

CARR 大容量 被動型 加壓輕水爐 概念에 關한 研究



장 순 흥
한국과학기술원 원자력공학과 교수

신형원자로연구센터(Center for Advanced Reactor Research, CARR)에서는 한국의 차세대 원자로형으로 적합할 것으로 기대되는 대용량(1,000MWe 혹은 1,300MWe)의 피동형 가압경수로 개념에 대해 연구하고 있다. 다음 두 가지 형태의 노형과 피동안전계통에 대한 대체설계들이 제안되어 연구되고 있다. 1. 웨스팅하우스社의 AP600에 기초한 3-회로 이상의 대용량 피동형 가압경수로 2. 한국 표준원자력발전소(Korean Standard Nuclear Power Plant, KSNPP)의 원자로냉각재계통과 AP600의 피동형 안전설비에 기초한 2-회로 대용량 피동형 가압경수로 그리고 3. 두 가지 노형에 대해 대체가능한 피동안전계통들의 설계이다. 지금까지는 예비설계변수들이 결정되었

고 2-회로 대용량 피동형 가압경수로에의 냉각재상실사고에 대한 예비안전성분석이 수행되었다. 본 논문은 신형원자로연구센터의 대용량 피동형 가압경수로의 개발전략, 예비설계변수, 안전성 분석결과를 제시하고 본 개념의 타당성을 논의한다.

서 론

신형원자로의 개발은 안전요건, 경제적 경쟁성 그리고 공공신뢰 등 원자력발전에 중요한 도전이 되고 있는 제반 문제들을 해결하여 원자력의 부흥을 피하는데 있어 가장 중요한 단계로 인식되고 있다. 한국은 2000년대 초까지 국가적인 연구과제로서 차세대원자로 개발을 계획하고 있으며 이는 2007년 이후

에 한국전력공사를 지원하기 위한 것이다.

한국의 차세대원자로형은 개량형 또는 피동형 가압경수로 중의 하나가 되거나 병행될 것이다. 현재 대부분의 개량형 설계에서는 정격출력 1,000MWe 혹은 그 이상을 추구하고 있는 반면, 피동형 설계에서는 비교적 소용량인 600MWe 정도의 출력을 추구하고 있다. 상대적으로 큰 전력망체계와 발전소 부지확보에 어려움을 겪고 있는 한국으로서는 소용량의 피동형 설계는 적합하지가 않다. 그러나 다음에 토의될 몇가지 관점에서 볼 때 만약 피동형 설계에서 1,000MWe 이상의 대용량 발전소가 가능하다면 개량형 설계보다 더 연구가치가 있는 것을 알 수 있다.

본 연구의 1차적인 목적은 앞으로 한국의 차세대원자로로서 적합할 것으로 기대되는 피동형 가압경수로의 노형들을 제시함으로써 차세대원자로형 결정에 이바지하는 것이다. 따라서 본 연구는 1. 1,000MWe 이상의 피동형 가압경수로 개념의 제공 2. 예비개념설계의 수행 3. 기술적, 경제적 관점에서의 타당성 평가를 그 내용으로 하며 제안된 개념의 개발전략, 설계변수들 그리고 안전성 분석결과들을 제시하고 타당성을 토의한다.

