

다경간 전열관의 난류 여기에 의한 마모특성 연구 Wear Characteristics of Multi-Span Tube Due to Turbulence Excitation

김형진† · 유기완* · 박치용**

Hyung-Jin Kim, Ki-Wahn Ryu and Chi-Yong Park

Key Words : Fretting-Wear(프레팅 마모), Turbulence Excitation(TE, 난류 가진), Normal Work Rate(수직 일률), Wear Volume(마모 체적), Steam Generator(증기발생기), Effective Mass(유효 질량)

ABSTRACT

Fretting-wear caused by turbulence excitation for KSNP(Korea standard nuclear power plant) steam generator is investigated numerically. Secondary sides density and normal velocity are obtained by the thermal-hydraulic data of the steam generator. Because nonlinear finite element analysis is complex and time consuming, work rate is estimated by using linear analysis for simple straight 2-span tube. Wear volume and depth by using work rate calculation are estimated. Span length, secondary side fluid density and normal velocity are adopted to study the effects on the fretting-wear by turbulence excitation. When secondary sides density and normal velocity is increased, It turns out that secondary side density and normal gap velocity are very important paramater for fretting-wear phenomena of the steam generator.

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기(steam generator)에 있어서 튜브 주위의 난류 에너지 변동에 의해서 발생하는 난류 가진(turbulence excitation)은 작은 진폭의 진동으로 튜브와 튜브 지지판(tube support plate, TSP) 사이에서 마모 메커니즘을 발생시킨다. 난류 가진은 갑작스런 튜브의 파손 현상을 일으키지는 않지만 증기발생기 수명동안 지속적인 가진 현상에 의한 마모 현상을 일으키게 된다. 튜브에 유체탄성 불안정성(fluid-elastic instability)의 문제가 없을 경우 진동의 주요 원인은 난류 가진이 될 수 있으며 가진에 의한 진폭은 보통 수 mils 이하이다.⁽¹⁾

증기 발생기는 전열관의 과도한 진동 진폭을 막기 위해 튜브 지지판, U-bend 구역에 대각 지지대, 수평 및 수직 지지대를 가지고 있다. 정기적인 점검을 통해 튜브와 지지대 사이에서 튜브의 손상이 지속적으로 보고되고 있으며 많은 손상 부위가 튜브와 지지대 상호간의 미끄럼 혹은 충격현상에 의한 마모로 인해서 두께의 감소를 나타냈다. 이러한 손상은 튜브의 파손이나 냉각수 유출의 원인이 된다.

프레팅 마모(fretting-wear) 현상의 주요 원인인 난류 가진은 Fig. 1과 같이 튜브 지지대와 튜브 사이의 접촉부분에서 마모 현상을 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 난류 가진 진폭을 이용한 수직일률의 계산이 많은 연구가들에 의해서 시도됐다. 프레팅 마모는 일률(work rate)에 비례하며 틈새가 있는 지지대에서 충격, 미끄럼 패턴의 복잡함으로 인해 열교환기 튜브에 대한 수직 일률의 계산은 비선형 모델이 필요하다. Yetisir는 수직 일률 해석에 있어서 다른 모델을 제시했으며,⁽²⁾ 이 모델은 비선형 해석이 아닌 진동 주파수, 난류 가진에 의한 진폭과 같은 선형 진동해석을 사용하는 선형 모델이다. 본 연구에서는 이 선형 해석법을 사용하여 증기발생기 전열관의 난류 가진에 의한 마모 특성을 해석하려 한다.

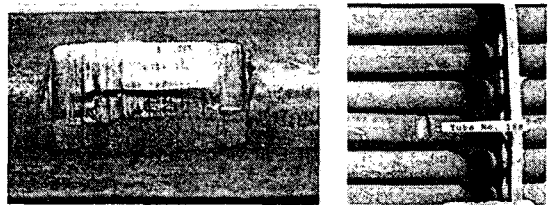


Fig. 1 Tube and support fretting

본 연구에서는 선형 해석법을 양 끝단의 지지 조건, 튜브 길이, 2차축 밀도, 수직 속도에 변화를 가지는 한국표준원전

† 전북대학교 대학원 항공우주공학과

* 전북대학교 기계항공시스템공학부

E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr

Tel : (063) 270-4286 Fax : (063) 270-2472

** 한국전력 전력연구원 원자력발전연구소

(Korea standard nuclear power plant, KSNP)의 튜브에 적용했다. 본 연구는 튜브의 지지 조건, 튜브 길이, 2차측 유체 밀도, 수직 틈새 속도가 마모와 마모 형상에 따른 마모 깊이에 어떻게 영향을 주는지에 중점을 두었다. 유체 밀도, 수직 틈새 속도의 선택은 증기발생기의 열수력 해석을 바탕으로 했다.

