

'96 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

발전소의 사고 또는 비정상 조건으로 원자로용기내의 증기 또는 수소기체가 발생시 이를 제거하기 위한 설계 분석

민경성, 이세용
한국원자력연구소

요 약

1979년 3월 Three Mile Island 2 (TMI-2) 발전소에서 사고가 발생했을 때 원자로용기내에 생성된 수소기체로 인하여 운전원은 원자로용기의 수위를 정확히 측정할 수 없었으며, 이로 인하여 사고상태를 신속히 파악하지 못하였다. TMI 사고이후 미국 원자력규제위원회 NRC는 이같은 문제점을 해결하고자 미국내 모든 원전에서 사고 또는 비정상 조건이 발생할 경우에 원자로용기 수위에 대하여 운전원이 신뢰성을 갖을 수 있는 후속조치를 수행토록 요구하였다. 또한 미국의 대표적인 전력연구소인 EPRI에서는 개량형 경수로 (Advanced Light Water Reactor : ALWR) 설계 요건으로 이러한 설계가 반영되도록 요건화 하였다[1]. 본 논문에서는 2,825 MWt급 한국형 표준원전을 대상으로 EPRI에서 요구한 설계요건에 따라 TMI 2 발전소에서와 같은 사고로 인하여 수소기체가 발생했을 경우와 발전소가 비정상 상태로 인하여 증기가 발생했을 경우에, 이를 신속히 제거하여 운전원이 원자로용기의 수위를 정확히 감지할 수 있도록 하는 설계 방안을 검토하였다. 따라서, 설계방안으로 원자로용기에 모인 증기 또는 수소기체를 계통중 가장 높은 위치에 있으며, 계통구성 기기중 유일하게 2상을 유지하고 있는 가압기로 배출시키고자 두 기기 간에 연결관을 설치하는 방안에 대해서 분석하였다. 원자로용기 상부헤드와 가압기를 연결하는 방안은 여러가지가 있으나, 검토한 결과 한국형 표준원전에서는 연결관을 가압기 상부헤드보다 4m 높게하여 원자로용기 상부헤드와 연결하는 방안이 EPRI의 설계요건을 만족하면서 기존설계에 영향을 가장 적게 미치는 적합한 설계방안으로 분석되었다.

1. 서 론

1.1 배경

TMI 사고이후 전세계의 원자력발전소 설계자는 사고를 포함한 모든 운전 조건에서 원자로용

표 2 각각 설계안에서의 연결관 길이 및 압력저항치

	관의길이(m)	ΔP (kg/cm ²)		비 고
		수소기체	증기	
(1) 안	2.56	0.824	0.319	
(2) 안	1.30	0.321	0.9×10^{-2}	
(3) 안	3.35	0.824	0.319	

표 3 각각 설계안의 연결관 내경 및 설계 고려사항

	연결관 내경 크기(cm)		기타 설계 고려 사항
	수소기체	증 기	
(1) 안	4.6	3.7	전열기의 추가용량 : 약 514 kW(28%정도 증가)
(2) 안	8.2	3.9	
(3) 안	4.9	3.9	연결관 높이 : 가압기의 상부로부터 4 m

