

지지부 형상에 따른 튜브 프레팅 마멸기구의 연구

A study on wear mechanism of tube fretting affected by support shapes

이영호*, 김형규, 하재욱

한국원자력연구소

ABSTRACT: Fretting wear test in room temperature air was performed to evaluate the wear mechanism of fuel rod using a fretting wear tester, which has been developed for experimental study. The main focus was to compare the wear behaviors of fuel rod against support springs at different contact geometries (i.e. concave and convex) and slip directions (axial and transverse). The wear on the tube was examined by the surface roughness tester, which measures the volume. The result indicated that with change of contact geometry from 5N of normal load to 0.1mm gap, wear volume of tube increased in the condition of concave spring, but slowly decreased in convex spring. From the results of SEM observation, wear mechanism of each test condition was also depend on the above contact parameters. The wear mechanism of each test condition in room temperature air is discussed.

Key Words: Fretting wear, fuel rod, spring, SEM, wear mechanism

1. 서 론

프레팅 마멸현상은 서로 접촉하고 있는 두 물체가 미세한 진폭으로 진동할 때 발생되며 이러한 현상을 억제하기 위하여 접촉 조건 등과 같은 설계변화를 통하여 많은 개선을 수행 하고 있다. 특히 원자력분야의 경우 이러한 진동의 가장 큰 원인으로 알려진 것이 유체 유발 진동 (Flow-Induced Vibration, FIV)현상이다. 이것은 국내 가동 중 원전이 대부분 가압경수로 형이며 항상 1 차 및 2 차측의 냉각수가 고압을 유지하면서 빠르게 순환되기 때문에 발생한다. 다시 말하면 노심에서 생성되는 많은 열을 냉각시키기 위해서는 냉각수의 유속 또한 상대적으로 빨라야 하며, 이러한 빠른 유속은 내부 구조물 중 상대적으로 단단히 고정되어 있지 못한 부위에서는 유체유발진동에 의한 고주기 피로 및 프레팅 현상을 필연적으로 발생시키게 된다. 이러한 대표적인 장소는 핵연료집합체, 증기발생기 전열관, 노심 제어봉 등과 같이 상대적으로 길이가 길고 지지력이 약한 부위로 알려져 있다.

현재까지 원전 구조물에서의 유체유발진동에 의한 프레팅 관련 열화현상은 증기발생기 2 차측에서의 전열관/지지구조물, 1 차측 압력용기 내에서 핵연료 집합체에서의 연료봉/스프링(딴플)에 대한 연구가 수행되어 왔다. 이것은 가동 온도 및 압력은 다소 차이가 있으나 그 기구는 매우 유사한 것으로 알려져 있으며 캐나다의 AECL, 프랑스의 EDF 에서 두 현상에 대한 연구가 매우 잘 수행되어 왔다[1,2]. 특히 AECL 에서는 전열관 및 핵 연료봉에 대한 마멸연구를 약 20 년 전부터 수행되었으나 현재까지 마멸 기구에 대해 명확한 설명을 하지 못하고 있는 실정이다. 마멸모형을 고려할 경우, 마멸이 발생할 때 설계 및 수명평가를 위한 모델로 Work-rate 모델[3]을 사용하고 있는 공통점이 있으나 국내에서는 이러한 마멸현상에 대한 체계적인 연구가 다소 늦어 이제 막 시작하는 단계에 있다. 이러한 원인중에는 원전내부에서의 유체유발진동에 대한 연구가 비교적 최근에 수행되기 시작한 것과 그로부터 실제 원전내부에서 발생하는 유체유발진동을 모사할 수 있는 장치의 개발이

Table 1. Mechanical properties of tested specimen

| Yield stress | Tensile strength | Elongation | Elastic modulus | Poisson's ratio |
|--------------|------------------|------------|-----------------|-----------------|
| 315MPa | 470MPa | 31% | 136.6GPa | 0.294 |

Table 2. Chemical composition of tested specimen [wt.%]

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

다소 뒤 떨어진 것을 들 수 있다.

