



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

신재생에너지 기반
MVR 해수담수화 플랜트에 관한
실증연구 및 적용성 제고를 위한 연구

濟州大學校 大學院

에너지공學科

金 永 珉

2018年 2月

신재생에너지 기반
MVR 해수담수화 플랜트에 관한
실증연구 및 적용성 제고를 위한 연구

指導教授 千 院 基

金 永 珉

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2017年 12月

金永珉의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	이 윤 준	(印)
委 員	천 원 기	(印)
委 員	이 현 주	(印)
委 員	임 상 훈	(印)
委 員	김 동 국	(印)

濟州大學校 大學院

2017年 12月

A Study of the Development of a MVR Seawater Desalination System and Enhancement of Its Energy Efficiency in Exploiting New and Renewable Energy

Yeong Min Kim

(Supervised by Professor Wongee Chun)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Doctor of Nuclear and Energy Engineering.

2017. 12.

This thesis has been examined and approved.



Thesis director, Wongee Chun, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

Yoon Joon Lee

Heon Ju Lee

Sang Hoon Lim

Dong Kook Kim

(Name and signature)

2017. 12.

Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iv
LIST OF TABLES	viii
SUMMARY	x
1. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 내용 및 목적	4
2. 연구동향	6
2.1 국내외 기술개발 현황	6
2.1.1 국외 기술개발 현황	6
2.1.2 국내 기술개발 현황	9
3. 이론적 배경	15
3.1 기술의 개요	15
3.2 응용특성	17
3.3 설계인자 검토	19
3.3.1 열 및 물질수지	19
3.3.2 열전달계수	20
3.3.3 총괄전열온도차	24
3.3.4 비등점 상승	24
4. 실험장치 및 실험방법	26
4.1 주요장치의 설계 및 제작	26
4.1.1 설계인자의 결정	26

4.1.2	주요장치의 설계 및 제작	27
4.2	MVR 시스템의 제어장치	36
4.2.1	증기압축 제어특성	36
4.2.2	MVR 증발·농축시스템 제어방법	41
4.3	MVR 해수담수화 플랜트 설치 및 실험방법	47
4.3.1	시스템 개요	47
4.3.2	실험방법	53
5.	실험결과 및 고찰	56
5.1	성능실험 결과	56
5.1.1	MVR 특성 분석	56
5.1.2	주 열교환기 특성 분석	59
5.1.3	예열용 열교환기 특성 분석	61
5.2	MVR 해수담수화 플랜트 성능 분석	62
6.	부산물 활용방안	67
6.1	부산물 활용방안	67
6.1.1	용암해수 제염 및 Mg회수 실험	70
6.1.2	실험 결과	71
6.1.3	공정 개요	72
6.1.4	제염 설비 구축	74
7.	저온 열원의 활용을 위한 TM변환 발전시스템 개발	77
7.1	서론	77
7.1.1	연구 배경 및 필요성	77
7.2	연구동향	80
7.3	이론적 배경	82
7.3.1	스털링 엔진(Stirling Engine)	82
7.3.2	가돌리늄(Gadolinium)	91

7.4 실험장치 및 실험방법	93
7.4.1 저온도차 스텔링 엔진을 활용한 TM변환 발전시스템	93
7.4.2 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전시스템	102
7.5 실험결과 및 고찰	106
7.5.1 저온도차 스텔링 엔진을 활용한 TM변환 발전시스템	106
7.5.2 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전시스템	125
8. 결 론	137
참 고 문 헌	140
요약문(Abstract)	144
CURRICULUM VITAE	146
감사의 글	154
첨 부	155

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Concept of MVR seawater desalination plant using renewable energy resources	3
Fig. 1-2 Difference between thermal evaporation process and MVR evaporation	4
Fig. 2-1 Flow chart of RO plant process	12
Fig. 2-2 Schematic of 4-stage MSF seawater desalination plant	12
Fig. 2-3 System of Thermal Vapor Compression(TVC)	13
Fig. 2-4 MVR desalination plant at KIER	14
Fig. 3-1 Concept of MVR desalination system	16
Fig. 3-2 Flow sheet of evaporation concentration process	19
Fig. 4-1 Flow chart determination of major design factors of MVR evaporation system	26
Fig. 4-2 Manufacturing drawings of single stage centrifugal compressor	27
Fig. 4-3 Manufacturing drawings of flash evaporator	29
Fig. 4-4 Manufacturing drawings of crystallizer	34
Fig. 4-5 Boring construction of magma seawater	35
Fig. 4-6 Performance curve of speed control system	37
Fig. 4-7 Performance curve of fixed speed control system	37
Fig. 4-8 Inlet guide vane	38
Fig. 4-9 Throttling control	39
Fig. 4-10 By-passing control	40
Fig. 4-11 MVR desalination plant	47
Fig. 4-12 P&ID of MVR desalination plant: (a) MVR and evaporator (b) Crystallizer	48
Fig. 4-13 Automatic control system of MVR desalination plant: (a) MVR and evaporator (b) Crystallizer	50

Fig. 5-1 MVR compression ratio: (a) by MVR inverter speed, (b) by suction and discharge pressure	57
Fig. 5-2 MVR suction and discharge temperature changes over time	58
Fig. 5-3 Temperature variation of main heat exchanger (steam section)	59
Fig. 5-4 Temperature variation of main heat exchanger (seawater section)	60
Fig. 5-5 Temperature variation of preheat exchanger	61
Fig. 5-6 Energy consumption of MVR desalination plant	63
Fig. 5-7 MVR compression ratio by MVR inverter speed	63
Fig. 5-8 Freshwater production of MVR desalination plant	65
Fig. 5-9 Energy consumption per ton of freshwater	65
Fig. 5-10 Concentration ranges of MVR desalination plant	66
Fig. 6-1 Experimental method of salt production and Mg recovery	70
Fig. 6-2 Major mineral composition at different stages of experimental process	71
Fig. 6-3 Schematic representation of process-1	72
Fig. 6-4 Schematic representation of process-2	72
Fig. 6-5 P&ID of salt production plant	74
Fig. 6-6 Salt production plant	75
Fig. 6-7 Magma salt from salt production plant	76
Fig. 7-1 Schematic representation of TM system	78
Fig. 7-2 System design for mechanical power measurement	94
Fig. 7-3 Experimental setup for mechanical power measurement	94
Fig. 7-4 Schematic representation of MM-7 electric generator	96
Fig. 7-5 Experimental output of MM-7 engine	96
Fig. 7-6 Experimental output measurement using the generator coil: (a) Stirling engine (b) Generator coil (c) Stirling engine with generator coil	98

Fig. 7-7 Schematic representation of TENG operation	99
Fig. 7-8 Experimental layout of TENG operation by a LTD heat engine placed on an electric plate heater	100
Fig. 7-9 Two TENGs integrated into LTD heat engine	101
Fig. 7-10 Position of hot and cold water streams in Gadolinium generator	103
Fig. 7-11 Experimental apparatus for measuring mechanical power of Gadolinium generator	103
Fig. 7-12 Electricity generation by Gadolinium rotor assembly (conceptual diagram)	105
Fig. 7-13 Gadolinium rotor assembly with magnetic shield	105
Fig. 7-14 Output of Stirling engine against temperature difference ..	108
Fig. 7-15 Output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)	110
Fig. 7-16 Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)	112
Fig. 7-17 Output of Stirling engine against difference and torque(Single)	114
Fig. 7-18 Electric power of the LTD heat engine	115
Fig. 7-19 Electric power using generator coil: (a) Electric voltage (b) Top and bottom plate temperatures	116
Fig. 7-20 Performance of simplified TENG operating in sliding mode: (a) Simple experimental kit composed of two Al electrodes and a FEP film (b) Forward and backward sliding for electricity generation (c) V_{oc} produced (d) V_{oc} rectified	118
Fig. 7-21 Performance of TENG driven by a LTD heat engine: (a) V_{oc} (b) I_{sc}	120
Fig. 7-22 Voltage-input resistance curve of the TENG	120
Fig. 7-23 Output voltage and current of TENG-2 operating in vertical contact-separation mode:(a) A schematic diagram of experimental system (b) V_{oc} (c) I_{sc}	121

Fig. 7-24 Output voltage and current of TENG-1 operating in (rotation) sliding mode: (a) A schematic diagram of experimental system (b) V_{oc} (c) I_{sc}	122
Fig. 7-25 Intergrated output (V_{oc}) of two TENGs connected in series:(a) Connection scheme of two TENGs for output measurement (b) V_{oc} (c) I_{sc}	123
Fig. 7-26 Charging a capacitor by TENG-1 and TENG-2: (a) Actual electric circuit (b) Circuit diagram (c) TENG-1 (d) TENG-2	124
Fig 7-27. A capacitor being charged by two TENGs and discharged through a LED	124
Fig. 7-28 RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=20^{\circ}C$)	126
Fig. 7-29 RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=30^{\circ}C$)	128
Fig. 7-30 RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=40^{\circ}C$)	130
Fig. 7-31 RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=45^{\circ}C$)	132
Fig. 7-32 Voltage and output variation over time ($\Delta T=45^{\circ}C$, AC generator)	134
Fig. 7-33 Voltage and output variation over time($\Delta T=45^{\circ}C$, Generator coil)	136

LIST OF TABLES

Table 2-1. Top 11 seawater desalination countries	8
Table 2-2. Status of desalination plant(drinking water)	10
Table 2-3. Status of desalination plant(industrial water)	10
Table 3-1. Approximate U values of various types evaporator	23
Table 4-1. Specification of single stage centrifugal compressor	27
Table 4-2. Specifications of flash evaporator	28
Table 4-3. Specifications of main heat exchanger	30
Table 4-4. Specifications of other pumps	31
Table 4-5. Specifications of pre-heat exchanger	32
Table 4-6. Specifications of crystallizer	33
Table 4-7. Specifications of boring construction	35
Table 6-1. Mineral composition and characteristics of sea waters	67
Table 6-2. Mineral composition of famous salts	69
Table 6-3. Mineral composition of major sea salts marketed in Korea	69
Table 6-4. Major mineral composition at different stages of experimental process	71
Table 7-1. Specifications of various types of Stirling engine	106
Table 7-2. Torque measurement of LTD engines (using a weight of 200mg)	107
Table 7-3. Performance measurement of Stirling engine(MM-7)	109
Table 7-4. Performance measurement of Stirling engine(Twin)	111
Table 7-5. Performance measurement of Stirling engine(Single)	113
Table 7-6. Torque measurement of gadolinium generator	125
Table 7-7. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$)	126
Table 7-8. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)	127

Table 7-9. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)	129
Table 7-10. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)	131
Table 7-11. Electrical power variation over time ($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$, AC generator)	134
Table 7-12. Electrical power variation over time ($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$, Generator coil)	136

SUMMARY

MVR desalination plants are generally about 30% more efficient than traditional plants adopting evaporative schemes (single effect evaporation). Their overall hardware can be downsized and, with the application of a high-speed vapor compressor, they can be operated at partial loads or in automatic modes. Moreover, they apply vapor recompression heat pump technologies, ensuring high energy efficiency regardless of seawater quality (cleanliness) and do not require any sophisticated pretreatment processes. Above all, MVR desalination schemes have lower maintenance costs and show higher recovery rates (fresh water/water-intake), facilitating seawater concentrate (desalination byproducts) management as compared to desalination by reverse osmosis (RO). Salt production and recovery of minerals from desalination brines create added value to the MVR schemes.

This work has been conducted to develop a MVR desalination system with improved energy-efficiency where its design, construction and operation details are explored. Especially, the main focus of its development was on the operation of the system in conjunction with variable loads of new and renewable power sources. Optimal operation modes of the system were studied, in which single and double effect operations were analyzed for its energy efficiency improvement.

The compression ratio of the present MVR system was 1.55 at an inverter speed of 55Hz, which agreed well with its design value. Operation of the main heat exchanger remained stable within the limits of its operable range, although the temperature differences in the main heat exchanger didn't remain constant due to the pressure variations in the evaporator. Daily freshwater

yield was between 28tons and 51tons. The power consumption per ton of freshwater produced was about 43kW for a single effect and about 23kW for a double effect, whose energy efficiency is about two times higher than that of the single effect.

It was found that low-load operation is made possible by controlling the loads of the system by regulating the inverter speed in conjunction with the electric steam boiler. By applying the low-load operation mode developed through continuous operation of the system, it is estimated that the system will be operable in response to the unstable conditions of new and renewable power sources.

Salt processing technology is proposed as a measure to manage high concentration brine, whose practicability was verified by experimental salt production. Based on the experimental results, a salt production unit was linked to the MVR seawater desalination system and its performance was monitored. By hiring the approach developed in this work, effective mineral control deems possible, including production of salt, magnesium, etc.

This work also explored the possibility of generating power by exploiting low temperature thermal discharge from the MVR seawater desalination system as the temperature difference between the feed water and the processed fresh water amounts to about 50°C. Two different types of electric generators were designed and tested for their mechanical output as well as electrical output. Of these, one is basically a LTD (Low Temperature Differential) Stirling engine of gamma-configuration, capable of extracting power from a temperature differential of as low as 4°C. The other is based on materials with the magnetocaloric effect (such as gadolinium) capable of running on temperature differentials ranging from 90 down to a few degrees

Celsius. It is driven by the force developed between gadolinium (Gd) blocks and a neodymium bar magnet as the magnetic property of Gd blocks continuously changes between ferromagnetic and paramagnetic. Results show that the latter was capable of developing a torque and mechanical power output, which are as much as 8.1 times and 4.5 times greater than the former, respectively. It deems, however, that more work is necessary to convert mechanical energy into electric energy more effectively as the Gd generator was not as efficient as that which was integrated with the LTD Stirling engine.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

지구상에서 자원의 고갈을 일으키지 않고 인간과 생물이 사용할 수 있는 담수의 연간 공급량은 90억 ton이며, 이 중 인간이 실제 사용하는 양은 43억 ton으로 아직 절대량이 부족한 것은 아니지만 기후 변화에 따른 국지적인 가뭄과 인구 증가에 따른 물 사용량의 급증, 생활 폐수의 증가 및 공업용수의 공급량 증가 등에 의하여 2025년경 전 세계의 물 수요량은 지난 1995년 수준보다 약 40% 증가할 것으로 전망되며 이에 따라 물 부족 문제는 더욱 심화될 것으로 전망된다 [1].

이러한 물 부족 현상과 산업화에 따른 수질오염에 직접적으로 피해를 보는 지역은 수도 및 하수처리장이 제대로 정비가 되어 있지 않은 중소규모 지역이다. 이런 지역은 대규모 용수시설 및 상수도 시설에 의한 물 공급에 한계가 있으므로 그 지역 내에서 직접 담수할 수 있는 중소규모 단위의 콤팩트한 담수 플랜트 필요성이 점차 증가되고 있는 추세이다.

따라서, 물 부족을 겪고 있는 인구 1,000명 정도의 중소규모 도서 지역에는 해수(바닷물)를 이용하고, 지하수 또는 강물이 오염된 육지 지역에는 오염수를 이용하여 깨끗한 먹는 물(담수)을 만들어 공급할 수 있는 담수 플랜트를 하나의 대안으로 고려할 수 있다. 특히 신재생에너지 자원이 풍부한 지역에서는 신재생 에너지를 활용하여 담수 플랜트를 운영함으로써 탄소배출 저감 효과는 물론 담수 제조단가를 획기적으로 절감시킬 수 있는 장비의 개발이 요구된다.

현재, 국내 해수담수화 시설용량은 약 2000m³/day (세계 14위) 규모로 99% 이상이 서해공단의 공업용수용이며, 도서지역의 갈수기 때 음용수 해결을 위한 중소규모의 담수화 시설은 70여기로 대부분이 RO(Reverse Osmosis: 역삼투압)방

식을 채택하고 있다 [2]. 그러나 사용자부담원칙에 따라 주기적인 고가의 막 교체 및 약품투입 등의 비용이 도서관의 부담으로 작용하고, 또한 막 보호용 독성 약품인 황산, 염산 등 약품사용에 대한 운용자의 불안감 등으로 사용자체를 거부하여 빗물을 음용수로 이용하고 있는 도서관이 많아지고 있다 [3].

증발법 담수화 플랜트는 마모 부분이 없어 부품교체비가 불필요하고, 전후처리용 약품 비용이 들지 않아 운영비가 극히 저렴하기 때문에 경제적이며, 특히 100℃ 전후로 해수를 끓여서 담수를 얻으므로 해수 중에 포함된 병원균 및 유해성분을 약품 투여 없이 완벽하게 살균 제거할 수 있어 먹는 물 기준에 아주 적합하다. 따라서 증발법 담수화 플랜트의 수요는 기존 RO방식의 높은 유지관리 비용문제를 해결함으로써 국지적인 고립지역의 소규모 마을, 군사시설, 골프장 등을 중심으로 수요가 크게 증가할 것으로 생각된다. 그러나 증발법 담수화 플랜트는 RO방식의 담수화 플랜트 보다 많은 에너지를 소비한다.

일반 증발법의 경우, 투입되는 에너지를 줄이기 위한 방법으로는 증발기 개수를 늘리는 방법(MED : Multiple Effect Desalination, MSF : Multiple Stage Flash 등)과 신재생에너지를 활용하는 방법 등이 있다. 전자의 경우 에너지 소비량은 작아지나 초기시설 투자비가 높으며 후자의 경우 신재생에너지를 활용하기 위해서는 발전의 불안정한 전력부하특성을 해결해야 한다.

MVR(Mechanical Vapor Recompression: 기계증기재압축법) 방식의 증발법은 다른 증발법(MED, MSF 등)보다 에너지 소비량이 적으며 압축기의 속도 제어 등을 통하여 부분부하 운전 및 자동화에 용이하다 [4]. 따라서 MVR방식 담수화 플랜트의 주요기기에 대한 개발과 실증연구가 요구된다. 더불어, 신재생에너지원의 부하변동에 대응할 수 있는 부분부하 운전에 대한 연구가 필요하게 된다. Fig. 1-1은 신재생에너지를 활용한 MVR방식의 해수담수화 플랜트 개념도를 보여준다.

한편, 태양열, 태양광, 풍력 등과 같은 신재생에너지원 외에 각종 기관과 플랜

트에서 발생하는 폐열의 이용에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 폐열원은 주위와의 온도차가 작다는 특징을 갖고 있으며 아직까지 대규모 실용화가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 MVR 시스템에서 방출되는 열원으로 부터 전기에너지를 얻는 방법에 대하여서도 연구하였으며 그 내용은 7장에서 다루었다.



Fig. 1-1 Concept of MVR seawater desalination plant using renewable energy resources

1.2 연구 내용 및 목적

기존의 증발법에서는 통상 원수(해수, 폐수, 식품용 액체)를 1 리터(liter) 증발 시키는데 에너지가 약 620 kcal의 에너지가 소모된다. 이에 비하여 MVR방식은 증발된 증기를 증기압축기를 이용하여 가압·승온하고, 가압·승온된 증기가 보유한 열량을 열교환기로 통과시켜 증발관 내의 원수를 가열하는 방법이다. 이론적으로 MVR 장비를 운전하여 1 리터(liter)의 담수를 얻는데 소요되는 에너지는 증기압축기를 구동하는데 소요된 전기에너지로서 약 20 kcal 정도가 된다. 따라서 기존의 일반 증발법에서 필요한 620 kcal에 비해, 20 kcal의 에너지를 가지고도 동일한 양의 담수를 얻을 수 있으므로 MVR 방식은 획기적인 에너지 재활용 기술이라 할 수 있다 [5-8]. Fig. 1-2는 기존 증발법과 MVR방식의 차이점을 보여준다.

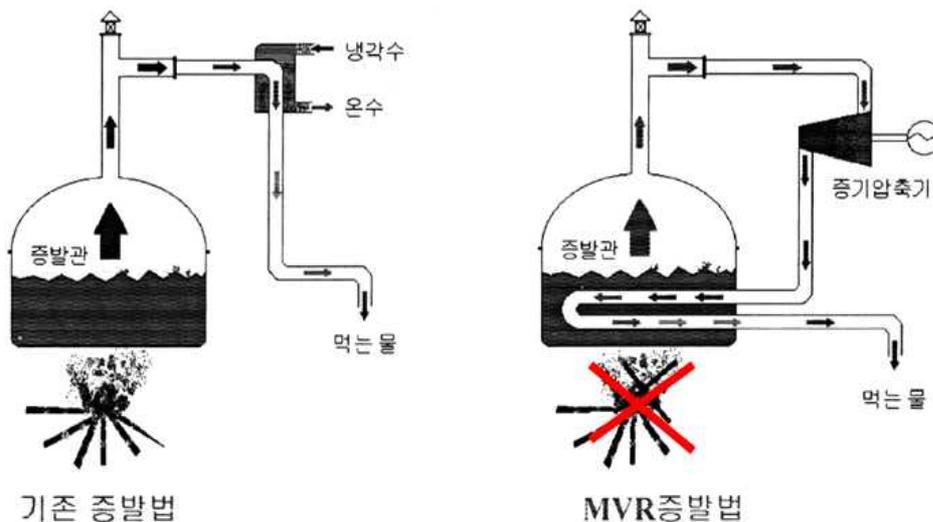


Fig. 1-2 Difference between thermal evaporation process and MVR evaporation

이처럼 MVR방식의 해수담수화 플랜트는 기존 증발 방식 대비 약 30배 이상의 고효율 장비이며 고속 터보형 증기압축기를 적용하여 장비의 소형화가 가능하다 [9]. 또한 증기재압축식 히트펌프시스템으로 에너지 효율이 매우 높으며 해수의 청정도와 무관하여 정밀한 전처리장비가 불필요하다 [10]. 또한, MVR방식

의 증발법은 RO방식의 막 분리법보다 회수율(담수/취수)이 높으며 부산물인 농축수의 농도조절이 용이하다 [11]. 따라서 고농도의 농축수를 활용한 소금 제조 및 미네랄 회수 등으로 부가가치를 높일 수 있다.

본 연구에서는 설치면적이 매우 작고, 이동성이 용이한 30ton ~ 50ton/day급 고효율 MVR방식의 담수화플랜트를 개발하였다. 반복운전을 통해 주요기기에 대한 특성을 분석하고 신재생에너지원과 연계하였을 때 부하변동 특성에 대응이 가능한지 확인하였다.

이를 위하여 신재생에너지원의 부하변동 특성에 대응 가능한 저부하운전모드 및 정상운전모드를 개발하였다. 또한 에너지효율 향상을 위한 단일효용 시스템과 2중효용 시스템의 운전모드를 개발하고 실증운전을 수행하였다.

아울러 본 연구에서는 담수화플랜트의 가장 큰 문제점인 농축수 해결방안을 제시하였다. 대부분의 담수화플랜트는 담수를 생산하고 남은 농축수를 방류하며 이는 해양생태계를 오염시킨다. 본 연구에서는 담수화플랜트의 부산물인 고농도 농축수를 활용하기 위한 제염 실험을 수행하였다.

또한 MVR 해수담수화 플랜트의 담수에서 지속적으로 발생하는 저온의 폐열 원으로부터 효율적으로 전기에너지를 생산할 수 있는 시스템을 개발하였다. 저온에서도 작동이 가능한 스틸링 엔진을 활용하여 TM(Thermal to Mechanical energy)변환 발전기를 개발하였으며 기초적인 실험을 진행하였다. 기계적 출력 및 전기적 출력을 측정하고 그 결과를 비교분석하였다. 이를 통하여 새로운 TM 변환 발전기를 개발하고 실험을 진행하였다.

2. 연구동향

2.1 국내외 기술개발 현황

2.1.1 국외 기술개발 현황

에너지과동 후 일본에서는 1976~1983년까지 기존 에너지의 효율을 높이는 국책프로젝트인 문라이트(moonlight project)계획에 의거, 폐열이용기술의 기계압축식 증발시스템을 개발하기 위해 Kawasaki Heavy사, Kobe Steel사, Kimura Chemical사들이 공동으로 핵심부품(증기압축기, 증발기)의 고효율화 제품을 개발하였다 [12]. 1986년에는 Kimura Chemical사와 동경전력(주)이 공동으로 고압축비 2단 원심식 압축기와 박막유하형 열교환기 등 요소기술을 개발하여 185℃까지 이용 가능한 Kimura heat pump system을 성공하였다 [13]. 1990년대 중반 Sasakura사에서는 TVC의 담수화 기술을 바탕으로 수평관 충격 유하식 열교환기를 개발하여 시스템의 고성능화를 꾀해 저에너지 소비형 증발 농축 담수 시스템(MVR 방식, Model : VVCC)을 실용화하였다 [14]. 또한, 통상산업성 주관으로 실시된 “슈퍼히트펌프, 에너지집적시스템”과제에 의해 “고온 출력형 저온열원용 히트펌프”와 “고온 출력형 고온열원용 히트펌프”가 개발되었다 [15].

미국에서는 담수, 식품 및 석유화학공업의 증발공정에서 기계증기재압축(MVR) 방식의 적용연구가 1970년대 초부터 수행되어 널리 보급되었다. 1977년 Exxon Chemical사에서 단일효용방식(ME)과 더불어 MVR 시스템의 최적화를 공정모사방법으로 연구하여 시제품 개발 성공 후 적극적으로 도입을 추진했으며, 이후 Dupont사, Assoc사, Thermo Electron사 등이 MVR 시스템을 개발하여 다양한 종류의 증류공정에 응용할 수 있도록 실용화하였다. 또한 증발용축기의 열효율을 높이는 연구가 이루어져, 동일 용량 장비 크기를 기존의 1/2 ~ 1/3까지 줄일 수 있는 실증사업들이 진행 중에 있다 [16].

독일의 경우, Atlas Copco사가 중심이 되어 원심식 증기압축기가 개발된 1980년대 이후 기계증기재압축(MVR) 시스템의 보급이 급격히 증가했으며, 전 세계적으로 유명한 원심식 증기압축기 메이커로 급부상하였다 [17].

스위스의 경우, Sülzer Brothers사가 1976년 이후 기계증기재압축(MVR) 시스템의 파일럿 플랜트(Pilot Plant)를 자체 설계 및 건설하여 시스템의 경제성, 제어 및 가동특성, 부분부하특성 등을 시험 분석하여 핵심요소부품(원심식 증기압축기, 충전탑, 열교환기, 제어기기 등) 및 시스템을 자체 설계/제작할 수 있는 기술을 축적하였다 [18].

스웨덴의 경우, Alfa Laval사는 판형 열교환기의 세계적인 전문업체로서 전 세계시장의 60% 이상을 차지하고 있으며, 2상 유체유동(Two Phase Flow)의 증발기용 AlfaVap과 응축기용 AlfaCond 열교환기를 개발하여 캐나다의 소규모 기계증기재압축(MVR) 담수화 플랜트 업체인 Aqua Pure사에 공급하면서 경험을 쌓았다. 또, 세계적인 담수화 플랜트의 수요 증가추세에 맞추어 2000년대 중반 타 열교환기에 비하여 오염계수(Fouling Factor)가 낮고 고효율이면서 간단한 판형 열교환기를 개발하여 자체 브랜드의 컴팩트한 기계증기재압축(MVR) 방식의 해수담수화 플랜트에 부착, 상품화(Model: Desalt VVC 200/400) 하였다 [19]. Table 2-1은 주요 국가별 담수화 플랜트 종류 현황을 보여준다 [20].

Table 2-1. Top 11 seawater desalination countries

Country	Total Capacity (m ³ /day)	% of Global Production	MSF	MEE	MVR	RO	ED
Saudi Arabia	5,253,200	25.9	65.7	0.3	1.2	31	1.9
United States	3,092,500	15.2	1.7	1.8	4.5	78	11.4
United Arab Emirates	2,164,500	10.7	89.8	0.4	3.0	6.5	0.2
Kuwait	1,538,400	7.6	95.7	0.7	0.0	3.4	0.3
Japan	745,300	3.7	4.7	2.0	0.0	86.4	6.8
Libya	683,300	3.4	67.7	0.9	1.8	19.6	9.8
Qatar	566,900	2.8	94.4	0.6	3.3	0.0	0.0
Spain	529,900	2.6	10.6	0.9	8.7	68.9	10.9
Italy	518,700	2.6	43.2	1.9	15.1	20.4	19.2
Bahrain	309,200	1.5	52.0	0.0	1.5	41.7	4.5
Oman	192,000	0.9	84.1	2.2	0.0	11.7	0.0
Total	15,593,900	76.9					

2.1.2 국내 기술개발 현황

우리나라에는 총 70여개의 담수설비가 도서지방에 설치 및 운영 중에 있으나 담수화를 이용한 생활용수 확보는 도입단계이다. 공업용수의 경우 1989년 보령화력의 해수담수화 플랜트를 시작으로 일부 공장에서 담수화 플랜트를 운영 중이다. 담수화 시설 용량은 하루 수백 ton에서 수만 ton 규모의 공업용수 시설이 대부분이고, 음용수 생산용 시설은 하루 수십 ton 이하의 소규모 시설이 대부분으로 담수화방식은 대부분 역삼투압(RO) 방식을 채택하고 있다. 역삼투압(RO) 방식의 해수담수화 플랜트는 증발법에 이어, 향후 세계적인 수요가 급증할 것으로 보이며, 이 장비는 고도의 전처리 장비, 고압 펌프시스템 및 에너지 회수 장비, RO필터, 약품 오염의 농축 방류수 처리 장비들로 이루어져 있다. Table 2-2와 Table 2-3은 국내 생활용수용 해수담수화 시설 현황과 국내 공업용수용 해수담수화 시설 현황을 보여준다 [21].

Table 2-2. Status of desalination plant(drinking water)

구 분	인 천	충 남	전 북	전 남	경 북	경 남	제 주	합 계
수량(개소)	1	21	6	30	1	7	4	70
용량(ton/day)	200	655	290	2,270	28	120	2,200	5,763
급수인구(명)	1,250	3,814	1,690	5,794	40	643	5,766	18,997

Table 2-3. Status of desalination plant(industrial water)

회 사 명	취수원	시 설 용 량 (ton/day)	시 설 년 도	비고
LG대산유화 롯데대산유화	대호 방조제, 삼교호	84	1991	충남 서산
현대오일뱅크	대호 방조제, 삼교호	16	1988	충남 서산
삼성토탈	삼교호	25	1990	충남 서산
동부철강	삼교호	4.5	1997	충남 당진군
삼성 자동차	-	2.64	-	부산시
삼성 전관	-	2.4	-	울산시

최근 2007~2012년까지 약 1,600억원(정부:800억, 기업:800억)의 사업비로 산학연 클러스터(해수담수화플랜트사업단)를 구성하여 “해수담수화 플랜트 기술 고도화”사업을 추진 중에 있다. 사업 내용을 보면 RO 장비가 타 담수화 장비나 해외 타사의 장비에 비해 경쟁력을 얻기 위해 RO막의 대형화 및 국산화와 함께, 담수화 플랜트의 25,000 ton/day 이상의 대규모(Large Scale Plant)를 목표로 하고 있다. RO필터를 거쳐 나온 농축수의 압력에너지 회수장비에 고도화로 저에너지화(Low Energy Consumption), RO막의 교체수명과 관련된 막의 막힘 저감기술(Low Fouling)을 개발해 나가는 방식으로 장기적인 연구개발이 이루어지고 있다. Fig. 2-1은 해수담수화플랜트사업단의 RO플랜트 공정 흐름도를 보여준다 [22].

증발법 장비의 종류는 다단플래쉬(MSF), 단일효용(MED), 열증기압축 (TVC), 기계증기재압축(MVR) 방식 등이 있으며, 발전소의 폐열을 이용하는 대형장비 MED, MSF 방식은 국내 전문업체(두산중공업, 현대중공업)가 많은 연구개발을 수행하여 세계적으로 경쟁력이 있는 제품들을 출시하고 있으나, 에너지 효율이 높고 중소형인 MVR 장비에 대한 국내 상품화기술은 현저히 낮다 [23]. 열증기압축(TVC) 방식의 경우 1990년대에 한국기계연구원이 중심이 되어 기원산업(주)과 공동으로 기술 개발하여 선박용 조수기를 실용화한 사례가 있다. 특히, (주)한국엔비텍, (주)세화엔스텍 등이 국가 연구개발과제를 통하여 개발한 폐수처리용 TVC 장비들이 국내 영세한 악성폐수 수탁 처리업체에 많이 설치되어 기존 저효율 MED 방식에 의존하던 폐수처리비용이 대폭적으로 절감되었다 [24]. Fig. 2-2와 Fig. 2-3은 각각 4-stage MSF법 해수담수화 플랜트의 모식도와 열증기압축법(TVC) 시스템을 보여준다.

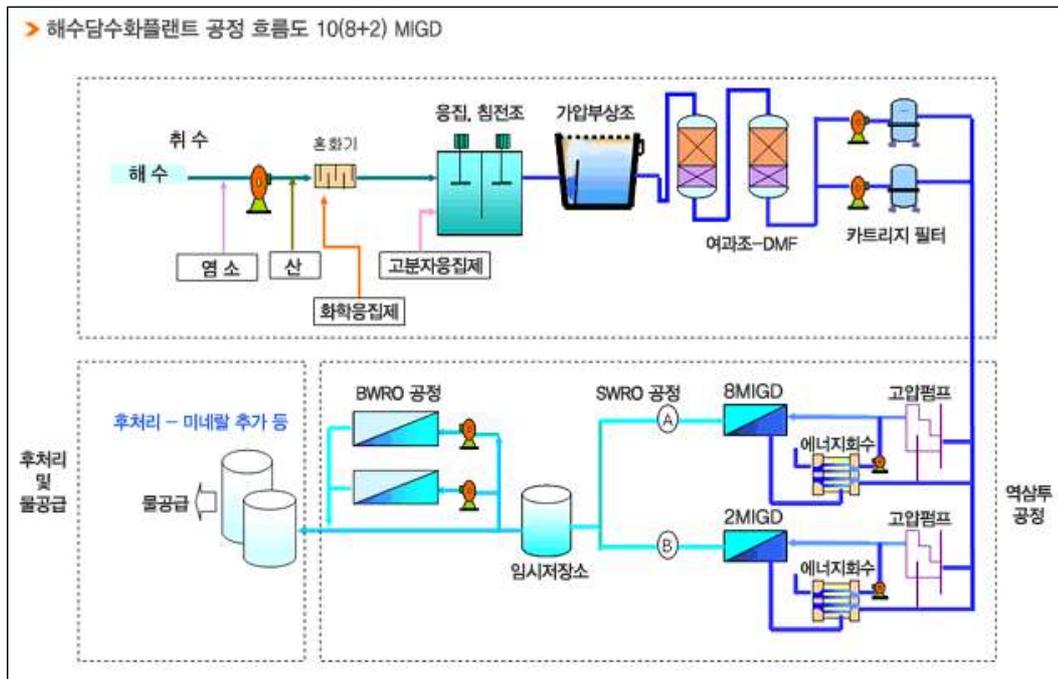


Fig. 2-1 Flow chart of RO plant process

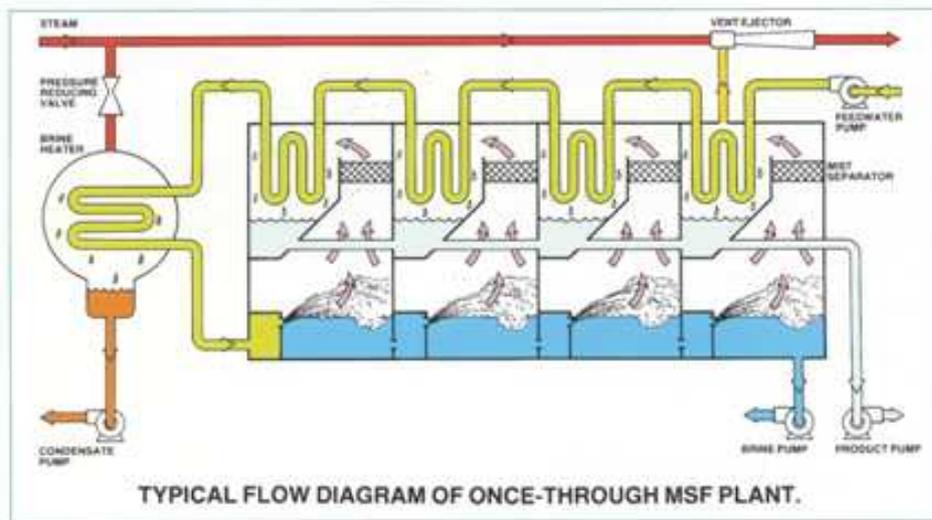


Fig. 2-2 Schematic of 4-stage MSF seawater desalination plant

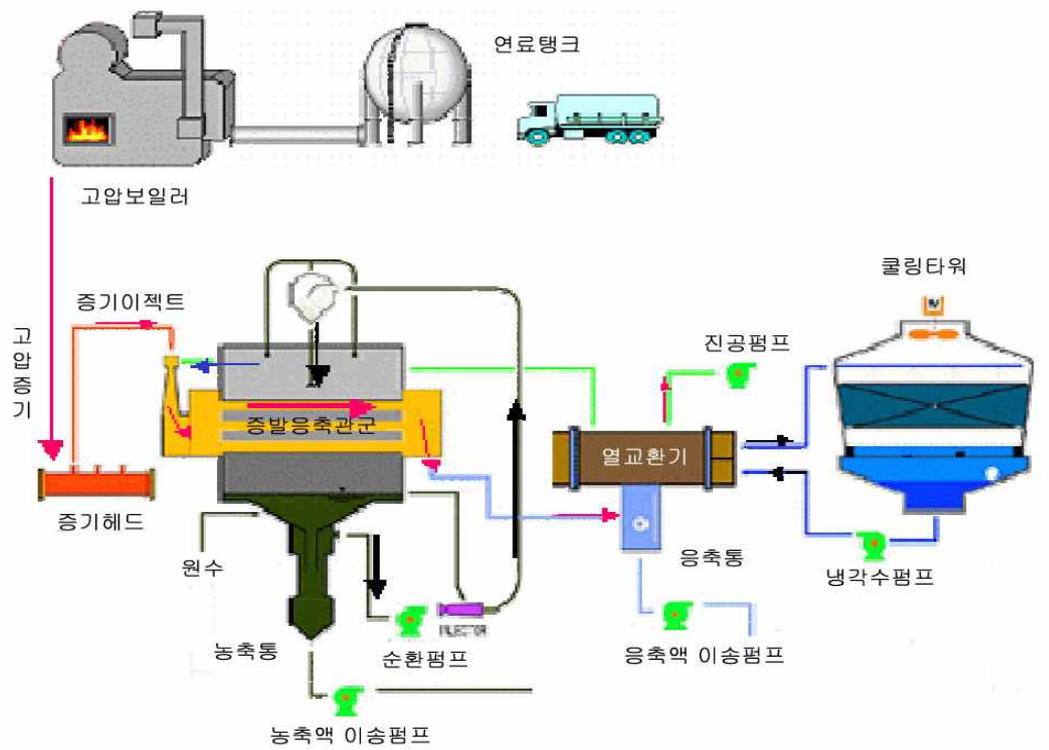


Fig. 2-3 System of Thermal Vapor Compression(TVC)

1980년대 초부터 한국에너지기술연구원(KIER)을 중심으로 프레온가스를 이용한 열펌프의 국내적용을 위한 적용연구들이 있었다. 기계증기재압축(MVR) 방식의 적용 타당성 연구는 1980대 말, KIER와 선일포도당(주)과 공동으로 Atlas Copco사의 증기압축기를 수입하여 적용한 결과, 에너지비용과 투자비용을 대폭 줄일 수 있다는 결론을 얻은 바 있다 [25]. 2000년대 초, 한국기계연구원(KIMM)의 압축기 핵심부품의 설계능력 확보로, 일부 제조기술을 보유한 (주)삼정터빈과 산연 협동으로 “원심형 증기압축기를 이용한 증발법 해수담수화 플랜트 개발” 과제를 수행하여, 초소형(25 ton/day) MVR법 해수담수화 플랜트를 개발하였다 [26]. Fig. 2-4는 KIER 연구용 MVR법 담수화 플랜트를 보여준다.

또한, 2004년 초에는 증기 및 공기압축기를 독자적으로 설계 제작하던 (주)대봉기계의 연구팀이 국내에서는 처음으로 악성폐수의 감량 및 처리수 재활용의 용도로, 국내 최고의 고효율 판형 열교환기의 업체인 (주)엘에치이의 기술 지원 하에 열교환기를 개발하고, 나머지 고속 증기압축기와 시스템 운용 컨트롤러를 독자적으로 개발하여, 75 ton/day급 기계증기재압축(MVR) 방식의 담수화 플랜트를 상용화하였다 [27].

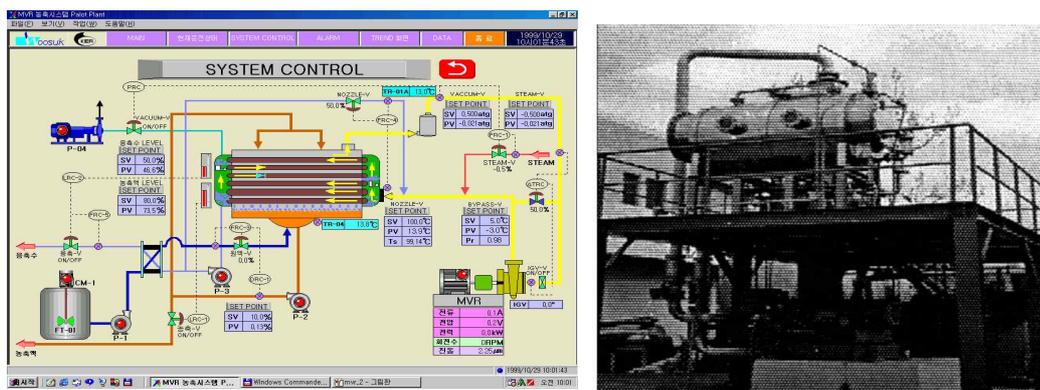


Fig. 2-4 MVR desalination plant at KIER

3. 이론적 배경

3.1 기술의 개요

증발관에서 발생하는 증기를 기계적으로 재압축(MVR : Mechanical Vapor Recompression)하여 공정의 열원으로 다시 이용하고자 하는 기술은 1960년대 중반 이후 산업분야의 에너지절약을 위해 heat pump의 일종으로 이미 사용되어 왔던 기술이다. 이 기술의 특징은 열매체로서 공정자체에서 발생하는 자신의 증기를 이용한다는 점에서 일반적으로 알려져 있는 프레온 등의 매체를 사용하는 냉매압축식 열펌프와 구분되며, 따라서 증기 압축식 열펌프로 불리운다. 이러한 MVR 시스템의 특성 때문에 고온용 및 고효율화를 위해 냉매와 cycle의 연구에 중점을 두는 압축식 열펌프와는 달리 적용공정에 따라 주어진 열매체를 이용한 응용시스템 및 공정의 최적 설계기술과, 시스템을 구성하는 요소 기기의 고효율화에 대해 중점적인 연구개발이 수행되어 왔다.

