‘2002 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

핵연료봉 프레팅 마멸에서의 접촉형상과 분위기의 영향

Effects of Contact Shape and Environment in Fuel Fretting Wear

이영호, 김형규, 박순종, 윤경호, 강흥석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

상온 공기 및 물 분위기에서 경수로(PWR)용 핵연료의 연료봉 재료인 Zircaloy-4 튜브에 대한 마멸실험을 같은 재질을 가진 여러 형상의 스프링을 이용하여 수행하였다. 실험에 사용된 스프링 형상은 튜브를 감싸는 형태를 가진 concave형 스프링과 선접촉을 의도한 convex형 스프링이며 10 N의 수직하중하에서 10~100 μm의 슬립변위, 30 Hz의 주파수 및 10만 사이클 동안 실험을 수행하여 마멸량과 접촉면에서의 마멸경향을 비교하였다. 그 결과 마멸부피는 모든 스프링 조건에서 슬립 변위가 증가함에 따라 마멸량이 증가하였으며, 특히 80 μm의 슬립변위 이상에서 부터 마멸량의 증가가 뚜렷이 나타났다. 환경의 영향에서는 물 분위기의 마멸량은 항상 공기 분위기보다 더 크게 나타났으며 가장 낮은 마멸부피를 보인 조건은 convex형 스프링으로 나타났다. SEM 관찰 결과로 부터 공기분위기에서의 마멸면은 미세한 마멸입자가 기지에 잘 흡착되어 입자로 구성된 층을 가지는 반면 물 분위기에서는 이러한 입자층의 형성을 관찰하기가 어려웠으며 외부로 방출되지 못한 마멸입자가 틈새에 많은 양이 잔류하였으며 기지에서 떨어져 나가는 최종 마멸입자의 크기가 공기분위기 보다 더욱 크게 나타났다.

Abstract

Fretting wear test in room temperature air and water was performed to evaluate the wear behavior of fuel rod material (Zircaloy-4) against two types of springs (Zircaloy-4). The main focus is to compare the fuel fretting wear behaviors between concave and convex spring shape as well as between air and water environment. Test conditions are 10 N of normal load, 10~100 μm of sliding amplitude and 30 Hz of frequency. The result indicated that the wear volume of convex spring condition was lower than that of concave spring condition with increasing slip amplitude at both air and water conditions. The shapes of wear scar were dominantly determined by the spring shape rather than test environment. From the results of SEM observation, wear mechanism of each test condition also depended on both the spring shape and test environment. The wear mechanism of each test condition in room temperature air and water is discussed.

1. 서론

최근 들어 경수로형 원자력 발전의 경제성 제고를 위하여 고연소도 장주기의 핵연료 개발이 매우 중요한 과제로 인식되고 있다. 그러나 냉각재의 유동에 의해 발생되는 유체유발진동(Flow Induced Vibration, FIV)이 연료봉과 지지 스프링(혹은 딤플) 사이에서 프레팅 마멸을 발생시키게 된다. 이로 인하여 피복관의 천공이 발생하게 되어 원자로 냉각재의 방사능 준위를 상승시키고 발전을 정지하여야 하는 상황이 될 뿐만 아니라, 핵연료 교체 또는 수리가 필요하게 된다. 따라서 연료봉의 손상 방지에 관점을 둔 프레팅 마멸 연구는 접촉하는 스프링의 형상과 그에 따른 마멸기구 연구, 접촉하중 및 변위, 유체 흐름과 관련된 연료봉 진동형태, 혼합날개의 형상, 온도의 영향 및 1차 냉각수 내에서의 피복관 부식과 마멸과의 상호작용 등 매우 많은 변수를 포함하므로 이에 대한 체계적 연구가 광범위하게 이루어 져야 한다.

