

# 국내 증기발생기 전열관 마멸에 대한 실험적 연구

## Experimental studies on the fretting wear of domestic steam generator tubes

이영호 <sup>a,\*</sup>, 김형규 <sup>a</sup>, 김인섭 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> 한국원자력연구소

<sup>b</sup> 한국과학기술원

**ABSTRACT:** Fretting wear test in room temperature water was performed to evaluate the wear coefficient of Inconel 600, 690 (Pressurized Water Reactor, PWR) and Alloy 800 (CANadian Deuterium Uranium, CANDU) steam generator (SG) tubes against ferritic and martensitic stainless steels. The main focus is to compare the wear behaviors between Alloy 800 and Inconel alloys. Test conditions are 10~30N of normal load, 200~450 $\mu$ m of sliding amplitude and 30Hz of frequency. The result indicated that the wear rate of Alloy 800 was higher than those of Inconel 690 at various test condition such as normal loads, sliding amplitudes etc. From the results of SEM observation, there was little evidence of plastic deformation layer that were dominantly formed on the worn surfaces of Inconel 690. Also, wear particles in Alloy 800 were released from contacting asperities deformed by severe plastic flow during fretting wear. Main cause of wear rate between Alloy 800 and Inconel 690 may be due to the difference of hardness between martensitic and ferritic stainless steel. The wear rate and wear mechanism of two tubes in room temperature water are discussed.

**Key Words:** Fretting wear, Steam generator tubes, Inconel alloy, Alloy 800, PWR, CANDU

### 1. 서론

현재까지 국내 증기발생기에서 빈번하게 발생하고 있는 프레팅 마모현상은 원전의 안전성을 위협하는 매우 중대한 열화기구로 인식되어 가고 있다. 이러한 현상의 주된 원인은 매우 잘 알려진 2 차축에서의 유체유발진동이나 현재까지 뚜렷한 해결책을 제시하지는 못하고 있는 실정이다. 결국 증기발생기 전열관, 핵연료 집합체 및 제어봉과 같이 원전에서 매우 긴 구조물은 필연적으로 발생하는 유체유발진동에 의해 항상 마모에 노출되어 있다. 따라서 이러한 진동에 의한 마멸현상을 피할 수 없다면 보다 효율적인 원전 구조물 관리를 위해 각각의 재질, 실험조건, 온도 등과 같은 변수에 따른 마모특성을 충분히 파악할 필요가 있다.

현재까지의 이러한 마모현상에 대한 문헌을 살펴보면 거의 대부분의 연구는 캐나다 AECL 에서 수행되었으며 이에 따라 중수로 증기발생기 전열관 재료인 합금 800

을 중심으로 각 시험변수(하중, 변위, 사이클, 온도 등)에 따른 마멸량과 최근 널리 사용되고 있는 증기발생기 마모 모델인 Work-rate 모델[1-3]을 사용하여 마멸계수를 산출하고 있다. 그러나 국내의 경우, 거의 대부분이 경수로형 원전이며 유체유발진동에 의한 마멸현상은 상부 유동이 심한 영역에서 빈번하게 발생되고 있다. 이때 발생된 마멸에 의한 열화는 가동 주기별 검사를 통하여 주요 열화예상위치에서의 마멸정도를 평가하고 40%이상의 관두께 손실이 다음 주기에 예상될 경우 관막음을 수행하게 된다. 따라서 과도한 마멸계수를 적용할 경우, 가동 중 전열관의 파단에 의한 1 차 냉각수 유출이 의심되는 전열관에 대한 과도한 예비 관막음의 수행하게 되며 이것은 장기적인 측면에서 원전의 효율성을 감소하게 된다. 따라서 보다 정확한 마멸계수 값의 산출이 필요하게 되었으며 이것은 각 전열관 재질에 따른 마멸기구의 이해로부터 가능하게 된다.

