2003 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

미끄럼 및 충격/미끄럼 하중에서 스프링 형상에 따른 핵연료봉 프레팅 마멸

Effects of Spring Shapes on the Fuel Fretting Wear under Sliding and Impact/Sliding Load

이영호, 김형규, 정연호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

경수로용 핵연료 피복관 재료인 Zircaloy-4 튜브에 대한 미끄럼 및 충격/미끄럼 마멸실험을 두 가지 형상의 스프링을 이용하여 상온 공기 및 물속에서 수행하였다. 실험에 사용된 스프링 형상은 튜브를 감싸는 형태를 가진 오목한(concave) 스프링과 선접촉을 의도한 볼록한(convex) 스프링이며, 실험의 목적은 서로 다른 형상을 가진 스프링에 대하여 하중 형태 및 실험 환경의 변화에 따른 마멸경향의 변화를 상호 비교하는 것이다. 실험 결과로부터, 마멸부피는 모든 스프링 조건에서 슬립 변위가 증가함에 따라 마멸량이 증가하였으며, 두 스프링 조건 모두 동일하게 물속 충격/미끄럼 조건이 가장 큰 마멸량을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 마멸이 최소로 나타나는 조건은 스프링 형상에 따라 다르게 나타났는데, 볼록한 형상의 스프링은 공기중 미끄럼 조건, 오목한 형상의 스프링은 물속 미끄럼 조건에서 가장 낮은 마멸부피를 보였다. 이러한 원인은 접촉면 내부에 존재하는 마멸입자의 거동이 스프링 형상, 환경 및 하중조건에 따라 그 영향이 서로 다르게 나타나기 때문이다. 또한 실험 후 나타난 마멸면의 크기와 모양은 실험에 사용된 스프링 형상에 따라 다르지만, 마멸면적과 부피의 관계는 하중형태 및 환경의 영향에는 관계없이 스프링 형상에 의해서만 결정되는 것으로 나타났다.

Abstract

Sliding and impact/sliding wear tests were carried out to evaluate the wear behavior of nuclear fuel rod (Zircaloy-4) against two types (concave and convex) of springs in room temperature air and water. The main focus is to compare the fuel fretting wear behaviors between concave and convex spring shape as well as between sliding and impact/sliding load. The result indicated that the wear volumes of two spring conditions increased with sliding slip amplitude. The most severe wear occurred under impact/sliding test in water at each spring condition. However, the concave spring condition showed better wear resistance in water sliding condition even though it was possible to easily remove wear particles generated between contact surfaces by water lubricant. From the variation of wear volume and worn area, it is possible to estimate wear behaviour of each spring condition because the shapes of worn area were dominantly determined by the spring shape rather than test environment and applied load type.

1. 서론

지지격자체 내부의 스프링(혹은 딤플)은 연료봉을 지지하는 매우 중요한 구성품이다. 지지격자체내의 스프링 설계요건에 만족해야 할 사항으로는 유체유발진동(Flow-Induced Vibration, FIV)과 이에 따른 접촉하중 및 변위, 가동 중 온도증가에 따른 지지력의 감소, 유체흐름에 따른 연료봉의 진동형태 및 충격특성 등과 같은 다양한 요건이 있다. 이러한 설계요건 중 연료봉과 스프링(혹은 딤플) 사이에서 유체유발진동에 의한 상대적인 미끄럼으로 발생되는 프레팅 마멸현상을 억제하기 위해서는 최적의 형상을 가지는 스프링이 설계되어야 한다. 만약 과도한 마멸이 발생하게 되면 연료봉에서 천공이 발생하게 되어 원자로 냉각재의 방사능 준위를 상승시키고, 원전 운전이 정지되는 중대사고가 발생할 뿐만 아니라 사용 중인 핵연료 교체 또는 수리로 인한 발전소 운용 비용의 상승을 수반하게 된다. 따라서 연료봉의 손상방지를 위한 프레팅 마멸연구의 목표는 가급적 상대적인 미끄럼이 발생하지 않는 최적의 형상을 도출하는 것과 동시에 열수력적 손실을 최소화하는 것에 중점을 두고 있다. 국내 및 국외에서도 이러한 지지격자체를 설계하기 위하여 다양한 형상을 가지는 스프링이 설계되고 있으며, 이를 검증하기 위하여 여러 방법의 프레팅 마멸시험들이 다양하게 수행되고 있다.

현재까지 국내에서 수행된 프레팅 마멸시험은 일정한 수직하중을 가한 상태에서 수행된 미끄럼 마멸시험이 거의 대부분이다. 그러나 실제 구조물에서 발생 가능한 하중상태를 관찰해 보면 일정한 접촉하중보다는 전달되는 하중이 매순간마다 바뀌는 것이 일반적이다. 연료봉 혹은 증기발생기 전열관과 지지구조물사이의 간격이 존재하게 될 경우, 유체유발진동에 의한 충격하중이 발생하게 되며 이것은 마멸현상에 있어 미끄럼 마멸결과와는 다른 양상을 보이게 될 것이다. 그러나 이에 대한 체계적인 연구는 수행되지 않았다.

본 연구에서는 상온 공기 및 물 분위기에서의 두 가지 형상(Concave형 및 Convex형)을 가진 스프링을 이용하여 미끄럼 및 충격/미끄럼 마멸실험을 수행하였다. 그 결과로부터 마멸부피 및 실제 접촉면적의 변화에 미치는 하중형태, 스프링 형상 및 실험 환경의 영향을 분석하였으며, 각 실험조건에서의 마멸기구를 분석하여 핵연료봉의 마멸기구에 미치는 접촉하중 형태의 영향을 알아보았다.

