

증기발생기 전열관 충격 미끄럼 마모 모델 개발

권대엽* · 신희재** · 오영진** · 반치범*†

Development of Impact-sliding wear model for Steam Generator Tubes

Daeyeop Kwon*, Heejae Shin**, Young-Jin Oh**, and Chi Bum Bahn*†

(Received 25 September 2023, Revised 14 November 2023, Accepted 12 December 2023)

ABSTRACT

The phenomenon of fretting wear due to the flow-induced vibration in steam generator (SG) tube is a significant degradation mechanism in nuclear power plants. Fretting wear in SG tube is primarily attributed to the friction and impact forces between the SG tube and the tube support structures, experienced during nuclear power plants operation. While the Archard model has generally been used for the prediction of fretting wear in SG tube, it is limited by its linear nature. In this study, we introduced an "Impact Shear Work-rate" (ISW) model, which takes into account the combined effects of impact and sliding. The ISW model was evaluated using existing experimental data on fretting wear in SG tube and was compared against the Archard model. The prediction results using the ISW model were more accurate than those using the Archard model, particularly for impact forces.

Key Words : Steam generator tube(증기발생기 전열관), Fretting wear(프레팅 마모), Archard model(아카드 모델), Impact-sliding(충격 미끄럼)

기호설명

E = impact energy
 F_n = normal contact force
 F_s = shear contact force
 H = material hardness
 h = wear depth
 K = sliding wear coefficient
 k = impact wear coefficient
 K_W = dimensionless wear coefficient
 L = length of wear scar
 m = mass of tube
 N = impact cycle

\dot{N} = impact frequency
 n = exponent of model
 R = radius of tube
 S = sliding distance
 t = time
 V = wear volume
 v_i = impact velocity
 v_{ve} = rebound velocity
 \dot{W}_N = normal work-rate
 \dot{W}_S = shear work-rate
 μ = friction coefficient
 θ = angle of wear from tube surface
 σ_i = impact pressure
 σ_c = characteristic of pressure

† 반치범, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : bahn@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-1033, FAX : (051)510-9164

* 부산대학교 기계공학부

** 한국전력기술(주)

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기 전열관(steam generator tube)의 프레팅 마모(fretting-wear) 발생 원인은 전열관과 지지구조물 사이의 유체유발진동(flow-induced vibration)으로 알려져 있다. 이러한 마모 현상은 원자력발전소의 중요한 손상기구 중 하나이다.⁽¹⁻³⁾ 전열관의 파열 압력(burst pressure)은 특히 마모 깊이에 의해 크게 좌우된다.^(4,5) 또한 마모의 성장은 전열관의 파손이나 원자로 냉각재 유출을 유발할 수 있어 증기발생기 건정성을 위협하게 된다. 따라서 전열관의 파손을 예측하는 데 있어서 마모 깊이가 중요한 역할을 하며, 마모 깊이 예측은 전열관 건전성 관리나 발전소 운영에 있어서 매우 중요하다.

증기발생기 전열관의 프레팅 마모에 의한 마모 성장을 예측하기 위하여, 일반적으로 마모율을 일률(work-rate)형태로 도입한 Archard 모델⁽⁶⁾이 사용되고 있다. 일률 모델⁽⁷⁾은 수직 일률에 따라 마모율이 선형적으로 증가하는 선형 모델이다. 하지만 실제 전열관의 마모 성장은 발전소 운전 초기에 성장 속도가 빠르고 점차 감소하다가 수렴하는 경향이 있다.

전열관의 마모는 전열관과 지지구조물 사이에서 충격(impact)과 미끄럼(sliding)의 동시 작용으로 인해 발생한다. 따라서 전열관의 마모 성장을 예측하기 위해서는 미끄럼 마모와 충격 마모를 모두 고려할 수 있는 마모 모델이 필요하다. 최근까지의 연구 결과를 살펴보면 마모 예측을 위한 다양한 모델이 제안되었다. Frick⁽⁸⁾, Rabinowicz⁽⁹⁾는 충격 에너지를 고려한 충격 마모 모델을 제안하였으며, Engle⁽¹⁰⁾은 충격 접촉압력을 고려한 마모 모델을 제안하였다. 또한 Guo⁽¹¹⁾, Lewis⁽¹²⁾, Zalzal⁽¹³⁾는 미끄럼 마모 모델과 충격 마모 모델을 결합하여 충격 미끄럼 마모 모델을 제안한 바 있다.