본 연구는 핵 연료봉/스프링(담플)에 대한 고온고압 미끄럼 및 충격 마멸실험을 수행하기 전에 상온공기분위기에서 실제 연료봉의 진동을 유사하게 모사할 수 있는 실험장치를 이용하여 각 스프링의 접촉부 형상에 따른 마멸량의 변화를 관찰하고, 접촉조건의 변화에 따른 마멸기구를 상호 분석하는 것을 목적으로 한다. 또한 고온 고압 환경 하에서 스프링 형상에 대한 마멸 경향을 파악하는데 있어, 이러한 영향을 상온에서 우선적으로 파악하도록 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편

본 실험에 사용된 튜브와 판 스프링 시편의 재료는 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되고 있는 Zircaloy-4 이며 화학적 조성과 기계적 특성을 표 1 및 2 에 나타내었다. 튜브시편은 9.5mm 의 외경과 0.6mm 의 두께를 가지고 있으며 이를 특정한 길이만큼 절단하며 마멸실험을 수행하였다. 또한 지지격자 스프링은 0.46mm 의 두께를 가진 판재를 프레스로 가공하여 제작하였으며 그림 1 과 같은 형상을 가진다. 그림에서와 같이 각각의 스프링을 A 및 B type 으로 나타내었다.

A 스프링의 특징은 튜브와의 접촉부가 오목한 (concave) 형태를 가지고 있는

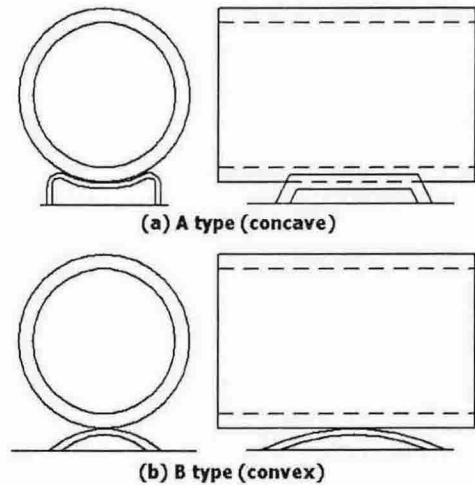


Fig. 1 Fretting wear specimen.

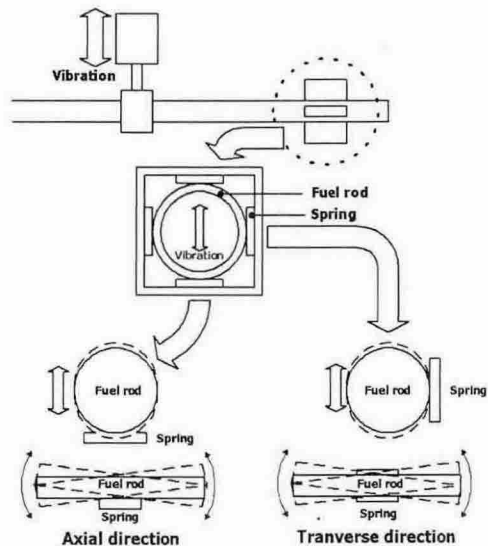


Fig. 2 Schematic diagram of fretting wear tester.

것이며 이러한 형태로 인해 튜브를 감싸는 형상을 가지도록 한 것이 특징이다. 그러나 B 스프링은 그 형상이 확연히 구분되며 볼록한 (convex) 형태를 가지고 있으며 스프링과 댐플의 형상이 동일한 특징을 갖고 있다.

