신형경수로 증기발생기 마모손상 억제를 위한 설계최적화

임혁순+, 박영섭*, 이광한*, 이석호*, 정대율*

The Design Optimization of Preventive Measure Against APR1400 Steam Generator Tube Fretting Wear

Hyuk-Soon LIM, Young-Sheop PARK, Kwang-Han LEE, Seok-Ho LEE, Dae-Yul CHUNG

Key Words: APR1400 Steam Generator(신형경수로1400 증기발생기), Inconel-690(인코넬-690), F.I.V(유체유발 진동), Egg-crate Flow Distribution Plate(유량분배판)

Abstract

Inconel-600 alloy has been used as steam generator tube material for current pressurized water reactors (PWRs). The long-term operation of steam generators showed that the use of this material induced localized corrosion damages and increased tube wear of steam generator. To protect these problems, steam generator tube material is being changed to Inconel-690 alloy. Based on the current trend, we have chosen Inconel 690 as the Advanced Power Reactor 1400 (APR1400) steam generator(SG) tube material and performed the design optimization of preventive measure against tube fretting wear for the APR1400 steam generator. In this paper, we examined the technical consideration in this modification : the selection of material, wear characteristics, effect of the Egg-crate Flow Distribution Plate installation, and effect analysis of vertical strip installation.

기호설명

EFDP : Egg-crate Flow Distribution Plate
F.I.V : Flow-induced Vibration
UBS : Upper Bundle Support
RMS : Root Mean Squire

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기는 원자로 냉각재 계통에서 생성된 열을 2차측으로 전달하는 것으로 1차측과 2차측의 압력경계부를 이루고 있다. 증기발생기 전열관의 손상은 증기발생기 교체요구 등 발전소의 안전성 관련 문제를 야기 시키는 것 이외에도 원자로 불시정지, 전열관 건전성 검사범위 확대, 전열관 폐쇄 및 보수와 관련되는 경제적 손실을 수반한다. 따라서 원자력 발전소의 안전성 및 경제성 향상을 위해 증기발생기 전열관의 건전성이 매우 중요하다. 현재 세계적으로 대부분의 가동원전 증기발생기 재질로써 I-600을 사용하고, 증기발생기 전열관에서 유체유발 진동에 의한 마모현상이 발생하고 있어 전열관의 마모현상에 대하여 관심사항으로 대두되고 있다. 본 논문에서는 신형경수로 증기발생기의 특성, 전열관 손상추이, I-600 및 690의 재질 및 마모 특성, 전열관 마모억제를 위한 설치개선의 기술적 타당성을 제시하고자 한다.

+ 한수원(주) 원자력환경기술원
E-mail : LHS6169@khnp.co.kr
TEL:(042)865-5763 FAX:(042)865-5704
* 한수원( ) 원자력환경기술원

2. 신형경수로1400 증기발생기 특성

APR1400 증기발생기는 한국형 표준원전(KSNP) 증기발생기에서 발생하는 전열관 진동문제를 해결하기 위한 설계개선이 이루어 졌다. 중앙공동 및 U-bend 영역에서의 높은 유동 에너지를 감소시켜 전열관 다발 상부 U-bend 영역에서 발생된 마모를 방지하기 위해 최상부 Full egg- crate의 중앙 공동부분에 볼트로 결합된 유량 분배판 (Egg-crate Flow Distribution Plate : EFDP)을 설치하였다. 또한, 마모가 집중되는 전열관을 구속시키기 위하여 기존의 U-bend 전열관 다발 중앙에 Vertical Strip 및 Horizontal Strip을 추가하여 고유진동수가 낮은 전열관 발생을 근원적으로 제거하기 위한 설계개선을 수행 하였다.