현재까지 국외에서 수행된 연료봉 관련 마멸연구로는 캐나다 AECL에 의해 수명예측과 관련된 마멸계수 산출을 목적으로 하는 연구가 거의 대부분 이었으며, 200~250^{o}C에서 가장 큰 마멸계수 값을 보이고 있으며 300^{o}C에서는 상온과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보고하고 있다[1-3]. 그러나 이러한 온도에 따른 마멸기구의 변화에 대해서는 자세히 설명하지 못하고 있는 실정이다. 국내의 경우, 실제환경을 모사한 실험은 증기발생기 전열관 마멸연구에서 일부 수행되었으나 연료봉의 경우 표면처리를 이용한 프레팅 마멸저항성 향상에 관한 연구가 상온에서 일부 수행되었다. 따라서 실제 환경에서의 프레팅 마멸연구는 국내의 경우 시작단계에 있으며 이러한 주된 원인은 환경을 모사하기 위한 실제 장치제작에 대한 기반기술이 다소 부족하기 때문인 것으로 보인다.

본 연구에서는 실제 환경인 고온고압 마멸시험을 수행하기 전에 상온에서 공기 및 물 분위기에서의 마멸실험을 수행하여 두가지 형상을 가진 스프링을 이용하여 마멸실험을 수행하였다. 그 결과로 부터 마멸부피 및 실제 접촉면적의 변화에 미치는 스프링 형상 및 실험 환경의 영향을 분석하였으며, 각 실험조건에서의 마멸기구를 분석하여 스프링 형상과 실험환경이 핵연료봉의 마멸기구에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시편 및 실험장치

본 실험에 사용된 재료는 현재 국내 가동중인 경수로 원전의 핵연료 피복관 재료로 사용되고 있는 Zircaloy-4 튜브를 사용하였으며, 이에 대한 지지구조물로 같은 재질의 스프링을 사용하였다. 본 실험에 사용된 Zircaloy-4의 조성은 표 1에 나타내었으며, 각 스프링에 대한 형상의 개략도를 그림 1에 나타내었고 각각 A (concave형) 및 B (convex형) 스프링으로 표시하였다. 실험에 사용된 스프링은 두께 0.45 mm (A 스프링) 및 0.38 mm (B 스프링)의 판재를 프레스 가공하여 제작하였다. 본 실험에 사용된 프레팅 마멸시험기에 대한 설명은 발표된 문헌에 보다 자세히 설명되어 있다[4].

2.2 실험변수

실험과정 중 나타난 반복 미끄럼 진폭, 평균 수평하중, 수직 및 수평하중은 연속적으로 측정하여 마찰계수를 산출하였으며, 모터의 회전 속도를 조정하여 주파수를 조절하였다. 실험에 사용된 변수로 수직하중은 10 N, 미끄럼 진폭은 10, 30, 50, 80, 100 μm이며 30 Hz의 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다. 물 분위기에서 사용된 물은 증류수를 사용하여 부식에 의한 프레팅 부식현상을 배제하였다.

2.3 손상면 관찰

상온 물속에서 전열관 재료에 대한 마모기구를 파악하기 위하여 마모실험을 수행한 후 손상면에 대한 주사직 전자현미경(SEM) 관찰을 수행하였다. 여기서 손상면에 존재할 수 있은 마모입자의 영향을 관찰하기 위하여 실험 후 세척과정을 거치치 않고 건조 시킨 후 바로 관찰하였다.

2.4 마멸량 및 마멸면적 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 나와있으며[5], 마멸면적은 광학현미경을 이용하여 각각의 조건에서 마멸면의 형상을 관찰한 뒤 이것을 상용 그래픽 프로그램을 이용하여 마멸면적을 측정하였다. 공기 및 물 분위기에서 실험을 수행한 뒤 시편을 세척하지 않고 그대로 측정하였으며 마멸입자에 의한 입자층 형성의 영향을 고려하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 마멸부피 및 마멸면적의 변화

그림 2에 슬립 진폭에 따른 각 실험 조건에서의 마멸부피의 변화를 나타내었다. 슬립 진폭이 증가함에 따라 각 스프링 조건에서의 튜브 마멸부피는 서서히 증가하는 경향이 나타났다. 모든 시편조건에서 튜브의 마멸부피는 공기분위기보다 물분위기에서 더욱 크게 나타났으나, 그 차이는 스프링 조건에 따라 틀린 경향을 보인다. 대부분의 마멸부피는 50μm의 슬립진폭까지 스프링 시편조건에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 80μm이상에서는 마멸부피의 차이가 매우 급격히 나타났다. 실험 결과 가장 적은 마멸부피를 보인 조건은 공기분위기에서의 B 스프링이며 가장 큰 마멸부피를 보인 조건은 물속에서의 A 스프링으로 나타났다.

