

핵연료 프레팅 마멸에서 마멸면적을 이용한 스프링 형상 영향 평가

이 영 호*, 김 형 규, 정 연 호
한국원자력연구소

Evaluation of spring shape effect on the nuclear fuel fretting using worn area

Young-Ho Lee*, Hyung-Kyu Kim, Youn-Ho Jung
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract: The sliding wear behaviors of Zircaloy-4 nuclear fuel rod were investigated using two support springs with convex and concave shapes in room temperature air and water. The main focus is to compare the wear behavior of various test variables such as slip amplitude, environment, contact contours with different spring shape and a number of cycles. The results indicated that wear volume and maximum wear depth increased with slip amplitude in both air and water, but their trends tended to change according to the spring shapes and test environments. In air condition, the wear volume was controlled by wear debris behavior generated on worn surface. As a result, final wear volume and maximum wear depth decreased if a ratio of protruded wear volume to worn area (D_p) would be saturated to specific value. This is because wear particle layer could accommodate large strain by accumulating and transforming wear particle layer. However, in water condition, metal-to-metal contact was more dominant and wear volume was greatly affected by changed mechanical behavior between contact surfaces since wear debris should be generated after repeated plastic deformation and fracture. After wear test, worn surfaces were examined using optical microscope and SEM and details of wear mechanism were discussed using a ratio of wear volume to worn area (D_e) at each test condition.

Key Word: Spring shape, nuclear fuel, protruded wear volume, D_p , D_e , SEM

1. 서론

접촉하는 두 물체사이에서 미세한 상대적 미끄럼에 의해 발생하는 프레팅 마멸손상은 모든 산업분야에서 중요한 열화기구로 인식하고 있다. 특히 원자력발전소의 경우, 그 특수성을 고려해 볼 때 이러한 마멸손상을 억제하는 것은 경제성은 물론 안전성 제고 측면에서 반드시 해결해야 할 문제이다. 원자력발전소에서 빈번히 발생하는 프레팅 손상의 주요 원인은 1, 2차측에서의 빠른 유속에 의한 유체유발진동(FIV, Flow-induced Vibration)으로 알려져 있으며 거의 대부분 길이가 긴 구조물인 핵연료 피복

관, 증기발생기 전열관 및 제어봉 등에서 빈번히 발생하고 있다. 이중에서 핵연료 피복관의 경우, 노심내부에서 일정한 공간상에 위치하기 위하여 스프링 및 덤플로 구성된 지지격자체 내부에 고정되어 있으나, 운전이 시작됨에 따라 중성자 조사에 의한 스프링의 탄성 손실 및 유체유발진동에 의해 프레팅 손상이 발생하며 만약 피복관의 천공이 발생할 경우 방사선 물질유출과 같은 중대사고로 연결될 가능성을 가진다. 또한 최근 들어 경수로 원전의 운전조건이 경제성 향상을 위하여 고연소도 장주기 운전으로 변화함에 따라 보다 우수한 내마멸성을 가지는 지지격자체의 개발이 요구되고 있다. 핵연료 피복관에서 발생하는 프레팅 손상

*주저자, 책임저자: ex-leeyh@kaeri.re.kr

을 억제하는 방법은 노심내에서의 방사선 환경 및 고온고압 부식성 분위기로 인해 매우 제한적이다. 이때 가장 적용이 가능한 방법은 핵연료 피복관을 지지하는 스프링 또는 덤플을 내마멸성을 가지는 형상으로 개선하는 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 두 가지 스프링 형상에 대한 마멸실험을 수행하여 각각의 스프링 형상에 따른 마멸현상을 비교하고자 한다. 여기서 사용된 스프링은 피복관을 감싸는 오목한 형상을 가진 스프링(A 스프링)과 볼록한 형상을 가져 피복관 축방향으로의 선접촉을 의도한 스프링(B 스프링)을 사용하였다. 이때 스프링 형상에 따라 마멸면의 모양이 달라지며, 마멸 과정에서 나타난 마멸부피 및 깊이도 달라지므로 스프링 형상이 달라짐에 따라 마멸부피 및 최대마멸깊이 외에 내마멸성을 평가하는 새로운 변수를 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 두 가지 형상의 스프링에 대한 상온 공기 및 물분위기에서의 미끄럼 마멸실험을 수행하였다. 실험을 수행한 뒤 마멸의 크기를 비교하기 위하여 마멸부피 및 최대깊이를 측정하였으며, 각 스프링 형상에 따른 마멸면적과 이들간의 상호관계를 규명함으로써 내마멸성을 가지는 형상의 도출에 필요한 새로운 변수의 적용성을 분석하였다.

