2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료봉 프레팅마멸에서 지지조건 및 형상의 영향에 대한 실험적 분석

Experimental Analysis on the Influences of Support Condition and Shape in Fuel Fretting Wear

하재욱, 김형규, 이영호, 송기남, 김석삼*

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
*경북대학교 기계공학부
대구광역시 북구 산격동 1370

요 약

접촉하중 및 형상이 핵연료봉 프레팅 마멸에 미치는 영향을 분석하였다. 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이의 지지하중 조건으로서 접촉하중 5 N, 0 N 인 경우와 간격 0.1 mm 가 존재할 때를 고려하였다. 스프링/딤플 시편은 서로 다른 두 가지 형상을 사용하였다. 실험 후 핵연료봉 시편에 발생한 마멸을 광학 현미경과 표면 조도계를 이용하여 마멸의 형상, 깊이를 측정하고 마멸부피를 계산하였다. 또한 지지격자 스프링/딤플의 형상에 따른 마멸 특성을 조사하였으며 SEM 사진을 통해 마멸면을 미시적으로 관찰하였다. 결과로서 Truncated wedge 형상의 스프링이 convex 형태의 스프링보다 접촉부에 접촉력이 존재하지 않을 때 마멸이 크게 발생하였다. 그러나 접촉력이 존재하는 경우에는 Truncated wedge 형상의 스프링이 convex 형상의 스프링보다 마멸량이 더 적었다. 한편 마멸흔 주변에 생기는 융기부는 접촉력이 존재할 때 많이 발생하며 Truncated wedge 형상의 스프링에 의한 접촉에서 convex 형상의 스프링에서 보다 많이 발생한다. 이것은 SEM 분석결과, 스프링의 기하학적 형상에 따라 마멸기구가 달라지기 때문인 것으로 분석 되었다.

Abstract

The influence of contact force and shape on fuel fretting wear is analysed experimentally. As for the supporting condition between fuel rod and spring/dimple, the contacting force of 5 N, 0 N (Just-contact) and the gap of 0.1 mm are used. Two different shapes of spring/dimple specimen are used. Investigated is the wear characteristic depending on the grid spring shape. Detail examination of wear scar is also performed using SEM micrographs. As results, more wear occur when the spring of truncated wedge in the case of non-contacting force. However, the truncated wedge shaped spring causes less wear than the convex shaped spring does in the case of positive contacting force. Protrusion part found at the wear scar boundary is large in the case of positive contact force and the truncated wedge spring being used. Through the detail examination using SEM, it is thought that the difference in the protrusion is caused by the different wear mechanism, which is influenced by the spring shape.

1. 서 론

핵연료 집합체(Fuel Assembly)를 구성하는 부품중의 하나인 지지격자체(Spacer Grid)는 핵연료봉(Fuel Rod)을 핵연료 집합체 내의 공간상에 정해진 위치에 있도록 하는 중요한 부품이다. 이때 지지격자체를 구성하는 지지격자판에는 핵연료봉의 지지를 위하여 스프링과 딤플이 가공되어 있으며 지지격자판들이 서로 직교하며 조립되어 핵연료봉이 삽입될 수 있는 셀을 구성하고 있다. 따라서 핵연료봉의 지지력은 하나의 셀 내에서 스프링 및 딤플들과 핵연료봉 사이의 접촉면에 존재하는 마찰력이 된다. 핵연료봉 설계 시에는 이 마찰력에 의한 지지기능이 핵연료봉의 수명 말 까지 유지 되도록 스프링 또는 딤플의 변위와 그에 따른 초기의 하중을 설정한다. 그러나 원자로 내의 냉각수 유동에 의한 유체유발진동(Flow-Induced Vibration)이 발생하면, 접촉면에서는 상대운동이 발생하게 되고 이로 인해 접촉면이 마멸하게 되는 현상, 즉 프레팅 마멸(Fretting Wear)이 발생하게 된다. 이때 마멸이 과도하게 발생하게 되면 핵연료봉 피복관에 구멍을 발생 시킬 수 있으며 내부의 방사능 물질이 원자로 내부로 유출되는 심각한 사고를 야기하기도 한다. 따라서 원자력 발전소의 안정성 및 경제성을 향상 시키기 위해 핵연료봉의 프레팅 마멸을 억제하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 이에 대한 실험적 연구로서 시편단위의 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉의 피복관 사이 또는 피복관과 피복관 사이의 접촉에 의한 마멸 특성을 분석하는 시험과 핵연료 집합체를 유동장에 놓이게 한 후 유체 유발 진동 시험에 의해 나타나는 마멸을 분석하는 시험 등이 있다. 전자의 경우는 다시 미끄럼마멸시험과 미끄럼/충격 마멸 시험으로 구분 할 수 있다. 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉 사이의 미끄럼 마멸 시험은 접촉 형상을 확인하고 마멸이 급격히 증가하는 조건 (예를 들면 임계진폭 등)을 도출하는데 이용된다. 한편 이 시험 방법에 의해서는 원자로 내에서의 고온과 조사의 영향에 의해 지지격자 스프링/딤플 의 강성이 이완되고 이로 인해 발생할 수 있는 스프링/딤플과 피복관 사이의 간격이 존재하는 경우에 대한 접촉 상황을 모사하지 못하는 한계가 있다. 일반적으로 피복관과 지지격자 스프링/딤플 사이에 간격이 존재할 경우 마멸량이 증가하는 것으로 알려져 있으므로 미끄럼/충격에 의한 마멸을 분석하는 것은 매우 중요하다.