2. 실험방법

2.1 시편 및 실험장치

국내 가동 중인 경수로 원전의 핵연료 피복관 재료로 사용되고 있는 Zircaloy-4 튜브를 이용하여 마멸시험을 수행하였으며, 이에 대한 지지구조물로 같은 재질을 가지는 스프링을 사용하였다. 실험에 사용된 Zircaloy-4의 조성은 표 1에 나타내었으며, 각 스프링에 대한 형상의 개략도를 그림 1에 나타내었고 각각 A (concave형) 및 B (convex형) 스프링으로 표기하였다. 또한 실험에 사용된 충격/미끄럼 마멸시험기에 대한 개략도를 그림 2에 나타내었다.

2.2 실험변수

실험과정 중 나타난 반복 미끄럼 진폭, 수직 및 전단하중과 평균 전단하중을 연속적으로 측정하였으며, 모터의 회전 속도를 조정하여 주파수를 조절하였다. 실험에 사용된 변수로 미끄럼 마멸실험의 경우, 수직하중은 10 N, 미끄럼 진폭은 50, 80 및 100 ㎛이며 30 Hz의 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다. 충격/미끄럼 마멸실험에서는 앞의 미끄럼 마멸시험 조건의 수직하중 대신 30 Hz의 주파수와 360 ㎛의 진폭으로 최대 10 N의 충격하중을 적용하였다. 증류수를 사용한 물분위기에서 마멸시험을 수행하였으며, 10만 사이클의 짧은 시간동안 마멸시험을 수행하여 프레팅 부식 현상을 배제하였다.

2.3 손상면 관찰

마멸시험을 수행한 뒤 광학현미경을 이용하여 일반적인 마멸경향을 분석, 상호 비교하였다. 또한 마멸기구를 파악하기 위하여 실험을 수행한 후 손상면에 대한 주사직 전자현미경(SEM) 관찰하였다. 이때 손상면에 나타난 과도한 마멸입자를 제거하기 위해 초음파 세척기에서 10분 동안의 세척을 수행하였다.

2.4 마멸량, 마멸면적 및 마멸깊이 측정

마멸량의 측정은 2차원의 표면조도계를 이용하여 마멸면에서의 깊이를 측정하여 이 과정을 마멸면의 폭 방향으로 반복하여 마멸부위에 대한 3차원 형상을 구성한 후 부피를 측정하였다. 이때의 마멸부피 계산은 기존의 문헌에 자세히 나와 있으며[1], 마멸면적은 광학현미경을 이용하여 각각의 조건에서 마멸면의 형상을 관찰한 뒤 이것을 상용 그래픽 프로그램을 이용하여 마멸면적을 측정하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 미끄럼 마멸

그림 3에 스프링 형상 및 실험 환경조건이 변할 때 슬립 진폭 변화에 따른 마멸부피의 변화를 나타내었다. 슬립 진폭이 증가함에 따라 두 스프링 조건 모두 연료봉의 마멸부피는 증가하는 경향이 나타났으나 환경의 영향은 서로 다르게 나타났다. A 스프링에서는 낮은 마멸부피를 보이는 조건이 물속이었으나 B 스프링에서는 공기분위기에서 낮은 마멸부피를 보이고 있다. 이러한 경향은 기존의 다른 시험장치에서 나타난 결과[2]와는 차이를 보인다. 즉 연료봉이 수직으로 서 있는 기존의 실험에서는 마멸부피가 모두 물속 미끄럼일 때 크게 나타났으나, 연료봉이 수평으로 배열되어 있는 현재의 실험에서는 A 스프링에서 마멸부피가 공기분위기에서 보다는 물속에서 오히려 더 낮게 나타난 것이 특징이다. 이러한 마멸부피의 변화경향을 파악하기 위하여 우선 마멸면적을 조사하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 마멸면적의 경향 역시 마멸부피와 유사하게 A 스프링에서 물속일 때 면적이 더 작게 나타났다. A 스프링에서 슬립 진폭에 따른 마멸부피와 마멸면적의 경향을 자세히 살펴보면 우선 50 ㎛에서는 두 환경에서 마멸부피와 면적이 매우 비슷하게 나

타났다. 그러나 80 ㎛에서는 마멸면적은 비슷하나 마멸부피는 공기분위기에서 더 큰 값을 보이며 이것은 공기분위기에서 국부적인 마멸이 발생하는 것을 나타내고 있다. 100 ㎛에서는 마멸부피와 면적이 공기분위기에서 모두 큰 값을 보인다. 이러한 원인을 확인하기 위하여 마멸부피를 산출하기 위해 측정된 80 ㎛에서의 마멸면의 프로파일을 그림 5에 나타내었다. A 스프링의 마멸은 접촉하는 스프링의 양쪽 끝에서 시작되어 내부로 그 면이 확장되는 것이 특징이나 그림에서와 같이 양쪽에서 발생한 마멸면이 물속에서는 양쪽이 비슷한 크기를 보이는 반면 공기분위기에서는 한쪽에서 과도한 마멸이 발생한 것을 알 수 있다. 이것은 공기분위기에서 마멸이 발생할 때 접촉면에서 마멸입자의 분쇄 및 입자층의 형성이 발생하게 되나, 마멸이 진행함에 따라 마멸입자 양의 균형이 깨지게 되면 상대적인 접촉위치가 변화하게 되고 이에 따라 반대편에서의 접촉하중이 증가하게 되므로 국부적인 마멸의 발생 가능성이 증가하게 된다. 따라서 공기분위기에서 나타난 A 스프링의 큰 마멸부피는 생성되는 입자층의 불균일로 인한 국부적인 마멸이 주된 원인으로 판단된다. 그러나 B 스프링에서의 마멸면적은 접촉면을 중심으로 길이가 긴 타원형의 형상을 가지므로 일반적으로 알려진 물속에서의 입자방출 용이성으로 인해 물속에서 마멸이 빠른 것으로 보인다. 여기에서 연료봉 배열에 따른 마멸부피의 차이에 대한 상세한 논의는 본 연구내용을 벗어나므로 차후에 논하기로 하였다.