3. 전열관 손상유형 및 마모손상기구

3.1 전열관 손상유형

3.1.1 손상종류

○ 덴팅(Denting)
전열관 지지판이나 전열관시트 사이에 이물질이 침적되어 전열관이 밖에서 안에서 찌그러드는 현상

○ 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking)
고온부에서 불순물로 인한 부식과 응력집중에 의해 발생하는 부식균열

○ 기계적 마모(Fretting)
진동에 의한 기계적 접촉 마모

○ 점식(Pitting)
이물질이 금속표면에 침적하여 발생하는 국부적인 부식현상

○ 감육(Thinning)
전열관지지판이나 전열관 시트등과 전열관 사이의 접촉 밀림 및 전열관속의 1차 냉각재 유속으로 인하여 전열관이 얇아지는 현상

3.2 전열관 손상추이

원자로 1차 냉각재의 외부 방출을 방지하기 위하여 증기발생기 전열관은 균열, 관통부 및 일반적인 성능 저하가 없어야 한다. 전열관의 손상추이는 1976년에 증기발생기 수질제어를 위하여 사용한 인산염에 의한 Thinning이 가압경수로 증기발생기의 주요 전열관 성능저하의 원인이었으나 1976~1979년 사이에는 Denting이 주된 손상원인으로 등장하였다. 1979년 이후에는 전열관 외측에서 외경부 결정입계부식/응력부식균열(ODSCC/IGA) 내측에서는 1차측 응력부식 균열(PWSCC) 등이 다양한 형태의 부식유형으로 발견되었다. 1983년부터는 마모에 의한 손상이 점차 증가하기 시작하였다. 최근 국내원전의 증기발생기 전열관에서도 중앙공동(Central Cavity) 상단 지역으로 전열관 지지대 사이 간격이 길고, 통과 유속이 높은 지역에서 유체유발진동에 의한 마모현상이 발생되고 있어 이에 대한 구조적인 현상 파악이 관심사항으로 대두되고 있으며 설계 단계에서 전열관 마모억제를 위해 설계개선을 추진하였다. [그림1]

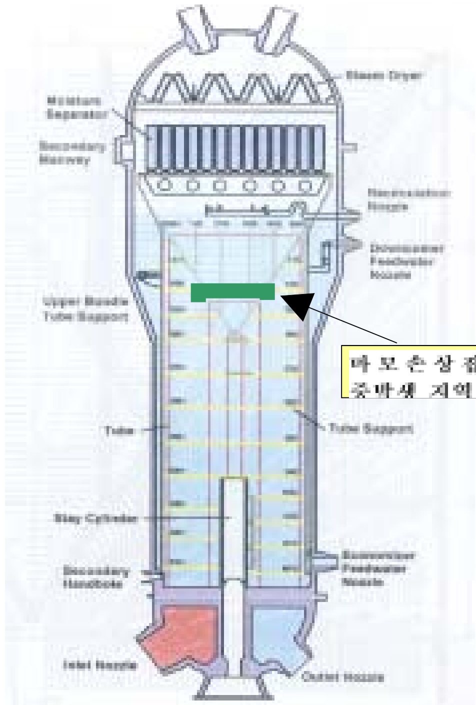


Fig. 1 Region of fretting wear in S/G tube

3.3 증기발생기의 전열관 마모손상 기구

증기발생기내부는 1차측 냉각수와 2차측 급수의 열교환이 이루어지고 있는 곳으로 빠른 유체의 흐름이 발생되고 있으며 2차측에 유입된 이물질로 인해 유체 흐름이 많은 방해를 받고 있다. 이러한 방해에 의해 유속이 달라지고 유체의 흐름방향이 전열관의 위치에 따라 매우 불분명하게 나타나게 되며, 이를 예측하기는 매우 힘들다. 이러한 원인으로 전열관과 지지대 사이에서는 유

체유동에 따른 계속적인 진동이 발생하게 되면 전열관은 많은 마모손상을 입게 된다. 이와 같이 증기발생기내에서의 전열관과 지지대사이에는 유체유발 진동에 기인된 마모로 인해 전열관은 열화 된다. 전열관과 지지대 사이의 두 접촉면 사이에 큰 주파수와 작은 진폭으로 슬라이드 등과 충격이 동시에 작용되어 마모현상을 기계적 마모라 한다. 증기발생기에서 발생되는 마모의 유형은 일반적인 형태의 기계적 마모와, 유량의 빠른 움직임에 기인된 잦은 충격과 진동에 따른 충격-진동 형태의 기계적 마모가 발생되고 있다.

