

碩士學位論文

# HTR-10 Benchmark Problem에 대한 MARS 코드 적용성 평가



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

金 亨 錫

2005年 12月

# HTR-10 Benchmark Problem에 대한 MARS 코드 적용성 평가

指導教授 鄭 鈺 津

金 亨 錫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金亨錫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李 憲 周 印

委 員 朴 在 雨 印

委 員 鄭 鈺 津 印

濟州大學校 大學院


2005年 12月

# A Study on Application of MARS Code for HTR-10 Benchmark Problem

Hyung-Seok Kim  
(Supervised by professor Bum-Jin Chung)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Science

2005. 12.

 제주대학교 중앙도서관  
This thesis has been examined and approved.

.....  
Thesis director, Bum-Jin Chung, Prof. of Nuclear and Energy Engineering


.....  
.....  
.....

.....  
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	iv
SUMMARY .....	v
I. 서 론 .....	1
II. 본 론 .....	3
1. HTT-10 .....	3
1) HTT-10의 개관 .....	3
2) HTR-10의 주요 구성요소 .....	5
(1) 노심용기 .....	5
(2) 원자로용기 .....	6
(3) 원자로 공동냉각계통 .....	7
2. Benchmark problems .....	11
1) HTR-10 Benchmark Problem-I .....	11
2) HTR-10 Benchmark Problem-II .....	12
3. MARS 전산코드 .....	15
1) MARS 코드의 구조 .....	15
2) 입력의 처리 .....	16

3) 과도상태 처리 .....	16
4) 고온가스로 해석을 위해 추가된 표면간 복사열전달 모델 ...	18
4. 계통모델링 .....	21
Ⅲ. 결과 및 토의 .....	25
1. Benchmark problem - I .....	25
2. Benchmark problem - II .....	28
IV. 결론 .....	31
 제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY	
참 고 문 헌 .....	32
부록. HTR-10 Benchmark Problem에 대한 MARS 코드 Input .....	34
감사의 글 .....	44

## LIST OF FIGURES

Fig. 1. Primary system of HTR-10 .....	5
Fig. 2. Reactor vessel of HTR-10 .....	7
Fig. 3. Schematic diagram water loop system .....	8
Fig. 4. Structure of MARS code .....	16
Fig. 5. Nodalization for HTR-10 benchmark problem .....	22
Fig. 6. Heat transfer modelling of RCCS .....	23
Fig. 7. View factor calculation using NEVADA code .....	24
Fig. 8. Temperature of RPV 15th node under benchmark problem I .....	25
Fig. 9. Mass flow rate of RCCS under benchmark problem I .....	26
Fig. 10. Comparison of surface temperature of CV, RPV and WCP .....	27
Fig. 11. Comparison of surface temperature of CV, RPV and WCP at initial status .....	28
Fig. 12. Comparison of mass flow rate of RCCS of depressurization accident .....	29
Fig. 13. Comparison of inlet and outlet temperature curves of RCCS under depressurization accident .....	29
Fig. 14. Comparison of heat transfer rate of RCCS of depressurization accident .....	30

## LIST OF TABLES

Table 1. HTR-10 main data .....	4
Table 2. Specification of core vessel .....	6
Table 3. Specification of reactor vessel .....	6
Table 4. Specification of water cooler .....	9
Table 5. Data of an air cooler .....	10
Table 6. Data of a chimney .....	10
Table 7. Specification of regulation tank .....	10
Table 8. Surface temperature distribution of CV at heatup experiment .....	12
Table 9. Temperature distribution of CV under LOHS .....	13
Table 10. Comparison between results of RCCS heat transfer rate .....	27

# SUMMARY

MARS code has been developed for the LWR (Light Water Reactor). In order to investigate the applicability of MARS code to HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor), benchmark problems for the HTR-10 (10 MWth High Temperature gas cooled test Reactor), suggested by the IAEA, was simulated and the results were compared with results calculated by the THERMIX code.

In the benchmark problem- I , the calculated results show good agreement between MARS results and those calculated by the THERMIX code by the maximum deviation around 1.46 %. Deviation was analyzed to originate from the simplification of complicated geometry and from the modeling capability of heat transfer characteristics in the HTGR components such as water cooler and air cooler.

In the benchmark problem- II , the temperature distribution for the initiation time was lower than those of the THERMIX code and mass flow rate of the RCCS was higher than those of the THERMIX code. The temperature differences between inlet and outlet was lower than the THERMIX code but total heat transfer rates generally coincide with the THERMIX code.

As expected, radiation heat transfer plays an important role in gas cooled reactor. During the course of study, the view factors were independently calculated and inserted as an input to MARS code. However in order to improve the user friendliness, the detailed view factor calculation module are to be implemented in MARS.

It is concluded that MARS code can be successfully to calculate the RCCS cooling capability of HTGR and needs the component related to the HTGR such as water cooler and air cooler.



# I. 서 론

산업화가 진행되고 삶의 질 향상에 대한 요구가 증가됨에 따라 에너지 과소비형 사회구조로의 전환은 필연적이고 이러한 사회구조를 따라가기 위해서 화석연료를 기초로 하는 산업구조는 화석연료의 고갈과 대기오염, 지구 온난화 등 문제점을 초래하고 있다. 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 최근 청정한 대체 에너지원으로서 수소에 대한 관심이 증대되고 있다. 수소는 화석연료와는 달리 지구환경오염물질(CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>)을 배출하지 않으며 기존의 석유, 천연가스등을 연료로 사용하는 에너지 시스템을 부분적으로 수정하여 활용할 수 있다는 측면에서 미래의 유망한 청정에너지로서 부각되고 있다. 특히 원자력을 이용한 수소의 생산은 오래전부터 그 가능성이 모색되어 왔으며 전기에너지의 저장방법의 일환으로 수소의 생산이 고려된 바 있다. 최근 우리나라에서도 2020년까지 원자력을 이용한 수소생산용 원자로를 상용화하는 목표로 고온가스로 개발 연구에 착수한 바 있다 [장종화 등 2003].

한편 국내의 경우 경수로에 대하여 노심, 안전 및 성능 해석을 신뢰성 있게 수행할 수 있는 능력을 보유하고 있고 사고해석 방법론 및 체계구축 등에 대한 실제 경험이 풍부하며 최적 노심 및 열수력 계통 해석코드의 국산화를 수행할 수 있는 기술의 축적이 이미 이루어져 있다. 그러나 현재까지 국내에서는 가스로에 대한 관심이 없었던 관계로 이에 관한 안전해석 방법론 및 관련 전산코드에 대한 제반이 없는 실정이다. 이에 따라 기존의 경수로 해석을 위해 개발된 코드가 가스로에도 적용이 가능한지 확인하고 보완하는 연구가 절실히 필요한 시점이다.

한국원자력연구소에서는 원자력연구개발사업을 통하여 경수 및 중수로 안전 해석코드인 MARS (Multi-dimensional Analysis of Reactor Safety) 코드를 개발하고 있으며 [이원재 등 2002], 이와 병행하여 고온가스로 해석능력 확보를

위한 MARS 코드의 개선연구를 MIT와 공동연구를 수행하고 있다 [이원재 등 2004]. 현재, 가스특성 및 가스 열전달 모델이 개선되었으며, 고온가스로의 RCCS 평가를 위하여 요구되는 복사열전달 모델의 보강이 진행중이다.

본 연구에서는 경수 및 중수로해석을 위하여 개발된 기존의 MARS코드를 사용하여, 국제원자력기구(IAEA: International Atomic Energy Agency) HTR-10 Bechmark Problem인 RCCS 냉각능력에 대한 평가계산을 수행하였으며, 추후에 MARS-GCR 버전이 완성되는 시점에서 다시 평가계산은 수행될 것이다.



## II. 본 론

### 1. HTR-10

#### 1) HTR-10의 개관

HTR-10은 중국 칭화대학 원자력에너지기술연구소(INET: Institute of Nuclear Energy Technology)에서 개발·운영중인 10MW<sub>th</sub>급 페블베드형 고온가스실험로이다. 이 원자로는 피동형 안전원자로로서, 피복연료입자(Coated fuel particles)를 사용하므로 연료요소(Fuel element)의 온도가 1600℃까지 올라가더라도 핵분열 생성물을 연료입자 내에 가둘 수 있다. 또한, 원자로 노심은 큰 음의 반응도를 가지므로 출력 과도거동에 대한 고유 안전성을 보유하고 있으며 원자로 사고 및 정지시 발생하는 여열(Afterheat)의 제거를 위하여 피동형 원자로공동냉각계통(RCCS : Reactor Cavity Cooling System)을 두어 고유안전성을 높인 원자로이다.

HTR-10의 주요설계 목적은 고온가스로에서 중요시 여겨지는 기술을 검증하는 것 이외에도 HTGR의 설계, 건설, 운전에 관한 Know-how 취득, 방사선 조사와 실험 시설 설치, 전력과 열 공동 생산과 Closed cycle gas turbine 기술 시험, Nuclear Process Heat 활용에 관한 연구와 개발 등의 연구 목적을 가지고 있다.

이 원자로 주요 파라미터를 살펴보면 열출력은 10MW<sub>th</sub>이고 냉각재로 헬륨을 사용하고 있으며 원자로로 들어오는 냉각재의 온도 및 나가는 온도는 각각 250℃, 700℃이며, 일차측 냉각재의 정상운전 압력은 3MPa이다. Table 1은 HTR-10의 주요 설계 파라미터에 대한 값을 나타낸다.[IAEA 등 2000]

Table 1. HTR-10 main data.

Parameter	Value
Thermal power (MW)	10.0
Primary helium pressure (MPa)	3.0
Inlet helium temperature (°C)	250
Outlet helium temperature (°C)	700
Primary coolant flow rate (kg/s)	4.3
Outlet steam Pressure at the S.G. (MPa)	4.0
Outlet steam temperature at the S.G. (°C)	440
Secondary steam flow rate (kg/s)	3.47
Core volume (m <sup>3</sup> )	5.0
Core diameter (m)	1.80
Core height (avg.) (m)	1.97
H/D Ratio	1.09
Diameter of fuel element (cm)	6.0
Number of fuel elements	27,500
Burn-up (avg.) (MWd/t)	80,000

HTR-10의 일차계통은 Fig. 1에서 보이는 것처럼 원자로용기(Reactor Vessel), 증기발생기용기(Steam Generator Vessel) 그리고 원자로용기와 증기발생기용기를 연결시키는 고온기체 배관(Hot Gas Duct)으로 구성되어 있다.

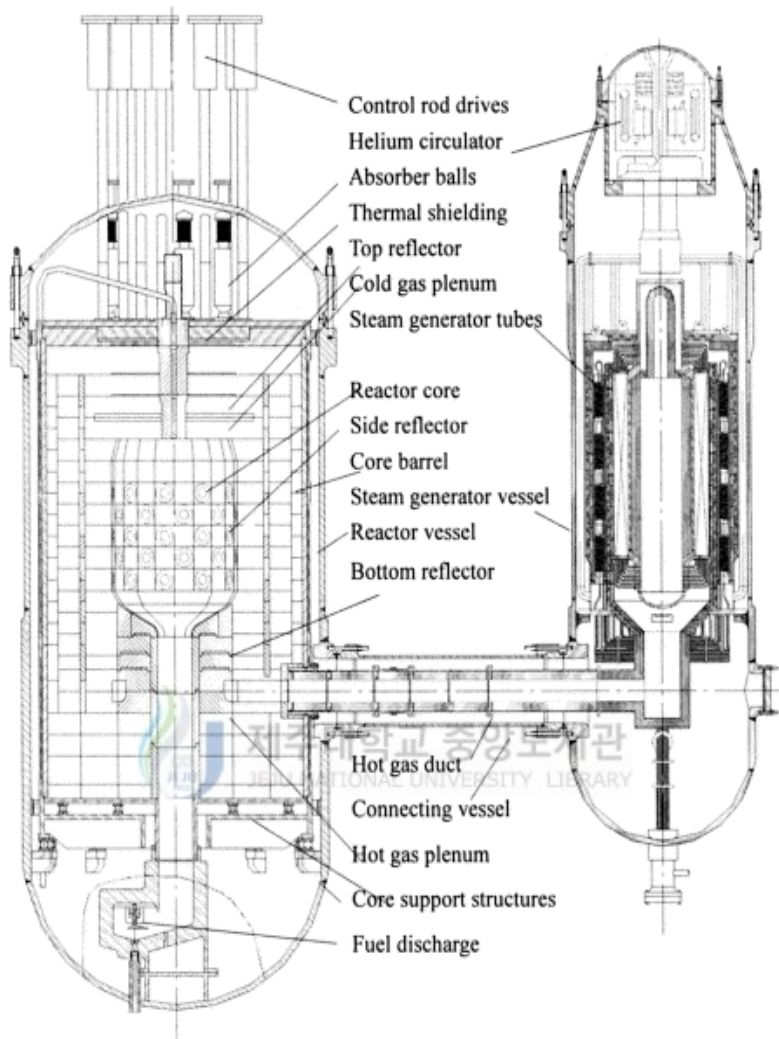


Fig. 1. Primary system of HTR-10.

2) HTR-10의 주요 구성요소[Goa 등 1994]

(1) 노심용기(CV : Core vessel, Core barrel)


HTR-10의 노심용기는 SA387-11의 재료로 제작되었고 Fig. 1에서 보듯이 첨쇠판(Holddown plate)에 의해 원자로용기에 매달려있으며 노심을 감싸고 있는 원통형의 외곽 틀이다. 이것의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2. Specification of core vessel.

Parameter	Value
재료 (Material)	SA387-11
내경 (Inside Diameter)	3820 mm
두께 (Shell Thickness)	30 mm
높이 (Height)	7,370 mm

(2) 원자로용기(RV : Reactor vessel)

냉각재인 헬륨으로 가득 채워진 HTR-10의 노심용기는 Fig. 2에서 보듯이 외곽 몸체(Shell body), 상단덮개(Head closure)와 하단덮개(Bottom closure)로 구성되었고 상단덮개에 있는 4개의 지지대는 원자로 공동 콘크리트 플랫폼에 고정되어 노심용기가 원자로 공동에 떠있는 역할을 한다. 이것의 총 높이와 중량은 각각10,250mm와 140.0t이며 세부 제원은 Table 3과 같다.

 제주대학교 중앙도서관  
Table 3. Specification of reactor vessel.

