

중소형 일체형원자로에 사용되는 자기가압기 크기결정 및 성능해석

김 신*

Sizing and Performance Analysis of the Self-Pressurizer for Small Integral Reactors

Sin Kim*

ABSTRACT

Many small integral reactors adopt self-pressurizers which do not use heaters nor sprays for passive operation. In this study, working mechanisms of steam-, mixture-, and nitrogen-type self-pressurizers are compared and the sizes of the primary systems that can accomodate the operating conditions are determined for each types of self-pressurizer. Also, the reactor coolant system conditions after thermal load transients are calculated and the performances of each type self-pressurizers are analyzed.

Key words : Integral reactor, Self-pressurizer, Sizing, Performance analysis

1. 서 론

피동성 또는 고유안전성을 갖는 중소형 원자로의 개발은 현재 세계 원자력 계가 추구하고 있는 가장 중요한 과제라 할 수 있다. 1979년 미국 TMI 원전 사고와 1986년 구 소련의 체르노빌 원전 사고 이후에 원자력 개발은 새로운 국면을 맞게 되었으며, 발전의 안전성과 이에 대한 대중의 수용이 큰 관심사로 부각 되기에 이르렀다. 이 두 사고로 인해 원자력 발전의 안전성에 대한 대중의 우려가 증폭되었으며, 원전의 안전설비는 더욱 복잡해지고 인·허가도 불안정하게 되었다. 따라서 세계 원자력 계는 사고 발생

물을 현저히 줄이면서도 경제성이 향상된 새로운 개념의 원자로 개발에 많은 노력을 기울이게 되었다. 이러한 노력으로 현재 상용로와 같은 대용량 원자로의 개량화에 대한 연구가 진행중이며, 이와 함께 피동성을 부각시킨 중소형 원자로의 개발도 병행하여 활발히 추진되고 있다. 중소형 원자로는 안전계통의 신뢰성을 증대시키고 노심 손상 확률을 대폭 감소시킬 수 있는 중력, 자연대류, 기체압력 등의 자연현상을 이용한 피동적 안전개념의 접목이 용이하며, 계통의 단순화, 모듈화, 표준화 및 건설기간의 단축 등의 추구를 통해 경제성을 향상시킬 수 있는 가능성이 많다는 점에서 주목을 받고 있다. 특히 담수화, 지역난방, 선박 추진용과 같이 원자력 에너지의 활용을 다변화할 수 있다는 측면에서도 매우 긍정적인 평가를 받고 있다. 대규모 전기 생산을 위한 대용량 상용로

* 제주대학교 에너지공학과

Dept. of Nuclear and Energy Eng., Cheju Nat'l Univ

에서는 원자로, 증기발생기, 가압기 및 원자로 냉각재 펌프 등의 일체계통 주기가 배관에 의하여 연결된 분리형 방식을 채택하고 있는 반면에, 앞서 언급한 중소형 원자로는 계통의 안전성과 신뢰성을 부각시키고 공간확보에 유리하도록 일체계통 주기를 별도의 압력용기 내에 모두 포함시키는 일체형 원자로가 대부분이다.^{1,2)}

대용량의 상용 원자로 가압기에서 부피 및 압력 제어를 위해 설치한 가열기 및 살수기를 배제하여 피동기능을 극대화함으로써 운전을 단순화하고 유지보수를 최소화하기 위해 중소형 일체형 원자로에서는 흔히 자기가압기를 채용하고 있다. 이와 같은 자기가압기는 원자로의 단위 출력 당 부피가 크기 때문에 대용량 원자로에서는 도입이 불가능하지만 중소형에서는 가능하다. 자기가압기로는 순수증기를 사용하는 방식과 증기에 가압질소를 혼합하여 사용하는 방식, 그리고 가압질소만을 사용하는 방식 등 세 가지 방식이 있다.^{1,2)} 본 연구에서는 이상의 세 종류의 가압기에 대해 각각의 작동 원리와 필요한 크기, 그리고 과도 상태 대처 능력 등을 비교 검토해 보고자 한다.

II. 자기가압기의 종류 및 작동 원리

자가가압기는 가압 매체의 종류에 따라 포화증기를 이용한 순수증기 방식, 포화증기에 비응축성 기체를 가압하여 사용하는 혼합기체 방식, 그리고 비응축성 기체만으로 가압하는 방식 등 세 가지로 구분할 수 있다. 비응축성 기체로는 흔히 질소가 이용되며, NHR-5 등의 운전 경험에 의하면 질소는 냉각재의 화학적 조성에 거의 문제를 일으키지 않는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} 표 1에 현재 개념설계 혹은 실제 중소형 원자로에서 사용되고 있는 자기가압기의 사용 예를 나타내었다.