3.3.1 기계적 마모(Fretting Wear)

좁은 간격사이에서 상대적으로 작은 진폭과 높은 주파수를 가지고 슬라이딩과 충격에 의하여 접촉면이 계속적인 마찰을 하게 되면 접촉면은 일종의 기계적인 마모의 한 형태로 마모가 발생하게 된다.

3.3.2 충격-기계적 마모(Impact-Fretting Wear)

기계적인 마모에 외부로부터의 잦은 충격이 더해지면서 충격-기계적 마모의 형태가 발행된다. 이는 증기발생기의 전열관 지지대 사이에서 가장 많이 발생하는 형태이다. 따라서 다음과 같이 일반적인 기계적 마모와 구분된다.

- 두 접촉면 사이에서 마모된 입자가 제거
- 두 접촉면 사이에서 항상 충격력이 작용

4. S/G전열관 마모억제를 위한 설계개선

4.1 전열관 재질 I-690 선정

4.1.1 화학적 조성

가압경수로의 증기발생기 전열관은 일반적으로 I-600을 사용하였으나 Ni-Cr-Fe인 오스테나이트계 고용체 합금으로 고온에서 안전하고, 성형성, 내부식성 및 고온 기계적 특성이 우수한 재질인 I-690을 사용한다. 전열관 재질이 I-600 보다 I-690을 사용할 경우 상온 및 고온에서 기계적 특성과 마모억제 측면에서 유리하다. [표1]과 같이 I-690은 I-600에 비해 Ni의 함량은 줄어든 반면 Cr의 함량을 2배 정도 증가하였으나 재질의 평형구조는 동일하다.

Table1. Chemical composition(%) of I-600 and I-690

재 질	Composition, Wt %							
	Fe	Ni	Cr	C	Mn	Si	Al	Ti
I-600	8	72	15	.03	.2	.1	.2	.25
I-690	10	58	30	.02	.2	.1	.2	.25

4.1.2 두전열관 재료의 마모속도

전열관 재질 I-600 및 I-690의 전열관 마모량를 측정하기 위하여 각 슬라이당 진폭(50~500 ㎛)의 범위에서 10~30N 의 수직하중을 가하여 상온상태에서 마모실험 결과 I-600/405 스테인레스강과 I-690/409 스테인레스강에서 같은 수직하중하에서 슬라이딩 거리에 따른 전열관 재료의 마모량은 그림[2,3,4]와 같이 나타났다. 실험분석결과 수직하중 증가에 따른 마모량의 증가는 두 전열관 재료에서 잘 나타나 있으며 전열관을 비교해 볼 때, 특히 낮은 하중하에서의 마모특성을 비교해 볼 때 인코넬 690이 내마모성이 우수한 것으로 명확히 나타났다.

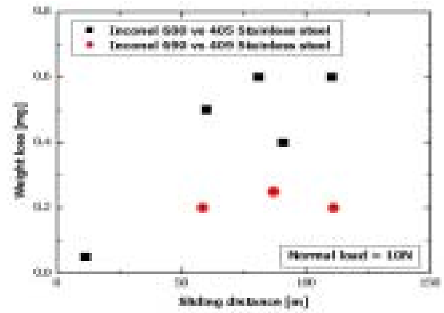


Fig. 2 Comparison of wear quantity (Vertical load : 10N)

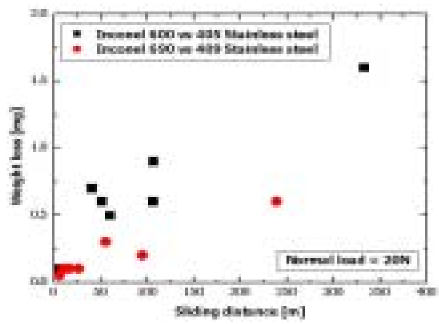


Fig. 3 Comparison of wear quantity (Vertical load : 20N)

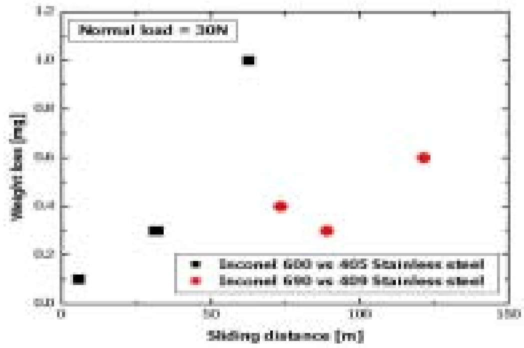


Fig. 4 Comparison of wear quantity (Vertical load : 30N)