3.2 충격/미끄럼 마멸

충격/미끄럼 마멸시험 결과를 그림 6에 나타내었다. 미끄럼 마멸시험과 유사하게 슬립 진폭의 영향이 나타났으나, 물과 공기분위기를 비교해 볼 때 매우 큰 차이를 보이는 것이 특징이다. 공기분위기에서는 상대적으로 충격하중의 영향이 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있으나, 물속에서는 매우 급격한 마멸부피 증가를 보이고 있다. 보다 자세히 원인을 분석하기 위하여 손상면에 대한 SEM 관찰을 수행하였으며 그 결과를 그림 7 및 8에 나타내었다. 그 결과 공기분위기에서는 두 스프링 조건 모두 접촉면에서 마멸입자층이 매우 잘 형성되어 있음을 알 수 있으며 입자층 상부에서 미세한 마멸입자가 산재한 것을 알 수 있다. 이러한 마멸입자층의 영향은 접촉면에서의 하중과 변위를 수용할 수 있는 것으로 잘 알려져 있다[3]. 그러나 물속에서의 마멸면은 그 양상이 매우 틀리다. 우선 공기분위기에서 볼 수 있었던 마멸입자층의 흔적은 전혀 없으며 표면에서 생성된 변형층과 입자에 의한 스크레치가 잘 나타나 있다. 이것은 충격하중하에서 마멸입자가 층을 이루지 못하고 존재할 때 충격에 의해 표면에서 변형층이 형성되고 미끄럼이 작용할 때 상대적으로 크기가 큰 입자들에 의한 연삭 마멸이 발생하는 것으로 보인다. 따라서 과도한 마멸이 발생하게 되며 다른 모든 조건에 비해 매우 큰 마멸속도를 보이게 된다.

3.3 미끄럼 및 충격/미끄럼 마멸 비교

가해준 하중 형태에 따른 마멸부피를 비교해 보면 물속에서 충격/미끄럼 하중이 존재할 때 마멸이 가장 크게 나타났으나, 가장 낮은 마멸부피를 보이는 조건은 스프링 형상에 따라 서로 다르게 나타났다. 그러나 하중 형태에 따른 두 스프링의 마멸부피를 직접 비교하는 것은 형상에 의한 영향인자를 포함하고 있다. 이것은 형상에 따라 연료봉과 스프링 사이의 접촉면적이 틀려지게 되기 때문이다. A 스프링의 경우, 접촉면적은 하중에 큰 영향이 없게 되나 B 스프링의 경우 하중이

증가함에 따라 접촉면적 또한 증가하게 된다. 이러한 형상(접촉면적)의 영향을 가급적 배제하기 위하여 마멸부피를 손상면적으로 나눈 상대적인 값(R)을 그림 9에 나타내었다. 물속 충격/미끄럼의 경우 두 스프링 모두 슬립변위가 증가함에 따라 R값이 서서히 증가하는 경향을 동일하게 보이고 있다. 여기에서 R값이 클 경우 접촉면에서의 마멸경향은 마멸면의 확장보다는 마멸부피의 증가가 더욱 빠르다는 것을 의미하며 두 형상을 비교할 때 B 스프링에서 R 값이 낮게 나타남을 알 수 있다. 이것은 B 스프링의 경우 마멸이 진행함에 따라 마멸면이 계속 확장되고 있으며 결국 연료봉 측면에서의 상대적인 깊이는 감소하게 된다. 즉 슬립변위가 증가할수록 마멸면의 확장 또한 증가하지만 상대적인 마멸깊이는 감소하게 되어 연료봉의 안정성 측면에서 더 유리하게 된다. 이러한 경향은 마멸면에서 측정된 최대깊이 측정결과인 그림 10에서 알 수 있다. 슬립변위가 증가함에 따라 A 스프링의 경우 깊이방향으로의 증가가 빠르게 이루어지는 반면 B 스프링에서는 최대깊이가 둔화되는 경향을 보인다. 따라서 A 스프링의 경우 슬립변위가 증가함에 따라 깊이방향으로의 증가가 빠르게 이루어지므로 결국 마멸부피의 급격한 증가가 나타나게 되며, B 스프링의 경우에는 깊이보다는 면적의 증가로 인해 최대깊이는 슬립변위 증가에 따라 큰 영향을 받지 않은 것으로 나타났다.