2.1. 순수증기 방식

순수증기 자기가압기는 원자로 압력용기 상부를 포화증기로 채우는 방식을 채택함으로써, 원자로 냉각재의 온도 변화에 따라 포화 증기압이 변화하는 것을 이용하여 원자로 계통이 운전 범위에 걸쳐 적절한

Table 1 Type of Self-pressurizer in Various Integral Reactors

Reactor	Nation	Type
AST-150	Russia	Mixture
AST-500	Russia	Mixture
ABV	Russia	Nitrogen
ABV-6	Russia	Nitrogen
NHR-5	China	Mixture
NHR-200	China	Mixture
CAREM	Argentine	Steam
SPWR	Japan	Steam

압력 상태를 유지할 수 있도록 해준다. 가압기 내 증기는 원자로 상부의 냉각재와 접하므로 이 둘은 열적으로 평형 상태를 유지한다. 원자로 계통의 압력은 고온부 냉각재 온도에 해당하는 포화증기압을 유지하며, 노심에서는 다소간의 비등이 허용된다. 원자로심을 통과하면서 온도가 증가된 냉각재는 압력 손실을 경험하게 되므로 노심 상부에서는 상당량의 기포가 발생한다. 기포는 상승하여 가압기에 포집되어 가압기 내 증기량을 증가시키지만, 체적의 제한을 받게된 가압기 내 증기는 다시 응축되어 냉각재로 회수된다. 그리고 실제의 경우는 가압기 표면을 통한 열손실이 지속적으로 일어나므로 증기 중 일부는 이로 인해 응축되는 과정을 겪는다. 증기 발생량이 응축량에 비해 크면 원자로 계통의 압력이 증가하며, 반대의 경우에는 압력이 감소하게 된다. 이러한 과정을 통해 계통의 열역학적 상태 변화에 따라 가압기 압력의 변동이 발생하여 계통은 적절한 압력 상태를 유지하게 된다.

이 방식의 자기가압기는 설계 및 운전이 매우 단순하다는 장점이 있으나 노심에서의 비등이 허용되므로 노심 열수력 설계 시 이에 대한 고려가 필요하며, 열유속이 높은 경우에는 임계열유속에 도달할 가능성이 많으므로 열유속이 매우 낮은 경우에만 적용이 가능하다는 단점이 있다.

2.2. 혼합기체 방식

포화증기 및 가압질소를 이용한 혼합기체 방식의 자기가압기는 순수증기 방식의 자기가압기의 단점인 노심 비등 가능성을 배제하기 위하여 가압기 내에 가

가압질을 추가한 형태의 가압기이다. 즉, 가압기 압력은 포화증기의 압력과 질소기체 분압의 합이 되므로, 질소기체의 분압만큼 원자로 계통을 가압하여 노심에서의 비등을 방지할 수 있다. 원자로심을 통과한 냉각재는 비등이 아닌 증발 과정을 통해 원자로 압력용기 상부에 위치한 가압기에 증기를 공급하며, 가압기의 과압 또는 표면을 통한 열손실에 의해 응축된 증기가 냉각재로 회수된다.

포화증기만을 이용한 가압기는 냉각재의 비등이 허용되므로 원자로의 상태 변화에 따라 증기 생성량의 변화가 빠른 반면에, 혼합기체 방식의 가압기는 증기의 생성이 단지 증발에 의하므로, 과도 상태에 대응해 가압기가 반응하는 시간이 상대적으로 길다.

혼합증기 방식의 가압기는 질소기체를 사용하기 때문에 이로 인한 문제를 야기시킬 수 있다. 질소기체는 소량이지만 냉각재에 용해되므로 설계 시에 이 양을 고려하지 않으면 질소기체의 부족으로 가압기가 원자로 계통의 압력 변동을 수용할 수 없게 된다. 질소기체의 용해도는 온도와 압력의 함수이므로, 온도 및 압력의 변화는 질소기체를 추가로 용해시키거나 용해된 질소가 기체 상태로 빠져 나온다. 따라서, 앞에서 언급했듯이 질소의 용해량을 고려하지 않으면 가압기의 압력 변화를 제대로 예측할 수 없게 된다. 또한, 열수력학적인 측면에서 원자로 압력용기 내에서 생성된 질소기체는 열전달을 방해하는 역할을 하게 된다. 특히, 원자로의 압력이 급격히 감소하는 과도 상태 내지는 사고 시에 질소기체의 유입 및 생성은 열전달에 절대적인 영향을 미쳐 노심의 안전성에 중요한 영향을 미칠 가능성이 있으므로 이에 대한 해석과 대비책이 요구된다는 단점을 갖고 있다.