4.1.3 마찰계수

수직하중에 따른 마찰계수의 변화는 큰 차이를 보이고 있지 않으나 같은 수직 하중하에서 슬라이당 거리가 증가함에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 슬라이딩 진폭이 낮을 경우 I-690 전열관이 다소 낮은 마찰계수 값을 보이고 있었으며 특히, I-690/409 스테인레스강을 사용할 경우 매우 낮은 마모계수 값을 그림5와 같이 보이고 있다. 따라서 I- 690/409을 사용할 경우 전열관 마모관점에서는 매우 유리한 것으로 판단된다.

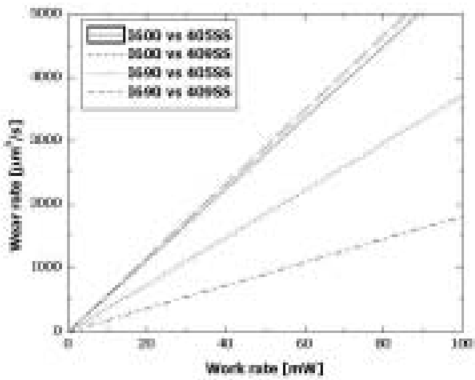


Fig. 5 Wear coefficient comparison of I-600 & I-690

4.1.4 손상면 관찰

상온 물 분위기에서 마모실험을 수행한 뒤 표면에서 변형특성을 관찰하기 위하여 주사식 전자현미경(SEM)을 이용하여 손상면을 관찰 한 결과 다음과 같이 나타내었다. I-600인 경우 접촉면에서 마모과정중 형성된 소성 변형층의 두께가 매우 크게 나타나고, I-690인 경우 소성 변형층의 두께가 상대적으로 얇고 떨어져나가는 입자의 크기 또한 작게 나타나 마모 감소측면에서도 I-690이 유리한 것으로 관찰 되었다.[그림6,7]

Fig. 6 Observation of worn surface in I-600

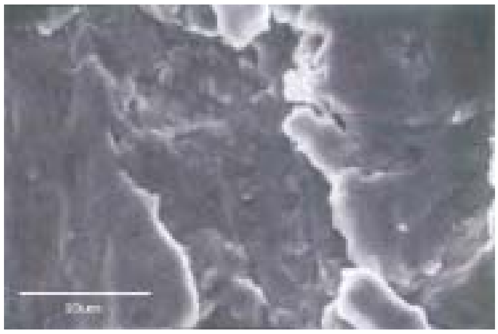


Fig. 7 Observation of worn surface in I-690

4.2 전열관 마모억제를 위한 설계개선

국내 표준원전의 증기발생기는 운전초기에 전열관 진동에 기인하여 중앙 공동부 상단의 전열관 일부에서 마모로 인한 두께 감육이 발생하였다. 마모의 원인 분석결과 중앙 공동부 상단 지역은 전열관의 지지대 사이의 간격(Tube Span길이)이 상대적으로 길고, 통과 유속이 높아 고유동 에너지가 발생 및 전열관의 낮은 고유 진동수에 기인하는 것으로 확인 되었다. 따라서 신형경수로1400 증기발생기의 전열관 마모에 의한 손상 발생 가능성을 억제하기 위하여 다음과 같이 설계개선을 수행하였다.

4.2.1 전열관 다발 직경증가

유체유속을 감소시키 위해 신형경수로의 증기발생기 전열관 다발은 기존의 증기발생기 전열관보다 높이는 일정하게 유지하는 대신 직경을 증가시켰다.