연구배경 및 개발전략

개량형과 피동형 설계는 각각 고유의 장단점을 가지고 있다. 개량형 설계는 경제적이고(높은 출력을 통하여) 효율적이며 훨씬 이해하기

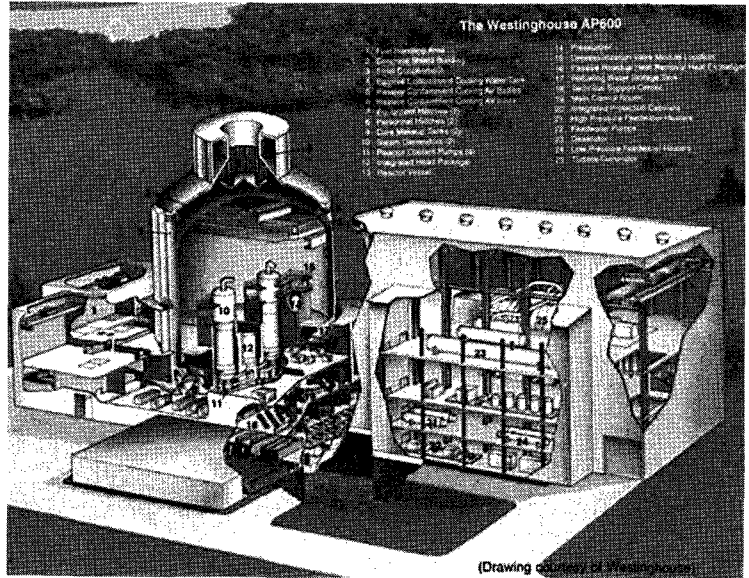
쉽고 시험 및 검사에 더 융통성이 있으며 보수가 쉬운 장점을 가지는 반면에, 피동형 설계는 신뢰성이 있고 인간실수에 덜 민감하며 훨씬 간단하고 공공신뢰의 획득에 용이할 것으로 기대된다. 두 설계 모두 높은 안전성을 확보하고 있으므로 안전성의 비교는 현실적이지 못한 것으로 생각된다.

개량형 가압경수로의 기술이 2006년까지 실제 발전소의 건설을 바탕으로 자람될 수 있을 것으로 기대되지만 원자력에 대한 일반국민의 불신을 회복시키기 위한 안전성 향상이라는 측면에서 볼 때 피동안전개념이 더 바람직하다는 것은 명백하며 차세대원자로형을 결정할 때 가장 중요하게 고려되어야 하는 것이 바로 공공신뢰의 증진여부이다. 그러므로 피동형 가압경수로가 한국에서 연구개발할 노형으로 더 적합할 것으로 생각된다.

발전소 부지문제, 상대적으로 큰 전력망체계, 규모의 경제성 등을 고려해 볼 때 기술적인 면으로나 경제적인 면으로 타당하다면 대용량(1,000Mwe 혹은 1,300Mwe)의 피동형 가압경수로(Large Passive PWR, LP-PWR)의 개발이 더 바람직하며 다음과 같은 두 가지 접근방법을 생각할 수 있다.

1. SPWR형 대용량 피동형 가압경수로(3-회로 1,000Mwe와 4-회로 1,300Mwe), AP600의 설계를 직접 적용하며 냉각재회로의 수를 두 개에서 세 개 혹은 네 개로 늘리고 증가된 출력에 대한 계통과 기기의 용량을 채택한다.

2. 2-회로 대용량 피동형 가압



경수로(출력수준에 무관), AP600 등의 피동안전계통들을 한국표준원자력발전소의 원자로냉각재계통에 도입한다.

신형원자로연구센터는 위 두 가지 노형의 설계를 발전시키기 위해 박차를 가하고 있다. 특히 피동잔열제거계통(Passive Residual Heat Removal System, PRHR)과 피동격납용기냉각계통(Passive Containment Cooling System, PCCS)의 설계개선에 초점을 맞추고 있으며 이에 대한 대체설계가 논의되었다.

신형원자로연구센터의 대용량 피동형 가압경수로로는 세 가지 단계를 거쳐 개발될 것이다. 즉 두 가지 노형과 대체피동설비들에 대한 예비개념설계, 위 노형들에 대한 비교평가 그리고 CARR 대용량 피동형 가압경수로 설계의 결정 및 설계 최적화이다.

현 단계에서는 신형원자로연구센터가 독립적으로 연구를 수행중

이지만 다음 단계에서는 한국의 차세대원자로를 위한 국가적 연구개발계획의 틀안에서 다른 기관들과 공동으로 연구를 수행해야 한다.