2. 실험관련

(1) 시편 및 실험장치

본 실험에 사용된 핵연료 피복관 재료는

현재 상용으로 사용되는 Zirlo를 사용하였다. 마멸실험을 위하여 40 mm의 길이로 가공하여 실험에 적용하였으며, 마멸실험에 사용된 오목한 A 및 볼록한 B 스프링 시편이 피복관과 접촉할 때의 개략적인 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 미끄럼 마멸시험에 사용된 장치는 본 실험실에서 자체 제작한 마멸시험기를 사용하였으며 장치에 대한 설명은 기존의 문헌에 자세히 설명되어 있다[1].

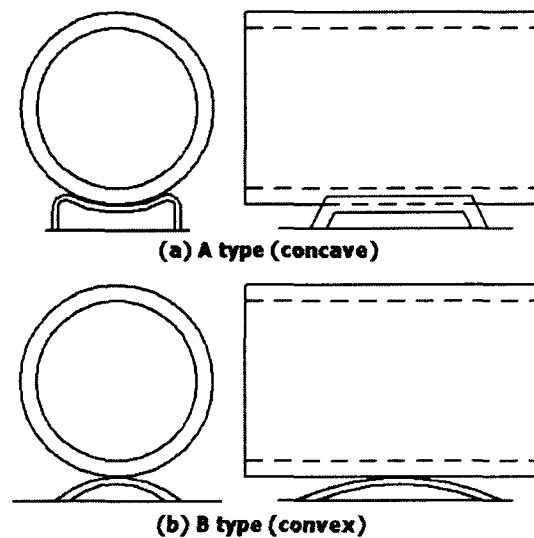


Fig. 1. Schematic diagram of spring specimen.

(2) 시험 조건

본 실험에서는 각 스프링 형상에 따른 진폭, 사이클 및 환경의 영향을 파악하기 위하여 다양한 조건에서 미끄럼 마멸실험을 수행하였다. 스프링과 피복관 사이에 10 N의 수직접촉력을 가한 상태에서 10, 30, 50, 80 및 100 μm 의 진폭을 적용하여 30 Hz, 10만 사이클 동안 마멸실험을 수행하였으며

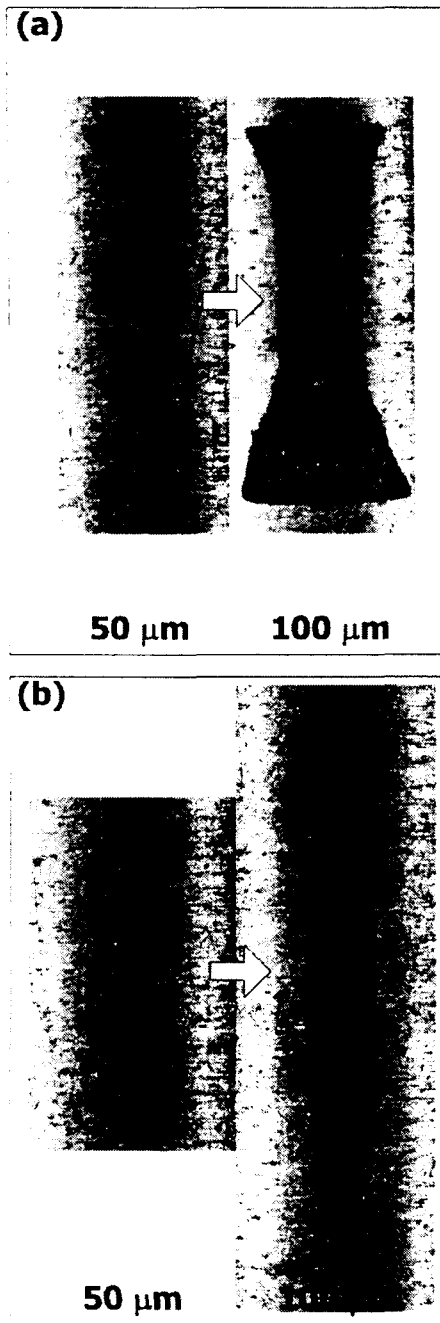


Fig. 2. Variation of worn area with increasing slip amplitude:

(a) A spring condition, (b) B spring condition.

진폭에 따른 각 스프링 조건에서의 마멸경

향을 비교하였다. 또한 사이클의 영향을 확인하기 위하여 10 N의 수직하중과 50 μm 의 미끄럼 진폭의 조건에서 10만, 30만, 50만, 80만 및 100만 사이클로 증가시키며 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 물은 증류수를 사용하여 가급적 부식과 관련된 열화 기구의 영향을 배제하였다.

