

난류 가진에 의한 증기발생기 전열관의 마모 일률 평가

Work-rate Estimation for Predicting Fretting-wear in SG Tubes due to Turbulence Excitation

조봉호* · 유기완** · 박치용***

Bong-Ho Cho, Ki-Wahn Ryu and Chi-Yong Park

Key Words : Steam Generator(증기발생기), Tube(전열관), Turbulence Excitation(난류 가진), Fretting-wear(프레팅 마모), Work-rate(일률)

ABSTRACT

In this study, amplitudes of turbulence excitation are obtained for selected tubes inside the KSNP SG and their normal work-rates are investigated to estimate the magnitude of fretting-wear. From the results of numerical calculation, row 40&41 tubes show the maximum work-rates. Up to this row number, the work-rates inside the row 41 have much larger values than those of outside tubes. This phenomenon reveals the particular central zone which has larger normal work-rate than that of outside zone. It turns out that both of the higher local mode at the U-bend region and the larger value of effective mass in the central region increase the normal work-rate enormously.

1. 서 론

원전의 구성요소 중 하나인 증기발생기는 원자로에서 고온·고압으로 된 물이 전열관을 지나면서 열전달을 통해 증기를 발생시키는 열교환기의 일종이다. 증기발생기 내부에서 물과 증기의 유체의 흐름으로 인한 유체유발진동(flow-induced vibration)으로 인해 전열관의 피로 파괴(fatigue cracks)와 프레팅 마모(fretting-wear) 등의 손상 사례가 꾸준히 보고되고 있으며, 원전설비의 성능과 신뢰도, 수리비용 발생 및 전력생산성 저하 등의 경제적인 면에 손실을 가져오기도 한다. 이에 따라 증기발생기 전열관의 손상과 관련된 유체유발진동은 주요 관심사가 되어 왔고, 고온 가압된 발전소의 진동 마모에 대한 시스템적인 해석은 70년대 중반에 시작되었다. 그리고 발전소 요소를 포함한 마모 문제와 연구의 출현 연대기를 다른 논문과 연구가 발간되기도 하였다.⁽¹⁾

유체유발진동으로 인한 전열관의 손상을 피해야할 문제이므로 설계 및 제작단계에서 폭넓은 유체유발진동 해석이

미리 시행되어야 하며, 증기발생기 설계자뿐만 아니라 발전소 운영자 및 기기 유지 보수 담당자에게도 전열관의 손상의 원인과 진행 과정에 대한 이해가 필요하게 된다.

증기발생기 내에 유체의 흐름은 전열관에 대해 축류흐름(axial flow) 또는 횡흐름(cross flow)으로 나눌 수 있다. 축류흐름으로 인한 진동 가진 힘은 열교환기에서는 상대적으로 작기 때문에 진동 가진 메커니즘은 무시되나, 횡흐름으로 인한 진동 가진 메커니즘은 무시할 수 없는 사항이 된다. 전열관의 진동은 유체유발진동 가진 메커니즘(excitation mechanism)과 감쇠 메커니즘(damping mechanism)에 의해 발생된다.⁽²⁾

유체유발진동 메커니즘에는 다음과 같이 4가지 경우가 있다. (1) 유체탄성불안정성(fluid-elastic instability) (2) 주기적인 와류홀림(periodic wake shedding) (3) 난류 가진(turbulence-induced excitation) (4) 음향 공진(acoustic resonance) 등이다. 먼저 유체탄성불안정성은 유체 유발력과 구조물의 움직임으로 발생한다. 유체의 흐름속도가 지나치게 높아서 유체력에서 흡수된 에너지가 진동에 의해 흡수된 에너지를 초과하였을 때, 불안정성이 일어나며 과도한 진동 진폭을 일으킨다. 다음으로 주기적 와류 홀림 공진은 유체의 흐름이 상대적으로 균등한 횡흐름에서 고려되기 때문에 유체의 흐름이 비균등하고 난류 특성이 강한 냉각수 유입부분에서 큰 문제가 되지 않는다.⁽³⁾ 주기적 와류 홀림은 홀림주파수(shedding frequency)가 전열관의 고유진동수

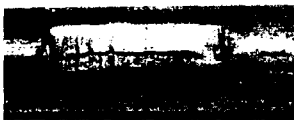
* 전북대학교 대학원 항공우주공학과
E-mail : exivguy@korea.com
Tel : (063) 270-2468, Fax : (063) 270-2472