AP600의 기술에 기초한 SPWR형 대용량 피동형 가압경수로에 웨스팅하우스사와 日本 기업들간의 연합연구과제로서 개발중에 있다. 그러므로 한국의 차세대원자로형으로 채택된다면 국제적인 협력을 통해 높은 성공률을 가지고 개발될 수 있다. 그러나 위의 노형을 한국에서 채택, 개발 및 건설을 하는데는 몇가지 문제점이 있다. 왜냐하면 한국의 핵증가공급계통 설계 및 제조에 관한 기술과 도구들은 AB-B-CE사의 기술과 밀접한 연관이 있기 때문이다. 본 논문에서 1,000Mwe 용량의 설계는 웨스팅하우스사와 日本 기업의 SPWR에 대한 공동연구결과를 최대한 이용하여 개발노력을 최소화하고 있다. 그러나 1,300Mwe에 대한 연구는

아직까지 완성되지 않고 있다.

2-회로 대용량 피동형 가압경수로로는 한국 원자력산업계의 지휘 아래 한국의 제조기술을 이용하여 개발될 수 있다. 그러나 이 경우에는 국제적인 협력체계의 구축 이전에 한국 원자력계에 의해 독립적으로 방대한 연구가 선행되어야 한다. 2-회로 대용량 피동형 가압경수로에 대한 예비설계는 다음의 전제를 통해 이루어졌다.

1. 한국표준원자력발전소 원자로 냉각재계통의 기본적인 배치는 그대로 유지한다.

2. AP600의 피동안전설비들은 약간의 변경을 거친 후 직접 채용된다.

3. 원자로냉각재계통의 설계변수들은 안전여유도를 개선하고 피동원자로의 특성을 반영하기 위해 설계변경을 거친다.

4. 피동안전계통들은 증가된 출력을 반영하기 위해 재설계한다.

현재는 중요한 피동안전계통들의 대안에 대한 개념설계를 수행 중이다. 향후 연구과제로는 계통구조와 설계변수들에 대한 설계 최적화와 더 자세한 성능 및 안전성 분석이 포함될 것이다.

예비설계

1. SPWR형 대용량 피동형 가압경수로

3-회로 대용량 피동형 가압경수로의 전반적인 RCS, PRHRS 그리고 PECCS에 대한 전반적인 배열은 AP600과 유사하다. 2-회로 대용량 피동형 가압경수로의 설계

와 크게 다른 점은 다음과 같다.

(1) 회로 자체의 크기를 증가시키는 대신 회로의 수를 AP600의 두 개에서 세 개와 네 개로 증가시킴

(2) 캔드 모터 펌프를 사용함으로써 Cross-Over Leg를 제거

(3) 원자로냉각재계통에 웨스팅하우스社의 설계를 사용

(4) 피동간열제거계통의 유로

(5) 현저히 낮은 증기압력 및 온도

신형원자로연구센터에서는 SPWR 설계의 검토 및 안전성 분석을 통한 설계변수의 검증을 SPWR형 대용량 피동형 가압경수로에 대한 중점연구과제로 삼고 있다. <표 1>에 AP600과 SPWR의 주요 설계변수들이 요약되어 있다.

