

# 핵연료 피복관 프레팅 마멸에서 나타난 마멸면 특성 분석

이영호<sup>†</sup> · 김형규\* · 정연호\*

## Analysis of Worn Area Characteristic in the Fretting Wear of Nuclear Fuel Rod

Young-Ho Lee, Hyung-Kyu Kim, Youn-Ho Jung

**Key Words :** Nuclear fuel rod(핵연료 피복관), Worn area(마멸면), Spring shape effect(스프링 형상 영향), Ratio of wear volume to worn area(마멸면적과 부피비)

### Abstract

To evaluate the effect of spring shape on the fretting wear of nuclear fuel rod, sliding wear tests were performed using three kinds of space grid springs in room temperature air and water. With increasing slip amplitude, wear volume of each spring gradually increased. It is apparently shown that spring with convex shape had a relatively high wear resistance compared with concave shape springs. It is suggested that the ratio of the wear volume to the worn area can be suggested as an efficient and valid parameter to evaluate the wear resistibility of a fuel grid spring.

### 1. 서 론

경수로형 원자력발전소의 노심에서 핵반응에 의해 발생된 열을 제거하기 위해 빠른 유속을 가진 유체가 연료봉 주위를 지나갈 때 필연적으로 유체유발진동(Flow-induced Vibration, FIV)이 발생하게 되어 이에 따른 프레팅 손상이 중요한 문제로 인식되고 있다. 이러한 프레팅 손상은 기존의 부식관련 손상에 비하여 매우 빠른 속도로 진행되기 때문에 핵연료의 건전성을 위협하는 매우 중요한 문제이다. 이를 극복하기 위하여 내마멸성을 가지는 피복관 개발이 중요할 수 있으나 경제성을 고려해 볼 때 핵연료봉을 지지하는 스프링의 형상을 최적화하는 것이 매우 유리하다.

일반적으로 프레팅 마멸에 영향을 미치는 인자로서 접촉하중, 상대 미끄럼 변위가 매우 중요한 인자로 인식하고 있다. 그러나 현재까지 수행된 실험결과를 살펴보면 이러한 하중관련 변수와 유사하게 접촉형상 또한 매우 중요한 변수임을 확

인하였다[1]. 이러한 원인은 피복관과 접촉하는 스프링의 형상에 따라 마멸 진행특성의 변화가 발생하기 때문이다. 특히 스프링 형상을 설계할 때 연료봉을 감싸는 형상, 즉 면접촉을 의도한 스프링과 선접촉을 의도한 스프링에 대한 마멸실험 결과에서 마멸부피는 면접촉을 의도한 스프링에서 다소 크게 나타났다. 그러나 이러한 마멸부피를 가지고 스프링의 내마멸성을 평가하기에는 다소 부족한 점이 있다. 왜냐하면 실험에 사용된 스프링의 형상 영향이 같은 실험조건이더라도 서로 다르게 적용될 수 있기 때문이다. 이것은 스프링형상의 영향을 평가하기 위한 새로운 변수가 필요함을 의미한다.

특히 핵연료봉 또는 증기발생기 전열관과 같이 내부 그리고/또는 외부로 유체가 흐르는 튜브형상의 구조물에 발생하는 마멸손상의 경우 마멸부피보다는 마멸깊이가 구조물의 수명을 결정하는데에 훨씬 중요한 변수이다. 그러나 마멸깊이는 접촉면에서 국부적으로 나타나는 마멸진행의 특성 상 매우 큰 편차를 가지게 되어 대표성 있는 변수로 사용하기에는 문제점이 많다.

이에 따라 접촉면에서 나타난 핵연료 피복관의 마멸면적을 이용하여 핵연료 집합체의 프레팅 손상에 대한 내마멸성 평가방법을 새로이 발표하였

<sup>†</sup> 한국원자력연구소 경수로연료개발부

E-mail : ex-leeyh@kaeri.re.kr

TEL : (042) 868-8761 FAX : (042) 863-0565

\* 한국원자력연구소 경수로연료개발부

으며[2], 본 연구에서는 이를 개선하여 새로운 평가변수와 방법을 제안한 것이다.