본 논문에서는 전열관의 마모 성장을 예측하기 위한 충격 미끄럼 마모 모델을 제시하고자 한다. Electric Power Research Institute 시험 보고서의 전열관 마모 시험 결과⁽¹⁴⁾를 바탕으로 제시한 마모 모델의 적절성을 검토하고 Archard 모델과 비교 분석하였다.

2. 마모 성장 예측

2.1 마모 모델

일반적으로 증기발생기 전열관의 마모를 예측하

기 위하여 식 (1)과 같은 Archard 모델이 사용된다.

$$V = K_W \frac{F_n S}{H} \quad (1)$$

여기서 V 는 마모 부피, K_W 는 마모 계수, F_n 는 수직 하중, S 는 미끄럼 거리이고, H 는 재료의 경도이다.

Frick⁽⁷⁾에 의해 제안된 일률은 식 (2)와 같이 표현할 수 있고, Archard 모델의 마모율을 일률형태로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\dot{W}_N = \frac{1}{t} \int F_n ds \quad (2)$$

$$\dot{V} = K_W \dot{W}_N \quad (3)$$

여기서 \dot{V} 는 마모율, t 는 시간이고, \dot{W}_N 은 수직 일률이다. 식 (3)에 의하면 마모율은 수직 일률에 비례하며, 마모 계수는 상수의 값을 가진다고 가정한다. 하지만 실제 증기발생기 전열관의 마모 성장률은 일정하지 않으며 비선형성을 나타낸다. 따라서 Archard 모델의 단순한 가정은 실제 증기발생기 전열관의 마모 현상을 정확히 설명하지 못할 수 있다.

Guo⁽¹¹⁾, Lewis⁽¹²⁾는 Archard 모델의 단순한 가정을 보완하기 위해 Archard 모델과 충격 모델을 결합한 충격 미끄럼 모델을 제안하였다. 여기서 충격 모델은 Fricke⁽⁸⁾가 제안한 충격 에너지 모델을 사용하였으며, 모델을 식 (4)에 나타내었다.

$$V = kNe^n \quad (4)$$

$$\text{where } e = \frac{1}{2}mv_i^2.$$

여기서 k 는 충격 마모 계수, N 은 충격 횟수, e 는 충격 에너지, n 은 모델 지수, m 은 튜브 질량이고 v_i 는 충격 속도이다.

Engle⁽¹⁰⁾은 충격 접촉력을 고려한 충격 모델을 제안하였으며, 식 (5)와 같다.

$$V = kN\sigma_i^n \quad (5)$$

여기서 σ_i 는 충격 압력이다.

Guo⁽¹¹⁾는 제안한 충격 미끄럼 모델을 전열관 프레팅 마모 시험을 통해 입증한 바 있으며, 제안한 모델은 식 (6)와 같다.

$$V = K \frac{F_n S}{H} + kN\Delta E, \quad (6)$$

$$\text{where } \Delta E = \frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{1}{2}mv_{re}^2.$$

여기서 K 는 미끄럼 마모 계수, ΔE 는 충격 에너지 손실양이고, v_{re} 는 리바운드 속도이다.

Guo⁽¹¹⁾가 제시한 모델에서는 충격에 의한 마모를 충격 에너지로 표현하고 있다. 하지만 충격 속도의 경우 실제 증기발생기에서 측정하기 어려운 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 실제 환경에 더 적용하기 쉬운 Engel⁽¹⁰⁾ 충격 모델과 전단 일률을 결합한 Impact Shear Work-rate (ISW) 모델을 제시하였다. 이 모델은 프레팅 마모의 충격과 미끄럼의 영향을 설명할 수 있으며, ISW 모델은 식 (7)과 같다.