마멸실험을 수행한 뒤 슬립 진폭에 따른 손상면의 면적을 그림 3에 나타내었다. 그 결과 30μm까지는 마멸에 의한 손상면의 면적이 모든 스프링 조건에서 비슷하게 나타났으며, 50μm에서는 물속에서의 A 스프링 조건만이 높은 마멸면적을 보이고 있다. 그러나 슬립 진폭이 증가함에 따라 오히려 물속에서의 B 스프링 조건에서의 마멸면적이 더욱 크게 증가하였으며 물속에서의 A 스프링 조건은 공기 분위기의 A 스프링 조건에 비해 낮은 마멸면적을 보이고 있다. 이에 반해 마멸부피의 큰 증가를 보이지 않고 있는 공기분위기에서의 B 스프링 조건은 마멸면적의 증가가 다소 높게 나타나고 있다. 이것은 마멸의 진행방향은 튜브 깊이 방향보다는 접촉면의 확장이 더욱 용이하

게 진행되고 있음을 의미한다.

각 실험조건에서 마멸부피와 그때의 접촉면적을 그림 4에 나타내었다. 여기서 접촉면적 증가에 따른 마멸부피 증가거동의 기울기가 낮은 경우, 접촉면에서 마멸거동은 마멸면적의 확장이 우세하게 나타난 것으로 볼 수 있고 이와 반대로 기울기가 클 경우 마멸거동은 튜브의 깊이방향으로 빠르게 진행됨을 의미한다. 따라서 핵연료봉의 프레팅 마멸관점에서 볼 경우, 기울기가 크면 튜브 깊이방향으로의 마멸이 빠르게 진행됨을 의미하고 이것은 피복관의 천공가능성이 높아지는 것을 말한다. 그러므로 스프링 설계에서는 마멸깊이보다 마멸면적이 확장되는 방향을 설계시 고려하는 것이 필요하다. 본 실험결과에서는 실제 환경에서 온도를 고려하지 않은 상온 물 속에서는 B 스프링 조건이 마멸에 대한 저항성을 가지는 것으로 나타났다.

3.2 마멸면의 확장

각 실험조건에서 슬립진폭이 증가함에 따른 접촉면에서의 튜브 마멸면적의 확장 경향을 그림 5에 나타내었다. Concave 형상을 가진 A 스프링의 경우, 마멸이 진행됨에 따라 튜브의 축방향 양쪽 끝에서 부터 마멸이 시작되어 내부로 마멸이 진행됨을 알수 있다. 이러한 경향은 상하 두 점에서 시작된 마멸흔적이 슬립진폭이 증가함에 따라 결합이 이루어 지며 이때부터는 횡방향으로의 확장이 시작된다. 즉 마멸이 진행됨에 따라 접촉면에서 생성되는 마멸입자의 많은 부분이 내부로 유입되고 여기서 마멸입자에 의한 third body abrasion 현상이 나타나게 되며 최종적으로 방출되는 마멸입자의 경로는 중심부의 횡방향이 우세하게 된다. 그러나 이와는 달리 convex 형상의 스프링의 경우, 마멸이 진행됨에 따라 접촉면의 형상은 길이가 긴 타원의 형태를 가지게 되며 스프링의 접촉면적이 concave 형상의 스프링과 같이 한정되어 있지 않기 때문에 면적은 계속해서 증가하게 된다. 따라서 마멸과정은 계속적인 마멸부피 생성과 함께 마멸면적의 확장이 발생하게 된다. 따라서 마멸과정중 접촉면에서 생성되는 마멸입자는 접촉면에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 분쇄되어 외부로 방출되며 이때 크기는 매우 적기때문에 상대적으로 많은 면적에 의해 접촉면 바깥쪽에서 기지와의 흡착경향이 상대적으로 높아 공기분위기에서는 접촉면 주위에서 오히려 견고한 마멸입자층을 형성하게 된다. 이에 대한 손상면 관찰결과는 다음절에 논하였다.