본 연구는 기 개발된 상온 미끄럼/충격 마멸 시험기[1]를 이용하여 원자로 내에서의 핵연료 피복관과 지지격자 스프링/딤플의 접촉에 대한 기하학적 조건을 고려하여 실험을 수행하고 분석한 결과이다. 이때 두 가지 형상의 스프링/딤플에 대하여 마멸현상을 관찰하였으며 SEM 사진을 통한 분석으로부터 접촉부의 형상이 마멸특성 및 마멸량에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 아울러 본 논문은 앞선 연구[2]에서의 실험방법을 개선하여 스프링과 딤플의 위치를 교환하며 반복 시험을 수행하여 시험결과의 신뢰도를 제고함과 동시에 마멸부 주위의 융기부에 대한 분석과 SEM 을 이용한 마멸기구의 상세분석을 포함한 것이다.

본 연구결과는 핵연료봉의 프레팅 마멸 저항성 제고를 위한 지지격자체 개발에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 시험

2.1 미끄럼/충격 프레팅 마멸 시험기

원자로 내 핵 연료봉의 프레팅 현상을 모사하기 위해서는 하중, 진폭, 주파수, 온도, 압력, 수화학적 조건 등 여러 인자를 고려해야 한다. 본 시험장치는 기계적인 관점에서의 조건(하중, 진폭, 주파수 등)을 고려하여 설계된 것으로 하나의 셀이 구성된 지지격자체 단위에서 발생하는 프레팅 마멸현상을 모사하여 실험할 수 있도록 되어 있다.

그림 1 은 본 연구에 사용된 프레팅 마멸시험기의 개략도를 보여준다. 이 시험기는 회전속도를 가변할 수 있는 서보모터와 편심원통, 링크기구 및 지렛대를 이용하고 있으며 시험 변수인 시편사이의 상대진폭, 진동수, 수직 하중 및 핵연료봉 시편과 스프링/딤플 시편 사이의 간격 등을 조절할 수 있도록 설계되었다. 본 시험기를 이용한 프레팅 마멸 시험은 상온 공기 중에서 수행하도록 되어 있으며 서로 수직한 스프링/딤플 시편 4 개와 핵연료봉 시편과의 다양한 접촉상황을 모사할 수 있는 것이 특징이다. 본 시험기의 상세는 앞서 발표된 문헌[1]에 나와 있으므로 본 논문에서는 이를 생략한다.

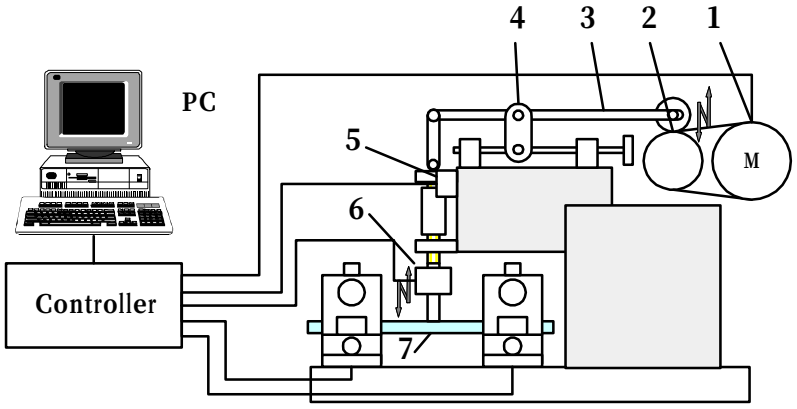


그림 1. 시험에 사용한 셀 단위 프레팅 마멸 시험기; 1:Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: LVDT, 6: Load Cell, 7: Tube Specimen.

2.2 시편

본 시험에 사용된 지지격자 스프링/딤플 시편과 핵연료봉 피복관 시편의 재질은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 지르코늄계 합금으로 되어 있다. 피복관 튜브 시편의 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 실제 핵연료봉의 제조에 사용되는 것을 절단/채취하여 그림 2 와 같이 반영구적으로 사용 가능하게 설계한 Center rod 와 Extension rod 를 연결하여 핵연료봉 시편을 구성하였다.

한편 연료봉 시편과 접촉하게 되는 스프링/딤플 시편은 두 가지 다른 형상 사용하였으며 판재로부터 가공하여 제작하였다. 표 1 에서는 본 시험에 사용된 스프링/딤플 시편의 형상과 마멸부의 모습, 그리고 각각의 특징을 정리하여 나타내었다.