$$\dot{V} = K\dot{W}_S + k\dot{M}\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_c}\right)^n \quad (7)$$

$$\text{where } \dot{W}_S = \frac{1}{t} \int F_s ds.$$

여기서 \dot{W}_S 는 전단 일률, σ_c 는 압력 특성 함수, F_s 는 전단 하중이다. Lee⁽¹⁵⁾는 전열관 마모실험을 통해 마모 입자의 방출은 수직 하중보다 전단 하중의 영향을 많이 받는 것으로 확인되었다. 따라서 제안한 모델에서는 전단 하중의 영향을 반영하기 위해 전단 일률을 고려하였다. 또한, 충격 마모의 영향을 반영하기 위해 충격 압력(σ_i)이 고려되었는데, 이는 마모가 성장하면서 접촉단면적이 증가하는 현상을 반영할 수 있다.

2.2 마모 형상에 따른 마모 부피 계산

증기발생기 전열관과 지지구조물의 형상 혹은 위치에 따라서 마모 형상이 결정되며, 마모 부피가 같더라도 어떠한 형상의 마모가 발생하는지에 따라 마모 깊이가 달라진다. 본 연구에서는 평탄형 마모와 경사형 마모 형상이 고려되었다.

Figure 1은 평탄형 마모 형상이고, R 은 전열관의 바깥 반지름, h 는 마모 깊이, L 은 마모 길이이다. 평탄형 마모 형상의 마모 부피와 마모 깊이의 관계는 식 (8)⁽¹⁶⁾과 같다.

$$V = \frac{R^2 L}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha) \quad (8)$$

$$\text{where } \alpha = \cos^{-1}(1 - h/R).$$

실제 증기발생기 전열관에서 주로 발생하는 마모 형상은 경사형 마모이고⁽¹⁷⁾, 그 형상은 Figure 2와 같

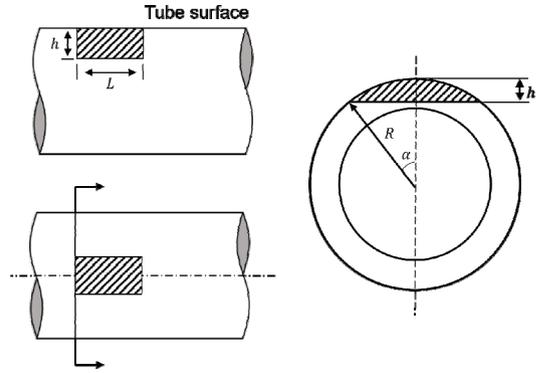


Fig. 1. Geometries of tubes with flat wear

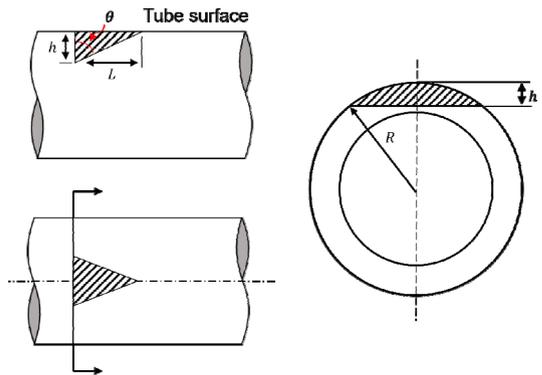


Fig. 2. Geometries of tubes with tapered wear

다. 여기서 θ 는 마모 각도이고, 경사형 마모 형상의 마모 부피와 마모 깊이의 관계는 식 (9)⁽¹⁶⁾와 같다.

$$V = \tan\theta [aR^2 - a^3/3 - R^2(R-h)\sin^{-1}(a/R)] \quad (9)$$

$$\text{where } a = \sqrt{2hR^2 - h^2}.$$

2.2 모델 검증용 시험 데이터

제안한 ISW 모델의 적절성을 검토하기 위해 280 °C, 15 MPa 환경에서 약 100시간의 프레팅 마모 시험을 진행한 결과를 사용하였다. 마모 시험 조건은 Table 1⁽¹⁴⁾과 같고 충격 주파수와 미끄럼 주파수를 각각 10Hz와 11Hz로 고정하고 충격 하중과 미끄럼 진폭을 조정하여 시험이 진행되었다. 마모 시험 전열관 시편에 사용된 재료는 Alloy 600과 Alloy 690이며, 지지관 시편의 재료는 SA 508 탄소강이 사용되었다.