3.3 스프링 형상의 영향

접촉면적의 관찰결과로 부터 스프링 형상에 따른 마멸부피의 차이는 결국 각각의 스프링 형상에 영향을 받는다. 다시 말하면 공기 및 물 분위기에서 나타난 마멸면적의 모양은 각 스프링 형상에 의해 결정되며 단지 물 및 공기분위기에서의 접촉면의 입자거동의 차이로 인해 접촉면적의 크기가 증가하는 것으로 보인다. 같은 실험조건에서 두 스프링 형상에 따른 마멸부피의 차이는 형상에 따른 마멸입자의 방출거동의 차이로 요약할수 있다. 손상면에 대한 SEM 관찰결과를 그림 6에 나타내었다. 축방향으로 핵연료봉이 진동할때 입자의 방출은 상하로 우세하게 방출되므로 접촉폭이 상대적으로 좁은 B 스프링의 경우, 상대적으로 낮은 마멸부피를 보일것으로 예상된다. 또한 마멸이 계속 진행됨에 따라 접촉면 중심부에서 생성된 마멸입자는 내부에서 분쇄되어 이동거리가 상대적으로 짧은 횡방향으로 방출된다. 여기서 생성되는 마멸입자는 외부 환경과 접촉과정에서 생성되는 마찰열에 의해 쉽게 산화가 발생하게 되며 결국 횡방향 끝단에서 기지와 흡작이 발생하게

된다. B 스프링의 경우 스프링과 튜브 양쪽에서 생성된 마멸입자층이 횡방향으로의 마멸입자의 방출을 억제하는 것으로 보인다. 그림 7에서와 같이 마멸과정중 접촉면 횡방향 끝단에서 생성되어 기지와 고착된 마멸입자층은 스프링의 형상이 convex형이므로 반복되는 슬립에서 상호작용이 어렵게 된다. 이와는 달리 concave형의 경우, 기지와 고착된 마멸입자층이 생성된다 하더라도 스프링 혹은 튜브와의 상호작용이 convex형의 접촉에 비해 매우 용이하므로 쉽게 제거된다. 이에 따라 마멸입자의 방출경로는 횡방향의 경우, concave형에서 매우 용이하게 되며 이에 따라 횡방향으로의 마멸면적의 확장이 다소 용이하게 된다.

3.4 환경의 영향

그림 8에 마멸실험을 수행한 뒤 공기 및 물 분위기에서의 스프링 형상에 따른 마멸 손상면의 주사식 전자현미경(SEM) 관찰결과를 나타내었다. 공기분위기에서 예상과 같이 접촉면 내부는 매우 미세한 입자에 의한 마멸입자층이 잘 형성되어 있다. 공기분위기에서의 A 스프링의 경우, 접촉면에 형성된 입자층은 횡방향으로의 미세한 균열이 잘 발달되어 있는 반면, B 스프링에서는 미세한 균열보다는 크기가 매우 작은 입자들이 보다 견고한 입자층을 형성하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 상대적으로 접촉면적이 적은 B 스프링 조건에서 보다 큰 수직응력이 작용하게되며 이에 따라 접촉면에서 생성된 마멸입자의 분쇄도 보다 작은 크기로 진행될 가능성이 있기 때문이다. 그러나 물속에서는 이러한 마멸입자층의 형성은 더 이상 우세한 마멸기구가 되지 못하며 마멸과정중 거의 대부분이 외부로 방출된다. 이때 A 스프링의 경우, 마멸입자는 third body abrasion의 흔적이 명확히 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 제 3입자에 의한 연삭은 마멸면 거의 전 영역에서 발생하는 반면 B 스프링에서는 국부적인 영역에서 발생하는 것으로 보인다. 또한 A 스프링에서는 마멸면에서 깊이 방향으로 보다 깊은 골이 형성되었다. 이러한 원인을 생각해 보면 두 스프링 조건에서 생성되는 마멸입자는 상대적으로 접촉응력이 낮은 A 스프링에서 다소 긴 시간동안 변형을 경험한 뒤 분쇄되어 미세한 입자가 연삭을 일으키게 되어 전 영역에서 거의 평활한 마멸면을 형성하게 되나, B 스프링에서의 높은 접촉응력은 산화된 높은 경도의 마멸입자에 의해 스프링과 튜브쪽에 보다 깊은 골을 형성하게 된다. 이때 입자가 작은 크기로 분쇄된다면 일부는 외부로 방출되나 나머지는 변형에 의해 형성된 골에 잔류하게 된다. 따라서 이러한 잔류된 마멸입자는 쉽게 외부로 방출되지 못하며 골 주위의 기지가 다시 마멸로 인해 제거된 후에야 방출되므로 최종 마멸부피는 A 스프링에 비해 상대적으로 작은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