2.3. 가압질소 방식

가압질소만을 가압 매체로 사용하는 방식의 자기 가압기는 가압기를 원자로 압력용기 내에 설치되는 것이 아니라 기존의 상용로에서와 같이 외부에 별도로 설치된다. 원자로 압력용기에서 비등이 일어나지 않도록 원자로 계통은 과냉 상태로 유지되며, 외부에 설치된 가압기는 단열을 하지 않고 가능한 한 상온에 가까운 온도가 되도록 하여 가압기에 존재하는 냉각재 역시 과냉 상태로 유지시킨다. 가압기 내 냉각재

의 온도가 낮으므로 포화 압력은 거의 무시되며 가압기 압력은 질소기체의 압력으로 간주할 수 있다. 이 방식에서는 냉각재가 열팽창 혹은 열수축에 의해 변화하는 부피를 가압기가 흡수하여 압력 변동을 완충한다. 따라서, 가압질소 방식 자기가압기의 압력 대응은 열전달 과정을 거치는 순수증기 및 혼합기체 자기가압기와는 달리 오직 냉각재의 부피 변화에만 의존하므로 반응이 상대적으로 빠르다는 장점이 있다. 그러나 압력용기를 통과하는 배관이 존재하므로 LOCA 발생 가능성을 배제할 수 없다는 점과 부피 변화에 따른 압력 변동의 폭을 줄이기 위해서는 매우 큰 용량의 가압질소 탱크가 추가로 필요하다는 점을 단점으로 꼽을 수 있다.

III. 자기가압기 유형별 크기 결정 및 정상 운전 상태 해석

가압기가 압력용기 내에 위치하는 일체형 원자로 계통의 설계에 있어서 가압기의 크기 결정은 압력용기 자체의 크기 결정과 기타 주요 기기의 배치에 직접적으로 영향을 미치므로, 개념 설계 단계부터 계통의 부피 및 압력 변동을 적절하게 수용할 수 있는 가압기의 크기 결정 작업이 병행되어야 한다.⁽³⁾ 여기에서는 몇 가지 가정을 토대로 간단한 자기가압기 해석 모형을 개발하고 정상운전 시 열역학적 상태 변화를 해석하여 계통이 겪는 부피 및 압력 변동을 수용할 수 있는 가압기의 크기를 결정하였으며, 자기가압기의 유형별 특성을 비교하였다.

3.1. 가정

해석의 편의를 위해 일체형 원자로의 압력용기를 하나의 검사체적으로 간주하였으며, 냉각재 및 가압기의 열역학적 상태 변화만을 고려하고 동력학적 거동은 해석하지 않았다. 냉각재의 온도를 하나의 온도로 대표하였는데, 사실상 관심의 대상이 되는 온도 범위에서 냉각재의 부피 변화율은 거의 선형적이므로 냉각재 전체가 하나의 온도를 갖는다는 가정은 합리적이다. 증기를 포함하는 순수증기 및 혼합기체 방식의 자기가압기의 경우에 증기는 포화상태에 있다고

보았으며, 혼합기체 및 가압질소 방식의 자기가압기에서 질소는 이상기체 상태방정식을 따르는 것으로 가정하였다. 혼합기체 방식에서는 증기와 질소가 가압질소 방식에서는 질소와 과냉 냉각재가 동일한 온도를 갖는다고 가정하여 해석하였다. 그리고, 질소의 용해는 고려하지 않았다.

3.2. 지배방정식

압력용기 내 냉각재 및 질소기체 각각의 질량은 열역학적 상태 변화를 경험하는 과정에서 보존되어야 한다. 따라서 하첨자 i 가 임의의 상태 1, 2를 나타낸다고 할 때 질량은 다음의 관계식을 만족해야 한다:

$$M_{WTRi} + M_{STMi} + M_{SRGi} = M, \quad (1a)$$

$$M_{NITi} = M_{GAS}. \quad (1b)$$

여기에서 하첨자 WTR와 STM는 압력용기 내 액체 상태의 물과 기체상태의 증기를 나타내며, SRG는 외부 가압기로의 surge량을 나타낸다. 그리고 NIT는 질소기체를 나타내고, GAS는 비용축성 기체 전체를 나타낸다. 에너지 보존으로부터

$$\begin{aligned} & (M_{WTR2}u_{WTR2} + M_{STM2}u_{STM2} + \\ & M_{SRG2}u_{SRG2} + M_{NIT2}u_{NIT2}) \\ & - (M_{WTR1}u_{WTR1} + M_{STM1}u_{STM1} + M_{SRG1}u_{SRG1} + \\ & M_{NIT1}u_{NIT1}) = Q_{SOURCE} - Q_{LOSS} \end{aligned} \quad (2)$$

를 얻는다. 여기에서, Q_{SOURCE} 와 Q_{LOSS} 는 각각 상

태 변화 기간 동안 노심에서 생성되고 증기발생기를 통해 제거된 총 에너지를 나타낸다.