표 1. 실험에 사용된 전열관 및 지지구조물 재료의 합금 조성 (w/o)

Specimen	Cr	Fe	C	Si	Mn	Ti	P	S	Co	Ni
Inconel 600	16.81	9.1	0.026	0.32	0.81	0.35	0.008	0.002	0.012	Bal.
Inconel 690	29.5	10.4	0.02	0.33	0.26	0.32	0.004	0.001	0.012	Bal.
Alloy 800	21.54	Bal.	0.02	0.43	0.73	0.54	0.01	0.001	0.015	32.73
405SS	11.5 ~ 14.5	Bal.	0.08	1.00	1.00	0.1(Al)	0.04	0.03	-	-
409SS	10.5 ~11.75	Bal.	0.08	1.00	1.00	6x%C	0.045	0.045	-	-
410SS	11.5 ~13.5	Bal.	0.15	0.75max	1.00	0.15	0.04	0.03	-	0.5max

표 2. 실험에 사용된 시편 조건

Label	A	B	C	D	E
<b>S/G Tubes</b>	Inconel 600HTMA	Inconel 600HTMA	Inconel 690TT	Inconel 690TT	Alloy 800
<b>Support</b>	405SS	409SS	405SS	409SS	410SS
참고	YG 12 (I600TT)	UJ 34	KR 1	KNGR	WS 2-4

현재까지 수행된 마모실험은 현장에서 사용되고 있는 인코넬 600, 690 전열관과 지지구조물 재료인 페라이트 계열의 스테인레스 강에 대하여 수행되었다. 그러나 최근 중수로형 원전에서 이물질 관련 마멸열화가 발생하고 있으며 이에 따라 국내 증기발생기 전열관 마멸에 대한 DB 구축을 위해서는 실제로 사용되고 있는 전열관/지지구조물 사이의 보다 많은 마모실험이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 인코넬 600HTMA, 690TT 및 합금 800 전열관을 각 발전소별로 분류하여 그에 따른 지지구조물 재료를 사용한 실험을 수행하였으며, 각 재질별 마모정도를 비교하였다. 또한 실험후 관찰된 재질별 마모 기구의 차이를 분석하였으며, 증기발생기 마모에 사용되는 Work-rate 모델을 이용하여 각각에 대한 마모계수값을 산출하여 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편

실험에 사용된 증기발생기 전열관 재료는 현재 국내 원전에서 사용되는 인코넬 600HTMA, 690TT 및 합금 800 을 사용하였으며, 이에 대한 지지구조물 재료로 페라이트 및 마텐사이트 계열의 스테인레스 강 (405SS, 409SS 및 410SS)을 사용하였다. 마멸 실험후 마멸량의 측정은 0.1mg 의 정확도를 가진 미세저울을 이용하여 실험 전후에 수행하였다. 측정의 오차를 줄이기 위하여 5 회 이상 반복 측정과 기준시편을 이용하였으며 측정전에 초음파 용기에서 세척하여 마멸입자를 충분히 제거한 후 건조시켜 질량을 측정하였다. 각 시편에 대한 합금성분을 표 1 에 나타내었다. 여기서 국내

발전소 증기발생기별로 사용되고 있는 전열관/지지구조물의 조건을 A~E 까지 표기하였다. (표 2 참조)

## 2.2 실험변수

각 전열관 재료에 대한 마멸실험을 수행하기 위해 장치를 제작하였으며 그 개략도를 그림 1에 나타내었다. 실험에 사용된 변수로 수직하중은 10 ~ 40N, 미끄럼 진폭은 100 ~ 450 $\mu$ m이며 30Hz의 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 물은 화학적 영향인자를 제거하기 위하여 증류수를 사용하였으며, 실험을 수행하는 동안 수직하중, 마찰계수 및 진동진폭을 저장하여 실험을 수행한 뒤 분석 및 마모모델 적용시에 사용하였다.