ISW 모델의 평가에 사용된 전단 일률은 식 (10)을 통해 계산되었다. 전단 일률은 수직 일률과 마찰 계

Table 1 Wear test matrix for Alloy 600 and Alloy 690 steam generator tube specimens⁽¹⁴⁾

No.	Normal Work-rate (mW)	Impact Force (N)	Sliding Distance (μm)	Test Time (h)
A600-1	12.1	20	50	96
A600-2	45.8	50	190	96
A600-3	13.7	30	60	100
A600-4	36.5	50	100	100
A600-5	43.7	50	200	100
A600-6	20.9	40	100	100
A600-7	21.1	40	140	100
A690-1	17.1	50	80	100
A690-2	18.9	50	60	103
A690-3	52.8	50	200	103
A690-4	42.0	50	120	100
A690-5	23.8	30	200	100
A690-6	45.4	50	160	100
A690-7	48.9	50	180	100

수의 곱으로 나타낼 수 있고, Ko⁽¹⁸⁾와 Pendlebury⁽¹⁹⁾의 프레팅 마모 시험에 의하면 마찰 계수는 약 0.5 근방의 값을 가진다. 따라서 전단 일률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{W}_S = \mu \dot{W}_N = 0.5 \dot{W}_N \quad (10)$$

Python 3.11⁽²⁰⁾ 개발환경에서 마모 성장을 예측하였으며, 모델의 매개변수인 마모 계수와 모델 지수의 최적값을 계산하기 위해 Adam 최적화 방법⁽²¹⁾이 사용되었고, 학습률(learning rate)은 0.1로 설정하였다.

3. 마모 성장 예측 결과

본 연구에서 제시된 ISW 모델의 적절성을 평가하기 위해 Table 1에 나타낸 Alloy 600과 Alloy 690 재료 시편에 대한 시험조건을 가정하고, 마모 시험 결과와 비교하였다. 또한 Archard 모델의 예측 결과와도 비교하였다.

3.1 마모 부피 예측 결과

Figure 3(a), (b)는 각각 Alloy 600과 Alloy 690 재료의 누적 수직 일에 따른 마모 부피 예측 결과와 마

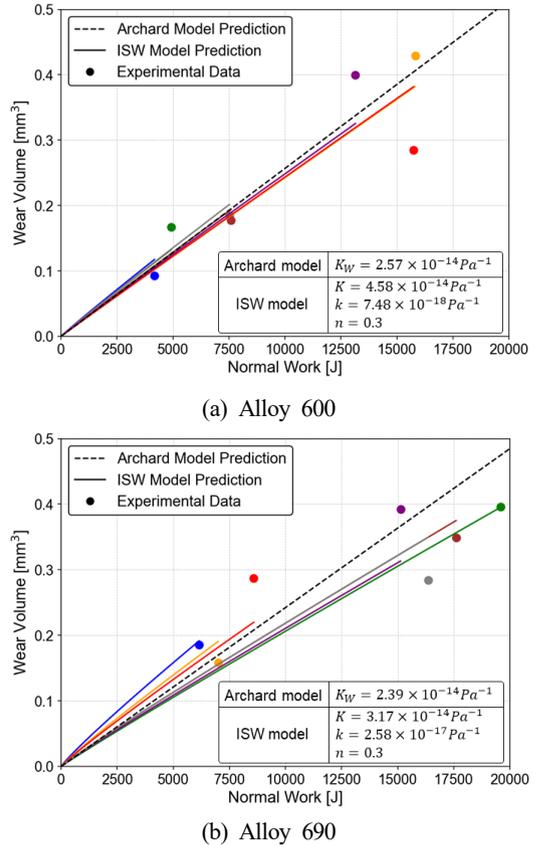


Fig. 3. Comparison of predicted wear volumes by Archard model and the ISW model in this study with experimental data for (a) Alloy 600 and (b) Alloy 690 specimens

모 시험 결과를 비교한 그래프이다. 점선은 Archard 모델의 예측 결과이며, 실선은 ISW 모델 예측 결과이다. Archard 모델과 달리, ISW 모델은 각 시편의 마모 성장 과정을 보여줄 수 있다. 동일한 색을 가지는 예측값과 측정값은 동일한 시편을 의미한다.