한편, 압력용기의 부피는 변화하지 않아야 하므로 다음의 제약조건이 추가된다:

$$M_{WTRi}u_{WTRi} + M_{STMi}u_{STMi} + M_{SRGi}u_{SRGi} = V, \quad (3a)$$

$$M_{NITi}u_{NITi} = M_{STMi}u_{STMi}. \quad (3b)$$

그리고, 이상의 열역학적 변수들은 상태방정식을 만족해야 한다.

계통의 압력 P_{SYS} 는 가압기의 압력에 해당하는데, 가압기 방식에 따라 가압 매체로 증기 및 질소가 단독 혹은 혼합되어 사용되므로 다음과 같이 결정된다. 이때, 질소가 사용되지 않는다면 $P_{NIT} = 0$ 이다:

$$P_{SYS} = P_{STMi} + P_{NITi}. \quad (4)$$

3.3. 해석

3.3.1 정상운전 상태

이상의 지배방정식을 이용하여 자기가압기의 크기를 각 유형별로 결정하였다. 순수증기 및 혼합기체 방식의 자기가압기에 대해서는 원자로 상태가 고온영 출력(HZP : Hot Zero Power)에서 고온 전 출력(HFP : Hot Full Power)로 천이 할 때 계통의 열역학적 상태 변화를 수용할 수 있는 필요한 가압기의 크기를 구하였다.

그러나, 가압질소 방식의 경우는 위의 두 방식과는 다르게 접근하여야 한다. 가압질소 자기가압기는 원

Table 2 Operating Conditions Used in the Calculation

Coolant temperature control model	T_{avg} control
Mass of primary coolant (kg)	20000
Core outlet temperature at 100% power (°C)	300
Core inlet temperature at 100% power (°C)	260
Operating pressure at 100% power (MPa)	15 (*8.592)
Operating temperature of nitrogen self-pressurizer (°C)	80
Surge amount of nitrogen self-pressurizer at CZP (kg)	0

(*) The operating pressure-will be the saturation pressure at 300°C for steam-type self-pressurizer. .

자로 압력용기 외부에 별도로 설치되어 상온 근처의 온도에서 운전되며, 가압기 내부에는 가압질소 뿐만 아니라 원자로 계통으로부터 밀려들어 온 냉각재가 존재하기 때문에 운전 온도와 초기 냉각재 surge 양을 미리 결정해 주어야 한다. 여기에서는 출력 운전 시 가압기 운전 온도를 80°C로 가정하였으며, 저온영 출력(CZP : Cold Zero Power) 시 가압기 내 냉각재 surge 양은 없는 것으로 가정하였다. 그리고 냉각재의 온도를 하나의 온도로 가정하기 때문에 HZP 상태에서 HFP 상태로 천이 할 때 냉각재 부피 변화가 없으므로 초기 상태를 HZP 상태로 설정해서는 가압기 크기에 대한 정보를 얻을 수 없다. 따라서, 가압질소 방식 가압기에 대해서는 CZP에서 HFP로 천이 할 때의 상태 변화를 수용할 수 있는 가압기의 크기를 계산하였다. 계산에 사용된 운전 조건은 표 2와 같다.

이상의 운전 조건을 바탕으로 지배방정식을 만족하는 원자로의 열역학적 상태를 각 가압 방식별로 계산하여, 원자로 계통이 만족하여야 하는 부피와 필요

한 질소량을 구하였다. 순수증기 및 혼합기체 방식을 사용하는 경우에는 원자로 압력용기 내에 가압기가 위치하므로 가압기 부피는 원자로 계통 부피에서 가압기를 제외한 모든 기기가 포함하는 냉각재 부피와 냉각재 유로 등이 차지하는 부피를 제외하면 얻을 수 있는데, 단, 증기 또는 질소가 갖는 부피 이상이 되도록 하면 된다. 그리고 가압질소 방식의 경우는 가압기로의 냉각재 초기 surge 양을 가정하여 가압기의 크기를 결정하였다. 계산 결과는 표 3. 4에 정리하였다.

