

'95 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

증기발생기 건전성관련 고온관의 적정온도 설정을 위한 분석

민경성, 한규성, 박순희

한국원자력연구소

요 약

국내, 외에서 원자력발전소의 주요 구성 기기인 증기발생기의 세관 건전성과 관련 설계개선을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[2,3,4,5,6]. 현재 가동중인 발전소에서는 개선된 증기발생기로 교체하고자 하는 검토가 이루어지고 있으며, 설계중인 발전소에서는 증기발생기의 건전성을 향상시키기 위한 노력이 진행되고 있다. 본 논문에서 기존에 조사되고 검토된 자료를 바탕으로 [2] 현재까지 주로 사용되어온 증기발생기의 세관 재질을 인코넬 600 MA(mill annealed)로 사용할 때 40년 수명동안 증기발생기의 건전성을 보장할 수 있는 고온관의 온도를 분석한 결과 적절한 온도가 607 ° F(319.4 ° C)임을 알았다. 그리고 이 온도를 반영할 때 계통설계에 영향을 주는 설계사항에 대하여 검토하였고, 추가로 인코넬 600 MA보다 고온조건에서 건전성이 양호한 인코넬 690 TT(thermal treatment)를 사용할 때 설계에 미치는 영향도 검토하였다. 이러한 분석결과는 추후 국내 원자력발전소에서 보다 증기발생기의 건전성을 보장하기 위해 설계개선을 하고자 할 때 기초 자료가 되리라 판단한다.

1. 서 론

1.1 배 경

세계적으로 증기발생기의 건전성을 발전소 수명기간동안 유지하기 위해 증기발생기의 설계개선과 증기발생기의 건전성에 영향을 주는 설계 인자에 대한 연구가 활발히 수행되었다 [2,3,4,5,6]. 가압경수로형 발전소에서 증기발생기의 기능은 노심으로부터 발생된 열을 1차냉각수로부터 전달받아 2차 냉각수를 통해 전력을 생산하게 하는 역할을 한다. 증기발생기는 설계에 따라 또는 발전소 용량에 따라 크기와 개수가 상이하다. 전세계적으로 지금까지 증기발생기 세관 재질로는 주로 인코넬 600 MA를 사용하여 왔다. 인코넬 600 MA는 재질의 특성상 고온에서 건전성이 취약하여 사용중 균열로 인해 잦은 보수를 야기하였다[3,4]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 고온조건에서 인코넬 600 MA보다 건전성이 강한 인코넬 690 TT로 교체하는 방안이 검토되었고

[5], 이러한 안이 현재 가동중인 발전소 및 설계중인 발전소에서 검토되고 있다. 이미 일부 발전소에서는 새로운 세관 재질로 재설계하여 증기발생기가 교체된 발전소도 있다. 재질 특성상 인코넬 690 TT는 인코넬 600 MA보다 열전달율이 떨어져[2] 같은 용량의 열을 전달하기 위해선 열전달면적이 증가되어야 한다. 이와 관련하여 일부 발전소에서는 인코넬 690 TT를 사용할 때 제작상 제한 요건 때문에 발생하는 문제점도 검토되었다.

현재 세계적으로 상용 가압경수로의 수명은 40년을 기준으로 설계되고 있다. 차세대 발전소에서는 현재보다 수명이 연장된 60년을 목표로 설계하고 있다. 따라서 차세대 발전소 설계에서 발전소 수명연장과 병행하여 증기발생기의 건전성에 대한 중요성이 더욱 부각됨에 따라 가능한 증기발생기의 건전성을 보장할 수 있는 연구가 지속적으로 수행되고 있는 것이다. 미국에서는 미국의 대표적인 전력그룹인 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 많은 경험자료와 실험자료로부터 발전소 고온관의 설계온도가 600 ° F (315.6 ° C)를 초과하지 않도록 권장하였다[8]. 본 논문에서는 이러한 차세대 자료를 통하여 1000 MWe급 원자력발전소를 모델로 40년 발전소 수명기간 동안 증기발생기의 건전성을 보장할 수 있는 방안에 대해서 2가지 사항을 검토하였다. 첫째는 세계적으로 증기발생기에서 발생된 사례와 실험적 해석결과로부터 적절한 고온관의 온도를 설정하였고, 둘째로 이를 근거로 현재 주로 상용되고 있는 인코넬 600 MA와 인코넬 690 TT를 사용할 때 설계에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 증기발생기의 세관재질이 설계에 미치는 영향