2. 프레팅 마모 해석

2.1 열수력 해석

본 연구에서 사용할 증기발생기 2차측의 유체 밀도와 수직 속도를 얻기 위해서 ATHOS3 code⁽³⁾를 사용했다. ATHOS3는 여러 열교환기 형태에 대해서 3차원, 2상, 점성 열수력 문제를 계산하기 위해서 가장 광범위하게 사용되는 프로그램이다. 이 프로그램은 다공성 개념을 사용하여 튜브와 내부 구조를 설계했고, 열과 물질의 전달에 대해서는 실험 상관식을 사용하고 있다. 본 해석을 위해서 계산 범위는 튜브 고정대 상부에서 증기발생기 쉬라우드(shroud) 내부의 습분 분리기 하부 사이로 제한했다. 튜브 고정대 표면의 질량, 운동량, 에너지 유동에 대해서는 Neumann 경계조건, 급수(feedwater) 질량 유량과 증기발생기 내부의 온도에 대해서는 입구 Dirichlet 경계조건이 적용됐다. 출구 압력은 주어진 증기실(dome) 압력으로 추정하였으며 1차측 유체의 유동 조건은 명시되어 있다. 이러한 모든 경계 조건은 100% 최대 출력, 8% 관막음을 상태에서 안정 상태 조건으로 주어졌다. 계산에 채택된 격자계는 각각 원주방향(θ), 반경방향(r), 축방향(z)에서 $20 \times 18 \times 50$ 이다. 수립된 해석은 1차측과 2차측의 혼합 속도, 혼합 엔탈피, 공극률, 밀도분포 특성을 포함한다.

2.2 난류 가진에 의한 힘

난류 가진에 의해서 진동하는 직관 튜브에 작용하는 n 번째 모드에서의 동력에 대한 식은 아래와 같다.⁽²⁾

$$\dot{W} = 32\pi^3 m L f_i^2 y_{ms}^2 \zeta_i \quad (1)$$

튜브에 작용하는 동력은 진동 주파수, 튜브 길이, 튜브 질량에 의해서 결정된다. 그러므로 튜브와 지지대 사이에 유격이 있는 지지 조건과 유격이 없는 튜브에 작용하는 힘은 같다고 할 수 있다. 이 힘은 전단 일률(\dot{W}_Q) 형태로 튜브에 작용하며 프레팅 마모 해석에 필요한 수직일률(\dot{W}_N)은 마찰계수(μ)와 전단 일률에 대하여 아래와 같이 표현할 수 있다.⁽²⁾

$$\dot{W}_N = 32\pi^3 m L f_i^2 y_{ms}^2 \zeta_i / \mu \quad (2)$$

2.3 난류 가진에 의한 진폭

본 연구에서는 난류 가진의 진폭을 해석하기 위해 아래와 같이 ASME code section III appendix N⁽⁴⁾에 제시된 방법을 사용했다.

$$y_{ms} = \left\{ \sum_i \frac{L G(f_i) \phi_i^2(s)}{64\pi^3 M_i^2 \beta_i^2 \zeta_i} J_{ii}^2 \right\}^{0.5} \quad (3)$$

여기서 $J_{ii} = \sqrt{l_i/L}$ 이고, L 와 l_i 는 각각 스패의 길이와 난류의 상관길이(6.8 d)를 나타낸다. 아래첨자 i 는 n 번째 고유 모드를 나타낸다. 또한 ϕ_i 는 모드 형상 함수의 수직방향 성분을 나타낸다. M_i 와 G_i 의 값은 아래와 같이 임의의 난류 가진에 의한 모드 질량과 파워스펙트럼 밀도이다.

$$M_i = \int_0^L m(s) \phi_i^2(s) ds \quad (4)$$

$$G_i(f_i) = d^2 C_r^2(f_i) / 4 \int_0^L \{ \rho(s) V_n^2(s) \phi_i(s) \}^2 ds \quad (5)$$

여기서 C_r 는 랜덤 가진 계수이고 참고문헌 (4)의 Figure N-1343-1을 통해서 얻을 수 있다.