표 2의 운전조건을 가정하여 계산한 결과에 의하면, 원자로 계통의 총 부피는 순수증기 방식이 30.20m³로 혼합기체 방식 29.45m³에 비해 약간 크게 나타났으며, 가압질소 방식은 순수증기 방식과 비교할 때 거의 20% 정도 작은 24.87m³를 얻었다. 그리고 가압기의 최소 부피는 순수증기, 혼합기체, 가압질소 방식 각각에 대해 3.918, 3.479, 4.839m³를 얻었다. 한편, 원자로 계통이 만족해야 하는 열역학적 상태를 유지하는데 필요한 질소기체 양은 혼합기체 방식의 경우가 131.0kg, 가압질소 방식의 경우가 5.561kg으로 나타났다.

Table 3 Reactor Operating Conditions

Pressurizer Type	RCS variables	Condition		
		CZP	HZP	HFP
Steam	Core temperature (°C)		280	280
	Pressurizer temperature(°C)	-	280	300
	System pressure (MPa)		6.420	8.592
Mixture	Core temperature (°C)		280	280
	Pressurizer temperature(°C)	-	280	300
	System pressure (MPa)		12.93	15.00
Nitrogen	Core temperature (°C)	20	280	280
	Pressurizer temperature(°C)	20	80	80
	System pressure (MPa)	0.1	15.00	15.00

Table 4 RCS Volume and Required Nitrogen Mass

Pressurizer Type	Coolant volume (m ³)			Steam and nitrogen volume (m ³)			RCS volume (m ³)	Required nitrogen mass (kg)
	CZP	HZP	HFP	CZP	HZP	HFP		
Steam	-	26.48	26.28	-	3.721	3.918	30.20	-
Mixture	-	26.14	25.97	-	3.304	3.476	29.45	131.0
Nitrogen	20.03	20.03	20.03	4.839	4.839	4.839	24.87	5.561

이상의 결과로부터, 순수증기 방식의 자기가압기를 채택한 원자로가 표 2의 정상 운전 조건을 유지하기 위해서는 최소한 3.918m³의 가압기 공간이 필요하며 냉각재가 차지하는 원자로 계통 부피는 30.20m³ 이어야 함을 알 수 있다. 혼합기체 방식을 채택할 경우에는 가압기 공간이 3.474m³ 이상이 되어야 하고, 냉각재 부피는 29.45m³ 이어야 하며 질소기체 131.0kg을 충전하여야 한다. 그리고 가압질소 방식의 경우는 최소한 4.839m³ 크기의 외부 가압기가 필요하며 압력용기 내 공간이 20.03m³이어야 하고, 가압기에 질소는 5.561kg 있어야 한다.

Fig. 1은 원자로 출력이 증가함에 따라 계통압력이 변화하는 것을 보여주고 있다. 가압질소 방식 가압기의 계통압력은 일정하게 나타나는데, 이는 가압기를 제외한 압력용기 내 냉각수의 온도를 일정하다고 가정한다 노심 평균온도를 일정하게 유지하는 운전방식을 가정하였기 때문이다. 그리고 순수증기 및 혼합기체 방식에서는 노심 출력에 따른 계통압력 변화가 거의 선형적으로 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

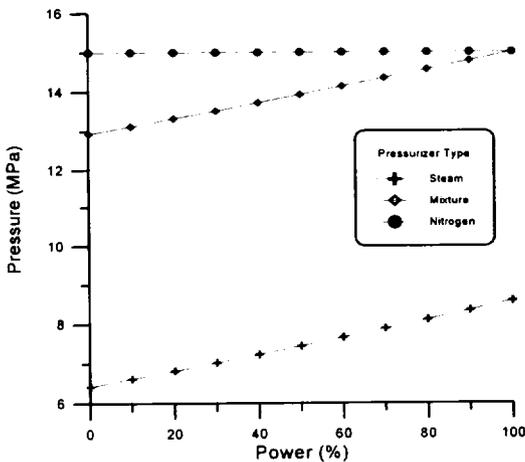


Fig. 1 Pressure according to power change.

가압질소 방식 가압기에서 가압기의 온도가 가압기 크기에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 가압기 온도를 변화시켜 가면서 필요한 가압기의 크기를 계산해 보았다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 온도를 20°C에서 120°C 까지 변화시켜 가면서 계산한 결과, 온도가

감소하면 가압기의 크기를 감소시킬 수 있는 효과가 있었다. 그러나 앞서의 가정에서 사용한 가압기 온도 80°C인 경우를 상온까지 냉각시킨다 하더라도 가압기 크기 감소가 0.2m³ 미만에 그쳐 효과가 크지 않은 것으로 나타났다.