## 2. 실험과정

### 2.1 시편

본 시험에 사용된 핵연료집합체 지지격자 스프링은 핵연료봉과 접촉하는 부분이 볼록한 형상의 A 및 C 스프링과 이와 반대로 오목한 형상을 가진 B 스프링을 사용하였다. A 및 C 스프링의 경우, 피복관을 감싸는 형상을 가지는 반면 B 스프링은 접촉하중이 증가함에 따라 접촉길이(혹은 면적)가 증가하는 특성을 가진다. 각각의 스프링 형상 및 연료봉과의 접촉에 대한 대략적인 모습을 Fig. 1 에 나타내었다. 시험에 사용된 시편의 재질은 Zirlo 이며 이 합금은 핵연료 피복관을 포함한 노심내부에서의 구조물에 널리 사용되는 지르코늄 합금을 개선하기 위해 개발된 재료로 Table 1 에 개략적인 합금조성을 나타내었다.

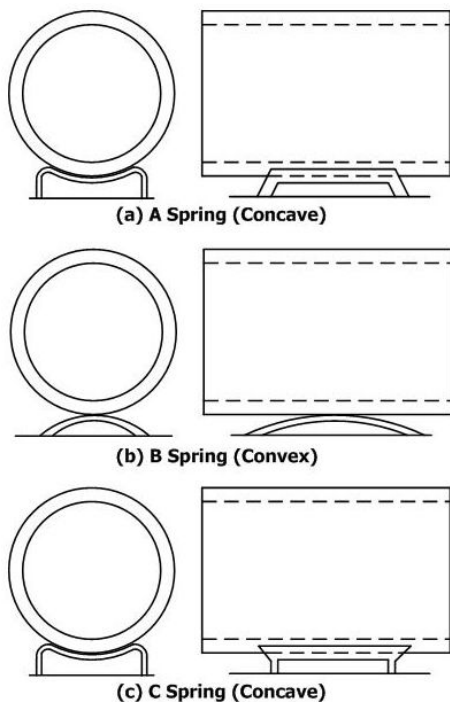


Fig. 1 Schematic views of tested springs.

Table 1 Chemical composition of spring specimen (wt%)

Element	Nb	Sn	Fe	O	Zr
contents	1.00	0.99	0.11	0.113	Bal.

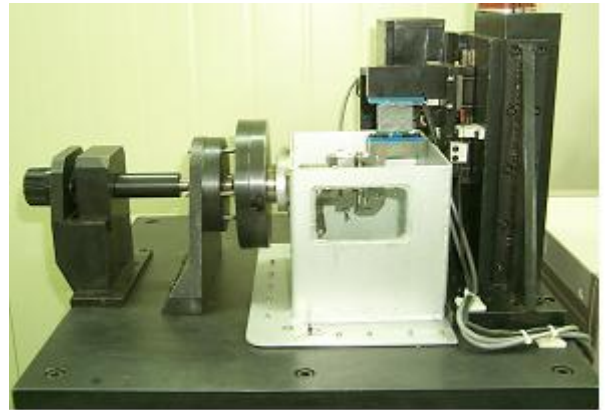


Fig. 2 The schematic view of room temperature fretting wear tester.

### 2.2 시험장치 및 조건

본 실험에서 사용된 미끄럼 마멸시험기는 상온 공기 및 수중에서 실험을 수행하도록 자체 제작하였으며 시험기의 개략도를 Fig. 2 에 나타내었다. 시험기에 대한 자세한 설명은 기존의 문헌에 나타내었다[3]. 시험에 적용한 변수로 접촉하중은 10 N 을 사용하였으며 피복관과 스프링 사이의 상대 미끄럼 변위는 50, 80 및 100  $\mu\text{m}$  를 적용하였다. 미끄럼 주파수는 30 Hz 를 적용하였고 10 만 사이클까지 실험을 수행하여 결과를 비교하였다. 실험에 사용된 환경은 상온 공기 및 물속에서 수행되었고 각각 2~3 회 반복 시험하여 평균 값을 사용하여 결과를 비교하였다.