** 전북대학교 기계항공시스템공학부

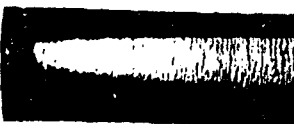
*** 한전 전력연구원 원자력연구실

와 부합될 때, 공진과 큰 진동 진폭으로 이어질지 모른다. 주기적 와류 흘림 공진은 액상 횡흐름을 받는 전열관 다발에서 Pettigrew와 Gorman(1981)이 연구하였다.⁽³⁾ Pettigrew와 Taylor(1994)는 주기적 와류 흘림은 매우 낮은 void fraction(15%이하)인 곳을 제외한 2상 유체인 곳에서 문제가 되지 않는다고 밝혔고,⁽³⁾ 그 거동은 액상 흐름과 비슷하다. 난류 흐름은 주기적 와류 흘림을 방해하고 유체탄성 불안정성과 주기적 와류 흘림은 단기간에 일으킬지 모르지만, 난류 가진은 오랜 기간동안 프레팅 마모 손상을 일으키도록 충분한 진동을 유도한다. 유체의 난류흐름은 액상과 2상 횡흐름에서 중요한 가진 메커니즘이며, 특히 증기발생기 상부의 U-bend 영역에서 매우 중요하다. 전열관의 난류 가진(turbulence random excitation)에 대한 시초의 2상 유체 설계는 Taylor 등(1989), Axisa 등(1990)과 Taylor 등(1996)에 의해 시도되었다.⁽³⁾ 이 데이터의 대부분은 약간의 증기물이 섞인 air-water로 이루어진 이상유동 실험을 통해 얻어졌다. 마지막으로 음향 공진은 주기적 와류 흘림 주파수와 음향 공동의 고유진동수가 동시에 일어났을 때 발생한다. 음향 공동 공진은 와류 흘림과 관련되고, 증기발생기 내부의 심한 구조적 손상을 일으킬 수 있다.⁽³⁾

감쇠 메커니즘(damping mechanism)의 이해는 유체유발 진동 가진 메커니즘만큼 중요하다. 열교환기에서 주요 감쇠 메커니즘은 전열관과 전열관 지지대 사이에서 발생하는 마찰이고, 특히 지지 두께에 영향을 많이 받고 전열관과 지지대 사이의 지름 공차에 의한 영향은 적다. Fig. 1(a)는 전열관과 전열관 지지대의 프레팅으로 인한 것이고, Fig. 1(b)는 전열관과 전열관 사이의 프레팅으로 인해 손상된 모습을 보여주고 있다. 열교환기에서 감쇠 메커니즘은 다음과 같다. (1) 전열관과 전열관 지지판 사이에서 마찰 감쇠 (2) 지지판 사이에서 squeeze-film damping (3) 전열관과 2차측 유체사이에서의 viscous damping 이다. 지금까지 전열관의 진동발생 메커니즘을 살펴보고, 진동 해석 절차는 유동



(a) Tube/tube support fretting



(b) Tube/tube fretting

Fig. 1 Tube failure cases due to fretting-wear

분포 계산(flow distribution calculations), 동적 요소 평가(dynamic parameter evaluation), 진동 가진 메커니즘 수식화(formulation of vibration excitation mechanism), 진동 응답 예측(vibration response prediction), 마모 평가(damage assessment)의 순으로 이루어진다. 진동 해석의 궁극적인 목적은 프레팅 마모 또는 피로 파괴가 열교환기에 일어나지 않도록 설계하는 것이다. 선형해석이 프레팅 마모를 예측하지 못하더라도, 허용치이내의 예측된 진동 진폭을 유지함으로써 심각한 프레팅 마모를 피할 수 있다. 본 연구에서는 전열관의 진동 발생 메커니즘을 이해하며, 현재 운용중인 한국표준원전 증기발생기에 대해 전열관 상부 U-bend 영역에서 중요한 역할을 하는 난류 가진에 의한 진폭을 살펴보고, 이에 따른 전열관의 프레팅 마모 예측을 위해 마모 일률을 평가하고자 한다.