(3) 손상면 관찰 및 면적 측정

각 실험조건에서 마멸실험 후 나타난 마멸면의 크기와 입자의 분포를 확인하기 위하여 실제 마멸이 발생한 부위의 정보를 광학현미경을 이용하여 획득하였으며 상용 이미지 프로그램을 이용하여 마멸면적을 측정하였다. 이와 함께 각 실험조건에서의 마멸기구 및 입자의 미세적 분포를 분석하기 위하여 주사식 전자현미경(SEM)을 이용한 마멸부 관찰도 수행하였다.

3. 실험 결과

(1) 스프링 형상에 따른 마멸 경향

접촉하는 스프링의 형상이 변화함에 따라 해연료 피복관에서 나타날수 있는 마멸흔적이 달라진다[2]. Fig. 2에 나타난 바와 같이 A 스프링의 접촉에서는 스프링의 양 끝에서 마멸이 시작되어 중심부로 진행되는 경향을 보이는 반면, B 스프링에 의해서는 스프링의 중앙위치에서 바깥쪽으로 확장되는 특징을 보인다. 따라서 A 스프링에 의한 마멸의 깊이 방향 궤적은 Fig. 3과 같이

“W” 형상을 가지며, B 스프링에 의해서는 “U” 모양의 궤적을 갖는다. 또한 접촉면에서 마멸이 진행함에 따라 A 스프링의 경우 피복관의 원주방향으로 폭이 증가하는 한편 길이방향으로는 거의 증가하지 않으며, 이에 반해 B 스프링에 의한 마멸은 피복관 축방향으로 빠르게 증가하나 폭방향으로는 서서히 증가하여 타원형의 형상을 갖게 된다.

마멸실험을 수행한 후 손상면에서의 마멸 입자 경향을 파악하기 위하여 피복관 마멸

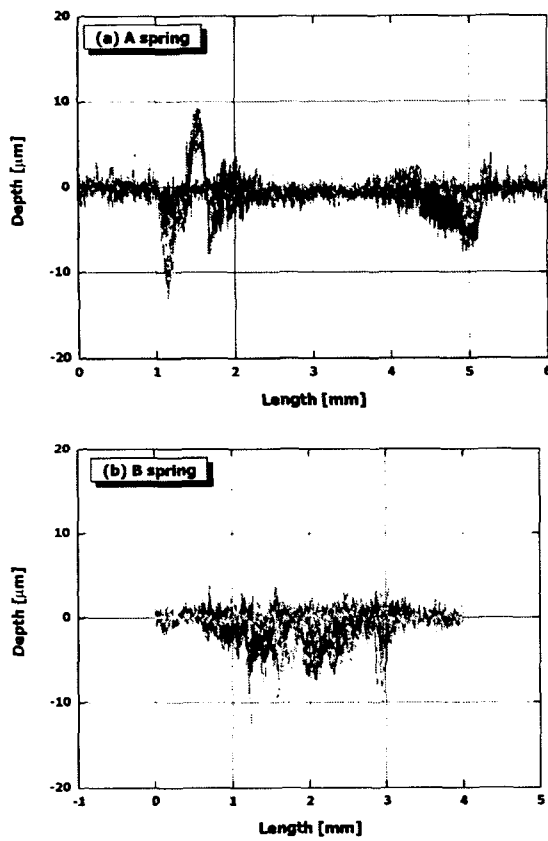


Fig. 3. Variation of worn surface profile with spring shapes.