Component	Parameter	Value
Head Closure	Maximum Outside Diameter	4,680 mm
	Maximum Inside Diameter	4,100 mm
	Head Closure Thickness	1,00 mm
	Head Closure Height	1,590 mm
Shell Body	Material	SA516-70
	Inner Diameter	4,100 mm
	Shell Thickness	70 mm
	Height	6,682 mm
Bottom Closure	Maximum Outside Diameter	4,340 mm
	Maximum Inside Diameter	4,100 mm
	Bottom Closure Thickness	100 mm
	Bottom Closure Height	1,864 mm

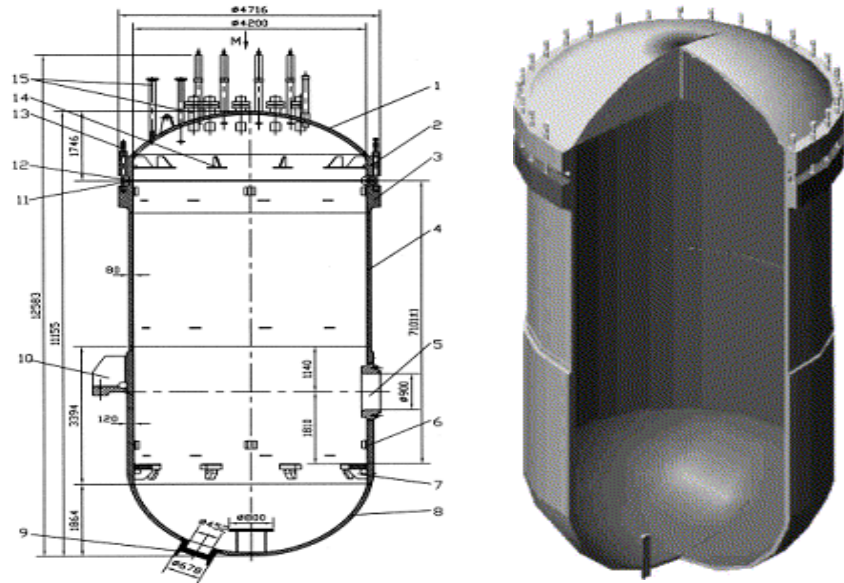
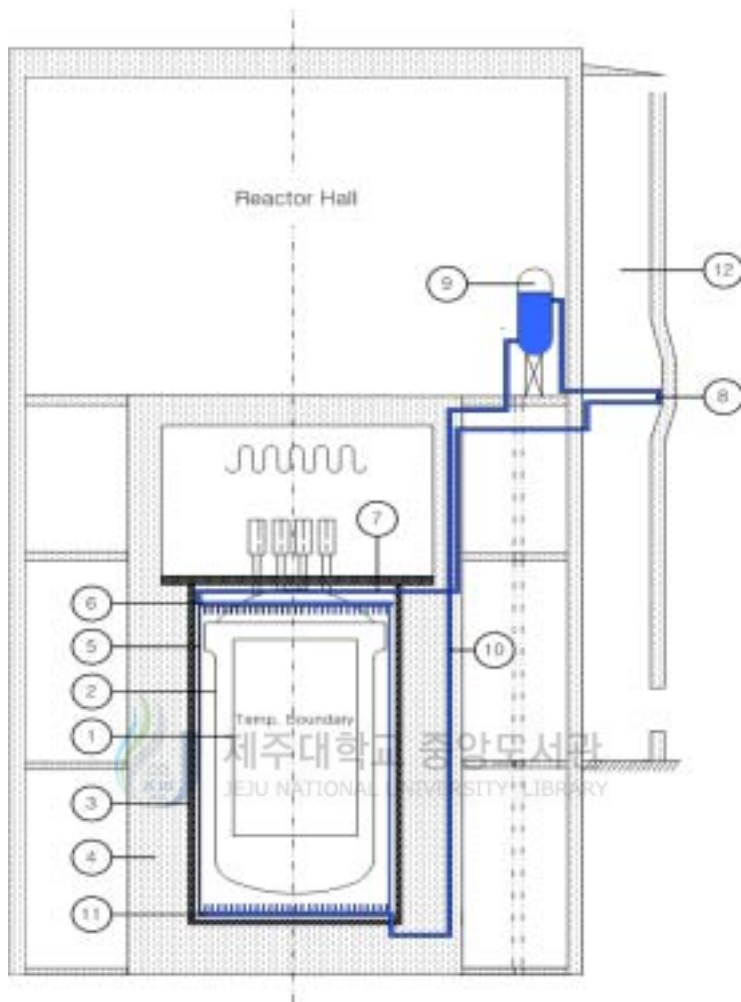


Fig. 2. Reactor vessel of HTR-10.

(3) 원자로공동냉각계통(RCCS : Reactor cavity cooling system)

현재 경수로로는 원자로사고 시 노심의 붕괴열을 제거하고 원전의 안전성 확보를 위해 공학적 안전설비계통으로 비상노심냉각계통(ECCS ; Emergency Core Cooling System)을 채택하여 원전의 안전성을 유지하고 있다. 한편 고온가스로의 경우 냉각재로 헬륨 및 이산화탄소 등과 같은 기체를 사용하고 있으므로 경수로에서 냉각재로 사용되는 물보다 열용량이 매우 작아 원자로 일차계통에 직접 냉각재인 기체를 주입해서는 효과적으로 붕괴열을 제거할 수 없다. 이와 같은 이유로 인해 원자로용기와 떨어진 외부에 물이 흐르는 관을 설치하여 자연대류 및 열복사의 방식으로 노심의 붕괴열을 제거하는 원자로 공동냉각계통을 채택하고 있다. 본 계통은 고온가스로의 안전등급계통으로써 원자로 사고 시 핵연료, 노심, 원자로압력용기, 원자로 공동 안에 설치되어진 설비계통의 열제거의 역할을 담당한다. HTR-10에 설계된 RCCS 역시 냉각재 상실사고나 열상승사고 시 원자로의 여열을 제거하고, 정상운전 중 원자로 콘크리트 공동을 냉각하기 위한 목적으로 설계되었다.



NO.	Component name	NO.	Component name
1	Core vessel	7	Hot uprising tube
2	Reactor pressure vessel	8	Air cooling tube
3	Thermal shield	9	Regulation tank
4	Concrete	10	Cold downcoming tube
5	Water cooling tube	11	Bottom circular plenum
6	Top circular plenum	12	Chimney

Fig. 3. Schematic diagram water loop system.



Fig. 3에서 보듯이 HTR-10에 설치된 RCCS는 독립된 두 개의 루프가 병렬로 배치되어 있으며, 하나의 루프는 원자로 공동 안에 존재하는 Cavity cooler, 굴뚝 채널에 존재하는 Air cooler 그리고 Cavity cooler와 Air cooler를 연결하는 배관으로 구성된다. 하나의 Cavity cooler는 원자로 공동의 안쪽 표면에 평행한 50개의 관으로 구성되어있고 관의 위쪽은 상부환형관(Top circular plenum)에, 아래쪽은 하부 환형관(Bottom circular plenum)에 연결되어있다. 상부환형관은 연결관(Hot uprising tube)에 의해 Air cooling tube의 입구 쪽에 연결되고 Air cooling tube의 출구 쪽은 연결관(Cold downcoming tube)에 의해 하부 환형관에 연결되어 하나의 루프를 이루게 된다.

고온가스로에서 중요한 특징인 사고시 피동적 붕괴열 제거 현상이 이루어지는 과정을 살펴보면 노심으로부터 나온 열은 복사와 대류에 의해 Cavity cooler에 전해지고 Cavity cooler 내부 물의 온도가 상승함에 따라 밀도는 감소하게 된다. 밀도가 감소한 물은 부력이 발생하여 Hot uprising tube를 따라 Air cooler 까지 올라가게 되며 그 물은 Air cooler를 지나면서 굴뚝의 찬 공기에 의해 냉각되고 밀도는 증가한다. 밀도가 증가된 물은 Cold downcoming tube를 따라 하부 환형관 까지 내려오게 되어 전체적으로 Cavity cooler 내부의 물은 자연대류에 의해 유동이 형성된다. HTR-10에서 원자로공동냉각계통을 구성하고 있는 요소들에 대한 제원은 Table 4 ~ Table 7과 같다.

Table 4. Specification of water cooler.

Parameter	Value
Cooler Number	2
Capacity / Cooler	125 kW/Cooler
Cooling Tube Number/Cooler	100
Cooling Tube Length	1,590 mm
Cooling Tube Outside Diameter	42 mm
Cooling Tube Inner Diameter	32 mm
Annular Tube Outside Diameter	152 mm
Annular Tube Inner Diameter	142 mm
Water Cooling Wall Outside Diameter	6,090 mm
water Cooling Wall Inner Diameter	6,006 mm

Table 5. Data of an air cooler.

Parameter	Value
Heat exchange tube outside diameter	25 mm
Heat exchange tube inner diameter	20 mm
Flow path number	2
Heat exchange area(outside area)	13.279 m <sup>2</sup>
Total flow area	5.3 m <sup>2</sup>

Table 6. Data of a chimney.

Parameter	Value
Total height	26,000 mm
Uprising stage length	12,000 mm
Cross section length	3,000 mm
Cross section width at top and bottom	1,500 mm
Cross section width at middle	2,000 mm

Table 7. Specification of regulation tank.

Parameter	Value
Operation pressure	0.1 MPa
Outside diameter	1,200 mm
Inside diameter	1,190 mm
Height	2,700 mm
Volume	~ 3.0 m <sup>3</sup>
Water volume	~ 2.0 m <sup>3</sup>
Nitrogen volume	~ 1.0 m <sup>3</sup>

## 2. Benchmark Problems

HTR-10 benchmark problem은 사고조건하에서 고온가스로에 대한 열전달과 여열제거에 관한 IAEA 협동연구프로그램(CRP : Coordinated Research Program)의 일환으로 정의되었다. 이 Benchmark problem의 목표는 열상승 실험조건과 사고조건하에서 HTR-10의 원자로공동냉각계통의 열전달 능력을 증명하고 원자로공동냉각계통의 고유안전설비를 확인하는 것이다. 또한 추가적인 목표로 코드와 코드의 비교방법으로 고온가스로의 반응을 예측하는 코드의 성능을 증명하고 정상상태와 과도상태하에서 HTR-10의 열전달과정을 연구하는 것이다 [IAEA 등 2000]. 본 연구에서는 HTR-10 Benchmark Problem-I, II를 선정하여 MARS 코드의 HTR-10 원자로공동냉각계통의 성능에 대해서 평가하였다. 본 문제의 경우 실험적 데이터가 없는 블라인드 평가계산으로 비교대상은 중국에서 사용된 THERMIX 코드의 계산결과와 일본에서 사용된 TAC-NC 코드의 계산결과를 사용하였다.

### 1) HTR-10 Benchmark Problem-I

HTR-10 Benchmark Problem-I은 정상상태 열상승 실험조건에서, 원자로 공동냉각계통의 열전달 능력을 증명하기 위한 문제이다. 본 문제의 경계조건과 비교 대상으로 선정된 주요 열수력 변수는 아래와 같다 [Goa 등 1994].

- 조 건 : 1) 두 개의 Water cooler는 모두 작동중이다.
  - 2) 헬륨 송풍기는 꺼져있고 일차 계통의 작동압력은 1bar 이다.
  - 3) 원자로 출력은 약 200kW이다.
  - 4) 노심용기 표면의 온도분포는 Table 8과 같다.
- 해석량 : 1) Reactor vessel, Water cooler, Air cooler에서의 온도장.
  - 2) Water cooler에서 물의 질량유량.

Table 8. Surface temperature distribution of CV at heatup experiment.

노드	높이(m)	온도(K)	노드	높이(m)	온도(K)
1	0.4	399.15	15	0.18	701.15
2	0.4	424.15	16	0.18	708.15
3	0.17	434.15	17	0.18	714.15
4	0.4	451.15	18	0.18	717.15
5	0.4	488.15	19	0.18	719.15
6	0.4	536.15	20	0.18	718.15
7	0.225	571.15	21	0.18	713.15
8	0.35	595.15	22	0.18	706.15
9	0.3	621.15	23	0.18	699.15
10	0.325	645.15	24	0.18	691.15
11	0.15	665.15	25	0.4	675.15
12	0.15	675.15	26	0.8	632.15
13	0.15	684.15	27	0.4	577.15
14	0.15	692.15	28	0.3	554.15

## 2) HTR-10 Benchmark Problem- II

HTR-10 Benchmark Problem- II는 과도상태에서 원자로용기 외측에서 발생하는 열전달 과정을 연구하기 위하여 HTR-10의 감압사고 조건하에서 정의된 문제이다. 본 문제의 경계조건과 비교 대상으로 선정된 주요 열수력 변수는 아래와 같다 [Goa 등 1994].

○ 조 건 : 1) 초기 원자로의 온도분포 온도 분포는 10MW의 작동출력의 온도 분포를 사용한다.

2) 시간에 따라 변화하는 노심용기 표면의 온도는 Table 9와 같다.

○ 해석량 : 1) Reactor vessel, Water cooler, Air cooler에서의 온도장

2) Water cooler에서 물의 질량유량

Table 9. Temperature distribution of CV under LOHS.

시간 노드	0	0.2925	0.9591	4.9130	8.020	12.042	18.042	24.042	33.125
1	453.40	451.40	449.25	445.65	443.70	441.75	439.35	437.15	433.60
2	459.90	459.05	457.90	453.80	451.75	449.90	447.65	445.35	441.45
3	462.68	462.15	461.32	457.12	455.45	454.15	452.35	450.12	445.95
4	462.10	461.65	461.00	458.70	458.65	459.00	458.25	456.15	451.60
5	465.10	464.70	464.20	466.40	469.75	472.45	472.55	469.95	464.25
6	476.85	476.35	476.00	485.80	492.30	495.35	493.85	489.50	481.80
7	488.50	487.9	487.80	503.70	511.35	513.35	509.70	503.85	493.50
8	496.30	495.75	495.90	513.90	521.35	522.35	517.65	511.00	500.90
9	503.05	502.60	502.95	522.35	529.30	529.55	523.85	516.65	506.10
10	509.60	506.30	506.75	527.20	533.90	533.70	527.65	520.35	509.60
11	507.95	507.82	508.38	529.28	535.98	535.72	529.72	522.45	511.72
12	508.28	508.22	508.82	529.52	536.28	536.22	530.45	523.32	512.72
13	508.35	508.35	509.02	529.18	536.02	536.22	530.85	523.92	513.45
14	508.25	508.28	508.95	528.38	535.22	535.78	530.85	524.22	514.02
15	507.85	507.95	508.60	526.90	533.65	534.75	530.40	524.15	514.30
16	507.10	507.25	507.90	524.75	531.40	533.00	529.45	523.70	514.25
17	505.95	506.10	506.75	522.10	528.60	530.65	527.95	522.75	513.80
18	504.30	504.50	505.15	519.00	525.25	527.75	525.90	521.30	512.90
19	502.20	502.45	503.10	515.50	521.45	524.35	523.30	519.30	511.55
20	499.75	500.05	500.7	511.65	517.25	520.45	520.1	516.75	509.7
21	497.05	497.35	498.0	507.55	512.70	516.05	516.40	513.7	507.35
22	494.05	494.4	495.0	503.15	507.85	511.25	512.20	510.1	504.45
23	490.7	491.1	491.7	498.4	502.65	506.00	507.40	505.9	501.0
24	486.95	487.4	488.0	493.3	497.0	500.25	502.05	501.15	497.05
25	479.75	480.35	480.95	484.05	486.75	489.65	492.0	492.05	489.3
26	466.0	466.75	467.5	468.55	469.75	471.65	474.05	475.05	474.25
27	448.95	449.7	450.65	451.1	451.25	452.0	453.55	454.75	455.35
28	434.8	437.8	438.1	437.0	436.75	436.95	437.85	438.9	439.9

Table 9. Temperature distribution of CV under LOHS.(Continue...)