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 마멸실험장치중 판스프링과 튜브의 접촉부에 대한 개략도를 그림 2 에 나타내었다[4]. 그림에서와 같이 튜브를 위아래로 반복 진동 시킬 경우, 양 끝단에서는 축 방향 (시소형태, seesaw)과 횡 방향 (노형태, oar)의 두 형태로 스프링과 접촉하게 된다. 이러한 조건을 단순화하여 축 방향 (Axial) 및 횡 방향 (Transverse)으로 나타내었다. 또한 튜브와 판 스프링 사이의 접촉조건을 인위적으로 조절하기 위하여 로드셀 및 LVDT 를 장착하여 수직하중을 가할 수 있게 설계하였을 뿐만 아니라 일정한 간격(gap)을 유지할 수 있게 제작하였다.

2.3 시험 조건

시편사이의 접촉형상에서 초기에 연료봉이 장입 되었을 때 스프링을 누름으로써 발생하는 수직하중과 장시간 가동 후 발생할 수 있는 중성자 조사에 의한 스프링의 강성(stiffness)의 소실로 인한 간격 등을 모사하기 위하여 3 가지 조건의 접촉 하에서 마멸실험을 수행하였다. 여기서 수행된 실험은 수직하중이 5N 이 있을 경우를 L, 수직하중은 없고 단순히 접촉만이 있을 경우를 J, 간격이 0.1mm 일 경우를 G 로 표기하였다.

또한 모든 조건에서 100 만회의 사이클로 실험을 수행하였으며 각각의 조건에서 마멸량을 비교하기 위하여 2D profile 의 측정 후 부피를 계산하였다.

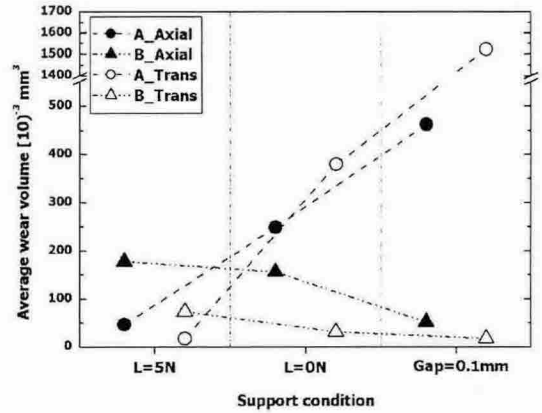


Fig. 3 Effect of contact geometries on the wear volume of fuel rod.

2.4 손상표면 관찰

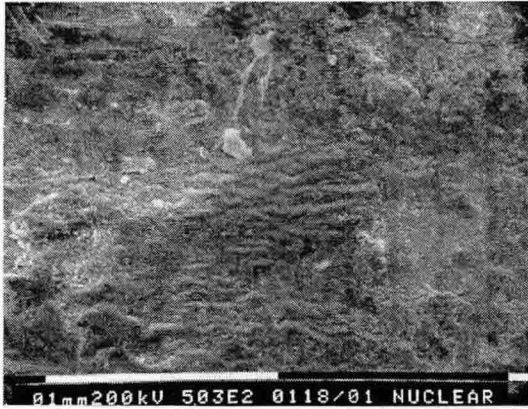
각 실험에서의 마멸실험을 수행한 뒤 마멸기구를 분석하기 위하여 주사식 전자현미경(SEM)을 이용하여 마멸면에 대한 분석 및 비교를 수행하였다. 또한 부피측정과정에서 stylus 에 의한 손상면에서의 scratch 를 비교함으로써 마멸과정 중 생성된 마멸입자층의 고착정도, 변형층에서의 경화정도를 상대적으로 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