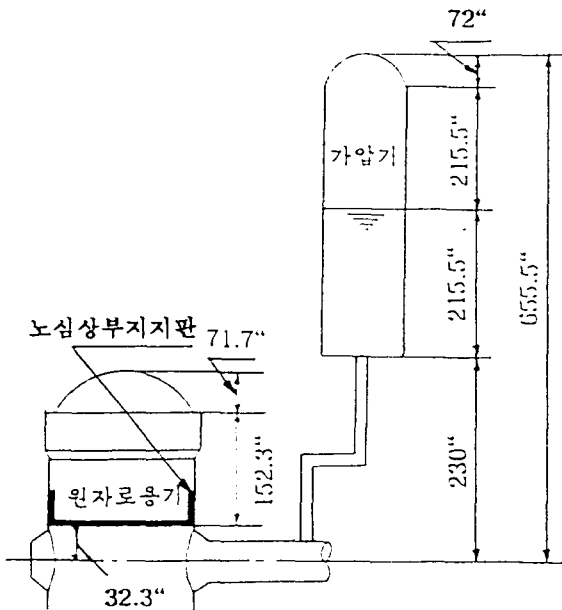


그림 1 한국 표준형발전소 원자로냉각재계통 단면도

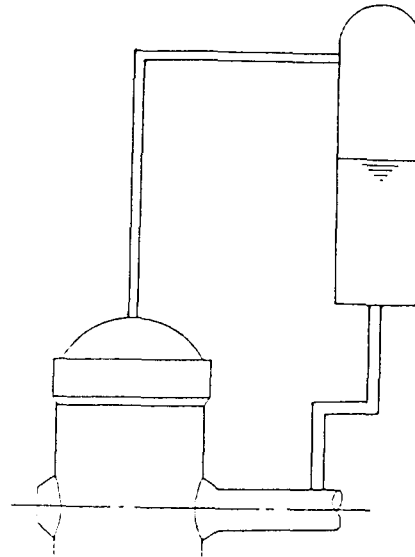


그림 2a (1) 안 원자로용기와 가압기 연결도

2.1 설계안별 연결관 내경 계산 및 기타 설계사항 분석

본 논문에서 사용된 기본 설계수치[4]는 표 1에 요약하였으며, 그림 2a, 2b, 2c를 참고로 각 설계안에서의 연결관의 길이와 Darcy 방정식을 이용하여 계산한 연결관에서의 압력저항치는 표 2에 정리하였다.

2.1.1 연결관 내경 및 기타 설계사항 분석

본 절에서는 각각 3가지 설계안에 대해서 증기가 발생할 경우와 수소기체가 발생할 경우에 이를 충분히 제거하기 위한 연결관 내경을 계산하였으며, 각각 설계안의 특성에 따라 검토 해야 할 추가 설계사항들을 분석하였다. 여기에서 사용된 기본 관계식[2,3]은 다음과 같다.

$$W = \nu d^2 (\Delta p / K \nu)^{0.5} \quad (1)$$

$$d = [W^2 * (fL \nu / \Delta P)]^{0.2} \quad (2)$$

W : 증기 또는 수소기체 질량(kg/hr), ν : 비체적(m^3/kg),
 d : 연결관의 내경(cm), L : 연결관의 길이(cm),
 ΔP : 압력저항치(kg/cm^2), f : 마찰계수, K : 저항계수($K = fL/d$)

가. 발전소가 비정상상태로 인하여 원자로용기내에 증기 발생시 이를 배출하기 위한 설계 검토

1) 가정

발전소 비정상상태로 인하여 원자로용기에서 발생된 증기량은 계통을 자연순환냉각 방법으로 냉각시켜 정상운전상태에서 잔열제거계통이 작동되는 시점인 28.8 kg/cm^2 ($230.6 \text{ }^\circ\text{C}$: 포화온도)까지 발생된 양으로 하였으며, 이때 계통의 냉각률은 $28 \text{ }^\circ\text{C/hr}$ [4]로 가정하였다. 이때 원자로용기는 절연되어 있으며, 비정상상태가 발생시 원자로용기에서 유체의 최소수위는 상부헤드 아래의 노심상부지지판까지로 가정하며, 이때 다른 유체와의 혼합 현상은 이루어지지 않는다고 가정한다.

2) 분석

위 1).가) 항을 근거로 계통에서 발생된 증기는 원자로용기를 통하여 가압기로 유입되는데 이때 증기량은 $3,565 \text{ kg/hr}$ 이었고, 각각 설계안별로 계산된 연결관 내경은 다음과 같다. : (1) 안 : 4.6 cm , (2) 안 : 8.2 cm , (3) 안 : 4.9 cm