4.2.2 유량분배판(EFDP) 설치

중앙 공동부에서 발생되는 높은 유동에너지를 감소시키기 위하여 전열관의 최상단에 유량분배판(EFDP)을 설치하였다.[그림8]

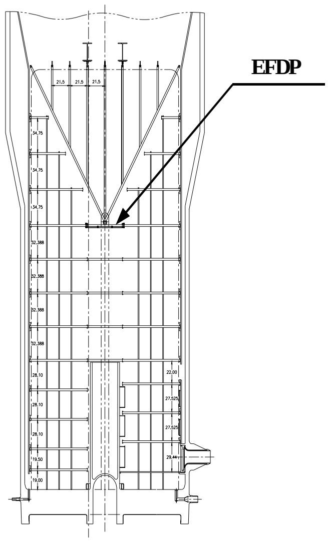
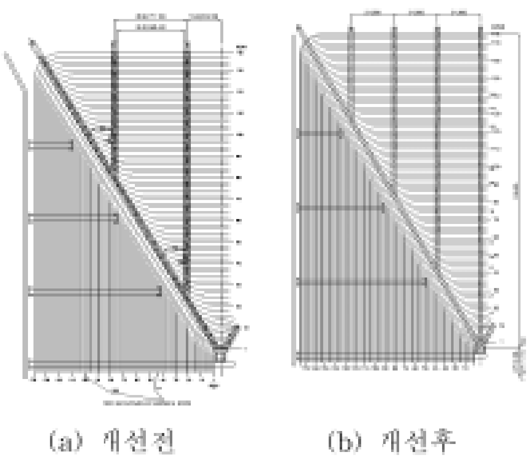


Fig. 8 EFDP of the Steam Generator

4.2.3 UBS(Upper Bundle Support) 개선

중앙 공동부 상단에 위치한 전열관의 진동특성인 고유진동수를 증대시킬수 있도록 Vertical UBS(Upper Bundle Support) 중앙에 Vertical Grid와 Horizontal Grid를 [그림9]와 같이 추가 설치하였다.



(a) 개선전 (b) 개선후

Fig. 9 Upper tube bundle supports before and after design improvement

4.3 설계 개선효과

4.3.1 전열관 다발 직경증가에 따른 효과

마모측면에서 전열관 다발 직경 증가는 긍정적인 효과가 있다. 즉, 전열관 다발 직경증가는 2차측 유동 면적을 증가시키므로 2차측 유동의 평균 속도를 감소시킨다. 따라서, 속도가 낮은 환경에서 운전되는 전열관은 2차측 유동에 의한 마모손상 가능성이 낮아질 것이다. 분석결과 선행호기 대비 신형경수로1400 증기발생기는 유량 증가분보다 초과한 유동면적 증가로 인해 각 위치별 2차측 유체 평균 속도는 선행호기 보다 약 10%정도 감소되는 것으로 분석되었다.[표2] 따라서, 열출력 증가에 따른 전열면적증가분을 반경방향으로 반영한 설계 개념은 2차측 유체 평균 속도를 상대적으로 낮추는 효과가 있기 때문에 2차측 유속에 의한 마모 손상은 감소될 것으로 판단된다.

Table2. Average velocity of Egg.

변수		개선전	개선후	편차 (%)
2	(10^6 lb/hr)	25.10	35.35	40.9
유동 면적 (ft^2)		122.0	186.3	52.7
평균 속도 (ft/sec)	Full Eggcrate #5	3.34	2.81	-15.88
	Partial Eggcrate #1	3.65	3.20	-12.20
	Partial Eggcrate #2	4.04	3.68	-8.90
	Partial Eggcrate #3	4.17	3.81	-8.54

4.3.2 유량분배판(EFDP) 설치에 따른 효과

마모발생의 근본 원인 중 하나인 중앙 공동부 상단에서의 유동에너지를 완화 시키기 위해 EFDP를 설치한 후 증기발생기 내부에서의 열수력 변수 검토 결과 중앙 공동부 상단에서 변수 값이 상당히 완화되었다. 유동유발 진동에 영향을 미치는 열수력 변수들의 결과는 설계 개선 전후에 분석결과를 [표3]에 제시하였으며, (IZ=30 영역, 중앙공동부에서 평균값) 진동 평가 시에 직접적으로 적용되는 Dynamic Pressure의 경우 약 42%의 개선 효과가 나타났음을 알 수 있었다.