2. 난류의 비정상 압력변동에 의한 가진 해석

난류 가진 현상은 갑작스런 튜브의 파손 현상을 일으키는 않지만 증기발생기의 수명동안 지속적인 프레팅 마모 현상을 일으키게 되어 전열관에 손상을 주게된다. 따라서 이러한 현상을 예측 또는 미연에 방지하기 위해서 난류유동에 의한 진동의 정도를 미리 알 필요가 있게 된다. 난류 가진에 의한 전열관 응답은 진동에 의한 변위로 나타난다. 이에 대한 해석방법은 ASME Code Section III Division 1 Appendix N Figure N-1343.2⁽⁴⁾에 제시되어 있다. 난류 가진에 의한 전열관의 진폭 rms 변위는 다음 식으로 나타난다.

$$\overline{v(s)} = \left\{ \sum_i \sum_j \frac{L_i G_i(f_j) (\phi_i^2(s) + \psi_j^2(s)) l_c}{64\pi^3 M_j^2 \beta_j^2 \zeta_j} \frac{l_c}{L_i} \right\}^{0.5} \quad (1)$$

여기서 L_i 는 횡유동을 받는 i 번째 스펀의 길이, l_c 는 난류 상관길이로서 $6.8d$ 의 값을 갖는다. 첨자 i 는 전열관 지지판 사이의 i 번째 스펀을 나타내며, j 는 j 번째의 고유진동수를 나타낸다. 또한 f_j 는 고유진동수, ζ_j 는 총감쇠비, $\phi_i(s)$ 는 모드 형상의 수직성분, $\psi_j(s)$ 는 접선방향 성분이다. M_j 는 단위 길이당 유효질량을 형상함수로 가중한 모드 질량이고, G_i 는 전열관을 따르는 단위 길이당 작용하는 랜덤 난류 가진력에 대한 파워스펙트럼 밀도함수(power spectral density)를 의미한다. 따라서 식 (1)로부터 유효질량, 고유진동수, 감쇠계수가 작을수록 난류 가진에 의한 전열관의 진폭이 커지게 됨을 알 수 있다.

3. 프레팅 마모(Fretting-wear) 평가

전열관의 프레팅 마모 손상(fretting-wear damage)은 보

통 전열관과 전열관 지지대 사이에서 일어나며, 전열관 지지대 사이에서 동적인 상호 작용과 관련이 있다. 전열관과 지지대 사이의 진동 에너지는 접촉력과 미끄러움을 통해 프레팅 마모의 원인이 된다. 구조물과 지지대사이의 동적인 상호관계는 일률(work-rate, W)라는 항으로 표현되고 간단하게 접촉력과 단위시간당 슬라이딩 거리의 곱의 적분으로 나타낸다. Work-rate와 프레팅 마모는 구조물에서 기계적 진동 에너지에 직접적으로 관련되어 있어, 기계적 에너지의 측정 또는 지지대에서 분산된 힘의 측정을 나타내기 때문에 프레팅 마모 손상을 예측하는데 중요한 요소이다. 슬라이딩 거리는 진동 진폭과 주파수와 관련되고, 접촉력은 또한 진폭과 주파수 전열관 질량에 관련된다. 전열관의 프레팅 마모는 다음과 같은 Archard 식을 사용하여 평가할 수 있다.⁽⁵⁾

$$V = K_{FW} W_N \quad (2)$$

여기서, V 는 체적 프레팅 마모율, K_{FW} 는 프레팅 마모 상수, W_N 은 수직 일률이다. Yetisir 와 Fisher(1996)는 전열관과 전열관 지지대 사이를 진동하는 다중 스펠 열교환기의 비선형 시간 영역 시뮬레이션을 수행함으로써 일률을 계산하였고,⁽³⁾ 그 후에 Yetisir(1997), Pettigrew(1999)에 의해 수직 일률을 다음과 같은 식으로 나타내었다.⁽³⁾