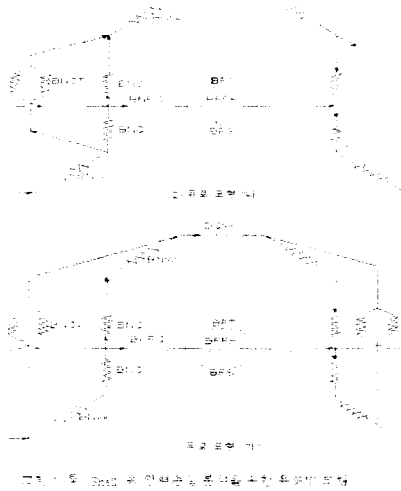


그림 2 유료모형 1과 유료모형 2의 전체 압력손실 비교

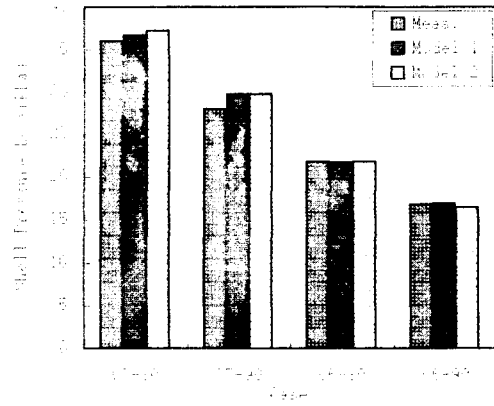


그림 3 유료모형이 전체 압력손실에 미치는 영향

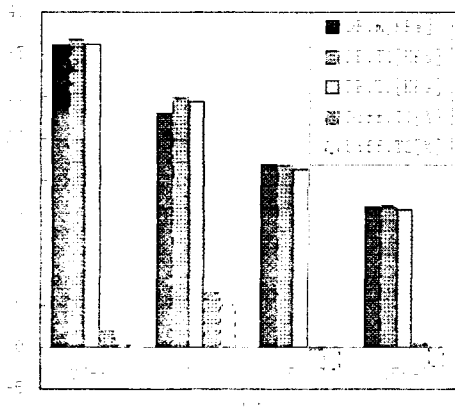


그림 4 ANTEEF 분석치와 측정치와의 비교

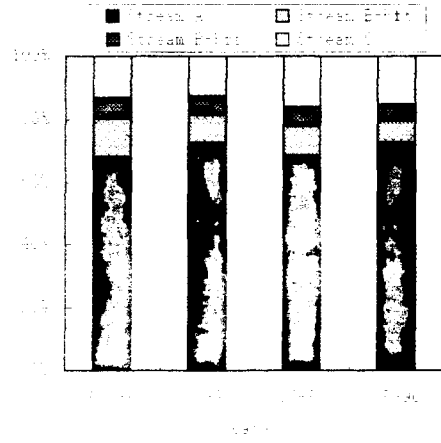


그림 5 일교환기제 유종의 구성비

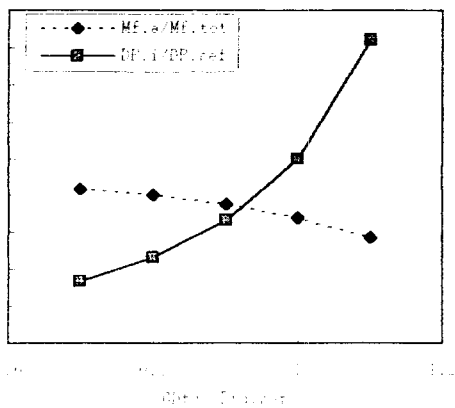


그림 6 관외경이 유종과 압력손실에 미치는 영향

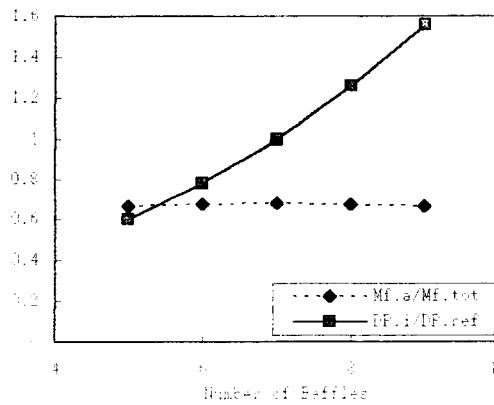


그림 7 관막이 숫자가 유종과 압력손실에 미치는 영향

2.2.2 (3) 안의 경우는 증기 또는 수소기체가 발생시 이를 충분히 배출하기 위해 최소한 4.9 cm 내경의 연결관이 설계되어야 하며, 설계의 특성상 정상운전시 원자로용기의 유량이 가압기로 유입되지 않기위해 가압기에 연결되는 연결관의 위치는 가압기 상부보다 4 m 정도 높게 설치되어야 했다.

3.결론

(1)안의 경우는 다른 설계안에 비하여 설계 특성상 가압기 전열기의 용량이 28% 증대되어야 하므로 이를 채택시 설계에 미치는 영향이 크다고 판단되었고, (2) 안의 경우는 다른 유형에 비하여 연결관의 직경이 다른 설계안에 비하여 약 2배 정도 크게 요구되어 원자로용기 상부헤드에 미치는 영향이 클것으로 판단되었다. 여러가지 설계안중 (3) 안의 경우는 가압기에 연결되는 연결관의 위치가 가압기 상부보다 4m 높게 설치되어야 하나, 다른 설계안에 비하여 기존설계에 미치는 영향이 가장 미소하고 EPRI의 설계요건을 만족하는 가장 적합한 설계안으로 분석되었다.