3.4 스프링 형상에 따른 마멸거동

마멸실험을 수행한 뒤 생성된 손상면에 대한 광학현미경 사진을 그림 11에 나타내었다. 각각의 스프링 조건에 대하여 마멸부피가 증가함에 따라 생성되는 마멸면의 면적은 일정한 모양으로 변화함을 알 수 있다. 두 스프링 조건에서 나타난 마멸면적과 그때의 마멸부피사이의 관계를 그림 12에 나타내었다. 그림에서 물속 충격/미끄럼 실험을 제외한 3가지 조건에서는 실험 환경 및 하중형태와는 무관하게 마멸면적이 증가함에 따라 부피가 증가하는 경향을 보이고 있으며 두 스프링 조건 모두 하나의 곡선으로 나타낼 수 있다. 그러나 물속 충격/미끄럼 실험에서는 마멸면적에 따른 부피가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 물속 충격/미끄럼 실험과 다른 3가지 실험 조건에서의 마멸기구가 서로 큰 차이를 보이는 것을 의미하며 결국 주된 원인은 물속에서 충격하중에 의한 접촉면 주위에서의 물의 유동으로 인해 생성된 입자들이 외부로 쉽게 빠져나가고 그 결과 그림 7 및 8에 나타난 손상면과 같이 접촉면에서의 변형 및 파괴가 급격히 진행되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

경수로 핵연료봉(Zircaloy -4)에 대한 미끄럼 및 충격/미끄럼 마멸실험을 같은 재질을 가진 두 가지 형상의 스프링에 대하여 상온 물 및 공기분위기에서 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미끄럼 마멸실험 결과, 마멸이 가장 낮은 조건은 두 스프링에 따라 서로 다른 환경에서 나타났다. 이러한 주된 원인은 스프링 형상에 따라 생성되는 접촉면에서의 마멸흔적과 이에 따른 마멸입자의 영향이 서로 다르게 작용한 것으로 보인다.

(2) 충격/미끄럼 마멸시험에서는 두 스프링 모두 물속에서 급격한 마멸을 보이고 있다. 이것은 공

기분위기에서 접촉면을 덮고 있는 마멸입자층이 물속에서 물의 유동에 의해 쉽게 제거되기 때문이다.

(3) 슬립변위가 증가함에 따라 A 스프링의 경우 깊이방향으로의 증가가 빠르게 이루어지는 반면 B 스프링에서는 최대깊이의 증가가 둔화되는 경향을 보였다.

(4) 물속 충격/미끄럼 실험과 다른 3가지 실험조건에서의 마멸기구가 서로 큰 차이를 보였으며 주된 원인은 물속에서 충격하중에 의한 접촉면 주위에서의 물의 유동으로 인해 생성된 입자들이 외부로 쉽게 빠져나가고 최종적으로 접촉면에서의 변형 및 파괴가 급격히 진행되는 것으로 설명할 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] 김형규 외, “프레팅 마멸 시험장비 개발”, KEARI/TR-1570/2000, 2000.

[2] 이영호 외, “튜브 프레팅 마멸에서의 접촉형상과 환경의 영향” 원자력학회 추계학술대회, 2002.

[3] Y.-H. Lee et al., "A study on wear coefficients and mechanisms of steam generator tube materials", WEAR, Vol. 250, p718-725, 2001.

표 1. 실험에 사용된 Zircaloy-4의 화학적 조성 (w/o)