2. 2-회로 대용량 피동형 가압경수로

(1) 전반적인 배치

2-회로 대용량 피동형 가압경수로

<표 1> AP600과 SPWR의 주요 설계변수

구 분	AP600 (2-회로)	SPWR (3-회로)	SPWR (4-회로)
출력/ 냉각재계통			
· NSSS 출력(MWt)	1,940	2,910	3,950
· 노심출력(MWt)	1,933	2,900	3,937
· 핵연료집합체 수	145	193	241
· 평균 선출력(kW/ m)	13.5	15.1	16.4
· 증기발생기 수	2	3	4
· 원자로냉각재펌프 수	4	6	8
· 가압기 용량(m ³)	36.8	59.5	84.5
피동간열제거 열교환기			
· 열교환기 수	1	2	2
· 열전달 면적(m ²)	382	764	764
· IRWST 용량(m ³)	1,935	2,580	3,915
자동감압계통			
· 1단계 밸브	2×4"	2×4"	2×4"
· 2단계 밸브	2×8"	2×8"	2×8"
· 3단계 밸브	2×8"	2×8"	2×8"
· 4단계 밸브	2×12"	3×12"	4×12"
피동안전주입계통			
· CMT 용량(m ³)	56.6	82.0	113.0
· 축압기 용량(m ³)	56.6	82.0	113.0
피동격납용기냉각계통			
· 격납용기 부피(m ³)	48,100	75,000	131,000
· 열전달 단면적(m ²)	4,980	6,865	8,860
· 냉각수저장탱크 용량(m ³)	1,520	2,270	3,030

로의 RCS, PRHRS 및 PECCS의 전반적인 배열이 <그림 1>에 나타나 있다. 배열은 다음을 제외하고는 AP600과 유사하다.

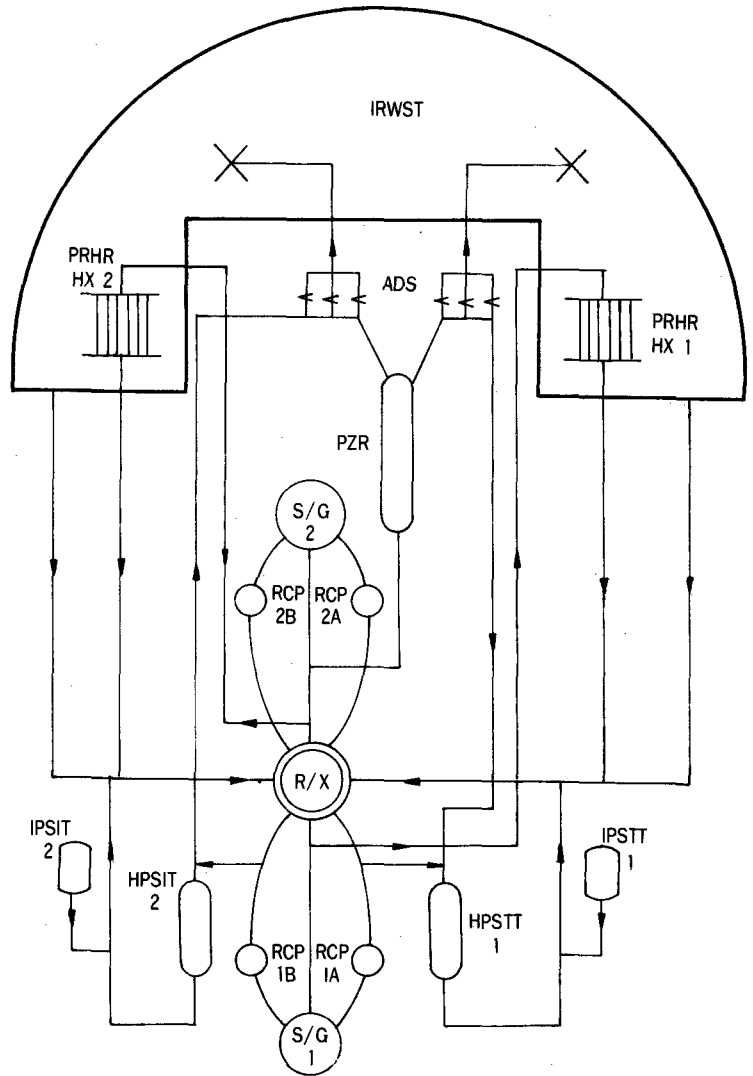
① 원심밀봉펌프의 사용과 그에 따른 Cross-Over Leg의 존재

② PRHRS에서의 냉각재 유로
냉각재가 두 개의 고온관으로부터 방출되어 원자로용기 직접주입관(Direct Vessel Injection Line, DVI Line)을 통해 원자로냉각재계통으로 되돌아온다.