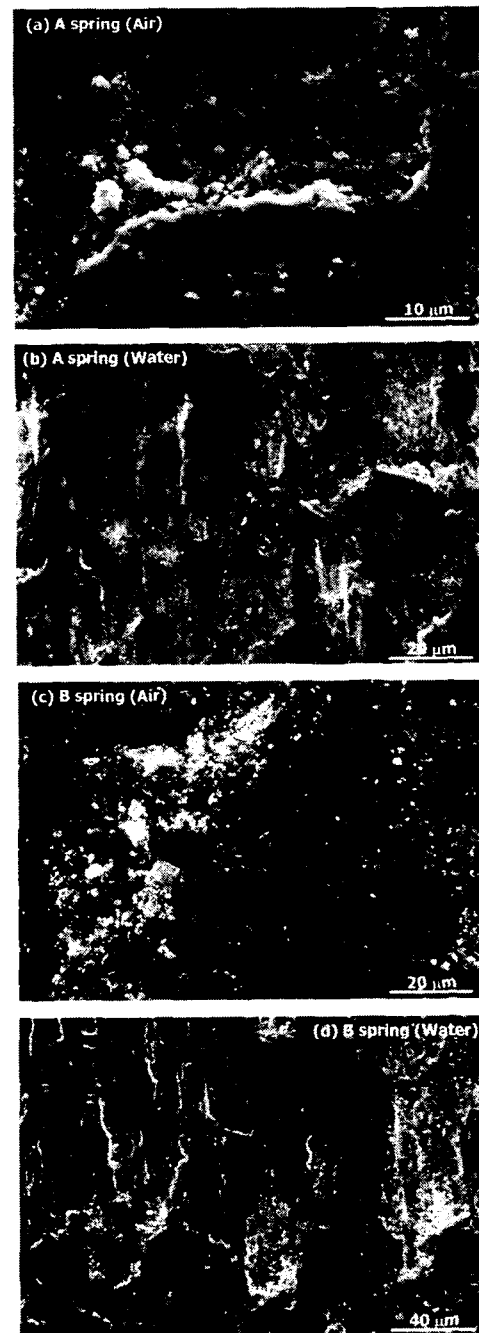


Fig. 4. SEM observation results of worn area after wear test at each test condition; (a) and (b): 10 N-100 μm - 10^5 cycles, (c) and (d) 10 N-80 μm - 10^5 cycles.

면에 대한 SEM 관찰을 수행하였으며 그 대표적인 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 공기분위기에서는 두 스프링 조건 모두 미세한 마멸입자가 접촉면에 존재하는 것을 관찰하였으며 특히 B 스프링 조건에서 마멸입자가 매우 조밀하게 분포하고 있음을 확인하였다. 이것은 마멸시험후 세척과정에서 일부 마멸입자층이 떨어져 나간 A 스프링 경우와는 달리 마멸입자가 매우 견고하게 기지와 흡착된 것을 의미하는 것이다. 그러나 물분위기에서는 마멸입자가 실험과정 중 외부로 쉽게 방출되어 마멸면에 잔류하는 입자를 거의 관찰할 수 없었고 이때 마멸입자의 형성은 돌출부에서의 변형 및 파괴가 주된 원인을 확인할 수 있었다.

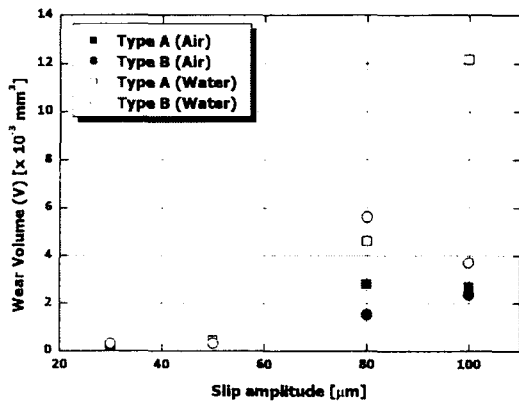


Fig. 5. Variation of wear volume with slip amplitude after 10^5 cycles.

(2) 마멸부피의 변화

상은 공기/물분위기에서 진폭에 따른 미끄럼 마멸부피의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 슬립진폭이 증가함에 따라 마멸부피가 증가

하는 경향은 모든 시험조건에서 동일하게 나타났으나 그 증가폭은 스프링 형상에 따라 서로 상이하다. 우선 공기분위기의 경우 마멸부피의 증가는 스프링 형상에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이와 달리 물분위기에서는 A 스프링의 경우 마멸부피가 급격하게 증가하는 반면 B 스프링에서는 80 μm에서 100 μm으로 진폭이 증가함에 따라 오히려 마멸부피가 감소하는 경향을 보인다. 또한 물분위기에서 마멸부피가 공기중에서의 그것에 비해 현저히 많음을 알 수 있다. 이러한 원인은 공기분위기의 경우, 접촉면에서 생성되는 마멸입자가 생성과 동시에 방출되지 못하고 일정한 시간동안 접촉면 내부에서 변형 및 파괴, 흡착등의 과정을 거친 후 외부로 방출되는 반면 물분위기에서는 생성과 동시에 쉽게 외부로 방출되는 것이 주된 원인으로 생각할 수 있다 [3]. 그러나 물분위기에서 100 μm의 슬립진폭에서 마멸부피가 오히려 감소하는 원인은 보다 자세한 조사가 필요한 것으로 보인다.

공기분위기에서 진폭에 따른 마멸부피가 비슷한 값을 보이더라도 스프링 형상의 차이로 인해 마멸과정이 계속될 때 접촉면에 생성되는 마멸입자층의 거동이 서로 다를 수 있다. 또한 물분위기에서도 마멸과정이 접촉면에서 계속적으로 진행될 때 생성되는 마멸입자의 양과 크기 또한 스프링 형상에 따라 서로 달라질 수 있다. 이러한 경향을 확인하기 위하여 10 N의 수직하중과 50 μm의 슬립진폭을 적용하여 사이클증가에 따른 마멸부피 변화를 확인하였으며 그 결