Zr	Sn	Fe	Cr	O	C	Si
Bal.	**1.28**	**0.22**	**0.12**	**0.114**	**0.013**	**0.01**

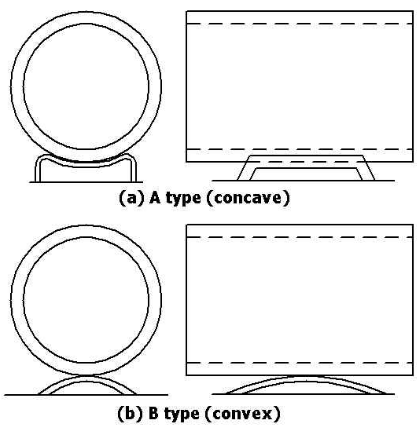


그림 1. 스프링 시편 형상

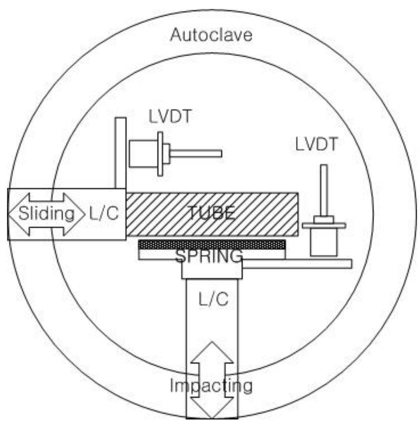


그림 2. 실험장치의 개략도

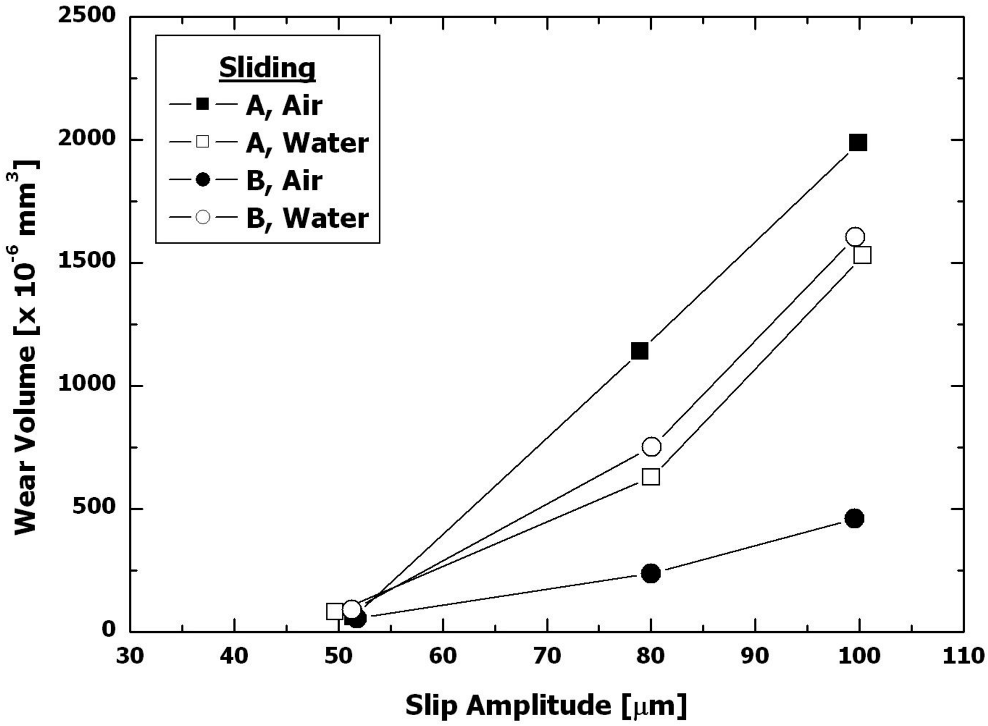


그림 3. 미끄럼 마멸실험에서 슬립 진폭에 따른 연료봉 마멸부피의 비교

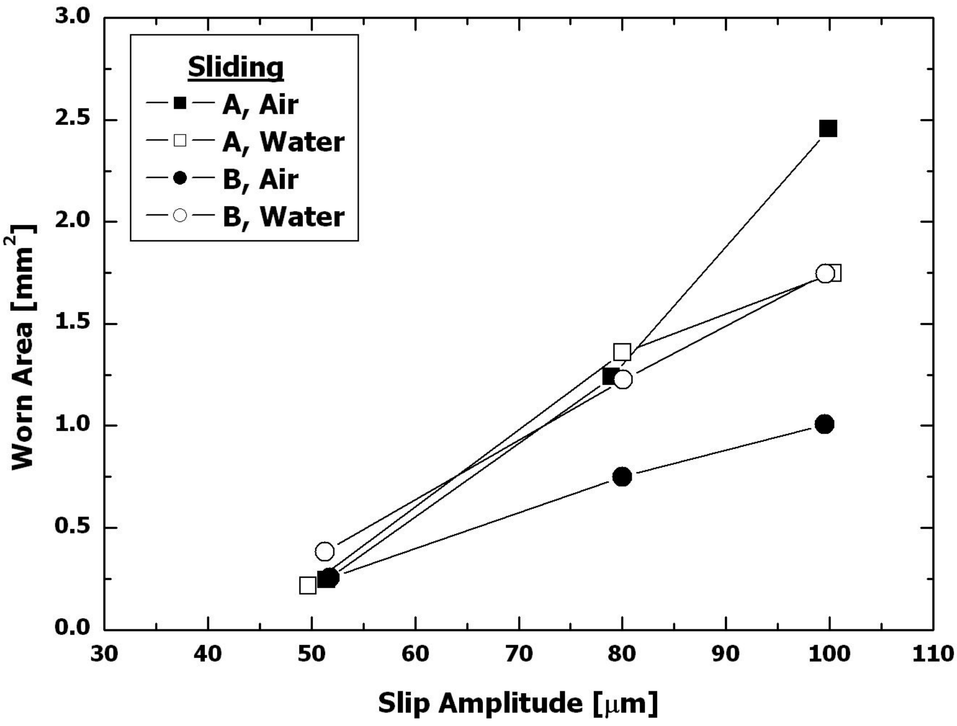
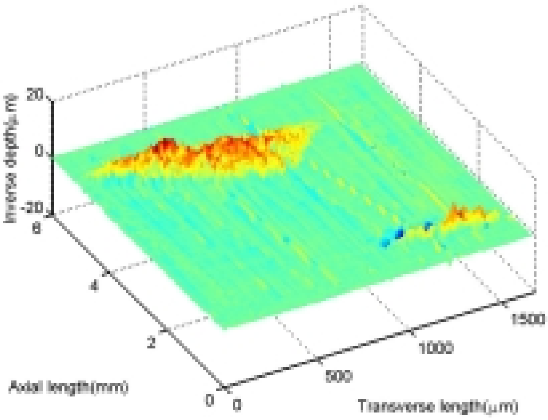
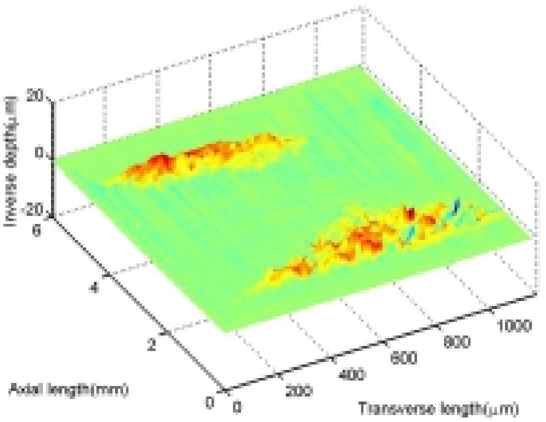


그림 4. 슬립 진폭에 따른 연료봉 마멸면적 변화(미끄럼 마멸시험)