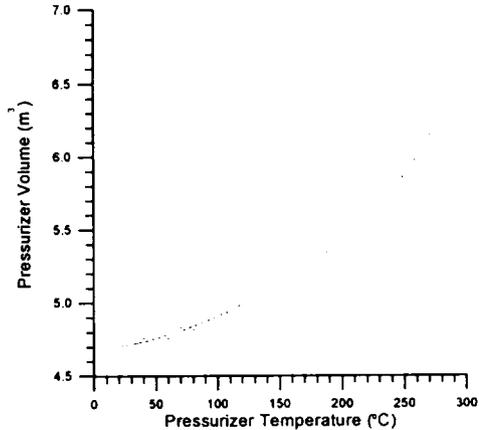


Fig. 2 Required pressurizer volume according to pressurizer temperature for nitrogen-type self-pressurizer.

그러나, 이상의 결과가 가장 작은 원자로를 설계하기 위해서는 가압질소를 이용한 자기가압기의 채용하는 것이 가장 유리하다는 것을 뜻하지는 않는다. 왜냐하면, 이 부피만으로는 운전 과도 또는 사고 시에 원자로가 원하지 않은 상태에 놓일 수도 있기 때문이다.

3.3.2 과도상태

이상과 같이 결정된 크기의 가압기를 사용할 경우에 과도상태 시에도 원자로가 원하는 상태에 놓일 수 있을 지를 판단하기 위하여, 정상운전 하에 있는 원자로에 임의의 열량을 더하거나 빼서 원자로 계통이 도달하는 열역학적 상태를 계산하였다. 설계에서 고려되어야 하는 사고의 종류가 결정되고 그 결과 원자로 계통에 인가되는 열부하를 계산하여야만 과도상태를 해석하는데 필요한 열부하량이 결정될 수 있으나, 본 연구에서는 계산 방법론의 적합성을 평가하는 것이 중요한 목적 중의 하나이므로 고려하고 있는 원자로의 온도가 대략 10°C 변화하는 결과를 초래하는 열량인 1000MJ을 열부하량으로 가정하여 평가하였다.

즉, 각각의 자기가압기 방식을 채용한 정상상태의 원자로 계통에 1000MJ의 열량을 더하거나 뺀을 때 원자로 계통이 궁극적으로 갖게 되는 열역학적 상태를 계산하였다. 순수증기 및 혼합기체 방식 가압기에 대한 계산 시 노심과 가압기의 온도차는 20°C를 유지하는 것으로 가정하였다. 계산 결과는 Table. 5와 같다.

Table. 5에서 볼 수 있듯이 순수증기 및 혼합기체 방식의 자기가압기를 사용한 경우에는 1000MJ의 열부하가 있을 때 약 10°C 정도의 온도 증감이 생기지만 가압질소 방식의 경우에는 약 20°C의 온도 변화가 일어나는 것을 알 수 있다. 그리고 가압질소 방식의 경우는 압력 변동이 매우 크다. 1000MJ의 열량을 가할 시 열역학적 임계상태를 넘어서는 것으로 나타났다. 이러한 극심한 압력 변화를 완화시키기 위해서는 가압기 부피를 증가시킬 필요가 있으므로, 기체탱크를 추가로 설치하는 것을 고려하여 보았다. 여기에서 기체탱크 내 질소는 정상운전 상태에서 가압기내

질소가 갖는 열역학적 상태와 동일한 상태에 있다고 가정하였다. Table. 6은 가압질소 방식의 가압기를 채택하고 기체탱크의 부피를 변화시켜 가면서 1000MJ의 열부하가 있을 때 계통의 열역학적 상태를 계산한 결과를 보여주고 있다. 기체탱크의 부피가 증가하여도 온도 변동은 완만해지지 않지만 압력 변동은 상당히 완화됨을 알 수 있다. 음의 열부하 시 노심 온도 변화에 주목하면, 기체탱크를 부착하지 않았을 때의 경우가 가장 높다가 기체탱크의 부피가 1m³ 이상인 경우에는 거의 일정한 온도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이는 노심에서 비등이 일어나기 때문인데, -1000MJ의 열부하가 있을 시 계산에 의하면 부피가 0.15m³ 이상인 기체 탱크를 추가해야 비등을 방지할 수 있다. 물론, 이 계산 결과는 최종의 열역학적 상태에 관한 것이므로 천이과정에서의 비등여부는 알 수 없다. 이상의 결과로부터 가압질소 방식 가압기에 5 m³의 기체탱크를 추가로 설치하면 혼합기체 방식과