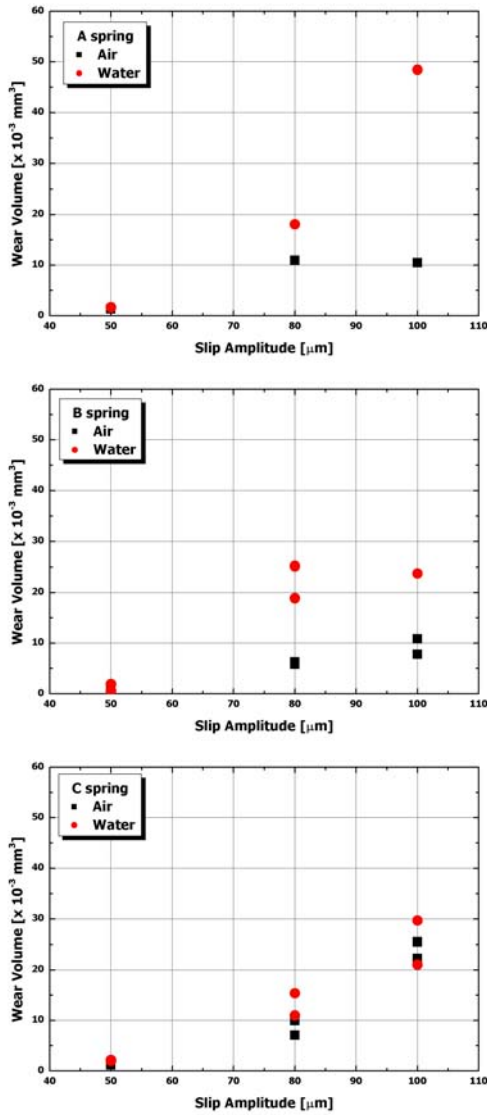
### 2.3 시험결과 분석

마멸실험을 수행한 후 시편을 세척하여 마멸면에 잔류하고 있는 입자를 일정한 절차에 따라 제거한 뒤 광학현미경을 이용하여 마멸면을 관찰하였다. 이때 보다 정확한 접촉면적을 산출하기 위하여 마멸면에서 획득한 정보를 상용프로그램을 사용하여 계산하였다. 또한 실제 마멸면에서 마멸부와 돌출부 사이의 구성비를 표면거칠기 데이터를 이용하여 산출하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

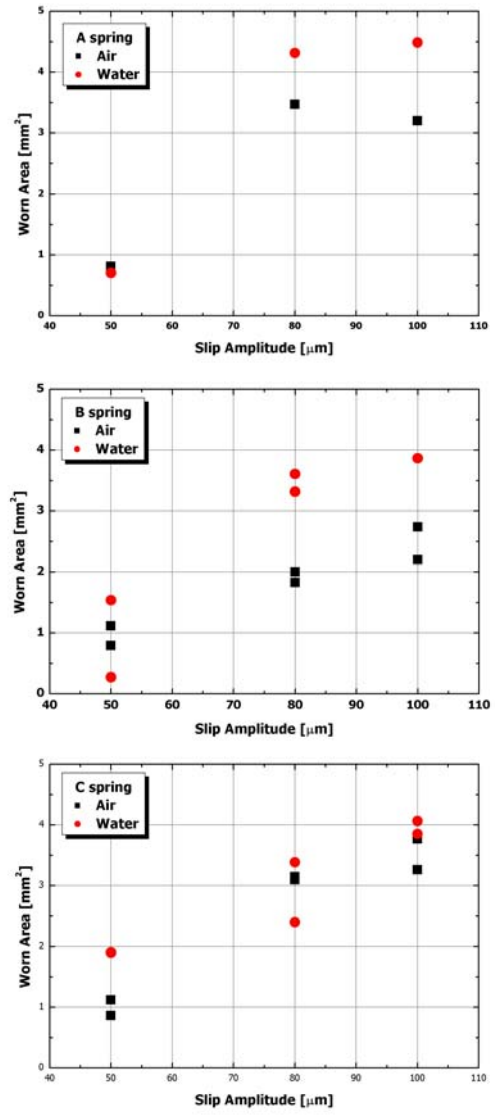
### 3.1 마멸시험결과

상온 공기 및 물속에서 미끄럼 마멸시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 미끄



**Fig. 3** Variation of wear volume with increasing slip amplitude in room temperature air and water.

럼진폭이 증가함에 따라 마멸량은 모든 스프링형상에서 공통적으로 증가하는 경향이 명확히 나타났다. 가장 큰 마멸량을 보인 조건은 A 스프링으로 나타났으며 특히 물속에서의 마멸량이 매우 크게 나타난 것을 알 수 있다. 일반적으로 물속에서 마멸이 발생하게 되면 두 접촉면 사이에서 마멸입자에 의한 층형성이 어렵게 되며 이와 동시에 마멸입자의 방출 또한 용이하게 되어 마멸량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 본 실험 결과에서 나타난 C 스프링의 경우 공기 및 물속에서의 마멸량 차이가 크게 나타나지 않은 반면 A 및 B 스프링에서는 실험환경이 변화함에 따라 마멸량이 매우 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인을 보다 자세히 규명하기 위해서는 접촉면에서 발생한 마멸면을 살펴볼 필요가 있다.