$$W_N = 16 \pi^3 f_i^3 m L \overline{y_{max}^2} \zeta_i \quad (3)$$

여기서 m 은 단위길이당 전열관의 유효질량, $\overline{y_{max}^2}$ 와 f_i 는 각각 최악의 모드일 때, 전열관의 최대 평균 진폭(maximum mean-square vibration amplitude)과 i -번째 고유진동수이다. 최악의 모드라 함은 수직 일률이 최대값을 갖는 진동모드이다. L 은 진동 진폭이 최대값인 스펠의 길이이고, ζ_i 는 전열관 지지대에 미치는 i -번째 감쇠비이다. 프레팅 마모 상수 K_{FW} 는 금속재질 조합과 실제 운전조건 등에 맞게 실험을 구현하여 얻는다. 전열관과 전열관 지지대 재질은 프레팅 마모를 최소화하도록 선택하여야한다. 일률은 마찰계수에 따라 변하며, Fisher 등(1992)의 실험 측정에서 마찰계수는 0.5보다 적지 않다고 밝혀, 보수적인 값으로 0.5 값을 사용한다.⁽⁵⁾ 일률에 대한 마찰계수의 영향을 살펴보면, 고유진동수에서 진동 진폭은 댐핑의 제공근에 반비례하므로 접촉점에서 마찰 메커니즘은 감쇠 메커니즘, 슬라이딩 거리를 고려한다면 일률은 마찰계수에 민감한 변화를 보일 것이다. 따라서 일률은 마찰계수가 클수록 또한 감쇠비가 클수록 감소한다. 감쇠가 증가하면 normal과 sliding 방향 모두에서 진동 진폭이 감소하므로, 그 결과로

접촉력과 미끄러움 거리도 감소하게 되고, 따라서 일률이 감소하는 결과를 얻는다.⁽⁵⁾

4. KSNP의 work-rate 평가

본 연구에서 마모 일률 평가에 적용하려는 증기발생기 모델은 Fig. 2 에서처럼 한국표준원전(Korea Standard Nuclear Powerplant, KSNP) 증기발생기로서 ABB-CE사의 설계로 미국 팔로버디(Palo Verde) 원자력 발전소인 System-80의 원자로설계 기술을 도입하여, 자체 개발한 최신 기술을 반영하여 우리 실정과 여건에 맞게 개량시킨 1000MWe급 경수로형 증기발생기이다. 전열관의 특징으로는 17번 열까지 역 U자형이고, 그 외에는 U자관 상부에 수평부분이 존재한다. 전열관의 상부 유동출구영역에서의 수평 전열관은 다이아몬드 배열형태이며, 전열관의 수직부분에서의 배열은 삼각형 배열이다. 증기발생기 상부에는 Fig. 2와 같이 대각 지지대, 수평 및 수직 지지대와 전열관 지지판(tube support plate, TSP)등의 진동방지 구조물들이 상부에 구성되어있고, 증기발생기 내부에는 총 8,214개에 이르는 전열관이 배열되어있다. 주요 전열관의 특징을 살펴보면 row 41은 증기발생기의 상부로 갈수록 전열관의 지지판이 중앙 부분이 점차적으로 제거되면서 전열관을 지지해 주지 못하는 것들 중에서 상부 경간이 최대가 되는 전열관이다. 본 연구에서 관심을 가지고 살펴 본 전열관들의 난류가진에 의한 진폭과 일률값을 정리하면 Table 1과 같고, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같다. 그래프에서 알 수 있듯 R41C83 전열관은 선정된 전열관들 중 최대 진폭값과 최대 일률값을 보였다. Fig. 4는 R41C83 전열관의 모드에 따른 일률값의 변화를 나타내고 있다. 식 (3)에서처럼 난류가진에 의한 진폭과 일률값은 상관 관계를 가지고 있으며,

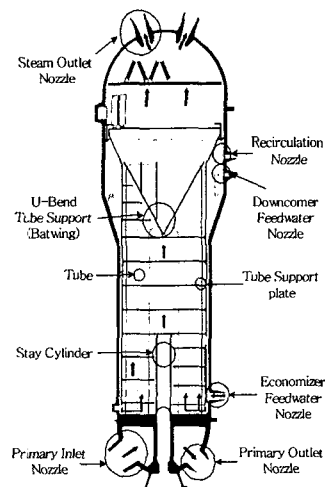


Fig. 2 Configuration of the KSNP steam generator

Table 1. Amplitudes of turbulence excitation and work-rates for selected tubes

No.	Tube	$\overline{y_{max}}$ (m)	Work-rate
1	R27C99	0.31736E-05	0.13207E-03
2	R32C96	0.66012E-05	0.56909E-03
3	R36C92	0.15660E-04	0.31252E-02
4	R36C96	0.12169E-04	0.18813E-02
5	R36C100	0.82945E-05	0.87404E-03
6	R36C104	0.69339E-05	0.61301E-03
7	R36C108	0.72492E-05	0.67389E-03
8	R36C112	0.65631E-05	0.55110E-03
9	R40C96	0.43025E-04	0.19156E-01
10	R41C83	0.71841E-04	0.47719E-01
11	R44C96	0.13625E-05	0.25742E-04
12	R48C96	0.98593E-06	0.13538E-04
13	R52C96	0.99361E-06	0.13928E-04
14	R75C83	0.10103E-05	0.15298E-04
15	R138C84	0.10863E-05	0.21569E-04