(a) 공기분위기



(b) 물분위기

그림 5. 10 N, 80 mm에서의 마멸흔적에 대한 3차원 프로파일

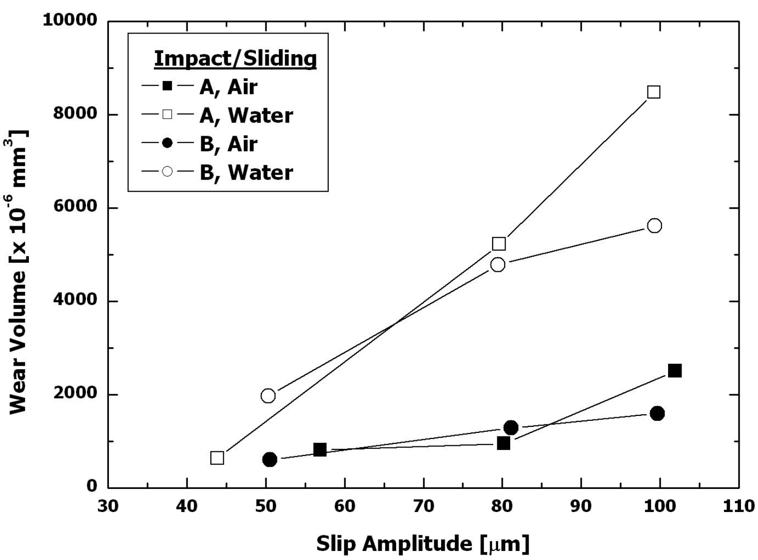
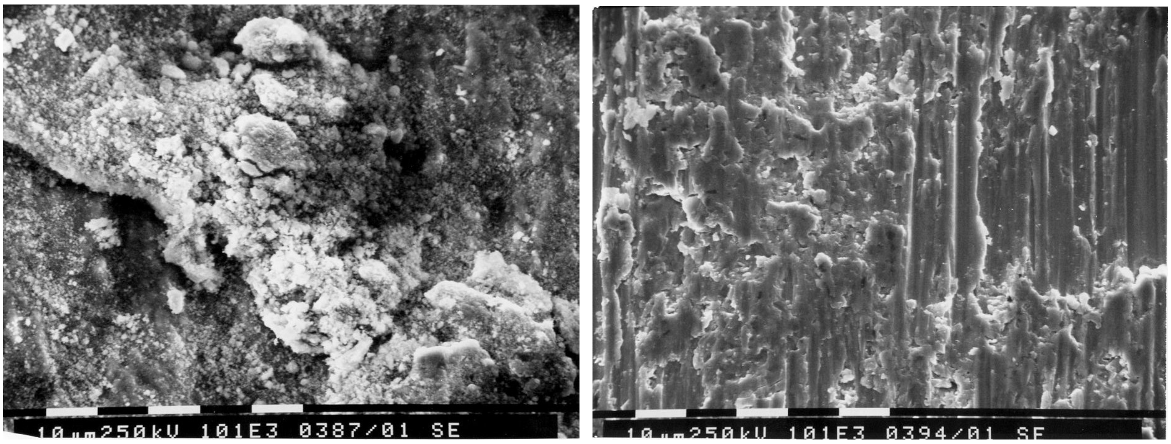
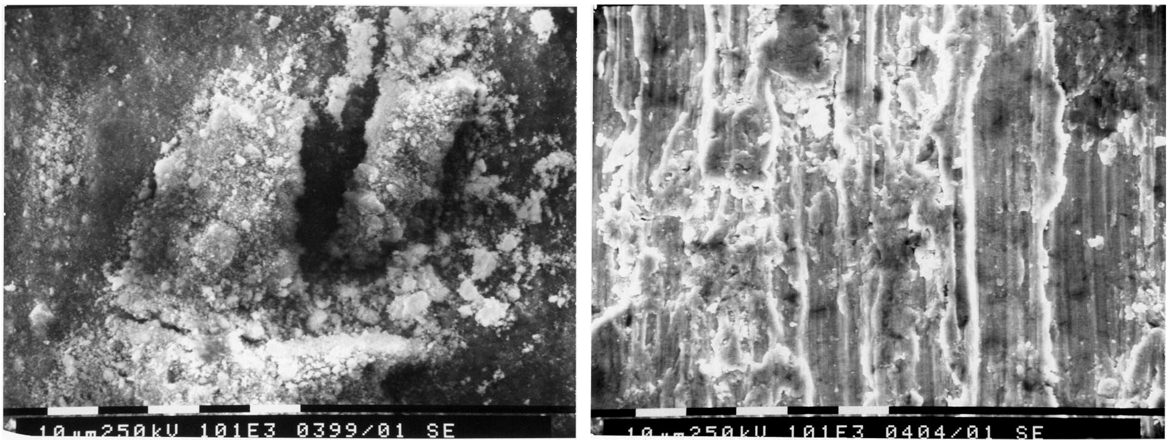


그림 6. 충격/미끄럼 마멸실험후 각 실험조건에서의 슬립진폭 증가에 따른 마멸부피의 변화.