**Fig. 4** Effect of slip amplitude and environment on the variation of worn area after wear tests.

마멸면의 형상 및 크기는 실험에 사용된 각각의 스프링 형상과 매우 밀접한 관련이 있다. 우선 광학현미경을 이용하여 측정된 마멸면의 크기를 Fig. 4에 나타내었다. 미끄럼 진폭이 증가함에 따라 마멸부피와 유사하게 면적 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 B 및 C 스프링의 경우, 마멸면적의 크기는 마멸부피와 매우 유사한 경향을 보였으나 A 스프링에서는 공기중에서 수행한 마멸시험 결과에서 마멸량은 상대적으로 작으나 마멸면적은 다소 큰 값을 보이고 있는 것이 특징이다. 이러한 부피와 면적사이의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 마멸면적이 증가함에 따른 마멸부피의 증가는 선형적인 관계를 가지지 않고 있으며 특히 B 및 C 스프링조건에서는 마멸부피가 서서히 증가하는 거동을 보인 반면 A 스프링에서는

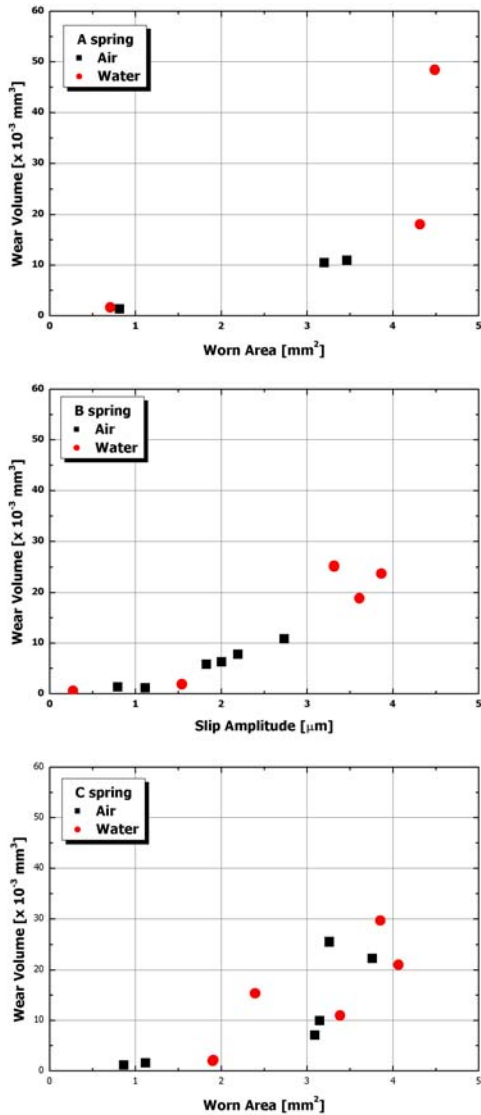


Fig. 5 The relationship between worn area and wear volume.

특정 마멸면적 이상에서는 마멸부피가 급격히 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 초기 마멸면적이 적을 경우 접촉면에서 형성된 마멸입자의 영향이 우세하게 작용하기 때문에 마멸면에서 마멸부피로 측정된 값보다는 돌출부로 구성된 마멸면적이 많이 존재하기 때문으로 생각된다. 이에 따라 마멸시험 후 측정된 마멸면에 대한 자세한 관찰이 필요하다.

### 3.2 마멸면 분석방법

마멸시험을 수행한 뒤 마멸시험결과로 산출되는 것은 일반적으로 마멸부피, 최대 마멸깊이 및 마멸면적이 있다. 이 중에서 마멸부피를 측정하는 방법은 매우 다양한데 일반적으로 수행되는 방법

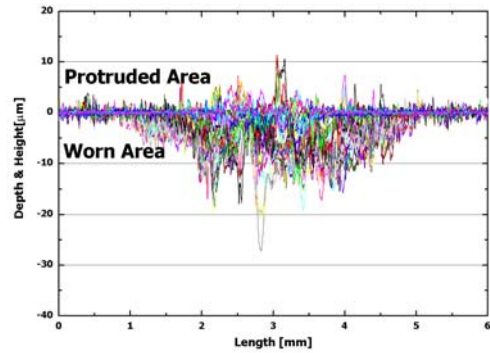


Fig. 6 The schematic view of worn area profile.