4. 결론

상온 공기 및 물 분위기에서 경수로 핵연료봉 재료인 Zircaloy-4에 대한 마멸실험을 같은 재질을 가진 두 가지 형상의 스프링에 대하여 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험결과로 부터 슬립진폭이 증가함에 따라 마멸량은 증가하였으며 약 80μm이상에서는 매우 급격히 증가하는 경향이 거의 모든 실험조건에서 나타났다.
(2) 스프링 형상이 concave형일 경우 마멸은 진동방향의 양 끝단에서 시작하여 내부로 진행되는 반면, convex형상일 경우 접촉면 내부에서 시작되어 외부로 진행하였다. 또한 생성되는 마멸면의

모양은 실험 분위기와는 무관하였으며 결국 스프링 형상에 따라 마멸면적의 모양이 결정되었다.
(3) 상온 공기 및 물 분위기에서의 마멸부피는 형상과 함께 환경에 따른 마멸입자의 거동에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
(4) 상온 물속에서 접촉면적이 상대적으로 넓은 concave형 스프링의 경우, 마멸입자에 의해 생성되는 third body abrasion이 보다 명확하게 나타났으나, 접촉응력이 큰 convex형 스프링의 경우 보다 깊은 골이 형성되었으며 이에 따라 생성되는 마멸입자의 외부방출이 다소 느린 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] N. J. Fisher et al., "Fretting-wear of zirconium alloys", Nuclear Engineering and Design, Vol. 213, p79-90, 2002

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

[3] 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

[4] 김형규 외, "프레팅 마멸 시험장비 개발", KEARI/TR-1570/2000, 2000

[5] H. K. Kim et al., "Fretting wear of laterally supported tube", Wear, Vol. 250, p535-543, 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