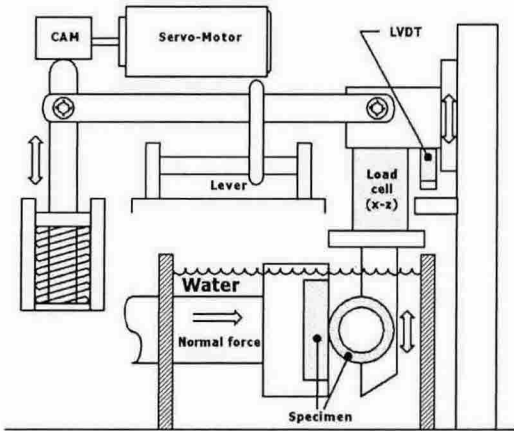


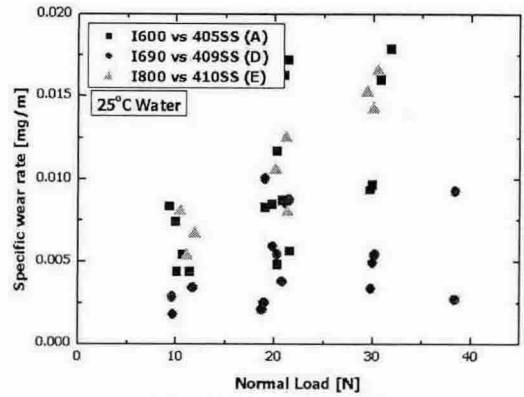
Fig. 1 실험에 사용된 마멸장치의 개략도

## 2.3 손상면 관찰

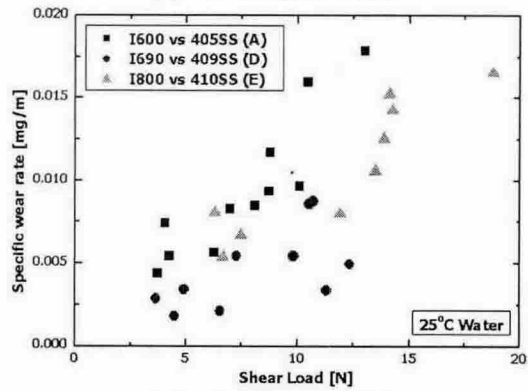
각 전열관에서 나타난 마모량의 차이와 손상면에서의 마모기구와의 관계를 파악하기 위하여, 실험을 수행한 후 세척을 수행하지 않은 상태에서 마멸입자의 거동까지 파악하기 위하여 손상면에 대한 주사식 전자현미경(SEM) 관찰을 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 전열관 재료의 마멸거동



(a) 수직하중의 영향



(b) 전단하중의 영향

Fig. 2 전체 실험조건에서의 수직하중 및 전단하중에 따른 마멸량의 변화

Fig. 2에 상온 물분위기에서 각 전열관 재료의 수직하중 및 전단하중에 따른 상대적인 마멸량을 나타내었다. 수직하중의 경우(Fig.2(a)), 하중이 증가함에 따라 인코넬 600 및 690 전열관의 마멸량 변화는 매우 불규칙적으로 진행됨을 알 수 있으나, 합금 800의 경우 마멸량이 다소 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 기존의 연구결과 표면에서 마멸입자의 방출기구는 접촉면에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 방출되며 따라서 표면에서의 변형수용능력이 상대적으로 뛰어난 인코넬 690 합금이 보다 높은 마멸저항성을 가지는 것을 알 수 있었다[4]. 따라서 이것을 표면에서 나타나는 마찰계수와 수직하중의 곱인 전단하중으로 나타내면 Fig.2 (b)와 같다. 여기서 앞에서 나타난 인코넬 합금의 많은 편차들은 거의

사라졌다. 그러나 합금 800의 경우, 수직하중 및 전단하중에 따른 상대적인 마멸량을 관찰해 볼때 큰 경향의 차이는 보이지 않고 있다. 이것은 합금 800의 마멸기구가 인코넬 합금처럼 표면변형층 형성과는 다른 마모기구가 있는것을 암시하는 것으로 판단되며 이것을 확인하기 위하여 주사식 전자현미경으로 관찰하였고 차후에 자세히 논하겠