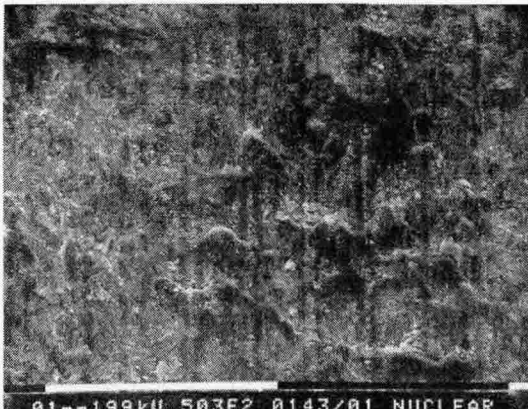
3.1 마멸부피의 변화

각 시편조건에서의 마멸실험을 수행한 뒤 부피측정으로부터 평균 마멸량을 산출하였으며 그 결과를 그림 3 에 나타내었다. 실험은 각 조건에 대하여 2~4 회 수행되었으며 평균값을 나타내었다. 2 가지 스프링에 대하여 접촉조건이 변함에 따라 마멸량의 변화도 서로 틀리게 나타났다.

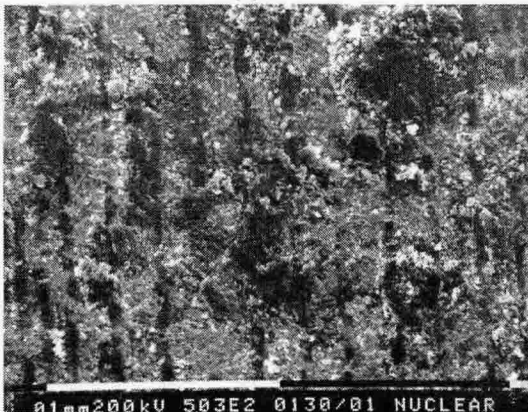
우선 A 시편의 경우 접촉형태가 L→J→G 로 변화할수록 마멸량이 매우 급격히 증가하는 거동을 보이고 있다. 이와는 반대로 B 스프링의 경우 마멸량이 서서히 감소하는 경향을 보인다. 또한 G 조건에서 가장 높은 마멸부피를 보인 A 시편의 경우 축 방향보



(a) L



(b) J



(c) G

Fig. 4 SEM results of worn surface. (A type spring)

다는 횡 방향의 마멸량이 많이 나타났다. 그러나 L 조건에서는 B 시편의 마멸량이 매우 높으며 축 방향의 마멸량이 높게 나타난 것이 특징이다.

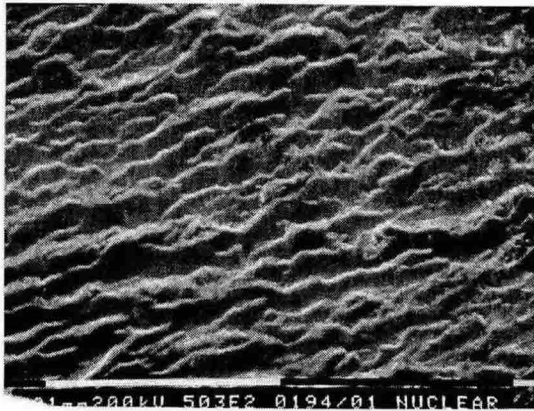
이 두 스프링의 기본적인 차이점은 그림에서와 같이 스프링의 형상 차이에 따른 연료봉과의 접촉 형태이다. 따라서 이러한 마멸량의 원인을 확인하기 위하여 마멸실험을 수행한 뒤 손상표면에 대한 SEM 관찰을 수행하였다.