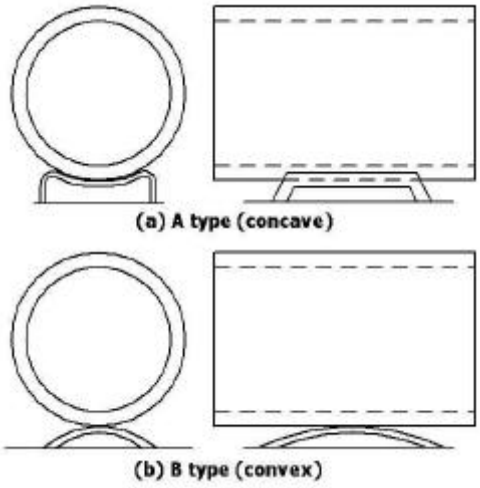


그림 1. 실험에 사용된 스프링 형상의 대략적인 모습

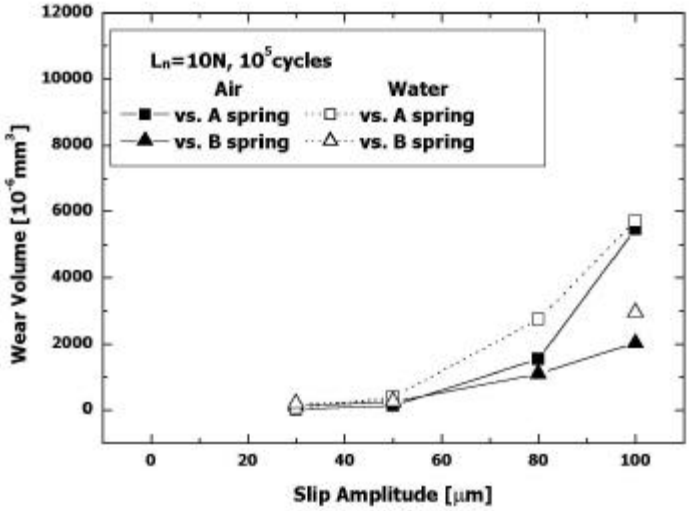


그림 2. 슬립 진폭에 따른 각 실험조건에서의 튜브 마멸부피의 비교

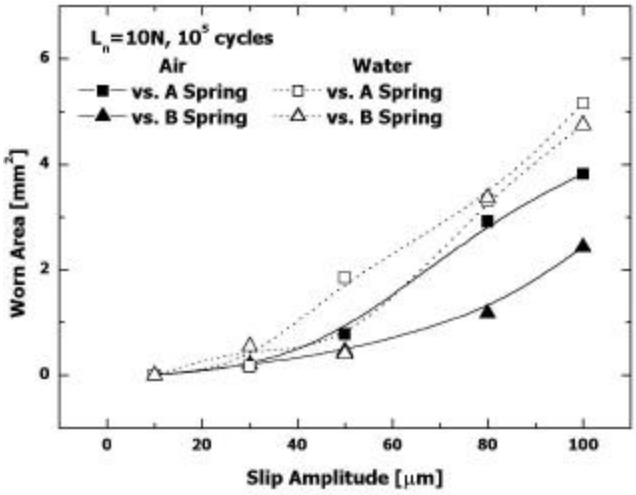


그림 3. 슬립 진폭의 증가에 따른 튜브 마멸면적의 변화

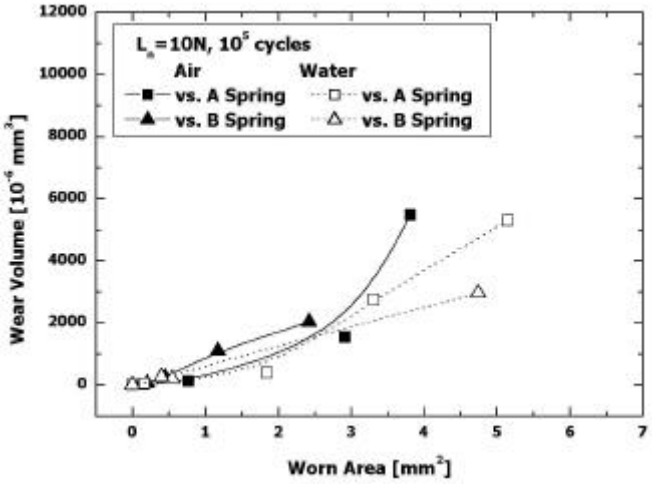
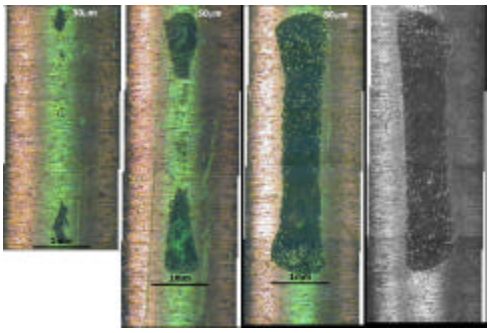
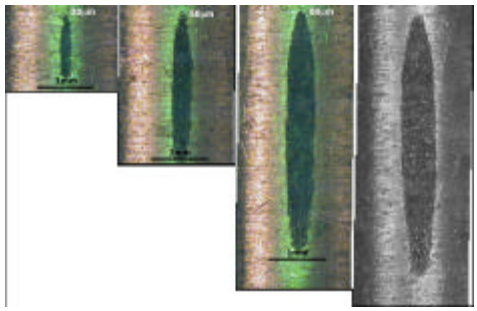