두 재료의 마모 성장 예측에 사용된 Archard 모델의 마모 계수(K_W), ISW 모델의 마모 계수(K , k)와 모델 지수(n)는 Table 2에 정리되어 있다. Archard 모델 경우, Alloy 690 전열관의 마모 계수가 Alloy 600보다 작게 나타났다. 일반적으로 Cr의 함량이 높을수록 가공경화능이 증가되며, 재료의 경도가 클수록 마모저항성이 우수하다.⁽¹⁵⁾ 따라서, Alloy 690 전열관의 Cr 함량이 Alloy 600 전열관보다 높기 때문에 마모 계수가 더 작게 나타난 것으로 볼 수 있다.

Table 2. Main parameters of wear models

Wear models	Parameter	Material of specimens	
		Alloy 600	Alloy 690
Archard model	$K_W [Pa^{-1}]$	2.57×10^{-14}	2.39×10^{-14}
	$K [Pa^{-1}]$	4.58×10^{-14}	3.17×10^{-14}
ISW model	$k [Pa^{-1}]$	7.48×10^{-18}	2.58×10^{-17}
	n	0.3	0.3

Table 3. RMSE of Archard model and the ISW model for wear volume and wear depth

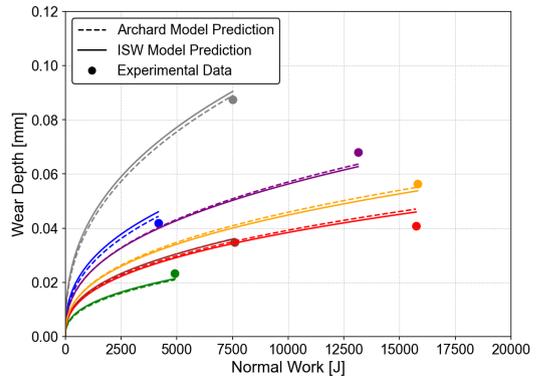
	Material of specimens	Wear model	
		Archard model	ISW model
Wear volume [mm ³]	Alloy 600	0.055	0.053
	Alloy 690	0.069	0.049
Wear depth [mm]	Alloy 600	0.0033	0.0036
	Alloy 690	0.0068	0.0049

ISW 모델 경우, 두 재료의 미끄럼 마모 계수(K)가 충격 마모 계수(k)보다 매우 크게 나타났다. 미끄럼과 충격의 영향을 정량적으로 비교하기 위해, 미끄럼에 의해 발생한 마모 부피를 총 마모 부피로 나누어 평균 미끄럼 마모 부피 비율을 계산하였다. 미끄럼 마모 부피는 식 (7)의 $K\dot{W}_s$ 에 시간(t)을 곱하여 구하였다. Alloy 600 및 690 전열관 시편의 평균 미끄럼 마모 부피 비율은 각각 0.89와 0.68로 나타났으며, 전체 마모 부피에서 충격 마모 부피보다 큰 비율을 차지하고 있다. 선행 문헌의 연구결과⁽¹⁵⁾와 같이, 증기발생기 전열관 프레팅 마모에서 미끄럼의 영향이 충격의 영향보다 클 것으로 판단되나, 충격의 영향도 무시할 수 없는 수준이라고 생각된다.

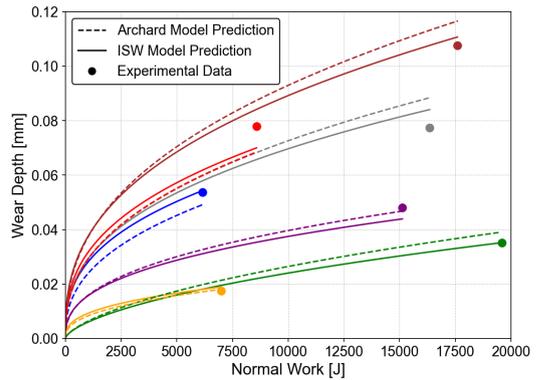
두 모델의 예측 정확도를 확인하기 위해 마모 부피 예측값과 시험 측정값과의 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)를 계산하여 Table 3에 정리하였다. ISW 모델은 Archard 모델 보다 Alloy 600 및 690 전열관의 마모 부피를 더 정확히 예측하였다. 특히, ISW 모델은 Alloy 690 전열관에서 더 높은 예측 정확도를 보였다.