프레팅 마모를 막기 위해서는 난류 가진의 진폭은 WRC Bulletin No.372에 기초해서 10mils 보다 작아야 한다. 이러한 제한은 증기발생기 설계 단계에서 중요한 매개변수 중 하나이다.

2.4 체적 마모율

체적 마모율은 수직 일률과 관계가 있으며 실험적인 마모 계수를 통해 아래와 같이 정의된다.

$$\dot{V} = K \dot{W}_N \quad (6)$$

여기서 K 는 실험적인 프레팅 마모 계수를 나타내며, 수직 일률을 제외한 모든 비선형의 항은 이 계수에 포함되어 있다. 본 연구에서는 물과 습증기 조건에서 증기발생기 튜브에 대한 보수적인 값인 $14 \times 10^{-15} \text{N/m}^2$ 을 사용했다.

본 연구에서는 체적 마모율의 계산을 통해 마모 체적에 따른 마모 깊이와 마모의 진행 속도를 알아보려 한다.

2.5 다경간 튜브의 해석

다경간 튜브의 프레팅 마모 해석은 Fig. 2와 같이 2-스팬 튜브로 세분화시킴으로써 해석할 수 있다.⁽²⁾ 이때 2-스팬 튜브의 양 쪽 끝단의 지지 조건은 pin 지지조건으로하여 해석해야 한다. 2-스팬 튜브의 수직 일률을 계산하기 위한 방법은 아래와 같다. 여기서 프레팅 마모의 방향 정보는 제공하지 않는다.

$$\dot{W}_N = 16\pi^3 m L f_i^2 Y_s^2 \zeta_i / \mu \quad (7)$$

, 여기서 f_p , Y_{ms} 는 1차 모드에서 튜브와 지지대의 유격이 없다는 조건하에 계산된 값이며, m 은 유효질량을 나타낸다. 본 연구에서는 2-스팬 튜브를 해석하는데 있어서 감쇠비로 1.5%를 사용했다. 이 값은 Conners 실험으로부터 얻어진 값으로 지지 조건과 유동 조건에 따라 달라지며 보통 가스의 경우 0.5%, 습증기의 경우 1.5% 값이 권장된다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 유효 질량은 부가질량을 포함하는 값으로 아래와 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$m = m_t + m_{pf} + m_a \quad \text{여기서} \quad m_a = C_m \frac{\pi D^2}{4} \quad (8)$$

, 여기서 m_t , m_{pf} , m_a 는 각각 튜브의 단위 길이당 유효질량, 튜브 내 1차 냉각수의 단위 길이당 유효질량, 단위 길이당 부가질량을 나타낸다. 부가질량 계수는 싱글 실린더에 대한 값으로 1.0을 사용했다.