특히 세계의 에너지환경 또는 사회적 환경변화에 따라서 시설투자에 대한 경제적 측면을 고려한 기술수요가 변동되어 왔거나 그 적용분야가 달라져 왔다. 예를 들면 에너지이용 측면보다 시설투자비 측면이 중요시되었던 1970년대의 유류 파동 이전에는 주로 저온 증발공정에 이용되었던 단중효용법(MED) 및 steam ejector에 의한 열압축시스템(TVR : Thermal Vapor Recompression) 등에 대비되는 개념으로서 MVR이 개발되어 왔으나, 1974년 이후 유가의 급상승 시기에는 주로 산업공정의 에너지절약 목적으로 광범위하게 이용되고 있다. 최근에는 환경오염에 대한 사회적 비용부담이 늘어나면서 새로이 그 응용분야가 확대되고 있는 기술이다.

이 기술은 Fig. 3-1에서 보는 바와 같이 최종 증발관에서 발생한 저온의 증발 증기를 전량 기계식 증기압축기로 가압·승온하여 자신의 최초 증발관의 가열열원으로 재사용하는 방식으로서 에너지 재이용 사이클에 필요한 보충열량은 가열

측과 증발측과의 온도차(ΔT)에 해당하는 에너지만을 필요로 하기 때문에 대기 압 증발시 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 인 경우 압축기의 이론적인 가역단열압축 가정하에서 약 14kcal/kg H₂O의 보충 열량만으로 운전이 가능하다.

따라서 열펌프시스템에 비해 2회의 열교환(응축기 및 증발기 열교환)을 생략할 수 있으므로 그만큼 더 작은 온도차에서 폐열을 이용할 수 있으며, 동일한 온도까지 회수할 경우에도 훨씬 더 높은 성적계수(COP : Coefficient of Performance)를 얻을 수 있어 타 방식에 비해 에너지 이용효율이 크다.

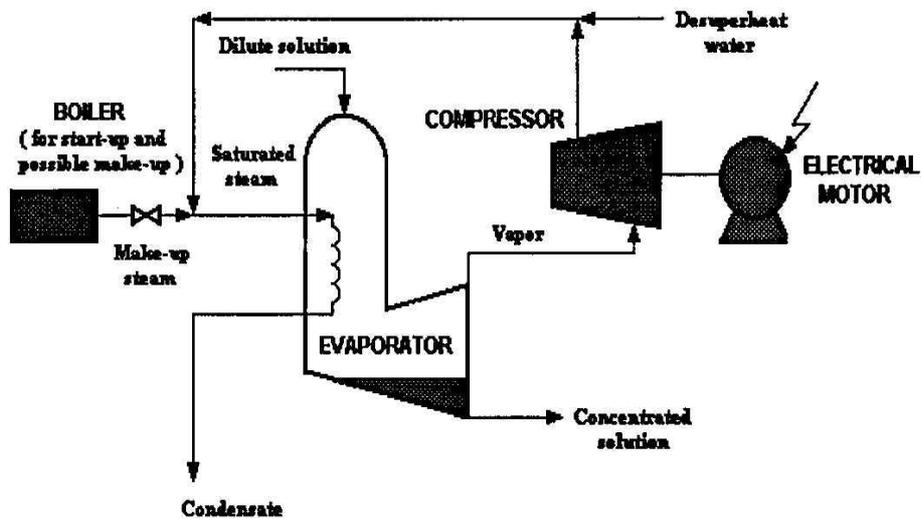


Fig. 3-1 Concept of MVR desalination system

3.2 응용특성

MVR방식이 획기적인 에너지절약 기술임에도 불구하고 증발증기에 기계적 에너지를 추가한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니며 보통 취급하고자 하는 물질에 대한 증발증기의 물성 및 열역학적 특성, 유량 및 이의 변동특성, 전열온도차에 의해 그 적용이 제한된다. 일반적으로 MVR증발 방식은 압축기의 가격 및 저온 증기의 비체적을 고려하여 대용량 처리가 가능한 단단 원심식 압축기를 주로 사용한다. 만일 적용하고자 하는 증발증기의 성질 및 유량특성이 적합할 경우 사용될 압축기의 압축비에 의해 시스템의 전열온도차가 제한된다. 즉 현재 개발되어 있는 단단 원심식 압축기의 경우 압축비가 최대 1.8~2.0정도임을 고려할 때, 대기압 상태의 증발관에서 적용 가능한 최대 전열온도차(ΔT)는 대략 15~20°C 정도이지만 시스템의 안정성 및 경제성을 고려하여 보통 8~12°C를 설계 값으로 적용한다.

이와 같이 통상의 증발방식과는 달리 MVR방식은 제한된 전열온도차의 범위에서만 운전이 가능하기 때문에 온도차 손실이 큰 물질, 압력손실이 큰 증발관 형식에는 이를 적용하지 않거나 해소방안을 마련한 후 도입하는 것이 좋다. 유효 전열계수의 저하를 최소화하고 농축액의 정압두 상승이나 증발증기의 마찰과 가속에 의한 압력손실, 과열증기의 현열 이동에 의한 액의 비평형 증발 등에 의한 유효온도차의 저하를 최소화할 경우라도 취급물질의 비등점상승(BPR : Boiling Point Rise)에서 오는 온도차 손실은 피할 수 없다. 따라서 어떤 물질의 증발·농축에 있어서 MVR방식을 도입하고자 할 때는 다음 식으로 표현되는 취급물질의 농축범위에 따른 BPR값이 가장 먼저 검토되어야 하며 이는 증발관의 설계의 가장 기본적인 사항으로서 여러 형태의 증발관들에 대한 상호 성능비교의 기초 자료로 활용된다. 여기서 ΔT 는 겉보기 전열온도차 ΔT_a 에서 BPR를 뺀 유효 전열온도차이며 식(3.2)의 a 는 실험값, T 는 절대온도 ($^{\circ}K$), x 는 용존성 고형물(DS : Dissolved Solid)의 농도이다 [28].

$$\Delta T = \Delta T_a - BPR \quad (3.1)$$

$$BPR = aT^2 \times \frac{x}{(100-x)} \quad (3.2)$$

3.3 설계인자 검토

MVR 해수담수화 시스템은 증발과 응축이 열교환면에서 동시에 일어나면서 상이 변화하는 장치이기 때문에 열교환면에서의 열 및 물질수지, 열전달 특성 등을 검토하는 것이 중요하다. 또한 용액의 증발·농축과정에서 발생하는 용액의 비등점 상승을 결정하는 해수의 물리적 성질을 정확히 파악하여 최적의 시스템을 선정하여야 한다 [29].

3.3.1 열 및 물질수지

Fig. 3-2의 증발·농축공정의 flow sheet를 작성하여 시스템의 열 및 물질수지를 검토하였다.

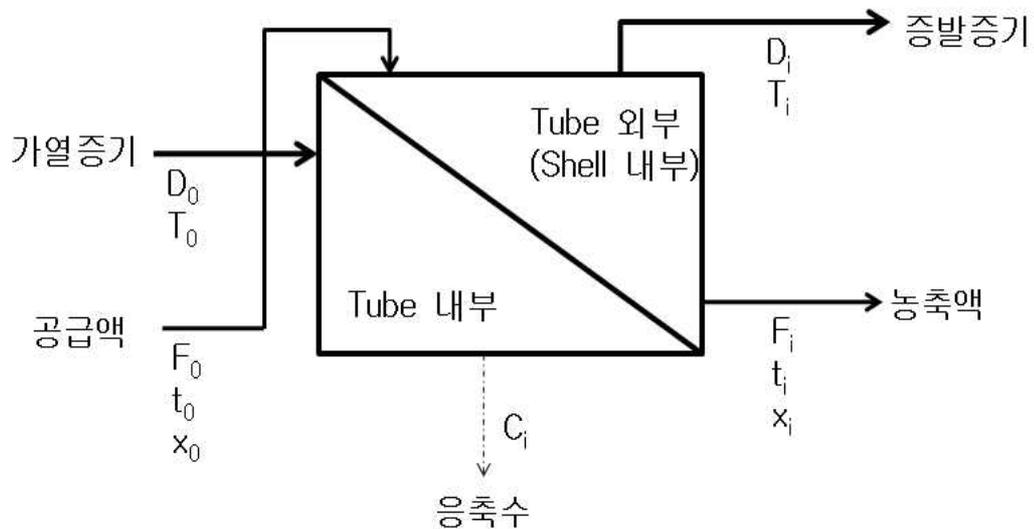


Fig. 3-2 Flow sheet of evaporation concentration process

1) 물질수지식

(가) 총괄물질수지식

$$F_0 = D_i + F_i \quad (3.3)$$

(나) 용질의 물질수지식

$$F_0 \times x_0 = F_i \times x_i = Constant \quad (3.4)$$

2) 열수지 및 전열속도식

(가) 열수지식

$$D_i \times \lambda_i = D_0 \times \lambda_0 - F_0 \times C_{p1}(t_i - t_0) \quad (3.5)$$

여기서 C_{p1} 은 농축액의 평균비열, λ_0 , λ_i 은 Tube와 Shells의 증발증기의 잠열이다.

(나) 전열속도식

$$D_0 \times \lambda_0 = U_1 \times A_1 \times \Delta T_1 \quad (3.6)$$

여기서 A_1 은 열교환기의 전열면적, U_1 은 총괄전열계수, ΔT_1 은 유효전열온도차이다.

3.3.2 열전달계수

증발기내에서의 전열은 현열과 잠열을 보유한 가열증기가 응축되면서 열전달이 일어난다. 이 때 증발하게 하는 적당한 용매의 양을 용질의 중량이 불변이라 하면 증발에 필요한 가열기의 열량 Q 는 다음 식 (3.7)과 같이 정의된다.

$$Q = (m_1 \times C_p \times \Delta T) + (m_2 \times r) \quad (3.7)$$

여기서 F_0 은 원수의 유량, D_i 는 증발량, C_p 는 비열, r 은 같은 압력과 용해도 하에서의 잠열이며, 증발기에서의 열전달이 일어나기 위해서는 용액의 증발온도보다 에너지원으로 공급되는 가열증기의 온도가 높아야 한다. 이 때 온도차를 ΔT 라고 하면 전열식은 다음 식 (3.8)과 같이 정의된다.

$$Q = UA\Delta T \quad (3.8)$$

총괄전열계수 U 값은 증발기의 형식, 처리용액의 물성치 등에 의해 변화하는 계수로서[Table 3-1 참조] 증발기내에서의 총괄전열계수는 비등액과 수증기 사이에서의 총열저항의 역으로 표시되며, 다음 식 (3.9)와 같이 정의된다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R_i + \frac{\Delta x}{k} + R_0 + \frac{1}{h_0} \quad (3.9)$$

여기서 $1/U$ 은 열전달에 있어서의 총 열 저항이며 h_i 와 h_0 는 관 내·외측의 열 전달계수로서 유체의 성질과 상태에 관계되며 열교환기의 재질에 관계된다. 또한 R_i 와 R_0 는 관 내·외측의 오염에 의한 저항으로서 오염계수는 열 전달면이 유체의 흐름속에서 여러 가지 퇴적물이 쌓이거나, 유체와 열전달면의 재질과의 상호 작용으로 열 전달면이 부식되어 열 흐름에 대해 부가적인 열 저항으로 나타난다. 이 오염계수는 요질자체의 성질에 관계되며 온도와 유속여하에 따라 결정된다.

따라서 U 값은 가열증기 측, 용액 측의 스케일과 액경막에 있어서의 전열계수가 구해지면 계산할 수 있다. 그러나 가열증기 측의 경막을 제외하고는 계산에 의해 구하는 것이 곤란하며, 반정량적 내지는 정성적으로 밖에는 알 수가 없다. 즉 스케일의 조성과 상태는 용액 및 증발 조건에 따라 다르며, 실험적으로 그 값을 구하는 것이 일반적이다.

비등액의 액막전열계수는 비등의 형식, 전열면의 성질, 온도차, 비점, 액의 유동상태 등에 현저한 영향을 받으며, 또한 증발관의 형식에 따라 변화하기 때문에 정확하게 추산하는 것은 일반적으로 곤란하며 어느 한정된 경우, 예를 들면 강제 순화식과 같이 전열이 비교적 안정되고 스케일이 적은 경우에 단상유동식으로부터 액경막전열계수를 추정할 수 있다.

특히 효율이 좋은 증발기란 U 값이 큰 것을 의미하며, Q 가 일정한 경우 U 값이 크다는 것은 다음과 같은 장점이 있음을 의미한다.

① 전열온도차 ΔT 가 일정하다면 U 값이 클수록 전열면적 A 는 감소되어 장치 비용이 적게 된다.

② 전열면적 A 가 일정하다면 U 값이 클수록 ΔT 를 작게 할 수 있어 MVR 시스템의 적용 시 유리하다.

그러나 일반적으로 증발기에서 용액을 증발시킬 때 용액의 성질로서 비점상승이 일어나므로 실제로는 ΔT 가 이론치보다 작아진다. 또한 증발시키려고 하는 용액의 오염도가 크면 증발시간의 경과에 따라 U 값이 저하한다. 따라서 ΔT 와 U 값의 저하와 함께 배관저항, 전열부에서의 압력손실 등을 고려하여 MVR의 압축비와 용량을 결정하여야 한다.

Table 3-1. Approximate U values of various types of evaporator

전열의 형식	증발관 형식		U [kcal/m ² · h · °C]	
관외비등	코일형		1,000~2,000	
관내비등	자연순환형	표준형	700~2,500	
		수직단관형	1,000~2,000	
		수직장관형	1,000~3,000	
	강제순환형	수직장관형	1,000~3,000	
		교반박막형	1c.r.*	2,000
			100c.r.	1,500
10,000c.r.	600			

(*c.r.: circulation ratio)

3.3.3 총괄전열온도차

MVR 해수담수화 시스템 설계 시 가장 중요한 설계인자 중의 하나는 총괄전열온도차(ΔT_s)를 결정하는 것으로서 다음 식 (3.10)과 같이 정의된다.

$$\Delta T_s = \sum_{i=1}^n \Delta T = T_0 - T_n - \sum_{i=1}^n BPR_i \quad (3.10)$$

여기서 i 는 효용관수, T_0 는 첫 번째 효용관에서 공급되는 증기의 온도, T_n 은 n 번째 효용관에서 증발되는 증기의 온도이다.

일반적으로 MVR 증발공정에서는 최종효용관의 증기의 온도를 기계적 에너지를 이용하여 가열열원의 온도조건까지 상승시켜 재이용하기 때문에 총괄전열온도차(ΔT_s) 만큼의 온도 상승에 필요한 동력이 요구된다. 즉 총괄전열온도차 ΔT_s 가 작을수록 MVR 운전에 필요한 동력이 적게 소요되지만 소요전열면적이 증가하게 되어 초기 설비투자비가 증가하게 된다.

총괄전열온도차를 결정하는데 있어서 일반적으로는 용액의 농축에 따른 비점상승을 고려하여야 한다. 특히 증기압축기의 압축비를 농도차이로 인한 비점상승에 따라 증가된 포화압력만큼 압축시키거나 농축기내의 압력을 비점상승에 따른 압력차 ΔP 만큼 감압시켜야 할 것이다. 따라서 정확한 에너지수지를 계산하고 열교환기에서의 에너지를 효율적으로 이용하기 위해서는 농도에 따른 비등점상승 또는 비등점상승에 따른 압력차 ΔP 를 반드시 고려하여야 한다.

3.3.4 비등점 상승(BPR : Boiling Point Rise)

용질이 용매에 용해되어 용액으로 작용하고 있을 때 일정 압력 하에서 용액의 비등점은 용매의 비등점보다 높게 된다. 이러한 현상을 비등점 상승(BPR)이라 하며, 용질의 농도가 증가한 만큼 비등점은 상승하게 된다.

용해물의 비등점도 물에서와 같이 압력에 따라 변하며, 압력이 높으면 높을수록 비등점이 상승한다. 용액의 BPR은 증발관의 열전달에 있어서 유효온도차를 감소시키는 주요 원인으로 특히 단일효용 증발기 및 진공증발기에서 그 영향이 심하다. 박막유하식 증발기의 경우 용액의 정압두에 미치는 BPR의 영향은 무시할 수 있으나, 용질의 농도에 기인한 BPR은 증발기의 설계에 있어 매우 중요한 인자이다 [30].

BPR은 측정 장치를 통해 측정하여 이용하는 것이 정확하나 일반적으로 식 (3.2) 또는 식(3.11)에 의해 계산할 수 있다.

$$BPR = T_{st} - T_{sw} = 0.003872 \times \Delta T_s \times \left(\frac{T^2}{r}\right) \quad (3.11)$$

여기서 t_{st} : 용액에서의 비등점, t_{sw} : 같은압력에서의 물의 비등점, Δt_s : 용액이 대기압일때의 비점의 상승도, T : 용액의 압력과 용해도에 대한 비등점(절대압력), r : 같은 압력과 용해도 하에서의 잠열이다.

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 주요장치의 설계 및 제작

4.1.1 설계인자의 결정

MVR 해수담수화 시스템은 증발·농축장치의 설계에 따라 MVR의 유량 및 압축비, 주 열교환기의 온도차 등이 결정된다. Fig. 4-1은 증발·농축장치의 주요 설계인자를 결정하기 위한 개략적인 flow chart를 보여준다.

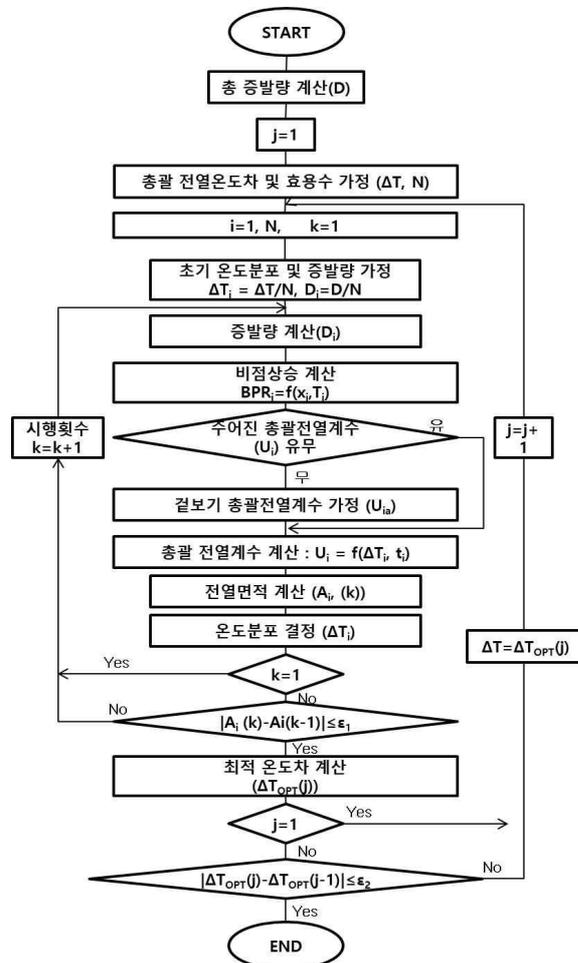


Fig. 4-1 Flow chart determination of major design factors of MVR evaporation system

4.1.2 주요장치의 설계 및 제작

1) 증기압축기

MVR 해수담수화 플랜트 개발 및 실증연구에 적용된 증기압축기는 단단형 원심 압축기로서 압축기의 주요 제작 사양은 Table 4-1과 같다. 또한 Fig. 4-2에 제작 도면을 나타내었다.

Table 4-1. Specifications of single stage centrifugal compressor

명칭	작동유체	유량 (m ³ /min)	동력 (kW)	극수	진압 (V)	주파수 (Hz)	가동방법	압력비
단단형 원심압축기	H ₂ O (Steam)	41	55	2	380	60	Inverter	1.6

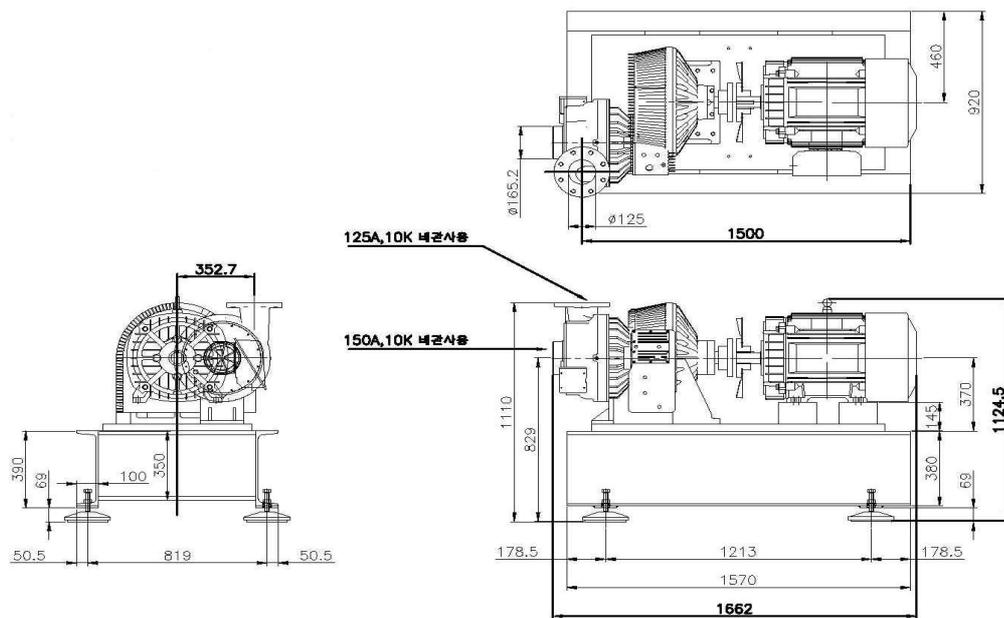


Fig. 4-2 Manufacturing drawings of single stage centrifugal compressor

2) 증발·농축장치

증발·농축장치는 flash evaporator형식을 채택하였으며, Table 4-1의 기본설계 조건에 따라 설계 및 제작된 증발·농축장치의 주요 사양은 다음 Table 4-2와 같다. 또한 Fig. 4-3에 제작 도면을 나타내었다.

Table 4-2. Specifications of flash evaporator

구분		사양
형식		Flash Evaporator
		Single Effect
		2 Pass Switching Operation
		상압운전
재질	Shell	SUS316L
	Head/Bottom	SUS316L
	Demister	SUS316L
	Stiffener	SUS304L(외장)
규격		φ1,940 * 3,080H(2,430H _{Shell})

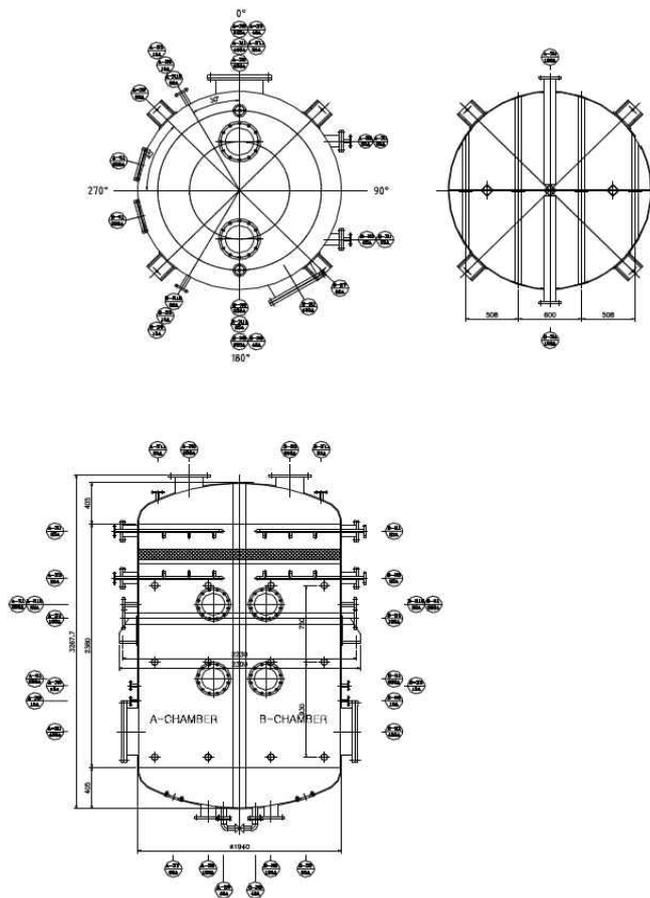


Fig. 4-3 Manufacturing drawings of flash evaporator

3) 주 열교환기

MVR 토출로부터 공급된 고온 증기와 증발·농축장치 내 해수의 열교환용 주 열교환기의 사양은 Table 4-3과 같다.

Table 4-3. Specifications of main heat exchanger

구분		사양		
형식		Plate Heat Exchanger		
		Wide Gap Heating Plate		
		2 Section		
재질	Plate	Titanium		
	Packing	EPDM		
	Frame	SS400		
용량		Cold Side	Feed	
		A Section	유량	49,531 kg/hr
			입구온도	102.2 ℃
			출구온도	110.0 ℃
			열유량	386,344 kcal/hr
		B Section	유량	49,531 kg/hr
			입구온도	102.2 ℃
			출구온도	110.0 ℃
열유량	386,344 kcal/hr			

4) 각종 펌프

MVR 해수담수화 플랜트에 적용된 펌프는 원액 공급펌프, 저농도 농축액 공급펌프, 순환펌프, 응축수 펌프, 냉각수 공급펌프 등으로 구성되어 있으며, 각종 펌프의 사양은 Table 4-4와 같다.

Table 4-4. Specifications of other pumps

NO	장치명	유량 (m ³ /hr)	소요동력 (kw)	재질 (Impeller)
P-101	원액공급펌프	10	2.2	SUS316L
P-201A P-201B	순환펌프(Flash Evaporator)	50	11	SUS316L
P-121	저농도농축액공급펌프	5	1.5	SUS316L
P-301	순환펌프(결정화농축장치)	5	1.5	SUS316L
P-231	응축수펌프	5	1.5	SUS304
P-111	냉각수공급펌프	5	1.5	SUS304

5) 예열용 열교환기

원액 공급펌프로부터 공급된 원액과 주 열교환기에서 가열용 증기가 응축된 응축수와의 열교환용 예열기의 사양은 Table 4-5와 같다.

Table 4-5. Specifications of pre-heat exchanger

구분		사양	
형식	Plate Heat Exchanger		
	Standard Heating Plate		
	1 Section		
재질	Plate	Titanium	
	Packing	EPDM	
	Frame	SS400	
용량	Cold Side		
	Cold Side	유량	1,422 kg/hr
		입구온도	15.0 ℃
		출구온도	86.8 ℃
		열유량	102,075 kcal/hr
	B Section	유량	1,361 kg/hr
		입구온도	100 ℃
		출구온도	25.0 ℃
열유량		102,075 kcal/hr	

6) 결정화 농축장치

Flash evaporator에서 농축된 저농도 농축액을 가열용 증기로 고농도 농축시키는 결정화 농축장치의 사양은 Table 4-6과 같다. 또한 Fig. 4-4는 결정화 농축장치의 제작 도면을 나타내었다.

Table 4-6. Specifications of crystallizer

구분		사양
형식		Calandria Evaporator
		Single Effect
		상압운전
재질	Shell	SUS316L
	Head/Bottom	SUS316L
	Tube	Titanium
	Support/Leg	SS400
규격		$\phi 960 * 2,730H(2,150H_{Shell})$

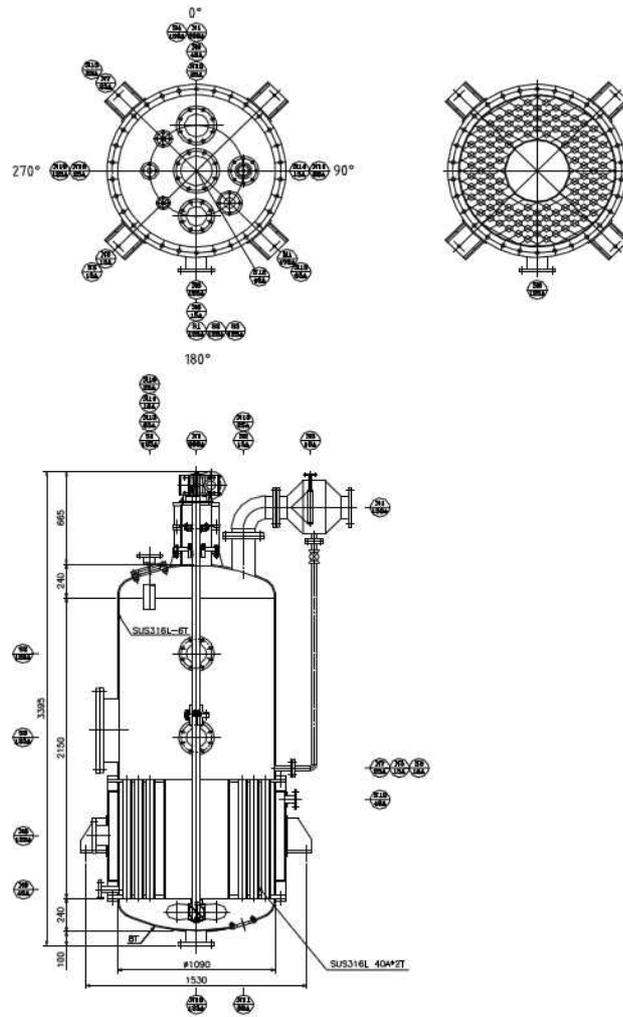


Fig. 4-4 Manufacturing drawings of crystallizer

7) 용암해수 취수시설

본 연구에 사용되는 해수는 일반 해수가 아닌 제주의 북동측 해안에 분포하는 용암 해수로서 일반 해수보다 취수가 용이하며 알칼리 성분이 많고 MgO 및 CaO 함량이 적다. 용암해수 취수공사의 일반적인 내용은 Table 4-7과 같다. 또한 Fig. 4-5는 설치 사진이다.

Table 4-7. Specifications of boring construction

지구명	위치				좌표		표고 (El.m)	시추심도 (GL.m)	비고
	시	읍	리	번지	X	Y			
김녕	제주	구좌	김녕	8	178887	57289	7.0	130	



Fig. 4-5 Boring construction of magma seawater

4.2 MVR 시스템의 제어장치

4.2.1 증기압축기 제어특성

증기압축기의 용량 제어방법은 속도 제어(Speed control), 고정속도 제어(Constant speed control), 자동제어(Automatic start and stop control) 방법 등이 있으며, MVR 시스템에서는 주로 속도 제어 또는 고정속도 제어방법을 이용하고 있다 [31].

1) 속도 제어방법

속도 제어방법은 증기압축기의 용량을 제어하기 위해 적절한 inverter 회전수를 조절하여 증기의 용량을 제어하는 방법으로서 간단하고 효과적인 압축기 용량제어 방법이다. 특히 MVR 시스템의 압력이 일정할 때, Fig. 4-6에서 보는 바와 같이 작은 변화에서도 용량변화 효과가 크며, 같은 속도변화에서 유동저항이 상대적으로 적다. 즉, 속도변화에 의한 용량조절이 매우 효과적이고 다른 제어방법에 비해 부분 부하운전이 용이하다. 이 방식은 터어빈 구동방식에 많이 이용된다. 전동기 구동방식에는 정밀한 variable speed motor(Induction motor)가 필요하며 유압 혹은 자기커플링(Magnetic coupling)이 요구된다. 이 방식의 장점으로 는 용량조절 범위가 넓고 부분 부하운전이 가능하며, throttling inlet type 보다 효율이 좋고 경제성이 높다는 점을 들 수 있다.

2) 고정속도 제어방법

대부분의 압축기가 기본적으로 이 방법을 채택하고 있으며, 제어시스템의 성능곡선은 다음의 Fig. 4-7과 같다. 구체적인 고정속도 제어방법으로는 inlet guide vane, throttling control 그리고 by-passing control 등이 있다.

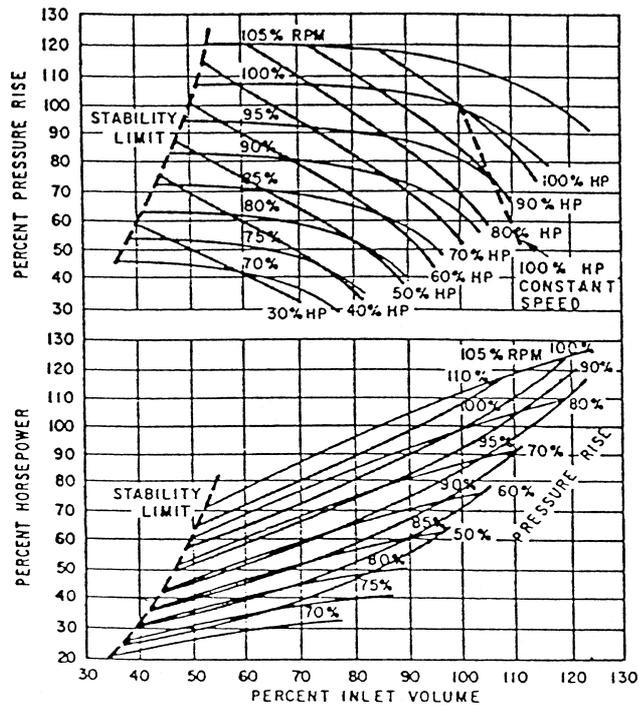


Fig. 4-6 Performance curve of speed control system

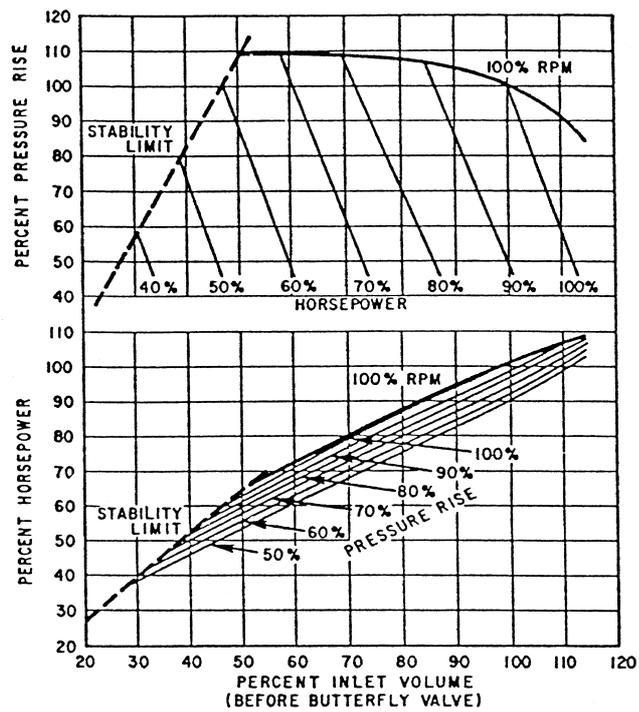


Fig. 4-7 Performance curve of fixed speed control system

가) Inlet guide vane

Fig. 4-8에 나타낸 바와 같이 증기압축기의 입구에 guide vane을 설치하여 압축기 속도는 일정하게 유지하면서 증기량을 조절하여 제어하는 방법으로서 압축기 head가 9,200kg_f·m/min이하의 원심식 압축기에 사용된다. guide vane은 압축기의 첫 번째 안내판 역할을 함으로써 증기의 회전이 wheel의 방향으로 선회하게 하여 압축기의 발생 head에 기여하기 때문에 이 방식은 속도제어와 같이 압축기 효율이 높으며, 조절범위가 넓고 부분 부하운전이 용이하다는 장점이 있는 반면, 조작성이 복잡하고 가격이 고가인 단점이 있다.

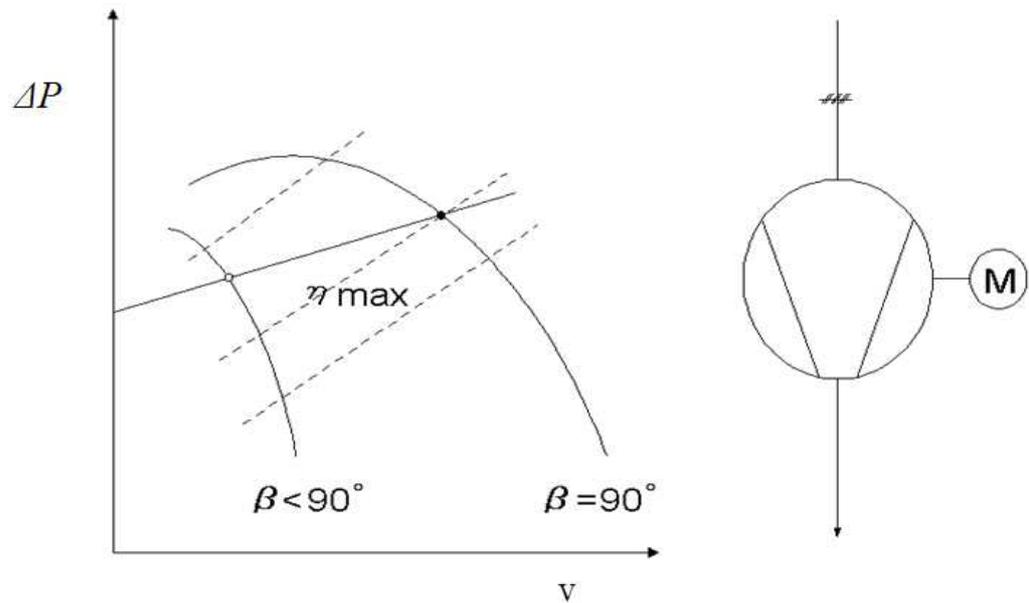


Fig. 4-8 Inlet guide vane

나) Throttling control

Fig. 4-9에 나타낸 바와 같이 압축기의 입구에 butterfly valve를 설치하여 증기의 양을 조절하여 고정속도를 제어하는 방법이다. 압축기의 흡입부에 압력손실, 유량감소 및 증기밀도에 의한 손실이 생기므로 압축기의 축동력이 손실부분 만큼 증가한다. 이 방법은 조작이 간단하고 설치비가 저렴하나 작동범위 부근에 서징(surging) 현상이 일어나기 쉽고 부분 부하운전이 곤란하며, 축동력이 커지는 단점이 있다.

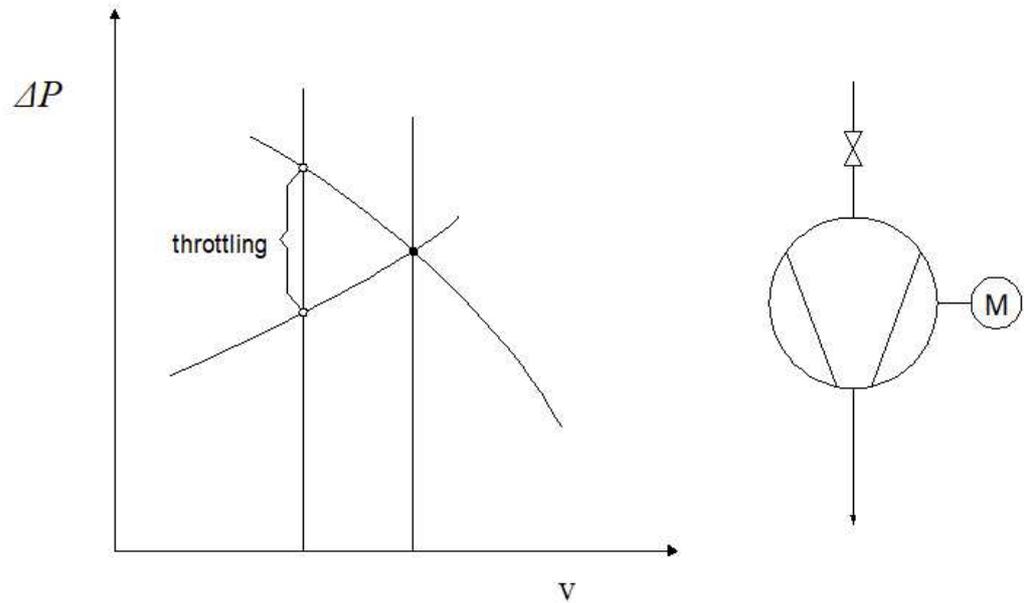


Fig. 4-9 Throttling control

다) By-passing control

Fig. 4-10에 나타낸 바와 같이 압축기의 회전속도를 일정하게 유지시키고 증기의 초과량만큼 by-pass시켜 제어하는 방법으로 조절범위가 넓고 간단하며 서징한계를 제어하기 용이하며 가격이 저렴하지만 부분 부하운전이 곤란하다.