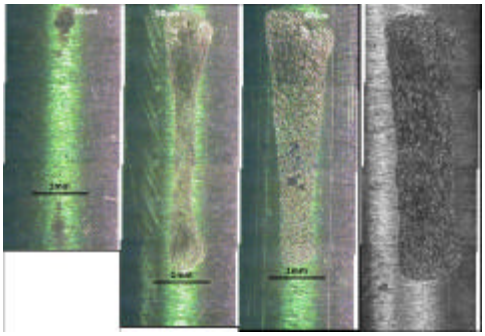
그림 4. 각 실험조건에서의 물 및 공기 분위기, 실험조건에 따른 마멸부피와 면적사이의 관계



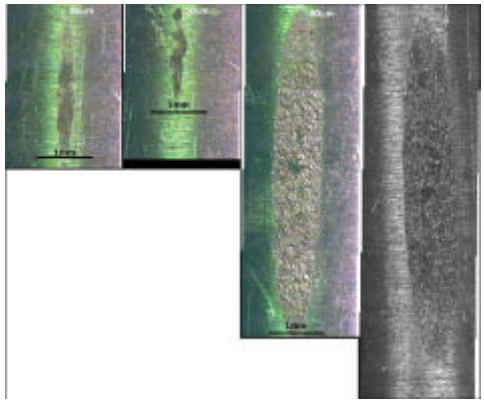
(a) A 스프링 (공기)



(b) B 스프링 (공기)

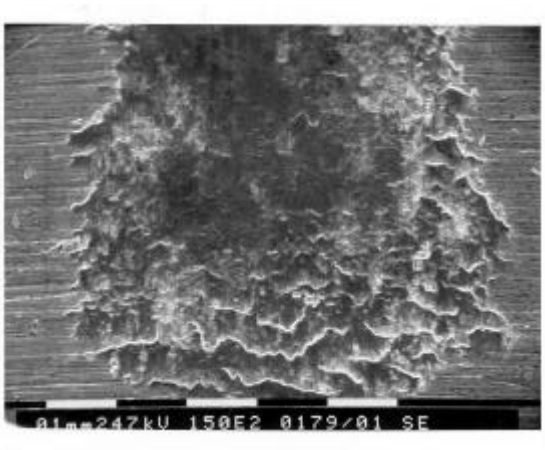


(c) A 스프링 (물)

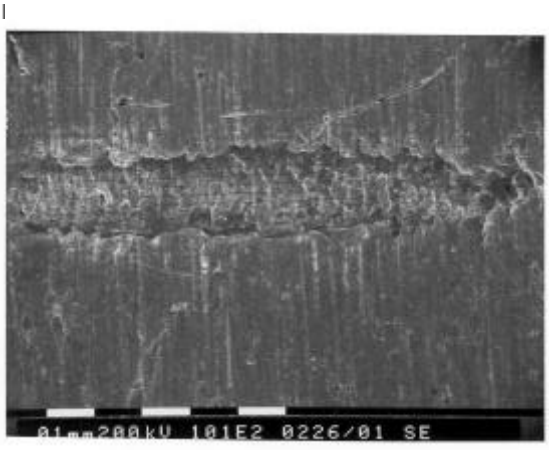


(d) B 스프링 (물)

그림 5. 마멸실험후 각 실험조건에서의 슬립진폭 증가에 따른 마멸면적의 변화.