Table 5 RCS Condition after Thermal Load Transients

Pressurizer Type	RCS variables	Condition		
		HFP	Heat up (+ 1000MJ)	Cool down (-1000MJ)
Steam	Core temperature (°C)	280	290.0	269.8
	Pressurizer temperature(°C)	300	310.0	289.8
	System pressure (MPa)	8.592	9.824	7.427
Mixture	Core temperature (°C)	280	290.8	269.3
	Pressurizer temperature(°C)	300	310.8	289.3
	System pressure (MPa)	15.00	17.63	12.87
Nitrogen	Core temperature (°C)	280	302.2	262.5
	Pressurizer temperature(°C)	80	80	80
	System pressure (MPa)	15.00	39.37	4.908

Table 6 RCS Condition after Thermal Load Transients for Nitrogen-type Self-Pressurizer with Gas Tank

Thermal Load (MJ)	RCS variables	Additional gas tank volume (m ³)						
		0	1	2	3	4	5	6
1000	Core Temperature (°C)	302.2	302.9	303.4	303.6	303.7	303.9	303.9
	System Pressure (MPa)	39.38	26.60	21.91	19.81	18.63	17.93	17.45
-1000	Core Temperature (°C)	262.5	259.5	259.6	259.7	259.7	259.7	259.7
	System Pressure (MPa)	4.908	9.814	11.62	12.48	12.98	13.32	13.56

비교하여 비슷한 부피를 유지하면서 열부하에 따른 압력 변동도 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 정상운전 만을 고려한 가압기 크기결정에서는 질소방식이 가장 유리한 것으로 나타났으나 열부하에 의한 과도상태를 고려하면 열부하량에 따라 불리해질 수도 있다는 것을 뜻한다. 따라서, 가압기 크기결정에는 계통의 특성에 맞는 과도상태와 이에 따른 열부하량이 정해져서 반영되는 과정이 되풀이되어야 한다.

Fig. 3은 가압질소 방식의 가압기에 기체탱크를 추가할 때, 열부하량에 따른 계통의 압력 변동을 나타낸 것이다. 1m³상의 기체탱크를 추가한 경우는 대체로 선형적인 압력 변화를 보이며 기체탱크의 부피가 커질수록 압력 변동폭이 완만해 짐을 알 수 있다. 그러나, 기체탱크를 추가하지 않은 경우는 압력 변동폭도 매우 크며, -500MJ 이하의 열부하량에 대해서 다른 영역에서와는 달리 거의 일정한 압력을 나타내는 것을 볼 수 있는데, 이는 이 영역에서 비등이 일어나 증기가 압력 변화를 흡수하기 때문이다.

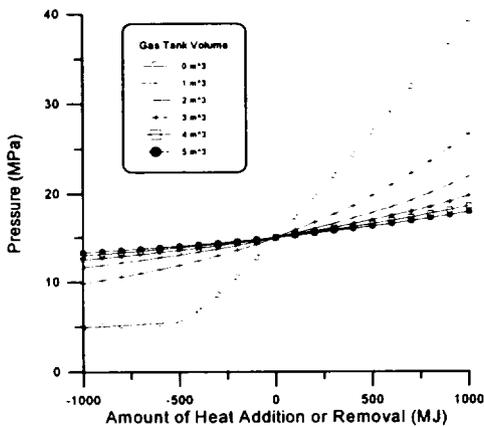


Fig. 3 Pressure after thermal load transients according to gas tank volume for nitrogen-type self-pressurizer.

열부하량을 -1000MJ에서 1000MJ로 변화시켜가면서 과도상태 후에 노심의 열역학적 상태 변화를 계산하여, Fig. 4와 5에 나타내었다. 단, 이 때 가압질소 방식 가압기에는 5m³ 부피의 기체탱크를 추가하여 계산하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 열부하량에 따른

온도 및 압력 변화는 거의 선형적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

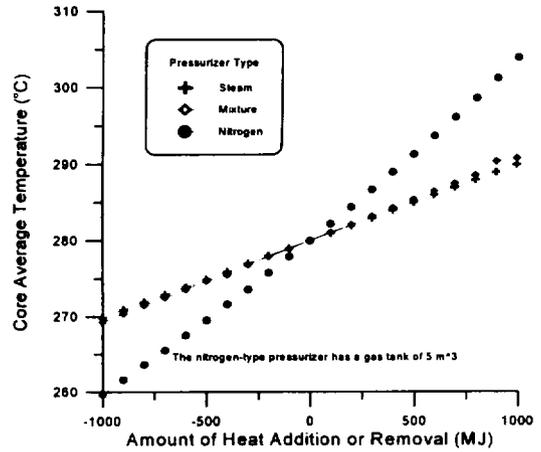


Fig. 4 Core temperature after thermal load transients.