시간 노드	43.125	53.125	63.125	73.125	83.125	93.125	103.125	113.125	120.0
1	429.45	425.15	420.75	416.40	412.10	408.05	404.00	400.20	397.65
2	436.85	432.10	427.30	422.55	417.95	413.55	409.25	405.15	402.45
3	441.02	435.95	430.85	425.92	421.15	416.48	412.08	407.82	405.05
4	446.05	440.50	435.00	429.70	424.60	419.75	415.15	410.75	407.85
5	457.45	450.80	444.45	438.45	432.70	427.35	422.30	417.55	414.40
6	473.30	465.30	457.80	450.90	444.40	438.40	432.65	427.40	423.90
7	484.85	475.90	467.65	460.10	453.05	446.45	440.35	434.70	431.00
8	490.70	481.30	472.70	463.85	457.50	450.70	444.40	438.50	434.75
9	495.45	485.75	476.85	468.75	461.20	454.25	447.75	441.75	437.90
10	498.75	488.90	479.85	471.60	463.95	456.85	450.25	444.20	440.25
11	500.82	490.92	481.82	473.45	465.75	458.55	451.78	445.82	441.82
12	501.85	491.95	482.82	474.42	466.68	459.52	452.85	446.65	442.65
13	502.72	492.82	483.65	475.25	467.55	460.35	453.65	447.45	443.45
14	503.35	493.52	484.42	476.02	468.25	461.05	454.35	448.15	444.15
15	503.85	494.05	485.00	476.65	468.85	461.65	455.00	448.80	444.80
16	504.05	494.35	485.40	477.10	469.35	462.20	455.55	449.35	445.35
17	503.90	494.40	485.55	477.30	469.65	462.55	455.85	449.70	445.70
18	503.35	493.10	485.40	477.25	469.65	426.60	455.95	449.85	445.85
19	502.40	493.40	484.90	476.90	469.35	426.40	455.80	449.75	445.75
20	501.05	492.35	484.00	476.20	468.80	461.90	455.40	449.40	445.45
21	499.2	490.90	482.75	475.15	467.90	461.10	454.7	448.75	444.85
22	496.85	489.00	481.15	473.75	466.65	460.00	453.7	447.85	443.95
23	493.55	486.65	479.15	472.00	465.10	458.60	452.45	446.65	442.85
24	490.3	483.85	476.75	469.85	463.20	456.85	450.85	445.15	441.45
25	484.3	478.25	471.85	465.45	459.25	453.2	447.5	442.05	438.45
26	471.25	466.85	461.85	456.55	451.2	445.85	440.7	435.7	432.4
27	454.3	451.95	448.7	444.85	440.65	436.25	431.85	427.5	424.55
28	439.9	438.65	436.45	433.55	430.15	426.5	422.7	418.9	416.3

### 3. MARS 전산코드

원자력 산업계에서는 원자로 계통 열수력 해석에서의 응용에 대한 최적 모델링을 기초로 한 실증해석틀을 강하게 요구하여 왔다. 이러한 요구는 RELAP5, COBRA-TF, TRAC, CATHARE 등과 같은 응용코드의 개발을 이끌었다. 원자력 최적통합안전해석코드인 MARS 코드는 일차원 열수력 계통분석코드인 RELAP5/MOD3와 다차원 원자로 용기의 열수력 분석코드인 COBRA-TF를 통합하여 하나의 분석체계를 구축한 코드로서 한국원자력연구소에서 개발되어 현재는 MARS3.0까지 수정작업이 이루어졌다. 따라서 MARS 코드 내에서 RELAP5/MOD3는 일차원 모듈로 작용하며 COBRA-TF는 삼차원 모듈로 작용한다. 코드는 전체적으로 FORTRAN 90의 Modular data structure와 New dynamic memory allocation scheme을 사용하여 재구성되었다. MARS 코드는 두 독립적인 코드가 하나의 통합코드체계에서 병렬적으로 계산을 수행하므로 계통의 특정 부분을 자세히 보기 위하여 삼차원 모듈을 일차원 모듈과 함께 사용하여 해석을 수행할 수 있다 [정법동 등 2004].

#### 1) MARS 코드의 구조

MARS 코드는 Fig. 4에서 보듯이 Top-Down 구조를 사용하여 부프로그램들이 모듈화되어 있으며 다양한 모델과 Procedure도 부프로그램으로 독립화 되어있다. 코드의 상위구조는 크게 Input(INPUTD), Transient/steady-state(TRANCTL), 그리고 Stripping(STRIPF)으로 구성된다. Input processing에서는 Processing type을 Transient/Steady-state calculation, Reediting, Plotting, Stripping 등으로 구분되어있다. Transient/Steady-state 블록은 사용자 선택에 따라 과도상태 계산 또는 정상상태 계산으로 구분되며 두 가지는 기본적으로 동일하지만 Transient 옵션의 경우에는 Thermal effect가 압력이나 밀도보다 그 수렴도가 작기 때문에 정상상태에 도달하는 시간이 더 길다. 따라서 이러한 경우에는 Steady-state 옵션을 사용하여 인위적으로 열전도체의 열용량을 감소시킴으로써 Thermal effect를 가속할 수 있다.

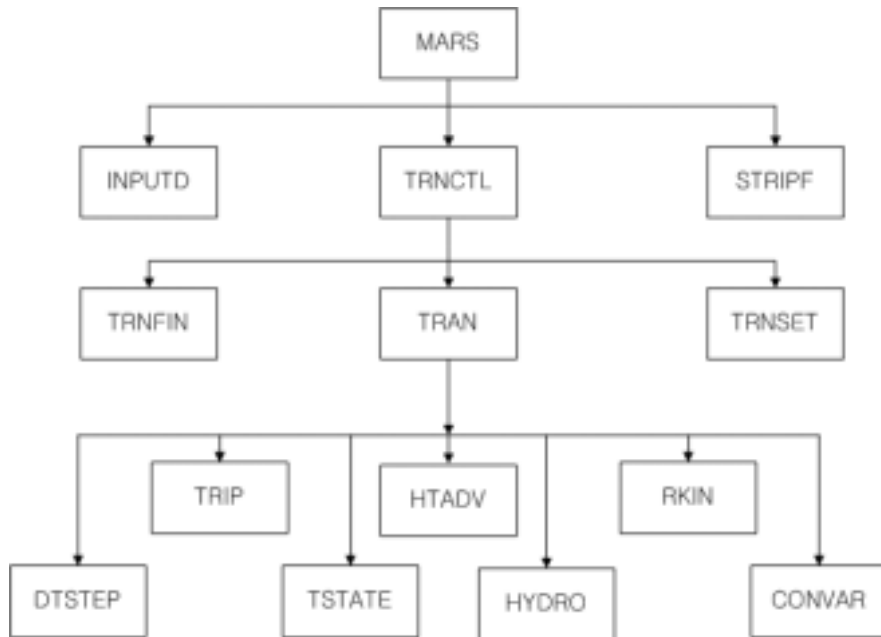


Fig. 4. Structure of MARS code.



## 2) 입력의 처리

입력의 처리는 INPUTD 블록에서 처리하며 총 3가지 단계로 구분된다. 첫 번째 단계에서는 입력카드의 내용을 읽고 입력오류나 문법오류의 유무를 판단하며 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 읽은 데이터를 Common block이나 Dynamic data block에 저장한다. 마지막 단계에서는 각 데이터 블록에 저장된 입력자료를 Cross-checking하여 상호 관련성이 올바르게 되어있는지를 검사한다. 사용자에게 입력된 자료의 출력과 진단결과는 2, 3단계에서 생성되며 출력파일에 기록된다.

## 3) 과도상태 계산

MARS 전산코드에서 과도상태의 계산을 담당하는 블록은 TRNCTL블록이다. TRNCTL 부프로그램은 다시 TRNFIN, TRANSET, TRAN의 구조로 나뉜다. TRANSET에서는 데이터 블록 정보간의 Cross-link를 최종적으로 점검하고 Matrix 계산을 위한 배열과 임시변수 저장 환경을 만들고 불필요한 컴퓨터



기억장소를 돌려주는 작업을 한다. 과도 및 정상상태의 계산을 TRAN에서 수행하는데 실제 컴퓨터의 계산시간의 대부분을 이 부프로그램에서 차지하며 컴퓨터 메모리의 크기에 영향을 크게 받는다. 과도 및 정상상태 계산 수행이 종료되면 TRNFN 부프로그램에서는 더 이상 필요하지 않은 Dynamic data block의 공간을 되돌려 준다.

다음은 TRAN에 의해 구동되는 부프로그램의 기능에 대한 설명이다.

DTSTEP에서는 Time step control 부분을 담당하는 부프로그램으로서 계산시간 간격 조정과 출력화일 편집기능, 과도상태 계산이 제대로 이루어지고 있는지를 결정하는 루틴이다. 또한 프로그램이 수행되는 동안 계산시간과 시간간격 등의 정보를 모니터를 통해 사용자가 알아볼 수 있도록 출력하는 기능도 수행한다.

TRIP은 논리언어로써 Trip system이 작동하도록 하는 기능을 담당한다. 어떤 Trip action이 취해질 지에 대해서는 각기 다른 모듈의 구성요소에서 결정된다. 예를 들면 Trip value에 따라 밸브의 개폐를 결정하는 Valve component와 펌프의 Electrical Breaker의 Trip 여부에 따라 펌프의 Trip상태를 결정하는 Pump component 등이 있다.

TSTATE에서는 State boundary volume module로서 각 Time-dependent volume에서의 유체의 열역학적 상태를 계산하는 부프로그램이며 Time-dependent junction에서의 속도도 계산한다.

HTADV는 Heat structure module로서 각 hydrodynamic volume에서의 열전도 및 열전달 계산을 수행하는 부프로그램이다.

HYDRO 부프로그램은 MARS에서 열수력학적 계산을 하는 루틴으로서 각종 질량 보존방정식 및 운동량 보존방정식, 에너지 보존방정식을 Matrix로 구성하여 압력, 온도, 속도 및 내부에너지와 같은 주요 변수를 구하는 과정을 수행한다.

RKIN은 원자로 동력학에 관한 부프로그램으로서 공간과 시간에 대한 함수로 분리하여 계산하여 Point-kinetics approximation으로 원자로 출력의 변화를 계산한다.

CONVAR에서는 열수력 계통의 전반적인 조정 기능을 제공하는 부프로그램으로서 여기서는 Hydrodynamic volume, Junction, Pump, Valve, Heat structure, Reactor kinetics 등의 변수를 포함한 Time advanced quantity의 제어를 한다.

#### 4) 고온가스로 해석을 위해 추가된 표면간 복사열전달 모델

경수로인 경우 열전달 방식에서 복사열전달에 대한 비중은 무시할 수 있을 정도로 작았으나 고온가스로인 경우는 표면의 온도가 크게 높아져 복사열전달이 원자로공동냉각계통의 열전달 방식에서 중요한 비중을 차지한다. 이 사항을 MARS 코드에 반영하기 위해 한국원자력연구소에서는 복사열전달 모델을 코드에 추가하였다.

MARS 코드에 추가된 복사열전달 모델은 격리체(Enclosure)에 포함된 표면에 대하여 Lumped-system 근사 계산방법을 사용한다. 이러한 방법을 적용하기 위해 다음과 같은 가정을 사용하였다 [Sparrow 등 1966].

- 격리체 내에 존재하는 유체는 복사열에너지를 방출하거나 흡수하지 않는다.
- 반사특성은 입사 또는 반사되는 방향의 함수이거나 복사빈도(radiation frequency)의 함수가 아니다.
- 온도, 반사율 그리고 라디오시티(Radiosity)는 각각의 표면에 대해 일정하다.

한 표면의 라디오시티는 그 표면에서 방출되는 총 복사에너지의 합이다.  $i$  번째 표면에 대한 라디오시티는 다음과 같은 수식으로 나타낸다.

$$R_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + \rho_i \sum_{j=1}^n R_j F_{ij} \quad (1)$$

여기에서

R = 라디오시티

$\epsilon$  = 방사율

$\sigma$  = 스테판볼츠만 상수

T = 온도

$\rho = 1 - \epsilon$  ; 반사율

$F_{ij}$  : "i" 표면에 "j" 표면까지의 관측계수


i 표면의 순 복사열속(Q)은 i 표면에 대한 라디오시티 값에서 모든 표면의 라디오시티에 i 표면에서 모든 표면을 바라보는 관측계수(F<sub>ij</sub>)를 곱한 값의 차이이며 식(2)와 같이 표현된다.

$$Q_i = R_i - \sum_{j=1}^n R_j F_{ij} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 조합하면 식(3)으로 표현될 수 있다.

$$Q_i = \frac{\epsilon_i}{\rho_i} (\sigma T_i^4 - R_i) \quad (3)$$

i 표면에 대한 복사열속을 구하는 문제는 단지 i 표면에 대한 라디오시티를 구하는 것이고 식(4)와 같은 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.



$$(\delta_{ij} - \rho_i F_{ij}) R_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 \quad (4)$$

여기에서 Kronecker delta(δ<sub>ij</sub>)는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} (\delta_{ij}) &= 0 & i &= j \\ (\delta_{ij}) &= 1 & i &\neq j \end{aligned}$$

식(4)의 해는 식(5)와 같이 역행렬을 포함한 식으로 표현될 수 있다.

$$R_i = (\delta_{ij} - \rho_i F_{ij})^{-1} \epsilon_i \sigma T_i^4 \quad (5)$$

모든 구조물의 표면 온도를 구하면, 식 (5)을 통해 각 표면의 라디오시티를 구할 수 있고, 다시 식 (3)로부터 복사열속을 구한다. MARS 코드에서는 식 (3)의 복사열속을 열전도체 모델의 경계조건으로 부여하고 열전도 방정식(6)을 푼다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_i = h_i(T_i - T_r) + Q_i \quad (6)$$

여기서

k = 표면 전도도

r = 반경

h = 대류 열전달계수

Tr = 기준 온도

그리고 복사열전달 방정식을 풀기위해 코드 사용자는 격리체 내에 존재하는 모든 표면에 대해 방사율( $\epsilon$ )과 관측계수( $F_{ij}$ )을 입력파일에 기재하여하고 코드는 입력처리과정에서 식(8)과 식(9)의 조건에 알맞게 입력되었는지 확인한다 [정범동 등 2004].