3.2 마모 깊이 예측 결과

Figure 4는 Figure 3에서 예측한 마모 부피를 바탕으로, 누적 수직 일에 따른 마모 깊이를 나타낸 그래프이다. 마모 깊이는 초반에 급격히 증가하다가 증



(a) Alloy 600

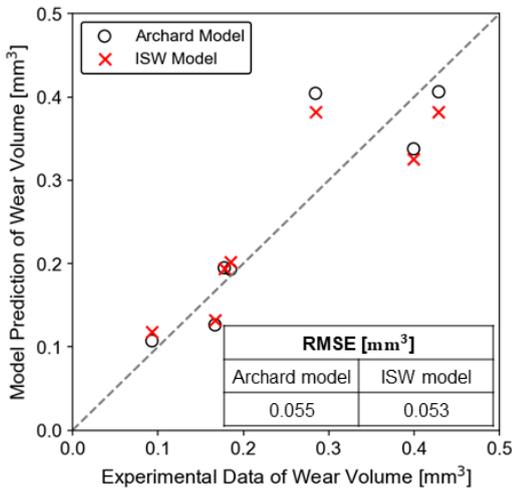


(b) Alloy 690

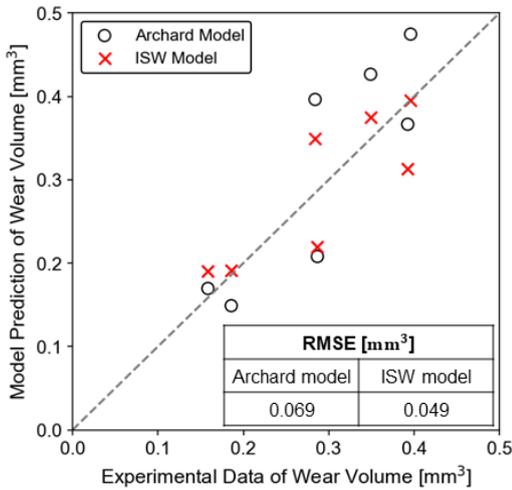
Fig. 4. Comparison of predicted wear depth by Archard model and the ISW model in this study with experimental data for (a) Alloy 600 and (b) Alloy 690

가 속도가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 마모 부피에 따른 최대 마모 깊이는 식 (8) 또는 (9)를 사용하여 수치적으로 계산하였다. 시편에서 나타난 대부분의 마모 형상은 경사형 마모이며, 평판형과 경사형이 합쳐진 마모 형상도 있다(시편 No. A690-3). 마모 부피에 따른 최대 마모 깊이를 계산하기 위해 수치해석방법인 뉴턴랩슨법(Newton-Raphson method)⁽²²⁾을 사용하였다.

마모 부피 예측 비교 결과에서와 같이, Alloy 600 전열관 시편에서는 두 모델간 큰 차이가 없으나 Alloy 690 전열관 시편 예측에서는 ISW 모델이 실험값에 보다 유사한 예측 결과를 보였다. 마모 깊이에 대한 예측값과 시험 측정값과의 RMSE를 Table 3에 나타내었다. Alloy 600 전열관 경우, RMSE 차이가 매우 작으므로 마모 깊이 예측 정확도는 비슷



(a) Alloy 600



(b) Alloy 690

Fig. 5. Scatter of model prediction and experimental data for (a) Alloy 600 and (b) Alloy 690 specimens

하다고 할 수 있다. Alloy 690 전열관 마모 깊이 예측 경우, 마모 부피 예측 경향성과 동일하게 ISW 모델의 RMSE가 더 작은 것을 확인하였다.