본 설비들을 사용한다는 것은 늘어난 출력효과를 고려하여 AP600의 검증실험결과들을 거의 모두 적용할 수 있다는 것을 의미한다.

(2) 원자로 및 원자로냉각재계통
원자로냉각재계통은 한국표준원자력발전소와 마찬가지로 원자로, 두 대의 증기발생기, 한 대의 가압기, 네 대의 원심밀봉펌프, 두 개의 고온관, 네 개의 저온관 그리고 네 개의 Cross-Over Legs로 이루어져 있다. 노심 열 여유도의 증가와 증기발생기 튜브의 부식저항의 개선을 위해 원자로냉각재와 2차측의 증기 및 급수온도 조건 그리고 증기발생기 튜브재질에 System 80+의 설계변수들이 채용되었다.

원자로용기, 용기의 내부, 핵연료집합체 및 다른 냉각재계통의 기기들은 본질적으로 ABB-CE社의 설계를 따랐기 때문에 새로운 제조기술의 개발을 필요로 하지 않는다. <표 2>에 한국표준원자력발전소와 System 80+ 그리고 2-회로 1,000MWe 피동형 가압경수로의 주요 원자로냉각재계통의 설계변수가 비교되어 있다.



<그림 1> 2-회로 대용량 피동형 가압경수로의 전반적인 배치도

(3) 피동안전계통

PRHRS의 설계는 기본적으로 AP600과 유사하다. 그러나 냉각재 유로의 설계가 변경되었다. 즉 냉각재는 고온관으로부터 흘러나와 격납용기내 핵연료 재장전수조에 잠겨 있는 열교환기에서 재장전수로 열을 전달한 다음 DVI관을 통

해 원자로냉각재계통으로 돌아온다. 두 개의 독립적인 회로가 제공되고 각각 100%의 열부하를 감당할 수 있다.

PECCS는 두 개의 고압안전주입탱크(High Pressure Safety Injection Tank, HPSIT), 두 개의 중간압안전주입탱크(Intermediate Pre-

〈표 2〉 2-회로형 발전소 원자로냉각재계통의 설계변수 비교

설계변수	KSNPP	System 80+	2-회로 1,000MWe 피동형 가압경수로
핵증기공급계통 설계자	ABB-CE KAERI KOPEC	ABB-CE	CARR
노심 열출력(MWt)	2,815	3,800	2,815
전기출력(MWe)	-1,000	-1,300	-1,000
냉각재계통 압력(psia)	2,250	2,250	2,250
냉각재회로의 수	2	2	2
핵연료집합체의 종류	16×16 CE 표준형		
고온관 온도(°F)	621	615	615
냉각재펌프 종류	원심밀봉펌프		
증기압력(psia)	1,070	1,000	1,000

〈표 3〉 2-회로 1,000MWe 피동형 가압경수로의 피동안전계통 설계변수

피동안전주입계통			
HPSIT	고압 안전주입기능	no./vol.(ft ³)	2/3,000
IPSIT	중간압 안전주입기능	no./vol.(ft ³)	2/3,000
IRWST	저압 안전주입 및 장기냉각기능	no./vol.(ft ³)	1/75,000
ADS	자동감압밸브계통	1단계	2/4"
		2단계	2/8"
		3단계	2/8"
		4단계	2/18"
피동잔열제거계통			
PRHR HX	열교환기 갯수		2
	열전달 단면적(ft ²)		8,224
격납용기 및 피동격납용기냉각계통			
격납용기	형 태 부피(ft ³)	콘크리트 차폐 건물+철제 격납용기	2.7×10 ⁶
PCCS Tank	용량(ft ³)		80,000

ssure Safety Injection Tank, IPSIT) 그리고 한 개의 격납용기내 핵연료 재장전 수조(In-containment Refueling Water Storage Tank, IRWST)로 구성되어 있고 각각은 고압, 중간압 그리고 저압의 조건에서 1차계통에 비상노심냉각수를 공급한다. PECCS와 자동감압계통(Automatic Depressurization Sys-

tem, ADS)의 배치는 AP600과 같지만 늘어난 냉각요건에 맞추어 용량을 증가시켰다.