으로 질량감소의 측정, 조도계를 이용한 마멸부피 산출 등의 방법이 있다. 본 실험에서는 2 차원 표면 조도계를 이용하여 길이방향으로의 마멸면 거칠기를 측정하고 이를 3 차원으로 배열하여 마멸부피를 측정하였으며 대표적인 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 마멸면을 구성하는 요소를 마멸부와 돌출부 및 초기 시편 거칠기 값에 따른 오차범위로 요약할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$A_t = A_w + A_p + A_o$$

여기서  $A_t$ 는 실제 관찰된 마멸면이며,  $A_w$  및  $A_p$ 는 마멸부와 돌출부의 면적으로 정의하였고  $A_o$ 는 각 시편에서 보이고 있는 표면거칠기의 값이 서로 다르기 때문에 발생하는 오차이다. 특히  $A_o$ 의 값은 마멸부와 돌출부의 높이를 시편의 거칠기 값에 특정 상수를 곱한 값보다 높은 값을 보이는 영역이며  $\pm k \cdot R_a$  ( $k$ 는 상수,  $R_a$ 는 평균거칠기) 내에 있는 값으로 정의하였다. 여기서 사용한  $k$  값은 시편마다 서로 다르며 이 값의 산출은 다음과 같은 방법을 이용하였다. 우선 마멸면을 구성하고 있는  $A_o$  값은 마멸부와 돌출부로 나눌 수 있으며 각각의 상대적인 양은  $A_w$ 와  $A_p$ 의 비에 근사한 값을 가질 것으로 예상된다. 다시 말하면  $\pm k \cdot R_a$ 의 범위내에서 마멸면적을 구성하고 있는 값 중에서 마멸의 진행이 빠르게 될 경우,  $A_w$  값이 증가하므로 이에 따른  $A_o$  값 내에서의 마멸부도 증가하게 된다. 이러한 방법을 사용하면 실제 마멸면은 마멸부와 돌출부로 구분할 수 있다(즉,  $A_o = A_{ow} + A_{op}$ ).

상술한 바와 같이 스프링 형상이 다르면 접촉면에서 나타나는 마멸면의 모양 또한 다르게 되며 실험에 적용된 미끄럼 진폭도 큰 영향을 미치게 된다. 이것은 결국 마멸부피의 차이를 가져오기 때문에 마멸면을 구성하고 있는 마멸부와 돌출부

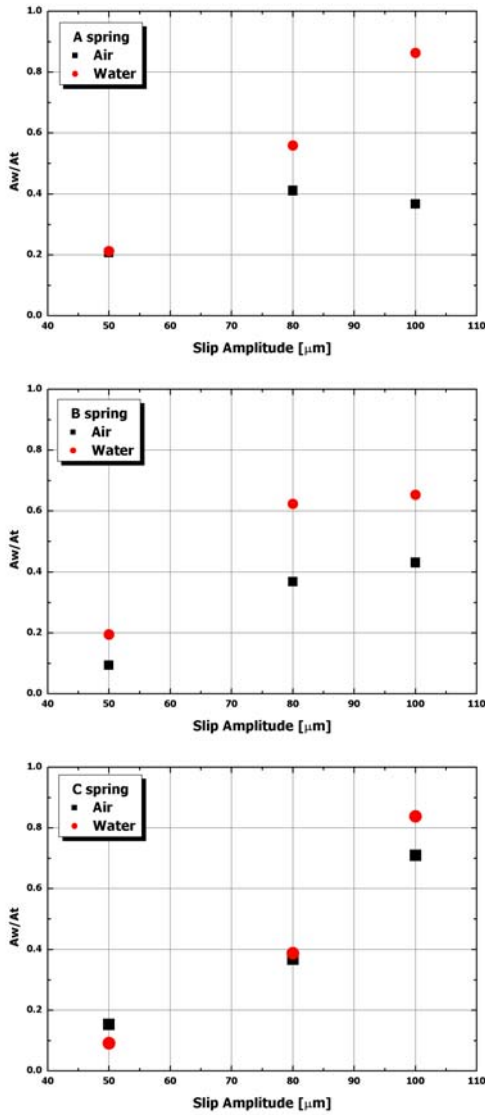


Fig. 7 The variation of  $A_w/A_t$  at each test condition.