3.3 모델 예측 정확도 비교

두 모델의 예측 정확도를 비교하기 위해 예측한 마모 부피와 시험 측정값을 Figure 5와 같이 도시하였다. Figure 3에서도 확인한 바와 같이, Alloy 600 전열관에서 두 모델은 유사한 예측 정확도를 가지며, Alloy 690 전열관에서는 ISW 모델이 Archard 모

델보다 높은 예측 정확도를 보였다. 재료 종류에 따라 모델의 예측 정확도 차이가 발생한 원인을 아래와 같이 분석하였다.

3.1절에서 미끄럼과 충격 마모 부피 비율을 계산하였고, Alloy 690 전열관의 평균 충격 마모 부피 비율이 Alloy 600 전열관보다 더 크다는 것을 확인하였다. Table 2에 나타난 시험조건으로부터 Alloy 600 및 690 전열관에 가해진 평균 충격 하중을 비교하면, 각각 40.0 N과 47.1 N으로 Alloy 690 전열관에 가해진 평균 충격 하중이 더 큰 것으로 나타났다. 이로 인해 Alloy 690 전열관 시험에서 충격의 영향이 미끄럼보다 더 크게 나타났다고 생각된다. ISW 모델은 미끄럼과 충격의 영향을 동시에 고려할 수 있으므로, 미끄럼 영향이 지배적인 Alloy 600 전열관 시험 경우보다는 평균 충격 하중이 높아 충격 영향이 상당 부분을 차지하는 Alloy 690 전열관 시험 경우에서 더 정확한 예측 결과를 보였다고 할 수 있다. 따라서, 충격의 영향을 고려할 수 없는 Archard 모델보다는 미끄럼과 충격을 동시에 고려할 수 있는 ISW 모델이 증기발생기 전열관의 프레팅 마모 예측에 더 적합하다고 생각된다.

ISW 모델 평가에 사용된 전단 일률은 측정된 수직 일률에 일관된 마찰 계수($\mu=0.5$)를 곱한 값이다. 하지만 마찰 계수는 같은 재료에서도 수직 하중, 미끄럼 진폭 등의 영향을 받아 불규칙하게 나타난다.⁽¹⁸⁾ 향후 프레팅 마모 실험을 통해 측정된 전단 일률을 적용할 경우, 모델의 정확도가 더 증가할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 미끄럼과 충격의 영향을 모두 고려할 수 있는 증기발생기 전열관 마모 모델(ISW 모델)을 제안하였고, Alloy 600 및 690 전열관을 사용한 프레팅 마모 시험 결과를 사용하여 모델 계수를 추론하였다. ISW 모델의 미끄럼 마모 계수 차이는 Alloy 600 및 690 전열관 정도 차이로 인해 나타난 것으로 판단되며, 전열관 프레팅 마모에서 충격의 영향보다 미끄럼의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. ISW 모델을 기존 Archard 모델과 비교 평가한 결과, 전반적으로 충격의 영향을 고려한 ISW 모델의 예측 정확도가 Archard 모델보다 조금 더 높게 나타났다. 특히, Alloy 690 전열관에서 정확도가 더 개선된 것

으로 나타났는데, 이는 시편에 가해진 충격 하중이 더 높아 미끄럼 대비 충격의 영향이 커지면서 미끄럼 영향만을 고려하는 Archard 모델보다 두 가지를 모두 고려할 수 있는 ISW 모델의 특성이 반영된 결과로 판단된다. 향후 추가적인 마모실험을 통해 모델 정확도를 개선할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20224B10100030).