인코넬 600 MA 및 인코넬 690 TT의 재질 및 열전달계수 특성은 참고문서 [1]에서 이미 분석된 바 있으며, 이 자료로부터 동일한 설계조건에서 인코넬 690 TT를 이용할 때는 인코넬 600 MA를 사용할 때보다 대략 열전달면적이 5%정도 증가되어야 함도 알았다[1]. 기존 발전소의 설계에서 인코넬 690 TT를 선택할 때 증기발생기의 열전달면적의 증가를 요구함에 따라 기존 증기발생기 설계와 관련 제작 측면에서 발생할 수 있는 설계인자들이 검토되었다. 현재 국내에서 운전중이거나 건설 설계중인 발전소의 증기발생기에 대한 설계사항은 표1과 같으며, 설계사는 주로 웨스팅하우스, 프라마름, ABB-CE(Asea Brown Boveri Combustion Engineering)사에서 수행하였다. 각사의 발전소 설계의 특성을 보면 웨스팅하우스사와 프라마름사는 설계 개념이 동일하게 각 loop당 한 개의 냉각재펌프로부터 열이 전달되며, ABB-CE사의 설계는 1개 loop가 두개의 냉각재펌프로부터 열이 전달된다. 따라서 ABB-CE사에서 제작한 증기발생기의 크기는 기존 국내의 웨스팅하우스사나 프라마름사에서 설계한 발전소의 증기발생기에 비하여 상대적으로 크게 설계되어 있다. 따라서, 세관재질 교체에 따른 증기발생기 설계는 상대적으로 증기발생기가 큰 ABB-CE사의 설계에 영향을 크게 주었다.

2.2 고온관 온도 설정 및 관련 설계사항 검토

2.2.1 고온관 온도 산정

참고 문서 [1]에서 전세계 발전소를 대상으로 균열이 발생한 발전소의 조건과 시점에 대한 자료가 소개되었다. 이를 근거로 EPRI에서 차세대 발전소의 고온관의 온도 요건을 60년 수명으로 선정시 600 ° F(315.6 ° C)이하로 설계되어야 하는 요건을 제시하였다[8]. 본 논문에서는 1000 MWe급 발전소로서 수명을 40년 기준으로 87%의 발전소 이용률을 가정할 때 가장 적합한 고온관의 온도를 다음과 같이 구하였다. 40년 수명기간동안 87%의 이용률을 가정할 때 유효한 발전소 이용시간(EFPH:Effective Full Power Hours)은 약 305,000 EFPH이다.

가) 증기발생기 세관중 U-band에서의 온도는 식(1),(2)과 같다.[3]

1) 운전경험자료로부터의 관계식

$$tf = 1.58 * 10^{-22} \exp(54.9 * 1000/T) \text{ ----- (1)}$$

2) 실험결과로부터의 관계식

$$tf = 1.46 * 10^{-14} \exp(3.6 * 10000/T) \text{ ----- (2)}$$

여기서, $tf : EFPH/1000 = 25.4$ (305,000 EFPH에 실험보정값 12배를 고려한 값)

(1), (2)식으로부터 증기발생기 세관중 U-band관련 온도는 각각 567.4 ° F(297.4 ° C), 565.9 ° F(296.6 ° C) 임을 알았다.

위 결과로부터 고온관의 온도로 역추한 값은 609 ° F(320.6 ° C), 607.5 ° F(319.7 ° C) 임.(참고문서 [2]로부터 고온관과 저온관의 온도차를 65 ° F(18.3 ° C)로 정하였고, U-band의 온도는 대략 이값의 64%를 예상하였다.)

나) 증기발생기의 세관과 고온관 접속부분에서의 온도는 식 (3), (4)와 같다[3].

1) 운전경험자료로부터의 관계식

$$tf = 2.44 * 10^{-20} \exp(51.6 * 1000/T) \text{ ----- (3)}$$

2) 실험결과로부터의 관계식

$$tf = 5.68 * 10^{-14} \exp(3.6 * 10000/T) \text{ ----- (4)}$$

위 (3),(4)식으로부터 계산된 온도는 각각 606.2 ° F(319 ° C), 607.2 ° F(319.6 ° C)임을 알았다

위 가)와 나)의 결과로부터 인코넬 600 MA로서 40년 동안 증기발생기의 건전성을 보장하기 위해 적절한 고온관의 온도는 607 ° F(319.4 ° C)이고 계통설계는 고온관의 온도가 607 ° F(319.4 ° C)이하로 설계되어야 함을 알 수 있다.