(a) 공기분위기　　　　　　　　　　(b) 물속

그림 7. A 스프링에 대한 충격/미끄럼 마멸시험 후 손상면 관찰결과



(a) 공기분위기　　　　　　　　　　(b) 물속

그림 8. B 스프링에 대한 충격/미끄럼 마멸시험 후 손상면 관찰결과

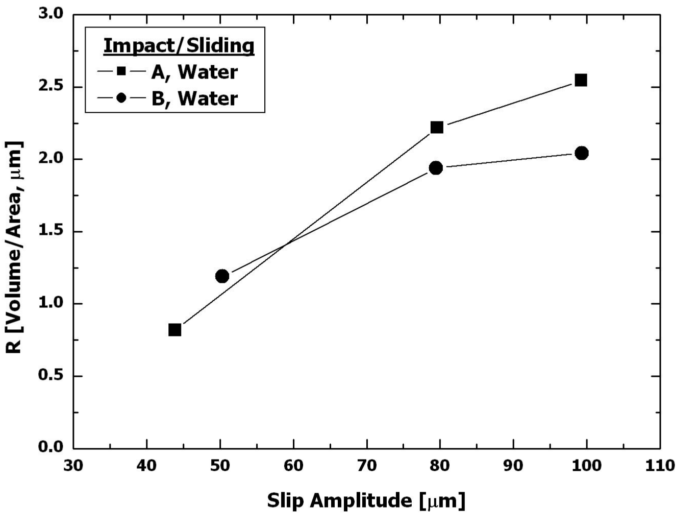


그림 9. 슬립 변위 증가에 따른 마멸면적에 대한 부피의 비 (R).

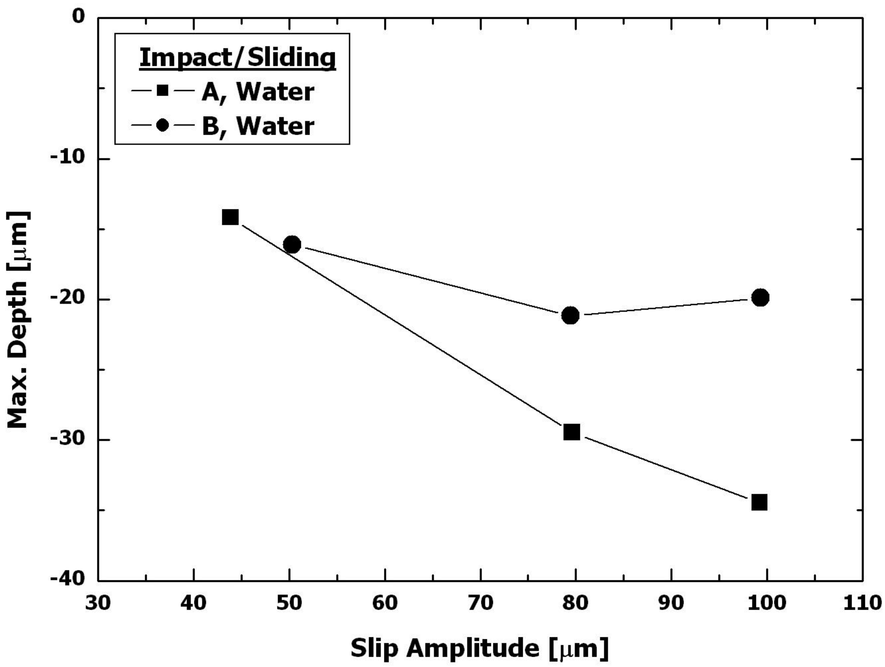
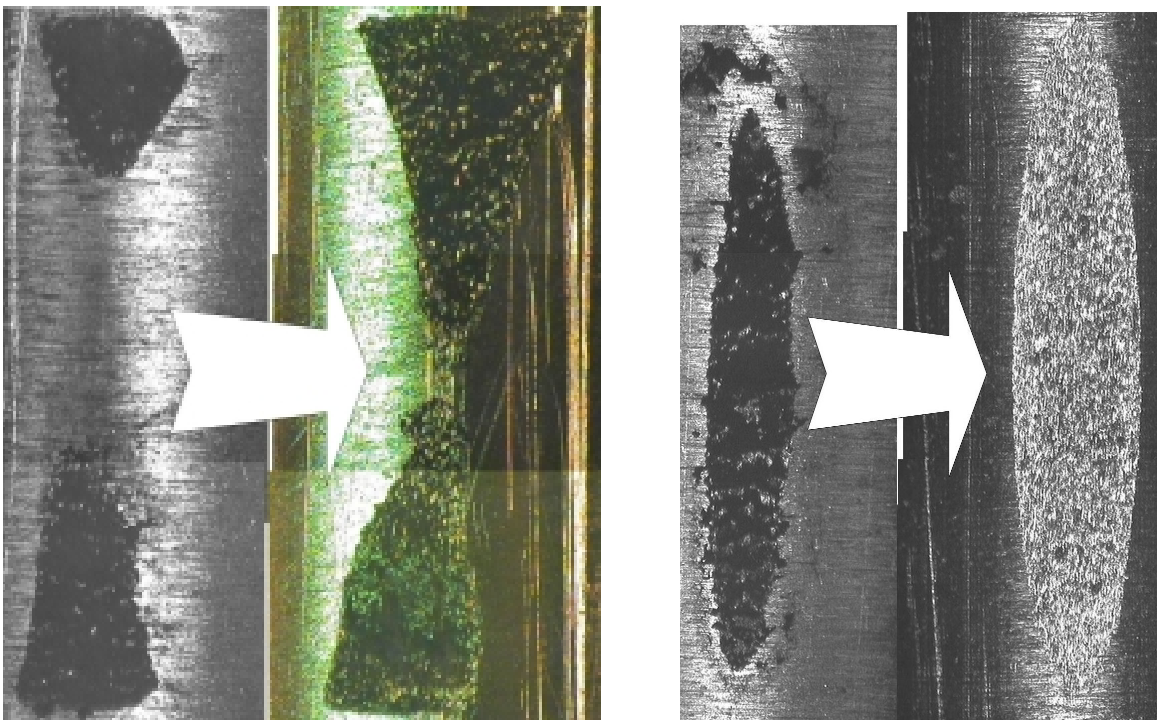
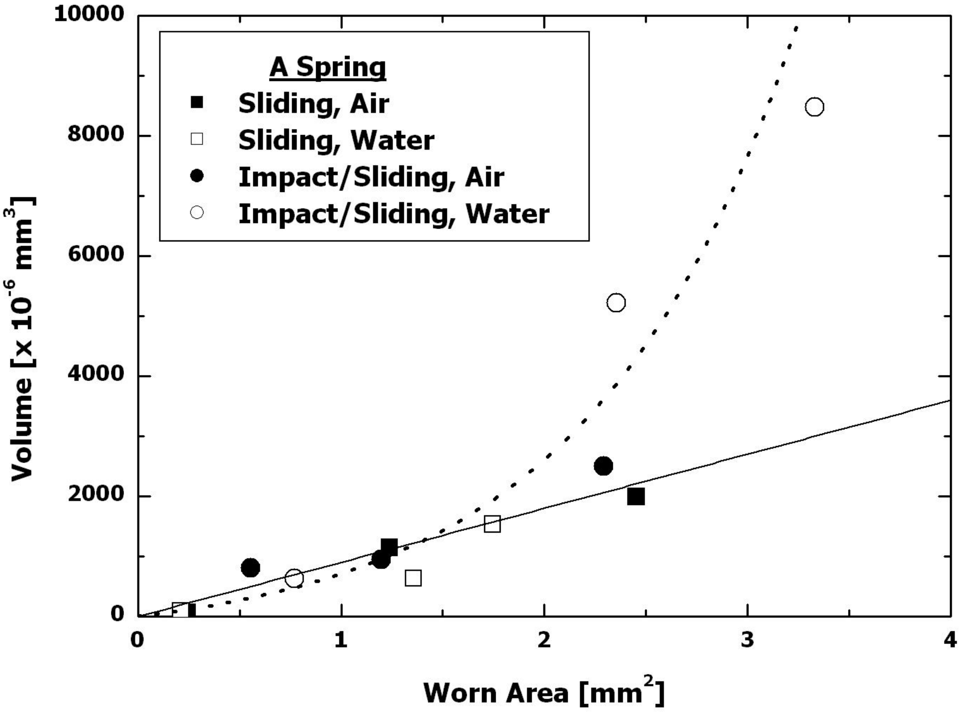