사이의 값 또한 변화할 수 있으며 실제 마멸부피의 관계에서도 전체 마멸면적( $A_t$ )보다는  $A_w$ 를 적용하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 본 논문에서 제안한 마멸부를 이용하여 기존의 결과를 재 검토하였다.

### 3.3 마멸면 분석결과

미끄럼 진폭이 증가함에 따라 각 스프링 조건에서 전체 마멸면에서의 마멸부의 상대적인 양 ( $A_w/A_t$ )을 산출하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 미끄럼 진폭이 증가함에 따라 모든 스프링에서  $A_w/A_t$  값이 증가하였으나 그 민감도는 형상에 따라 다소 차이가 남을 확인하였다. A 스프링의 경우, 공기분위기에서는 미끄럼 진폭이 증가하더라도  $A_w/A_t$ 의 비가 둔화되는 경향을 보

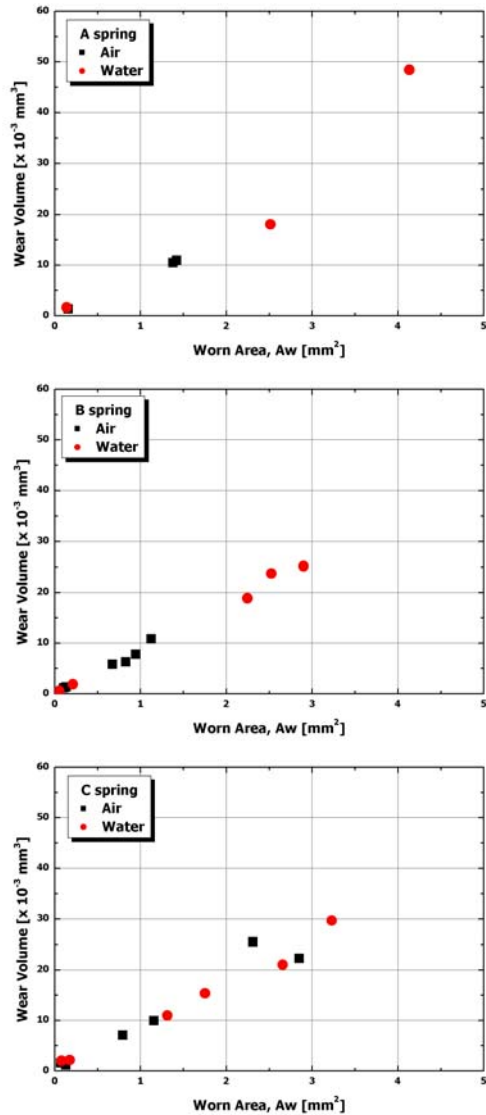


Fig. 8 The relationship between worn area ( $A_w$ ) and wear volume.

이고 있다. 이것은 마멸면을 구성하고 있는 마멸입자가 접촉면에서 견고한 마멸입자층을 잘 형성하는 것을 의미하므로 최종적으로 나타난 마멸부피값은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 작은 값을 보인다. 그러나 물속에서는 이러한 마멸입자층의 형성이 용이하지 못하기 때문에 전체마멸면에서의 마멸이 발생하게 되어 급격한 마멸의 진행이 나타나게 된다. 따라서 실제 핵연료봉에서 발생하는 프레팅 손상이 물속조건이므로 A 스프링의 내마멸성은 다소 낮은 것으로 판단할 수 있다.

이와는 달리 C 스프링에서는 실험환경과는 무관하게  $A_w/A_t$ 의 값이 미끄럼 진폭에 따라 선형적인 관계를 보이고 있다. 이러한 결과는 실제 마멸과정에서 생성되는 마멸입자의 거동이 환경에 큰 영향을 받지 않거나 스프링 형상의 영향으

로 인하여 외부로의 방출이 용이하지 않은 것으로 판단된다. 특히 B 스프링의 경우, 미끄럼 진폭이 증가함에 따라  $A_w/A_t$  값의 증가가 둔화되는 경향이 공기 및 물속에서 모두 나타났는데 이것은 상대적으로 돌출부 혹은 마멸입자층의 형성이 용이한 것을 의미한다. 전체 마멸면에서 마멸부의 구성비가 작을수록 내마멸성을 가지는 것으로 생각할 수 있는데 B 스프링에서 상대적으로 둔화되는  $A_w/A_t$  값을 보이는 이유는 스프링 형상이 불룩하기 때문에 미끄럼 진폭이 증가함에 따라 마멸면이 확장될 때 깊이 방향보다는 길이방향으로 진행이 빠르며 이와 동시에 확장된 면적내부에서의 돌출부의 형성이 용이하기 때문으로 생각된다.