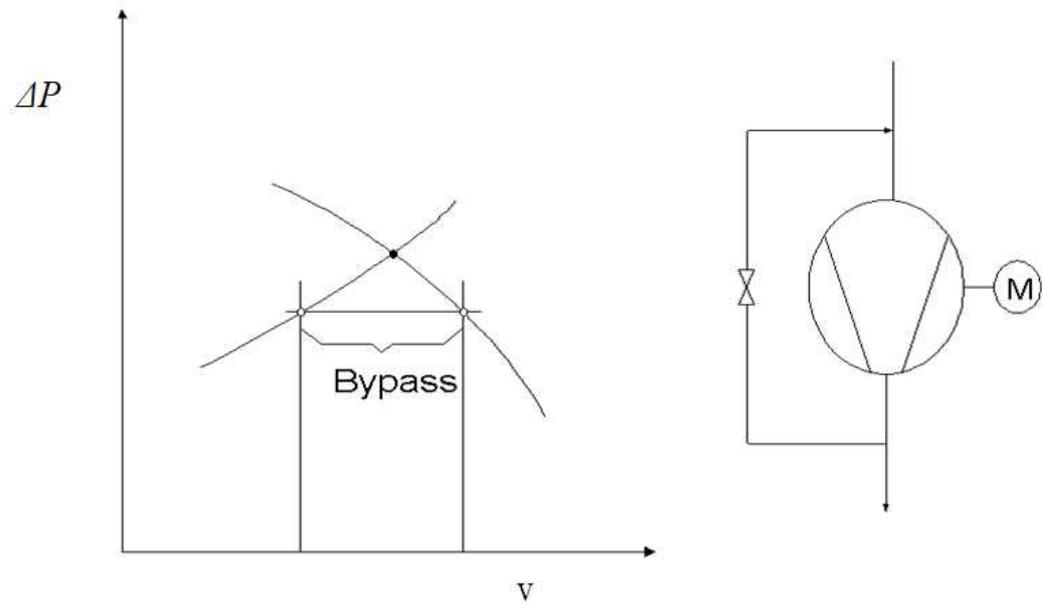


Fig. 4-10 By-passing control

4.2.2 MVR 증발·농축시스템 제어방법

MVR은 크게 증발·농축 loop와 증기압축 loop로 나누어지며 각 loop의 구성은 아래와 같다.

1) 증발·농축장치 제어 Loop

가) 원액공급량 제어 Loop

(1) Loop의 개요

원액의 공급량을 제어하는 loop는 ① 증발·농축기의 최저레벨을 유지하기 위한 경우와, ② 농축농도를 일정하게 유지하기 위한 경우의 2개 loop로 구성된다.

① 증발·농축기의 최저레벨을 유지하기 위한 경우

증발·농축기의 최저 레벨유지는 운전 중 MVR 시스템의 전체 안정성을 좌우하는 중요한자이므로 항상 최저레벨 이상을 유지하여야 한다. 또한 초기 가동 시 MVR가동 전 최저 레벨까지 원액을 공급하여 순환펌프의 작동여부를 결정한다.

② 농축농도를 일정하게 유지하기 위한 경우

증발시간이 경과함에 따라 증발·농축기내의 원액은 농도가 높아지게 된다. 이러한 과정에서 설정농도에 도달하게 되면 이를 일정하게 유지하기 위하여 원액공급량을 제어한다.

따라서 이 Loop에서는 농축시스템 중의 어떤 구성원에서 이상이 발생하기 전까지는 농축시스템의 수동제어가 전혀 필요치 않다.

(2) Loop의 구성요소

원액공급량은 증발·농축기에 설치된 차압식 레벨 트랜스미터로부터의 차압을 전기적 신호로 바꾸어서 원액공급밸브에 전달하여 공급량을 제어한다.

①의 경우, 레벨 트랜스미터로부터 나온 데이터는 설정 값과 비교된 후, 원액공급밸브로 전달되어 흐름량을 비례제어 하게 된다.

②의 경우, 전도도로부터 나온 농축농도가 설정 값과 비교 연산된 후 그 결과를 원액공급밸브에 전달하여 흐름량을 비례제어 한다.

나) 출액제어 Loop

출액제어는 단순히 최종증발관의 액위를 적정 수위로 유지시키기 위한 것이므로 출액의 밀도는 증발·농축운전에 필요한 참고 값으로서만 반영된다. 출액제어는 최종증발관의 하부에 부착된 차압측정 변환기가 액위를 감지한 후, 이를 전기적 신호로 변환하여 자동밸브(Level indicating automatic controller)를 동작시킴으로써 비례 제어를 한다.

다) 액위제어 Loop

농축운전의 안정을 유지하기 위해서는 각 농축관의 액위를 감지, 조정하여야 한다. 액위는 증발관 하부에 부착된 차압측정 변환기가 액위를 감지한 후, 단순히 운전의 참고 값으로서 표시만 되도록 제어 loop가 구성되어 있으며, 액위 조정은 상한선과 하한선에 따라 출액제어 loop와 원액공급제어 loop로 연결되어 있다.

라) 진공압력 지시 Loop

증기압축기의 흡입부에 연결되어 있는 기액분리기에 압력 측정기를 설치하여 시스템의 변화상태를 운전의 참고 값으로 표시되도록 구성된다. 또한 증발·농축기내의 압력을 설정 값과 비교하여 설정된 값을 유지하도록 진공밸브(Solenoid valve)를 제어한다.

마) 압축증기 온도제어 Loop

증기압축기에서 과열상태로 압축된 증기를 포화증기의 상태로 전환시킬 때 이의 냉각에 소요되는 냉각수의 양이 비례제어가 되도록 구성한다. 즉, 증발관의 증기입구에 설치되어 있는 온도감지기에 의해 감지된 신호가 비례제어 밸브(TIC: Temperature Indicating Controller)를 자동으로 비례 동작하게 함으로써 일정한 온도의 증기가 유입되도록 한다. 단, 가동초기와 증발기가 가열되었을 경우에는 비례제어 밸브의 조절범위를 초과(-, +방향)하기 때문에 이러한 경우에는 수동조작 운전을 수행한다.

바) 증기 온도제어 Loop

증기압축기의 흡입증기 상태를 과열증기로 유지하기 위해 압축증기의 일부를 순환케하며 이때 순환되는 증기의 양은 증기압축기의 흡입온도에 따라서 비례제어 된다. 즉, 흡입부에 설치된 온도감지기가 온도를 측정 후 이를 전기적인 신호로 변환하여 비례제어 밸브(TIC)를 작동케함으로써 흡입온도를 일정한 값으로 유지하도록 한다. 이때, 증기압축기의 흡입온도 및 토출온도는 운전의 참고 값으로서 지시가 되며, 이중 증기압축기의 토출온도는 운전기록을 유지하기 위해 기록계에 의해 기록되도록 한다.

사) 원액 공급제어 Loop

가열기에서 응축수와 열교환된 후, 증발기로 투입되는 원액의 온도는 증발기의 운전상 항상 일정한 온도가 요구되는 반면에 가열기로 투입되는 원액의 초기 온도는 공정의 운전조건에 따라 변화의 폭이 매우 크므로 운전의 기복이 발생하게 된다. 따라서 원액공급 온도제어 loop는 온도를 일정하게 유지하기 위한 방법으로 원액의 가열에 사용되는 응축수의 유량을 제어토록 한다. 제어방식은 공급 원액온도를 감지하여 응축수량을 비례제어밸브(TIC)로 자동제어가 되도록 한다.

아) 응축수조 수위제어 Loop

원액가열과 과열증기의 냉각에 사용하는 응축수의 연속적인 공급을 위하여

원액 가열기에서 열교환한 후, 배출되는 응축수의 일부를 응축수 저조로 순환토
록 한다. 수위의 제어는 응축수 저장조의 하부에 부착된 차압측정 변환기가 최
대, 최소 수위를 감지한 후, 응축수 배출배관 중의 순환배관에 부착된 on-off 자
동밸브를 동작하여 이루어진다.

자) 증발량 제어 Loop

증발기내에서의 증발량 조정은 IGV(Inlet Guide Vane)로 하게 되며 이의 조
정은 필요에 따라 현장 수동조작과 원격 수동조작으로 구분하여 작동시킬 수 있
다. 그러나 증발수량의 제어는 feedback 제어 시스템에 의하여 제기되는 것이 아
니라 농축운전의 필요에 따라서 인위적인 조작이 가하여지는 것이므로 다른 제
어 loop와 구분된다.

2) 증기압축기 제어 Loop

가) 윤활온도 제어 Loop

(1) 급유 저장조 온도제어

가동 초기에 급유의 온도가 25℃를 초과하지 않으면 증기압축기는 가동되지
않는다.

(2) 윤활유 배출온도제어

압축기 내부의 증속기 입·출력 측의 윤활 배출온도가 규정치(50℃)를 초과하
지 않도록 제어 loop를 구성하며, 규정치를 초과하면 경보가 울리도록 한다.

(3) 급유 온도제어

급유온도가 규정치(45℃)를 초과하지 않도록 제어 Loop를 구성하며, 규정치를
초과하면 경보가 울리도록 한다.

나) 급유 압력제어 Loop

급유의 압력제어는 다음의 2가지로 분류한다.

(1) 초기 가동 시

급유압력이 2.5 bar 이상이 되어야 interlock에 의해 가동이 될 수 있다.

(2) 통상 가동 시

급유압력이 2.0 bar 이하가 되면 interlock에 의해 증기압축기의 가동이 중지된다.

다) 진동제어 Loop

모든 가동 시 진동의 수치가 7mm/sec를 초과하면 경보가 울리도록 한다. 또한 9mm/sec 초과 시 자동으로 가동이 중지된다. 단, 초기 가동 시에는 30초 동안 경보 작동이 되지 않는다.

라) 가동제어 Loop

증기압축기의 가동제어는 다음의 2가지로 분류한다.

(1) 초기 가동 시

다음의 3가지 조건이 부합되어야만 가동이 된다.

- ① IGV가 0%로 전폐
- ② 급유압력이 2.5 bar 이상
- ③ 급유저장조의 온도가 25℃ 이상

(2) 통상 가동 시

시스템 펌프 중 임의의 펌프가 중지되면 interlock에 의해 증기압축기는 중지

된다.

마) 급유펌프 제어 Loop

급유펌프는 다음의 조건에 의해 가동이 제어된다.

- ① 급유 저장조의 온도가 25℃이하일 때 가동이 되지 않는다.
- ② 증기압축기의 가동이 중지되면 interlock에 의해 즉시 급유펌프가 제어된다. 단, ①의 경우에는 oil heater를 작동하여 온도를 상승시킨 뒤에 가동 조작을 하여야 한다.

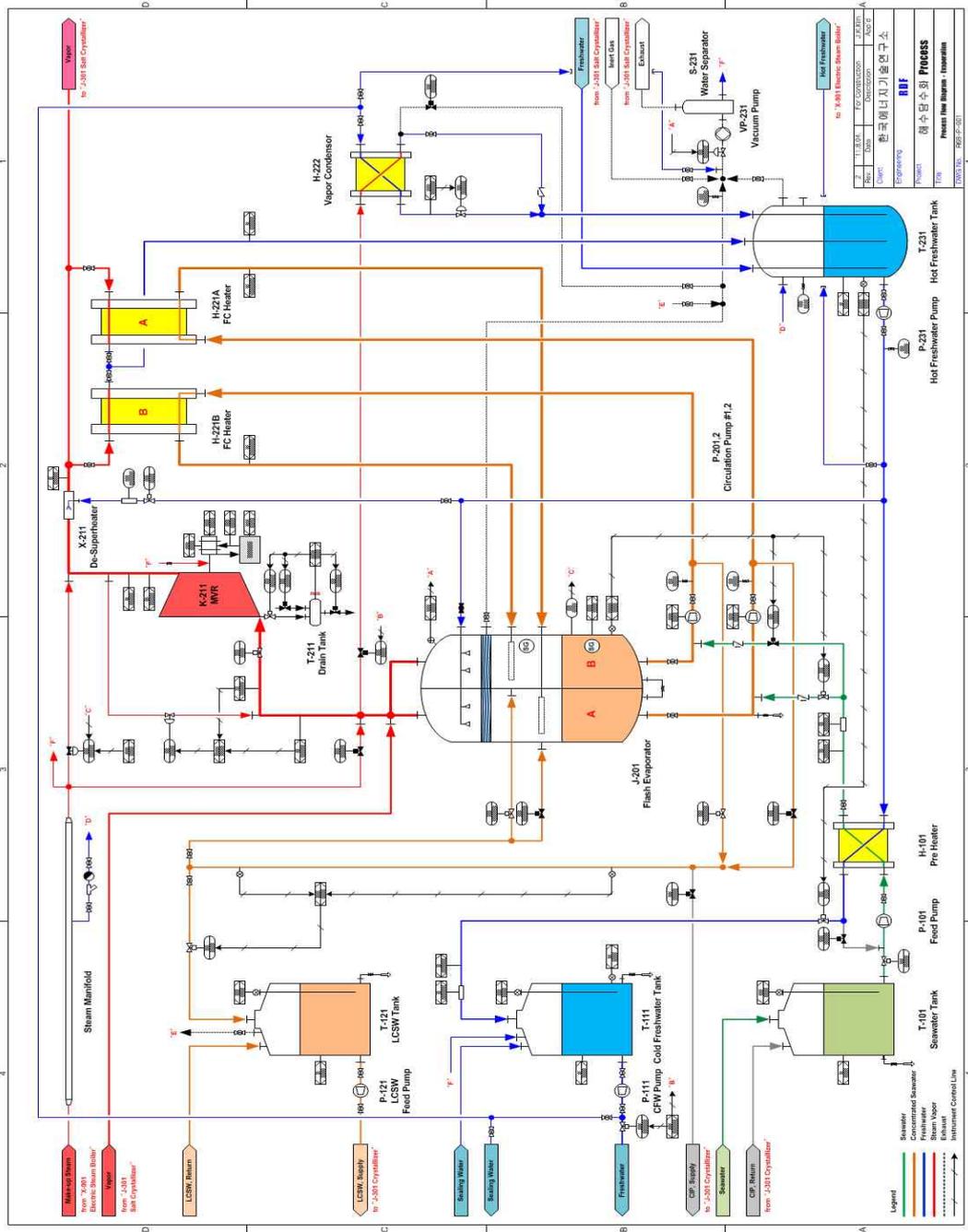
4.3 MVR 해수담수화 플랜트 설치 및 실험방법

4.3.1 시스템 개요

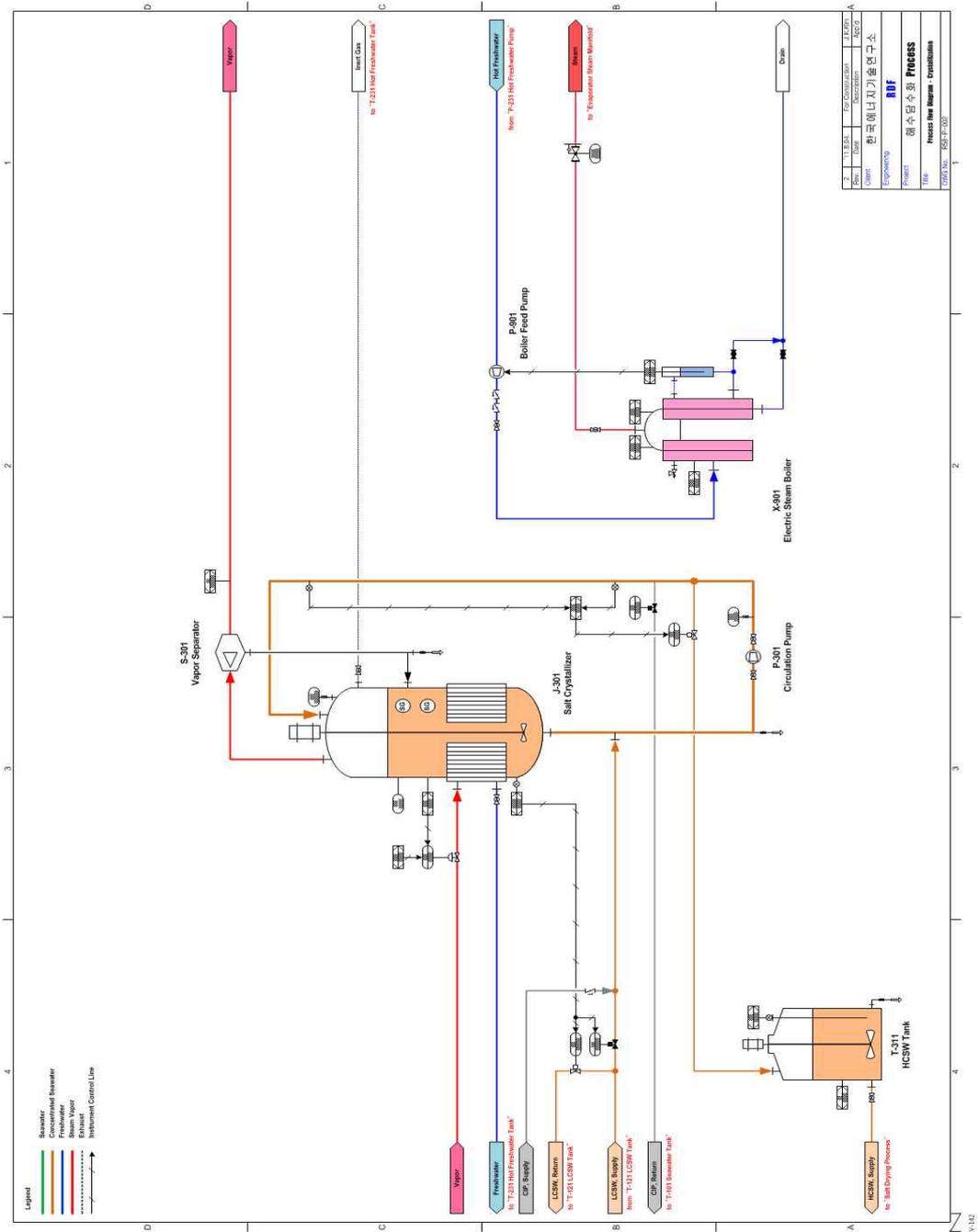
기본 설계조건으로부터 주요 장치를 설계 및 제작하여 MVR 해수담수화 플랜트를 Fig. 4-11과 같이 설치하였으며, 본 플랜트의 P&ID(Piping and Instrumentation Diagram)는 Fig. 4-12와 같다. 또한 MVR 시스템을 제어하는 프로그램은 Fig. 4-13과 같으며 시스템에 대한 모든 사항을 모니터링 및 조작할 수 있다.



Fig. 4-11 MVR desalination plant



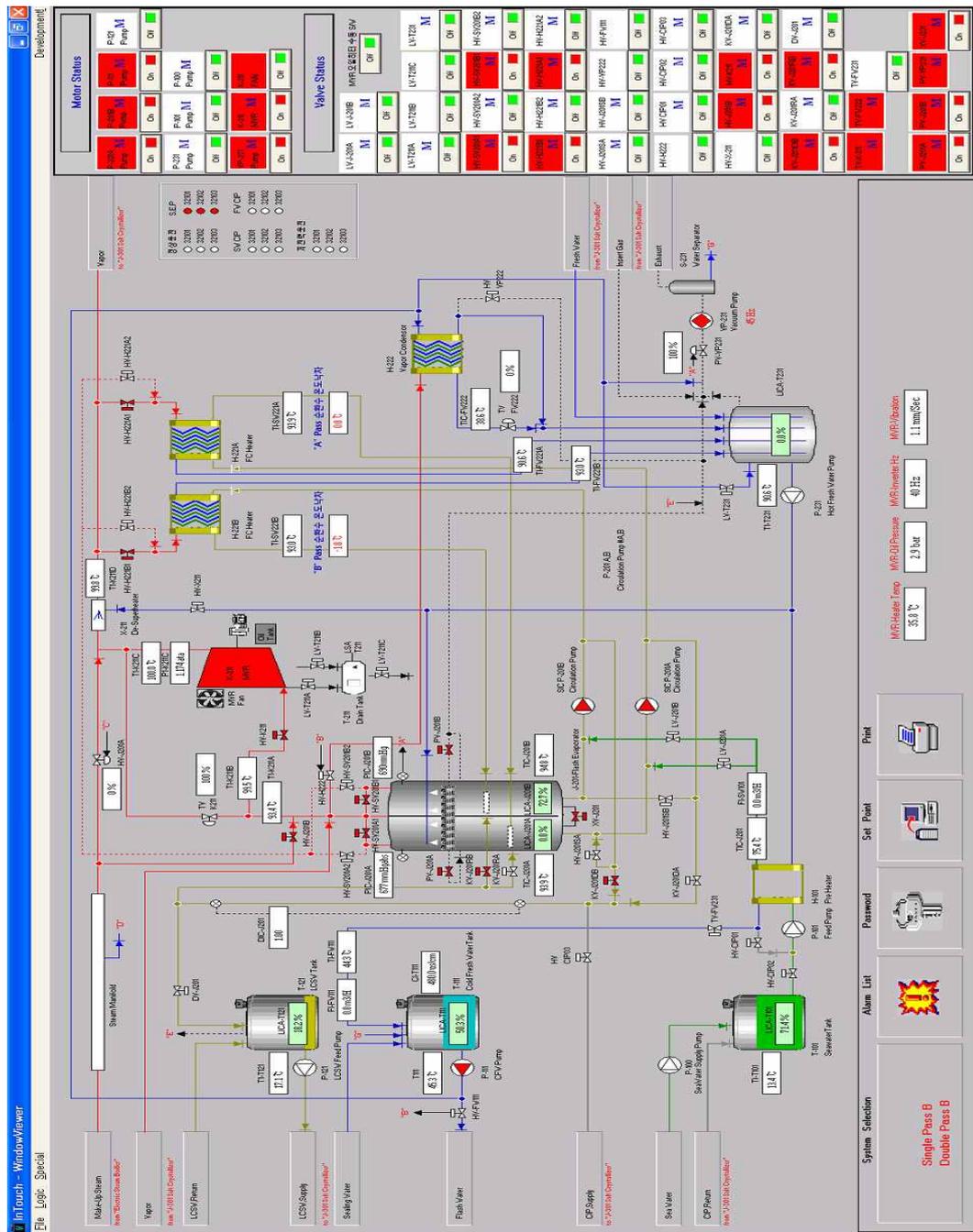
(a)



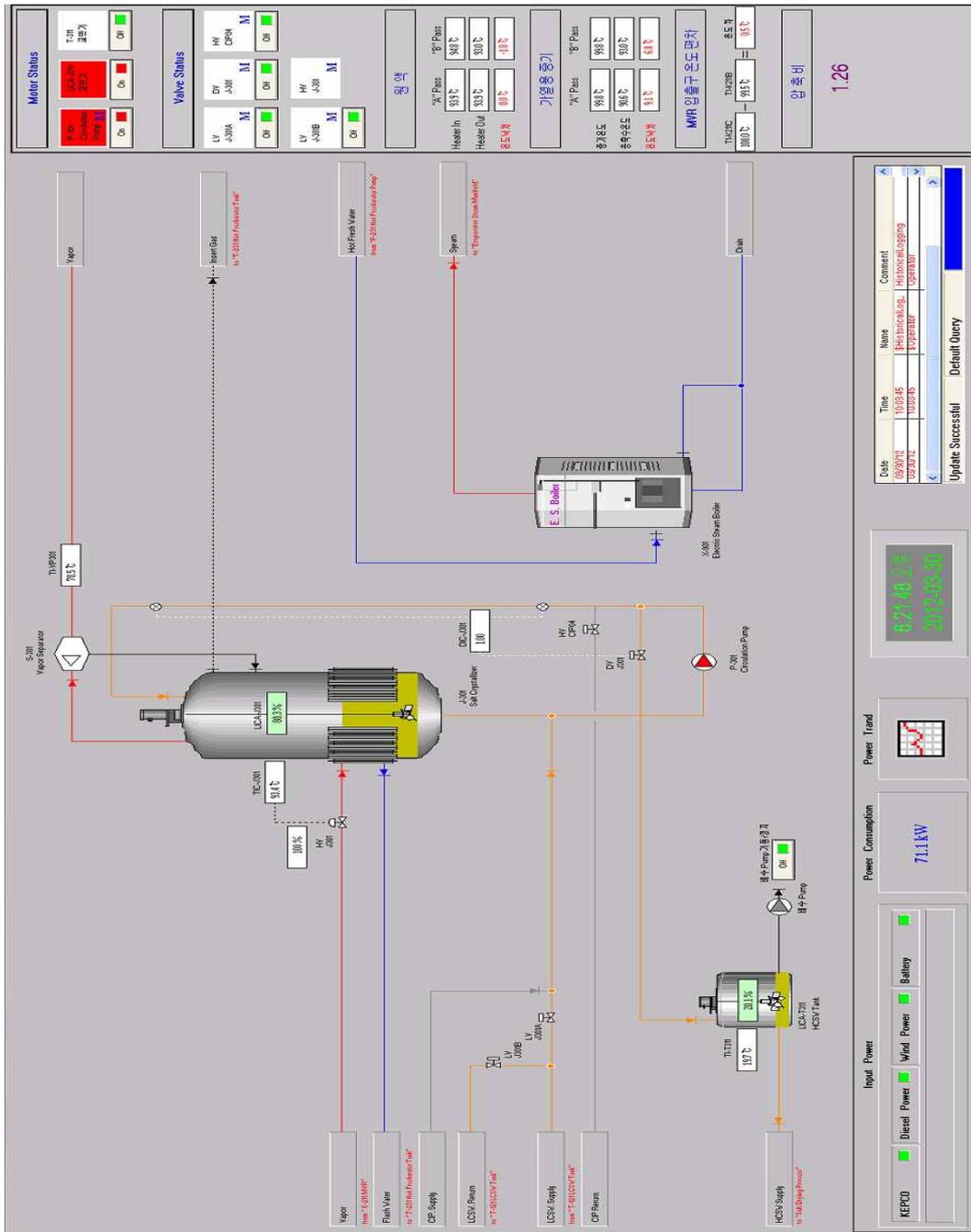
(b)

Fig. 4-12 P&ID of MVR desalination plant:

(a) MVR and evaporator (b) Crystallizer



(a)



(b)

Fig. 4-13 Automatic control system of MVR desalination plant:

(a) MVR and evaporator (b) Crystallizer

MVR 해수담수화 시스템은 Fig. 4-12에서와 같이 원액탱크(T-101)로부터 공급펌프(P-101)에 의해 원액(15℃, 3.5% 정도)이 공급되어 예열용 열교환기(H-101)에 의해 주 열교환기(H-221A, H-221B)의 가열측 열원으로 사용된 가열 증기의 응축수와 열교환되어 약 70℃로 예열된 후 flash evaporator로 공급된다. Flash evaporator에서는 순환펌프(P-201A, P-201B)를 이용하여 flash evaporator 내의 원액을 주 열교환기로 거쳐 다시 flash evaporator로 순환시키며 증발하게 된다. 주 열교환기에서는 flash evaporator에서 발생하는 증기를 MVR로 가압·승온하여 flash evaporator 원액의 가열 열원으로 재사용된다.

이때 증기압축기의 단열압축과정에 의한 과열증기 상태의 토출증기는 열교환기의 전열특성을 고려하여 공정용 응축수를 분무노즐(X-211)을 통해 과열증기 중에 분무됨으로써 포화수증기 상태의 열원으로 주 열교환기에 공급된다.

한편 flash evaporator를 통해 농축된 저농도 농축액(약 12%)은 저농도 농축액 저장탱크(T-121)에 저장되며, 주 열교환기에서 flash evaporator의 원액의 증발에 필요한 열을 전달한다. 응축된 응축수는 응축수 저장탱크(T-231)에 저장된 응축수 펌프(P-231)를 통해 예열용 열교환기에서 원액과 열교환된 후, 응축수 저장탱크(T-111)로 집수된다.

저농도 농축액 저장탱크에 저장된 저농도 농축액은 저농도 농축액 공급펌프(P-121)를 통해 결정화 농축장치(J-301)로 보내지게 되며 MVR에서 가압·승온된 포화증기를 이용하여 고농도로 농축된 후 고농도 농축액 저장탱크(T-311)로 집수된다.

4.3.2 실험방법

1) 운전방법

가) 운전조작 순서

MVR 해수담수화 플랜트의 가동은 다음과 같은 운전조작 순서에 따라 수행한다.

(1) 가동준비

- ① 동력반 및 중앙 제어반의 점검, 펌프 상태 및 각 밸브 상태를 확인한다.
- ② 냉각수 및 펌프 sealing water 등 utility를 공급한다.
- ③ MVR의 가동준비를 위해 제어반 점검, 순환준비 및 순환을 시작한다.

(2) 승온운전

- ① Flash evaporator의 액위를 80%까지 조정 한 후 액순환 펌프(P-201A, P-201B)를 가동하여 계속 순환시킨다.
- ② steam boiler를 135℃로 설정 후 가동하고, steam control valve를 100% open 한다.
- ③ 기액분리기 및 증기 배관상의 응축수를 제거한다.

(3) 증발·농축운전

- ① 시스템의 온도가 일정온도에 도달하여 증발이 이루어지면 MVR을 가동한다.
- ② MVR inverter speed를 10Hz에서 55Hz까지 5Hz 씩 서서히 증가시킨다.(조정 전에 sight glass(SG-FW221A, SG-FW211B, SG-FW301)에서 증발여부 확인 및 sight glass에서 증발이 확인되는 경우에만 조정)
- ③ 주 열교환기에서 열교환 후, 응축된 응축수는 응축수 저장조로 배출한다.
- ④ Flash evaporator에서 농축된 저농도 농축액은 저농도 농축액 저장탱크로

배출한다.(DIC-J201 확인)

- ⑤ 저농도 농축액 저장탱크에 저장된 저농도 농축액을 저농도 농축액 공급펌프를 이용하여 결정화 농축장치로 보낸다.
- ⑥ 결정화 농축장치에서 고농도까지 농축된 농축액은 고농도 저장탱크로 배출한다.(DIC-J301 확인)

(4) 운전정지

- ① MVR inverter speed를 서서히 감속시켜 증발이 일어나지 않도록 한다.
- ② MVR의 운전을 정지한 후, 계내의 응축수를 모두 배출한다.
- ③ 모든 펌프의 작동을 중지한다.

(5) 세정(CIP : Cleaning in Place)

- ① Seawater 세정 : flash evaporator의 액위를 50%로 설정 후 원액공급 탱크의 밸브를 수동으로 개방하여 원액을 공급한다. flash evaporator 및 결정화 농축장치의 순환펌프를 가동시킨 후 10분간 세정운전을 지속한다. Flash evaporator 및 결정화 농축장치의 용액 배출 밸브를 open 시킨 후 약 1~2시간 운전을 지속한다.
- ② Freshwater 세정 : flash evaporator의 액위를 50%로 설정 후 응축수 저장탱크의 펌프(P-231)를 가동시키고 세정용 밸브(HV-CIP01)를 수동으로 개방하여 담수를 공급한다. flash evaporator 및 결정화 농축장치의 순환펌프를 가동시킨 후 10분간 세정운전을 지속한다. Flash evaporator 및 결정화 농축장치의 용액 배출 밸브를 open 시킨 후 약 1~2시간 운전을 지속한다. Flash evaporator 및 결정화 농축장치의 액위가 약 20% 정도가 되면 가동을 중지한다.

나) 최적운전모드 개발

신재생에너지의 부하조건에 따른 출력변동에 대응하기 위하여 MVR 해수담수화 플랜트 정상운전모드 및 저부하운전모드 등의 최적 운전모드를 개발하였으며

첨부된 운전매뉴얼에 따라 MVR 해수담수화 플랜트를 가동하였다. 또한, 주요 장치의 가동용 panel을 별도로 설치하고, DDC(Direct Digital Controller) panel을 통해 컴퓨터에 연결하여 자동제어가 가능하도록 하였으며 증기압축기와 각종 펌프를 가동(on/off)할 수 있도록 하였다. 또한 계측기를 통해 flash evaporator의 운전 상태(온도, 변위량, 압력, 유량 등)에 대하여 모니터링이 가능하게 하였다. 아울러 일정 간격으로 운전 상태에 대한 정보를 기록하도록 하여 차후 시스템 분석을 하는데 이용 가능토록 하였다.

(1) 정상운전모드

신재생에너지 발전에서 MVR 해수담수화 플랜트의 구동에 충분한 전력이 공급될 경우 증발·농축장치의 담수량 및 농축범위에 따라 단일 및 2중효용으로 선택하여 운전할 수 있다. 기본적인 운전방법은 위의 증발·농축운전에 따라 실행한다.

(2) 저부하운전모드

MVR 해수담수화 플랜트의 정상운전모드에서 소요되는 전력보다 신재생에너지 발전에서 생산되는 전력이 적을 경우에는 MVR 해수담수화 플랜트를 정상적으로 가동할 수가 없다. 따라서 저부하운전모드 시에는 공급되는 전력량에 따라 MVR의 inverter speed를 조절하여 예열상태를 유지시켜야한다. 공급되는 전력량이 매우 작을 경우, MVR의 가동을 정지한 상태에서 electric steam boiler에서 공급되는 증기를 이용하여 증발·농축장치 전체의 예열상태를 유지시키는 것은 물론 약간의 담수생산을 연속적으로 유지시키도록 한다. 이 때 소요되는 전력은 최소한의 펌프 구동전력 뿐이며, 신재생에너지 발전에서 생산되는 나머지 잉여전력은 모두 electric steam boiler의 구동에 사용하도록 한다.

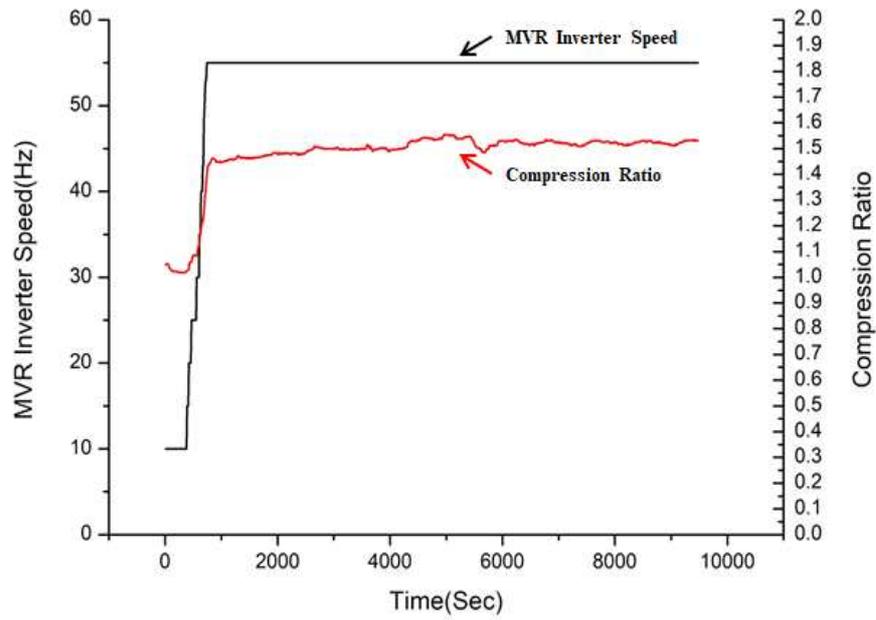
5. 실험결과 및 고찰

5.1 성능실험 결과

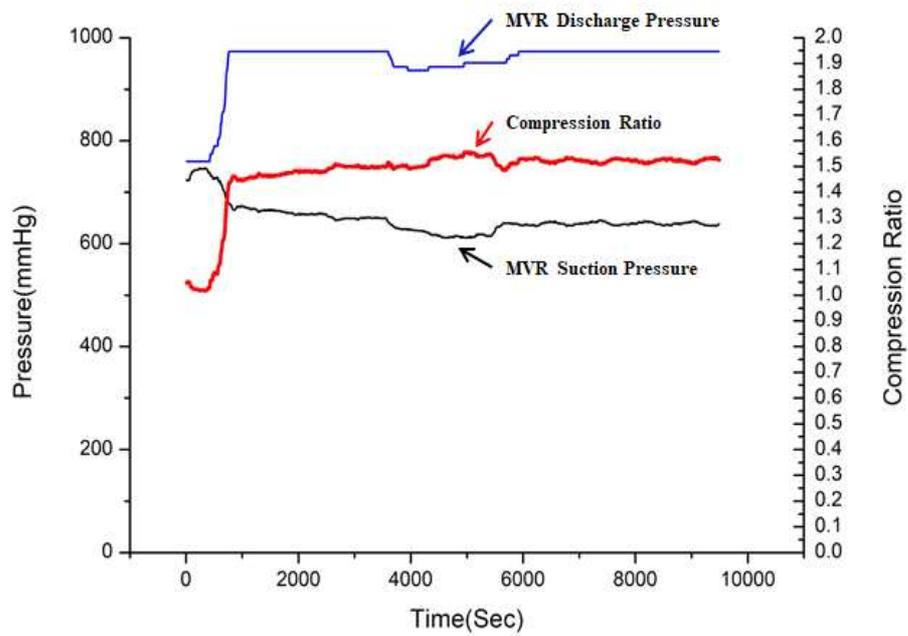
5.1.1 MVR 특성 분석

MVR의 특성 분석은 시스템이 설계치에 따라 정상 운전됨을 확인하기 위하여 실시하게 되었다. MVR 시스템은 계절적 수요변동 및 해수투입 유량 등을 고려하여 예상 부하별 운전조건을 결정하게 되나, 본 MVR 시스템의 경우 기타 고려요인을 배제하고 MVR의 inverter 회전수에 따른 압축비와 온도 특성만을 고려하여 분석을 실시하였다.

Fig. 5-1은 MVR inverter 회전수 및 MVR 흡입 및 토출압력에 따른 압축비를 분석한 그래프이다. Inverter 회전수에 따라 MVR의 흡입 및 토출압력이 변화되는 걸 확인할 수 있으며, Inverter 회전수가 최대인 55Hz일 때 압축비는 평균 1.5이상으로 MVR 성능이 설계치에 맞게 운전되고 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5-1 MVR compression ratio:

(a) by MVR inverter speed, (b) by suction and discharge pressure

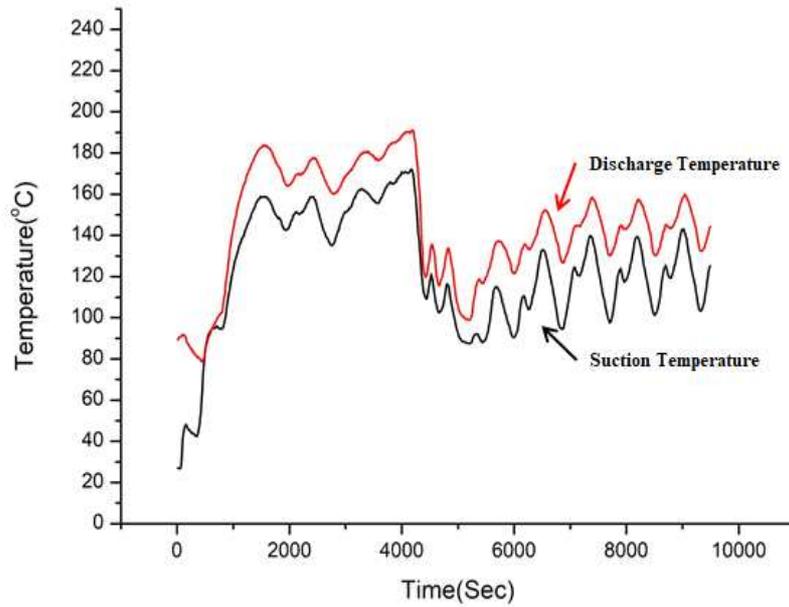


Fig. 5-2 MVR suction and discharge temperature changes over time

Fig. 5-2는 MVR 흡입 및 토출온도 변화를 보여 주는 그래프이다. MVR의 서어징을 예방하기 위하여 증기 발생량 부족 시 토출되는 증기 일부분을 흡입하도록 설계되어 흡입 및 토출온도가 일정하게 유지되지는 않았다. 그러나 평균 ΔT 가 약 11~15°C로 압축비에 따른 정상적인 온도변화를 나타내고 있다.

5.1.2 주 열교환기 특성 분석

주 열교환기는 MVR에서 토출되는 증기와 증발기에서 순환되는 해수를 열교환하며 ΔT 가 약 7°C 로 설계되었다. Fig. 5-3과 Fig. 5-4는 주열교환기 내의 온도변화를 보여주고 있다. 계 내의 압력변화로 인하여 온도변화가 있지만 ΔT 가 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 로 설계치와 비교적 잘 일치하고 있다.