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1.0 \quad (7)$$



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(8)

#### 4. 계통모델링

Fig. 5는 HTR-10 benchmark problem에 대하여 MARS 코드를 이용한 평가 계산을 수행하기 위한 Nodalization을 보여준다. 본 문제의 Nodalization은 원자로 부분(100~199), 원자로공동부분(400~499), 냉각계통부분(200~299), 굴뚝부분(300~399) 등 총 4개의 Hydrodynamic system으로 구성되며 각각의 Hydrodynamic system은 Heat structure에 의해 유체의 흐름 없이 전도와 복사의 방식으로 열전달이 이루어진다.

노심과 원자로용기 간의 Hydrodynamic system은 두개의 Single volume 컴퍼넌트, 하나의 Pipe 컴퍼넌트, 그리고 각각의 컴퍼넌트를 연결하기 위한 Single Junction로 모사하였다. Pipe 컴퍼넌트의 내부 volume의 높이는 THERMIX 코드와의 Benchmarking을 위해 TECDOC-1163에서 THERMIX로 모델링한 것과 같은 높이로 나누었다.

원자로공동부분의 Hydrodynamic system은 원자로 반경 방향으로의 대류 열전달을 모사하기 위해 Fig. 6에서 보이는 것과 같이 2개의 Annulus 컴퍼넌트와 이를 연결하여주는 Multiple Junction을 사용하여 Cross flow가 존재할 수 있도록 구성하였다.

냉각계통부분의 Hydrodynamic system은 32개의 내부 Volume을 가진 Pipe 컴퍼넌트를 사용하여 Water cooler를 모사하였고, 2개의 Pipe 컴퍼넌트를 사용하여 Water Cooler와 Air cooler를 연결하는 Hot uprising tube와 Cold downcoming tube 모사하였으며, 10개의 Volume을 가진 Pipe 컴퍼넌트를 사용하여 Air cooler를 모사하였다. 추가적으로 냉각계통의 압력을 일정하게 유지 시켜주기 위해 Cold downcoming tube 상단부에 4개의 Volume으로 구성된 Pipe, time dependent volume, single junction 컴퍼넌트를 사용하여 Regulation tank를 모의하였다.

굴뚝부분의 Hydrodynamic system은 실제 굴뚝을 모사하기 위한 3개의 내부 Volume을 가진 Pipe 컴퍼넌트, 상부 유체 유출구와 하부 유체 주입구의 모사를 위한 2개의 Time dependent volume 컴퍼넌트, 그리고 이들 컴퍼넌트를 연결시켜주는



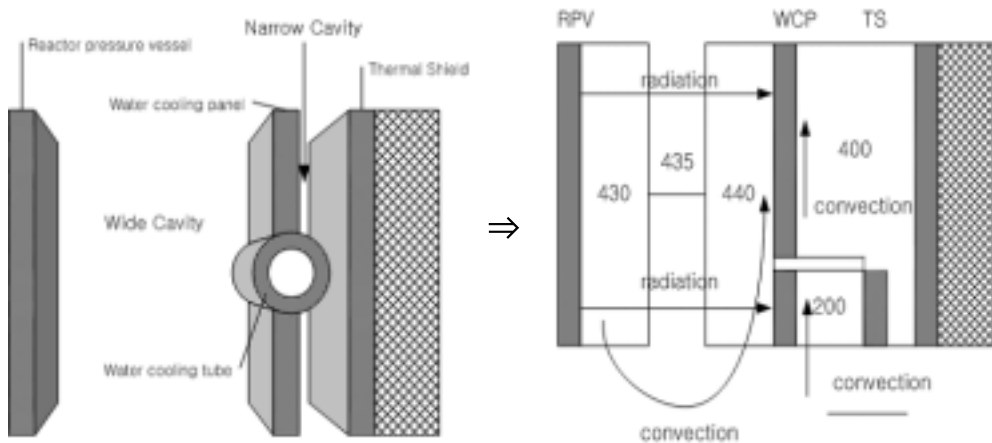


Fig. 6. Heat transfer modelling of RCCS.

전체 계통의 열전달 모델은 MARS 코드의 해석능력 진단을 위하여 코드에 제공된 모델, 즉, 단상기체 열전달 모델 및 Air cooler 2차측의 경우 수평변들 열전달 모델을 적용하였다. 또한 Air cooler 2차측의 복잡한 구조에서 발생하는 자연대류 열전달을 비교적 간단한 기하구조로 묘사하기 위하여 열전달계수에 Fouling factor를 적용하였으며 고온가스로의 열전달 방식 중 20% 이상의 비중을 차지하는 복사열전달은 Enclosure의 개념을 적용하여 모델링하였다. 이 문제에서는 두개의 Enclosure가 사용되었다. 하나는 노심용기 외부표면과 원자로용기 내부표면으로 구성된 Enclosure이며, 다른 하나는 원자로용기 외부표면과 Water cooling tube 외부표면, Water cooling panel 내부표면으로 구성된 Enclosure이다. 그리고 각각의 표면에 대한 방사율( $\epsilon$ )은 0.8로 가정하였으며, 관측계수(F)는 Fig. 7에서 보여지는 Nevada 코드를 이용하여 나온 데이터를 MARS 코드 내의 복사열전달 조건식 (6), (7)을 만족시키도록 수정하여 입력하였다 [TAC technology 1997].

경계조건으로 문제 1번은 Table 1에 제시된 온도를 노심용기 Heat structure의 내부 경계조건으로 고정시켰으며, Chimney로부터 Air cooler로 유입되는 공기의 온도를 30 °C로 일정하게 유지시켰다. 그리고 문제 2번은 Table 2에 제시된 온도를 노심용기 Heat structure의 내부 경계조건으로 문제시간에 따른 온도변화를 General table를 사용하여 모의하였으며, Chimney로부터 Air cooler로 유입되는 공기의 온도는

30℃로 일정하게 유지시켰다. 그리고 시스템 유체의 경우, 현재 MARS 코드는 공기를 시스템의 주 유체로 사용할 수 없으므로, 모든 시스템의 주 유체를 경수로 사용하였으며, 또한 사용된 비응축 기체인 공기는 증기와 열적, 기계적 평형상태로 존재하게 모델 하였고, 실제로 헬륨이 존재하는 원자로 내의 유체 역시 공기로 가정하였다.

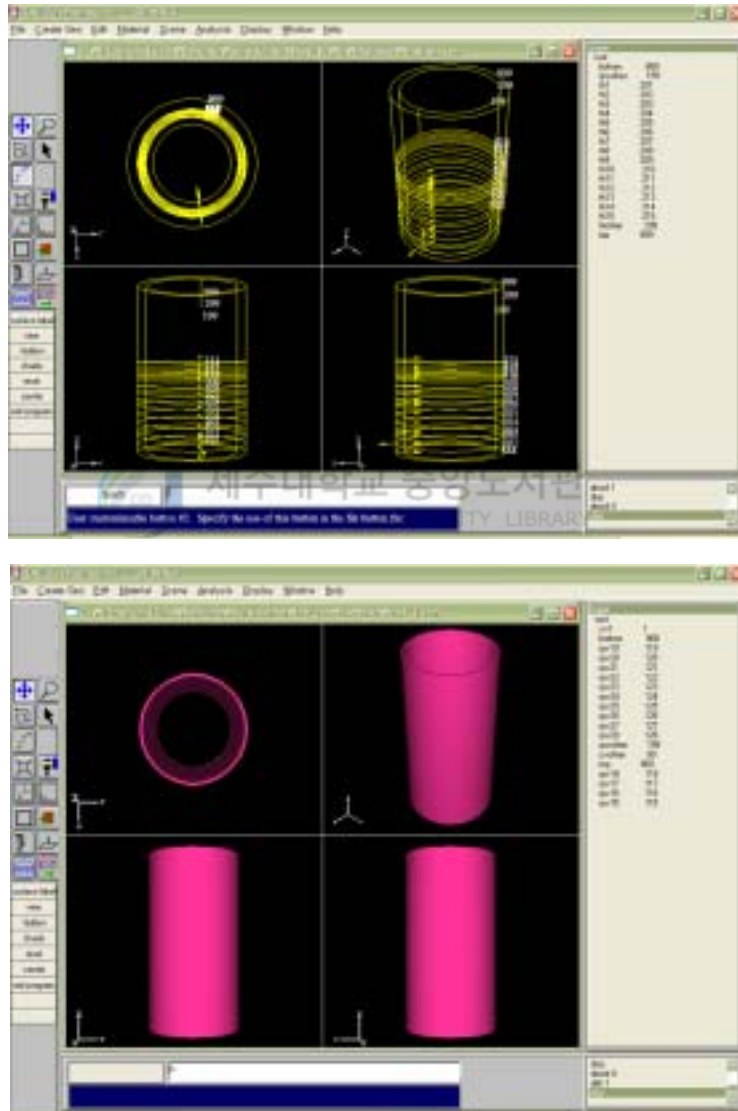


Fig. 7. View factor calculation using NEVADA code.



### Ⅲ. 결과 및 토의

#### 1. Benchmark problem - I

Table 8에 주어진 노심용기 표면온도를 경계조건으로 사용한 MARS 코드의 평가계산 결과, Fig. 8, 9에서 보듯이  $7 \times 10^4$  초가 경과한 뒤 질량유량에서 약간의 진동은 있으나 전체적으로 원자로는 정상상태에 도달한 것을 확인할 수 있었다. 이 시간에서 Water cooler에서 물의 질량유량은 8.5 kg/s, 입구 및 출구 온도는 각각 61.2 °C, 68.6 °C로, 이에 따른 RCCS에 의한 총 열전달률은 264.2 kW로 계산되었다.

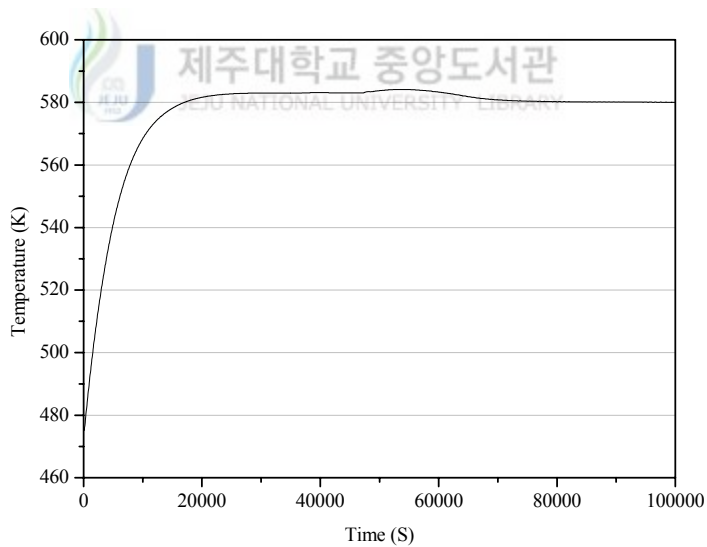


Fig. 8. Temperature of RPV 15th node under benchmark problem I.

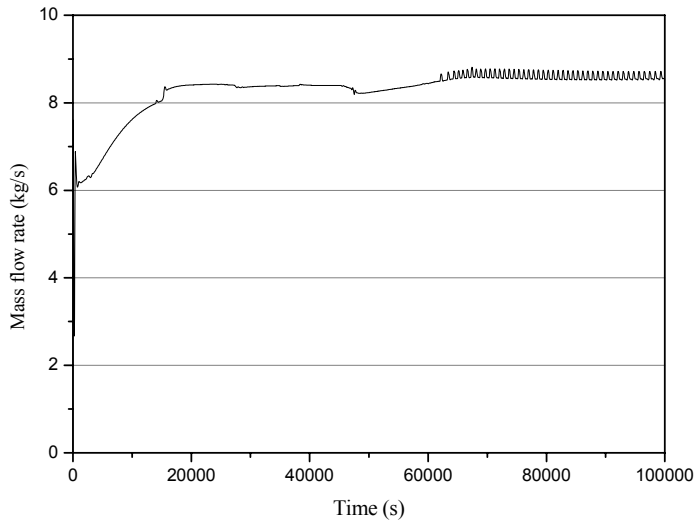


Fig. 9. Mass flow rate of RCCS under benchmark problem I .

Fig. 10 은 HTR-10의 노심용기, 원자로용기, Water cooling tube의 축 방향 온도장에 대한 MARS 코드와 THERMIX 코드의 계산결과를 비교한 것이다. 열린 기호는 비교대상인 THERMIX 코드의 평가 계산결과이고 닫힌 기호는 MARS 코드의 평가 계산결과이다. 그림에서 보듯이, MARS 코드의 계산결과와 THERMIX 코드의 계산 결과는 전체적으로 일치함을 알 수 있다. 원자로용기 표면온도장의 경우, 원자로 상단 부분에서 최대 1.09 %의 오차가 있었으며 하단 부분으로 내려갈수록 오차가 작아짐을 알 수 있었다. Water cooling tube 온도장의 경우, 상단 부분과 하단부분의 온도에 비해 중간 부분의 온도 오차가 크며 최대 1.46 %의 계산 오차가 존재함을 알 수 있다. 또한 Table 10은 THERMIX, TAC-NC, MARS 코드의 평가 계산결과 원자로공동냉각계통에 의한 총 열전달률에서 복사 열전달률과 대류열전달률이 차지하는 비율을 보여준다. 이러한 차이는 각 코드에 내재한 복사 및 대류 열전달모델과 계통 모델링 방법의 차이에 기인한다고 판단된다.

Table 10. Comparison between results of RCCS heat transfer rate.

코드 구분	$Q_T$ (kW)	$Q_R$ (kW)	$Q_C$ (kW)	$R_C$ (%)
THERMIX	215.0	194.0	21.0	9.8
TAC-NC	208.0	-	-	20.0
MARS	264.2	197.2	67.0	25.4

$Q_T$  : 원자로공동냉각계통에 의한 총 열전달률.

$Q_R$  : 복사열전달에 의한 열전달률.

$Q_C$  : 대류열전달에 의한 열전달률.

$R_C$  : 대류열전달 비율 ( $Q_C / Q_T$ ).