PCCS는 AP600의 설계를 그대로 도입하였다. 피동안전계통들에 대한 상세설계변수의 결정은 현재 진행중이며 〈표 3〉에는 2-회로 대용량 피동형 가압경수로의 피동안전계통에 대한 예비설계변수들이

정리되어 있다.

3. 대체 피동안전설비

신형원자로연구센터에서는 위의 두 가지 노형에 모두 적용될 수 있으며 타당성이 있는 다음과 같은 대체 안전설비들에 대한 연구를 하고 있다.

(1) 콘크리트 격납용기를 위한 피동격납용기냉각계통

(2) 잔열제거를 위한 피동증기응축계통

(3) 단순화된 피동안전주입계통

현재로는 위의 대체설계 중에서 콘크리트 격납용기를 위한 피동격납용기냉각계통과 잔열제거를 위한 피동증기응축계통이 주요 대체설계로서 연구되고 있다.

(1) 콘크리트 격납용기를 위한 피동격납용기냉각계통

대형 철제 격납용기를 열전달 표면으로 사용하는 AP600의 피동격납용기냉각계통은 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

① 건전성과 열전달 용량

이 두 가지 인자에 대한 벽두께 증가의 효과는 상반되기 때문에 발전소의 크기와 출력은 엄격히 제한되어 있다. 또한 철제 격납용기는 압축응력(Prestressed) 콘크리트 격납용기에 비해 인장응력면에서 약하다.

② 경 험

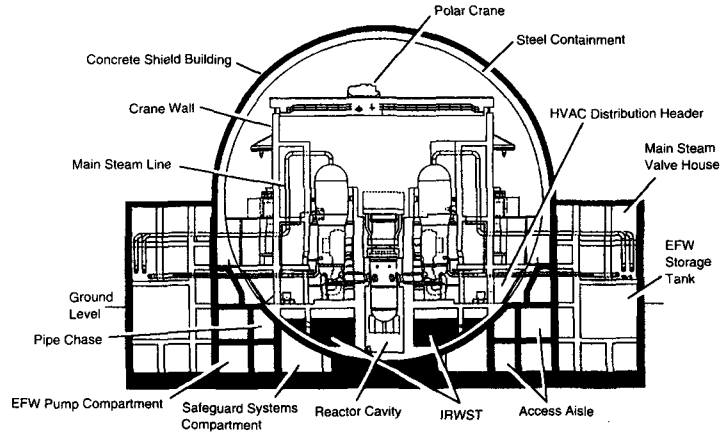
한국표준원자력발전소에서 채택된 격납용기 형태는 압축응력 콘크리트 격납용기이다. 그리고 한국은 영광 3, 4호기 등의 직접 건설을 통해 이러한 격납용기에 대한 많은 경험을 축적하였다.

새로운 피동격납용기냉각계통은
신형원자로연구센터에서 연구되고
있으며 설계원리는 다음과 같다.

- ① 철제 격납용기가 아닌 압축응
력 콘크리트 격납용기의 사용
- ② 수소정화기, 피동격납용기살
수계통 등의 조화

<그림 2>에서 보듯이 새로운 피
동격납용기냉각계통은 수소정화기
(피동형 촉매형태)를 PCCS의 입구
에 장착하고 있다. PCCS는 피동격
납용기냉각기(Passive Containment
Cooler, PCC)에 의해 물을 격납용
기대기로부터 응축시켜 격납용기내
의 압력을 낮추는 역할을 한다. 응
축된 물은 피동격납용기살수계통에
의해 격납용기대기로 살수되어 더
많은 증기를 응축시키는데 기여
한다.