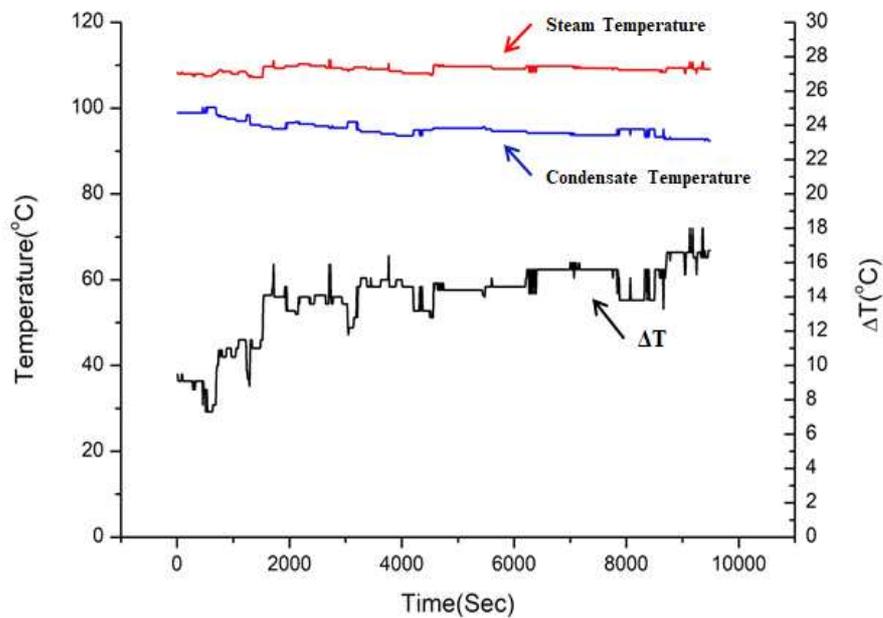


Fig. 5-3 Temperature variation of main heat exchanger (steam section)

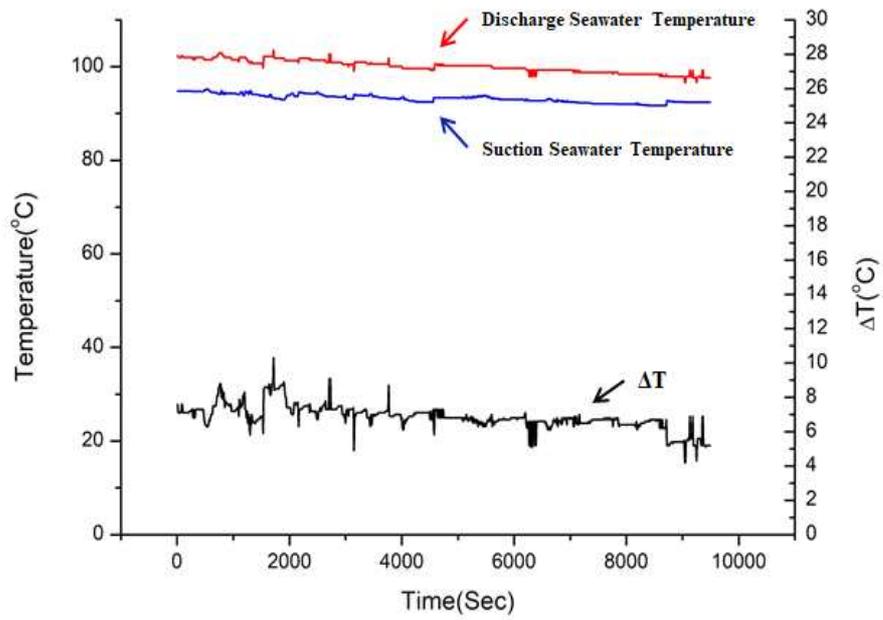


Fig. 5-4 Temperature variation of main heat exchanger (seawater section)

5.1.3 예열용 열교환기 특성 분석

예열용 열교환기에서는 원수와 응축수가 열교환되며 원수의 온도가 너무 낮게 계 내로 투입될 경우 시스템이 평형상태가 깨지므로 매우 중요한 설비 중의 하나이다. Fig. 5-5는 예열용 열교환기의 온도분포를 보여주고 있다. 약 12℃의 해수가 약 65℃까지 승온된 것을 확인할 수 있다.

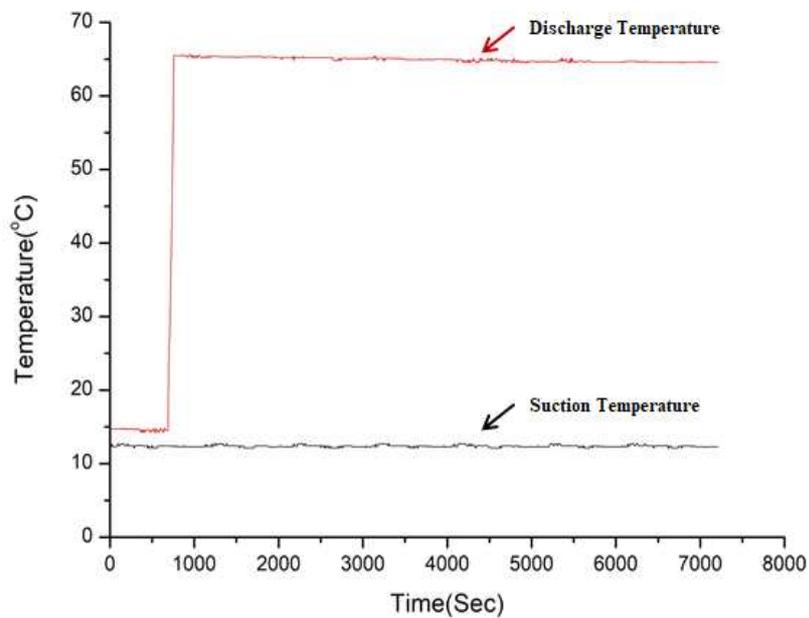


Fig. 5-5 Temperature variation of preheat exchanger

5.2 MVR 해수담수화 플랜트 성능 분석

Fig. 5-6은 데이터 수집간격이 10초인 MVR 해수담수화 시스템 전력소비량을 나타낸다. Fig. 5-6에서 확인할 수 있듯이 MVR 해수담수화 시스템은 최소 약 40kW에서 최대 약 140kW의 전력을 소비하고 시스템이 안정적인 경우 약 55kW의 전력을 소비하는 것을 알 수 있다. 또한 단일효용과 2중효용의 전력 소비는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 가동 초기 50분간의 데이터를 분석해 보면 electric steam boiler의 steam 공급량에 따라 신재생에너지 발전의 부하변동에 대응이 가능하며, MVR inverter의 속도에 의해서도 대응이 가능할 것으로 생각된다.

Fig. 5-7은 MVR의 inverter speed에 따른 compression ratio를 나타낸다. MVR inverter speed가 55Hz 일 때 MVR의 압축비는 단일효용일 때 평균 1.410, 최대 1.418이며 2중효용일 경우 평균 1.519, 최대 1.554로 측정되었다. 2중효용일 경우 MVR이 이론적인 설계모델인 inverter speed 55Hz, 압축비 1.5와 비교적 잘 일치하고 있으나 단일효용인 경우 압축비가 조금 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 flash evaporator 설계와 관련이 있는 것으로 단일효용일 때 flash evaporator의 부피가 늘어나면서 비체적이 증가하여 압축비가 조금 낮은 것으로 추정된다.

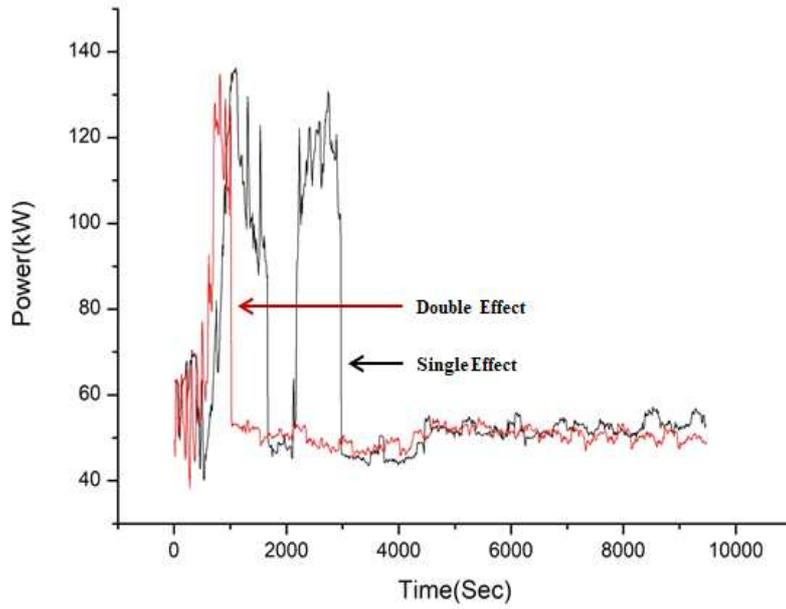


Fig. 5-6 Energy consumption of MVR desalination plant

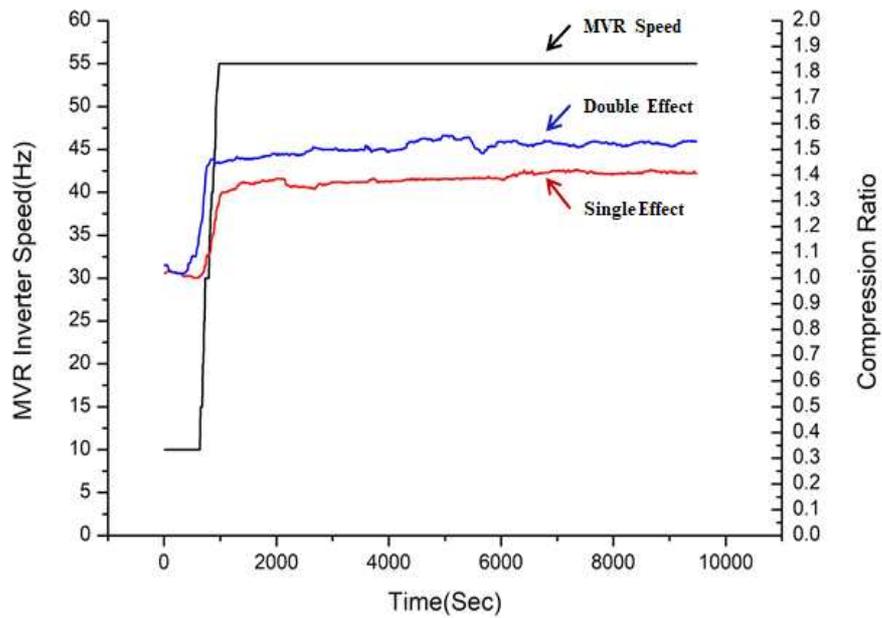


Fig. 5-7 MVR compression ratio by MVR inverter speed

Fig. 5-8은 MVR 해수담수화 시스템의 담수생산량을 보여준다. MVR 해수담수화 시스템의 안정성을 유지하기 위하여 단일효용 운전 시는 hot flash water tank의 수위를 높게 설정하였고 2중효용 운전 시에는 낮게 설정하였기 때문에 담수생산량 차이가 크게 다른 것을 확인할 수 있다. MVR 해수담수화 시스템 전체 운전 중 평균 담수량은 단일효용 시 $1.277\text{m}^3/\text{h}$ 이며, 2중효용 시 $2.095\text{m}^3/\text{h}$ 이다. 초기 부하변동 운전을 제외한 정상운전 시의 평균 담수량은 단일효용 시 $1.162\text{m}^3/\text{h}$ 이며, 2중효용 시 $2.127\text{m}^3/\text{h}$ 이다. 즉, Fig. 5-9에서 확인할 수 있듯이 MVR 해수담수화 시스템이 정상운전을 한다고 가정하면 일일 약 28ton~51ton의 담수를 생산 할 수 있으며 평균 전력소비량이 50.483kWh이므로 담수 1ton당 약 23kWh의 전력이 소비됨을 알 수 있다.

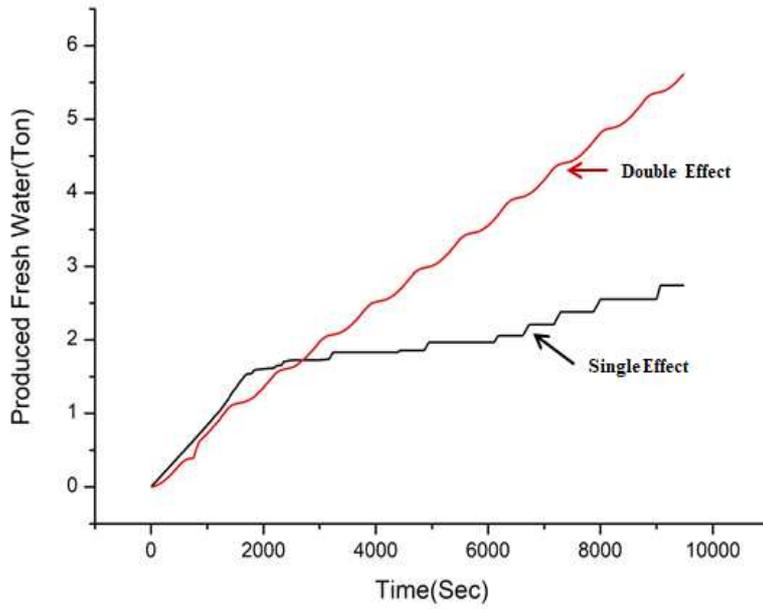


Fig. 5-8 Freshwater production of MVR desalination plant

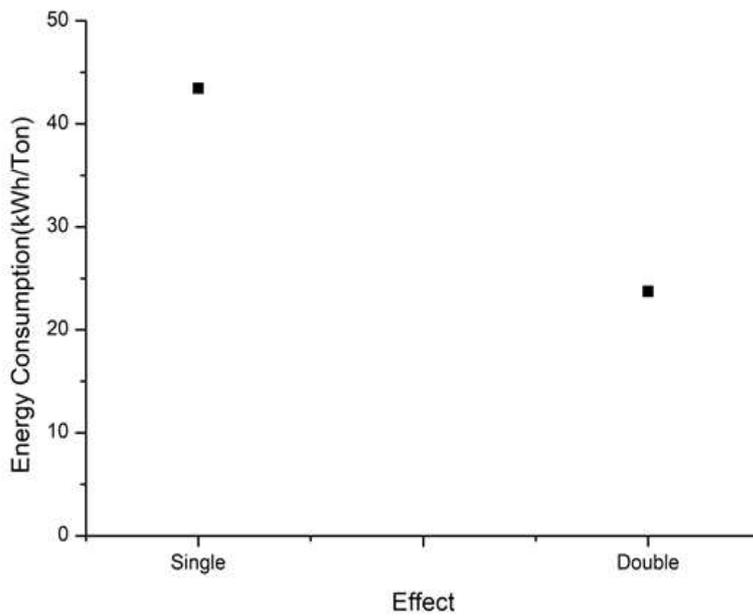


Fig. 5-9 Energy consumption per ton of freshwater

Fig. 5-10은 MVR 해수담수화 시스템의 농축범위를 보여주고 있다. 그래프에서 보는 바와 같이 flash evaporator에서는 약 8wt%까지 농축하였으며, salt crystallizer에서는 약 15wt%까지 농축되었음을 확인할 수 있다.

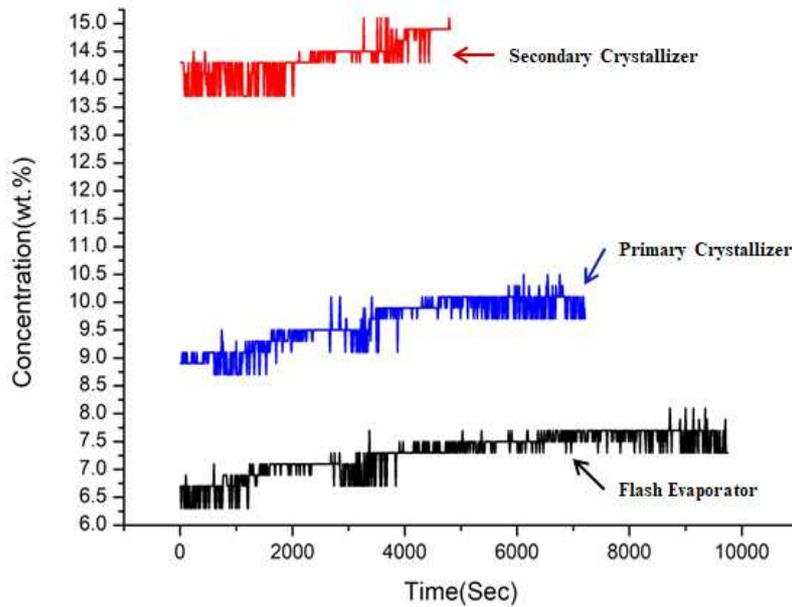


Fig. 5-10 Concentration ranges of MVR desalination plant

6. 부산물 활용방안

6.1 부산물 활용방안

기존 증발법에서는 담수화 과정의 부산물인 농축염수를 그대로 바다에 방류시킨다. 그 결과, 염도 증가, 해수 온도 상승, 탁도 증가, 화학첨가제 오염 등으로 해양생태계에 악영향을 끼치게 된다. 그러나, MVR 해수담수화 시스템은 담수 후 남은 농축수를 방류하는 대신에 ‘결정화 농축장치’를 통해 18% 이상의 고농도로 농축시켜 소금을 생산할 수 있도록 하여 생태계 악영향 감소 및 플랜트의 부가가치를 현저하게 높일 수 있다.

Table 6-1. Mineral composition and characteristics of sea waters

구분	일반해수	해양심층수	용암해수	미네랄 특성
	(단위: mg/kg)			
Na	10,762	11,000	10,510	혈액 내 pH 밸런스와 적정 수분유지 및 필수미네랄
Mg	1,294	1,270	1,295	심장동맥질화, 골다공증 예방, 콜레스테롤 수치를 낮춤
Ca	413	474	399	심장동맥질화, 골다공증 예방, 콜레스테롤 수치를 낮춤
K	387	403	400	혈압유지, 세포대사물질, 효소작용, 단백질 합성역할
Br	67	80.3	63.4	골다공증 예방, 충치발생 감소, 전립선암 유발감소
Sr	7.8	8.03	7.7	뇌막의 감염성 질화, 말초신경, 관절염, 피부질환 효과
Zn	0.00035	<0.005	0.019	전립선 기능 및 갑상선 기능에 필수, 인슐린 생성
Fe	0.00003	0.03	0.015	헤모글로빈과 미오글로빈 생산, 면역체계 유지
Mn	0.00002	<0.005	0.008	연골형성, 성호르몬 생성유지, 티록신 생산, 당뇨병치료
V	0.002	-	0.015	동맥경화 예방, 당뇨병 치료, 고지혈증 개선
Se	0.0001	<0.005	0.013	항암, 항산화 효과, 간기능 강화, 심근경색, 고혈압 예방
Ge	-	-	0.002	항암, 항바이러스, 혈압상승 억제, 칼슘대산 개선

Table 6-1은 주요 해수의 미네랄 함량 및 특성을 보여준다. Table 6-1에서 확인할 수 있듯이 MVR 해수담수화 시스템이 원수로 사용하고 있는 용암해수는 다른 해수와 비교했을 때 인체에 이로운 미네랄 성분이 많이 포함되어 있으며 특히 셀레늄(Se), 게르마늄(Ge) 등의 미네랄 성분이 포함되어 있어 소금으로 제조했을 시 상당한 고부가가치의 상품이 될 것으로 예상된다 [3].

Table 6-2는 세계 유명 소금의 미네랄 함량이며, Table 6-3은 국내에서 판매 중인 주요 소금의 미네랄 함량이다 [32-33]. Table 6-2에서 확인할 수 있듯이 용암해수로 제조한 소금은 마그네슘(Mg)과 칼륨(K)성분이 다른 소금보다 높으며 2차 제염 후 성분측정 결과 칼슘(Ca)성분이 국내에서 판매중인 태안자염과 비교했을 때 부족한 것을 확인할 수 있다. 마그네슘(Mg)성분은 소금이 쓴맛을 내기 때문에 필히 제어가 필요하며 칼슘(Ca)성분 또한 다른 소금과 균등하도록 제어가 필요하다.

Table 6-2. Mineral composition of famous salts

국가	구분	마그네슘 (Mg)	칼륨 (K)	칼슘 (Ca)	스트론튬 (Sr)	철 (Fe)	망간 (Mn)	구리 (Cu)	아연 (Zn)
		(단위: mg/kg)							
이탈리아	코마치오 천일염	1,576	613	1,406	32.73	80.57	9.30	1.39	0.85
	사보이안 원염	190	139	1,518	94.76	25.19	5.57	1.38	0.63
	사보이아 가공염	485	334	928	32.60	19.64	4.40	1.35	0.56
	C.I.S 가공염	519	288	655	16.96	23.05	3.13	1.30	0.68
	이탈칼리 암염	17	44	152	2.59	17.26	3.29	1.22	0.51
	피오치 천일염	454	252	2,311	183.75	18.03	3.80	1.20	0.63
슬로베니아	세코벨즈 스케	1,507	579	1,967	81.86	35.49	4.06	1.38	0.68
프랑스	카마르그 꽃염	539	549	1,072	17.28	19.98	2.94	1.30	0.57
	게랑드 꽃염	4,447	1,322	1,578	63.46	35.22	4.76	1.16	0.62
	게랑드 천일염	3,533	936	3,481	80.91	94.09	6.62	1.13	0.78
대한민국	전남산 천일염	9,645	3,465	1,296	65.63	24.48	7.70	0.97	0.66
	용암해수 소금	44,000	19,000	531	-	0.13	<0.1	0.90	0.15
	울릉도 심층수 소금	7,000	3,800	2,400	-	-	-	-	-
중국	중국산 천일염	4,240	936	990	45.42	58.34	4.80	0.99	0.62

Table 6-3. Mineral composition of major sea salt marketed in Korea

구분	천일염	중국산 천일염	정제염	울릉도심층 소금	용암해수	태안 자염	비고
	(단위: mg/kg)						
염(Na)	386,296	392,389	396,423	410,000	377,785	380,282	
마그네슘 (Mg)	14,045	7,298	33	7,000	6,367	9,569	
칼륨(K)	4,949	2,499	1,085	3,800	2,764	3,082	
칼슘(Ca)	903	797	132	2,400	722	12,784	태안자염 14배

6.1.1 용암해수 제염 및 Mg회수 실험

앞에서 언급했듯이 용암해수로 소금을 제조했을 시 Mg성분이 다량으로 함유되어 있어 쓴맛을 내기 때문에 Mg성분을 제어하는 것이 무엇보다 중요하다. 이에 Fig. 6-1와 같이 실험을 실시하였다.

본 실험은 용암해수 소금의 Mg성분을 제어하기 위한 것으로 실험방법은 용암해수 원수를 증발·건조하여 1차 소금을 생산한 후 잔류 농축수에 다시 용암해수 원수를 첨가하여 다시 증발·건조시켜 2차 소금을 생산한다. 2차 소금 제조 후 잔류 농축수에 NaOH를 첨가하여 마그네슘(Mg)을 제어하고 원심분리를 이용하여 침전물과 액을 분리시킨 후 잔류소금을 제조한다.

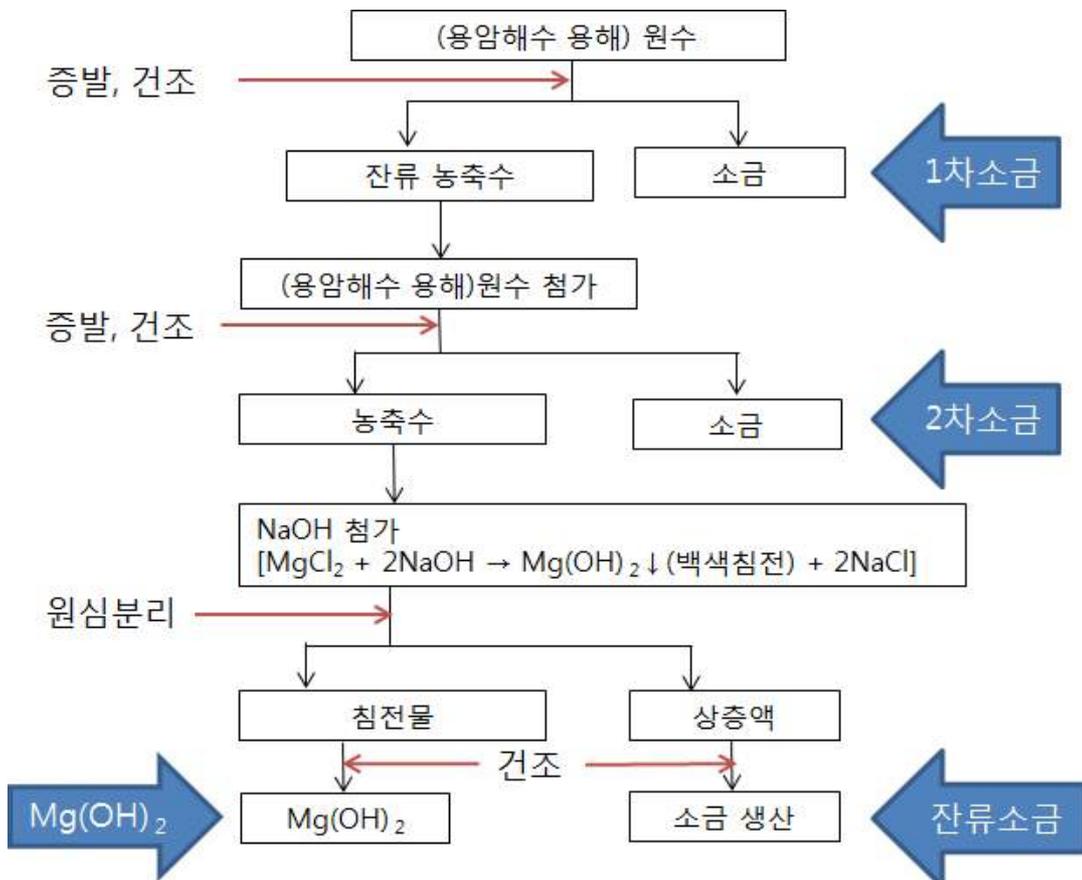


Fig. 6-1 Experimental method of salt production and Mg recovery

6.1.2 실험 결과

Table 6-4와 Fig. 6-2는 실험 단계별 주요 미네랄 함량을 보여준다. Table 21과 Fig. 38에 나타낸 바와 같이 마그네슘(Mg)을 제외한 주요성분은 대체적으로 일정하게 유지되며 마그네슘(Mg)성분은 침전물에 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.

Table 6-4. Major mineral composition at different stages of experimental process

용암해수	소금	1차생산	2차생산	Mg침전	잔류소금
	(단위: mg/kg)				
Na	319,793	370,957	377,785	147,682	322,324
Mg	22,399	8,473	6367	231,439	2,978
K	6,877	3,827	2,764	10,149	15,046
Ca	1,995	99	722	376	917

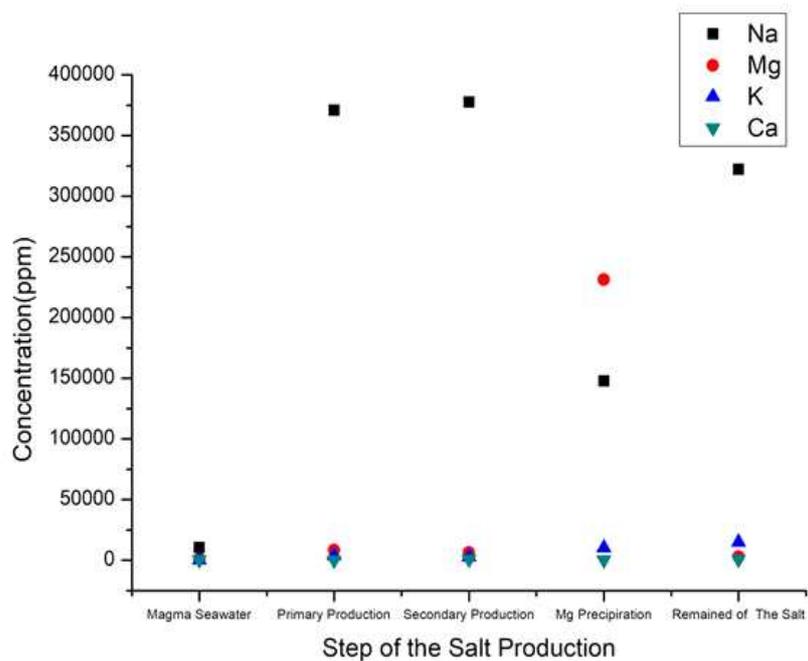


Fig. 6-2 Major mineral composition at different stages of experimental process

6.1.3 공정 개요

위 실험내용을 바탕으로 아래와 같이 2가지 방법으로 실험장치를 구상하였다.

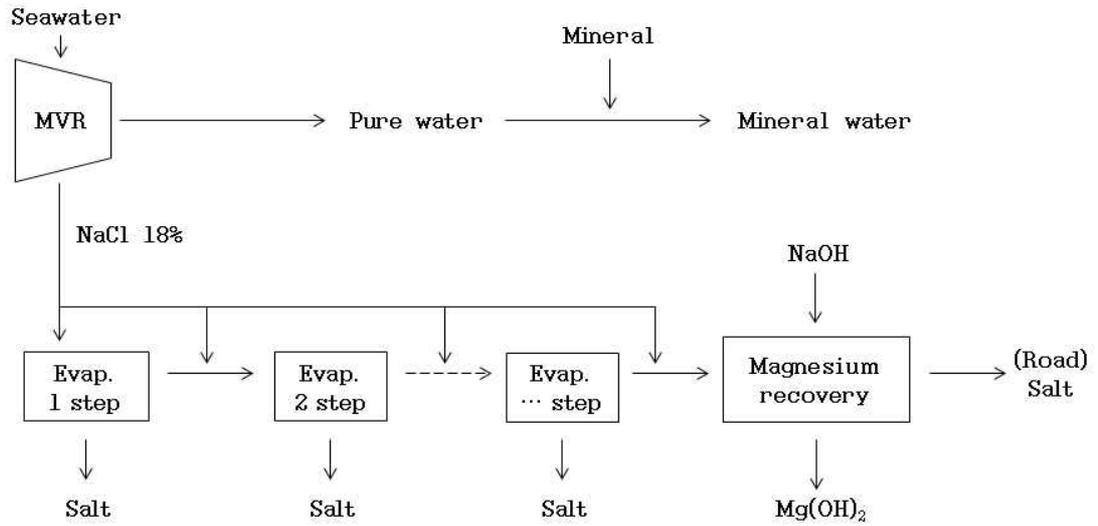


Fig. 6-3 Schematic representation of process-1

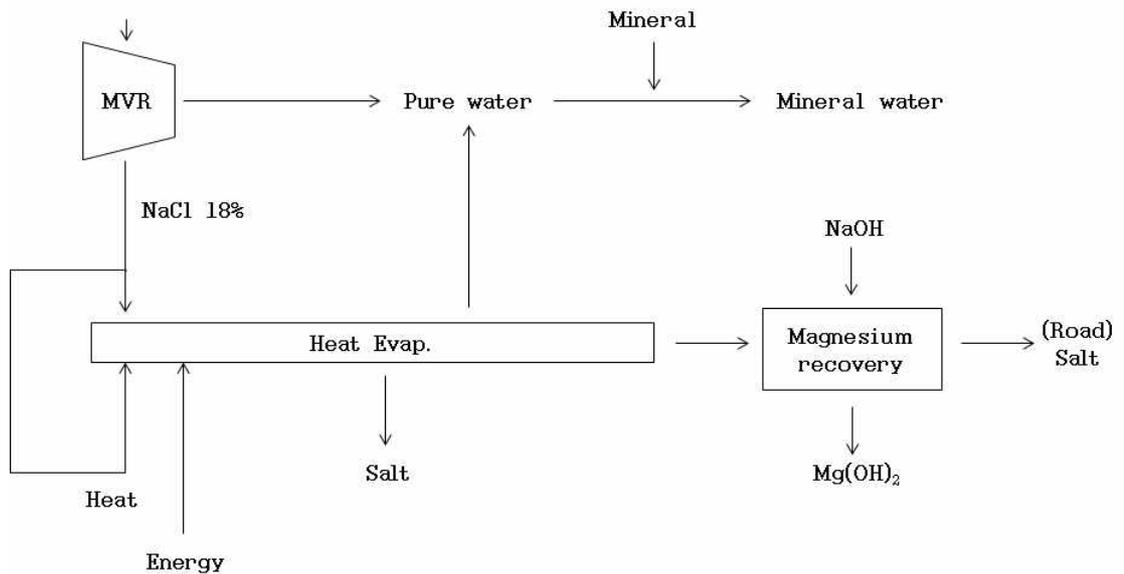


Fig. 6-4 Schematic representation of process-2

공정-1의 경우는 evaporator를 단계별로 따로 설치하여 소금을 제조하는 방법으로 마그네슘(Mg)제어에 유용하나 설치비가 비싼 단점이 있으며 공정-2인 경우, heat evaporator설치로 담수 생산이 소량이나마 가능하고 설치비가 상대적으로 적은 반면 증발에 필요한 energy 투입이 필요하고 마그네슘(Mg)제어가 상대적으로 부족할 수 있다.



Fig. 6-6 Salt production plant

Fig. 6-5는 MVR 해수담수화 시스템과 연계된 제염설비의 P&ID이며 이를 바탕으로 Fig. 6-6과 같이 제염설비를 구축하였다. 제염설비는 공정-2를 바탕으로 구축하였으며 화학약품(NaOH)을 사용하여 마그네슘(Mg)을 회수하는 설비는 생략하였다. 제염설비는 제염을 용이하기 위하여 원심분리기를 설치하였으며 조금 제조 후 농축염수를 순환하는 방식으로 설계되었다.



Fig. 6-7 Magma salt from salt production plant

본 실험은 제염설비의 성능을 예측하기 위한 예비실험으로서 설치시스템의 제염이 정상적으로 진행되고 있음을 보이고 있다. 그러나 제조된 소금이 크기가 천일염보다 작으며, 화학약품 사용 등으로 생략된 마그네슘(Mg)성분 등을 제어할 수 있는 방안을 모색하여야 하며 salt crystallizer에서 소금 결정이 생기기까지의 농축시간을 단축시키는 등 관련 연구를 지속적으로 진행하여야 할 것으로 보인다.

7. 저온 열원의 활용을 위한 TM변환 발전시스템 개발

7.1 서론

7.1.1 연구 배경 및 필요성

저온 폐열로부터 전력을 생산하는 것은 산업계에서 확대되는 주요한 기술 중의 하나이다. 대규모 기계 가공 및 전력발전 시설들은 작동 시 다양한 공정에서 다량의 열에너지가 발생하는데, 이와 관련하여 다양한 냉각 또는 HVAC(Heating, Ventilation, Air Conditioning) 시스템을 사용하게 된다. 특히, 이러한 시설들은 주위에 비해 20~30℃ 정도 밖에 높지 않은 폐열을 지속적으로 발생시키나 그 양이 많기 때문에 잠재적으로 유용한 에너지원이 되며 에너지 신소재 및 폐열 회수 기술의 개발과 함께 동력 생산(발전)에 효율적으로 적용될 수 있다 [34].

일반적으로 폐열 회수와 관련하여 현재 고려될 수 있는 발전 기술은 고가의 열전발전기(Thermoelectric generator) 및 형상기억 합금 활용 기술 등이며, 이들 방법을 통하여 열원과 열침원 사이의 비교적 크지 않은 온도차로부터 전력을 생산할 수 있다. 그 동안 폐열원의 발전 적용과 관련하여 상당히 다양한 형태의 열전 발전기 및 형상기억 합금 발전 시스템이 개발되었으며, 최근에는 카르노 엔진에 가장 가깝다고 할 수 있는 히트 엔진의 하나인 스텔링 엔진(Stirling engine)에 관한 연구도 꾸준히 이어오고 있다 [35].

본 연구는 에너지 하베스팅의 일환으로 40 ~ 50℃ 정도 저온의 버려지는 폐열원으로부터 효율적으로 전기에너지를 생산할 수 있는 TM(Thermal to Mechanical energy) 변환 발전기의 개발을 수행하였다. 본 연구에서는 기존의 방법(에너지 변환시스템)과 달리 주위보다 40 ~ 50℃ 정도 밖에 높지 않은 폐열원 등으로부터 효율적으로 기계적인 에너지 또는 전기에너지를 생산할 수 있는 시

시스템의 개발을 위하여 이론적 분석과 실증연구를 수행하였다. 모든 히이트 엔진과 마찬가지로 TM변환기도 열원과 열침원의 온도차가 작으면 이에 비례해 생산되는 기계적인 일도 작기 마련이며 특히 작동성이 부하에 민감하게 반응하게 된다. 따라서 TM변환 발전기의 두 주요 핵심 유닛인 TM변환기와 발전장치의 최적 설계와 제작 그리고 작동은 열에너지로부터 전기에너지를 생산하는 전체 시스템의 효율에 크게 영향을 미치게 되며 이에 대한 체계적인 이론적 분석과 실증적 연구·개발이 필수적이다.

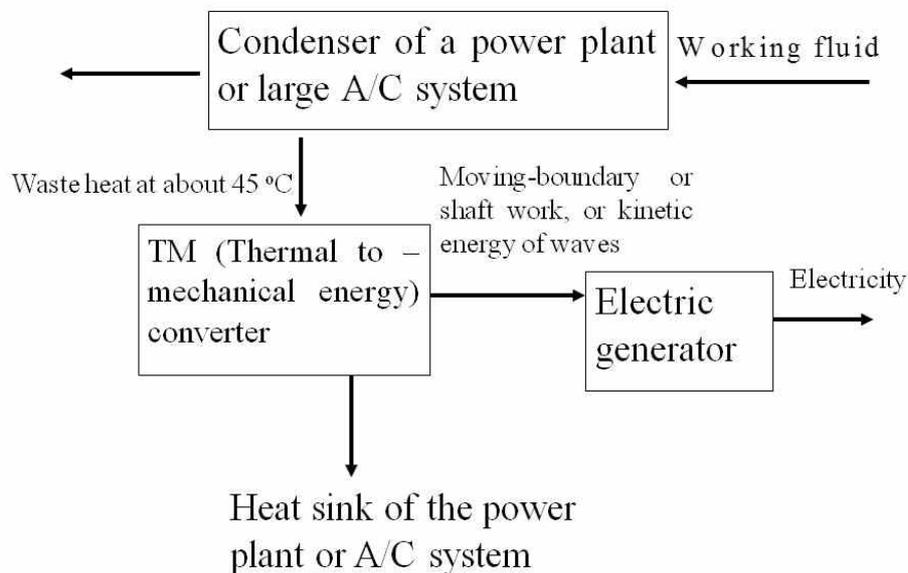


Fig. 7-1 Schematic representation of TM system

본 연구에서는 MVR 해수담수화 플랜트의 담수에서 지속적으로 발생되는 저온의 폐열원으로부터 효율적으로 전기에너지를 생산할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다. 이에 대하여 서로 다른 특성의 TM변환 발전기를 이용하여 저온도차에 따른 기계적 출력을 측정하고 분석에 따른 발전장치를 설계 및 제작하여 열에너지로부터 전기에너지를 생산하는 방안을 모색하였다.

저온도차 스텔링 엔진의 특성을 이용한 TM변환기의 경우, 온도차에 따른 출

력 측정을 진행하여 스텔링 엔진의 최대 기계적 에너지를 산출하고 AC generator와 Coil generator를 연계하여 전기 에너지를 생산하였다. 또한, 비접촉 슬라이딩 방식과 수직 접촉 분리 방식에서 작동하는 두 가지 다른 방식의 TENG (Triboelectric Generator)를 적용하여 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방법을 제시하였다.

이와 함께 본 연구에서는 가돌리늄의 자기적 특성을 이용한 변환기를 개발하였다. 가돌리늄의 특성을 이용한 변환기의 경우 저온도차스텔링 엔진과의 비교를 위해 같은 방식의 발전기를 연계하여 전기 에너지를 측정하였으며 서로 다른 특성의 TM변환 발전기의 비교분석을 통하여 TM변환 발전기의 효율 개선 및 개발 방안을 살펴보았다.

7.2 연구동향

지구의 한정된 자원은 인간이 다양한 에너지 자원을 생산하는 데 끊임없는 도전을 시도하게 하는 원동력이 되고 있다. 특히 심화되고 있는 기후 변화 현상은 무한한 동시에 청정한 에너지 자원에 대한 갈망을 불러일으키고 있다. 그러나 아쉽게도 우리는 우리 주위에 상존하는 많은 에너지원을 기술적인 한계 때문에 제대로 활용하지 못하고 있으며, 특히 열원의 온도가 낮을수록 그 활용 가능성도 비례하여 낮아진다고 할 수 있다. 일반적으로 열원과 열침원 사이의 온도차가 30°C 이하일 경우는 재래식 열동력 사이클로는 일을 생산하는 데에는 기술적으로 여러 가지 한계에 부딪히게 된다. 이와 같은 난제를 극복하기 위하여 그간 국내·외에서는 많은 연구가 이루어져 열전소자나 형상기억 합금을 근간으로 하는 열변환장치가 개발되었으며 오랫동안 여러 가지 용도로 이용되어 왔다. 전자의 경우, 인간의 체온을 열원으로 시계나 LED 조명 등에 많이 이용되었으나, 그 발전 효율이 카르노 효율에는 크게 미치지 못하여 큰 규모의 발전에는 그 적용 실적이 미미한 실정이다. 후자의 경우, 1970년대 이후 다양한 형태로 개발되었으며 특히 뜨거운 물이나 가스로부터 기계적인 일을 생산하는 데에 활용되어 왔다 [36]. 그러나 이 방법도 전자와 마찬가지로 그 효율성에 있어 적지 않은 문제를 안고 있다. 형상기억 합금은 그 자체가 지니고 있는 큰 열용량 때문에 온도 변화에는 일정한 시간을 필요로 할 뿐 아니라 비용 면에서도 이를 이용한 큰 규모의 TM변환 시스템 제작은 경제성이 없는 것으로 알려져 있다.

주위와 온도차가 작은 열원으로부터 일을 생산하기 위한 열변환기는 앞서 소개한 방법 외에도 다양한 시도가 있었는데 그 중 하나가 열에너지를 물질파(음향에너지)로 변환하는 개념이다. 음향 레이저의 개념은 오래 전에 제안되어 왔으며 다양한 형태의 입력 에너지에 대한 연구가 진행되었다. 최근에 새로이 개발된 음향에너지는 약한 전원 공급을 사용하여 테라 헤르츠 주파수 범위의 고주파를 생산해 낼 수 있다. 특히 미국의 연구팀에 의해 TA 레이저로 알려져 있는 소형 열음향 에너지 변환장치가 소개되었는데, 효과적으로 저온의 폐열을 음향에너지로 변환시킬 수 있는 것으로 알려졌다. 음향 에너지는 직접적으로 냉동 및 극저

온에 적용 가능하며, 압전효과(piezoelectricity) 등을 사용하여 전기를 생산할 수도 있다 [36].