참고문헌

- (1) Fisher, N. J., Chow, A. B. and Weckwerth, M. K., 1995, "Experimental Fretting-Wear Studies of Steam Generator Materials," *J. Press. Vess-T. ASME*, Vol. 117, No. 4, pp. 312-320. doi:https://doi.org/10.1115/1.2842129
- (2) Amanov, A. and Umarov, R., 2018, "The effects of ultrasonic nanocrystal surface modification temperature on the mechanical properties and fretting wear resistance of Inconel 690 alloy," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 441, pp. 515-529. doi:https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.293
- (3) Cai, Z., Li, Z., Yin, M., Zhu, M. and Zhou, Z., 2020, "A review of fretting study on nuclear power equipment," *Tribol. Int.*, Vol. 144, 106095. doi:https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106095
- (4) Kim, H. D., 2010, "Burst Behavior of Wear Scar of Steam Generators Tubes," *Trans. of the KPVP*, Vol. 6, No. 2, pp. 1-8.
- (5) Lee, K. H., Kim, H. N. and Kang, Y. S., 2015, "Burst Pressure for Steam Generator Tubes with Inclined Wear Degradation," *Proc. of KPVP Conference*, Gimcheon, Nov. 19-20.
- (6) Archard, J. F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," 1953, *J. Appl. Phys.*, Vol. 24, No. 8, pp. 981-988. doi:https://doi.org/10.1063/1.1721448
- (7) Frick, T. M., Sogeck, T. E. and Reavis, J. R., 1984, "Overview on the development and implementation of methodologies to compute vibration and wear of steam generator tubes," *Symposium on Flow-Induced Vibrations*, New Orleans, Dec. 9-14, pp. 149-161.
- (8) Fricke, R. W. and Allen, C., 1993, "Repetitive impact wear of steels," *Wear*, Vol. 162-164, pp. 837-847. doi:https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90085-Z
- (9) Rabinowicz, E. and Tanner, R. I., 1966, "Friction and wear of materials," *J. Appl. Mech-T. ASME*, Vol. 33, No. 2, pp. 479.
- (10) Engel, P. A., Lyons, T. H. and Sirico, J. L., 1973, "Impact wear model for steel specimens," *Wear*, Vol. 23, No. 2, pp. 185-201. doi:https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90083-5
- (11) Guo, K., Tian, C., Wang, Y., Wang, Y. and Tan, W., 2020, "An energy-based model for impact-sliding fretting wear between tubes and anti-vibration bars in steam generators," *Tribol. Int.*, Vol. 148, 106305. doi:https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106305
- (12) Lewis, R., 2007, "A modelling technique for predicting compound impact wear," *Wear*, Vol. 262, No. 11-12, pp. 1516-1521. doi:https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.032
- (13) Zalzal, M., Lewis, R. and Slatter, T., 2021, "A new predictive model for normal and compound impact wear," *Wear*, Vol. 480-481, 203954. doi:https://doi.org/j.wear.2021.203954
- (14) Feldman, H., 2008, "Steam Generator Management Program: PWR Steam Generator Tube Wear-Alloy 690/Foreign Objects, Alloy 600/Carbon Steel, Alloy 690/Carbon Steel" Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1016563.
- (15) Lee, Y. H., Kim, I. S. and Park, Y. S., 2001, "A study on the formation of plastic deformation layer in the steam generator tube materials during fretting wear," *Proc. of KNS Spring Meeting*, Jeju, May 24-25.
- (16) Lee, K. H. and Kim, H. N., 2015, "Relationships between Depth and Volume for Various Wear Shapes," *Proc. of KSME Material and Fracture Division Conference*, Jeju, April 2-3, pp. 328-329.
- (17) Lee, K. H., Kang, Y. S. and Kim, H. D., 2019, "Methods for Determining Burst Pressure for Steam Generator Tubes with Wear Degradation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 43, No. 1, pp. 57-66. doi:https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.1.057
- (18) Ko, P. L., 1985, "The significance of shear and normal force components on tube wear due to fretting and periodic impacting," *Wear*, Vol. 106, No. 1-3, pp. 261-281. doi:https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90112-7

- (19) Aldham, D., Warburton, J. and Pendlebury, R. E., 1985, "The unlubricated fretting wear of mild steel in air," *Wear*, Vol. 106, No. 1-3, pp. 177-201. doi:[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90109-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90109-7)
- (20) Van Rossum, G. and Drake, F. L., 2009, *Python 3 Reference Manual*, CreateSpace, Scotts Valley.
- (21) Kingma, D. P. and Ba, J., 2014, "Adam: A Method for Stochastic Optimization," *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- (22) Yau, L. and Ben-Israel, A., 1998, "The Newton and Halley Methods for Complex Roots," *Am. Math. Mon.*, Vol. 105, No. 9, pp. 806-818. doi:<https://doi.org/10.1080/00029890.1998.12004968>