(2) 잔열제거를 위한 피동증기응
축계통



AP600에서는 PRHRS의 성능이
IRWST의 높이에 의존하는데 이는
이 높이가 자연순환유량 및 열제거
용량을 결정하기 때문이다. IRW
ST 높이의 한계가 이 계통의 주요
한 결점 중의 하나이다. 이의 대안
으로서 증기발생기 2차측에서의 잔
열제거를 위한 피동증기응축계통이

연구되고 있다<그림 2>.

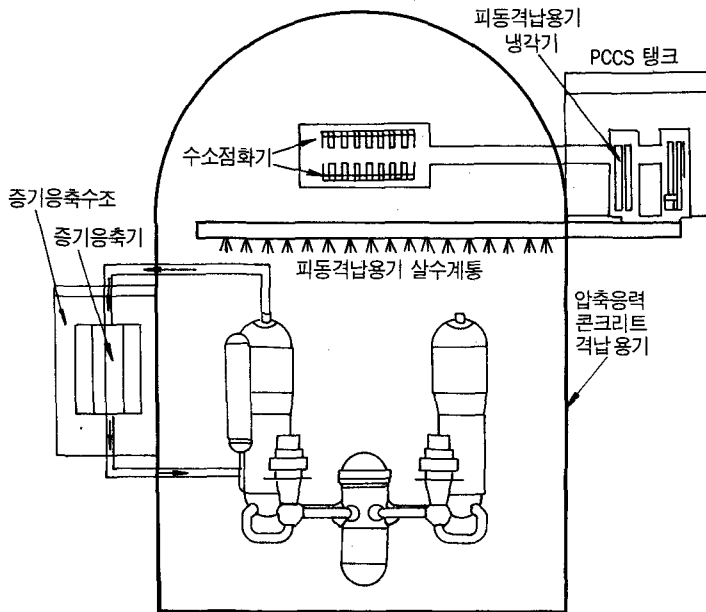
이 대안은 두 가지의 장점을 가
지고 있다.

- ① 수증기의 응축은 가장 효과적
인 열전달 메커니즘 중의 하나이고
큰 압력강하는 유량을 증가시킨다.
- ② 계통의 용량증대에 한계가 없
으므로 대용량의 발전소를 건설할
수 있다.

현재는 본 두 가지의 대체안전계
통들에 대한 타당성 검토 및 예비
설계변수들에 대한 계산이 수행되
고 있다.

예비안전성분석

지금까지 제안된 개념들의 안전
성 평가를 위해 최적계통해석코드
인 RELAP5/MOD3를 이용한 예
비안전성분석이 행해지고 있다. 2
-회로 1,000MWe 피동형 가압경
수로에 대한 분석결과를 AP600의
경우와 비교하여 보았다. 첫단계로
중형 LOCA에 대한 분석이 이루어
졌으며 현재는 유량상실사고, 주급
수 상실사고 등을 포함하는 과도상



<그림 2> 콘크리트 격납용기를 위한 피동격납용기냉각계통과 피동증기응축계통

태에 대한 분석이 진행중이다. DVI관에 대해 양면파단사고의 해석이 4단계 감압밸브 중 하나는 열리지 않는다는 가정하에 이루어졌다. AP600과 같은 크기의 감압계통밸브를 가정한 경우의 결과를 보면 침투 피복재 온도(Peak Cladding Temperature, PCT)가 제한값인 2,200°F를 넘는 것으로 나타났다. 따라서 4단계 감압밸브의 크기를 12"에서 18"로 증가시켜서 분석을 행하여 보았다. 변경후의 결과에는 예비설계된 2-회로 1,000 MWe 피동형 가압경수로의 안전성과 관련된 변수들이 AP600과 비슷한 거동을 하는 것으로 나타났다. 안전주입의 측면에서는 2-회로 피동형 가압경수로에서의 주입이 AP600에서보다 약간 빠르게 일어남을 알 수 있는데 이는 피동안전계통들의 용량을 증가시켰기 때문으로 생각된다. 결과적으로 이것이 모의시간이 지날수록 PCT가 AP600보다 낮아지는데 주요한 역할을 한 것으로 생각된다.