(a) A 스프링 조건



(b) B 스프링 조건

그림 6. 상온 공기분위기에서 튜브 시편에서의 SEM 관찰결과

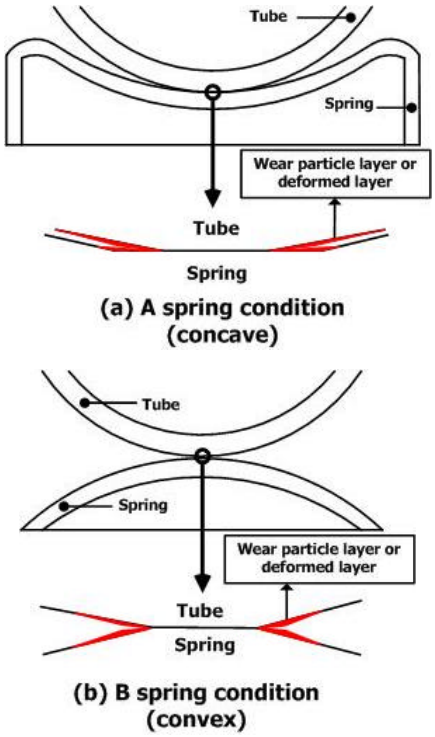
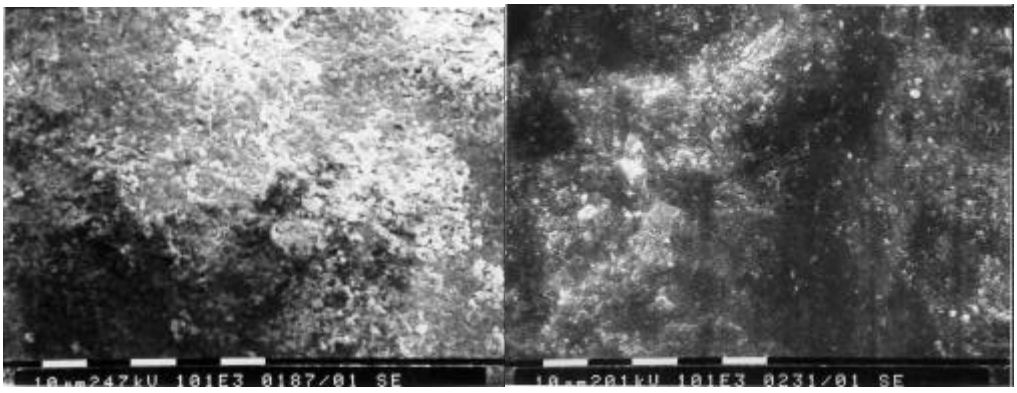
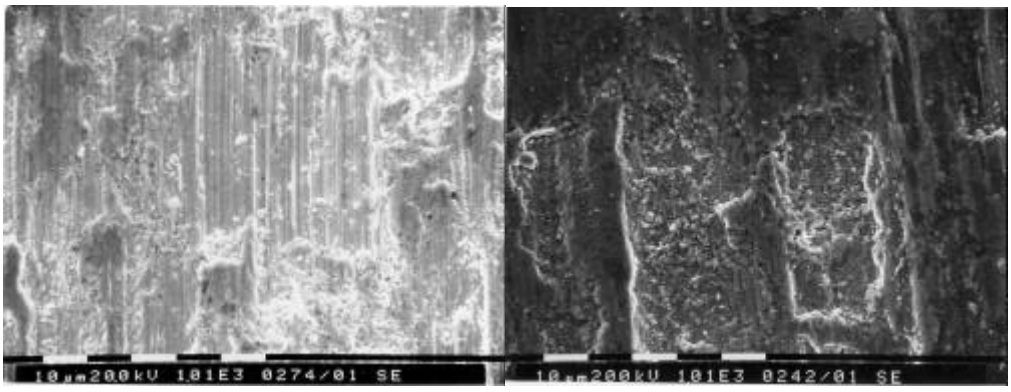


그림 7. 스프링 형태에 따른 접촉면에서의 마멸입자 방출 경향



(a) A 스프링 (공기)　　(b) B 스프링 (공기)



(c) A 스프링 (물)　　(d) B 스프링 (물)

그림 8. 10N, 80μm의 수직하중 및 슬립진폭에서의 튜브 손상면에 대한 SEM 관찰 결과