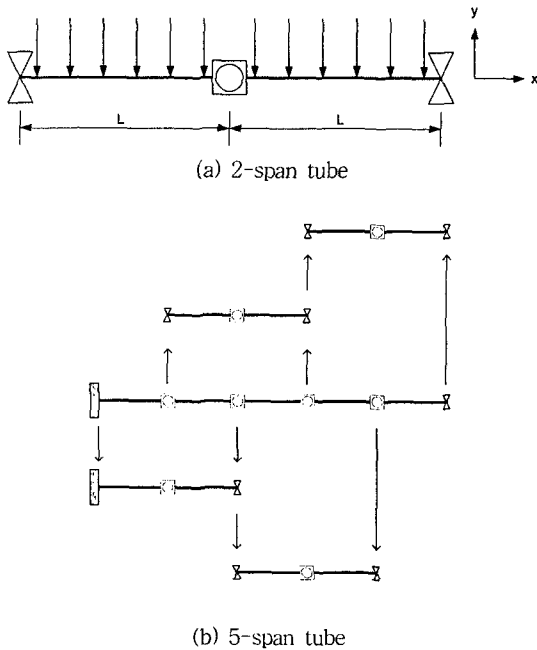


Fig. 2 Tube model due to span number

2.6 마모체적과 마모깊이 평가

계산된 체적 마모율에 의해서 마모 깊이를 계산할 수 있으며 Fig. 3과 같이 2가지 마모 형상에 따른 마모 체적과 마모 깊이의 계산을 수행했다. Case 1과 같이 원형 패턴의 간단한 모델에 대한 마모 체적과 마모 깊이에 대한 관계식은 아래와 같다.⁽¹⁾

$$V = \pi D w h \quad (9)$$

, 여기서 D , w 는 각각 튜브의 외경과 튜브 지지대의 두께를 나타내며, h 는 마모 깊이를 나타낸다. 마모 체적과 마모깊이의 관계를 통해서 튜브의 두께까지 마모가 되는 시간을 알 수가 있다. Case 2의 대한 마모 깊이는 아래와 같다. 실제 증기발생기 전열관에서는 Fig. 1의 마모 사례와 같이 Case 2와 같은 마모가 진행된다.

$$h = \frac{D(1 - \cos \theta)}{2}, \quad \text{여기서} \quad \theta = \left(\frac{6V}{D^2 w} \right) \quad (10)$$

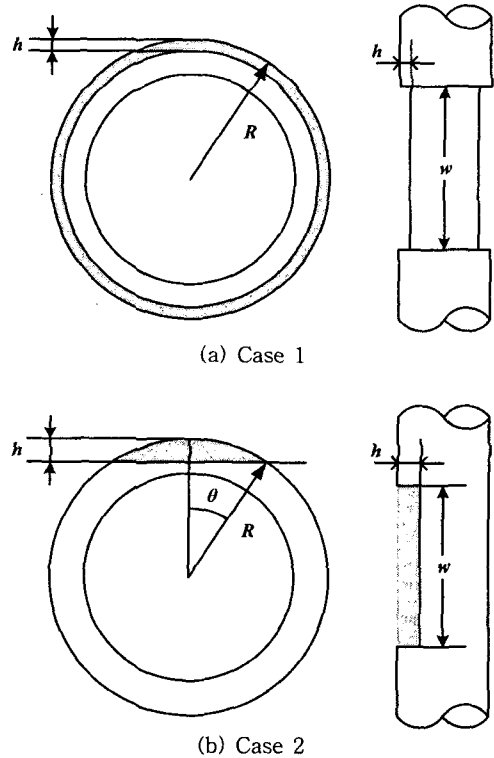


Fig. 3 Wear topology

원자력발전소 증기발생기의 경우 튜브 두께의 60%까지 마모가 진행되면 관막음을 실시한다.

3. 결과 및 토의

프래팅 마모 해석에 대한 과정은 Fig. 4와 같다. 튜브 길이, 1차측과 2차측 유체 밀도, 수직 속도의 변화에 따른 튜브의 마모를 평가하기로 한다.

2-스팬 튜브의 기하학적 변수에 따른 수직 일률에 대한 결과는 Table 1과 같다. 참조 case(PP)의 튜브 외측의 지름과 튜브 두께는 각각 0.01905m, 0.001m이며 튜브의 밀도 8430kg/m³, 탄성계수 1.98×10¹¹(kg/m²), 마찰계수 0.5이다.

또한 튜브에 작용하는 수직 속도는 2m/s이다. PP는 튜브 양 끝단의 지지조건이 pinned-pinned임을 나타내며, CP는 clamped-pinned, CC는 clamped-clamped를 나타낸다. 결과에 기초하여 튜브 길이에 따라 수직 일률의 값이 상승하지만 길이가 일정 이상이 되면 마모 깊이의 변화는 미미함을 확인할 수 있었다. 또한 튜브 양 끝단의 지지 조건 변화에 의한 수직 일률은 감소하고 있음이 나타난다.