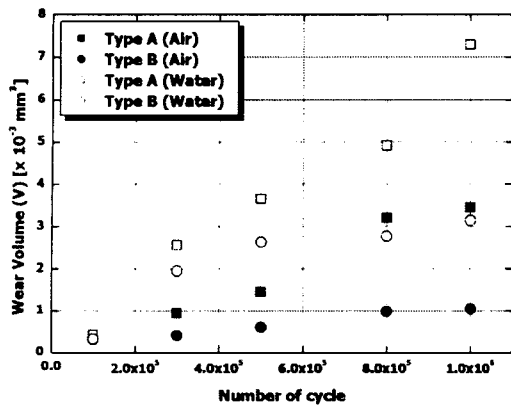
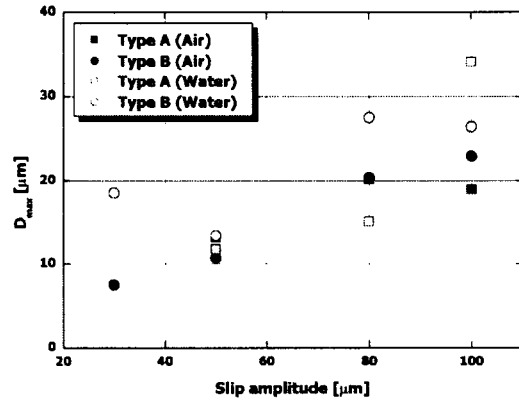


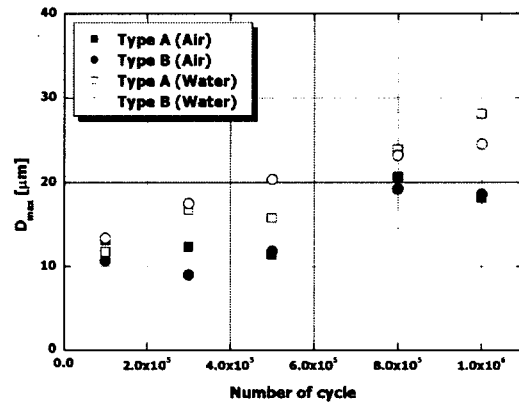
Fig. 6. Variation of wear volume with number of cycle at 10 N-50 μm conditions.

과를 Fig. 6에 나타내었다. 우선 공기분위기에서 슬립진폭이 증가함에 따라 스프링 형상에 관계없이 나타났던 비슷한 마멸부피는 사이클이 증가함에 따라 A 스프링의 경우에서 보다 큰 마멸부피를 보이고 있다. 이것은 공기분위기에서는 마멸입자층의 생성 및 파괴가 A 스프링이 접촉하는 경우 보다 빠르게 진행되었다는 것을 의미한다. 그러나 공기분위기에서 생성되는 마멸입자층의 양 혹은 두께가 무한히 증가할 수 있는 것은 아니므로 스프링 형상 및 실험조건에 따라 특정한 값을 가질 수 있다. 이것은 결국 최종 마멸부피와 밀접한 관련을 가질 수 있으므로 마멸실험 후 마멸면에 대한 자세한 분석이 필요하다. 그러나 물분위기의 경우, 생성되는 마멸입자는 거의 대부분 마멸과정에서 외부로 방출되므로 마멸부피를 결정하는 인자는 접촉면에서의 변형특성과 관련지을 수 있으며 이에 대하여 스프링 형상을 고려한 새로운 변수를 제시할 필요가 있다.

(3) 마멸깊이의 변화



(a) Effect of slip amplitude



(b) Effect of number of cycle

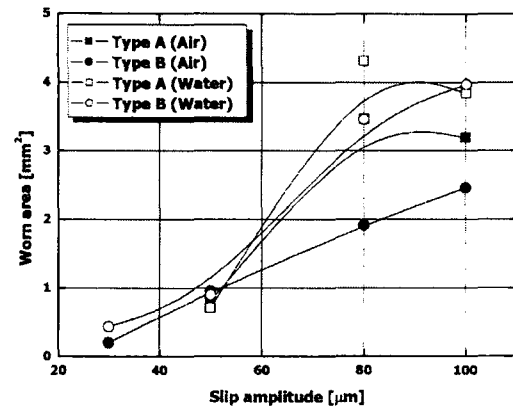
Fig. 7. Variation of the maximum wear depth with slip amplitude and number of cycle at each test condition.