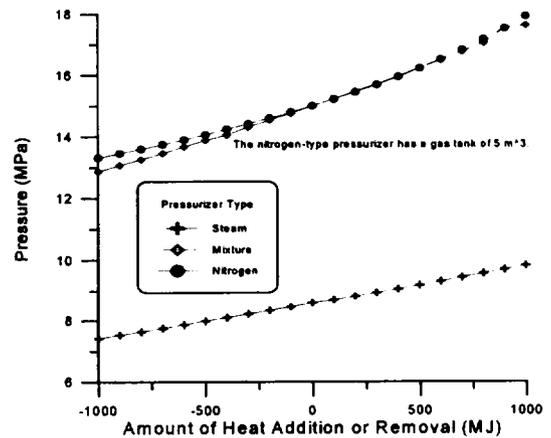


Fig. 5 Pressure after thermal load transients.

Fig. 4는 열부하량에 따른 온도 변화를 보여주고 있는데, 순수증기 및 혼합기체 방식은 거의 일치된 온도 변화 경향을 나타내는 반면에 가압질소 방식은 약 2배 가량의 온도 변화율을 보여 상대적으로 적은 열부하 과도상태에 대해서도 온도 변동이 큰 것으로 나타났다. 이는, 과냉상태로 유지되는 가압질소 방식과 비교할 때 증기를 사용하는 다른 두 방식에서는 증기가 잠열의 형태로 에너지를 포함하여 온도 변화

를 흡수하기 때문이다.

한편, 증기의 포화압력으로만 계통의 압력을 유지하는 순수증기 방식을 제외하고 혼합기체 방식과 가압질소 방식의 가압기를 채택한 경우에 열부하량에 따른 압력 변동은 거의 동일한 거동을 나타내고 있는데, 이를 Fig. 5에 나타내었다.

IV. 결 론

최근 많은 관심을 불러일으키고 있는 중소형 일체형 원자로에서는 살수기 및 가열기의 사용이 배제된 자기가압기를 채용하고 있다. 본 연구에서는 순수증기, 혼합기체 및 가압질소 방식의 자기가압기를 비교하고, 원자로의 운전조건에 따른 각 방식의 자기가압기의 크기를 결정하였다. 그리고 가열 및 냉각 과도상태 시에 원자로 계통이 도달하게 되는 열역학적 상태를 해석하였다.

가압기 크기결정 면에서 정상 운전상태 만을 고려하면, 순수증기 방식과 혼합기체 방식의 경우는 필요한 원자로 계통의 크기가 거의 비슷하였으며, 가압질소 방식의 경우가 가장 크기가 작았다. 그러나 가압질소 방식의 경우에는 열부하 과도상태 시 압력 변동이 매우 심하고 냉각 과도상태 시에는 냉각재 계통에서 전체에 걸쳐 비등이 일어나므로, 혼합기체 방식과 비슷한 정도의 압력 변동을 유지하기 위해서는 기체 탱크를 추가하여야 하는 것으로 나타났다. 기체 탱크를 함께 고려하면 가압질소 방식 역시 다른 두 경우와 비슷한 부피가 됨을 알 수 있었다.

본 연구에서는 질소기체의 용해는 고려하지 않았으므로, 앞으로 질소기체의 용해를 고려한 해석이 필요하다. 그리고 혼합기체 방식의 자기가압기에서 온도 변화에 따른 증기압 변화를 완화하고 HZP 시 압력 저하로 인한 노심의 국부 비등 발생 가능성을 제거하기 위하여 가압기에 냉각기를 부착하는 것을 고려할 수 있는데, 이에 대한 해석 또한 수행되어야 할

것이다.

NOMENCLATURE

M	mass
P	pressure
T	temperature
u	internal energy per unit mass
v	specific volume
V	volume

Subscript

GAS	noncondensable gas
NIT	nitrogen
SGR	surge from/to gas tank for nitrogen-type self-pressurizer
STM	steam
SYS	system
WTR	water

참고문헌

- 1) 이두정 외, 1997, 중소형 일체형원자로 계통설계 개발, 과학기술처 보고서, KAERI/RR-1722/96.
- 2) 배운영 외, 1997, 신형원자로 계통개념 연구, 과학기술처 보고서, KAERI/RR-1749/96.
- 3) Todreas, N.E. and Kazimi, M.S., 1989, *Nuclear system I : Thermal hydraulic fundamentals*, Hemisphere Publishing Co., New York, pp.257-287.