참고 문헌

1. EPRI, EPRI Utility Requirement Document, Chapter 4, 1987
2. Crane Co., Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe, 1976
3. Ingersoll-Rand, Cameron Hydraulic Data, 1981
4. KEPCO, YGN 3&4, Final Safety Analysis Report, Chapter 1, 3&5
5. MPR Associates, Inc., ALWR Reactor Vessel Head Vent, 1988.1

표 1 기본 설계수치값

	항 목	설계값
1	원자로냉각재계통의 총체적	325.7 m ³
2	가압기의 운전온도	345 °C
3	계통 운전압력	158.2 kg/cm ²
4	고온관의 운전온도	327.3 °C
5	잔열제거계통 작동압력	28.8 kg/cm ²
6	원자로용기상부에서 노심상부지지판까지 유체체적	6.8 m ³
7	원자로용기상부에서 노심상부지지판까지 유체질량	24,200 kg
8	원자로용기상부에서 노심상부지지판까지 몸체중량	199,100 kg

나. 발전소 사고로 인하여 원자로용기내에 수소기체가 발생시 이를 배출하기 위한 설계 검토

1) 가정

사고시 원자로용기에서 수소기체의 발생은 TMI 사고의 전개과정[5]과 동일하게 가정하였고, 발생한 수소기체의 양은 1시간 내에 원자로냉각재 유량의 반이 수소기체로 변환되는 것으로 가정하였다.[1]

2) 분석

위 1).가) 항을 근거로 원자로용기에서 생성된 수소기체가 가압기로 유입된 양은 978 kg/hr 이었고, 이를 제거시키기 위해 계산한 각각 설계안별 연결관 내경은 다음과 같다.

(1) 설계안 : 3.7 cm , (2) 설계안 : 3.9 cm , (3) 설계안 : 3.9 cm

다. 설계안의 특성에 따라 고려해야할 설계사항 분석

1) (1)안의 경우는 정상 운전시 가압기와 원자로용기간에 수두 및 온도차로 인하여 원자로용기 유량 2,778 kg/hr이 가압기로 유입되므로 추가되는 가압기 전열기 용량을 계산한 결과 514 kW가 필요하였다. 이 값은 기존 전열기 용량의 28%이다.

2) (3)안의 경우는 (1)안에서 고려된 정상운전중 유량의 유입을 배제하기 위한 설계로서 가압기에 연결되는 연결관은 가압기의 상부헤드보다 4 m 이상 높게 설치되어야 했다.

2.2 결과

지금까지 분석된 결과는 표 3와 같다.

2.2.1 (1) 안의 경우는 증기 또는 수소기체가 발생시, 이를 충분히 배출하기 위해 최소한 4.6 cm 내경의 연결관이 설계되어야 하며, 설계의 특성상 가압기의 전열기용량이 기존용량의 28%인 514 kW가 증대되어야 했다.

2.2.2 (2) 안의 경우는 증기 또는 수소기체가 발생시 이를 충분히 배출하기 위해 최소한 8.2 cm 내경의 연결관이 설계되어야 했다.

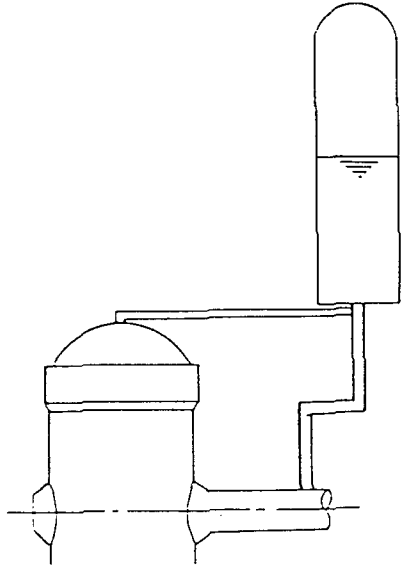


그림 2b (2) 안 원자로용기와 가압기 연결도

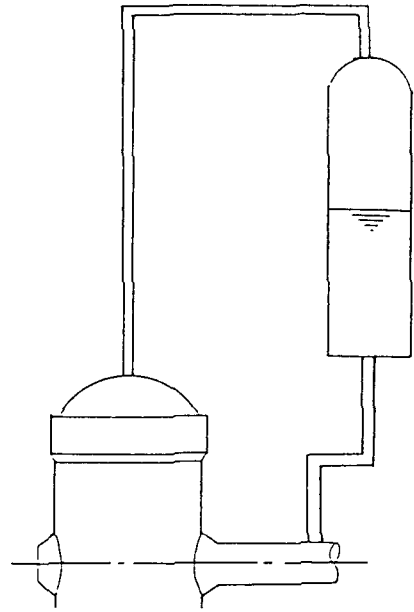


그림 2c (3) 안 원자로용기와 가압기 연결도