기존의 열음향 에너지의 적용성은 입증되었으며, 그 동안 지속적으로 다양한 TA 쿨러 및 극저온 장치들이 개발되고 실험되어왔다. 과학자들과 엔지니어들은 보다 효율적으로 음향에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 새로운 재료와 방법에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 TM (Thermal to Mechanical energy) 변환 발전기는 2007년에 태국의 한 대학에서 소개한 바 있는 재생기를 장착한 열변환기를 근간으로 하고 있으며, 낮은 온도의 열원으로부터 기계적인 일이나 압력파를 발생시키는데 비교적 효율적으로 적용될 수 있는 것으로 보고된 바 있다 [37].

7.3 이론적 배경

7.3.1 스텔링 엔진(Stirling Engine)

스텔링 엔진의 사이클을 이론적으로 해석하는 방법으로는 (1)이상적인 스텔링 사이클 해석, (2)Schmidt의 등온(isothermal) 사이클 해석, (3)Finkelstein의 단열(adiabatic) 사이클 해석, 그리고 (4)Finkelstein의 nodal 해석 방법 등이 있다. 이 중 본 연구에서는 Schmidt 사이클 해석을 연구대상으로 하였다. Schmidt의 등온 해석 방법은 실제 엔진에 비하여 상당히 이상화되어 있지만 엔진 설계에서 많이 이용되고 있다. 이 방법에서는 압축과 팽창 과정을 등온이라고 가정한다 [38].

1) Schmidt 등온 해석 방법

Schmidt 등온 해석 방법은 피스톤의 왕복 운동이 조화 운동일 때 그리고 재생기는 완벽하다는 가정 하에서 적용할 수 있다.

가) Schmidt 등온 해석에서 적용되는 가정

이론적 해석에서는 실제 엔진 상황을 그대로 묘사할 수 없다. 그러므로 등온 해석에서는 다음과 같은 가정을 필요로 한다.

- ① 재생 과정은 완벽하여 재생기의 효율은 1이다.
- ② 순간 압력은 계 전체에서 동일하다.
- ③ 작동 유체는 이상 기체 상태 방정식을 만족한다.
- ④ 작동 유체의 누설은 없으며 계 내의 질량은 항상 일정하다.
- ⑤ 실린더 벽과 피스톤의 온도는 일정하다.
- ⑥ 계에서는 정상 상태를 만족한다.

나) 기본 방정식

계 내의 작동유체는 이상 기체 방정식을 만족한다. 즉 순간에서의 상태는 다음 식으로 계산된다.

$$PV = MRT \quad (7.1)$$

팽창 공간에서 순간 작동 유체의 체적(V_c)은 다음 식으로 계산된다.

$$V_c = \frac{1}{2} V_E (1 + \cos \phi) \quad (7.2)$$

여기서, V_E 는 팽창 공간의 최대 체적이며 ϕ 는 피스톤 크랭크 각이다.

압축 공간에서 순간 작동 유체의 체적(V_c)은 위상각(휠의 원주각) α 를 포함하며 다음 식으로 계산된다.

$$V_c = \frac{1}{2} \kappa V_E [1 + \cos(\phi - \alpha)] \quad (7.3)$$

여기서, κ 는 팽창 공간과 압축 공간의 최대 체적 비이다.

또한 불용 공간(Dead space)에서의 체적(V_D)은 정의에 의해서 다음과 같이 계산된다.

$$V_D = XV_E \quad (7.4)$$

여기서, X 는 불용 공간과 팽창 공간의 최대 체적 비이다. 팽창 공간에서 순간 작동 유체의 질량은 기체의 상태 방정식에서 계산된다. 팽창 공간(M_e), 압축 공간(M_c) 그리고 불용 공간(M_d)에서의 작동 유체의 질량은 다음 식으로 계산된다.

$$M_e = \frac{(P_e V_e)}{(RT_e)} \quad (7.5)$$

$$M_c = \frac{(P_c V_c)}{(RT_c)} \quad (7.6)$$

$$M_d = \frac{(P_d V_d)}{(RT_d)} \quad (7.7)$$

계 내에서 작동 유체의 질량(M_T)은 일정하므로 다음 식을 만족한다.

$$M_T = M_e + M_c + M_d = \frac{KV_E}{2RT_c} \quad (7.8)$$

순간 압력은 계 내에서 p 로 일정하며 순간 온도 T_e (팽창 공간에서 작동 유체의 순간 온도), T_c (압축 공간에서 작동 유체의 순간 온도)가 T_E (팽창 공간에서 작동 유체의 온도)와 T_C (압축 공간에서 작동 유체의 온도)로 일정하다고 가정하여 식 7.8을 정리하면 다음 식이 된다.

$$\frac{K}{p} = \left(\frac{T_C}{T_E}\right)(1 + \cos \phi) + \kappa [1 + \cos(\phi - \alpha)] + \frac{(2V_D T_C)}{(V_E T_D)} \quad (7.9)$$

재생기의 불용 공간에서 작동 유체의 온도(T_D)는 선형적으로 변한다고 가정하면 재생기에서의 온도는 다음 식이 된다.

$$T_D = T_C + \frac{1}{2}(T_E - T_C) = (1 + \tau)\left(\frac{T_C}{2}\right) \quad (7.10)$$

여기서, τ 는 $\frac{T_C}{T_E}$ 이다.

식 7.10을 식 7.9에 대입하면

$$\frac{K}{p} = \tau(1 + \cos \phi) + \kappa[1 + \cos(\phi - \alpha)] + 2S \quad (7.11)$$

이 되며 $S = \frac{2X\tau}{(\tau+1)}$ 이다.

$A = (\tau^2 + 2\tau\kappa \cos \alpha + \kappa^2)^{\frac{1}{2}}$, $B = \tau + \kappa + 2S$ 그리고 $\delta = \frac{A}{B}$ 로 두면 식 7.11에서 p 에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$p = \frac{K}{B[1 + \delta \cos(\phi - \theta)]} \quad (7.12)$$

여기서 $\theta = \tan^{-1} \frac{(\kappa \sin \alpha)}{(\tau + \cos \alpha)}$ 이다.

식 7.12에서 최소 압력은 $(\phi - \theta) = 0$ 일 때 그리고 최대 압력은 $(\phi - \theta) = \pi$ 일 때 생기는 것을 알 수 있으며 $p_{\min} = \frac{K}{B(1 + \delta)}$ 이며 $p_{\max} = \frac{K}{B(1 - \delta)}$ 이다. 그러므로 순간 압력은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$p = \frac{p_{\max}(1 - \delta)}{1 + \delta \cos(\phi - \theta)} \quad (7.13)$$

$$p = \frac{p_{\min}(1 + \delta)}{1 + \delta \cos(\phi - \theta)} \quad (7.14)$$

이때 압력비 p_r 은

$$p_r = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{(1 + \delta)}{(1 - \delta)} \quad (7.15)$$

이 된다.

다) 평균 압력

계 내에서 평균압력은 다음과 같이 한 사이클에 대해서 적분하여 구한다.

$$\begin{aligned} p_{mean} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d(\phi - \theta) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p \left[\frac{p_{max}(1 - \delta)}{1 + \delta \cos(\phi - \theta)} \right] d(\phi - \theta) \end{aligned} \quad (7.16)$$

이 식을 적분하면

$$p_{mean} = p_{max} \left[\frac{(1 - \delta)}{(1 + \delta)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.17)$$

이 된다. 그리고 식 7.13과 식 7.17를 이용하면 시스템 내의 순간 압력을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p = \frac{p_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}}}{[1 + \delta \cos(\phi - \theta)]} \quad (7.18)$$

라) 열전달량과 일

팽창과 압축이 등은 상태에서 일어나므로 열전달량 Q 와 일 P 는 같다. 즉

$$Q = P = \int p dV \quad (7.19)$$

마) 팽창공간에서의 열전달량과 일

팽창공간에서의 체적에 대한 식 7.2와 압력에 대한 식 7.14를 식 7.19에 대입하면 다음 식이 된다.

$$Q = \oint pdV = \oint \frac{-p_{\min}(1+\delta)V_E \delta \sin\phi}{2[1+\delta \cos(\phi-\theta)]} d\phi \quad (7.20)$$

식 7.20을 적분하면 팽창 공간에서 다음 식과 같이 열전달량을 구할 수 있다. 이 때 식 7.17이 이용된다.

$$Q = \frac{\pi p_{mean} V_E \delta \sin\theta}{[1+(1-\delta^2)^{\frac{1}{2}}]} \quad (7.21)$$

바) 압축 공간에서의 열전달량과 일

팽창 공간에서 순간 체적은 식 7.3을 이용하고 압력에 대한 식 7.14를 이용하여 식 7.21에 대입하면 다음 식이 된다. 이 때 식 7.17이 이용된다.

$$Q_C = \frac{\pi p_{mean} V_E \kappa \delta \sin(\phi-\alpha)}{[1+(1-\delta^2)^{\frac{1}{2}}]} \quad (7.22)$$

사) 효율 계산

식 7.21을 식 7.22로 나누면

$$\frac{Q}{Q_C} = \kappa \left(\frac{\cos\alpha - \sin\alpha}{\tan\alpha} \right) \quad (7.23)$$

이 되며 $\theta = \tan^{-1}\left[\frac{\kappa \sin \alpha}{(\tau + \kappa \cos \alpha)}\right]$ 을 이용하면

$$\frac{Q}{Q_C} = -\tau \quad (7.24)$$

가 된다. 팽창공간에서 열전달량은 압축공간에서의 열전달량에 비해 음의 부호를 갖는다. 그리고 압축과 팽창 공간에서 일은 앞서서와 같은 관계가 있으며 $P_C = -\tau P_E$ 가 된다. 그러므로 net work는 $(1 - \tau)Q$ 이다. 그러므로 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{heat } plied - \text{heat rejected}}{\text{heat } plied} = 1 - \tau = \frac{T_E - T_C}{T_E} \quad (7.25)$$

아) 시스템 내의 질량 변화

시스템 내의 질량 변화를 예측하는 것은 작동 유체의 거동을 파악하는데 이용된다. 팽창 공간에서의 순간 질량은 이상 기체 상태방정식과 순간 체적과 압력으로 구해진다. 식 7.2와 식 7.18 그리고 이상 기체 상태방정식을 이용하면 시스템 내의 순간 질량이 다음과 같이 계산된다.

$$M_e = \frac{\frac{1}{2} V_E p_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} (1 - \cos \phi)}{RT_E [1 + \delta \cos (\phi - \theta)]} \quad (7.26)$$

그리고 순간 질량의 변화율은 식 7.26을 미분하여 구한다.

$$\frac{d}{d\phi} M_e = \frac{V_E p_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} [\delta [\sin(\phi - \theta) - \sin\theta] - \sin\phi]}{2RT_E [1 + \delta \cos(\phi - \theta)^2]} \quad (7.27)$$

압축 공간에서 순간 질량과 질량 변화량은 위와 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$M_c = \frac{\frac{1}{2} V_E \kappa p_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} [1 + \cos(\phi - \alpha)]}{RT_C [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]} \quad (7.28)$$

$$\frac{d}{d\phi} M_c = \frac{V_E \kappa p_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} [\delta [1 + \sin(\phi - \theta) + \sin(\alpha - \theta)]]}{RT_C [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]} \quad (7.29)$$

불용 체적 내에서의 순간 질량과 질량 변화율은 다음과 같이 계산된다.

$$M_d = \frac{X V_E p_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}}}{RT_D [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]} \quad (7.30)$$

$$\frac{d}{d\phi} M_d = \frac{X V_E p_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} \delta \sin(\phi - \theta)}{RT_D [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]^2} \quad (7.31)$$

각 질량 변화량의 합은 0이 된다. 그러므로 작동 유체 전체 질량은 일정하므로 전체 질량은

$$M_T = \frac{[V_E P_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} \tau (1 + \cos\phi) + \kappa [1 + \cos(\phi - \alpha)] + 2S]}{2RT_C [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]} \quad (7.32)$$

이 되고 $\phi = 0$ 일 때, 식 7.32는 다음 식과 같다.

$$M_T = \frac{V_E P_{mean} (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} \tau + S + \frac{\kappa}{2} (1 + \cos \alpha)}{RT_C [1 + \delta \cos \theta]} \quad (7.33)$$

자) 무차원 단위로 표시된 열량과 엔진 출력

작동유체 단위 질량당 열량은 식 7.21과 식 7.33을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{mass} &= \frac{Q}{M_T RT_C} \\ &= \frac{\pi \delta \sin \theta (1 + \delta \cos \theta)}{(1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}} [1 + (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}}] [\tau + S + (\frac{\kappa}{2})(1 + \cos \alpha)]} \end{aligned} \quad (7.34)$$

이와 유사하게 단위 질량당 출력도 다음과 같이 표시된다.

$$P_{mass} = (1 - \tau) Q_{mass} \quad (7.35)$$

팽창 공간과 압축 공간의 체적의 합은 다음과 같이 표시된다.

$$V_T = (V_E + V_C) = (1 + \kappa) V_E \quad (7.36)$$

식 7.36을 식 7.17, 식 7.21과 결합하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$Q_{max} = \frac{Q}{(p_{max} V_T)} = \frac{\pi [(1 - \delta)^{\frac{1}{2}} \delta \sin \theta]}{(1 + \kappa) (1 + \delta)^{\frac{1}{2}} [1 + (1 - \delta^2)^{\frac{1}{2}}]} \quad (7.37)$$

$$P_{max} = (1 - \tau) Q_{max} \quad (7.38)$$

7.3.2 가돌리늄(Gadolinium)

1) 가돌리늄의 물리적 성질

가돌리늄은 연성과 전성이 있는 은백색의 희토류 금속으로서 공기 중에서는 표면이 쉽게 산화되어 옅은 노란색을 띤다. 가돌리늄의 녹는점은 1,313°C, 끓는점은 3,273°C 이며, 25°C 에서의 밀도는 7.90g/cm³ 이다. 실온에서 육방조밀격자 구조를 하는 α-형으로 존재하는데, 가열하면 1,235°C에서 체심입방(bcc) 구조를 갖는 β-형으로 전환된다.

특히 가돌리늄은 20°C 이하에서는 강자성(ferromagnetic, 외부에서 자기장을 걸면 자석이 되고 자기장을 제거한 후에도 자석 성질이 남아있는 특성)을 띠나, 이보다 높은 20°C 이상의 온도에서는 강한 상자성(paramagnetic, 외부에서 자기장을 걸면 약한 자석의 성질을 띠며 자기장을 제거하면 자석 성질이 없어지는 특성)을 띠는 성질을 갖고 있다. 또한, 자기장 속으로 들어가면 온도가 올라가고 자기장 밖으로 나오면 온도가 내려가는 자기열량 효과(Magnetocaloric effect)를 보인다 [39].

2) 가돌리늄의 기술적 적용

가돌리늄은 널리 사용되지는 않으나 몇몇 특정한 분야에서 소량씩 사용되는데, 그 중 하나는 의료 진단용 자기공명영상(MRI) 촬영에서 암과 같은 이상 조직의 이미지를 선명하게 보이도록 하는 조영제로 사용하는 것이다 [40].

또한, 가돌리늄이 갖고 있는 열중성자 흡수 성질을 이용하여 원자로와 중성자 투과검사법에서 중성자 차폐물 등으로 사용되며 중수형 원자로에서 급히 핵반응을 감속시킬 시에도 사용된다. 또한 합금첨가체로서 철(Fe)과 크로뮴(Cr)의 고온 내산화성과 가공성을 향상시키기 위한 재료로도 사용된다 [41].

가돌리늄-규소-저마늄 합금($Gd_5Si_2Ge_2$)은 실온에서 큰 자기열량 효과 (magnetocaloric effect: 자기장의 변화에 따라 온도가 변하는 것)를 보이고 있어 실온 자기 냉각에 유용하게 사용될 수 있으며, 가돌리늄 화합물은 브라운관 컬러 TV 등에서 녹색 형광체로 사용된다. 이 밖에 가돌리늄 이트륨 가넷 ($Gd:Y_3Al_5O_{12}$)은 전자 오븐(마이크로파 오븐)에서의 마이크로파 발생 소자에 사용되며, 가돌리늄 갈륨 가넷(GGG, $Gd_3Ga_5O_{12}$)은 모조 다이아몬드와 광학 부품으로 사용되는 등 다양한 방법으로 기술적인 적용이 이루어지고 있다 [42].

7.4 실험장치 및 실험방법

7.4.1 저온도차 스텔링 엔진을 활용한 TM변환 발전시스템

1) Mechanical Power

스텔링 엔진은 히트 엔진(열기관)의 일종이므로 그 최대 출력은 두 열원(열원과 열침원)의 온도차에 근거하여 산출할 수 있다. 본 연구에서 사용된 스텔링 엔진은 American Stirling Company에서 제작된 것이나 [43], 본 연구에서는 세부 연구 목적에 따라 이를 여러 형태로 변형하여 사용하였다.

본 연구에서는 저온도차 스텔링 엔진의 기계적 출력을 측정하기 위해 높이 약 2m 정도의 선반 위에 핫플레이트를 올려놓은 후 스텔링 엔진 하판부를 가열하여 작동을 위한 열에너지를 공급하였다. 스텔링 엔진의 중심축 부분에 추를 연결하여 바닥으로부터 추가 일정한 속도로 올라가는 시점부터 상단 끝까지 올라오는 동안의 평균 속도를 구해 온도차별 출력을 계산하였으며 속도 분석을 위해 영상 카메라를 이용하여 녹화를 진행하였다. 한편, 스텔링 엔진과 핫플레이트는 흔들림이 없도록 고정하여 추가 엔진의 작동에 따라 일직선으로만 움직일 수 제작하였다. 온도 및 추의 무게 등의 변수를 바꿔가며 실험을 진행하였다. 온도의 측정은 열전대를 가열부와 방열부에 각각 접촉시켜 측정하였으며 데이터 로거에 외부 저장장치를 연결하여 데이터 값을 저장하였다.

본 연구에서 사용된 저온도차 스텔링 엔진은 각기 다른 크기로 제작되어 각각 걸리는 토크가 다르게 측정되는데 그 계산은 토크의 일반식 $F \times r$ 로서 그 (최대)크기는 힘에 반지름을 곱한 값으로 구할 수 있다. Fig. 7-2는 기계적 출력 산출을 위한 실험 장치의 구성을 개념적으로 나타낸 것이며, Fig. 7-3는 본 실험에서 사용한 실제 측정 장치의 주요 구성 요소를 보여 주고 있다.

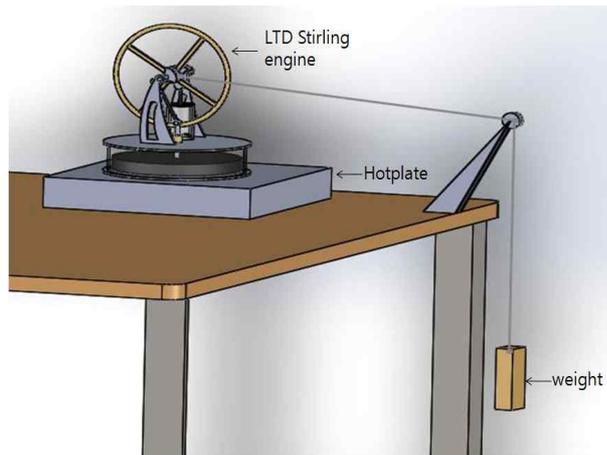


Fig. 7-2 System design for mechanical power measurement



Fig. 7-3 Experimental setup for mechanical power measurement

2) Electrical Power

본 연구의 주요 목적인 저온도차 스텔링 엔진의 전기적 출력은 엔진 작동에 따라 회전하는 구동축(또는 이에 연결된 휠)에 Faraday 법칙에 따른 발전 장치를 장착함으로써 구해 볼 수 있다. 가장 간단한 방법으로는 우선 generator를 연결하여 발전하는 방식을 생각해 볼 수 있으며, 엔진의 회전하는 휠에 AC 또는 DC generator를 연결하여 전기적 출력을 얻는 방법이다. 또 다른 방법은 자석과 코일을 이용하여 전기를 얻는 방법으로 회전하는 휠에 자석을 부착하고 이를 정면으로 마주보는 고정 휠에는 원형으로 감겨진 다수의 코일을 아주 작은 간격을 두고 배치해 자석과 코일 간의 상호 작용에 의해 발생하는 유도전류를 이용하는 것이다. 그 밖에 마찰전기(Triboelectric nanogenerator: TENG)를 이용하는 방법도 고려할 수 있는데, 본 연구는 이들 각 방법의 적용에 의한 발전의 효율성을 실험적으로 측정·분석하였다.

가) AC Generator

본 연구에서는 generator를 연결하여 저온도차 스텔링 엔진으로부터 전기적 출력을 생산하였는데, 엔진의 휠 측에 동일한 직경 $\text{Ø}120\text{mm}$ 의 크기로 제작한 플라스틱 휠을 접착시킨 후 generator에 연결하였다. 이 때, 기어비는 약 1:15 정도이고 스텔링 엔진의 토크가 강하지 않은 점을 고려하여 최대한 마찰손실이 일어나지 않고 generator가 용이하게 작동할 수 있도록 실을 연결하는 형태로 실험을 진행하였다. AC출력은 AC-DC 컨버터를 이용하여 DC 출력으로 변환하고 캐패시터를 발전소자에 연결하여 일정한 출력을 얻도록 하였으며, 부하로 $2\text{k}\Omega$ 의 소형 LED를 사용하였다. 본 연구에서는 generator를 1개에서 3개까지 직렬로 연결하여 얻을 수 있는 전기적 출력을 측정해 보았다. Fig. 7-4와 Fig. 7-5는 각각 본 실험에 대한 개략도와 실제 실험이 진행되고 있는 모습을 보여주고 있다.

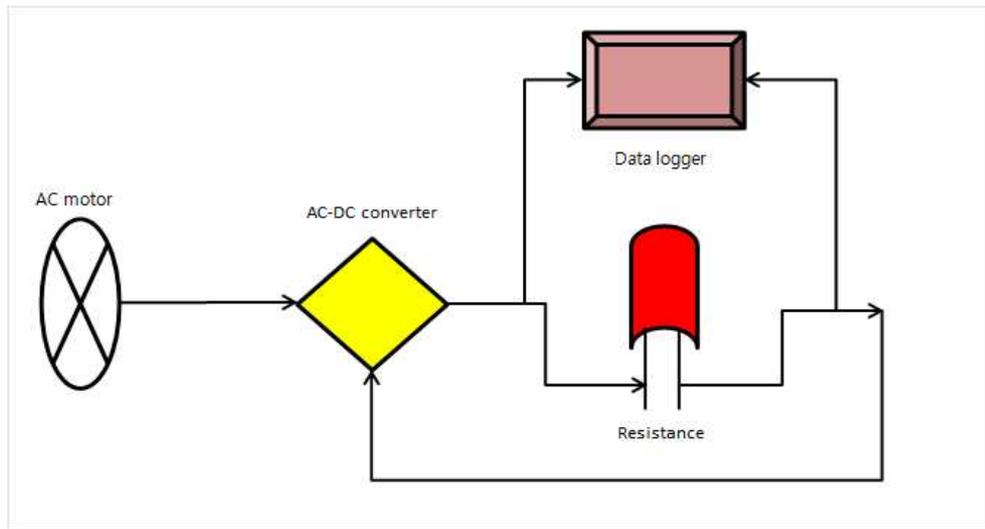


Fig. 7-4 Schematic representation of MM-7 electric generator

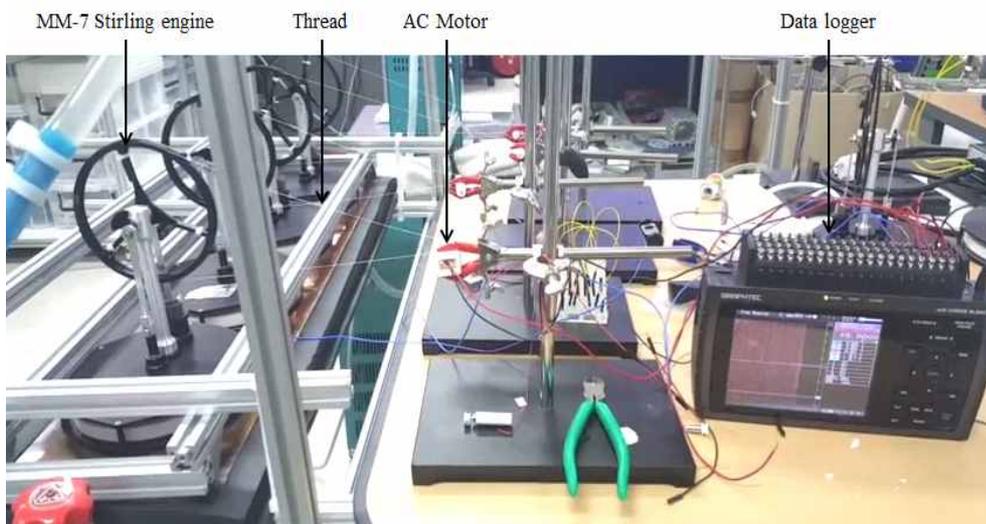


Fig. 7-5 Experimental output of MM-7 engine

나) Generator Coil (Stator coil)

본 연구에서 고려한 또 다른 방법은 전술한 바와 같이 스텔링엔진의 작동과 함께 회전하는 휠(회전자)에 일정 수의 자석을 장착하고 이와 마주보는 휠(고정자)에 원형으로 감겨진 다수의 코일을 부착하는 방법을 고려할 수 있다. 즉, 회전자에 장착된 자석이 회전하면서 코일을 건드리지 않도록 고정자를 배치하면 회전자와 함께 자석이 회전하면서 이와 마주보고 있는 코일을 관통하는 자력선이 지속적으로 변화하면서 기전력을 발생시키고 이에 따라 유도 전류를 발생시키게 된다. 회전자는 스텔링 엔진의 플라이휠에 3D프린터를 이용하여 직경 135mm의 magnet holder를 제작한 후 직경 10mm, 높이 10mm의 원통형 네오디움 자석을 36°마다 장착시키는 형태로 제작되었다. 한편, 고정자의 원형 코일은 그 권선수가 약 750회이며, 9개의 코일을 피스톤 축이 지나가는 경로인 하부를 제외하고 3D프린터를 이용하여 coil holder를 제작한 후 자석과 마찬가지로 36°마다 하나씩 붙여 넣어 완성하였다. Fig. 7-6 (a)는 플라이휠 회전자에 부착된 자석의 형태와 배열을 보여주고 있으며, (b)는 고정자에 부착된 코일의 실제 모습을 보여주고 있다. 한편, (c)는 스텔링 엔진의 작동 상태 하에서 본 연구에서 설계·제작한 generator coil의 실제 모습을 보여주고 있다. 여기서 전압과 출력의 측정 및 산출은 전술한 AC generator에서 적용한 방법의 경우와 동일하다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7-6 Experimental output measurement using the generator coil:
(a) Stirling engine (b) Generator coil (c) Stirling engine with generator coil

다) TENG(TriboElectric NanoGenerator)

TENG의 작동 원리와 구조를 Fig. 7-7에 나타내었다. TENG는 세그먼트 디스크 모양의 알루미늄 전극 2개와 FEP(Fluorinated Ethylene Propylene) 필름 (테플론 필름의 일종)으로 코팅된 아크릴 세그먼트로 구성되어 있다. FEP가 음전하(전자를 쉽게 얻음)를 갖는 동안 Al은 양의 표면을 가지기 쉽고(전자를 쉽게 잃는다), FEP 필름 및 Al 전극은 마찰 전기 표면으로 작용한다 [44-47].

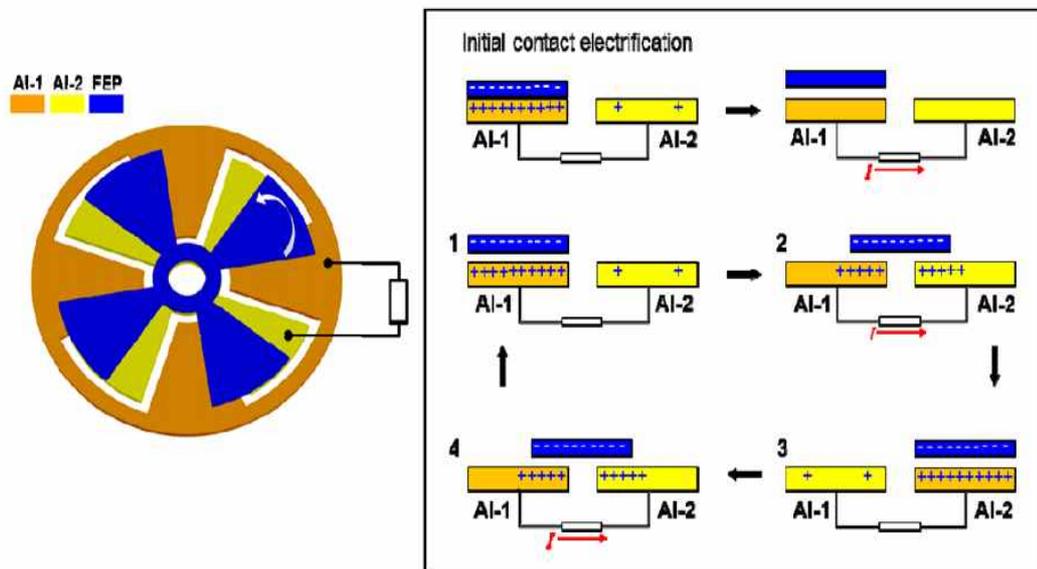


Fig. 7-7 Schematic representation of TENG operation

TENG에 의해 에너지가 생성되는 메카니즘은 두 가지 주요 단계, 즉 (1)초기 접촉 대전 단계와, (2)순환 회전 정전 유도 단계가 있다. 우선 첫 번째 단계에서는 FEP 세그먼트는 알루미늄 층과 접촉하게 되는데, 두 표면의 극성이 다르기 때문에 전자는 알루미늄에서 FEP 표면으로 보내지고 그 결과 FEP 표면에 순 음전하가 발생하고 알루미늄에 순 양전하가 생기게 된다. 이어서 두 번째 단계에서는 두 개의 층 사이에 0.5 ~ 1mm 두께의 공기 매질을 형성한 상태에서 FEP 세그먼트를 A1에서 A2로 회전시킴에 따라 전자는 A2에서 A1로 이동하게 된다. 그 결과 FEP 표면의 이동하지 않는 음전하에 의해 생성된 전위차를 무효화하게

되며 전술한 첫 번째 단계와 함께 에너지 변환과정의 전반부를 구성한다. 세 번째 단계에서는 FEP가 A2의 겹쳐진 위치에 도달하고 대다수의 전자가 A1로 이동하게 되어 A2에는 대부분 양이온만이 있게 되며, 그 후 A1을 향해 FEP 세그먼트가 이동하게 된다. 따라서 네 번째 단계에서는 전자는 A1에서 A2로 되돌아가 FEP 세그먼트가 원래 위치로 돌아갈 때까지 반대 방향으로 전류를 발생시키는데 세 번째 단계와 같이 에너지 변환과정의 후반부를 이룬다 [48-51].

(1) TENG 슬라이딩 방식

Fig. 7-8은 슬라이딩 방식에서 작동할 때 실제 TENG-LTD 열엔진의 모습을 나타낸다. LTD 열엔진을 구동하기 위해 핫플레이트 (600W, 최대 온도 380°C)를 사용하였으며 LTD 열엔진의 고온 및 저온의 평균 온도는 약 98°C 및 23.6°C ($\Delta T = 74.4^\circ\text{C}$)로 측정되었다.

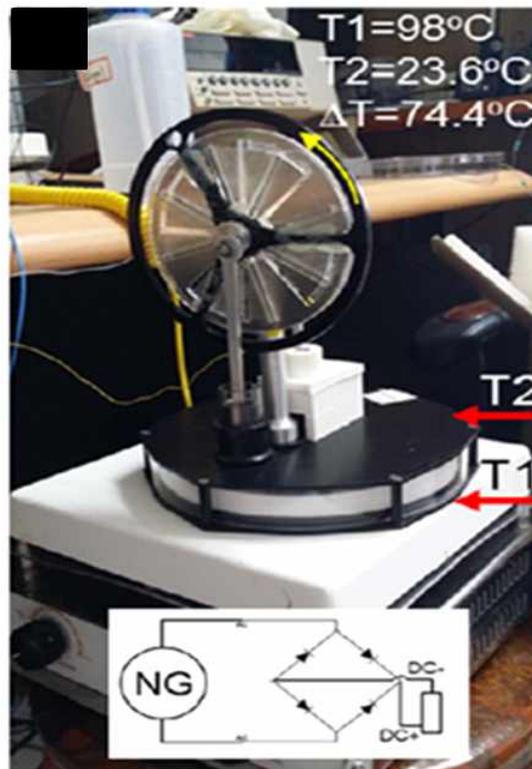


Fig. 7-8 Experimental layout of TENG operation by a LTD heat engine placed on an electric plate heater

(2) 슬라이딩 방식과 수직 접촉 분리방식을 적용한 TENG

수직 접촉 분리 모드로 작동하는 TENG는 LTD 열엔진에서 디스플레이서의 움직임을 제어하는 축에 결합하였다. 이는 엔진의 파워 피스톤에 연결된 휠의 회전 운동으로 축이 반복적으로 위아래로 움직이기 때문에 슬라이딩 방식으로 작동시키는 것 외에도 수직 접촉 분리 모드로 작동하는 TENG를 적용할 수 있기 때문이다. 즉, 하나의 TENG는 엔진의 회전하는 휠을 통해 슬라이딩 방식으로 작동하고 다른 TENG는 위에서 언급한 수직 접촉 분리 방식으로 작동할 수 있다. Fig. 7-9는 LTD 열엔진에 통합된 2개의 상이한 TENG 작동방식을 동시에 적용한 모습을 나타낸다. 여기서, TENG-2는 수직 접촉 분리 모드로 작동하는 TENG를 말하며, 슬라이드 유리 기판 및 그 위에 위치한 두 개의 전극으로 구성된다. 이 중 하나는 FEP 필름과 Al 박층의 두 층으로 구성되며 다른 하나는 Al 박층만을 갖는 형태이다.

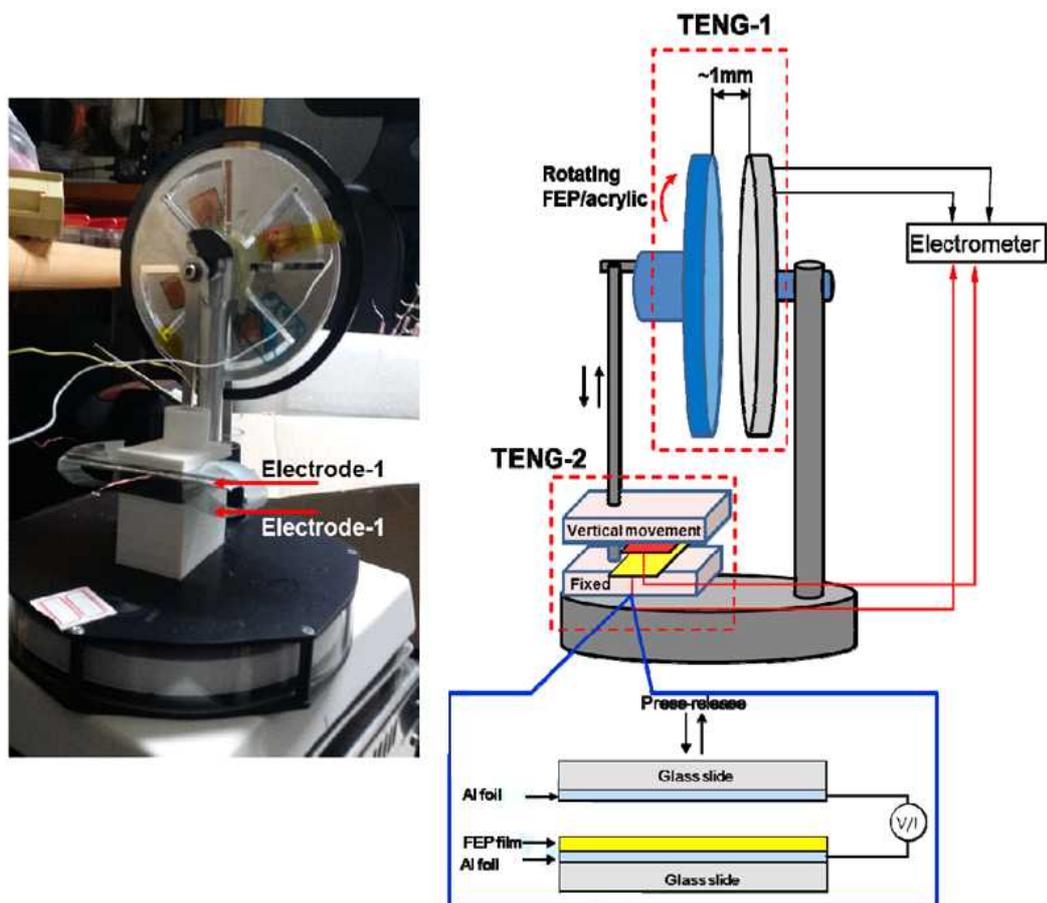


Fig. 7-9 Two TENGs integrated into LTD heat engine

7.4.2 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전시스템

1) Mechanical Power

본 연구에 사용된 가돌리늄은 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 사이즈의 정육면체 형태의 블록으로 가공되었으며, 총 16개의 가돌리늄 블록을 회전축에 부착하여 발전 장치의 근간인 로우터(rotor)를 제작하였다. 가돌리늄의 온도변화에 따른 자성변화를 이용하여 용이하게 로우터의 회전 운동을 유발시킬 수 있도록 발전장치를 설계하였다. 가돌리늄이 부착된 회전축의 한쪽 편에 $10\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 1\text{cm}$ 크기의 네오디움 자석을 0.1mm 이하의 간격으로 밀접하게 배열하였다. 실험 진행 시 고온의 유체를 네오디움 자석이 고정되어있는 편에 흘려주어 자석 인근에서는 자력을 약하게 하고, 자석과 떨어지는 부근에는 저온의 유체를 흘려주어 강자성을 띠게 해 연속적인 회전을 하도록 하였다. 이 때, 전술했던 스텔링 엔진의 기계적 출력을 측정하는 방법과 동일하게 회전하는 축에 추를 달고 온도차, 질량에 따른 기계적 출력을 측정하였다.

가돌리늄 블록이 부착된 로우터는 저온도차 스텔링 엔진에 비해 자력(magnetic force)에 의한 토크가 상당히 강하므로 추의 질량을 5g부터 10g, 20g, 50g 순으로 증가시켜 실험을 진행하였으며, 온도차 20°C , 30°C , 40°C , 45°C 에서 각각의 출력을 산출하였다. Fig. 7-10와 Fig. 7-11은 각각 가돌리늄 발전장치에 고온과 저온의 물이 투입되는 모습과 가돌리늄 발전장치에 추를 달아 기계적 출력을 측정하는 실제 모습을 나타내고 있다.

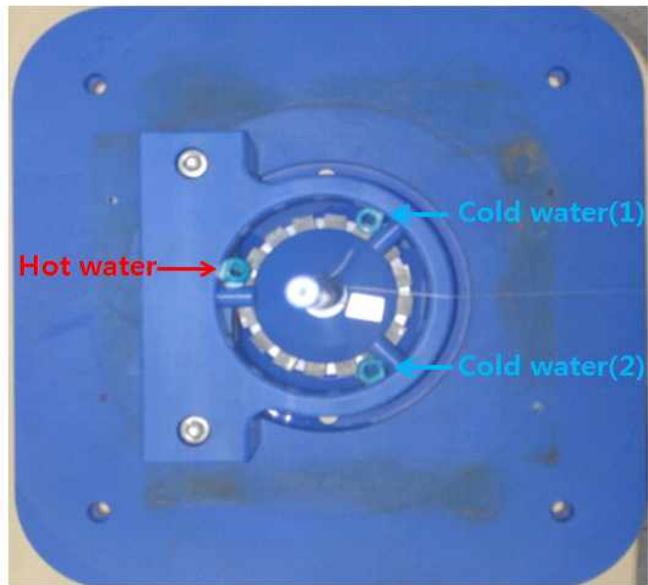


Fig. 7-10 Position of hot and cold water streams in Gadolinium generator



Fig. 7-11 Experimental apparatus for measuring mechanical power of Gadolinium generator

2) Electrical Power

가돌리늄 로우터를 이용한 발전장치의 성능 측정도 저온도차 스텔링 엔진에서 전기적 출력을 측정했던 방법과 유사한 형태를 적용하였으며 회전하는 가돌리늄 발전장치에 AC generator를 연결하여 전기를 생산하였다. 즉, 로우터의 회전 중심축에 직경 Ø130mm의 휠을 그리고 AC generator 축에는 직경 Ø7.5mm의 휠을 부착하였으며, 기어비는 약 1:17 정도로 설계되었다. 네오디움 자석의 자력에 의해 AC generator의 rpm이 줄어드는 현상을 방지하기 위해 가돌리늄 로우터 장치(assembly)는 두께 2.5mm의 철판으로 제작된 자기장 차폐체로 감싸 자장의 누설로 인해 AC generator의 발전 성능에 영향을 끼치지 않도록 하였다. 자기장 차폐체로 감싸기 전 가돌리늄 로우터 장치 인근의 자력은 약 200Gauss로 측정되었으나 자기장 차폐체로 감싼 후 동일한 위치에서의 자력은 약 10Gauss 정도로 낮아짐이 확인되었다.