그림 10. 물속 충격/미끄럼 마멸시험후 나타난 최대마멸 깊이의 비교.

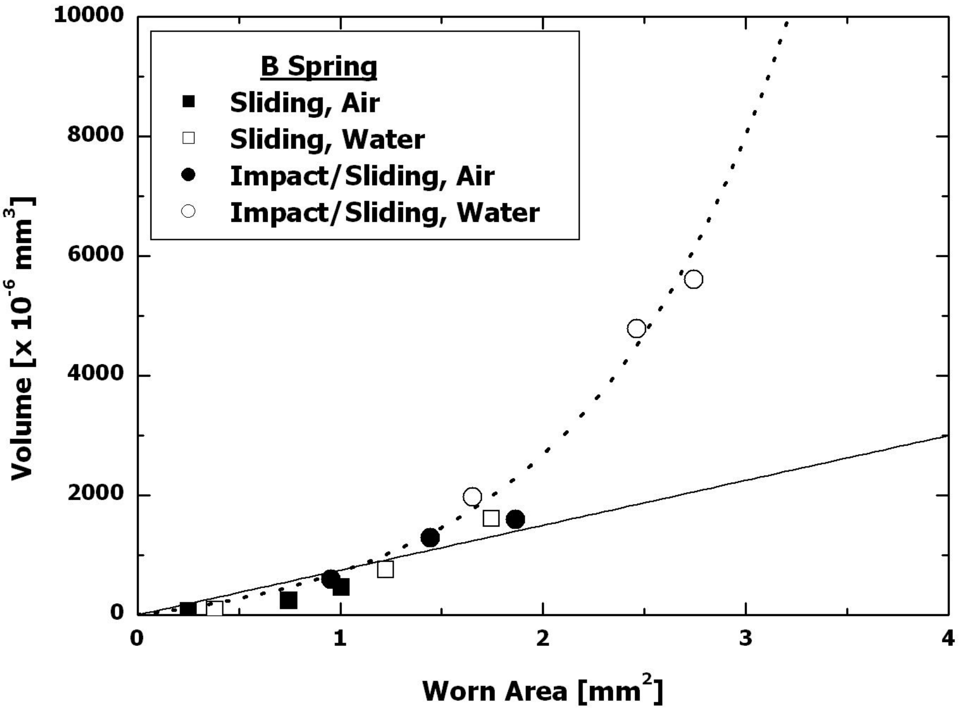


(a) A 스프링 (b) B 스프링

그림 11. 스프링 형상에 따른 마멸면의 확장 경향



(a) A 스프링



(b) B 스프링

그림 12. 각 스프링 형상에서 마멸면적과 부피사이의 관계.