2.2.2 고온관 온도 607 ° F(319.4 ° C)와 증기발생기 면적에 대한 비교검토

인코넬 600 MA과 인코넬 690 TT의 증기발생기 재질을 이용하여 기존설계 고온관 온도 621.2 ° F(327.3 ° C)에서 607 ° F(319.4 ° C)로 감소시 증기발생기 열 전달에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 인코넬 600 MA와 인코넬 690 TT의 온도에 따른 열전달계수의 변경은 표 2와 같으며, 해석에 사용된 code는 LAZYE computer code로서 option 3을 사용하였다. [7] 여기서, option 3은 증기발생기의 열전달 면적과 이차 축의 압력 변화, 노심을 흐르는 유량의 변화에 따라 고온관의 온도 변화를 검토할 수 있는 조건이다. 검토결과는 그림 1, 2, 3과 같다. 그림 1은 인코넬 600 MA를 사용하고 온도를 621.2 ° F(327.3 ° C)에서 607 ° F(319.4 ° C)로 온도를 감소시킬 때 분석된 결과이며, 그림 2는 인코넬 690 TT를 사용한 결과이고, 그림 3은 세관재질에 따라 고온관 온도를 감소시킬 때 분석된 결과이다.

2.2.3 분석 결과

- 1) 그림 1에서와 같이 인코넬 600 MA재질로서 고온관의 온도를 621.2 ° F(327.3 ° C)에서 607 ° F(319.4 ° C)로 감소시 증기발생기의 열전달 면적은 대략 33%정도 증가되어야 함.
- 2) 그림2와 그림3으로부터 인코넬 690 TT재질로서 교체시 증기발생기의 열전달 면적은 대략 33 %정도 증가되어야 하고 고온관 온도를 621.2 ° F(327.3 ° C)에서 607 ° F(319.4 ° C)로 변경 시엔 38 % 정도 열전달면적이 변경되어야 한다.

4. 결론

- 1) 인코넬 600 MA의 증기발생기 세관재질로서 40년 발전소 수명동안 건전성을 보장하기 위해서는 고온관 온도가 607 ° F(319.4 ° C)이하로 설계되어야 한다.
- 2) 현재의 설계조건 고온관 온도를 621.2 ° F(327.3 ° C)에서 607 ° F(319.4 ° C)로 설계 변경 시 동일한 열 출력의 생산을 위해서는 증기발생기의 열전달면적이 약 33 % 증가되어야 한다.
- 3) 인코넬 600 MA대신 인코넬 690 TT로 재질 변경 시엔 인코넬 600 MA보다도 증기발생기의 열전달면적이 약 5 % 증가되어야 하였다.

참고 문헌

1. '95 춘계학술발표논문집(I), "원자력발전소 고온관 온도와 증기발생기세관 재질에 대한 설계분석", 한국원자력학회, 1995.5
2. MPR Associates, Inc., "ALWR Requirements Document - Reactor Coolant Temperature Limit", 1987.2
3. F.P.Vaccaro, G.J. Theus, B.P. Miglin, "The Effect of Steam Generator Tube Temperature on the Stress Corrosion Cracking of Alloy 600", Babcock & Wilcox, Research and Development Division, Transmitted by EPRI Memorandum, 1986 11.17.
4. C.M.Owens, "Corrosion Performance of Alloys 600 and 690 Steam Generator Tubing in Standard and Modified Nitric Acid Tests", Corrosion-NACE, Paper 91, 1987.3
5. Bandy, R. & Van Rooyan, D., "Stress Corrosion Cracking of Inconel Alloy 600 in High Temperature Water - An Update", Corrosion-NACE, Vol. 40, No.8, August 1984
6. 박천태, "원자로냉각재 고온관 온도 감소가 핵증기공급계통의 설계에 미치는 영향 예비분석", 한국원자력연구소, 1994.5
7. LAZYE computer code manual
8. EPRI URD, Chapter 4, 1987.

표 1 인코넬 600/690의 열전달계수 비교

온도 (°C)	열전달 계수 (Cal./hr-m ² -°C)		비례
	인코넬 600	인코넬 690	
21.1	41.88	-	-
93.3	44.33	37.82	1.172
204.4	49.21	43.51	1.131
315.6	54.09	49.61	1.090
426.7	58.97	55.31	1.066

표 2 국내 원전의 증기발생기 입력자료 비교

호 기	용량 (만 kW)	NSSS설계사	RCP 개수	LOOP 수	증기발생기(1 대)		
					세관수	열전달면적	높이
고리 2	65	웨스팅하우스	2	2	5,624	5,114 m ²	20.6 m
고리 3,4	95	웨스팅하우스	3	3	5,626	5,110 m ²	20.6 m
영광 1,2	95	웨스팅하우스	3	3	5,626	5,110 m ²	20.6 m
영광 3,4	100	ABB-CE	4	2	8,214	9,523 m ²	20.9 m
울진 1,2	95	프라마툼	3	3	3,300	4,699 m ²	20.6 m
울진 3,4	100	한원연	4	2	8,214	9,523 m ²	20.9 m