고온의 작동유체는 관내 직경 Ø3.8mm를 통해 300ml/min의 유량으로 네오디움 자석이 고정되어 있는 위치에 흘려주었으며, 저온의 작동유체는 2개의 튜브를 사용하여 120° 간격을 두고 설치한 후 저온수를 300ml/min의 유량으로 흘려 주었다. Fig. 7-12는 본 실험에 대한 개략도를 나타낸 것이며, Fig. 7-13은 자기장 차폐체로 감싸 자장이 밖으로 흐르지 못하도록 제작한 가돌리늄 로우터 장치의 실제 모습을 보여주고 있다.

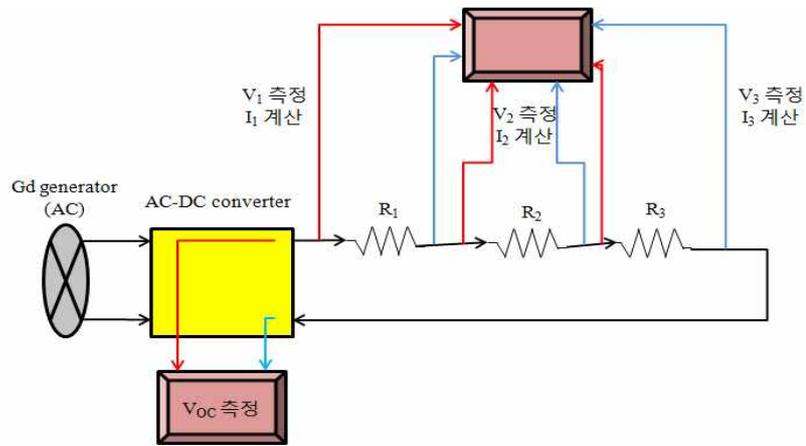


Fig. 7-12 Electricity generation by Gadolinium rotor assembly (conceptual diagram)

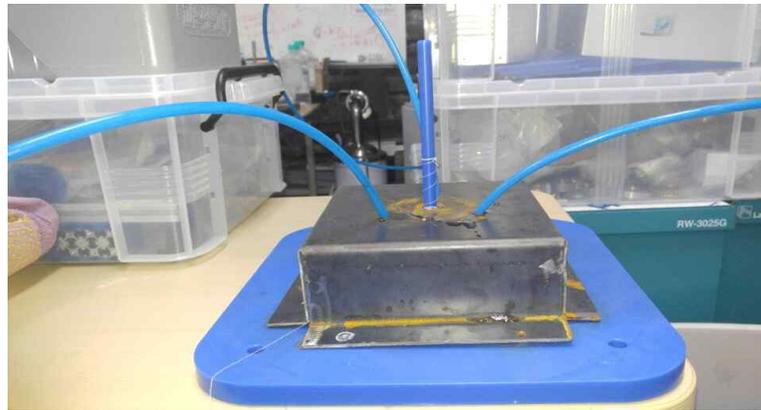


Fig. 7-13 Gadolinium rotor assembly with magnetic shield

7.5 실험결과 및 고찰

7.5.1 저온도차 스텔링 엔진을 활용한 TM변환 발전시스템

1) Mechanical Power

가) 저온도차 스텔링 엔진별 토크

엔진별 토크의 계산은 토크의 일반적인 관계식 $\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$ 에 의하여 구할 수 있는데, $\mathbf{F} = m\mathbf{g}$ 이므로 토크는 다시 $\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \mathbf{r} \times (m\mathbf{g})$ 로 됨을 알 수 있다. 사용된 스텔링 엔진은 single-2(MM-7) 및 단열면적을 달리한 single type, displacer가 2개인 twin type, 그리고 displacer를 사각형으로 제작한 rectangular type등으로 이들의 사양은 Table 7-1과 같다.

Table 7-1. Specifications of various types of Stirling engine

	Single(2)	Single	Twin	Rectangular
Displacer diameter	14 cm	7 cm	7 cm x2	14 cm
Piston Material	Graphite	Graphite	Graphite	Graphite
Power cylinder Material	Borosilicate glass	Borosilicate glass	Borosilicate glass	Borosilicate glass
Flywheel	12 cm	8.25 cm	8.25 cm	12 cm
Overall height	20.3 cm	13 cm	14 cm	20.3 cm
Base plate	16.5 cm	9.2 cm	18 cm	16.5 cm
Weight	500 g	172 g	350g	550 g
Temperature differential required	4°C	10°C	10°C	20°C

온도차 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 와 질량 200mg 사용 시, 각 스텔링 엔진별 토크를 Table 7-2에 나타내었다.

Table 7-2. Torque measurement of LTD engines(using a weight of 200mg)

MM-7	질량(mg)	온도차	중력가속도(m/s^2)	반지름(mm)
	200	10°C	9.8	10.25
토크 = 1.702009(N·mm)				
Single	질량(mg)	온도차	중력가속도(m/s^2)	반지름(mm)
	200	10°C	9.8	9.25
토크 = 0.01813(N·mm)				
Twin	질량(mg)	온도차	중력가속도(m/s^2)	반지름(mm)
	200	10°C	9.8	12
토크 = 0.02352(N·mm)				

Table 7-2에서 알 수 있듯이 동일한 온도차 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 와 200mg의 질량을 적용한 경우가 MM-7엔진의 토크가 1.702009N·mm로 가장 높았으며 다음으로 각각 Twin엔진 0.02352N·mm, Single엔진 0.01813N·mm의 순으로 토크가 측정되었다.

나) 온도차에 따른 저온도차 스텔링 엔진의 기초출력 비교

Fig. 7-14는 가열부와 방열부 간의 온도차 10°C, 20°C, 30°C, 40°C에서 측정 한 저온도차 스텔링 엔진별 출력을 보여준다. 이 때, 저온도차 스텔링 엔진의 출력은 $P = F \cdot V = m \cdot g \cdot (distance/time)$ 로 계산될 수 있다. 측정결과 질량이 MM-7 엔진(Single-2)의 출력이 가장 높게 측정되었다.

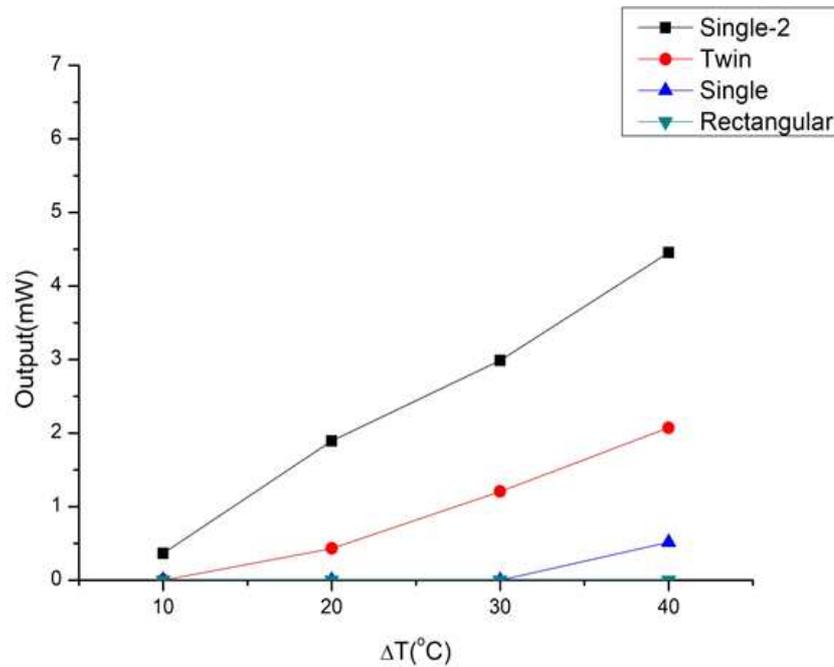


Fig. 7-14 Output of Stirling engine against temperature difference

다) 온도차에 따른 저온도차 스텔링 엔진의 토크 및 출력

추의 질량을 1g, 2g, 3g 등으로 변경하며 측정하였으며 온도차 또한 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 등으로 올라가며 저온도차 스텔링 엔진 별 토크, 출력, 단위면적 당 출력 등을 산출하였다.

(1) 저온도차 스텔링 엔진: MM-7

저온도차 스텔링 엔진(MM-7)의 전체 실험조건 및 측정데이터는 Table 7-3에 나타내었으며, 온도차 및 토크에 따른 출력은 Fig. 7-15에 나타내었다.

온도차 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 일 경우, 스텔링 엔진은 질량 2g과 3g 짜리 추를 견인하지 못하였다. 한편, 1g의 추를 들어 올릴 때의 토크, 즉 $0.10045\text{N}\cdot\text{mm}$ 에서 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 의 경우 서로 비슷한 출력을 보였으나 그 이상의 토크 값들은 온도차에 따라 확연히 다른 출력 값을 보여주었다.

Table 7-3. Performance measurement of Stirling engine(MM-7)

MM-7												
ΔT	10 $^{\circ}\text{C}$			20 $^{\circ}\text{C}$			30 $^{\circ}\text{C}$			40 $^{\circ}\text{C}$		
추 질량(g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
토크 (N·mm)	0.10045	0	0	0.10045	0.2009	0.30135	0.10045	0.2009	0.30135	0.10045	0.2009	0.30135
출력(mW)	0.363	0	0	1.176	1.795	1.893	1.274	2.305	2.988	1.078	2.579	4.455
단위면적당 출력 (mW/mm ²) ($\times 10^{-6}$)	26	0	0	85	129	136	92	166	215	78	186	321

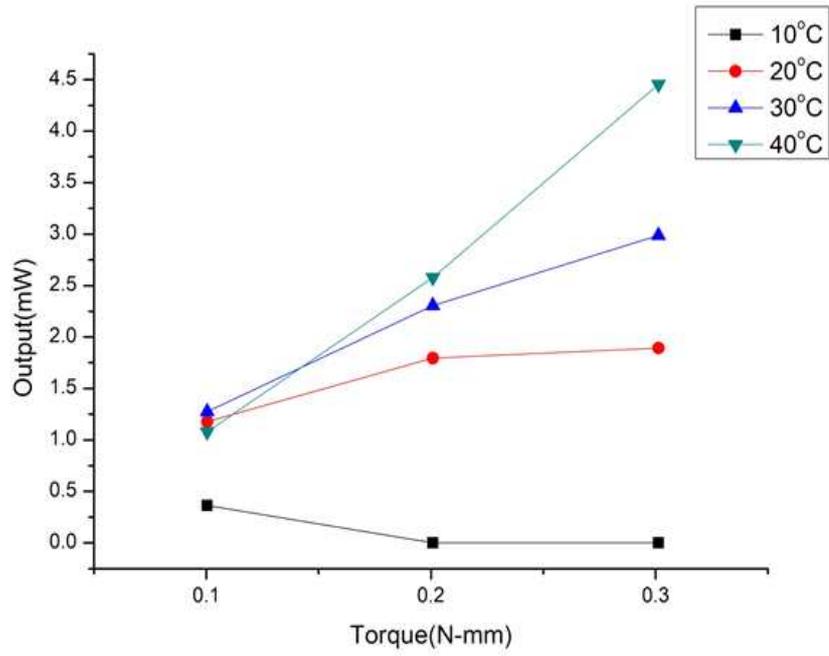


Fig. 7-15 Output of Stirling engine against temperature difference and torque(MM-7)

(2) 저온도차 스텔링 엔진: Twin

Table 7-4는 저온도차 스텔링 엔진(Twin)의 전체 실험조건 및 측정데이터를 보여주고 있으며, 온도차 및 토크에 따른 출력은 Fig. 7-16와 같다.

온도차 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ 에서는 질량 1g, 2g, 3g의 추를 모두 들어 올리지 못하였으며, 온도차 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 경우에는 질량 2g과 3g의 추를, 그리고 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 와 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 경우에는 3g의 추를 들어 올리지 못하였다.

Table 7-4. Performance measurement of Stirling engine(Twin)

Twin												
ΔT	10 $^{\circ}\text{C}$			20 $^{\circ}\text{C}$			30 $^{\circ}\text{C}$			40 $^{\circ}\text{C}$		
추 질량(g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
토크 (N-mm)	0	0	0	0.118	0	0	0.118	0.235	0	0.118	0.235	0
출력(mW)	0	0	0	0.431	0	0	1.204	0.501	0	2.072	0.992	0
단위면적당 출력 (mW/mm 2) ($\times 10^{-6}$)	0	0	0	49.5	0	0	138	57	0	238	114	0

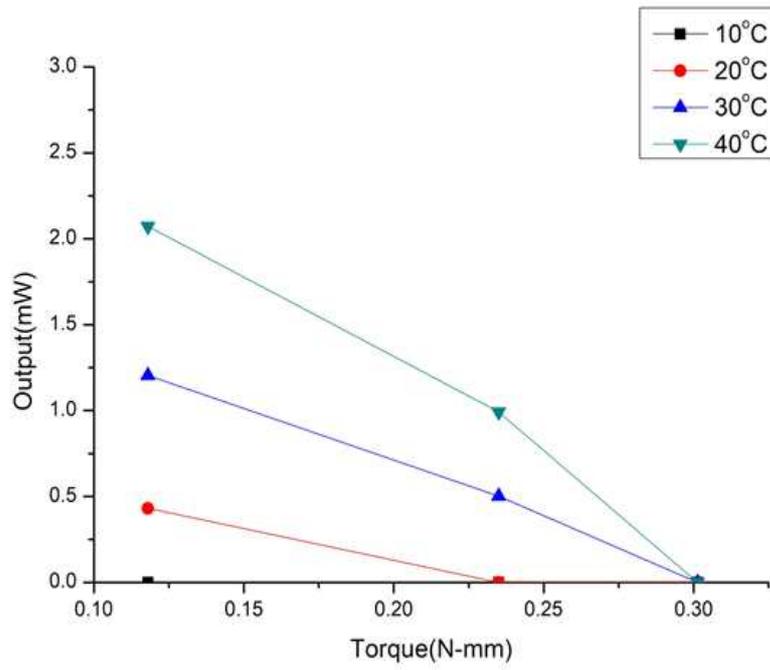


Fig. 7-16 Output of Stirling engine against temperature difference and torque(Twin)

(3) 저온도차 스텔링 엔진: Single

Table 7-5는 저온도차 스텔링 엔진(Single)의 전체 실험조건 및 측정데이터를 보여주고 있으며, 이 때 온도차 및 토크에 따른 출력은 Fig. 7-17에 나타내었다.

Single엔진의 경우 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 질량 1g, 2g, 3g 모두 들어 올리지 못하였으며 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서 1g의 추를 들어 올린 후 2g과 3g은 들어 올리지 못하는 것으로 측정되었다.

저온도차 스텔링 엔진의 기계적 출력을 측정한 결과 MM-7의 최대 출력은 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 일 때 약 4.45mW로 가장 높게 산출되었다. 이에 따라 저온도차 스텔링 엔진으로부터 전기적 출력을 얻어내는 연구는 MM-7엔진을 이용하여 실험을 진행하였다.

Table 7-5. Performance measurement of Stirling engine(Single)

Single												
ΔT	10 $^{\circ}\text{C}$			20 $^{\circ}\text{C}$			30 $^{\circ}\text{C}$			40 $^{\circ}\text{C}$		
추 질량(g)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
토크 (N-mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09065	0	0
출력(mW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.513794	0	0
단위면적당 출력 (mW/mm 2) ($\times 10^{-6}$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	118	0	0

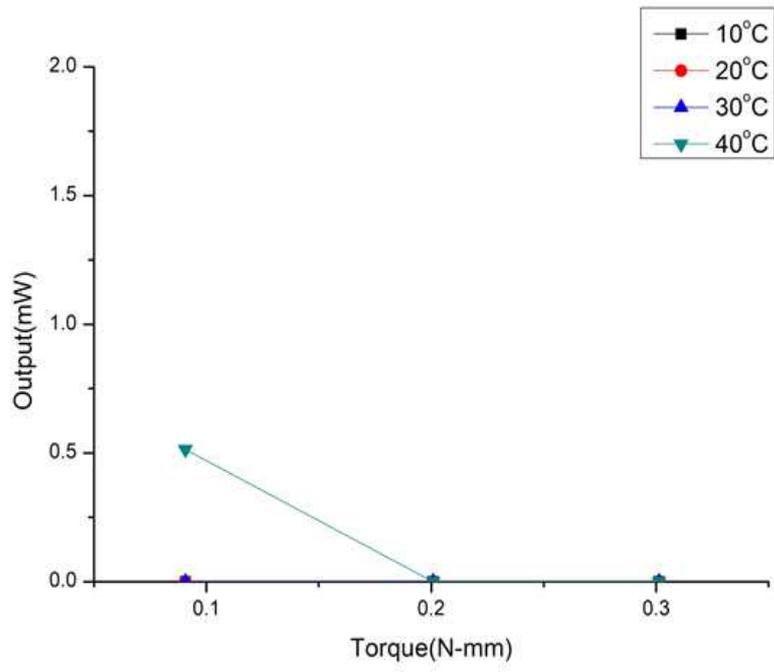


Fig. 7-17 Output of Stirling engine against difference and torque(Single)

2) Electrical Power

(가) AC Generator

저온도차 스텔링 엔진에서 전기적 출력을 얻기 위해 소형 AC generator를 발전기로 사용하여 출력을 얻었으며 가열부와 방열부의 온도차 약 $\Delta T=25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 사이에서의 시간에 따른 전압을 측정하였다. Fig. 7-18은 저온도차 스텔링 엔진에 AC generator 1개를 연결했을 경우의 전압과 AC generator 3개를 직렬로 연결했을 경우의 전압을 시간과 온도에 따른 그래프로 나타낸 것이다.

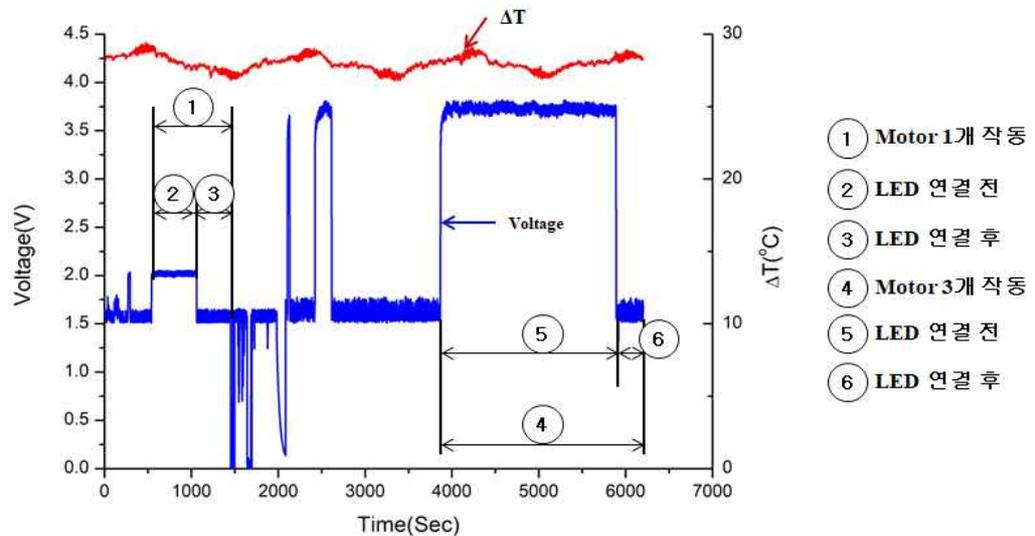
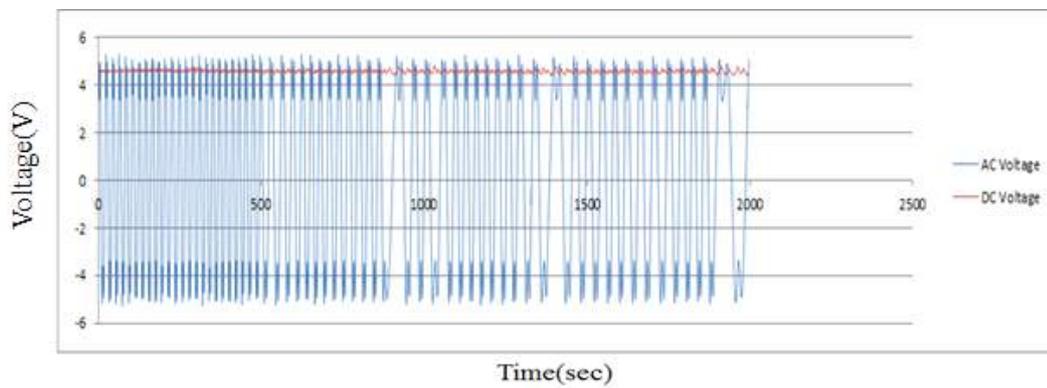


Fig. 7-18 Electric power of the LTD heat engine

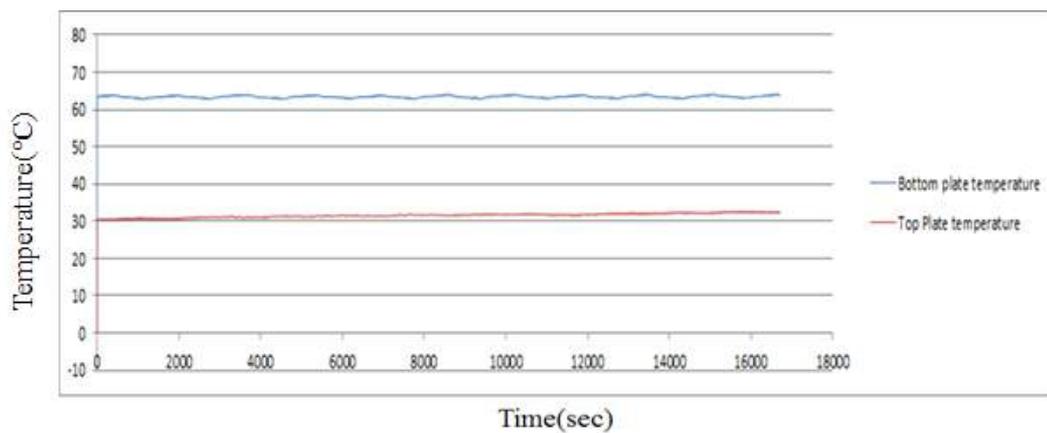
AC generator를 이용하여 출력을 측정한 결과 AC generator 1개 연결 구간에서 LED 연결 시 전압은 약 1.5V, 전류는 약 0.06mA~0.08mA로 측정되었으며, AC generator 3개 직렬연결 구간에서의 전압은 약 3.8V, 전류는 약 0.19mA~0.23mA가 측정되었다. 따라서 약 $\Delta T=25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 사이에서의 출력은 1개 연결 시 0.09mW~0.12mW로 산출되었으며 3개 직렬연결 시 0.72mW~0.87mW가 산출되었다. 이에 앞서 측정한 기계적 출력은 약 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 2.98mW로 변환 효율은 약 29%로 계산된다.

(나) Generator Coil (Stator Coil)

Generator coil을 활용한 실험의 경우 Fig. 7-19(a)에서 보는바와 같이 AC와 DC로 변환했을 경우 모두 전압이 4.7V로 일정하게 나타나는 것을 알 수 있으며 Fig. 7-19(b)에서는 전열판과 방열판의 온도가 서서히 올라가는 것을 확인할 수 있다. 2k Ω 의 소형 LED를 연결하여 측정 시 전압은 약 1.8V, 전류는 약 0.9mA로 산출되었다. 이를 적용하면 출력은 1.6mW로 변환 효율은 약 53%이다.



(a)



(b)

Fig. 7-19 Electric power using generator coil:
(a) Electric voltage (b) Top and bottom plate temperatures

(다) TENG

(1) 슬라이딩 방식의 전기 출력 기초 측정

실제 측정을 수행하기 전에 두 개의 AI 전극과 FEP 필름으로 구성된 간단한 실험 키트를 사용하여 기본 전기 출력을 측정하였으며 Fig. 7-20(a)는 그 모식도를 나타낸 것이다. Fig. 7-20(b)와 같이 AI 전극 위로 FEP 필름을 앞뒤로 미끄러뜨림으로써 발생하는 개방회로 전압(V_{oc})의 거동을 관찰하였으며, Fig. 7-20(c)에서 확인할 수 있듯이 FEP 필름이 하나의 AI 전극에서 다른 쪽의 AI 전극으로 미끄러지면 양의 전압이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 반대로 FEP 필름이 후방으로 미끄러지면 음의 전압을 발생시키는걸 알 수 있다. 따라서 FEP 필름의 연속적인 전·후진으로 미끄러지는 동작은 AC 전압 신호를 생성하게 되는데 이는 4개의 다이오드로 구성된 브리지 정류기를 사용하여 쉽게 DC 신호로 변환 할 수 있다. Fig. 7-20(d)는 정류된 DC 신호의 그래프를 나타낸다.

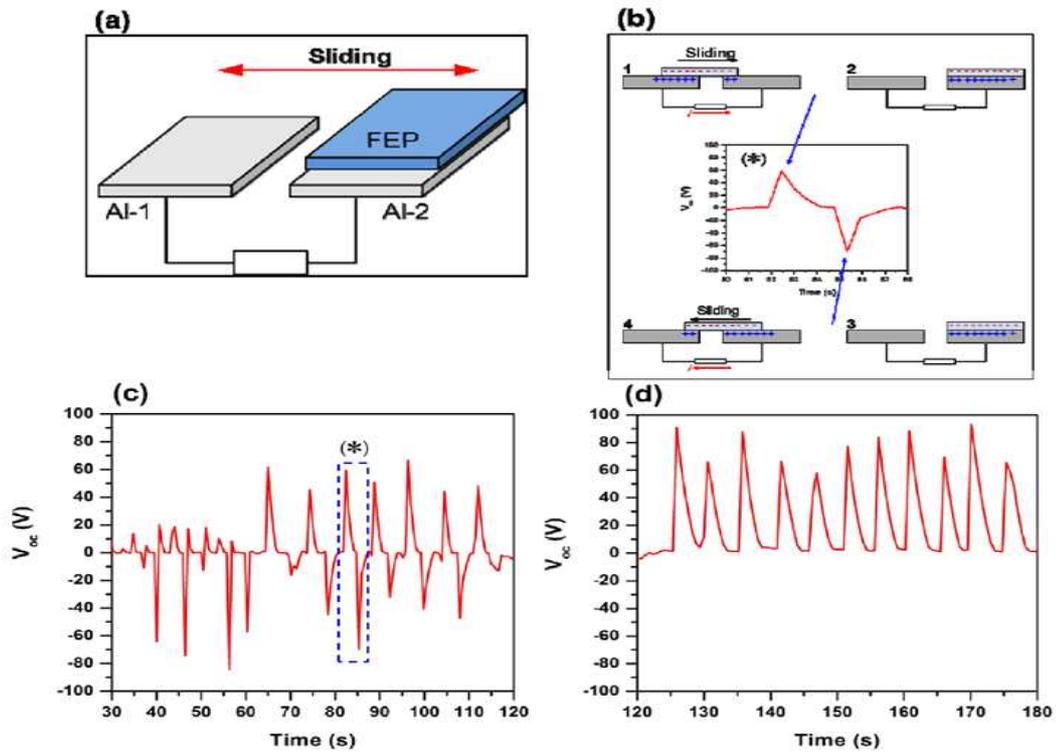


Fig. 7-20 Performance of simplified TENG operating in sliding mode:
 (a) Simple experimental kit composed of two Al electrodes and a FEP film
 (b) Forward and backward sliding for electricity generation
 (c) V_{oc} produced (d) V_{oc} rectified

(2) TENG 슬라이딩 방식

Fig. 7-21은 슬라이딩 방식에서 작동할 때의 실제 TENG/LTD 열엔진의 전압 및 전류 신호를 나타내며 온도차는 74.4°C 조건에서 측정되었다. 이 온도차에서 TENG/LTD 열엔진의 회전 속도는 250rpm이었으며, Fig. 7-21(a)과 Fig. 7-21(b)에서 볼 수 있듯이 전압과 전류 신호는 TENG를 작동시키는 동시에 엔진의 움직임에 따른 즉각적인 응답을 나타내고 있다. 전극간 간격이 1mm 인 TENG의 개방회로 전압 및 단락회로 전류(I_{sc})는 각각 70V 및 0.31 μ A로 측정되었다.

LTD 열엔진과 연계한 TENG의 작동 시 노이즈가 존재하여 일부 불확실한 값이 측정 기간 동안 존재하였으며, 이로 인해 평균값 근처에서 전압 약 $\pm 1.3V$, 전류 약 0.017 μ A 정도의 오차가 존재하였다. TENG의 출력은 저항에 크게 의존하는데 전위계 내부 저항은 200G Ω 으로 매우 높아 낮은 전류에서도 출력 전압을 측정할 수 있다. 그러나 최대 출력 전압에 대응하는 입력 저항의 정확한 값을 알기 위해서는 저항과 전압 사이의 관계를 조사하는 것이 바람직하며 Fig. 7-22은 그 저항과 전압의 관계를 나타내고 있다.

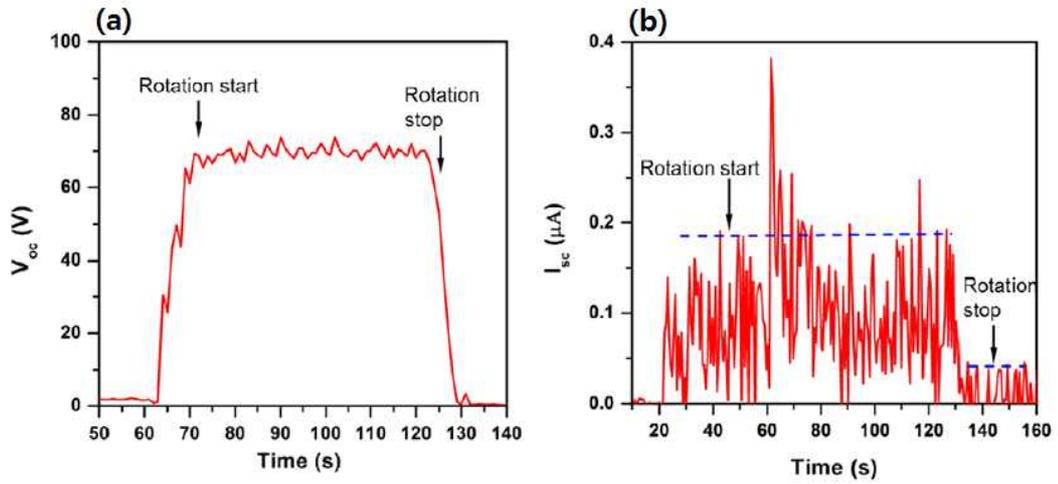


Fig. 7-21 Performance of TENG driven by a LTD heat engine:

(a) V_{oc} (b) I_{sc}

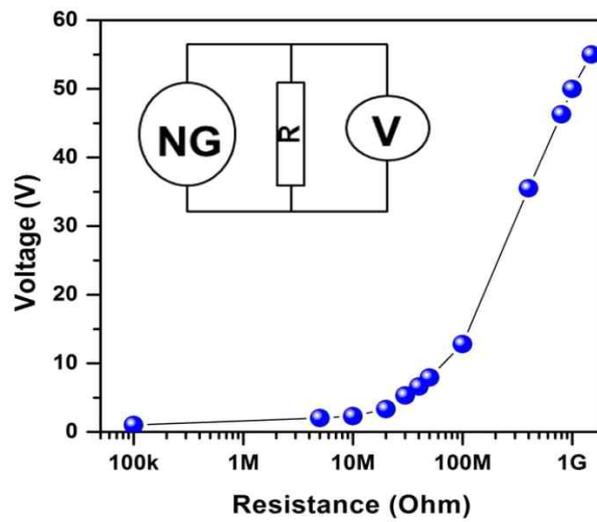


Fig. 7-22 Voltage-input resistance curve of the TENG

(3) 슬라이딩 방식과 수직 접촉 분리방식을 적용한 TENG

총 출력을 산출하기 위해 TENG를 결합하기 전 별도의 측정을 수행하였다. Fig. 7-23은 수직 접촉 분리방식(TENG-2)에서 생성된 전압 및 전류 출력을 나타내고 있다. Fig. 7-23(a)에서 TENG-1에 연결된 회선의 "X"표시는 TENG-1에서 나오는 전력이 없음을 의미한다. Fig. 7-23(b)와 Fig. 7-23(c)에 나타난 그래프는 시간 변화에 따른 개방회로 전압과 단락회로 전류로서, TENG-2 작동의 시작점과 종단점을 명확히 보여주고 있다.

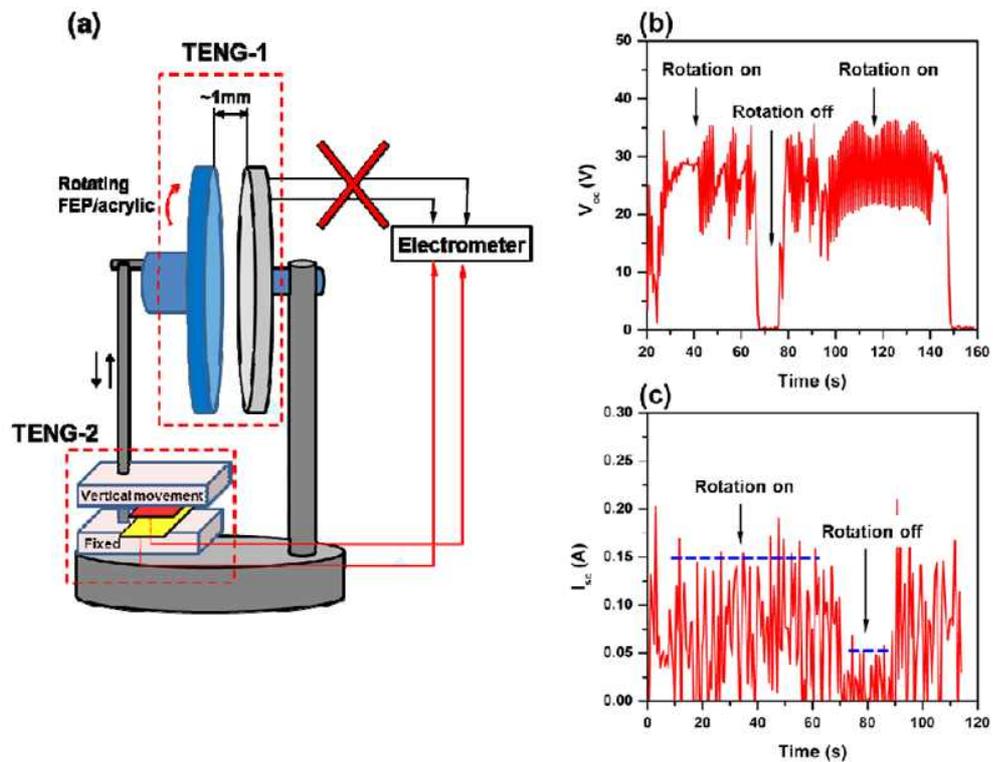


Fig. 7-23 Output voltage and current of TENG-2 operating in vertical contact-separation mode:

(a) A schematic diagram of experimental system (b) V_{oc} (c) I_{sc}

Fig. 7-24에 슬라이딩 방식(TENG-1)에서 생성된 전압 및 전류 출력을 나타내고 있다. 앞서 설명했듯이 TENG-2에 “X”표시는 전기 신호가 들어오지 않음을 의미한다. 즉, TENG-2는 전력을 생산하지 않는 상태를 나타내며, 이로부터 시간에 따라 변하는 개방회로 전압 및 단락회로 전류의 전기 신호 패턴이 Fig. 7-23과 유사하게 나타남을 알 수 있다.

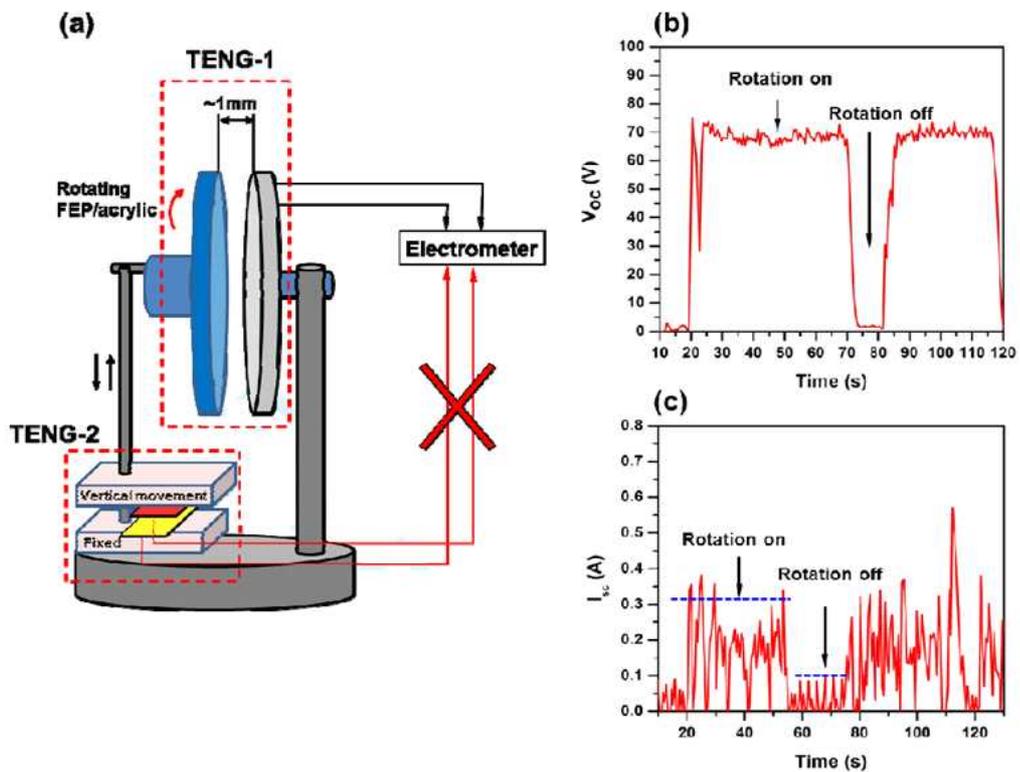


Fig. 7-24 Output voltage and current of TENG-1 operating in (rotation) sliding mode: (a) A schematic diagram of experimental system (b) V_{oc} (c) I_{sc}

Fig. 7-25(a)는 두 방식의 TENG 출력이 결합되어지는 방법을 개략적으로 보여주고 있으며, 출력 측정을 위하여 AC-DC 변환기를 사용하여 각 TENG의 AC 출력을 DC로 변환하였다. Fig. 7-25(b)는 스텔링 엔진의 온도차가 약 80°C 로 작동되는 TENG의 V_{oc} 를 나타내고 있다. Fig. 7-25(b)에서 보듯이 TENG-1(슬라이

딩 방식)과 TENG-2(수직 접촉 분리 방식)에서는 각각 70V와 35V의 전압이 측정되었으며 결합된 출력은 105V로 측정되었다. Fig. 7-25(c)는 각각 TENG-1과 TENG-2에 의해 생성된 전류와 결합하였을 때 생성되는 전류를 나타낸다.

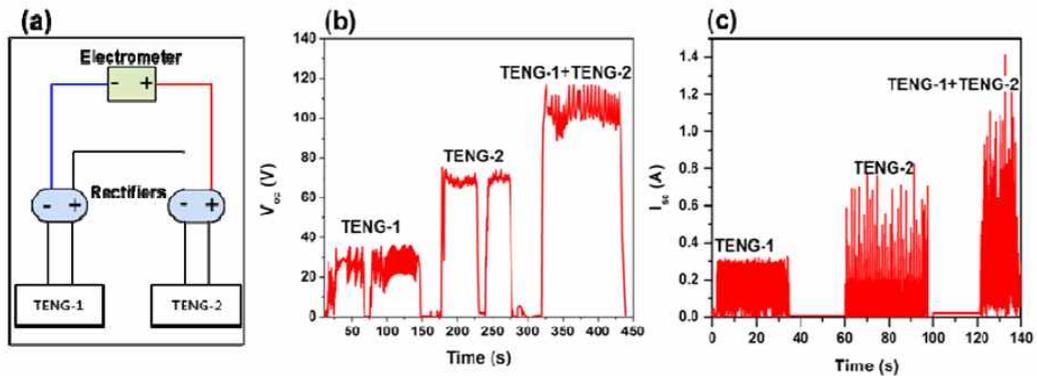


Fig. 7-25 Intergrated output (V_{oc}) of two TENGs connected in series:
 (a) Connection scheme of two TENGs for output measurement (b) V_{oc} (c) I_{sc}

TENG의 성공적인 작동과 이의 적용성은 $4.7\mu\text{F}$ 용량의 커패시터를 충전하고, 초록색의 LED를 켜므로써 그 가능성을 어느 정도 가늠할 수 있었다. Fig. 7-26(a)는 본 연구에 사용된 실제 전기 회로의 모습을 나타내고 있으며 Fig. 7-26(b)는 그 회로도 를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 회로는 커패시터, AC-DC 변환기 및 LED로 구성되었다. 또한, Fig. 7-26(c)와 Fig. 7-26(d)는 각각 TENG-1 및 TENG-2를 사용하여 커패시터를 별도로 충전하는 다이어그램을 나타내고 있다.

Fig. 7-27은 두 발전기의 결합된 전력으로 충전되고 LED 조명을 통해 방전되는 커패시터를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 TENG의 경우 높은 전압에 비해 전류의 값이 매우 작기 때문에 변환 효율은 약 4.85%로 산출되었다.