원자력발전소에서 유체유발진동에 의한 프레팅 손상은 거의 대부분 길이가 긴 구조물에서 빈번히 발생하며 그 대표적인 예로서 핵연료 피복관, 증기발생기 전열관 및 노심 제어봉 등이 있다. 이러한 구조물에서의 프레팅 관련 손상평가는 마멸부피보다는 마멸 깊이를 기준으로 수행되므로 마멸부피가 큰

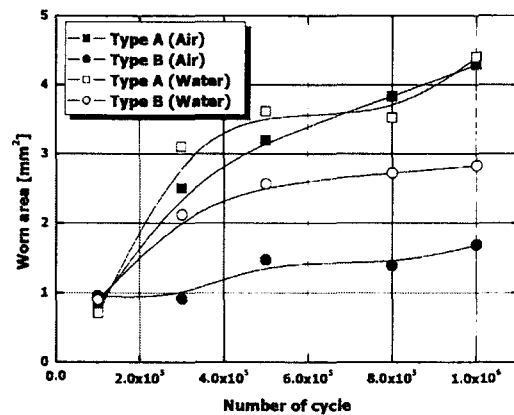
값을 보이더라도 마멸깊이가 작다면 상대적으로 내마멸성을 가지는 것으로 생각할 수 있다. 이에 대한 분석을 위하여 Fig. 7 (a)에 슬립 진폭에 따른 마멸깊이를 나타내었다. 진폭이 증가함에 따라 최대 마멸깊이는 모두 증가하는 경향이 나타났으며 50 μm 의 슬립진폭까지는 큰 차이를 보이지 않았으나, 진폭이 증가함에 따라 A 스프링의 경우 물분위기에서 급격히 증가하는 경향을 보였고 B 스프링에서는 다소 감소하는 경향을 보인다. 또한 사이클이 증가함에 따라 최대마멸깊이는 Fig. 7 (b)에 나타낸 바와 같이 스프링 형상에 따라서는 큰 영향이 없으며 공기분위기보다 물분위기에서 약간 높은 최대마멸깊이를 보이고 있다. 그러나 여기서 나타난 최대 마멸깊이 값은 국부적인 마멸면에서의 특정한 값을 나타낸 값이므로 전체 마멸면적에서의 마멸깊이를 고려할 필요가 있다.

4. 토의

스프링 형상의 차이로 인하여 같은 하중조건에서도 실제 접촉면적이 달라지며 이에 따라 마멸면적도 달라질 수 있으므로 이를 확인하기 위하여 진폭 및 사이클 증가에 따른 마멸면적의 변화를 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 8에 보여준다. 슬립 진폭이 증가함에 따라 B 스프링의 경우 마멸면적이 증가하는 경향이 잘 나타난 반면 A 스프링의 경우, 80 μm 의 진폭에서 최대 마멸면적을 보였다가 100 μm 의 진폭에서는 오히려 마멸면적이 작아지는 경향이 나타났으며, 이



(a) Effect of slip amplitude



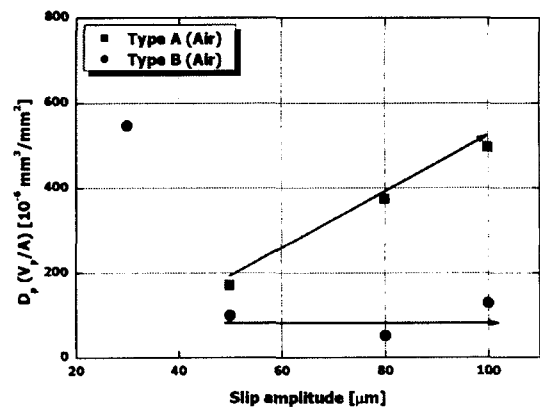
(b) Effect of number of cycle

Fig. 8. Effect of slip amplitude and number of cycle on the variation of worn area.

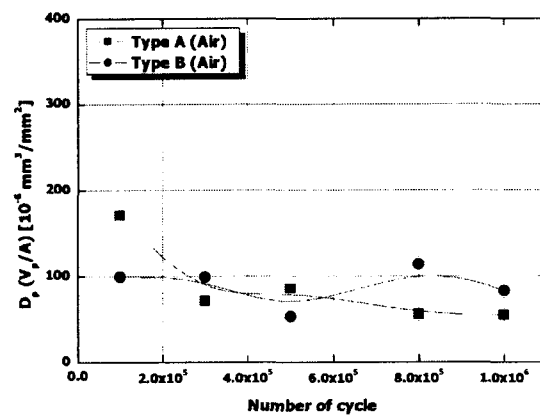
는 물 및 공기분위기 모두에서 공통적으로 관찰되었다. 이와는 다르게 사이클이 증가함에 따라 마멸면적은 스프링 종류 및 환경에 따라 다소 차이를 보이나 대부분 서서히 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 큰 특징은 A 스프링의 경우, 사이클 증가에 따른 마멸면적의 변화는 환경에 거의 무관한 것으로 나타난 반면 B 스프링에 의해서는 물분위기에서의 마멸면적이 매우 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

공기분위기에서 나타난 결과를 살펴보면 B 스프링의 경우 마멸부피와 면적은 슬립 진폭이 증가함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이며 이것은 마멸깊이의 증가와 유사한 경향을 보인다. 결국 마멸깊이 및 면적이 슬립진폭에 비례하여 증가하는 것을 나타내고 있으며 이것은 B 스프링에 의한 접촉에서는 각각의 슬립진폭에서의 마멸기구가 서로 유사하다는 것을 의미한다.