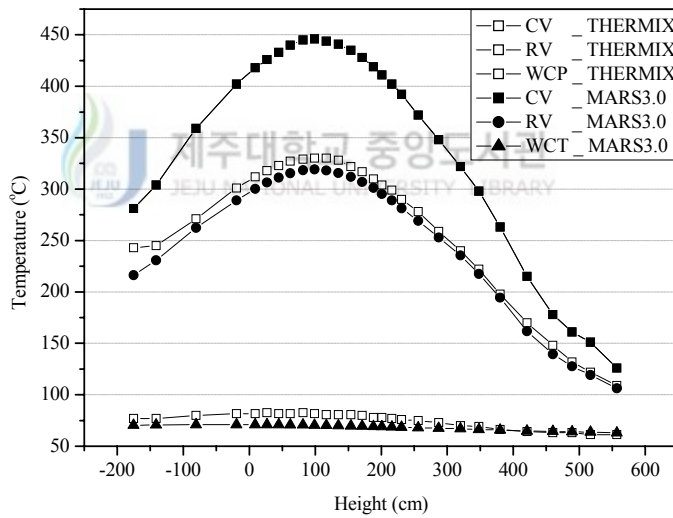


Fig. 10. Comparison of surface temperature of CV, RV and WCP.

## 2. Benchmark problem - II

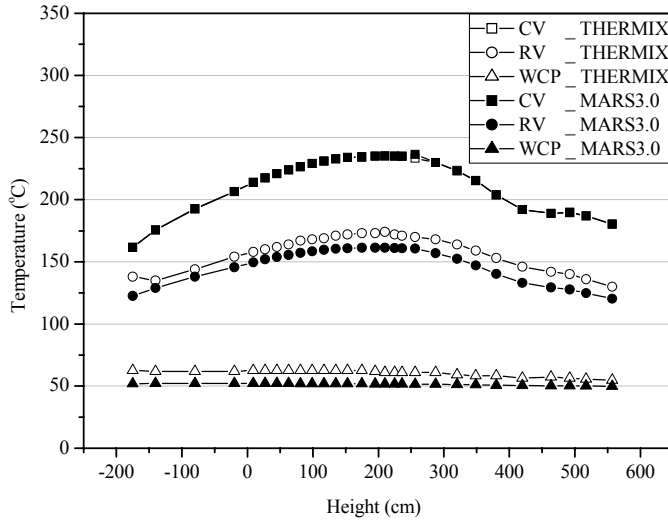


Fig. 11. Comparison of surface temperature of CV, RV and WCP at initial status.

Fig. 11은 Table 9에서 주어진 데이터 중 초기시간( $t=0$ )에 대한 노심용기 표면온도를 경계조건으로 사용하여  $2 \times 10^5$  초가 경과한 뒤 정상상태에 도달했을 때의 축방향 노심용기, 원자로용기 그리고 냉각관의 온도분포를 THERMIX의 초기 온도분포와 비교한 결과를 보여준다. 이 시간에서 Water cooler에서 물의 질량 유량은  $5.912 \text{ kg/s}$ , 입구 및 출구 온도는 각각  $47.08 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 로, 이에 따른 RCCS의 총 열전달률은  $95.083 \text{ kW}$ 로 계산되었다.

Fig. 12는 MARS 코드와 THERMIX 코드에서 계산된 시간에 따른 질량유량의 변화를 비교한 것이다. MARS 코드의 결과가 THERMIX 코드의 결과 보다 최대  $1.99 \text{ kg/s}$ 보다 높으나 전체적으로 비슷한 추이를 가지며 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 13은 MARS 코드와 THERMIX 코드에서 계산된 시간에 원자로냉각관의 입구, 출구 그리고 입구와 출구의 온도차의 변화를 비교한 것이다. 그래프에서 입구와 출구의 온도차이 곡선을 보면 MARS 코드의 결과가 THERMIX 코드의 결과 보다 최대  $2.21 \text{ }^\circ\text{C}$ 보다 낮으나 전체적으로 비슷한 추이를 가지며 감소됨을 알 수 있다.

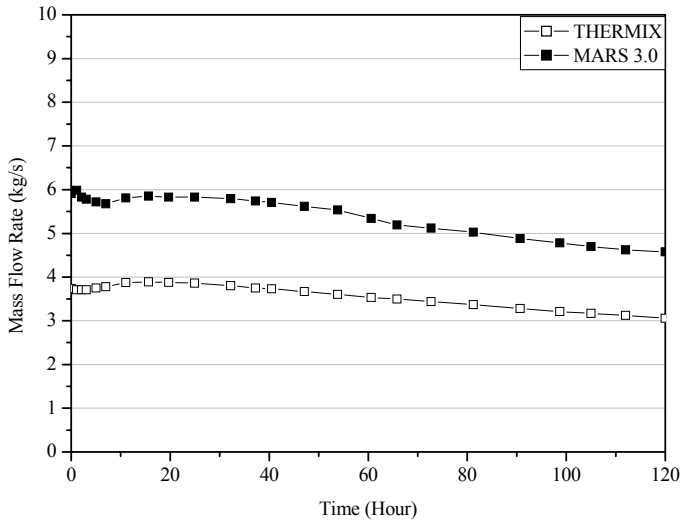


Fig. 12. Comparison of mass flow rate of RCCS of depressurization accident.

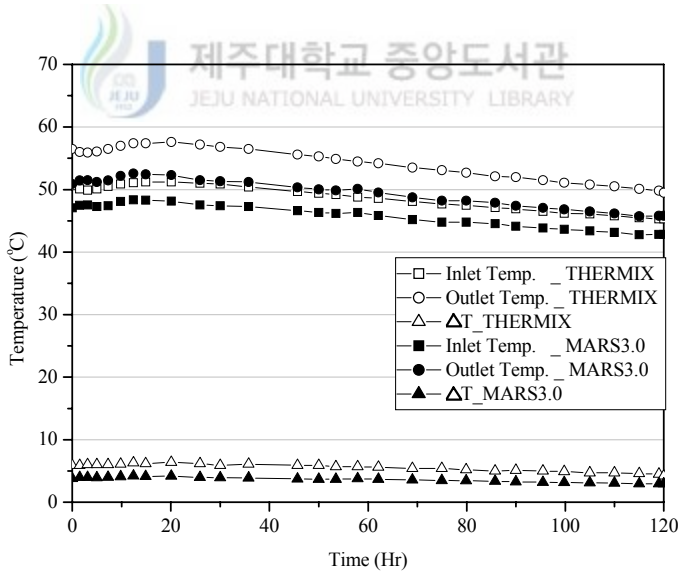


Fig. 13. Comparison of inlet and outlet temperature curves of RCCS under depressurization accident.

그러나 Fig. 14에서 나타난 원자로공동냉각계통의 열전달률 변화 곡선을 살펴보면 초기에는 최대 5.0kW의 차이는 존재하나 전체적으로 일치함을 볼 수 있다. 계산결과 MARS 코드는 THERMIX 코드에 비해 질량유량이 높게 계산되었고 원자로공동 냉각계통 냉각수의 온도차이는 낮게 계산되었으나 원자로공동냉각계통의 총 열전달율은 전체적으로 일치한다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 MARS 코드와 THERMIX 코드의 계산결과의 차이는 각 코드의 원자로용기 및 공동에서의 복사 및 대류 열전달, 그리고, air cooler 2차측의 열전달 계산 모델의 차이에 기인하는 것으로 평가된다. 초기 시간 Air cooler 2차측 열전달의 경우, MARS 코드는 열전달계수를  $611.3 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 로, THERMIX 코드는  $566.5 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 로 예측된다. 특히, Water cooling tube 및 Air cooler에서의 열전달 형태는 혼합 또는 자연대류 형태로, 기존 코드에 내재한 단순화된 열전달 모델로는 예측능력에 문제점이 있음이 이미 밝혀진 바가 있다 [이원재 등 2004].

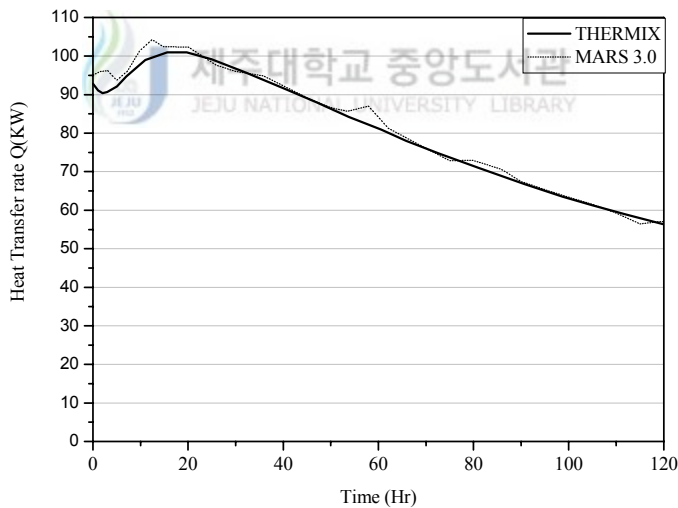


Fig. 14. Comparison of heat transfer rate of RCCS of depressurization accident.

## IV. 결 론

본 연구에서는 MARS 코드가 고온가스로 안전해석에 적용될 수 있을지를 검증하고 문제점이 있다면 이를 도출하기 위해 MARS 코드를 사용하여 IAEA HTR-10 Benchmark Problem-I, II에 대해서 평가계산을 수행하였다. 평가방법은 MARS 코드 계산결과와 THERMIX 코드 계산결과에 대한 노심용기, 원자로용기, 원자로냉각관의 온도장과 원자로공동냉각계통의 열전달률을 비교하는 것이다.

Benchmark problem-I의 경우 비교 대상 온도장은 최대 오차범위 1.46% 정도로 잘 일치하였고 원자로공동냉각계통의 총 열전달률은 MARS 코드가 보고된 THERMIX 코드 보다 51.2kW 더 큰 결과를 보였다. 또한 원자로공동냉각계통의 열전달방식에서 MARS 코드의 경우 복사열전달 비율이 타 코드보다 작음을 알 수 있었다.

Benchmark problem-II의 경우 초기시간에 대한 온도장 분포는 THERMIX 코드보다 낮은 결과를 보였고 시간에 따른 원자로공동냉각계통의 질량유량은 높게 나타났고 입구와 출구의 온도차이는 THERMIX 코드보다 낮은 계산결과를 보였으나 이에 따른 총 열전달률은 거의 일치하였다.

Benchmark problem-I, II에 대한 MARS 코드의 계산결과 오차는 Water cooling panel과 Air cooler 등 원자로공동냉각계통의 설계자료의 미비에 따른 모델링의 단순화와 각 Component에서의 대류 및 복사열전달 해석능력의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 고온가스로의 경우 원자로공동에서의 복사열전달이 매우 중요한 역할을 수행하고 있으므로 MARS 코드 내 복사열전달의 관측계수 입력부분을 사용자의 편리성을 고려하여 관측계수 계산 상관식을 코드 내에 적용시킬 필요가 있다.

결론적으로, 본 연구를 종합하여 볼 때 MARS 코드가 고온가스로 안전해석 코드로서의 역할을 충분히 수행할 수 있으나 코드 사용자의 편리성 측면에서 고온가스로 관련 콤포넌트의 추가가 필요한 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- Bub-Dong Chung, et al, 2004, Development and Assessment of Best estimate Integrated Safety Analysis Code. KAERI/RR-2520, Korea.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2000, Heat Transport and Afterheat Removal for Gas Cooled Reactors Under Accident Conditions, TECDOC-1163, Vienna, pp. 64-103.
- Gao Zuying, Li Baoyan and Jiang Zhiqiang, 1994, Benchmark Problem Definition of HTR-10, Institute of Nuclear Energy Technology, China.
- Won-Jae Lee, et al, 2004, Progress of Accident Analysis Codes Development for Gas-Cooled Reactors, BE-2004, ANS 2004 Embedded Meeting.
- Won-Jae Lee, et al, 2002 "Development of Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, KAERI/RR-2235.
- Jong-Hwa Jang, et al. 2003. Basic Study on High Temperature Gas Cooled Reactor Technology for Hydrogen Production. KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute)/RR-2435, Korea.
- TAC Technology, 1997, Net Energy Verification And Determination Analyzer, NEVADA Software Package User's Manual.



E. M Sparrow and R. D. Cess, 1966, Radiation Heat Transfer, Belmont, CA: Brooks-Cole Publishing Co.

Zuying Gao and Baoyan Lee, 1995, Definition and Solution of Benchmark Problem of 200kW Heatup Experiment of HTR-10, Institute of Nuclear Energy Technology, China.

Zuying Gao, Shuyan He and Min Zhang, Afterheat Removal for HTR-10 Test Module under Accident Conditions, Institute of Nuclear Energy Technology, China.

Zuying Gao and Shi Lei, 2002, Thermal Hydraulic Transient analysis of the HTR-10. Institute of Nuclear Energy Technology, Nuclear Engineering and Design pp. 65-80.

INET(Institute of Nuclear Energy Technology), Benchmark Problem of the HTR-10 Steady State Temperature Distribution for Full Power Initial Core. China.