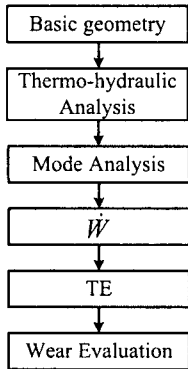


Fig. 4 Flow chart for fretting wear

Table 1 Work rate prediction of 2-span tube

Supports	f_i (Hz)	y_{max} (mm)	m (kg/m)	L (m)	ξ	\dot{W} (W)
PP(ref.)	39.04	0.19	0.729	1	0.015	2.38e-2
PP	157.60	2.02e-5	0.729	0.5	0.015	8.63e-9
PP	9.85	1.07	0.729	2	0.015	2.37e-2
PP	39.04	0.27	0.729	1	0.0075	2.37e-2
PP	39.04	0.13	0.729	1	0.03	2.37e-2
CP	61.55	1.32e-3	0.729	1	0.015	4.40e-6
CC	89.31	3.29e-4	0.729	1	0.015	8.35e-7

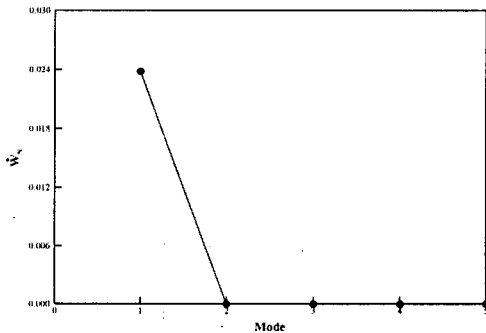
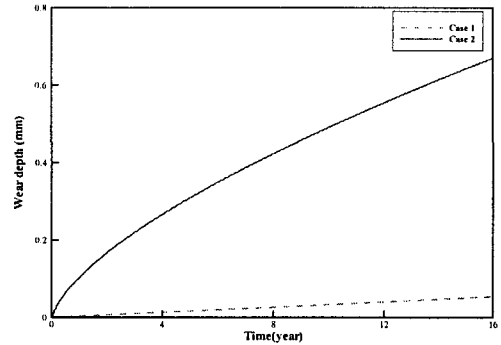


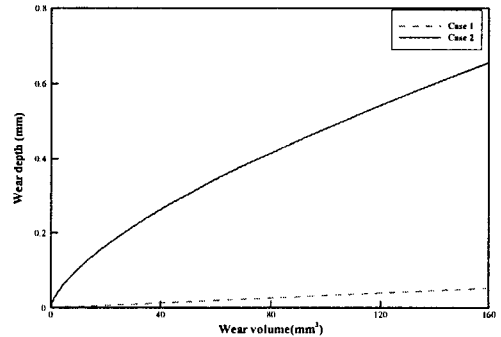
Fig. 5 Normal work rate and mode shape

Fig. 5는 모드형상에 따른 수직 일률의 그래프로서 1차

모드에 비해 그 외의 모드는 굉장히 작은 값을 나타내고 있다. 즉 수직 일률은 1차 모드에 지배적임을 이 결과를 통하여 확인할 수 있다. Fig. 6은 참조 case(PP)의 시간에 따른 마모 깊이 변화, 마모체적에 따른 마모깊이를 나타내고 있다. 마모 형상 Case 2는 원전 운용시간 15년 정도에 튜브 두께의 60%까지 마모가 진행됨을 알 수 있으며 Case 1의 경우는 마모량이 미비하다. 즉 마모 형상에 따라 마모량과 마모의 진행 속도가 영향을 받음을 알 수 있다.



(a) Wear depth vs time



(b) Wear depth vs wear volume

Fig. 6 Wear depth vs wear volume

증기발생기의 수직/수평 단면에서 2차측 유체밀도는 Fig. 7과 같다. 전열관이 존재하지 않는 중앙 공동 부위와 저온관 측에서 높은 값을 나타내고 있다. 1차측과 2차측 유체 밀도, 수직 속도의 변화에 따른 수직 일률의 결과값은 Table 2와 같다. Table 1의 결과와 비교해 볼 때 튜브의 기하학적 변수보다는 증기발생기 내부의 유동 조건에 의한 수직 일률의 변화가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 7 ~ Fig. 9는 원전 증기발생기 수명동안의 유체 밀도, 수직 속도 변화에 따른 마모 깊이를 나타내고 있다. 2차측 유체 밀도와 수직 속도가 큰 값을 가질수록 마모가 활발함을 알 수 있다. 수직 속도, 유체 밀도의 변화 범위는 열수력 해석 결과를 바탕으로 했다.