이와는 달리 A 스프링의 경우, 슬립진폭이 80 μm 일 때 최대 마멸면적을 보이고 있다. 이러한 원인은 A 스프링 형상의 경우 접촉면에서의 마멸입자층 형성이 100 μm 에서 매우 잘 형성되며 초기 빠르게 형성된 마멸입자층이 load-bearing layer로 작용하여 마멸면적의 확장을 억제하며 마멸부피 및 깊이의 증가를 감소시키는 것으로 생각된다. 따라서 공기분위기에서의 마멸기구는 접촉면에서 형성된 마멸입자층의 특성에 의해 결정되므로 마멸면적(A)당 마멸입자층에 의해 형성된 돌출면의 부피(V_p)의 비($D_p = V_p/A$)를 계산하였다. D_p 는 접촉면에서 형성되는 마멸입자층의 평균두께로 생각할 수 있으며 스프링 형상, 접촉조건에 따라 일정한 값을 가지는 것으로 예상된다. Fig. 9 (a)에 슬립 진폭에 따른 D_p 의 변화를 나타내었다. 그 결과 슬립진폭에 따라 일정한 마멸부피, 면적 및 최대깊이를 보이는 B 스프링 조건에서 D_p 값이 일정한 값을 보이는 반면 A 스프링 조건에서는 D_p 값이 계속 증가하는 것을 알 수 있다. A 스프링 조건에서의 D_p 값의 증가는 진폭이 증가함에 따라 접촉면에 생성되는 돌출면의 크기가 증가하는



(a)



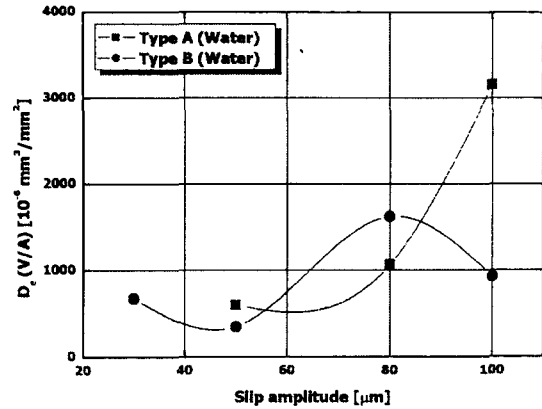
(b)

Fig. 9. The variation curves of the ratio of protruded wear volume to worn area (D_p); (a) slip amplitude; (b) number of cycle.

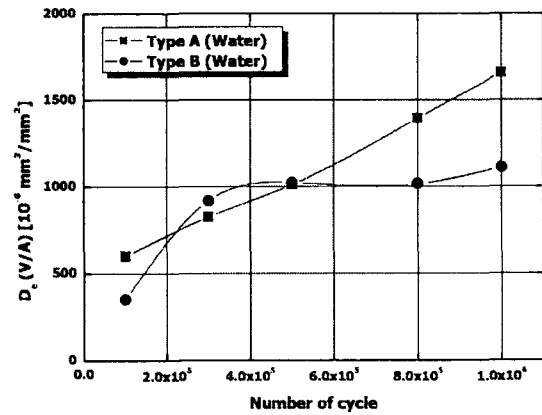
것을 나타내며 최종적으로 지속적인 마멸을 방해하는 인자로 작용할 수 있다. 이러한 D_p 값을 이용한 공기분위기 마멸특성 분석은 사이클 실험에도 적용할 수가 있는데, 사이클 증가에 따른 D_p 값의 변화를 Fig. 9 (b)에 나타내었다. 그 결과 사이클이 증가함에 따라 다소 차이를 보이나 두 스프링 조건 모두 거의 일정한 값을 보인다. 따라서 마멸입자에 의해 생성되는 돌출부의 두께는

스프링 형상에 따라 일정한 값을 가질수 있으며 접촉면적이 상대적으로 넓은 A 스프링 조건에서 마멸부피가 더 크게 나타난 것을 알 수 있다.