# 부 록. HTR-10 Benchmark Problem- I 에 대한 MARS 코드 Input

```

=====
=HTR-10 Benchmark Problem.1
*
*The Analyses of HTR-10 Benchmark Problem.1 Using MARS
*
=====
100 new transnt
101 run
102 si si
110 air
120 110250000 0.0 h2o reactor 0
121 430250000 0.0 h2o cavity 0
122 200270000 0.0 h2o wcooler 0
123 300010000 0.0 h2o chimney 0
*
201 500000.0 1.0e-7 0.5 3 100 1000 20000
*
301 httemp 001000103 400.0 800.0 1 1
302 httemp 001000503 400.0 800.0 1 2
303 httemp 001001003 400.0 800.0 1 3
304 httemp 001001503 400.0 800.0 1 4
305 httemp 001002003 400.0 800.0 1 5
306 httemp 001002503 400.0 800.0 1 6
307 httemp 001002803 400.0 800.0 1 7
*
311 httemp 100000103 400.0 600.0 2 1
312 httemp 100000503 400.0 600.0 2 2
313 httemp 100001003 400.0 600.0 2 3
314 httemp 100001503 400.0 600.0 2 4
315 httemp 100002003 400.0 600.0 2 5
316 httemp 100002503 400.0 600.0 2 6
317 httemp 100002803 400.0 600.0 2 7
*
389 mflowj 271000000 -15.0 15.0 3 1
*
321 tempg 440150000 300.0 600.0 4 1
322 tempg 430150000 300.0 600.0 4 2
323 tempg 110150000 300.0 600.0 4 3
324 tempf 200150000 300.0 600.0 4 4
325 tempg 240010000 300.0 600.0 4 5
326 tempg 240100000 300.0 600.0 4 6
*
392 velgj 305000000 -10.5 10.5 5 1
393 velgj 315000000 -10.5 10.5 5 2
*
394 htrnr 240100500 -10000.0 10000.0 6 1
395 htrnr 200102500 -10000.0 10000.0 7 1
396 p 270010000 1.0+5 3.0+5 8 1
*
401 time 0 ge null 0 0.0 1
402 time 0 lt null 0 0.0 1
*
=====
*hydrodynamic components
*
* Primary system
*
* Primary system components are numbered between 100-199
*
=====
*reactor upper plenum
1200000 rcuppln snglvol
1200101 0.0 1.49 11.1827 0.0 90.0
1200102 1.49 0.0 0.0 0.0
1200200 4 1.0e+5 486.25 0.0
*
1150000 rupjun sngljun
1150101 110280002 120010001 1.3788 0.0 0.0 0100
1150201 0 0.0 0.0 0.0
*
=====
*between CV and RPV
1100000 helimvol annulus
1100001 28
1100101 1.3788 28
1100201 1.3788 27
1100301 0.4 2
1100302 0.17 3
1100303 0.4 6
1100304 0.225 7
1100305 0.35 8
1100306 0.3 9
1100307 0.325 10
1100308 0.15 14
1100309 0.18 24
1100310 0.4 25
1100311 0.8 26
1100312 0.4 27
1100313 0.3 28
1100401 0.0 28
1100501 0.0 28
1100601 90.0 28
1100701 0.4 2
1100702 0.17 3
1100703 0.4 6
1100704 0.225 7
1100705 0.35 8
1100706 0.3 9
1100707 0.325 10
1100708 0.15 14
1100709 0.18 24
1100710 0.4 25
1100711 0.8 26
1100712 0.4 27
1100713 0.3 28
1100801 0.0 0.22 28
1100901 0.0 0.0 27
1101001 0000000 28
1101101 00000000 27
1101201 4 1.0e+5 439.75 0.0 0.0 0.0 1
1101202 4 1.0e+5 448.55 0.0 0.0 0.0 2
1101203 4 1.0e+5 455. 0.0 0.0 0.0 3
1101204 4 1.0e+5 465.7 0.0 0.0 0.0 4
1101205 4 1.0e+5 488.95 0.0 0.0 0.0 5
1101206 4 1.0e+5 521.55 0.0 0.0 0.0 6
1101207 4 1.0e+5 546.25 0.0 0.0 0.0 7
1101208 4 1.0e+5 560.65 0.0 0.0 0.0 8
1101209 4 1.0e+5 574.5 0.0 0.0 0.0 9
1101210 4 1.0e+5 586.8 0.0 0.0 0.0 10
1101211 4 1.0e+5 595.9 0.0 0.0 0.0 11
1101212 4 1.0e+5 601.35 0.0 0.0 0.0 12
1101213 4 1.0e+5 606.65 0.0 0.0 0.0 13
1101214 4 1.0e+5 611.65 0.0 0.0 0.0 14
1101215 4 1.0e+5 616.7 0.0 0.0 0.0 15
1101216 4 1.0e+5 621.45 0.0 0.0 0.0 16
1101217 4 1.0e+5 625. 0.0 0.0 0.0 17
1101218 4 1.0e+5 627.25 0.0 0.0 0.0 18
1101219 4 1.0e+5 628.05 0.0 0.0 0.0 19
1101220 4 1.0e+5 627.35 0.0 0.0 0.0 20
1101221 4 1.0e+5 625.25 0.0 0.0 0.0 21
1101222 4 1.0e+5 621.75 0.0 0.0 0.0 22
1101223 4 1.0e+5 617.05 0.0 0.0 0.0 23
1101224 4 1.0e+5 611.35 0.0 0.0 0.0 24
1101225 4 1.0e+5 599.9 0.0 0.0 0.0 25
1101226 4 1.0e+5 572.15 0.0 0.0 0.0 26
1101227 4 1.0e+5 523.1 0.0 0.0 0.0 27
1101228 4 1.0e+5 488.65 0.0 0.0 0.0 28
1101300 0
1101301 0.0 0.0 0.0 27
*

```

```

*
1050000 rdwjun sngljun
1050101 100010002 110010001 1.3788 0.0 0.0 0100
1050201 0 0.0 0.0 0.0
*
*reactor lower plenum
1000000 rlowpln snglvol
1000101 0.0 1.8 14.6065 0.0 90.0
1000102 1.8 0.0 0.0 0.0
1000200 4 1.0e+5 436.8 0.0
*
=====
* Reactor Cavity
* Reactor Cavity components are numbered between 400-499
=====
*
*reactor cavity top inner plenum
4500000 rctiplen pipe
4500001 3
4500101 0.0 3
4500201 10.502 1
4500202 19.1345 2
4500301 0.77 2
4500302 0.306 3
4500401 6.1803 1
4500402 11.321 2
4500403 6.0925 3
4500501 0.0 3
4500601 90.0 3
4500701 0.77 2
4500702 0.306 3
4500803 0.0 0.0 3
4500901 0.0 0.0 2
4501001 0000000 3
4501101 0000000 2
4501201 4 1.01325e+5 374.982 0.0 0.0 0.0 1
4501202 4 1.01325e+5 375.092 0.0 0.0 0.0 2
4501203 4 1.01325e+5 375.109 0.0 0.0 0.0 3
4501300 0
4501301 0.0 0.0 0.0 2
*
*reactor cavity top outer plenum
4510000 rctoplem annulus
4510001 3
4510101 8.6086 2
4510102 8.0681 3
4510201 8.6086 1
4510201 8.0681 2
4510301 0.77 2
4510302 0.306 3
4510401 0.0 3
4510501 0.0 3
4510601 90.0 3
4510701 0.77 2
4510702 0.306 3
4510801 0.0 0.0 3
4510901 0.0 0.0 2
4511001 0000000 3
4511101 0000000 2
4511201 4 1.01325e+5 372.307 0.0 0.0 0.0 1
4511202 4 1.01325e+5 372.730 0.0 0.0 0.0 2
4511203 4 1.01325e+5 370.689 0.0 0.0 0.0 3
4511300 0
4511301 0.0 0.0 0.0 2
*
4530000 retmjnc mtpljun
4530001 3 0
4530011 450010004 451010003 12.1967 0.0 0.0 00000000
4530012 1.0 0.14 0.0 10000 10000 0 2
4530021 450030004 451030003 4.847 0.0 0.0 00000000
4530022 1.0 0.14 0.0 0 0 0 3
4531011 0.0 0.0 3
*
4410000 iucvjun sngljun
4410101 430280002 450010001 5.8466 0.0 0.0 0000
4410201 0 0.0 0.0 0.0
*
*
4420000 oucvjun sngljun

```

```

4420101 440280002 451010001 8.6086 0.0 0.0 0000
4420201 0 0.0 0.0 0.0
*
*inner reactor cavity
4300000 inrcvct annulus
4300001 28
4300101 5.8466 28
4300201 5.8466 27
4300301 0.4 2
4300302 0.17 3
4300303 0.4 6
4300304 0.225 7
4300305 0.35 8
4300306 0.3 9
4300307 0.325 10
4300308 0.15 14
4300309 0.18 24
4300310 0.4 25
4300311 0.8 26
4300312 0.4 27
4300313 0.3 28
4300401 0.0 28
4300501 0.0 28
4300601 90.0 28
4300701 0.4 2
4300702 0.17 3
4300703 0.4 6
4300704 0.225 7
4300705 0.35 8
4300706 0.3 9
4300707 0.325 10
4300708 0.15 14
4300709 0.18 24
4300710 0.4 25
4300711 0.8 26
4300712 0.4 27
4300713 0.3 28
4300801 0.0 0.802 28
4300901 0.0 0.0 27
4301001 0000000 28
4301101 0000000 27
4301201 4 1.01325e+5 365.387 0.0 0.0 0.0 1
4301202 4 1.01325e+5 365.357 0.0 0.0 0.0 2
4301203 4 1.01325e+5 365.365 0.0 0.0 0.0 3
4301204 4 1.01325e+5 365.411 0.0 0.0 0.0 4
4301205 4 1.01325e+5 365.529 0.0 0.0 0.0 5
4301206 4 1.01325e+5 365.739 0.0 0.0 0.0 6
4301207 4 1.01325e+5 365.916 0.0 0.0 0.0 7
4301208 4 1.01325e+5 366.252 0.0 0.0 0.0 8
4301209 4 1.01325e+5 366.611 0.0 0.0 0.0 9
4301210 4 1.01325e+5 367.078 0.0 0.0 0.0 10
4301211 4 1.01325e+5 367.325 0.0 0.0 0.0 11
4301212 4 1.01325e+5 367.596 0.0 0.0 0.0 12
4301213 4 1.01325e+5 367.888 0.0 0.0 0.0 13
4301214 4 1.01325e+5 368.200 0.0 0.0 0.0 14
4301215 4 1.01325e+5 368.593 0.0 0.0 0.0 15
4301216 4 1.01325e+5 369.007 0.0 0.0 0.0 16
4301217 4 1.01325e+5 369.434 0.0 0.0 0.0 17
4301218 4 1.01325e+5 369.867 0.0 0.0 0.0 18
4301219 4 1.01325e+5 370.299 0.0 0.0 0.0 19
4301220 4 1.01325e+5 370.725 0.0 0.0 0.0 20
4301221 4 1.01325e+5 371.135 0.0 0.0 0.0 21
4301222 4 1.01325e+5 371.525 0.0 0.0 0.0 22
4301223 4 1.01325e+5 371.896 0.0 0.0 0.0 23
4301224 4 1.01325e+5 372.241 0.0 0.0 0.0 24
4301225 4 1.01325e+5 372.913 0.0 0.0 0.0 25
4301226 4 1.01325e+5 374.141 0.0 0.0 0.0 26
4301227 4 1.01325e+5 374.594 0.0 0.0 0.0 27
4301228 4 1.01325e+5 374.905 0.0 0.0 0.0 28
4301300 0
4301301 0.0 0.0 0.0 27
*
*
4350000 revtmjnc mtpljun
4350001 28 0
4350011 430010004 440010003 6.336 0.0 0.0 00000000
4350012 1.0 0.14 0.0 10000 10000 0 2
4350021 430030004 440030003 2.6928 0.0 0.0 00000000
4350022 1.0 0.14 0.0 0 0 0 3

```

4350031 430040004 440040003 6.336 0.0 0.0 00000000  
 4350032 1.0 0.14 0.0 10000 10000 0 6  
 4350041 430070004 440070003 3.564 0.0 0.0 00000000  
 4350042 1.0 0.14 0.0 0 0 7  
 4350051 430080004 440080003 5.544 0.0 0.0 00000000  
 4350052 1.0 0.14 0.0 0 0 8  
 4350061 430090004 440090003 4.752 0.0 0.0 00000000  
 4350062 1.0 0.14 0.0 0 0 9  
 4350071 430100004 440100003 5.148 0.0 0.0 00000000  
 4350072 1.0 0.14 0.0 0 0 10  
 4350081 430110004 440110003 2.376 0.0 0.0 00000000  
 4350082 1.0 0.14 0.0 10000 10000 0 14  
 4350091 430150004 440150003 2.8512 0.0 0.0 00000000  
 4350092 1.0 0.14 0.0 10000 10000 0 24  
 4350101 430250004 440250003 6.336 0.0 0.0 00000000  
 4350102 1.0 0.14 0.0 0 0 25  
 4350111 430260004 440260003 12.6719 0.0 0.0 00000000  
 4350112 1.0 0.14 0.0 0 0 26  
 4350121 430270004 440270003 6.336 0.0 0.0 00000000  
 4350122 1.0 0.14 0.0 0 0 27  
 4350131 430280004 440280003 4.752 0.0 0.0 00000000  
 4350132 1.0 0.14 0.0 0 0 28  
 4351011 0.0 0.0 28  
 \*  
 \*outer reactor cavity  
 \*  
 4400000 inrcvct annulus  
 4400001 28  
 4400101 8.6086 28  
 4400201 8.6086 27  
 4400301 0.4 2  
 4400302 0.17 3  
 4400303 0.4 6  
 4400304 0.225 7  
 4400305 0.35 8  
 4400306 0.3 9  
 4400307 0.325 10  
 4400308 0.15 14  
 4400309 0.18 24  
 4400310 0.4 25  
 4400311 0.8 26  
 4400312 0.4 27  
 4400313 0.3 28  
 4400401 0.0 28  
 4400501 0.0 28  
 4400601 90.0 28  
 4400701 0.4 2  
 4400702 0.17 3  
 4400703 0.4 6  
 4400704 0.225 7  
 4400705 0.35 8  
 4400706 0.3 9  
 4400707 0.325 10  
 4400708 0.15 14  
 4400709 0.18 24  
 4400710 0.4 25  
 4400711 0.8 26  
 4400712 0.4 27  
 4400713 0.3 28  
 4400801 0.0 1.1547 28  
 4400901 0.0 0.0 27  
 4401001 0000000 28  
 4401101 0000000 27  
 4401201 4 1.01325e+5 364.792 0.0 0.0 0.0 1  
 4401202 4 1.01325e+5 364.346 0.0 0.0 0.0 2  
 4401203 4 1.01325e+5 364.561 0.0 0.0 0.0 3  
 4401204 4 1.01325e+5 364.697 0.0 0.0 0.0 4  
 4401205 4 1.01325e+5 364.869 0.0 0.0 0.0 5  
 4401206 4 1.01325e+5 364.977 0.0 0.0 0.0 6  
 4401207 4 1.01325e+5 365.072 0.0 0.0 0.0 7  
 4401208 4 1.01325e+5 365.153 0.0 0.0 0.0 8  
 4401209 4 1.01325e+5 365.296 0.0 0.0 0.0 9  
 4401210 4 1.01325e+5 365.479 0.0 0.0 0.0 10  
 4401211 4 1.01325e+5 365.773 0.0 0.0 0.0 11  
 4401212 4 1.01325e+5 365.963 0.0 0.0 0.0 12  
 4401213 4 1.01325e+5 366.186 0.0 0.0 0.0 13  
 4401214 4 1.01325e+5 366.427 0.0 0.0 0.0 14  
 4401215 4 1.01325e+5 366.681 0.0 0.0 0.0 15  
 4401216 4 1.01325e+5 366.988 0.0 0.0 0.0 16