토 의

미국과 日本 기업들의 공동연구에서 1,000MWe의 피동형 가압경수로(SPWR)가 기술적으로나 경제적으로 타당하며 AP600 시험 프로그램의 확장이 SPWR에 전적으로 적용가능함을 보였다. 우리의 평가에 기초하면 2-회로 대용량 피동형 가압경수로는 기술적으로 타당하며 SPWR과 같은 수준의 안전성을 갖는 것으로 나타났다.

SPWR형 대용량 피동형 가압경

수로와 2-회로 대용량 피동형 가압경수로간의 비교평가는 아직 이루어지지 않았지만 다음의 관점들은 상세한 분석없이도 도출될 수 있다.

1. 원자로냉각재계통의 배열은 2-회로 대용량 피동형 가압경수로의 경우가 더 간단하다. 이는 적은 냉각재회로의 수로 인한 것이다.

2. 2-회로 대용량 피동형 가압경수로에서 원심밀봉펌프의 사용은 소형 LOCA의 가능성을 증대시키고 Cross-Over Legs와 펌프밀봉을 위한 보조회로의 필요성을 요구한다. 하지만 반면에 유량상실사고시에 좋은 유량 코스트 다운 특성을 가진다. 이는 열 여유도를 증가시켜 고출력밀도를 가능하게 한다.

3. 2-회로 대용량 피동형 가압경수로는 개발은 한국의 지휘 아래 진행될 수 있으며 기존의 핵증기공급계통 설계과 제조기술을 최대한 활용할 수 있다.

4. SPWR형 대용량 피동형 가압경수로는 국제적인 협력을 통해 높은 성공 가능성을 지니고 개발될 수 있다.

5. 두 가지 노형에 적용가능한 피동안전계통에 대한 대체설계가 연구중에 있다.

한국의 차세대원자로를 위한 국가적인 연구개발과제의 틀 아래 이 두 가지 노형의 타당성을 서로 그리고 다른 개량형 원자로와 충분히 비교하는 것이 바람직하다.

결 론

본 논문은 한국의 차세대원자로

형으로 적합할 것으로 기대되는 두 가지의 대용량 피동형 가압경수로 개념을 제안하였다. 또한 예비설계 변수와 예비안전성분석의 결과도 제시하였다. 이상과 같은 연구결과로 우리는 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 한국이 연구개발해야 할 차세대원자로로는 1,000MWe 이상의 용량을 가진 피동형 가압경수로서가 바람직하다.

2. 1,000MWe 이상의 용량을 가진 피동형 가압경수로는 SPWR형과 2-회로 대용량 피동형의 두 가지 방향에서 개발 타당성을 가지고 있다.

3. 각 노형은 고유의 장단점을 가지고 있지만 모두 한국의 차세대원자로로서 개발될 가치가 있다.

4. 기술적으로 그리고 경제적으로 타당하다면 2-회로 대용량 피동형 가압경수로서가 한국에 더 적합한 것으로 생각된다.

5. 피동안전계통들의 대체설계로서 콘크리트 격납용기를 위한 피동 격납용기냉각계통과 잔열제거를 위한 피동증기응축계통이 연구되고 있으며 한국의 기술적, 경제적 상황을 고려할 때 AP600의 계통들에 비해 더 큰 연구가치를 가질 것으로 기대된다.

본 연구가 미래의 피동형 가압경수로는 국가적 개발을 위한 시발점을 제공하기를 기대하며 앞으로는 심도 있는 안전성 분석, 설계의 최적화 그리고 타당성 평가를 포함하는 광범위한 연구가 수반되어야 할 것이다. ▣