그림 1 인코넬 600 MA 사용시 고온관 온도와 증기발생기 열전달면적과의 관계

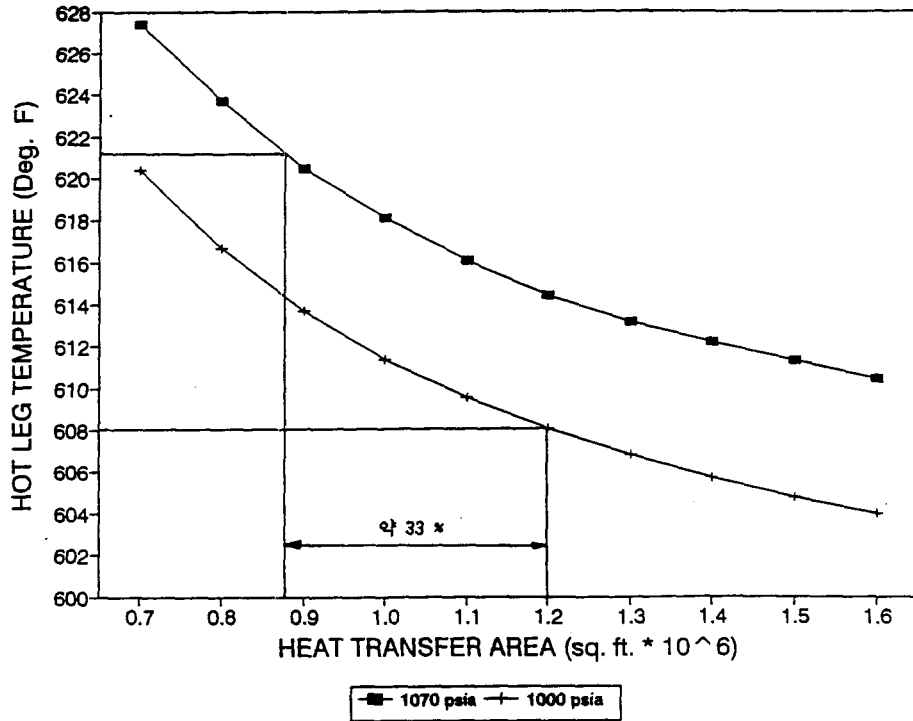


그림 2 인코넬 690 TT 사용시 고온관 온도와 증기발생기 열전달면적과의 관계

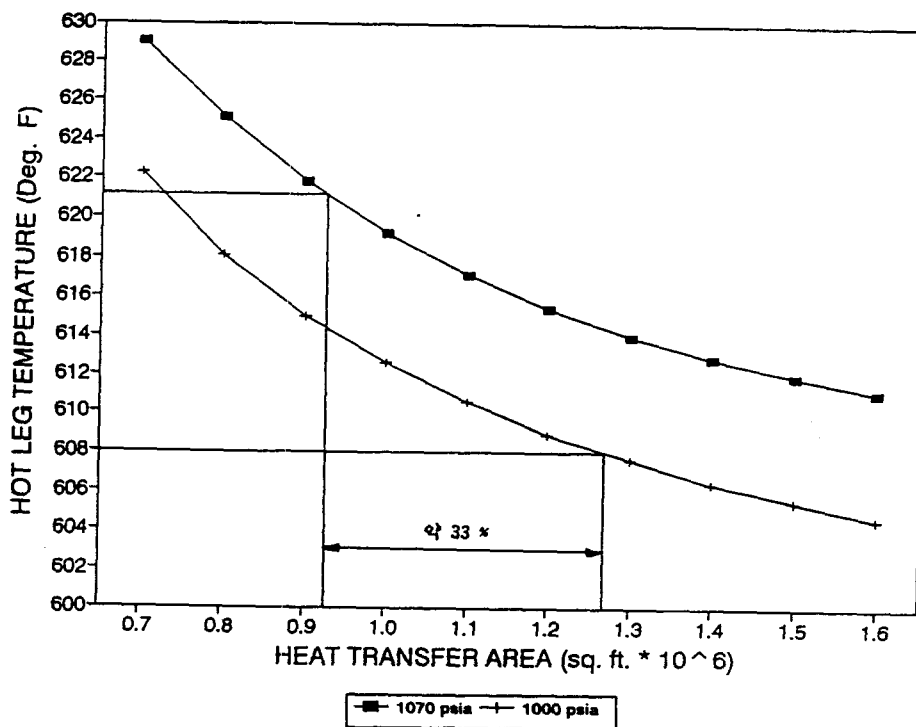


그림 3 인코넬 600 MA를 690 TT로 변경시 증기발생기 열전달면적의 비교