4401217 4 1.01325e+5 367.294 0.0 0.0 0.0 17  
 4401218 4 1.01325e+5 367.593 0.0 0.0 0.0 18  
 4401219 4 1.01325e+5 367.886 0.0 0.0 0.0 19  
 4401220 4 1.01325e+5 368.172 0.0 0.0 0.0 20  
 4401221 4 1.01325e+5 368.453 0.0 0.0 0.0 21  
 4401222 4 1.01325e+5 368.733 0.0 0.0 0.0 22  
 4401223 4 1.01325e+5 369.014 0.0 0.0 0.0 23  
 4401224 4 1.01325e+5 369.297 0.0 0.0 0.0 24  
 4401225 4 1.01325e+5 369.584 0.0 0.0 0.0 25  
 4401226 4 1.01325e+5 370.229 0.0 0.0 0.0 26  
 4401227 4 1.01325e+5 371.515 0.0 0.0 0.0 27  
 4401228 4 1.01325e+5 371.973 0.0 0.0 0.0 28  
 4401300 0  
 4401301 0.0 0.0 0.0 27  
 \*  
 \*  
 4010000 idcvjun snljun  
 4010101 410030002 430010001 5.8466 0.0 0.0 0000  
 4010201 0 0.0 0.0 0.0  
 \*  
 \*  
 4020000 odcvjun snljun  
 4020101 411030002 440010001 8.6086 0.0 0.0 0000  
 4020201 0 0.0 0.0 0.0  
 \*  
 \*  
 \*reactor cvity gap  
 \*  
 4000000 rccvgap annulus  
 4000001 6  
 4000101 1.2132 6  
 4000201 1.2132 5  
 4000301 1.99 1  
 4000302 2.17 2  
 4000303 1.8 4  
 4000304 1.9 5  
 4000305 1.54 6  
 4000401 0.0 6  
 4000501 0.0 6  
 4000601 90.0 6  
 4000701 1.99 1  
 4000702 2.17 2  
 4000703 1.8 4  
 4000704 1.9 5  
 4000705 1.54 6  
 4000801 0.0 0.0 6  
 4000901 0.0 0.0 5  
 4001001 0000000 6  
 4001101 0000000 5  
 4001201 4 1.01325e+5 373.009 0.0 0.0 0.0 1  
 4001201 4 1.01325e+5 372.326 0.0 0.0 0.0 2  
 4001201 4 1.01325e+5 371.999 0.0 0.0 0.0 3  
 4001201 4 1.01325e+5 371.502 0.0 0.0 0.0 4  
 4001201 4 1.01325e+5 370.972 0.0 0.0 0.0 5  
 4001201 4 1.01325e+5 370.379 0.0 0.0 0.0 6  
 4001300 0  
 4001301 0.0 0.0 0.0 5  
 \*  
 \*  
 4050000 dwgapent valve  
 4050101 411010002 400010001 1.2132 0.0 0.0 0100  
 4050201 0 0.0 0.0 0.0  
 4050300 trpvlv  
 4050301 402  
 \*  
 4550000 upgapent valve  
 4550101 400060002 451030001 1.2132 0.0 0.0 0100  
 4550201 0 0.0 0.0 0.0  
 4550300 trpvlv  
 4550301 402  
 \*  
 \*reactor cavity bottom inner plenum  
 4100000 rcbiplem pipe  
 4100001 3  
 4100101 0.0 3  
 4100201 19.9662 1  
 4100202 10.3451 2  
 4100301 0.43 1  
 4100302 0.995 3  
 4100401 8.5855 1





```

2990001 4
2990101 1.1122 4
2990201 1.1122 3
2990301 0.675 4
2990401 0.0 4
2990501 0.0 4
2990601 90.0 4
2990701 0.675 4
2990801 0.0 0.0 4
2990901 0.0 0.0 3
2991001 0000000 4
2991101 0000000 3
2991201 2 1.0e+5 0.0 0.0 0.0 0.0 1
2991202 2 1.0e+5 0.0 0.0 0.0 0.0 2
2991203 4 1.0e+5 321.158 0.4 0.0 0.0 3
2991204 4 1.0e+5 321.158 0.0 0.0 0.0 4
2991300 0
2991301 0.0 0.0 0.0 3
*
*Timedependent Volume over regulation tank
2980000 tvort tmdpvov
2980101 3.1674e+2 1.0 0.0 0.0 90.0
2980102 1.0 0.0 0.0 00
2980200 4
2980201 -0.1 1.0e+5 307.158 0.0
2980202 0.0 1.0e+5 307.158 0.0
2980203 1.0e+10 1.0e+5 307.158 0.0
*
2970000 tvart sngljun
2970101 299040002 298010001 1.1122 0.0 0.0 0000
2970201 0 0.0 0.0 0.0
*
2960000 rtadct sngljun
2960101 250010002 299010001 3.1674e-2 0.0 0.0 0000
2960201 0 0.0 0.0 0.0
*
*cold downcoming tube
2500000 cdct pipe
2500001 9
2500101 3.1674e-2 9
2500201 3.1674e-2 8
2500301 5.155 1
2500302 6.69 2
2500303 1.54 3
2500304 1.9 4
2500305 1.8 6
2500306 2.17 7
2500307 1.99 8
2500308 1.955 9
2500401 0.0 9
2500501 0.0 9
2500601 0.0 1
2500602 -90.0 8
2500603 0.0 9
2500701 0.0 1
2500702 -6.69 2
2500703 -1.54 3
2500704 -1.9 4
2500705 -1.8 6
2500706 -2.17 7
2500707 -1.99 8
2500708 0.0 9
2500801 0.0 0.142 9
2500901 0.0 0.0 8
2501001 0000000 9
2501101 0000000 8
2501201 3 1.0e+5 321.158 0.0 0.0 0.0 9
2501300 0
2501301 0.0 0.0 0.0 8
*
*air cooling tube
2400000 aircltb pipe
2400001 10
2400101 3.77e-2 10
2400201 3.77e-2 9
2400301 2.818e-1 10
2400401 0.0 10
2400501 0.0 10
2400601 0.0 10

```

```

2400701 0.0 10
2400801 0.0 0.02 10
2400901 0.0 0.0 3
2400902 0.2 0.2 4
2400903 0.0 0.0 5
2400904 0.2 0.2 6
2400905 0.0 0.0 9
2401001 0000000 10
2401101 0000000 9
2401201 3 1.0e+5 320.158 0.0 0.0 0.0 10
2401300 0
2401301 0.0 0.0 0.0 9
*
2210000 inact sngljun
2210101 220040002 240010001 3.1674e-2 0.0 0.0
0100
2210201 0 0.0 0.0 0.0
*
2410000 outact sngljun
2410101 240100002 250010001 3.1674e-2 0.0 0.0 0100
2410201 0 0.0 0.0 0.0
*
=====
* chimney
* chimney components are numbered between 300-399
=====
*
*bottom atmosphere
3100000 btatm tmdpvov
3100101 1.0e+6 1.0e+6 0.0 0.0 0.0
3100102 0.0 0.0 0.0 00
3100200 4
3100201 -0.1 1.01325e+5 307.15 0.0
3100202 0.0 1.01325e+5 307.15 0.0
3100203 1.0e+10 1.01325e+5 307.15 0.0
*
3050000 btatmjun sngljun
3050101 310010002 300010001 9.0 0.0 0.0 0100
3050201 0 0.0 0.0 0.0
* chimney
3000000 chimney pipe
3000001 3
3000101 0.0 3
3000201 9.0 2
3000301 12.0 1
3000302 2.0 2
3000303 12.0 3
3000401 108.0 1
3000402 23.8341 2
3000403 108.0 3
3000501 0.0 3
3000601 9.0 3
3000701 12.0 1
3000702 2.0 2
3000703 12.0 3
3000801 0.0 2.0 1
3000802 0.0 2.3834 2
3000803 0.0 2.0 3
3000901 0.0 0.0 2
3001001 010 1
3001002 000 2
3001003 010 3
3001101 0100 2
3001201 4 1.01325e+5 307.15 0.0 0.0 0.0 3
3001300 0
3001301 0.0 0.0 0.0 2
*
3150000 tpatmjun sngljun
3150101 300030002 320010001 9.0 0.0 0.0 0100
3150201 0 0.0 0.0 0.0
*
*top atmosphere
3200000 topatm tmdpvov
3200101 1.0e+6 1.0e+6 0.0 0.0 0.0
3200102 0.0 0.0 0.0 000
3200200 4
3200201 -0.1 1.010325e+5 307.15 0.0
3200202 0.0 1.010325e+5 307.15 0.0
3200203 1.0e+10 1.010325e+5 307.15 0.0

```



heat structure					
10010000	28	3	2	1	1.9399
10010100	0	1			
10010101	2	1.94			
10010201	1	2			
10010301	0.0	2			
10010401	530.0	3			
10010501	0	0	1001	1	0.4 1
10010502	0	0	1002	1	0.4 2
10010503	0	0	1003	1	0.17 3
10010504	0	0	1004	1	0.4 4
10010505	0	0	1005	1	0.4 5
10010506	0	0	1006	1	0.4 6
10010507	0	0	1007	1	0.225 7
10010508	0	0	1008	1	0.35 8
10010509	0	0	1009	1	0.3 9
10010510	0	0	1010	1	0.325 10
10010511	0	0	1011	1	0.15 11
10010512	0	0	1012	1	0.15 12
10010513	0	0	1013	1	0.15 13
10010514	0	0	1014	1	0.15 14
10010515	0	0	1015	1	0.18 15
10010516	0	0	1016	1	0.18 16
10010517	0	0	1017	1	0.18 17
10010518	0	0	1018	1	0.18 18
10010519	0	0	1019	1	0.18 19
10010520	0	0	1020	1	0.18 20
10010521	0	0	1021	1	0.18 21
10010522	0	0	1022	1	0.18 22
10010523	0	0	1023	1	0.18 23
10010524	0	0	1024	1	0.18 24
10010525	0	0	1025	1	0.4 25
10010526	0	0	1026	1	0.8 26
10010527	0	0	1027	1	0.4 27
10010528	0	0	1028	1	0.3 28
10010601	110010000	0	1	1	0.4 1
10010602	110020000	0	1	1	0.4 2
10010603	110030000	0	1	1	0.17 3
10010604	110040000	0	1	1	0.4 4
10010605	110050000	0	1	1	0.4 5
10010606	110060000	0	1	1	0.4 6
10010607	110070000	0	1	1	0.225 7
10010608	110080000	0	1	1	0.35 8
10010609	110090000	0	1	1	0.3 9
10010610	110100000	0	1	1	0.325 10
10010611	110110000	0	1	1	0.15 11
10010612	110120000	0	1	1	0.15 12
10010613	110130000	0	1	1	0.15 13
10010614	110140000	0	1	1	0.15 14
10010615	110150000	0	1	1	0.18 15
10010616	110160000	0	1	1	0.18 16
10010617	110170000	0	1	1	0.18 17
10010618	110180000	0	1	1	0.18 18
10010619	110190000	0	1	1	0.18 19
10010620	110200000	0	1	1	0.18 20
10010621	110210000	0	1	1	0.18 21
10010622	110220000	0	1	1	0.18 22
10010623	110230000	0	1	1	0.18 23
10010624	110240000	0	1	1	0.18 24
10010625	110250000	0	1	1	0.4 25
10010626	110260000	0	1	1	0.8 26
10010627	110270000	0	1	1	0.4 27
10010628	110280000	0	1	1	0.3 28
10010701	0	0.0	0.0	0.0	0.0 28
10010801	3.82	20.0	20.0	0.0	0.0 0.0 1.0 28
10010901	3.88	20.0	20.0	0.0	0.0 0.0 1.0 28
reactor pressure vessel					
11000000	28	3	2	1	2.05
11000100	0	1			
11000101	2	2.12			

11000201	1	2			
11000301	0.0	2			
11000401	520.0	3			
11000501	110010000	0	1	1	0.4 1
11000502	110020000	0	1	1	0.4 2
11000503	110030000	0	1	1	0.17 3
11000504	110040000	0	1	1	0.4 4
11000505	110050000	0	1	1	0.4 5
11000506	110060000	0	1	1	0.4 6
11000507	110070000	0	1	1	0.225 7
11000508	110080000	0	1	1	0.35 8
11000509	110090000	0	1	1	0.3 9
11000510	110100000	0	1	1	0.325 10
11000511	110110000	0	1	1	0.15 11
11000512	110120000	0	1	1	0.15 12
11000513	110130000	0	1	1	0.15 13
11000514	110140000	0	1	1	0.15 14
11000515	110150000	0	1	1	0.18 15
11000516	110160000	0	1	1	0.18 16
11000517	110170000	0	1	1	0.18 17
11000518	110180000	0	1	1	0.18 18
11000519	110190000	0	1	1	0.18 19
11000520	110200000	0	1	1	0.18 20
11000521	110210000	0	1	1	0.18 21
11000522	110220000	0	1	1	0.18 22
11000523	110230000	0	1	1	0.18 23
11000524	110240000	0	1	1	0.18 24
11000525	110250000	0	1	1	0.4 25
11000526	110260000	0	1	1	0.8 26
11000527	110270000	0	1	1	0.4 27
11000528	110280000	0	1	1	0.3 28
11000601	430010000	0	1	1	0.4 1
11000602	430020000	0	1	1	0.4 2
11000603	430030000	0	1	1	0.17 3
11000604	430040000	0	1	1	0.4 4
11000605	430050000	0	1	1	0.4 5
11000606	430060000	0	1	1	0.4 6
11000607	430070000	0	1	1	0.225 7
11000608	430080000	0	1	1	0.35 8
11000609	430090000	0	1	1	0.3 9
11000610	430100000	0	1	1	0.325 10
11000611	430110000	0	1	1	0.15 11
11000612	430120000	0	1	1	0.15 12
11000613	430130000	0	1	1	0.15 13
11000614	430140000	0	1	1	0.15 14
11000615	430150000	0	1	1	0.18 15
11000616	430160000	0	1	1	0.18 16
11000617	430170000	0	1	1	0.18 17
11000618	430180000	0	1	1	0.18 18
11000619	430190000	0	1	1	0.18 19
11000620	430200000	0	1	1	0.18 20
11000621	430210000	0	1	1	0.18 21
11000622	430220000	0	1	1	0.18 22
11000623	430230000	0	1	1	0.18 23
11000624	430240000	0	1	1	0.18 24
11000625	430250000	0	1	1	0.4 25
11000626	430260000	0	1	1	0.8 26
11000627	430270000	0	1	1	0.4 27
11000628	430280000	0	1	1	0.3 28
11000701	0	0.0	0.0	0.0	0.0 28
11000801	4.1	20.0	20.0	0.0	0.0 0.0 1.0 28
11000901	4.24	20.0	20.0	0.0	0.0 0.0 1.0 28
water cooling tube					
12001000	32	3	2	1	0.016 401 0 2
12001100	0	1			
12001101	2	0.021			
12001201	1	2			
12001301	0.0	2			
12001401	400.0	3			
12001501	200010000	0	1	1	49.75 1
12001502	200020000	0	1	1	49.75 2
12001503	200030000	0	1	1	20.0 3
12001504	200040000	0	1	1	20.0 4
12001505	200050000	0	1	1	8.5 5
12001506	200060000	0	1	1	20.0 6
12001507	200070000	0	1	1	20.0 7