Table 2 Work rate prediction of 2-span tube

	$f_f(\text{Hz})$	y_{max} (mm)	ρ_{1st} (kg/m^3)	ρ_{2nd} (kg/m^3)	V_n (m/s)	$\overline{W}_n(W)$
PP(ref.)	39.40	0.19	600	400	2	2.38e-2
PP	40.69	4.75e-3	400	400	2	1.55e-5
PP	38.22	0.19	800	400	2	2.23e-2
PP	41.03	2.36e-3	600	200	2	3.86e-6
PP	37.94	0.28	600	600	2	4.96e-2
PP	39.40	4.73e-2	600	400	1	1.49e-3
PP	39.40	0.43	600	400	3	0.12

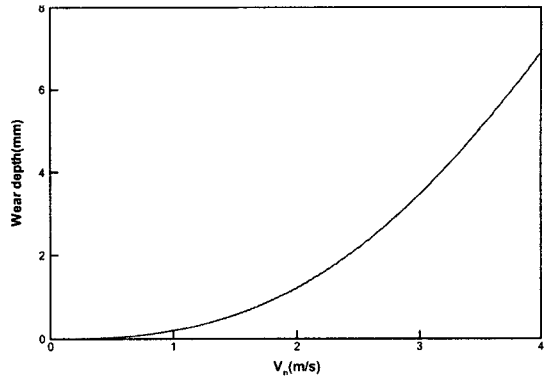
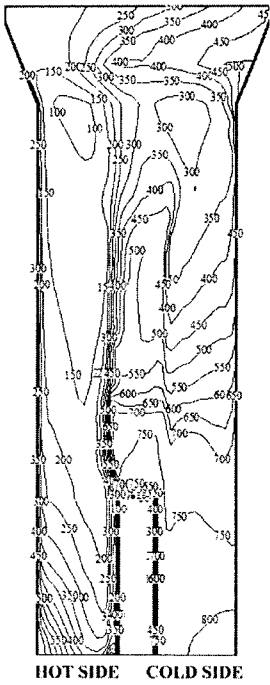


Fig. 8 Wear depth due to V_n



(a) y-z plane

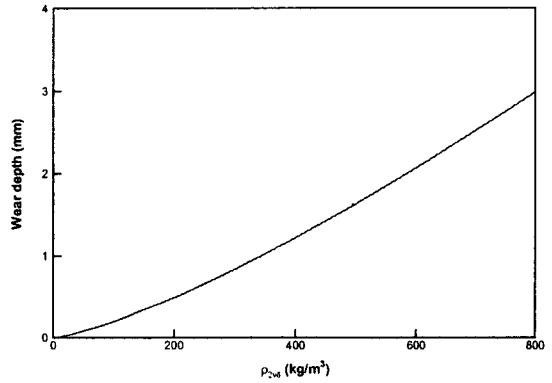
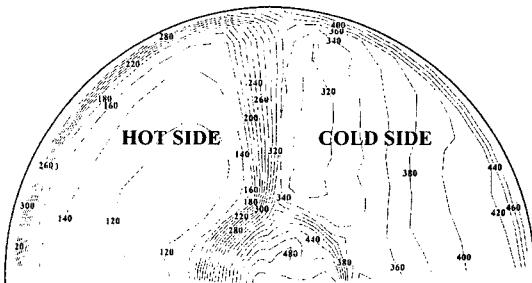


Fig. 9 Wear depth due to ρ_{2nd}



(b) x-y plane

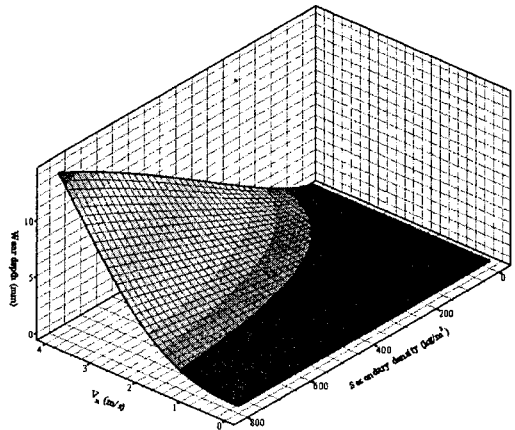


Fig. 10 Wear depth due to V_n, ρ_{2nd}

Fig. 7 Secondary side flow density(kg/m^3)