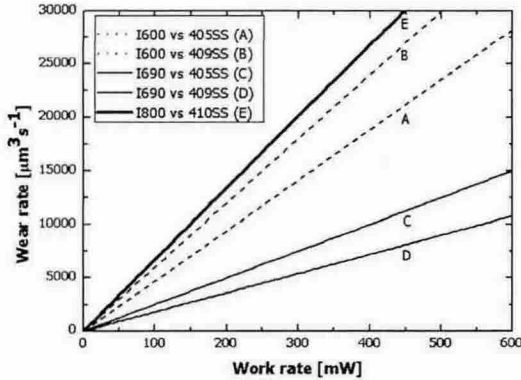


Fig. 3 각 전열관/지지구조물에 따른 상온 물분위기에서의 마멸계수 비교

### 3.2 마모계수 비교

마멸실험을 수행한 뒤 각 전열관/지지구조물에 따른 마멸계수를 현재 증기발생기 전열관 마모모델로 널리 사용되고 있는 Work-rate 모델을 이용하여 산출하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 나타난 값은 모든 실험결과의 평균값이며 어느정도 편차를 보이고 있으나 합금 800에서 매우 높은 마모계수값을 보이고 있다. 이 값은 현재 캐나다 AECL에서 발표한  $25 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ 의 값과 비교해 볼때 2배 이상 높은 값이며 기존의 인코넬 합금의 마모계수에 비해서도 상당히 높은 값을 보인다.

이러한 합금 800에서의 높은 마모계수값의 원인으로 기본적인 재료의 차이점을 들 수 있다. 합금 800의 재료는 니켈기질인 인코넬 합금과는 달리 철계 합금으로 기본적인 변형특성 또한 다르다. 또한 지지구조물 재료 또한 페라이트 계열이 아닌 다소 경도가 높은 마텐사이트 계열의 합금으로

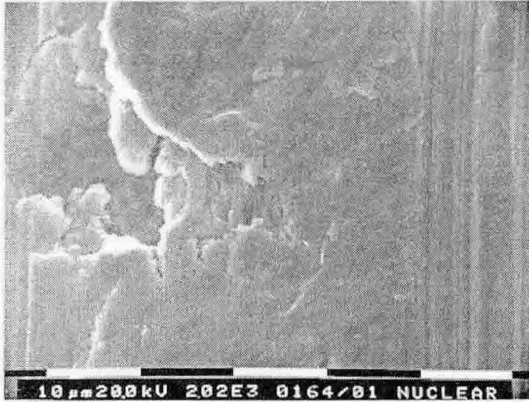
알려져 있다. 따라서 마멸과정중 접촉면에서의 마찰계수 및 접촉시 변형특성 또한 매우 달라지게 되며 결국 최종적인 마멸량의 변화로 이어지게 된다.

또한 현재 수행된 실험은 실제 보고된 충격 프레팅 마모(Impact-fretting wear)조건이 아니라 접촉한 상태에서 반복 슬라이딩 마모(Reciprocating sliding wear)조건이 더욱 많은 마모를 일으키는 것으로 보여진다. 또한 실험장치조건에 따라 부분 슬립(Partial slip)이 아닌 전범위 슬립(Gross slip) 조건이므로 이에 따른 접촉면에서의 변형거동과 재료의 가동경화지수, 항복응력 등과 같은 기본적인 물성치의 차이가 결국 마모량의 차이로 나타난 것으로 보인다. 그러나 같은 조건 하에서 수행된 결과로부터 인코넬 690에 비해 다소 많은 마모량을 나타내는 것을 알 수 있다.