3.2 접촉 형상의 영향

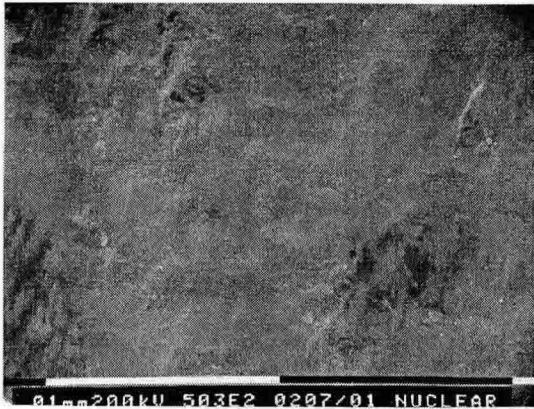
A 시편에서의 마멸기구를 파악하기 위하여 손상면에 대한 관찰을 수행하였으며 L, J 및 G 조건에서의 전형적인 손상면을 그림 4에 나타내었다. 우선 L 조건에서 손상면에 미세한 소성유동이 관찰되었으며 이러한 변형형태의 끝단간의 거리는 대략 $5\mu\text{m}$ 정도로 다소 좁은 편이다. 또한 마멸과정 중 생성된 입자의 크기는 다양하며 접촉에 의한 마멸 입자층이 잘 형성되어 있다. 이것은 마멸과정 중 생성된 입자가 접촉면 내부에서 분쇄과정을 거쳐 미세한 입자로 크기가 감소되고 일부는 방출되나 많은 입자가 입자층을 이루는 것으로 보인다. 따라서 이러한 입자층의 형성은 지속적인 마멸에 저항성을 보이게 되며 상대적으로 낮은 마멸부피로 나타났다.

J 조건의 경우, L 조건과 같이 마멸입자가 많이 분포하고 있으나 그 양은 상대적으로 적으며 입자층 형성의 경향은 별로 나타나지 않은 것으로 보인다. 또한 마멸입자의 생성은 접촉과정에서 변형된 소성유동의 끝단에서 파괴가 일어나며 접촉과정에서 수직하중이 거의 없기 때문에 생성된 마멸입자는 쉽게 외부로 방출되는 경향을 가지는 것으로 생각된다.

그러나 G 조건에서는 표면 거의 대부분이 마멸입자로 덮여있는 것이 관찰되었으며 간격의 존재로 인해 발생하는 충격하중이 상대적으로 크기가 큰 입자나 미세입자의 집적에 따른 부분적으로 조도가 높은 부위에서의 해머링(Hammering)에 따른 평평한 변형층의 영향이 다소 나타나지만 실제 기지와 이러한 충격하중에 의한 변형층과의 흡



(a) L



(b) J



(c) G

Fig. 5 SEM results of worn surface. (B type spring)

착경향은 다소 낮은 것으로 보인다. 특히 마멸부피 측정과정 중에 생성된 스크래치의 크기로 볼 때 G 조건에서 더욱 깊게 파인 것을 알 수 있으며 이것 또한 마멸입자가

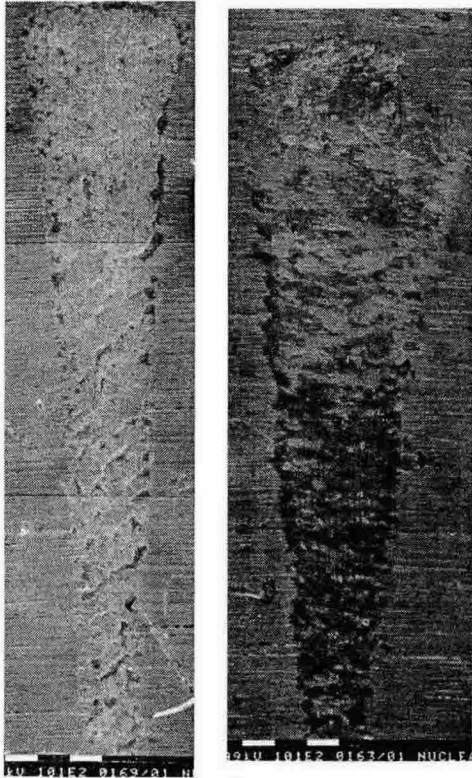
기지와의 흡착이 위 두 조건(L 및 J)에 비해 다소 약한 것을 간접적으로 의미한다.