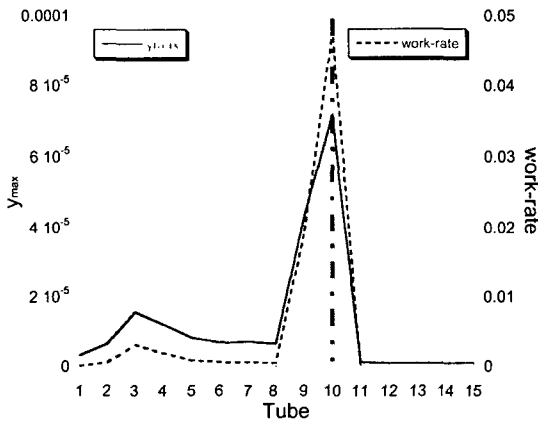


Fig.3 Change of the amplitude of turbulence excitation and work-rate for selected tubes

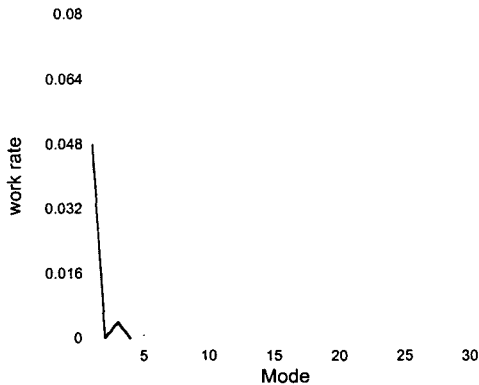


Fig. 4 Distribution of wear rate according to the mode number for R41C83 tube

row 44 이상의 전열관들은 진폭과 일률값이 내부의 전열관들에 비해 급속히 작아짐을 알 수 있다. 이는 마모관점에서 row 41 이하의 특정 영역의 전열관들이 그 영역 밖의 전열관에 비해 취약하다는 것을 나타내는 결과이며, 이는 특정 영역의 전열관들의 지지조건이 그 영역 밖과 비교했을 때 horizontal strip이 없다는 것과 그 영역에서의 밀도값이 높다는 것과 깊은 관련이 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 난류 가동에 의한 프레팅 마모 일률을 예측하기 위한 수치해석적인 방법을 시도하였으며 KSNP 증기발생기의 특정 전열관들에 대한 마모일률 값을 얻어내었다. 마모일률은 row 40과 41위치에서 최대값을 갖는 것으로 나타났으며, 그 위치를 경계로 내부 row에 해당하는 전열관들의 마모일률이 경계 밖의 row에 해당하는 전열관들의 마모일률보다 훨씬 큰 값을 보였다. 이는 경계 내부 영역의 전열관들이 U-tube 상부에 강한 국부모드를 발생시킨다는 것과 경계내부의 밀도가 외부에 비해서 큰 값을 갖는다는 특성이 반영된 것으로 본다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Pak L. Ko, Agnes Lina, Antoine Ambard, 2003, "A review of wear scar patterns of nuclear power plant components," ASME PVP, 2003-2079, pp. 97-106.
- (2) M.J. Pettigrew, C.E. Taylor, N.J. Fisher, M. Yetisir, B.A.W. Smith 1998, "Flow-induced vibration recent findings and open questions," Journal of Nuclear Engineering and Design, 185, pp. 249-276.
- (3) M.J. Pettigrew, C.E. Taylor, 2003, "Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: an overview-Part 2: vibration response, fretting-wear, guidelines," Journal of fluids and structures, 18, pp. 485-500.
- (4) ASME Code Section III, 1995, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1 - Appendics, ASME.
- (5) M. Yetisir, N.J. Fisher, 1997, "Prediction of pressure tube fretting-wear damage due to fuel vibration," Journal of Nuclear Engineering and Design, 176, pp. 261-271.