### 3.3 손상면 관찰결과

현재까지 수행된 결과로부터 두 인코넬 합금의 마멸기구는 거의 분석을 완료하였다. 따라서 본 연구에서는 합금 800의 손상면을 중심으로 SEM을 이용하여 관찰하였다. Fig. 4에 마모실험을 수행한 뒤 손상면에 대한 SEM 관찰결과를 나타내었다. 합금 800의 경우, 손상면에서 소성 유동에 따른 변형돌기가 수직하중에 의해 눌러진 흔적이 명확히 나타났으며, 이와 동시에 미세한 마모입자에 의한 연삭 마모 흔적이 뚜렷이 보이고 있다. 이것은 인코넬 690 합금에서는 거의 나타나지 않은 것이며 특히 특정두께의 변형층이 형성되는 경향은 전혀 보이지 않다. 이와 마찬가지로 410 스테인레스 강에서도 연삭에 의한 마모거동이 보이고 있으나 이와 동시에 소성변형층의 흔적을 잘 보이고 있다. 따라서 상온 물속에서 합금 800의 마모입자 방출은 우선적으로 경도가 높은 마텐사이트 계열의 410 스테인레스 강에 의해 표면에서의 돌출부가 반복 진폭에 의해 소성 유동이 발생하고 이에 따라 돌기는 변형에 의해 평활한 층을 형성하는 것으로 보인다. 이때 마모입자는 지속적인 반복변형에 의해 끝단에서 우선적으로 균열이 생성하게 되며 상대적으로 크기가

큰 입자로 방출되는 것으로 나타났다. 따라서, 인코넬 690 과 합금 800 의 상온 물속에서의 마모기구는 표면에서 반복적인 변형에 의해 마모입자가 방출되는 것은 유사하게 나타났으나, SEM 관찰결과로부터 연삭 마모의 흔적, 소성 유동에 의한 돌출부 변형에 의한 층 형성이 주요한 차이점이며 이것이 결국 합금 800 의 보다 높은 마모량 및 마모계수로 이어졌다.



(a) 합금 800



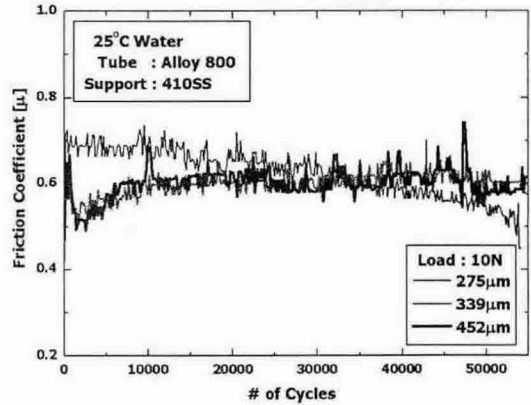
(b) 410SS

Fig.4 마멸실험을 수행한뒤 합금 800 과 410SS 의 손상면 관찰 결과

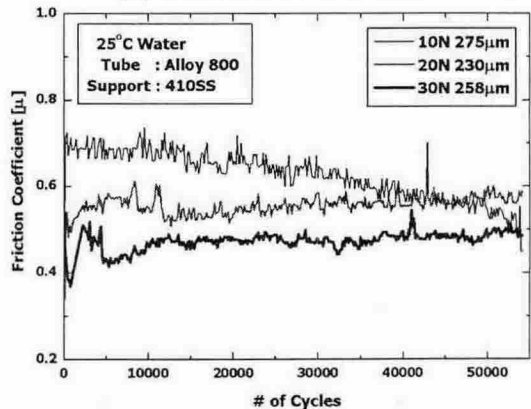
### 3.4 합금 800 의 마찰계수와 마멸기구

각 실험조건에서의 마찰계수 변화를 그림 5 나타내었다. 비슷한 슬라이딩 진폭 하에서 수직하중이 증가할수록 마찰계수 값은 감소하고 있었으며, 일정 하중 하에서 슬라이딩 진폭이 증가할수록 마찰계수 값이 서

서히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 기존의 인코넬 합금에서의 마찰계수 경향과 다소 유사하게 나타난 것으로 판단된다.