핵연료 피복관의 내마멸성을 평가하는데 있어 최대 마멸깊이가 매우 중요하다. 이것은 연료봉에서의 과도한 마멸로 인해 천공이 발생할 경우, 피복관 내부의 방사선 물질이 외부로 유출되는 중대사고를 유발하기 때문이다. 그러나 최대마멸깊이는 실제 마멸부에서 국부적으로 발생하기 때문에 실험을 수행할 때의 미세한 차이(시편 설치 혹은 가공시의 오차 등)로 인해 매우 큰 편차를 가질 수 있다. 그럼에도 불구하고 깊이방향의 마멸진전은 핵연료봉과 같은 튜브 구조물의 마멸수명 평가에 중요하므로 깊이의 차원과 의미를 갖는 변수를 개발하여 각 스프링의 내마멸성을 평가할 수 있다면 매우 유용할 것이다.

이와 같은 변수로서 마멸부피 대 면적의 비를 고려하였으며 이것을 등가 깊이로 정의하였다. 등가 깊이는 상대적으로 편차가 적은 마멸부피와 마멸면적을 이용하였으므로 최대 마멸깊이에 비해 평가변수로서 좀더 일반화할 수 있을 것으로 사료된다. 이때 마멸면적으로서  $A_w$  를 이용하여 본 연구의 실험결과에 적용한 결과를 Fig. 8 에 보여 준다. Fig. 8 로부터 스프링형상에 관계없이 마멸부피와 마멸면적( $A_w$ ) 사이에는 선형적인 관계를 가지는 것을 관찰할 수 있다.

이때 선형적 관계에 대한 비례상수가 등가 깊이가 되며 이 값이 낮을수록 내마멸성이 크다고 평가할 수 있다. Fig. 8 에서의 각 스프링에 대한 등가 깊이는 B 스프링의 경우에 가장 작았다. 이 결과는 기존의 마멸부피 및 최대깊이에 대한 스프링별 평가결과와 일치하였으므로 본 논문의 등가 깊이를 핵연료봉 프레팅마멸에 영향을 미치는 스프링의 마멸평가 변수로서 타당하게 사용할 수 있다고 판단된다.

## 4. 결 론

상온 공기 및 물속에서 핵연료집합체의 지지격자체 스프링에 대한 미끄럼 마멸시험을 세 가지 형상을 가지는 스프링에 대하여 수행하였으며 마멸면 분석을 병행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 미끄럼 진폭이 증가함에 따라 세 가지 형상의 스프링 조건에서 마멸량이 증가하였다. 그러나 실험환경 영향에 따른 마멸입자의 거동은 스프링 형상에 따라 서로 다르게 나타난 것으로 판단된다.
- 2) 실제 측정된 마멸면을 마멸부와 돌출부로 구분하였고 그 결과 스프링 형상에 따라 서로 다르게 나타났다. 특히 B 스프링에서 상대적으로 낮은 마멸부를 보이고 있었다.
- 3) 마멸부 면적과 마멸부피 사이에는 선형적인 관계를 보였다. 이를 이용하여 스프링 형상에 따른 내마멸 특성을 평가할 수 있는 변수로서 마멸부피 대 마멸면적의 비인 등가 깊이를 제안하였으며 타당성을 보였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Lee, Y. -H., Kim, H. - K., Ha, J. -W., 2002, "A study on wear mechanism of tube fretting affected by support shapes," *Proc. KSTLE*, May, pp. 73-79.
- (2) Lee, Y. -H., Kim, H. - K., 2003, "Analysis of wear properties in Zr alloys with variation of Nb and Sn content," *Proc. KSTLE*, Nov., pp. 64-71.
- (3) Kim, H. - K., 2000, "Development of fretting wear tester," *KAERI TR-1570*.