결과에 기초하여 난류 가진에 의한 프래밍 마모의 양과 진행속도를 해석하는데 있어 증기발생기의 2차측 유체 밀도, 수직 속도가 기하학적 변수보다는 중요한 매개 변수인 것으로 여겨지며, 증기발생기의 상부 유동이 빠른 고온관측과 밀도가 높은 저온관측에서 마모가 활발할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구는 증기발생기 프래팅 마모의 마모량과 진행속도를 조사하기 위해서 수행됐다.

결과에 기초하여 튜브 양 끝단의 지지 조건에 의한 마모량은 pinned-pinned 조건의 경우가 가장 큰 값을 가지며, 이는 지지조건에 따른 고유주파수의 영향으로 보인다. 또한 튜브의 길이가 길어질수록 큰 마모량 값을 가지지만 일정 이상이 되면 변화는 미미함을 확인했다. 2차측 유체 밀도와 수직 속도가 큰 값을 가질수록 마모량과 진행속도가 커짐을 알 수 있었다. 2차측 유체 밀도가 상대적으로 낮은 구역에서는 수직 속도가 마모에 중요한 역할을 하며, 수직 속도가 낮은 구역에서는 2차측 유체밀도가 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 마모 해석에 있어 기하학적 변수보다는 2차측 유체 밀도와 수직 속도가 중요한 매개변수인 것으로 보이며, 증기발생기의 유속이 빠른 고온 관측과 밀도가 상대적으로 큰 저온 관측에서 마모와 마모의 진행속도가 활발할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- (1) Connors, H. J., 1981, "Flow-Induced Vibration and Wear of Steam Generator Tubes," Nuclear Technology, Vol. 55, pp. 311-331.
- (2) Yetisir, M., Mckerrow, E., and Pettigrew, M. J., 1998, "Fretting Wear Damage of Heat Exchanger Tubes: A Proposed Damage Criterion Based on Tube Vibration Response," J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 120, pp. 297-305
- (3) ATHOS3 Mod-01, 1990, "A Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Steam Generators," Vol. 1, EPRI NP-4604-CCML.
- (4) ASME Code Section III, 1995, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1 - Appendics," ASME.
- (5) Jo, J. C., and Shin, W. K., 1999, "Fluid-Elastic Instability Analysis of Operating Nuclear Steam Generator U-Tubes," Nuclear Eng. Design, Vol. 193, pp. 55-71.
- (6) Chen, S. S., and Chung, Ho, 1976, "Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass Part I: Circular Cylindrical Structures," ANL-CT-75-45.
- (7) 유기완, 조봉호, 박치용, 박수기, 2003, "한국표준원전 증기발생기의 관막음 집중 영역 근방에서의 유체유발진동 특성해석," 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 452~459.
- (8) Chen, S. S., Warbmsganss, M. W., and Jezdrzejczyk, J. A., 1976, "Added Mass and Damping of a Vibrating Rod in Confined Viscous Fluids," J. of Applied Mechanics, pp. 325~329.
- (9) Carlucci, L. N., and Brown, J. D., 1983, "Experimental Studies of Damping and Hydrodynamic Mass of a Cylinder in Confined Two-Phase Flow," J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 105, pp. 89.
- (10) Rogers, R. G., Taylor, C., and Pettigrew, M. J., 1984, "Fluid Effects on Multi-Span Heat-Exchanger Tube Vibration," ASME PVP Conference, San Antonio, Tex., June 1984
- (11) Pettigrew, M. J., Taylor, C. E., and Kim, B. S., 1989, "Vibration of Tube Bundles in Two-Phase Cross-Flow: Part 1-Hydrodynamic Mass and Damping," J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 111, pp. 466~477.