B 시편에 대한 손상면 관찰결과를 그림 5에 나타내었다. L 조건에서 손상면은 파도형태의 변형된 주름이 우세하게 나타났으며 마멸입자가 적절한 위치에 잡혀있거나 입자층을 형성하는 경향은 거의 나타나지 않았다. 이것은 마멸과정 중 수직하중이 존재하더라도 마멸입자가 거의 대부분 외부로 방출된다는 것을 의미한다.

그러나 J 조건에서는 이러한 변형된 주름은 거의 나타나지 않았으며 소성변형층 혹은 미세한 입자가 기지와 고착된 형태를 보이고 있다. 즉 접촉을 이루고 있는 상태에서 축 방향 진동에 의한 해머링 효과가 우세하게 작용하였으며 생성되는 입자의 일부분이 연료봉과 스프링 사이에서 분쇄되어 기지에 고착된 형태를 보인다. G 조건에서는 축 방향 진동으로 인해 매우 적은 양의 변형된 주름이 나타났으며 입자 방출 또한 아래쪽 주름의 끝에서 시작되어 위쪽으로 밀려 올라간 뒤 상부에서 분쇄되는 경향으로 나타났다. 또한 마멸과정 중 변형은 연속적으로 발생하지 못하며 간격이 존재하여 0.1mm 에서의 충격하중은 볼록한 형태에의 접촉에서도 큰 소성변형을 주지 못하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 접촉형상이 A 시편과 같이 오목한 형태로 연료봉을 감싸고 있기 때문에 마멸입자의 방출은 다소 어렵게 되며 이에 따라 마멸거동은 표면에서 생성되는 마멸입자가 L, J 및 G 조건에서의 방출 용이성에 따라 최종적으로 마멸량은 급격히 변화하는 것으로 보인다. 또한 B 시편의 L 조건에서는 접촉형태가 볼록한 형태이므로 생성되는 입자가 접촉면에 존재할 가능성은 상대적으로 낮아지게 된다. 따라서 L 조건에서는 마멸입자가 더욱 용이하게 방출된 B 시편의 마멸량이 매우 크게 나타났다.

그러나 A 시편에서 나타난 G 조건 마멸부피는 다른 시편 및 조건과 비교할 때 매우 크게 나타났다. 이것의 원인으로 마멸입자



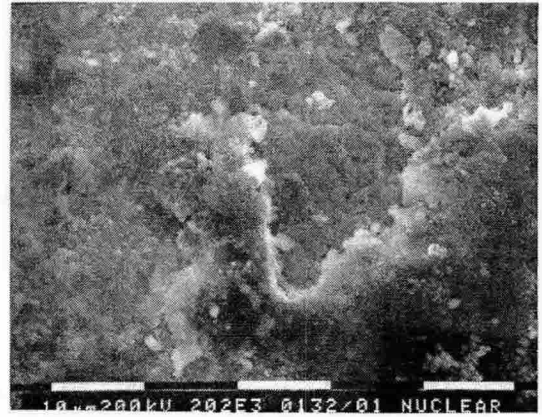
(a) Axial (b) Transverse

Fig. 6 Variation of worn surface morphology with slip direction.

가 방출되기 위해서는 접촉면에서 충분한 변형이 진행된 후 방출되므로, 볼록한 접촉의 경우 마멸이 진행됨에 따라 접촉이 이루어진 부분에 다음 사이클이 다시 같은 부위에 충격할 확률은 상대적으로 적어진다. 이것은 실제 변위가 위아래로 진동하는 것이지만 실험장치의 고유한 특성에 따라 좌우 방향으로의 변위가 존재하기 때문이다. 따라서 오목한 형태로 연료봉을 감싸는 A 시편은 충격 과정에서 마멸부위로 충격하중을 전달하는 guide 역할을 할 수 있으므로, 간격이 존재할 경우 상대적으로 높은 마멸량을 보인 것으로 생각된다.

3.3 슬립방향의 영향

축 방향과 횡 방향에서의 마멸기구 차이 점을 파악하기 위하여 가장 큰 마멸량의 차



(a) Axial



(b) Transverse

Fig. 7 Comparison of wear mode between axial and transverse slip.