Table3. Thermal-hydraulic analysis results

구 분	개선전	개선후	증감율 (%)
Density, lb/ft^3	21.44	18.70	- 12.8
Velocity, ft/sec	4.50	3.67	- 18.4
Mass Flux, lbm/ft^2-sec	96.59	68.54	- 29.0
Dynamic Pressure, psi	0.0469	0.0272	- 42.0

4.3.3 상부번들 지지대(UBS)설치 개선효과

유량분배판(EFDP) 설치만으로 마모에 의한 전열관 두께 감소를 충분히 방지하기 어렵기 때문에, 추가적인 설계 개선 방안으로 고려된 것은 전열관지지 구조물을 보강하는 방안이다. 구체적인 설계 결과는 [그림9] 에 나타나 있듯이 전열관 다발 가운데 Vertical Support를 추가하고 지지대 효율성을 고려하여 인근 Vertical Strip 사이의 간격을 조절하였으며, 개선된 설계에 대해 구조적 건전성 및 F.I.V 영향 평가를 수행하였다. 전체적으로 마모손상 억제를 위한 설계개선의 효과를 표준설계와 비교하여 요약하면 [표4] 과 같이 설계개선 효과를 요약하면 가장 취약한 전열관에서 안정비는 약 78%, 진동비 변위에서는 약 95%가 개선된 것으로 나타났다.

Table4. Summary of design improvement effect

Design	Stability Ratio	최대진동 변위 (mils)	비고
표준설계	0.730	26	SR 권고값 : 1.0 이하 최대진동 변위권고값 : 10mils 이하
개선후	0.162	1.3	
개선효과	77.8%	95.0%	

5. 결 론

○ 국내표준원전(CE형)의 전열관 재료로 I-600을 사용하는 증기발생기의 상부 방진봉 영역에서 유체유발진동에 의한 전열관 마모현상이 발생하는 것을 고려할 때 I-690/409을 전열관 및 지지지구조물 재료로 사용할 경우 유체유발 진동(Flow-induced Vibration)에 의한 피로 및 마모 손상에 대해서도 충분한 저항성을 가질 것으로 판단된다.

○ 신형경수로1400 증기발생기 전열관에서 진동에 의한 마모억제를 위해 구조적으로 취약하다고 판단되는 전열관에 대해, 유량분배판 설치, 전열관군의 수평 수직 지지대의 추가설치 하여 설계 개선한 후 전열관에 대한 유체유발 진동 평가 결과 가장 취약한 전열관에서 안정비는 78%, 진동변위는 95%로 개선되었다.

▫ 신형경수로1400 증기발생기의 수직 및 수평 직관부의 길이가 길어져서 고유진동수가 낮음에도 불구하고 Stability Ratio 및 RMS 변위가 감소한 것은 2차측 유체 속도가 감소하였기 때문이라고 판단된다. 또한, 전열면적증가분을 전열관 높이를 증가시키는 대신 반경 방향 으로 배정하여 설계함으로서 2차측 유체속도를 감소시켜 마모손상 방지효과를 유도하였다.

▫ 신형경수로의 설계수명 60년을 고려하여 기존의 S/G 전열관 재질을 I-600 대신 내부식성 및 내마모성이 뛰어난 I-690으로 재질을 변경하고, 전열관에 유량분배판 설치, 전열관군의 수평 수직 지지대의 추가설치에 따라 중앙공동 상단 지역의 유속을 감소시킴으로서 마모발생을 억제할 수 있을 것으로 사료되며, 향후 원자력 발전소의 증기발생기 전열관에 대한 운전 및 보수성이 향상 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 "차세대원자로 기술개발(III)-핵심기술 및 인허가 후속조치 연구"의 일환으로 한국과학기술원 김인섭 교수님 및 두산중공업의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) KHNP, 2003, "A Study on Preventive Measures against Steam Generator Tube Fretting Wear & A Confirmatory Evaluation of Flow-induced Vibration Calc."
(2) J. Benson, 2002, EPRI, "Steam Generator Progress Report"
(3) MOST, 2001,"Nuclear Material Technology Developments".
(4) Published by KEPCO. 12. 2001, Evaluation of Fretting-Wear Properties of Steam Generator Tubing Materials For KNGR,