(a) 슬라이딩 진폭의 영향



(b) 수직하중의 영향

Fig. 5. 마멸실험 과정중의 마찰계수의 변화

SEM 관찰결과로부터 마모입자의 방출이 표면에서의 소성 유동 후 끝단에서 마모입자가 방출되므로 실제 변형과 관련된 마찰계수 혹은 전단하중과 마모량 사이의 관계를 확인하기 위하여 그림 6 에 그 결과를 나타내었다. 그 결과 마찰계수를 사용하기 전후의 데이터 신뢰도의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 즉, 마모입자의 방출이 접촉면에서의 소성변형과 파괴를 경험하여야 하므로 가해진 하중 및 변위는 표면에서의 변형층 형성보다는 돌출부의 변형과 연삭이 동시에 진행된다. 이것은 외부에서 가해

는 수직하중 및 슬라이딩 진폭이 낮은 영역과 높은 영역에서의 마모기구 차이가 거의 없는 것을 의미한다. 결국 합금 800의 마모기구는 인코넬 690과는 달리 표면 변형층의 형성이 거의 나타나지 않았으며, 다소 강도가 높은 410 계열의 스테인레스 강으로 인해 연삭 마모 또한 주요한 기구로 나타났다.

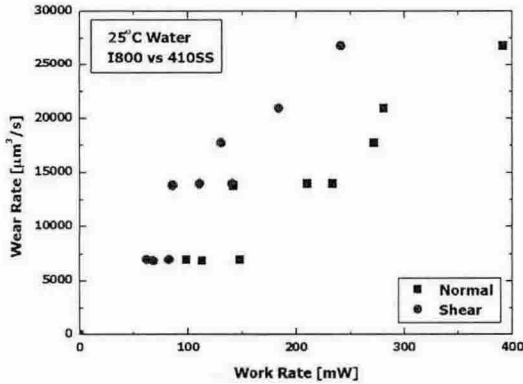


Fig. 6 수직 및 전단하중에 따른 합금 800의 마멸량 변화

#### 4. 결론

원전 증기발생기 전열관 재료인 인코넬 600 및 690 합금과 합금 800에 대한 마멸 실험을 상온 물 분위기에서 수행하였으며 Work-rate 모델을 적용하여 마멸계수를 산출하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 마모실험결과, 상온 물속에서 합금 800의 마모량은 기존의 인코넬 690에 비해 보다 크게 나타났다. 이러한 주된 원인은 지지구조물 재료인 마텐사이트 계열의 높은 경도값으로 보인다.

(2) 인코넬 690의 마모계수 값과 비교해 볼 때  $67 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ 의 다소 높은 값을 보이고 있었으며, 가해진 일률(Work-rate)의 크기와는 무관하게 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다.

(3) SEM 관찰결과, 표면에서 방출되는 마모

입자는 접촉면에서 발생되는 돌출부의 소성 유동에서의 미세균열전파로 인해 발생되며 이것은 기존의 인코넬 690에서 변형에 의한 변형층 형성 흔적은 나타나지 않았다.

(4) 상온 물속에서 410 스테인레스 강에 대한 합금 800의 마모기구는 접촉면에서 생성되는 소성 유동 흔적에서의 미세균열 형성 및 파괴와 410 스테인레스 강의 높은 경도에 따른 연삭 마모로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 교육인적자원부에서 지원하는 두뇌한국 21 과 한국전력공사의 차세대 원자로 기술개발과제 및 과학기술부 원자력 연구 개발 사업에서 부분 지원 되었음.

#### 참고 문헌

[1] N. J. Fisher et al. "Experimental fretting-wear studies of steam generator materials", J. Pressure Vessel Technology, Vol. 117, p312-320, 1995

[2] F. M. Guerout et al, "Effect of temperature on steam generator fretting-wear", ASME Int' Conf, of PVP, Vol. 328, Flow-Induced Vibration, p233-246, 1996

[3] F. M. Guerout and N. J. Fisher, "Steam generator fretting wear damage: A summary of recent findings", J. Pressure Vessel Technology, Vol. 121, p304-310, 1999

[4] Y. H. Lee, Ph.D thesis, Dept. of Nuclear Eng. KAIST, 2002