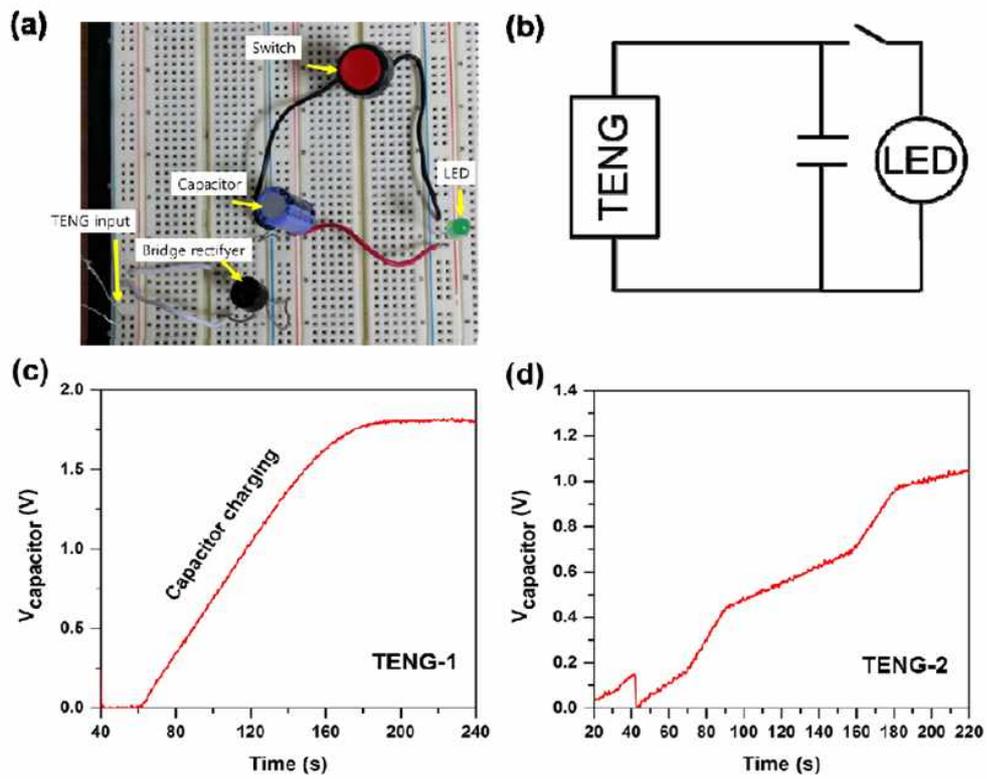


Fig. 7-26 Charging a capacitor by TENG-1 and TENG-2:
 (a) Actual electric circuit (b) Circuit diagram (c) TENG-1 (d) TENG-2

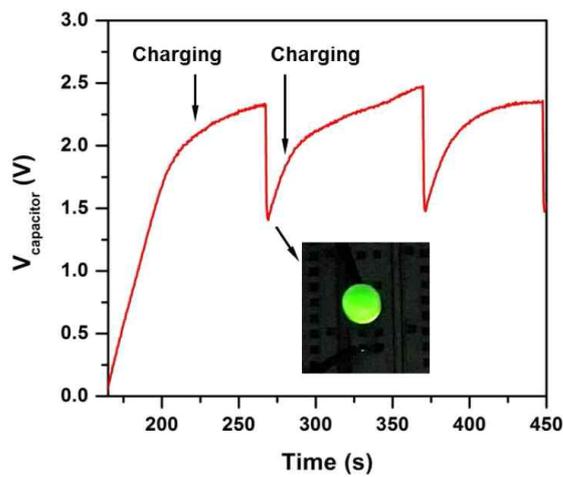


Fig 7-27. A capacitor being charged by two TENGs and discharged through a LED

7.5.2 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전시스템

1) Mechanical Power

가돌리늄 로우터 assembly를 이용한 발전장치의 토크는 저온도차 스텔링 엔진의 성능 측정을 위해 적용한 방법과 유사하게 진행하였다. Table 7-6는 추의 질량 5g, 10g, 20g, 50g과 추의 반경 5mm에서 가돌리늄 발전장치(gadolinium generator)에 걸리는 질량별 토크를 나타내고 있다.

Table 7-6. Torque measurement of gadolinium generator

Gadolinium			
질량(g)	중력가속도(m/s ²)	반지름(mm)	토크(N·mm)
5	9.8	5	0.245
10			0.49
20			0.98
50			2.45

이 표에서 보듯이 적용된 추의 질량별 가돌리늄 발전장치의 토크는 질량 5g, 10g, 20g, 그리고 50g에서 각각 0.245N·mm, 0.49N·mm, 0.98N·mm, 및 2.45N·mm로 측정되었다.

가) $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 출력 및 rpm

$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서 추의 질량을 5g, 10g, 20g, 50g로 증가시키며 실험을 진행하였으며, 추를 들어올리기 전 회전속도는 120rpm으로 측정되었다. 이때 고온의 작동유체 온도는 40°C , 저온의 작동유체 온도는 20°C 였다. Table 7-7은 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 데이터를 나타내고 있다.

Table 7-7. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium				
$\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$				
추질량(g)	5	10	20	50
토크(N-mm)	0.245	0.49	0.98	2.45
출력(mW)	2.94	5.39	0	0
분당회전수 (rpm)	114.6	105.1	0	0

$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서는 질량 20g 및 50g의 추를 들어 올리지 못하였으며 질량 5g에서의 회전속도는 약 114.6rpm, 출력은 약 2.94mW로 측정되었다. 질량 10g에서 회전속도는 약 105.1rpm, 출력은 약 5.39mW로 측정되었다. Fig. 7-28은 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 그래프를 보여주고 있다.

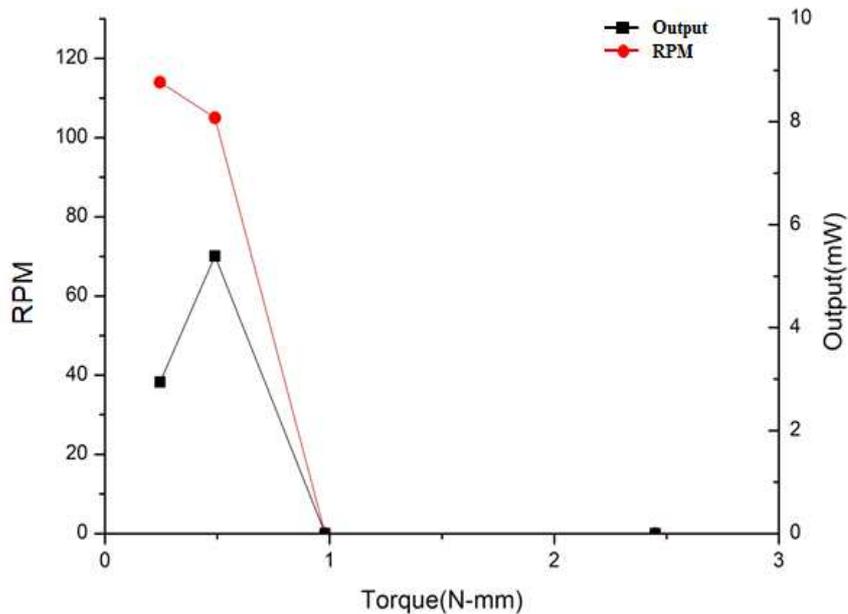


Fig. 7-28 RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$)

(나) $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 출력 및 rpm

추의 질량을 5g, 10g, 20g, 50g으로 증가시키면서 실험을 진행하였으며, 추를 들어올리기 전 회전속도는 125rpm으로 측정되었다. 이 때 고온의 작동유체 온도는 50°C , 저온의 작동유체 온도는 20°C 였다. Table 7-8는 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 데이터를 나타내고 있다.

Table 7-8. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium				
$\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$				
추질량(g)	5	10	20	50
토크(N-mm)	0.245	0.49	0.98	2.45
출력(mW)	3.136	5.586	9.8	0
분당회전수 (rpm)	107	108.9	95.5	0

$\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서는 질량 50g의 추를 들어 올리지 못하였다. 질량 5g에서 회전속도는 약 107.0rpm, 출력은 약 3.1mW로 측정되었으며, 질량 10g에서 회전속도는 약 108.9rpm, 출력은 약 5.5mW로 산출되었다. 질량20g에서의 회전속도는 약 95.5rpm, 출력은 약 9.8mW로 측정되었다. Fig. 7-29는 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 에서의 실측 결과를 그래프로 보여주고 있다.

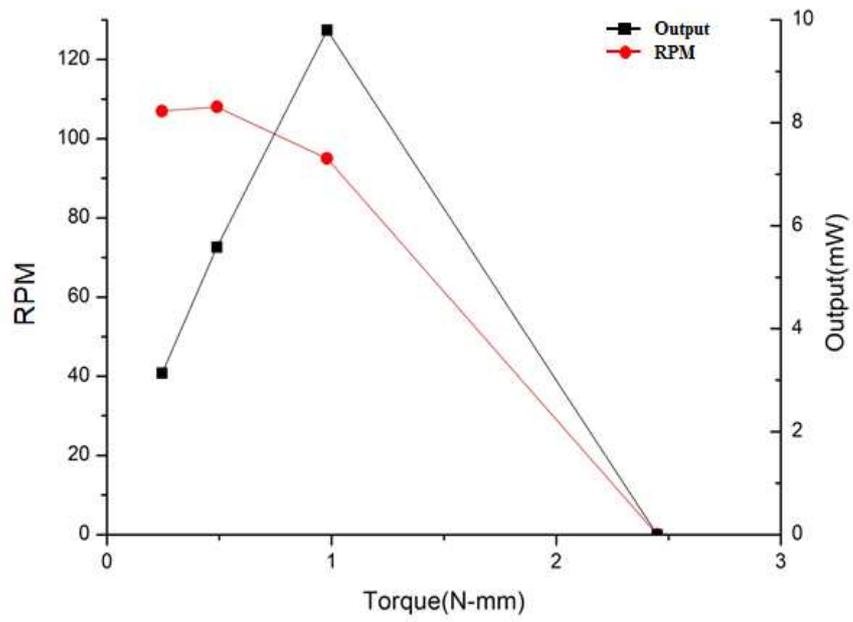


Fig. 7-29. RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)

(다) $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 출력 및 rpm

앞서와 마찬가지로 추의 질량을 5g, 10g, 20g, 50g으로 높여가며 실험을 진행하였으며 추를 들어올리기 전 회전속도는 145rpm으로 측정되었다. 이 때 고온의 작동유체의 온도는 60°C , 저온의 작동유체 온도는 20°C 였다. Table 7-9는 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서의 측정 데이터를 보여주고 있다.

Table 7-9. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium				
$\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$				
추질량(g)	5	10	20	50
토크(N-mm)	0.245	0.49	0.98	2.45
출력(mW)	3.185	6.664	12.25	20.09
분당회전수 (rpm)	124.2038	129.9363	119.4268	108.9172

$\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서는 실험에 사용한 추를 모두 들어 올렸다. 질량 5g에서 회전속도는 약 124.2rpm, 출력은 약 3.1mW로 나타났으며, 질량 10g에서 회전속도는 약 129.9rpm, 출력은 약 6.6mW로 측정되었다. 질량20g에서 회전속도는 약 119.4rpm, 출력은 약 12.2mW로 측정되었으며 질량 50g에서 회전속도는 약 108.9rpm, 출력은 약 20.0mW로 나타났다. Fig. 7-30에 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서의 실측 결과를 그래프로 보여주고 있다.

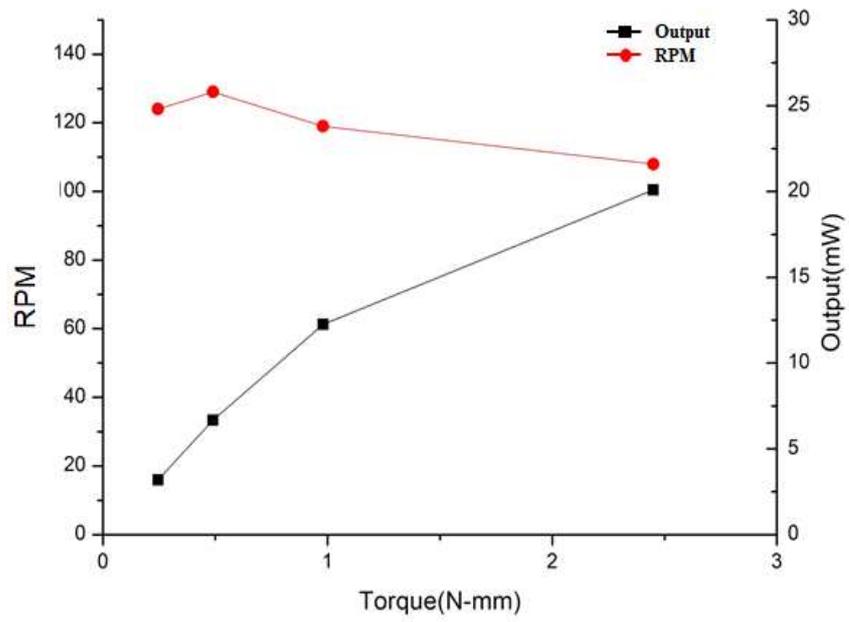


Fig. 7-30 RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=40^{\circ}\text{C}$)

(라) $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서 질량에 따른 출력 및 rpm

추의 질량을 5g, 10g, 20g, 50g으로 높여가며 성능 측정을 수행하였으며, 추를 들어올리기 전 회전속도는 185rpm으로 측정되었다. 이 때 고온의 작동유체의 온도 65°C , 그리고 저온의 작동유체 온도는 20°C 였다. Table 7-10는 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서의 성능 측정 결과를 보여주고 있다.

Table 7-10. Performance measurement of gadolinium generator($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

Gadolinium				
$\Delta T = 45^{\circ}\text{C}$				
추질량(g)	5	10	20	50
토크(N-mm)	0.245	0.49	0.98	2.45
출력(mW)	4.067	6.86	12.93	29.4
분당회전수 (rpm)	158.6	133.8	126.1	114.6

$\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서는 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 에서의 경우와 같이 실험에 사용한 추를 모두 들어 올렸다. 질량 5g에서 회전속도는 약 158.5rpm, 출력은 약 4.0mW로 나타났으며, 질량 10g에서 회전속도는 약 133.7rpm, 출력은 약 6.8mW로 측정되었다. 질량 20g에서의 회전속도는 약 126.1rpm, 출력은 약 12.9mW로 나타났으며 질량50g에서의 회전속도는 약 114.6rpm, 출력은 약 29.4mW로 나타났다. Fig. 7-31은 $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ 에서의 성능 측정 결과를 그래프로 일목요연하게 보여주고 있다.

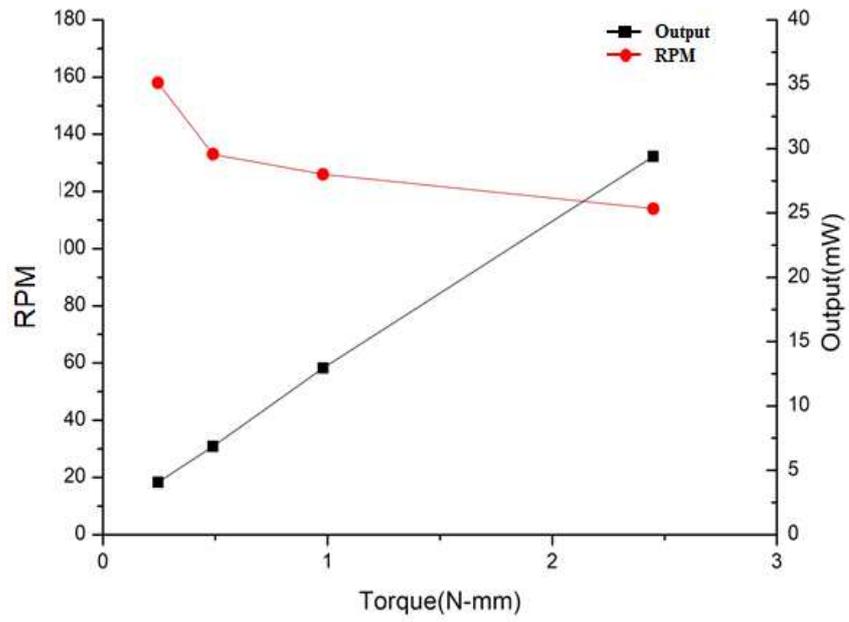


Fig. 7-31 RPM and mechanical power vs. torque($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

2) Electrical Power

가) AC generator

AC generator를 이용한 가돌리늄 발전장치의 전기적 출력을 저온도차 스텔링 엔진 발전장치와 비교하기 위해 동일한 AC generator를 이용하여 실험을 진행하였다. AC generator는 3개를 직렬로 연결하였으며, 각 generator 사이의 전압과 전류를 실시간으로 모니터링 하였다. 기계적 출력 계산 시 고온과 저온의 작동유체 간의 가장 높은 온도차였던 $\Delta T \cong 45^{\circ}\text{C}$ 에서 시간에 따른 전압과 출력을 측정하였다. Fig 7-32는 시간에 따른 가돌리늄 발전장치의 전압 및 출력 데이터를 시간에 따른 그래프로 보여주고 있으며, Table 7-11은 이들 데이터를 정리하여 보여주고 있다.

AC generator를 활용하여 출력을 측정한 결과 개방전압은 약 1.58V로 측정되었다. 한편, 100k Ω 저항 3개를 연결하여 실험을 진행하였을 때 전압은 각각 0.44V, 0.41V, 0.36V, 그리고 전류는 각각 약 0.0044mA, 0.0041mA, 0.0035mA로 측정되었다. 이 경우 출력은 각각 0.0019mW, 0.0017mW, 0.0013mW로 측정되었으며, 총 출력은 0.0049mW로 산출되었다. 앞서 측정한 기계적 출력 값이 29.4mW이므로 변환 효율은 0.016%로 계산되었다.

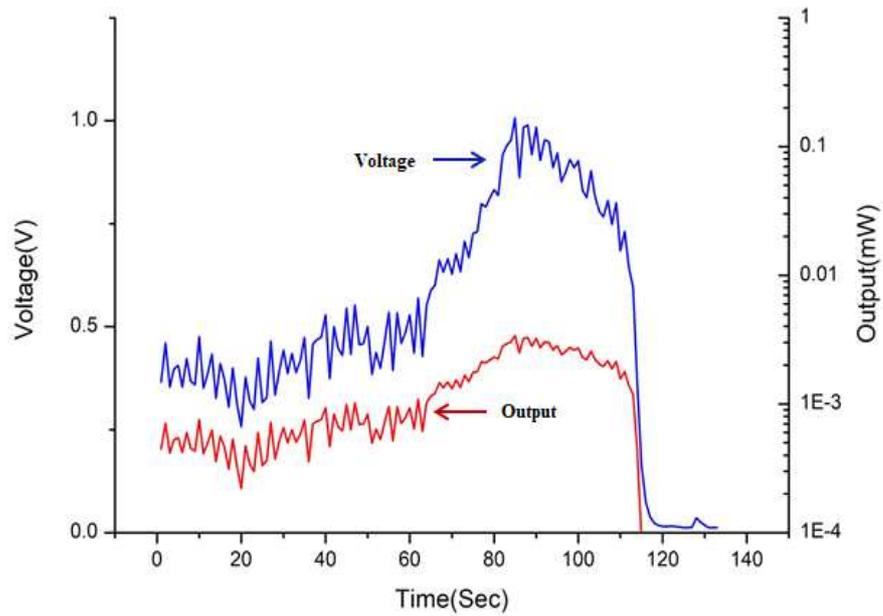


Fig. 7-32 Voltage and output variation over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$, AC generator)

Table 7-11. Electrical power variation over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$, AC generator)

Gadolinium			
최대 $V_{oc} = 1.58\text{V}$, 저항 = $100\text{k}\Omega$			
	전압(V)	전류(mA)	출력(mW)
Across generator 1	0.44	0.0044	0.0019
Across generator 2	0.41	0.0041	0.0017
Across generator 3	0.36	0.0035	0.0013
Across generator 1 thru generator 3	1.21		0.0049

2) Generator Coil (Stator coil)

앞서 저온도차 스텔링엔진에서 적용하였듯이 가돌리늄 로우터의 작동과 함께 회전하는 휠(회전자)에 일정 수의 자석을 장착하고 이와 마주보는 휠(고정자)에 원형으로 감겨진 다수의 코일을 부착하는 방법을 고려할 수 있다. 특히, 저온도차 스텔링 엔진 발전장치와의 일대일 성능 비교를 위해 동일한 generator coil을 사용하였다. Fig 7-33은 시간에 따른 가돌리늄 발전장치의 전압 및 출력의 시간에 따른 변화를 보여주고 있으며, Table 7-12는 그 주요 결과치를 정리하여 나타내고 있다.

Generator coil을 활용하여 실험을 진행한 결과 개방전압 약 1.848V으로 측정되었다. 또한, 100k Ω 저항 3개를 연결하여 측정하였을 시의 전압은 각각 0.512V, 0.54V, 0.546V, 그리고 전류는 각각 약 0.0051mA, 0.0054mA, 0.00546mA로 측정되었으며, 출력은 각각 0.0026mW, 0.0029mW, 0.003mW로 산출되었다. 총 출력은 0.0085mW로 기계적 출력 값과 비교 시 변환 효율은 약 0.02%로 계산되었다.

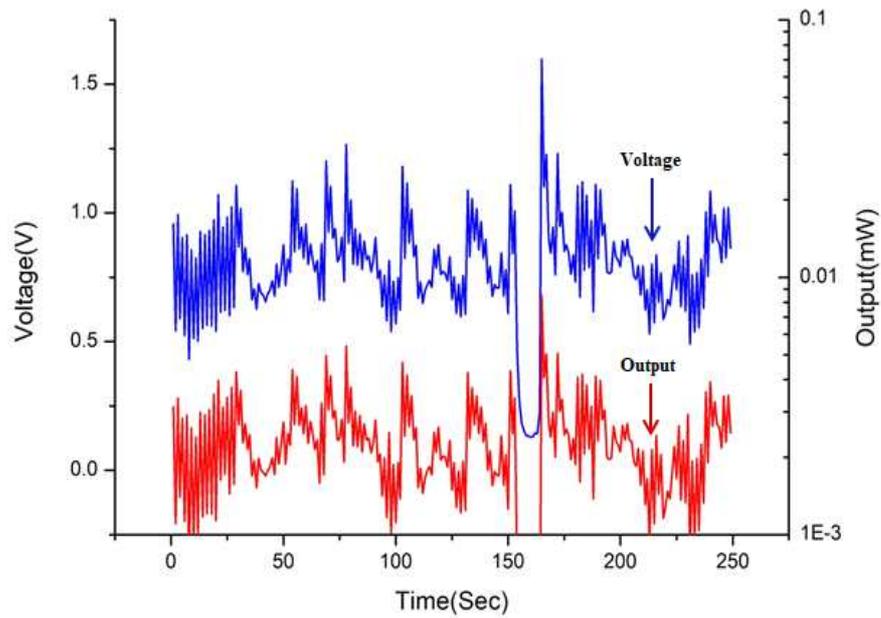


Fig. 7-33 Voltage and output variation over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$, Generator coil)

Table 7-12. Electrical power variation over time($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$, Generator Coil)

Gadolinium			
최대 $V_{oc} = 1.848\text{V}$, 저항 = $100\text{k}\Omega$			
	전압(V)	전류(mA)	출력(mW)
Across generator 1	0.512	0.0051	0.0026
Across generator 2	0.54	0.0054	0.0029
Across generator 3	0.546	0.00546	0.003
Across generator 1 thru generator 3	1.598		0.0085

8. 결론

본 연구에서는 신재생 에너지원의 부하변동에 대응이 가능하고 설치면적이 매우 작으며 이동성이 용이한 30ton ~ 50ton/day급 고효율 MVR방식의 담수화 플랜트를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 MVR방식의 해수담수화 플랜트는 하나의 증발·농축관으로 단일효용과 2중효용을 선택하여 운전할 수 있다. 따라서 다수의 증발·농축관을 이용하는 기존의 다중효용방식과 다단플래쉬방식에 비해 설치면적이 매우 작을 뿐 아니라 이동성도 용이하다. 본 연구에서는 지속적인 운전을 통해 단일효용과 2중효용의 최적운전모드를 개발하였다. 최적운전모드를 적용하여 실증운전을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

MVR 압축비의 경우 2중효용 운전의 경우 설계치와 동일한 성능을 보이나 단일효용 운전의 경우 설계치보다 조금 낮은 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 (1) 단일효용 운전일 때 flash evaporator의 부피가 늘어나면서 비체적이 증가하고 (2) 2중효용 운전일 때 단일효용 운전보다 조금 높은 온도에서 운전되기 때문인 것으로 판단된다.

주 열교환기의 경우 증발·농축관의 압력변화에 따라 흡입온도가 변화하여 온도차가 일정하진 않았으나 설계치 범위 내에서 운전됨을 확인하였다.

MVR 해수담수화 플랜트가 생산 담수량의 경우 정상운전 시 단일효용은 1.162m³/h이며 2중효용은 2.127m³/h임을 확인하였다. 따라서 MVR 해수담수화 플랜트가 정상운전을 한다고 가정하면 일일 약 28ton에서 51ton을 생산할 수 있으며 설계치와 동일한 성능을 보임을 확인하였다.

담수 생산 1ton당 전력소비량은 단일효용 시 약 43kW이고 2중효용 시 약 23kW임을 확인하였다. 이와 같은 결과는 이론적 분석보다 조금 높은 전력소비량을 보이는데 이론적 분석에서는 MVR에 필요한 전력만을 고려하였으나 실제운

전에서는 MVR 해수담수화 플랜트에 설치된 모든 전력(펌프 등)을 합산했기 때문으로 판단된다.

MVR의 부하 조절을 위해 inverter speed 제어 방식을 이용하였으며 electric steam boiler와 연계를 통해 저부하운전이 가능함을 확인하였다. 지속적인 운전을 통해 저부하운전모드를 개발하였으며 이를 통해 신재생에너지원이 불안정한 전력부하특성을 대응할 수 있을 것으로 판단된다.

아울러 본 연구에서는 담수화 플랜트의 가장 큰 문제점인 농축수 해결방안으로 제염 실험을 수행하였다. 기본 실험을 통해 제염 설비 방법을 제안하였으며 이를 바탕으로 제염설비를 구축하였다. 제염 실험을 통해 결정화 농축장치에서 약 15wt%까지 농축된 고농도 농축수를 이용하여 제염이 가능함을 확인하였다. 그러나 결정화 농축장치에서 소금 결정이 만들어지기까지 오랜 시간이 소요되며 마그네슘 등의 미네랄을 제어할 수 있는 방안을 모색하여야 할 것으로 보인다.

또한, MVR 해수담수화 플랜트의 담수에서 지속적으로 발생하는 저온의 폐열 원으로부터 효율적으로 전기에너지를 생산할 수 있는 시스템을 개발하고자 TM 변환 발전기에 관한 연구를 진행하였다.

저온에서도 작동이 가능한 여러 가지 종류의 스텔링 엔진을 활용하여 TM변환 발전기를 개발하였으며 다양한 방법을 적용하여 기초적인 실험을 수행하였다. 특히, 여러 경우의 열원과 열침원 간의 온도차에 대한 기계적 출력 및 전기적 출력을 측정하고 그 결과를 비교분석하였다. 이를 통하여 새로운 TM변환 발전기 개발에 관한 주요한 기술적 데이터를 구축하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

저온도차 스텔링 엔진을 활용한 TM변환 발전 실험의 경우 기계적 출력에서 MM-7엔진을 활용한 방법이 가장 높게 측정됨을 확인하였으며, 이를 토대로 MM-7엔진의 전기적 출력 변환에 대한 다양한 기술적 자료를 구축하였다.

전기적 출력 실험에서 AC generator를 활용하였을 경우 출력은 1.125mW, 변환효율은 약 37.6%에 이를 수 있음을 확인하였다. Generator coil의 경우 동일 조건하에서 출력은 1.62mW, 변환 효율은 43.5%를 나타냈다. 일반적인 터빈 변환 효율(약 60%)보다 낮지만 저온 열원을 활용한다는 점에서 지속적인 연구를 수행할 충분한 가치가 있다고 사료된다. 그러나 작동 시 저온도 차의 적용으로 인한 낮은 토크의 발생으로 엔진 내부의 기계적 마찰 등에 의한 멈춤 현상이 자주 관찰되었는데, 이를 극복하기 위해 동일 조건에서 보다 높은 토크와 회전속도를 제공할 수 있는 TM변환기술의 개발이 필요하다.

가돌리늄을 활용한 TM변환 발전장치의 경우 동일 작동 조건하에서 전술한 MM-7엔진의 경우와 비교하여 출력은 약 4.5배, 토크는 약 8.1배 증가함을 확인할 수 있었다.

전기적 출력 실험에서 AC generator와 generator coil를 활용하였을 경우 각각의 출력과 변환효율은 0.00491mW, 0.016% 그리고 0.00851mW, 0.02%로 측정되었다. 저온도차 스텔링 엔진과 비교했을 때 기계적 출력은 매우 높은 반면 전기적 출력은 매우 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이는 TM변환기(장치)와 발전기의 연계 조건과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 높은 토크 값과 빠른 회전속도를 활용할 수 있는 발전기의 개발이 필요하며 특히, TM변환기와 발전기의 최적의 연계 조건에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

MVR 해수담수화 플랜트의 원수와 생산 담수의 온도차는 약 50℃로 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전장치의 열원으로 사용하기에 매우 적합하다. 따라서 지속적인 연구를 통해 보다 발전성능이 양호한 발전기를 개발하여 TM변환기에 적용할 수 있다면 전체적으로는 MVR 해수담수화 플랜트의 에너지 효율성을 높이고 시스템의 부가가치를 한층 제고할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Water Security Corporation, Global Forecast 2020, 2004
- [2] Ko E. O. et al., Status-of-arts of Desalination Technology, Membrane Journal 20, 2010.
- [3] www.roplant.or.kr
- [4] Wolf R., Mechanical Vapour Compression for Concentration by Evaporation, UIE, 1986.
- [5] Zimmer AG., Latest Developments in Energy Efficient Evaporation. Wiegand Evaporators.
- [6] International Energy Agency, Heat pump systems: a technology review, 1982.
- [7] Moser H. et al., Mechanical Vapor compression(MVC), Heat Recovery System 4, 1984.
- [8] "VOSCO VRC 蒸發裝置", 住友重機械工業株式會社 資料
- [9] Zimerman Z., Development of large capacity high efficiency mechanical vapor compression (MVC) uniuts, Desalination 96, 1994.
- [10] Al-Juwayhel F. et al., Analysis of Single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps, Desalination 114, 1997.
- [11] Matz R. et al., A comparison of the relative economics of sea water desalination by vapor compression and reverse osmosis for small to medium capacity plants, Desalination 36, 1981.
- [12] 黒田章一, 水蒸氣 高效率 高壓縮 ヒートポンプの 開發, 省エネルギー、38, 1986.
- [13] 産業用 高壓縮式ヒートポンプの, 木村化工機株式會社 資料
- [14] VVC 蒸氣裝置, 笹倉機械製作所 資料
- [15] 産業用ヒートポンプの, 省エネルギー、46, 1994.

- [16] Galstaun L. S. et al., Heat pumping pay out in C5/C6 Isom Plant, Oil Gas Journal 12, 1979.
- [17] Distillation of Ethanol by Vapor Compression, Starcosa GmbH, 1984.
- [18] Distillation Columns with Vapor Recompression, Sultzer Brothers Ltd.
- [19] <https://www.alfalaval.com/search/?text=Desalt%20VVC>
- [20] Miller E. J., Review of Water Resources and Desalination Technologies, Sandia National Laboratories, 2003.
- [21] <http://www.seahero.org/main/>
- [22] KISTEP, 플랜트기술고도화사업, 2009.
- [23] KITECH, 폐열회수장치 이용기술에 관한 연구, KE-84-19 연구보고서, 1984.
- [24] Kim B. D. et al., A Development Study on the Evaporation Type Large Fresh Water Generator, Journal of The Korean Society of Marine Engineers 18, 1994.
- [25] KIER, 에너지절약기술 시범화 사업(Ⅱ), KE-87(B)-8 연구보고서, 1988.
- [26] Hyun Y. I. et al., Development of Mechanical Vapor Recompression System for Desalination and Waste Water Treatment, Proceedings of KSEE, 2003.
- [27] Hyun Y. I. et al., Small Efficient MVR Water Treatment System using High Speed Turbomachinery, Proceedings of KSFM, 2004.
- [28] Wiely J. et al., Cane Sugar Handbook, 10th ED, 1970.
- [29] KIER, A Development on the Effective Management Technology of Energy Conservation(Ⅲ), KIER-992301, 1999.
- [30] El-dessouky H., Modelling and Simulation of the Thermal Vapor Compression Desalination Process, IAEA-SM-347/52, 1998.
- [31] Compressor Handbook for Hydrocarbon Processing Industries, Gulf Publishing Company.
- [32] <http://www.ksalt.or.kr/>

- [33] <http://www.jihe.go.kr/>
- [34] Cengel Y. A. et al., Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition, McGraw Hill, 2015.
- [35] Shirani M. et al., One-dimensional constitutive model with transformation surfaces for phase transition in shape memory alloys considering the effect of loading history, International Journal of Solids and Structures 81, 2016.
- [36] Chun W. G. et al., Acoustic waves generated by a TA (ThermoAcoustic) laser pair, Energy 45, 2012.
- [37] Banchara K. et al., Performance of low-temperature differential Stirling engines, Renewable Energy 32, 2007.
- [38] KIST, The R&D on a Stirling Engine, 1990.
- [39] <http://www.rsc.org/periodic-table/element/64/gadolinium>
- [40] Zhou. Z. et al., Gadolinium-based contrast agents for magnetic resonance cancer imaging, Nanomedicine and Nanobiotechnology 5, 2012.
- [41] Abdushukurov D. A., Mathematical Modeling of the Efficiency Gadolinium Based Neutron Converters, Applied Mathematics 4, 2013.
- [42] Belov K. P. et al., Magnetic and magnetoelastic properties of dysprosium and gadolinium, SOVIET PHYSICS JETP 13, 1960.
- [43] <https://www.stirlingengine.com/>
- [44] Guo H. et al., A Water-Proof Triboelectric-Electromagnetic Hybrid Generator for Energy Harvesting in Harsh Environments, Advanced Energy Materials 6, 2016.
- [45] Chen K. et al., An analysis of the heat transfer rate and efficiency of TE(Thermoelectric) cooling systems, International Journal of Energy Research 20, 1996.
- [46] Hinchet R. et al., Recent Progress on Flexible Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Electronics, ChemSusChem 8, 2015.

- [47] Niu S. et al., Theoretical systems of triboelectric nanogenerators, *Nano Energy* 14, 2015.
- [48] Lin L. et al., Noncontact Free-Rotating Disk Triboelectric Nanogenerator as a Sustainable Energy Harvester and Self-Powered Mechanical Sensor, *American Chemical Society Applied Materials & Interfaces* 6, 2014.
- [49] Shin S. Y. et al., Fabrication of PDMS-based triboelectric nanogenerator for self-sustained power source application, *International Journal of Energy Research* 40, 2016.
- [50] Chun J. et al., Mesoporous pores impregnated with Au nanoparticles as effective dielectrics for enhancing triboelectric nanogenerator performance in harsh environments, *Energy Environmental Science* 8, 2015.
- [51] Wang Z. L., Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors, *American Chemical Society NANO* 7, 2013.

요약문(Abstract)

MVR방식의 해수담수화 플랜트는 기존 증발 방식(단일효용 기준) 대비 약 30배 이상의 고효율 장비이며 고속 터보형 증기압축기를 적용하여 부분부하 운전 및 자동화에 용이하고 장비의 소형화가 가능하다. 또한 증기재압축식 히트펌프시스템으로 에너지 효율이 매우 높으며 해수의 청정도와 무관하여 정밀한 전처리 장비가 불필요하다. 또한, MVR방식의 증발법은 RO방식의 막 분리법보다 유지보수비용이 저렴하고 회수율(담수/취수)이 높아 부산물인 농축수의 농도조절이 용이하다. 따라서 고농도의 농축수를 활용한 소금 제조 및 미네랄 회수 등으로 부가가치를 높일 수 있다.

본 연구에서는 고효율 MVR방식의 해수담수화 플랜트를 개발하였으며 지속적인 운전을 통하여 주요기기 및 MVR 해수담수화 플랜트의 특성을 분석하고 신재생에너지와의 연계를 위하여 부하변동 특성에 대응할 수 있는 최적운전모드를 개발하였다. 또한, 에너지효율 향상을 위한 단일효용 및 2중효용 운전모드를 개발하고 실증운전을 수행하였다.

MVR 압축비는 MVR inverter speed가 55Hz일 때 1.55로 설계치와 동일함을 확인하였다. 주 열교환기는 증발·농축관의 압력변화에 따라 온도차가 일정하진 않았으나 설계치 범위 내에서 운전됨을 확인하였다. 담수 생산량의 경우 일일 약 28ton에서 51ton을 생산할 수 있음을 확인하였으며 생산 담수 1ton당 전력소비량은 단일효용 시 약 43kW이고 2중효용 시 약 23kW로 2중효용 시 약 2배 높은 에너지 효율을 보임을 확인하였다. MVR의 부하 조절을 위해 inverter speed 제어 방식을 이용하였으며 electric steam boiler와 연계를 통하여 저부하운전이 가능함을 확인하였다. 지속적인 운전을 통해 개발된 저부하운전모드를 통해 신재생에너지원의 불안정한 전력부하특성에 대응할 수 있을 것으로 판단된다.

아울러 본 연구에서는 고농도 농축수 해결방안의 하나로 제염 방법을 제안하

였으며 기초 실험을 통해 실제 제염이 가능함을 확인하였다. 기초 실험결과를 바탕으로 제염 설비를 MVR 해수담수화 플랜트에 연계하였으며 제염설비를 통해 소금을 생산하였다. 지속적인 연구가 진행된다며 제염뿐 아니라 마그네슘 등의 미네랄 제어도 가능할 것으로 사료되어진다.

또한, MVR 해수담수화 플랜트인 원수와 생산 담수에서 지속적으로 발생되는 저온의 폐열원(약 50℃)으로부터 효율적으로 전기에너지를 생산할 수 있는 시스템을 개발하고자 서로 다른 두 가지 방식의 TM변환발전장치에 관한 연구를 진행하였다. 첫 번째는 저온도차 스텔링엔진을 활용한 TM변환 발전장치이며 두 번째는 자기열량효과를 가진 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전장치이다. 기계적 출력 비교 시 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전장치가 저온도차 스텔링 엔진을 활용한 TM변환 발전장치보다 토크는 약 8.1배, 출력은 약 4.5배 높다는 것을 확인하였다. 그러나 전기적 출력이 경우 가돌리늄을 활용한 TM변환 발전장치의 출력이 저온도차 스텔링엔진을 활용한 TM변환 발전장치보다 매우 낮게 측정됨을 확인하였다. 따라서 기계적 출력을 전기적 출력으로 효과적으로 변환하기 위해 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

CURRICULUM VITAE

◎ Personal Information

Name: Yeong Min Kim

Date of Birth: 26/04/1982

Place of Birth: Jeju, Republic of Korea

◎ Educations

Ph.D., Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University, Korea(2018. 02)

Thesis title: *“A Study of the Development of a MVR Seawater Desalination System and Enhancement of Its Energy Efficiency in Exploiting New and Renewable Energy”*

Supervisor: Prof. Wongee Chun

M.S., Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University, Korea(2011. 02)

Thesis title: *“A study on the performance enhancement of low-temperature solar applications : Daylighting and Adsorption Desalination System”*

Supervisor: Prof. Wongee Chun

B.E., Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University, Korea(2009. 02)

© Publications

• Journal Papers

1. Y. M. Kim, H. J. Jeong, W. S. Kim, W. G. Chun, H. J. Han, S. H. Lim, “A comparative performance analysis on daylighting for two different types of solar concentrators: Dish vs. Fresnel lens”, *Energy* 137, pp. 449–456, 2017.
2. Y. M. Kim, W. G. Chun, K. Chen, “Thermal-Flow Analysis of a Simple LTD (Low-Temperature-Differential) Heat Engine”, *Energies* 10(4), pp.567, 2017.
3. U. Shaislamov, Y. M. Kim, W. S. Kim, H. J. Jeong, H. J. Lee, W. G. Chun, “Hybrid operation of triboelectric nanogenerator for electricity generation by a low-temperature differential heat engine”, *International Journal of Energy Research* 41(10), pp. 1412–1421, 2017.
4. K. Chen, M. Albonaem, Y. M. Kim, N. J. Kim, S. H. Lim, W. G. Chun, “Development and Testing of a KiloHertz Solar-to-Acoustic Energy Converter”, *ASME* 139(2), pp. 8, 2016.
5. F. Israr, D. K. Kim, Y. M. Kim, S. J. Oh, K. C. Ng, W. G. Chun, “Synthesis of porous Cu-BTC with ultrasonic treatment: Effects of ultrasonic power and solvent condition”, *Ultrasonics Sonochemistry* 29, pp. 186–193, 2016.
6. F. Israr, D. Y. Chun, Y. M. Kim, D. K. Kim, “High yield synthesis of Ni-BTC metal - organic framework with ultrasonic irradiation: Role of polar aprotic DMF solvent”, *Ultrasonics Sonochemistry* 31, pp. 93–101, 2016.
7. F. Israr, D. K. Kim, Y. M. Kim, W. G. Chun, “SCOPE OF VARIOUS SOLVENTS AND THEIR EFFECTS ON SOLVOTHERMAL

SYNTHESIS OF Ni-BTC”, *Quimica Nova* 39(6), pp. 669-675, 2016.