이를 보이는 A 시편에서의 G 조건에 대한 손상면을 그림 6에 나타내었다. 축 방향의 경우 미세한 마멸입자로 덮여있는 부위(흰색)와 변형에 의해 형성된 평평한 돌출부가 잘 나타나 있다. 여기서 평평한 돌출부는 변형이 축 방향으로 진행됨에도 불구하고 약 45° 기울어진 형상을 보이는 것이 특징이다. 이것은 축 방향에서 진동시 스프링과 완전한 접촉을 이루는 것이 아니라 초기 접촉 후 떨어져 있다가 다시 접촉될 때 연료봉의 축 방향에 따라 정확히 내려가는 것이 아니라 기울어져 내려가는 것을 의미한다.

그러나 횡 방향의 경우, 거의 모든 영역에서 마멸입자의 흔적을 잘 나타나지 않았으며 이것은 횡 방향의 슬립이 상대적으로

마멸입자 방출이 더 용이한 것을 알 수 있다. 이것을 확인하기 위하여 보다 자세한 사진을 그림 7 에 나타내었다. 그 결과 축 방향의 경우 마멸입자의 응집된 층이 잘 형성되어 있으며 이러한 층들에서 마멸이 진행됨에 따라 균열이 전파되어 최종적으로 마멸입자가 방출된다. 특히 마멸 입자층 또한 스프링과의 흡착에 의해 찢어진 흔적(Torn area)이 많이 나타나 있다. 횡 방향의 경우, 생성된 입자층의 두께도 매우 얇으며 무엇보다도 횡 방향으로의 연삭에 의한 마멸흔적이 매우 뚜렷하게 나타났다. 이것은 마멸과정 중 연삭에 의해 마멸입자가 방출될 때 상대적으로 횡 방향의 마멸입자 방출이 더욱 용이하므로 축 방향에 비해 보다 많은 마멸부피를 보이는 것으로 생각된다.

4. 요약

상은 공기분위기에서 두 가지 형태의 스프링에 대한 연료봉 피복관의 마멸실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가장 큰 마멸부피는 스프링 형상이 오목할 경우 틈이 존재할 때 발생하였으며, 형상이 볼록한 경우에는 접촉하중이 존재할 때 마멸부피가 크게 나타났다.

(2) 접촉형상이 오목한 형태로 연료봉을 감싸고 있는 경우, 마멸입자의 방출은 다소 어렵게 되며 이에 따라 마멸거동은 표면에서 생성되는 마멸입자가 외부로 방출되는 용이성에 따라 최종적으로 마멸부피는 결정된다.

(3) 볼록한 형상의 스프링의 경우, 충격마모에 대하여 저항성을 보였으나, 접촉하중이

존재할 경우 높은 마멸량을 보이고 있다.

(4) 오목한 형태의 스프링 조건에서 축 방향의 마멸보다는 횡 방향의 마멸량이 더 낮게 나타났다. 이것의 주된 원인은 오목한 형태의 스프링이 충격하중에 있어 가이드 역할을 할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 양 방향 모두 마멸입자의 고착 흔적이 나타났으나 횡 방향의 경우 연삭에 의한 경향이 보다 뚜렷이 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] N. J. Fisher et al., "Fretting-wear of zirconium alloys", Nuclear Engineering and Design, Vol. 213, p79-90, 2002
- [2] S. Fouvry et al., "An elastic-plastic shakedown analysis of fretting wear", Wear, Vol. 247, p41-54, 2001
- [3] N. J. Fisher et al., "Experimental fretting-wear studies of steam generator materials", J. Pressure Vessel Technology, Vol. 117, p312-320, 1995
- [4] 김형규 외, 핵연료봉 프레팅 마멸시험기 개발" 2001 년 추계윤활학회 논문집, 2001