그러나 물분위기에서 접촉부에서의 돌출면의 생성이 거의 나타나지 않으며, 마멸량에 영향을 미치는 인자는 스프링과 피복관 사이의 metal-to-metal 접촉에 의한 접촉면 소성변형 및 파괴로부터 생성되는 마멸입자의 방출속도라고 생각할 수 있다. 따라서 공기분위기의 결과에서 고려하였던 D_p 를 물분위기 결과에 적용하는 것은 물분위기에서의 마멸기구와 상이하므로 적절치 않으며, 접촉면에서의 소성변형에 대한 저항성을 가지는 인자를 물분위기에서 고려할 필요가 있다. Fig. 8 (a)에 나타낸 바와 같이 슬립진폭이 증가함에 따라 B 스프링에 의한 마멸면적은 계속 증가하는 반면 A 스프링의 경우 마멸면적이 100 μm 의 슬립진폭에서 오히려 작아지는 경향을 보인다. 그러나 마멸부피의 경향은 Fig. 5와 같이 A 스프링 조건에서 급격히 증가하였으나 B 스프링 조건에서는 오히려 감소하였다. 또한 마멸깊이의 경향은 부피의 변화와 매우 유사하다. 이러한 변화로부터 판단해볼 때 A 스프링 조건의 경우 100 μm 에서의 마멸면적의 감소는 깊이방향으로의 마멸진행이 빠르게 발생하여 상대적으로 큰 마멸부피를 보인 것으로 생각되며 B 스프링에서는 이와 반대로 마멸면적의 증가에 따라 면적확장이 우세하게 나타나 상대적으로 마멸부피 및 최대깊이가 감소한 것으로 보인다. 또한 A 스프링에 의해서는 사이클 증가에 따른 마멸부피,



(a)



(b)

Fig. 10. Variation of the ratio of wear volume to worn area (D_e); (a) Effect of slip amplitude; (b) Effect of number of cycle.

마멸면적 및 마멸깊이의 증가율이 B 스프링의 경우보다 높은 것을 알 수 있다. 이것은 접촉면사이에서의 상호작용에 의한 입자 방출이 스프링 형상에 따라 마멸면적이 변화할 수 있으며 최종적으로 마멸손상의 정도에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 따라서 물분위기에서는 마멸부피에 따른 최대 마멸깊이의 변화가 서로 비례하는 관계를 가지므로 단위 마멸면적(A)당 마멸부피(V)

의 비($D_c=V/A$)는 스프링 형상에 따른 내마멸성을 평가할 수 있는 변수로의 사용이 가능하다[4]. 만약 진폭이나 사이클에 따라 D_c 값이 증가할 경우 마멸의 경향은 면적의 확장보다는 깊이방향으로의 마멸진행이 빠른 것을 나타내며 D_c 값의 변화가 없는 경우 마멸은 면적의 확장이 더욱 빠르게 진행함을 알 수 있다. 따라서 핵연료 피복관의 내마멸성을 위해서는 깊이방향으로의 마멸이 적게 일어나야 하며 이것은 D_c 값이 낮은 것을 의미하므로 Fig. 10에 정리된 것과 같이 상온 물분위기에서는 B 스프링이 보다 내마멸성을 갖는 접촉형상을 갖고 있다고 생각할 수 있다.

5. 결론

상온 물 및 공기분위기에서 두가지 형상의 스프링(오목 및 볼록한 형상)을 이용하여 미끄럼 마멸특성에 미치는 진폭 및 사이클의 영향을 분석하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스프링 형상에 따라 마멸면적의 확장경향이 서로 다르게 나타났으며 이것은 최종적으로 마멸부피 및 최대마멸깊이에도 큰 영향을 미친다.

(2) 볼록한 형상을 가지는 B 스프링과의 접촉에서 피복관의 마멸부피 및 최대마멸깊이가 상온의 물 및 공기분위기에서 진폭 및 사이클이 증가함에 따라 A 스프링 경우에 비해 작은 값을 보였다.

(3) 상온 공기분위기의 경우 두 스프링 모두 공기분위기에서는 손상면에 많은 마멸입자가 존재하였으나, 물속에서는 이러한 마멸입자는 마멸과정동안 거의 대부분 외부로 방출되며 이것은 스프링 형상에 따른 마멸기구가 실험 환경에 따라 큰 차이를 보일 수 있음을 나타낸다.

(4) 공기분위기에서의 마멸부피 및 마멸깊이를 결정하는 인자는 접촉면에서 외부로 방출되지 못하고 흡착되어 있는 돌출면의 특성(D_p)에 따라 결정되었다. 이와는 달리 물속에서는 접촉면에서의 소성변형 및 파괴에 대한 저항성(D_e)이 내마멸성을 결정하는 것으로 보이며 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] H.K. Kim et al., "Fretting wear of laterally supported tube", WEAR, Vol. 250, 535-543, 2001.

[2] H.K. Kim et al., "A study on third body abrasion in the small clearance region adjacent to the contact area", KSTLE International Journal, Vol. 4, 8-13, 2003.

[3] Y.-H. Lee et al., "A Study on wear coefficients and mechanisms of steam generator tube materials", WEAR, Vol. 250, 718-725, 2001.

[4] Y.-H. Lee et al., "Relationship between spring shapes and the ratio of wear volume to the worn area in nuclear fuel fretting", KSTLE International Journal, Vol. 4, 31-36, 2003.