12003518	200180000	0	1	1	9.0	18		
12003519	200190000	0	1	1	9.0	19		
12003520	200200000	0	1	1	9.0	20		
12003521	200210000	0	1	1	9.0	21		
12003522	200220000	0	1	1	9.0	22		
12003523	200230000	0	1	1	9.0	23		
12003524	200240000	0	1	1	9.0	24		
12003525	200250000	0	1	1	9.0	25		
12003526	200260000	0	1	1	9.0	26		
12003527	200270000	0	1	1	20.0	27		
12003528	200280000	0	1	1	40.0	28		
12003529	200290000	0	1	1	20.0	29		
12003530	200300000	0	1	1	15.0	30		
12003531	200310000	0	1	1	38.5	31		
12003532	200320000	0	1	1	38.5	32		
12003601	400010000	0	1	1	49.75	1		
12003602	400010000	0	1	1	49.75	2		
12003603	400020000	0	1	1	20.0	3		
12003604	400020000	0	1	1	20.0	4		
12003605	400020000	0	1	1	8.5	5		
12003606	400020000	0	1	1	20.0	6		
12003607	400020000	0	1	1	20.0	7		
12003608	400020000	0	1	1	20.0	8		
12003609	400030000	0	1	1	11.25	9		
12003610	400030000	0	1	1	17.5	10		
12003611	400030000	0	1	1	15.0	11		
12003612	400030000	0	1	1	16.25	12		
12003613	400030000	0	1	1	7.5	13		
12003614	400030000	0	1	1	7.5	14		
12003615	400030000	0	1	1	7.5	15		
12003616	400030000	0	1	1	7.5	16		
12003617	400040000	0	1	1	9.0	17		
12003618	400040000	0	1	1	9.0	18		
12003619	400040000	0	1	1	9.0	19		
12003620	400040000	0	1	1	9.0	20		
12003621	400040000	0	1	1	9.0	21		
12003622	400040000	0	1	1	9.0	22		
12003623	400040000	0	1	1	9.0	23		
12003624	400040000	0	1	1	9.0	24		
12003625	400040000	0	1	1	9.0	25		
12003626	400040000	0	1	1	9.0	26		
12003627	400050000	0	1	1	20.0	27		
12003628	400050000	0	1	1	40.0	28		
12003629	400050000	0	1	1	20.0	29		
12003630	400050000	0	1	1	15.0	30		
12003631	400060000	0	1	1	38.5	31		
12003632	400060000	0	1	1	38.5	32		
12003701	0	0.0	0.0	0.0	32			
12003801	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	1.0	32	
12003901	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	32
* reactor cavity wall ( thermal shield and concrete )								
14001000	6	5	2	1	3.1			
14001100	0	1						
14001101	2	3.2						
14001102	2	5.5						
14001201	4	2						
14001202	3	4						
14001301	0.0	4						
14001401	307.0	5						
14001501	400010000	0	1	1	1.99	1		
14001502	400020000	0	1	1	2.17	2		
14001503	400030000	0	1	1	1.8	3		
14001504	400040000	0	1	1	1.8	4		
14001505	400050000	0	1	1	1.9	5		
14001506	400060000	0	1	1	1.54	6		
14001601	0	0	0	1	1.99	1		
14001602	0	0	0	1	2.17	2		
14001603	0	0	0	1	1.8	3		
14001604	0	0	0	1	1.8	4		
14001605	0	0	0	1	1.9	5		
14001606	0	0	0	1	1.54	6		
14001701	0	0.0	0.0	0.0	6			
14001801	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	6
14001901	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	6

*=====									
* upper plenum water cooling tube									
*=====									
12101000	1	3	2	1	0.071				
12101100	0	1							
12101101	2	0.076							
12101201	1	2							
12101301	0.0	2							
12101401	400.0	3							
12101501	210010000	0	1	1	37.3096	1			
12101601	451030000	0	1	1	37.3096	1			
12101701	0	0.0	0.0	0.0	1				
12101801	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1	
12101901	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1	
*=====									
* lower plenum water cooling tube									
*=====									
12701000	1	3	2	1	0.071				
12701100	0	1							
12701101	2	0.076							
12701201	1	2							
12701301	0.0	2							
12701401	400.0	3							
12701501	270010000	0	1	1	37.3096	1			
12701601	411010000	0	1	1	37.3096	1			
12701701	0	0.0	0.0	0.0	1				
12701801	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1	
12701901	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1	
*=====									
* reactor pressure vessel head closure									
*=====									
11201000	3	3	3	1	2.1				
11201100	0	1							
11201101	2	2.2							
11201201	1	2							
11201301	0.0	2							
11201401	400.0	3							
11201501	120010000	0	1	1	0.175	1			
11201502	120010000	0	1	1	0.175	2			
11201503	120010000	0	1	1	0.0114	3			
11201601	450010000	0	1	1	0.175	1			
11201602	450020000	0	1	1	0.175	2			
11201603	450030000	0	1	1	0.0114	3			
11201701	0	0.0	0.0	0.0	3				
11201801	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3	
11201901	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3	
*=====									
* reactor pressure vessel bottom closure									
*=====									
11101000	2	3	3	1	2.1				
11101100	0	1							
11101101	2	2.2							
11101201	1	2							
11101301	0.0	2							
11101401	400.0	3							
11101501	100010000	0	1	1	0.2119	1			
11101502	100010000	0	1	1	0.233	2			
11101601	410020000	0	1	1	0.2119	1			
11101602	410030000	0	1	1	0.233	2			
11101701	0	0.0	0.0	0.0	2				
11101801	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2	
11101901	0.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2	
*=====									
* air cooler tube									
*=====									
12401000	10	3	2	1	0.01				
12401100	0	1							
12401101	2	0.0125							
12401201	1	2							
12401301	0.0	2							
12401401	307.0	3							
12401501	240010000	10000	1	1	33.816	10			
12401601	300020000	0	134	1	33.816	10			
12401701	0	0.0	0.0	0.0	10				

12401800 1  
 12401801 0.02 20.0 20.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.02 1.1 1.0 10  
 12401900 1  
 12401901 0.025 20.0 20.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.2818 1.1 170.0 10  
 \*

=====

heat structure thermal properties

=====

composition type and data form

=====

20100100 tbl/fctn 1 1 \* stainless steel 387-11, 516-70  
 \*20100200 tbl/fctn 1 1 \* water cooling wall gap  
 20100300 tbl/fctn 1 1 \* concrete  
 20100400 tbl/fctn 1 1 \* thermal shield panel  
 \*20100500 tbl/fctn 1 1 \* stainless steel  
 \*

=====

thermal conductivity data (W/m/k)  
 and  
 volumetric heat capacity data (j/m\*\*3-k) versus temperature

=====

20100101 37.0  
 20100151 3.68e+6  
 \*  
 \*20100201 273.15 0.0  
 \*20100202 293.15 3.724e-1  
 \*20100203 313.15 6.113e-1  
 \*20100204 333.15 8.169  
 \*20100205 353.15 1.003  
 \*20100206 373.15 1.177  
 \*20100207 393.15 1.341  
 \*20100208 413.15 1.497  
 \*20100209 433.15 1.647  
 \*20100210 453.15 1.792  
 \*20100211 473.15 1.932  
 \*20100212 493.15 2.068  
 \*20100213 513.15 2.201  
 \*20100214 533.15 2.331  
 \*20100215 553.15 2.458  
 \*20100216 573.15 2.582  
 \*20100217 593.15 2.704  
 \*20100218 613.15 2.823  
 \*20100219 633.15 2.941  
 \*20100220 653.15 3.057  
 \*20100221 673.15 3.171  
 \*20100222 693.15 3.284  
 \*20100223 713.15 3.395  
 \*20100224 733.15 3.505  
 \*20100225 753.15 3.613  
 \*20100226 773.15 3.720  
 \*20100251 273.15 1244.67  
 \*20100252 293.15 1159.76  
 \*20100253 313.15 1085.69  
 \*20100254 333.15 1020.51  
 \*20100255 353.15 962.71  
 \*20100256 373.15 911.11  
 \*20100257 393.15 864.77  
 \*20100258 413.15 822.90  
 \*20100259 433.15 784.91  
 \*20100260 453.15 750.26  
 \*20100261 473.15 718.55  
 \*20100262 493.15 689.41  
 \*20100263 513.15 662.54  
 \*20100264 533.15 637.69  
 \*20100265 553.15 614.63  
 \*20100266 573.15 593.18  
 \*20100267 593.15 573.18  
 \*20100268 613.15 554.49  
 \*20100269 633.15 536.97  
 \*20100270 653.15 520.53  
 \*20100271 673.15 505.06  
 \*20100272 693.15 490.49  
 \*20100273 713.15 476.73  
 \*20100274 733.15 463.73  
 \*20100275 753.15 451.41  
 \*20100276 773.15 439.74  
 \*  
 \*

20100301 7.803  
 20100351 1.76e+6  
 \*  
 20100401 0.2  
 20100451 1.0e+2  
 \*

=====

general table data

=====

20200100 temp  
 20200101 -1.0 0.0  
 20200102 0.0 399.15  
 20200103 1.0+10 399.15  
 20200200 temp  
 20200201 -1.0 0.0  
 20200202 0.0 424.15  
 20200203 1.0+10 424.15  
 20200300 temp  
 20200301 -1.0 0.0  
 20200302 0.0 434.15  
 20200303 1.0+10 434.15  
 20200400 temp  
 20200401 -1.0 0.0  
 20200402 0.0 451.15  
 20200403 1.0+10 451.15  
 20200500 temp  
 20200501 -1.0 0.0  
 20200502 0.0 488.15  
 20200503 1.0+10 488.15  
 20200600 temp  
 20200601 -1.0 0.0  
 20200602 0.0 536.15  
 20200603 1.0+10 536.15  
 20200700 temp  
 20200701 -1.0 0.0  
 20200702 0.0 571.15  
 20200703 1.0+10 571.15  
 20200800 temp  
 20200801 -1.0 0.0  
 20200802 0.0 595.15  
 20200803 1.0+10 595.15  
 20200900 temp  
 20200901 -1.0 0.0  
 20200902 0.0 621.15  
 20200903 1.0+10 621.15  
 20201000 temp  
 20201001 -1.0 0.0  
 20201002 0.0 645.15  
 20201003 1.0+10 645.15  
 20201100 temp  
 20201101 -1.0 0.0  
 20201102 0.0 665.15  
 20201103 1.0+10 665.15  
 20201200 temp  
 20201201 -1.0 0.0  
 20201202 0.0 675.15  
 20201203 1.0+10 675.15  
 20201300 temp  
 20201301 -1.0 0.0  
 20201302 0.0 684.15  
 20201303 1.0+10 684.15  
 20201400 temp  
 20201401 -1.0 0.0  
 20201402 0.0 692.15  
 20201403 1.0+10 692.15  
 20201500 temp  
 20201501 -1.0 0.0  
 20201502 0.0 701.15  
 20201503 1.0+10 701.15  
 20201600 temp  
 20201601 -1.0 0.0  
 20201602 0.0 708.15  
 20201603 1.0+10 708.15  
 20201700 temp  
 20201701 -1.0 0.0  
 20201702 0.0 714.15  
 20201703 1.0+10 714.15  
 20201800 temp



20201801	-1.0	0.0
20201802	0.0	717.15
20201803	1.0+10	717.15
20201900	temp	
20201901	-1.0	0.0
20201902	0.0	719.15
20201903	1.0+10	719.15
20202000	temp	
20202001	-1.0	0.0
20202002	0.0	718.15
20202003	1.0+10	718.15
20202100	temp	
20202101	-1.0	0.0
20202102	0.0	713.15
20202103	1.0+10	713.15
20202200	temp	
20202201	-1.0	0.0
20202202	0.0	706.15
20202203	1.0+10	706.15
20202300	temp	
20202301	-1.0	0.0
20202302	0.0	699.15

20202303	1.0+10	699.15
20202400	temp	
20202401	-1.0	0.0
20202402	0.0	691.15
20202403	1.0+10	691.15
20202500	temp	
20202501	-1.0	0.0
20202502	0.0	675.15
20202503	1.0+10	675.15
20202600	temp	
20202601	-1.0	0.0
20202602	0.0	632.15
20202603	1.0+10	632.15
20202700	temp	
20202701	-1.0	0.0
20202702	0.0	577.15
20202703	1.0+10	577.15
20202800	temp	
20202801	-1.0	0.0
20202802	0.0	554.15
20202803	1.0+10	554.15
*		

\*

\*Radiation heat transfer 입력라인은 분량이 많은 관계로 본 논문의 부록부분에서 생략하였습니다.

\*

.End of Input



## 감사의 글

본 학위논문을 마무리하는 과정에서 지난 대학원 생활을 돌이켜보면 피 같은 시간이었음에도 불구하고 생활하는 내내 최선을 다하지 못한 것 같아 한없이 제 자신이 부끄러워집니다. 항상 그렇듯이 후회하고 반성하고 또다시 희망을 갖는 그런 시기가 바로 지금이 아닌가 생각해 봅니다. 이제 이 논문의 끝맺음으로 지난 시간 저를 위해 사랑으로 지켜봐 주신 모든 분들에게 감사의 마음을 전하며 새로운 생활을 시작하려고 합니다.

학부 4학년 말 방황하는 저를 거두어 이렇게 짧게나마 연구의 길을 경험하게 해 주시고 삶을 살아가는 바른 태도에 대해 본인의 행동과 말씀으로 가르침을 주셨던 정범진 지도교수님께 감사와 존경의 마음을 전합니다. 그리고 심사위원으로서 논문의 완성도를 높이기 위해 조언해 주신 이현주 교수님과 박재우 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다. 더불어 학부 및 대학원 생활 동안 가르침을 주었던 에너지공학과 교수님들께도 감사를 드립니다.

원자력안전실험실에서 2년간 소중한 시간을 함께 보내며 저를 잘 따라준 후배 두혁이, 상혁이 그리고 덕원이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 함께 강의를 받았으며 도움을 주었던 고영주 선배님을 비롯한 대학원 선배님들, 코드를 배우기 위해 방학기간동안 낯선 대전생활에서 많은 격려와 조언을 주었던 안민수, 홍상범, 김계홍 선배님에게도 감사의 마음을 전합니다. 또한 본 논문을 완성하기까지 연구와 관련하여 직접적으로 많은 도움을 주신 이원재 박사님을 비롯한 한국원자력연구소 열수력안전연구부 MARS 코드개발팀에서 연구하시는 연구원들께도 진심으로 감사드립니다.

마지막으로 누구보다도 지금의 제가 있게끔 해주신 사랑하는 어머니와 바른 생각, 바른 삶을 강조하며 아버지의 책임까지 다했던 형님에게 감사의 마음을 전합니다. 그리고 늘 내 곁에 함께 있어준 소중한 아내 정민이에게도 고맙다는 말과 함께 사랑한다는 말을 전합니다.