8. S. H. Lim, R. Surathu, S. J. Oh, S. W. Shin, Y. M. Kim, W. G. Chun, K. Chen, “Transient and synchronization behaviors of two coupled thermal acoustic converters”, *Journal of Energy Engineering* 142(1), 2016.
9. K. Chen , A. Rahman, Y. M. Kim, S. J. Oh, W. G. Chun, “Production of acoustic waves from pulsed thermal radiation”, *International Journal of Energy Research* 40, pp. 462-472, 2016.
10. S. J. Oh, M. Burhan, K. C. Ng, Y. M. Kim, W. G. Chun, “Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics”, *International Journal of Energy Research* 39(7), pp. 965-976. 2015.
11. S. J. Oh. Y. J. Lee, K. Chen, Y. M. Kim, S. H. Lim, W. G. Chun, “Development of an embedded solar tracker for the enhancement of solar energy utilization”, *International Journal of Energy Research* 36, pp. 249-258, 2012.)
12. 김영민, 김원식, 정해준, 천원기, “태양추적식 자연채광 장치의 집광기 종류에 따른 성능 분석 - 포물 반사경 vs. 프레넬 렌즈”, *한국태양에너지학회 논문집* 37(1), pp. 39-45, 2017.
13. 김영민, 김원식, 정해준, 천원기, “소형 LTD 히트 엔진의 종류에 따른 기계적 출력 비교 분석”, *한국태양에너지학회 논문집* 37(2), pp. 59-66, 2017.
14. 김원식, 정해준, 김영민, 천원기, “자기열량효과 물질을 이용한 저온도차 열변환발전 시스템의 성능 분석 연구”, *한국신재생에너지학회 논문집* 13(2), pp. 44-49, 2017.
15. 정해준, 김원식, 김영민, 한현주, 천원기, “광화이버 및 Fresnel lens 적용 집광식 자연채광 시스템의 이용을 통한 조명에너지의 절감 - 시뮬레이션 및 실측 비교”, *한국태양에너지학회 논문집* 37(3), pp. 1-12, 2017.

16. 김영민, 관철편, 천원기, “TM발전변환기 개발을 위한 저온도차 스텔링엔진 (MM-7)의 성능실측 연구”, 한국에너지학회 논문집 25(1), pp. 9-14, 2016.
17. 김영민, 천원기, 김동국, “MVR해수담수화플랜트의 개발 및 성능에 관한 연구”, 한국에너지학회 논문집 25(3), pp. 59-65, 2016.
18. 정해준, 김영민, 김원식, 천원기, “형광등과 Fiber-Optic 자연채광 시스템의 경제성에 대한 LCC 비교 분석 연구”, 한국에너지기후변화학회 논문집 11(2), pp. 160-169, 2016.
19. 김영민, 천원기, 김동국, “MVR해수담수화플랜트의 고농도 농축수를 활용한 미네랄 제어 및 제염기술 연구”, 한국에너지학회 논문집 25(4), pp. 1-6, 2016.
20. K. Chen ,H. D. DaCosta, Y. M. Kim, S. J. Oh, W. G. Chun, “Construction and Testing of a radiation-beam powered TA (ThermoAcoustic) washer for grease removal”, 한국에너지학회 논문집 35(1), pp. 21-28, 2015.
21. F. Israr, D. K. Kim, Y. M. Kim, S. J. Oh, K. C. Ng, W. G. Chun, “Cost effective and low energy consuming hydrothermal synthesis of Ni based MOF”, 한국에너지학회 논문집 24(2), pp. 51-54, 2015.
22. F. Israr, D. K. Kim, Y. M. Kim, S. J. Oh, K. C. Ng, W. G. Chun, “Hydrothermal Synthesis of Fe Based MOFs with Energy Economy Approach”, 한국에너지학회 논문집 24(2), pp. 55-58, 2015.
23. 김영민, 모용현, 신상웅, 오승진, 천원기, “Hot mirror를 이용한 고밀도 태양광의 광분리에 관한 기초실험 연구”, 한국에너지학회 논문집 23(4), pp.56-60, 2014.
24. 김영민, 오승진, 현준호, 김남진, 천원기, “ 흡착식 담수화 시스템의 기초 설계 및 주요 요소 분석”, 에너지기후변화학회 논문집 5(2), pp. 36-43, 2010.

• **Conference papers**

1. 김영민, 천원기, “자기열량효과 물질을 이용한 에너지변화시스템의 성능 분석”, 한국에너지학회 춘계학술발표회, 2017.
2. 김영민, 김종인, 문성호, 천원기, “Gd 블록을 이용한 발전용 회전자의 성능 연구”, 한국에너지기후변화학회 추계학술발표회, 2017.
3. Y. M. Kim, W. S. Kim, H. J. Jeong, Y. S. Lee, W. G. Chun, “Producing power from low-grade thermal energy by using an heat engine based on materials with magnetocalorific effect”, 16th International Conference on Sustainable Energy Technologies 2017.
4. W. G. Chun, K. Chen, Y. M. Kim, W. S. Kim, Y. S. Lee, “A Study on the thermal performance of a LTD(Low-Temperature-Differential) heat engine for harvesting low temperature waste heat”, 15th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2016.
5. 김원식, 정혜준, 김영민, 오승진, 천원기, “태양추적시스템 반사경 크기에 따른 실내 자연채광 조도 분석”, 한국에너지기후변화학회 춘계학술발표회, 2015.
6. 정혜준, 김원식, 김영민, 오승진, 천원기, “태양추적시스템을 이용한 자연채광의 실내 조도 비교 분석”, 한국에너지기후변화학회 춘계학술발표회, 2015.
7. Y. M. Kim, Y. S. Lee, S. J. Oh, W. G. Chun, “A study on the optical separation of highly concentrated solar radiation using hot mirror”, 14th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2015.
8. Y. M. Kim, S. J. Oh, K. C. Ng, W. G. Chun, “Development of a two-axis solar tracker and solar concentrator modules for CPV(Concentrated Photovoltaics)”, Materials Challenges in Alternative & Renewable Energy, 2015.

9. W. G. Chun, S. W. Shin, Y. H. Mo, Y. M. Kim, Y. S. Lee, “An experimental analysis on a simple thermoacoustic generator for solar energy application”, 13th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2014.
10. S. J. Oh, Y. M. Kim, H. J. Jeong, K. C. Ng, W. G. Chun, “Development of smart solar trackers using a microcontroller for solar concentrators”, 6th International Meeting on Advanced Thermofluids, 2013.

◎ Patents

1. W. G. Chun, S. J. Oh, N. J. Kim, Y. C. Park, Y. M. Kim, K. Chen, “Dish washer using oscillatory flow generated from thermoacoustic effect”, US9498101 B2, 2016.
2. W. G. Chun, S. J. Oh, N. J. Kim, Y. C. Park, Y. M. Kim, K. Chen, “Use of pulsed thermal radiation and nano-particles for the effective generation of sound waves in kHz range”, US20160059265 A1, 2016.
3. W. G. Chun, S. J. Oh, N. J. Kim, Y. C. Park, Y. M. Kim, K. Chen, “Effective sound generator using pulsed thermal radiation”, US 9242278 B1, 2016.
4. 천원기, 오승진, 김남진, 박윤철, 김영민, 관철편, “펄스 열복사 빔과 나노 입자를 이용한 킬로헤르츠 범위의 고효율 음향파 발생장치”, 10-1550582, 2015.
5. 천원기, 오승진, 김남진, 박윤철, 김영민, 관철편, “펄스 열복사 빔을 이용한 고효율의 음향파 발생장치”, 10-1550583, 2015
6. 천원기, 오승진, 김남진, 박윤철, 김영민, 관철편, “펄스 열복사 빔과 나노 구조물을 이용한 킬로헤르츠 범위의 음향파 발생장치”, 10-1584613, 2016.
7. 천원기, 오승진, 김남진, 박윤철, 김영민, 관철편, “열음향 효과에 의한 진동유동을 이용한 식기 세척 장치”, 10-1584619, 2016.
8. 천원기, 관철편, 김영민, “전력 생산을 위한 파티클 타입 구조의 플루다인 스텔링 엔진”, 10-1678496, 2016.
9. 천원기, 관철편, 김남진, 김영민, 김원식, 정해준, “열효율 향상을 위한 TME 모듈”, 10-1738871, 2016.

◎ Project Research Activities

2017.03-present, Research Assistant, Jeju National University, “Development of cascaded TM (Thermal to Mechanical energy) power conversion technology for exploiting low-grade heat sources“, granted by NRF, No. 2017R1A2A1A05001461.

2014.05-2017.04, Research Assistant, Jeju National University, “Development of TM(Thermal to Mechanical Energy) electric conversion system for harvesting very low-temperature heat resouces“, granted by NRF, No. 2014R1A2A1A01006421.

2011.04-2013.03, Research Assistant, Korea Institute of Energy Research, “Development and demonstration of MVR desalination plant using wind diesel hybrid system”, granted by KIER, No. KIER-B18104.

2009.09-2014.08.31, Research Assistant, Jeju National University, “Development of a Thermal Acoustic Laser(TAL)/solar illumination system utilizing concentrated solar radiation”, granted by NRF(MSIP), No. 2009-0092786.

2008.09-2013.08, Research Assistant, Jeju National University, “Development of solar and waste-heat powered cooling and adsorption desalination technology”, granted by NRF(MSIP), No. R33200800010166.

감사의 글(Acknowledgement)

지난 대학원 생활을 돌이켜보니 참으로 많은 것을 배우고 느낀, 뜻 깊은 시간이었습니다. 많은 분들을 통해 얻은 삶에 지혜와 경험은 제 앞길에 새로운 지침이 될 것입니다.

우선, 부족한 저에게 항상 따뜻한 사랑과 자상하신 가르침으로 지도를 아끼지 않으신 지도 교수이신 천원기 교수님께 머리 숙여 깊은 감사드립니다. 그리고 저의 미흡한 논문을 자상하게 심사해 주시고 아낌없는 격려와 지도를 하여 주신 이윤준 교수님과 한국에너지기술연구원 김동국 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 논문심사를 위해 기꺼이 시간을 할애해주신 심사위원이신 이현주 교수님, 임상훈 박사님께 감사드립니다. 아울러 학부생 때부터 많은 가르침을 주신 에너지공학과 박재우 교수님, 김남진 교수님과 박사 과정 동안 많은 자문과 도움을 주신 한현주 박사님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

에너지공학과에서 오랜 시간을 보내면서 항상 많은 조언과 격려를 아끼지 않은 현준호, 김지훈, 오승진, 장영준 선배님과 양종근 후배님에게 지면을 빌어 감사의 뜻을 전합니다. 어렵고 힘들 때 힘이 되어준 신재생에너지 연구실 후배 원식, 해준, 윤정, 종인, 연주, 성호, 송이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 저에게 행정적 지원을 아끼지 않은 학과사무실 박경호, 모용현, 강제원, 강경윤 조교선생님에게도 고마움을 전하며 이외에도 곁에서 많은 힘이 되어주신 선·후배님들에게 감사의 말을 전합니다.

그리고 누구보다 기뻐할 부모님, 장모님 감사합니다. 제가 여기까지 올 수 있는 버팀목이었습니다. 그리고 항상 내편이 되어준 누나 내외와 동생 영호에게 진심으로 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 아빠라고 많이 놀아주지도 못하고 시간을 많이 보내주지 못했는데도 아빠를 많이 좋아하는 두 딸 예나, 유나와 대학원생인 남편을 만나 힘든 시간을 함께 버텨준 나의 아내 오명심에게 고맙다는 말과 사랑한다는 말을 전합니다. 끝으로 저를 사랑해주시는 모든 분들께 이 논문을 바칩니다.

첨 부

MVR 해수담수화 플랜트 최적운전모드

(1) 초기 단위장치 상태	156
(2) Effect 선택	160
(3) 초기 운전개시	162
(4) 정상운전 - Single Effect	166
(5) 저부하운전	170
(6) CIP운전	172

(1) 초기 단위장치 상태

No.	항 목	Tag No.	상 세 내 용	조 치 내 용
1	동력장치			
	1 Pump			
		P-101	Seawater Feed Pump	Stop
		P-111	CFW Pump	Stop
		P-121	LCSW Pump	Stop
		P-201A	J-201 A-Pass 순환 Pump	Stop
		P-201B	J-201 B-Pass 순환 Pump	Stop
		P-231	Hot Freshwater Pump	Stop
		VP-231	Vacuum Pump	Stop
		P-301	J-301 순환 Pump	Stop
2	기타			
		K-211	MVR	Stop
		J-301	Salt Crystallizer Agitator	Stop
		T-311	HCSW Tank Agitator	Stop
		X-901	Steam Boiler	Stop
		X-911	Air Compressor	Stop
2	Proportional Auto Valve			
	1 Steam Line			

No.	항 목	Tag No.	상 세 내 용	조 치 내 용
	1	HV-J201A	Make-up HP Steam 공급용 Control Valve	100% Close
	2	TV-K211	MVR Recycle Vapor 제어용 Control Valve	100% Close
	3	HV-J301	LP Vapor 제어용 Control Valve	100% Close
2	기타			
		PV-VP231	Inert Gas 제어용 Control Valve	100% Close
		TV-FW222	냉각수 제어용 Control Valve	100% Close
3	Auto On/Off Valve			
1	CIP Line			
	1	HV-CIP01	CIP Return 제어용	Close
	2	HV-CIP02	T-101 turn Seawater 공급제어용	Close
	3	HV-CIP03	CIP Return 제어용	Close
	4	HV-CIP04	CIP Return 제어용	Close
2	J-201 Seawater Line			
	1	LV-J201A	J-201 A-Pass Seawater 공급제어용	Close
	2	LV-J201B	J-201 B-Pass Seawater 공급제어용	Close
	3	HV-J201DA	J-201 A-Pass Seawater 배출제어용	Close
	4	HV-J201DB	J-201 B-Pass Seawater 배출제어용	Close
	5	HV-J201RA	J-201 A-Pass Seawater 순환제어용	Close
	6	HV-J201RB	J-201 B-Pass Seawater 순환제어용	Close
	7	HV-J201SA	J-201 B→A Seawater 공급제어용	Close
	8	HV-J201SB	J-201 A→B Seawater 공급제어용	Close
	9	XV-J201	J-201 Effect 변환時 Seawater 공급제어용	Close

No.			항 목	Tag No.	상 세 내 용	조 치 내 용
3	2	10		DV-J201	J-201 Light Concentrated Seawater 배출 제어용	Close
	3		J-301 Seawater Line			
		1		HV-J301A	J-301 Light Concentrated Seawater 공급 제어용	Close
		2		HV-J301B	T-121 LCSW Tank Light Concentrated Seawater 순환제어용	Close
		3		DV-J301	J-201 Heavy Concentrated Seawater 배출 제어용	Close
	4		Vapor(Steam) Line			
		1		HV-SV201A1	J-201 A-Pass Discharge Vapor 배출제어용	Open
		2		HV-SV201B1	J-201 B-Pass Discharge Vapor 배출제어용	Open
		3		HV-SV201A2	J-201 A-Pass Discharge Vapor 배출제어용	Close
		4		HV-SV201B2	J-201 B-Pass Discharge Vapor 배출제어용	Close
		5		HV-H221A1	H-221A FC Heater Vapor 공급제어용	Open
		6		HV-H221B1	H-221B FC Heater Vapor 공급제어용	Open
		7		HV-H221A2	H-221A FC Heater Vapor 공급제어용	Close
		8		HV-H221B2	H-221B FC Heater Vapor 공급제어용	Close
		9		HV-J201B	비상時 Make-up Steam 공급제어용	Close
		10		HV-H222	저부하운전時 J-201 Discharge Vapor 배출제어용	Close
	5		MVR			
		1		HV-K211	MVR Suction Vapor 공급제어용	Close
		2		LV-T211A	T-211 Drain Port 응축수 배출제어용	Open
		3		LV-T211B	T-211 Drain Port 응축수 배출제어용	Open
		4		LV-T211C	T-211 Drain Port 응축수 배출제어용	Open

No.		항 목	Tag No.	상 세 내 용	조 치 내 용
3	6	Freshwater Line			
	1		HV-FW111	P-111 Cold Freshwater 응축수 배출제어용	Close
	2		LV-T231	T-231 Hot Freshwater Tank 응축수 공급제어용	Close
	3		TV-FW231	T-231 Hot Freshwater Tank 응축수 배출제어용	Close
7		Vacuum Line			
	1		PV-J201A	J-201 A-Pass Inert Gas 배출제어용	Close
	2		PV-J201B	J-201 B-Pass Inert Gas 배출제어용	Close
	3		HV-VP222	H-222 Vapor Condensor Inert Gas 배출제어용	Close

(2) Effect 선택

No.	항 목		조 치 내 용	비 고
1		Single Effect		
	1	Effect Selection		
	1	Effect Switch	Effect 선택	Single Effect 선택
	2	Seawater Line		
	1	XV-J201	Auto On/Off Valve	J-201 Effect 변환時 Seawater 공급제어용 "Open"
	3	Vapor(Steam) Line		
	1	HV-SV201A1	Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Discharge Vapor 배출제어용 "Open"
	2	HV-SV201B1	Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Discharge Vapor 배출제어용 "Open"
	3	HV-SV201A2	Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Discharge Vapor 배출제어용 "Close"
	4	HV-SV201B2	Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Discharge Vapor 배출제어용 "Close"
	5	HV-H221A1	Auto On/Off Valve	H-221A FC Heater Vapor 공급제어용 "Open"
	6	HV-H221B1	Auto On/Off Valve	H-221B FC Heater Vapor 공급제어용 "Open"
	7	HV-H221A2	Auto On/Off Valve	H-221A FC Heater Vapor 공급제어용 "Close"
	8	HV-H221B2	Auto On/Off Valve	H-221B FC Heater Vapor 공급제어용 "Close"
	4	Vacuum Line		
	1	PV-J201A	Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Inert Gas 배출제어용 "Open"
	2	PV-J201B	Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Inert Gas 배출제어용 "Open"

No.	항 목		조 치 내 용	비 고
1		Double Effect		
	1	Effect Selection		
	1	Effect Switch	Effect 선택	Double Effect 선택
	2	Seawater Line		
	1	XV-J201	Auto On/Off Valve	J-201 Effect 변환時 Seawater 공급 제어용 “Close”
	3	Vapor(Steam) Line(A→B Pass 기준)		
	1	HV-SV201A1	Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Discharge Vapor 배출제어용 “Open”
	2	HV-SV201B1	Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Discharge Vapor 배출제어용 “Close”
	3	HV-SV201A2	Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Discharge Vapor 배출제어용 “Close”
	4	HV-SV201B2	Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Discharge Vapor 배출제어용 “Open”
	5	HV-H221A1	Auto On/Off Valve	H-221A FC Heater Vapor 공급제어용 “Close”
	6	HV-H221B1	Auto On/Off Valve	H-221B FC Heater Vapor 공급제어용 “Open”
	7	HV-H221A2	Auto On/Off Valve	H-221A FC Heater Vapor 공급제어용 “Open”
	8	HV-H221B2	Auto On/Off Valve	H-221B FC Heater Vapor 공급제어용 “Close”
	4	Vacuum Line		
	1	PV-J201A	Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Inert Gas 배출제어용 “Open”
	2	PV-J201B	Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Inert Gas 배출제어용 “Close”

(3) 초기 운전개시

No.		항 목		조 치 내 용	비 고
1		운전준비			
	1	압축공기			
	1	X-911	1. Air Compressor	Air Compressor Control Panel 전원 공급 확인	
			2. 압축공기 공급확인	압축공기 Valve "Open"	
	2	T-911	HP Air Service Tank	압축공기 압력확인	4bar이상
	2	담수(T-111 Cold Freshwater Tank)			
	1	LIA-T111	T-111 Level	T-111 Cold Freshwater Tank 수위 확인	
				Level이 10%이하인 경우, 공정수를 20%까지 보충	
	2	P-111	CFW Pump	P-111 CFW Pump "Start"	
	3		Sealing Water	P-111, P-121, P-201A, P-201B, VP-231, P-301	Sealing Water Valve의 위치확인
	3	Vacuum Line			
	1	PV-VP231	Proportional Auto Valve	Vacuum Control Valve 60% "Open"	
	2	PV-J201A	Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Inert Gas Discharge "Open"	
	3	PV-J201B	Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Inert Gas Discharge "Open"	
	4	SIC-VP231	Vacuum Pump Inverter	VP-231 Vacuum Pump Speed Setting → "30Hz"	
	5	VP-231	Vacuum Pump	VP-231 Vacuum Pump "Start"	
	4	J-201 해수공급			
	1	XV-J201	Auto On/Off Valve	1. Single Effect 운전時 "Open"	A ↔ B Pass

No.			항 목	조 치 내 용	비 고	
1	4	1	XV-J201	Auto On/Off Valve	2. Double Effect 운전時 “Close”	A↔B Pass 통액차단
		2	HV-CIP02	Auto On/Off Valve	해수공급용 Auto On/Off Valve “Open”	
		3	HV-CIP01	Auto On/Off Valve	CIP Water Return Auto On/Off Valve “Close”	
		4	P-101	Seawater Feed Pump	P-101 Seawater Feed Pump “Start”	
		5	Pass Switch	Pass 선택	A↔B Pass 선택	A→B Pass 기준
		6	KV-J201DA	Auto On/Off Valve	농도측정 공급용 Auto On/Off Valve “Open”	
		7	KV-J201DA	Auto On/Off Valve	농도측정 공급용 Auto On/Off Valve “Open”	
		8	LICA-J201A	J-201 A-Pass Level	J-201 A-Pass Level 이 80% 가 될 때까지 대기	
		9	SIC-P201A	P-201A Inverter	J-201 A-Pass 순환 Pump Speed Setting → “50Hz”	
		10	SIC-P201B	P-201B Inverter	J-201 B-Pass 순환 Pump Speed Setting → “50Hz”	
		11	P-201A	J-201 A-Pass Pump	J-201 A-Pass 순환 Pump “Start”	J - 2 0 1 A - P a s s Level 이 80%에 도 달한 후에 “Start”
		12	P-201B	J-201 B-Pass Pump	J-201 B-Pass 순환 Pump “Start”	
		13	LICA-J201A	J-201 A-Pass Level	“Auto” 로 전환	
		14	LICA-J201B	J-201 B-Pass Level	“Auto” 로 전환	
	5		J-301 해수공급			
		1	LV-J301A	Auto On/Off Valve	해수공급용 Auto On/Off Valve “Open”	
		2	LV-J301B	Auto On/Off Valve	Recycle Auto On/Off Valve “Close”	
		3	P-121	LCSW Feed Pump	P-121 LCSW Feed Pump “Start”	
		4	LICA-J301	J-301 Level	J-301 Level 이 80% 가 될 때까지 대 기	
		5	P-301	J-301 순환 Pump	J-301 순환 Pump “Start”	
		6	LICA-J301	J-301 Level	DIC-J301 “Auto” 로 전환	

No.		항 목		조 치 내 용	비 고
2		에열운전			
	1	Steam			
	1	X-901	Steam Boiler	Steam Boiler "Start"	
				설정온도 135℃ 확인	
	2	HV-J201A	Proportional Auto Valve	Steam Control Valve 100% "Open"	
	3	J-201	J-201 액온도	J-201 A-Pass Level 이 80% 가 될 때까지 대기	

No.	항 목		조 치 내 용	비 고
3		MVR 가동		
	1	MVR 가동준비		
	1	LSA-T211 Level Switch	Drain Port Level Switch "Auto" 로 전환	
	2	HV-K211 Auto On/Off Valve	MVR Suction Auto On/Off Valve "Open"	
	3	HV-J201B Auto On/Off Valve	MVR Suction Auto On/Off Valve "Open"	MVR 의 Surging 방지용
	4	HV-J201A Proportional Auto Valve	Steam Control Valve 100% "Close"	
	5	ΔTIC-K211 Proportional Auto Valve	Steam Control Valve 100% "Open"	MVR 의 Surging 방지용
	2	MVR 가동		
	1	SIC-K211 MVR Inverter	1. MVR Speed Setting → "15Hz"	
	2	K-211 MVR	2. MVR "Start"	
	3	SIC-K211 MVR Inverter	3. 15→40Hz까지 서서히 MVR Speed를 조정	MVR Speed 조절 용 주파수는 5Hz 씩 서서히 증가
			① 조정 전에 Sight Glass에서 증발여부 확인	SG-FW221A, SG-FW-221B, SG-FW301
			② Sight Glass에서 증발이 확 인되는 경우에만 조정	SG-FW221A, SG-FW-221B, SG-FW301

(4) 정상운전 - Single Effect

No.	항 목		조 치 내 용	비 고	
1			MVR 조정		
	1		MVR 흡입조건 조정		
		1 HV-J201B	Auto On/Off Valve	MVR Suction Auto On/Off Valve "Close"	
		2 HV-J201A	Proportional Auto Valve	1. Steam Control Valve 100% "Open"	정상운전을 위한 선조치
				2. Sight Glass 에서 증발을 확인	SG-FW221A, SG-FW-221B, SG-FW301
				3. Steam Control Valve 개도를 100→0% 까지 서서히 "Close"	개도는 10% 씩 서서히 "Close"
		3 Δ TIC-K211	Proportional Auto Valve	1. TV-K211 Steam Control Valve 50% "Open"	
				2. ΔTIC-K211의 온도차이를 확인	적정 온도차이 : 1~3℃
				3. ΔTIC-K211 "Auto" 로 전환	
	2		총 증발량 조정		
		1 SIC-K211	MVR Inverter	1. 50~55Hz 까지 서서히 MVR Speed 를 조정	MVR Speed 조절 용 주파수는 1Hz 씩 서서히 증가
				① 조정 전에 Sight Glass 에서 증발여부 확인	SG-FW221A, SG-FW-221B, SG-FW301
				② Sight Glass 에서 증발이 증가되는 경우에만 조정	SG-FW221A, SG-FW-221B, SG-FW301
				2. Surging 이 발생하는 경우, MVR Speed 를 감소	
				① 조정 후에 Surging 감소여부 확인	
				② Surging 이 사라지면 MVR Speed 를 증가	
		2 HV-X211	Auto On/Off Valve	De-superheating Water Auto On/Off Valve "Open"	
		3 FG-FW211	Local Flowmeter	살수유량 2~5 liter/hr 범위로 Manual Valve 를 조정	가급적 1회 조정 후에 Manual Valve 의 개도를 고정

No.	항 목		조 치 내 용	비 고
2			1stEvaporator증발량 조정	
	1		증발량 조정	
		1	SIC-K211 MVR Inverter	1. 50~55Hz까지 서서히 MVR Speed를 조정 MVR Speed 조절용 주파수는 1Hz 씩 서서히 증가
				① 조정 전에 Sight Glass에서 증발 여부 확인 S G - F W 2 2 1 A , S G - F W - 2 2 1 B , SG-FW301
				② Sight Glass에서 증발이 증가되는 경우에만 조정 S G - F W 2 2 1 A , S G - F W - 2 2 1 B , SG-FW301
				2. Surging이 발생하는 경우, MVR Speed를 감소
				① 조정 후에 Surging 감소여부 확인
				② Surging이 사라지면 MVR Speed를 증가
		2	HV-J301 Proportional Auto Valve	J-201에서의 증발량을 더 증가시킬 경우 "Close" 100% "Close" 일 경우, J-301 은 증발이 정지됨
2			농축액 배출	
		1	Pass Switch Pass 선택	A↔B Pass 확인 A→B Pass 기준
		2	DIC-J201 Density Control	1. J-201 B-Pass 의 농도가 1.125 가 될 때까지 대기 배출농도는 필요에 따라 설정치를 변경
				2. DIC-J201 "Auto" 로 전환

No.	항 목		조 치 내 용	비 고	
3			2ndEvaporator증발량 조정		
	1		증발량 조정		
		1 HV-J301	Proportional Auto Valve	1. 증발량을 감소시킬 경우 서서히 5% 씩 “Close” 2. 증발량을 증가시킬 경우 서서히 5% 씩 “Open”	100% “Close” 일 경우, J-301 은 증발이 정지 됨
	2		농축액 배출		
		1 DIC-J301	Density Control	1. J-301의 농도가 1.250가 될 때까지 대기 2. DIC-J301 “Auto” 로 전환	배출농도는 필요에 따라 설정치를 변경
	3		결정 생산 및 배출		
		1 DIC-J301	Density Control	DIC-J301 “Manual” 로 전환	
		2 J-301	Agitator	J-301 Agitator “Start”	
		3 LICA-J301	J-301 Level	“Low” Level 경보時, 액을 2% 씩 보충	일상운전과 동일할 경우, 결정이 용해됨
		4 MV-S301	Steam Manual Valve	Manual Steam Valve 30% “Open”	결정의 생성속도를 빠르게 할 경우에 조작
		5 DIC-J301	Density Control	1. J-301의 농도가 1.350가 될 때까지 대기 2. J-301 Sight Glass 에서 결정생성 확인	
		6 DV-J301	Auto On/Off Valve	J-301 농축액 Auto On/Off Valve “Open”	결정배출

No.		항 목		조 치 내 용	비 고
4			응축수 배출		
	1		응축수 저장		
		1	LV-T 231 Auto On/Off Valve	Hot Freshwater Auto On/Off Valve "Close"	
		2	LICA-T231 T-231 Level	1. T-231 Level 이 95% 가 될 때까지 대기	T-231 Level은 항상 95% 이상을 유지하여야 함
				2. LICA-T231 "Auto" 로 전환	
		3	P-231 Hot Freshwater Pump	P-231 Hot Freshwater Pump "Start"	
	2		응축수 배출		
		1	LICA-J201A J-201 A-Pass Level	Operating Mode가 "Auto"인지를 확인	
		2	LICA-J201B J-201 B-Pass Level	Operating Mode가 "Auto"인지를 확인	

(5) 저부하운전

No.	항 목		조 치 내 용	비 고
1			1단계 저부하운전	
	1		Operation Mode	
	1	Load Switch	1단계 저부하 선정	“1단계 저부하운전” 선택
	2		MVR 가동중지	
	1	K-211	MVR	MVR “Stop”
	2	HV-K211	Auto On/Off Valve	MVR Suction Auto On/Off Valve “Close”
	3		Pump 류 가동중지 및 속도조절	
	1	P-101	Seawater Feed Pump	P-101 Seawater Feed Pump “Stop”
	2	P-121	LCSW Feed Pump	P-121 LCSW Feed Pump “Stop”
	3	SIC-P201A	P-201A Inverter	J-201 A-Pass 순환 Pump Speed Down → “40Hz”
	4	SIC-P201B	P-201B Inverter	J-201 B-Pass 순환 Pump Speed Down → “40Hz”
	5	SIC-VP231	Vacuum Pump Inverter	VP-231 Vacuum Pump Speed Down → “20Hz”
	4		Steam 및 Vapor Line	
	1	HV-J201A	Proportional Auto Valve	1. Steam Control Valve 50% “Open” 2. 전력사용량을 점검한 후에 개도를 가감하여조정
	2	HV-H222	Auto On/Off Valve	Vapor Auto On/Off Valve “Open”
	3	HV-VP222	Auto On/Off Valve	Vapor Auto On/Off Valve “Open”
	4	TIC-FW222	응축수 온도제어	1. TV-FW222 Control Valve 10% “Open”
1	4	4		2. 응축수의 온도를 확인
				3. TIC-FW222 “Auto” 로 전환 응축수의 온도가 30~40℃ 정도일 때 전환

No.		항 목		조 치 내 용	비 고
2		2단계 저부하운전			
	1	Operation Mode			
	1	Load Switch	2단계 저부하 선정	"2단계 저부하운전" 선택	
	2	MVR 가동중지			
	1	K-211	MVR	MVR "Stop"	
	2	HV-K211	Auto On/Off Valve	MVR Suction Auto On/Off Valve "Close"	
	3	J-301 Salt Crystallizer			
	1	J-301	J-301 Agitator	J-301 Agitator "Stop"	
	2	P-301	J-301 순환 Pump	J-301 순환 Pump "Stop"	
	4	Pump 류 가동중지 및 속도조절			
	1	P-101	Seawater Feed Pump	P-101 Seawater Feed Pump "Stop"	
	2	P-121	LCSW Feed Pump	P-121 LCSW Feed Pump "Stop"	
	3	SIC-P201A	P-201A Inverter	J-201 A-Pass 순환 Pump Speed Down → "40Hz"	
	4	SIC-P201B	P-201B Inverter	J-201 B-Pass 순환 Pump Speed Down → "40Hz"	
	5	SIC-VP231	Vacuum Pump Inverter	VP-231 Vacuum Pump Speed Down → "20Hz"	
	5	Steam 및 Vapor Line			
	1	HV-J201A	Proportional Auto Valve	1. Steam Control Valve 30% "Open"	
				2. 전력사용량을 점검한 후에 개도를 가감하여 조정	
	2	HV-H222	Auto On/Off Valve	Vapor Auto On/Off Valve "Open"	
	3	HV-VP222	Auto On/Off Valve	Vapor Auto On/Off Valve "Open"	
	4	TIC-FW222	응축수 온도제어	1. TV-FW222 Control Valve 10% "Open"	
				2. 응축수의 온도를 확인	
1	4	4		3. TIC-FW222 "Auto" 로 전환	응축수의 온도가 30~40℃ 정도일 때 전환

(6) CIP운전

No.	항 목		조 치 내 용	비 고
1		Seawater CIP 운전		
	1	Operation Mode		
	1	Load Switch 해수 CIP 선정	“해수 CIP” 선정	
	2	Pass Switch Pass 선택	A↔B Pass 선택	A→B Pass 기준
	2	“Auto” Mode		
	1	LICA-J201A J-201 A-Pass Level	“Auto” 로 전환	J-201 A-Pass Level 50% 로 Setting
	2	LICA-J201B J-201 B-Pass Level	“Auto” 로 전환	J-201 B-Pass Level 50% 로 Setting
	3	LICA-J301 J-301 Level	“Auto” 로 전환	
	3	Seawater Line		
		LV-J201A Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Seawater 공급 제어용	
		LV-J201B Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Seawater 공급 제어용	
		HV-J201DA Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Seawater 배출 제어용	
		HV-J201DB Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Seawater 배출 제어용	
		HV-J201RA Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Seawater 순환 제어용	
		HV-J201RB Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Seawater 순환 제어용	
		HV-J201SA Auto On/Off Valve	J-201 B→A Seawater 공급 제어용	
		HV-J201SB Auto On/Off Valve	J-201 A→B Seawater 공급 제어용	
		XV-J201 Auto On/Off Valve	J-201 Effect 변환時 Seawater 공급 제어용	

No.		항 목		조 치 내 용	비 고
1	4	단위장치 운전상태 조정			
	1	K-211	MVR	MVR "Stop"	
	2	P-121	LCSW Feed Pump	P-121 LCSW Feed Pump "Stop"	
	3	P-231	Hot Freshwater Pump	P-231 Hot Freshwater Pump "Stop"	
	4	J-301	J-301 Agitator	J-301 Agitator "Stop"	
	5	P-301	J-301 순환 Pump	J-301 순환 Pump "Stop"	
	6	X-901	Steam Boiler	X-901 Steam Boiler "Stop"	
	7	SIC-P201A	P-201A Inverter	J-201 A-Pass 순환 Pump Speed Setting → "55Hz"	
	8	SIC-P201B	P-201B Inverter	J-201 B-Pass 순환 Pump Speed Setting → "55Hz"	
	9	P-201A	J-201 A-Pass Pump	J-201 A-Pass 순환 Pump "Start"	
	10	P-201B	J-201 B-Pass Pump	J-201 B-Pass 순환 Pump "Start"	
	11	P-301	J-301 Pump	J-301 B-Pass 순환 Pump "Start"	
5		해수 CIP 운전			
	1		CIP 운전	약 10분동안 CIP 운전지속	
	2	CIP-03	Auto On/Off Valve	J-201 CIP 용액 배출 Control Valve "Open"	
	3	CIP-04	Auto On/Off Valve	J-301 CIP 용액 배출 Control Valve "Open"	
	4		CIP 운전	약 1~2시간동안 CIP 운전지속	
6		가동중지			
	1	LICA-J201A	J-201 A-Pass Level	J-201 A-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
	2	P-201A	J-201 A-Pass Pump	J-201 A-Pass 순환 Pump "Stop"	
	3	LICA-J201B	J-201 B-Pass Level	J-201 B-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
	4	P-201B	J-201 B-Pass Pump	J-201 B-Pass 순환 Pump "Stop"	

No.			항 목		조 치 내 용	비 고
1	5	5	LICA-J301	J-301 Level	J-201 B-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
		6	P-301	J-301 Pump	J-301 순환 Pump “Stop”	
		7	VP-231	Vacuum Pump	VP-231 Vacuum Pump “Stop”	
		8	P-111	CFW Pump	P-111 CFW Pump “Stop”	

No.	항 목		조 치 내 용	비 고
2			Freshwater CIP 운전	
	1		Operation Mode	
		1	Load Switch 담수 CIP 선정	“담수 CIP” 선정
		2	Pass Switch Pass 선택	A↔B Pass 선택 A→B Pass 기준
	2		“Auto” Mode	
		1	LICA-J201A J-201 A-Pass Level	“Auto” 로 전환 J-201 A-Pass Level 50%로 Setting
		2	LICA-J201B J-201 B-Pass Level	“Auto” 로 전환 J-201 B-Pass Level 50%로 Setting
		3	LICA-J301 J-301 Level	“Auto” 로 전환
	3		Seawater Line	
			LV-J201A Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Seawater 공급 제어용 “Close”
			LV-J201B Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Seawater 공급 제어용 “Close”
			HV-J201DA Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Seawater 배출 제어용 “Close”
			HV-J201DB Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Seawater 배출 제어용 “Close”
			HV-J201RA Auto On/Off Valve	J-201 A-Pass Seawater 순환 제어용 “Close”
			HV-J201RB Auto On/Off Valve	J-201 B-Pass Seawater 순환 제어용 “Close”
			HV-J201SA Auto On/Off Valve	J-201 B→A Seawater 공급 제어용 “Close”
			HV-J201SB Auto On/Off Valve	J-201 A→B Seawater 공급 제어용 “Close”
			XV-J201 Auto On/Off Valve	J-201 Effect 변환時 Seawater 공급 제어용 “Open”
	4		단위장치 운전상태 조정	
		1	K-211 MVR	MVR “Stop”
		2	P-121 LCSW Feed Pump	P-121 LCSW Feed Pump “Stop”
		3	P-231 Hot Freshwater Pump	P-231 Hot Freshwater Pump “Stop”

No.			항 목		조 치 내 용	비 고
2	4	4	J-301	J-301 Agitator	J-301 Agitator "Stop"	
		5	P-301	J-301 순환 Pump	J-301 순환 Pump "Stop"	
		6	X-901	Steam Boiler	X-901 Steam Boiler "Stop"	
		7	SIC-P201A	P-201A Inverter	J-201 A-Pass 순환 Pump Speed Setting → "55Hz"	
		8	SIC-P201B	P-201B Inverter	J-201 B-Pass 순환 Pump Speed Setting → "55Hz"	
		9	P-201A	J-201 A-Pass Pump	J-201 A-Pass 순환 Pump "Start"	
		10	P-201B	J-201 B-Pass Pump	J-201 B-Pass 순환 Pump "Start"	
		11	P-301	J-301 Pump	J-301 B-Pass 순환 Pump "Start"	
	5		해수 CIP 운전			
		1		CIP 운전	약 10분동안 CIP 운전지속	
		2	CIP-03	Auto On/Off Valve	J-201 CIP 용액 배출 Control Valve "Open"	
		3	CIP-04	Auto On/Off Valve	J-301 CIP 용액 배출 Control Valve "Open"	
		4		CIP 운전	약 1~2시간동안 CIP 운전지속	
		5	LICA-J201A	J-201 A-Pass Level	J-201 A-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
		6	P-201A	J-201 A-Pass Pump	J-201 A-Pass 순환 Pump "Stop"	
		7	LICA-J201B	J-201 B-Pass Level	J-201 B-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
		8	P-201B	J-201 B-Pass Pump	J-201 B-Pass 순환 Pump "Stop"	
		9	LICA-J301	J-301 Level	J-201 B-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
	6		담수 CIP 운전			
		1	LV-FW231	Auto On/Off Valve	Freshwater 배출제어용 "Close"	
		2	HV-CIP01	Auto On/Off Valve	CIP Freshwater 공급제어용 "Open"	
		3	HV-CIP02	Auto On/Off Valve	Seawater 배출제어용 "Close"	

No.			항 목		조 치 내 용	비 고
2	6	4	P-231	HFW Pump	P-231 HFW Pump “Start”	
		5	P-201A	J-201 A-Pass Pump	J-201 A-Pass 순환 Pump “Start”	
		6	P-201B	J-201 B-Pass Pump	J-201 B-Pass 순환 Pump “Start”	
		7	P-301	J-301 Pump	J-301 B-Pass 순환 Pump “Start”	
		8		CIP 운전	약 1~2시간동안 CIP 운전지속	
			LICA-J201A	J-201 A-Pass Level	1. J-201 A-Pass Level 30% 로 유지	
			LICA-J201B	J-201 B-Pass Level	2. J-201 B-Pass Level 30% 로 유지	
			LICA-J301	J-301 Level	3. J-301 Level 70% 로 유지	
	7		가동중지			
		1	P-231	HFW Pump	P-231 HFW Pump “Stop”	
		2	LICA-J201A	J-201 A-Pass Level	J-201 A-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
		3	P-201A	J-201 A-Pass Pump	J-201 A-Pass 순환 Pump “Stop”	
		4	LICA-J201B	J-201 B-Pass Level	J-201 B-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
		5	P-201B	J-201 B-Pass Pump	J-201 B-Pass 순환 Pump “Stop”	
		6	LICA-J301	J-301 Level	J-201 B-Pass 액위가 약 20% 정도가 될 때까지 대기	
		7	P-301	J-301 Pump	J-301 순환 Pump “Stop”	
		8	VP-231	Vacuum Pump	VP-231 Vacuum Pump “Stop”	
		9	P-111	CFW Pump	P-111 CFW Pump “Stop”	