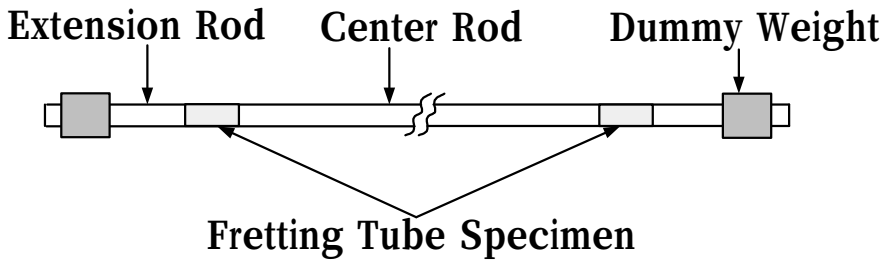
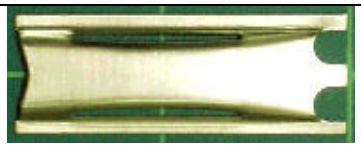
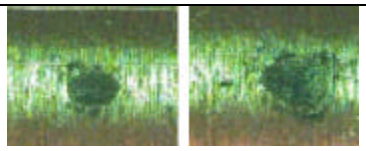


그림 2. 시험에 사용한 핵연료봉 시편.

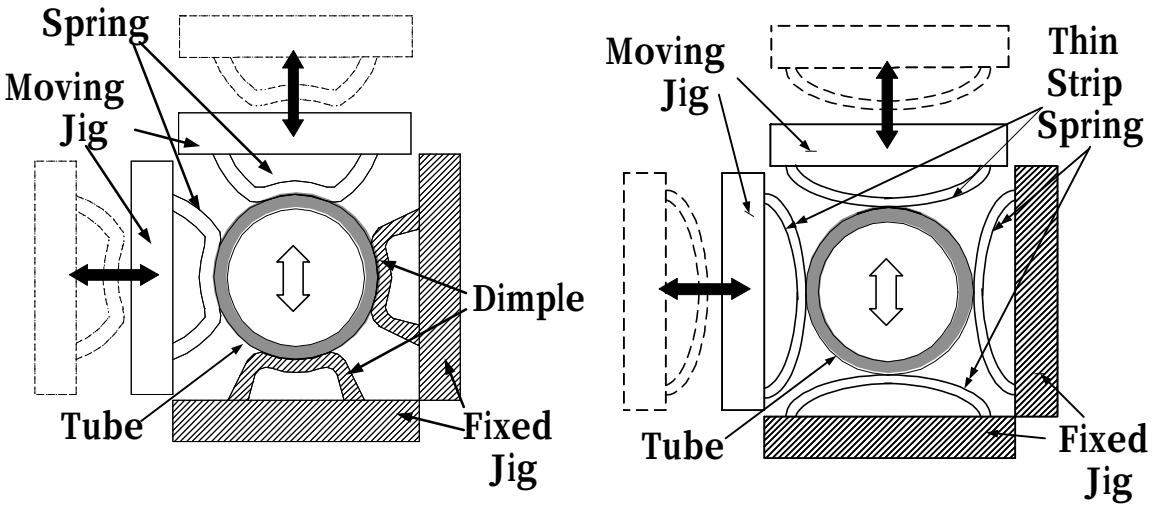
표 1. 지지격자 스프링 시편형상과 특징

Specimen Type	**Type A**	**Type B**
Spring Shape		
Typical Wear Scar Shape		
Contact Contour (Axial)	Truncated wedge	Convex
Contact Contour (Transverse)	Concave	Convex
Spring / Dimple Shape	Different	Same
End Condition	Clamped at both ends	Clamped at both ends
Contact Length	4.5 mm	Depends on the contact force
Thickness	0.45 mm	0.38 mm

2.3 시험 방법

실제 원자로 내에서 핵연료봉과 스프링/딤플이 접촉하는 여러 가지 경우를 모사하기 위해 지지격자판 4 개를 하나의 지지격자체 셀로 구성하였고, 두 개의 지지격자체로 하나의 구간(Span)을 구성 하였다. 스프링 시편을 시편 블록에 접착제로 고정시키고 완전히 굳힌 다음에 각 블록을 로드셀이 장착되어 있는 시편 고정부에 고정시켜서 지지격자체를 구성하였다. 이때 그림 3 과 같이 두 개의 스프링 시편은 고정되어 있는 시편 고정부에 장착이 되며 나머지 두개의 스프링 시편은 이동할 수 있는 구조를 갖는 이동측 시편 고정부에 장착하였다. 고정측 시편 고정부에는 로드셀을 장착하여 시험 중 접촉 수직하중을 실시간 측정이 가능하도록 하였다. 핵연료봉 시편을 구성된 두 개의 지지격자체 사이에 끼워 넣어서 실제 핵연료봉의 하나의 구간을 모사하였으며 한 구간 길이는 실제 핵연료봉과 같은 520 mm 로 하였다.

시험은 상온에서 수행하였으며, 서로 다른 형상을 가진 두 가지 종류의 스프링 시편에 대하여 시험하였다. 각 시편에 대해서 실제 원자로 내에서 핵연료봉과 스프링/딤플이 접촉하는 여러 가지 경우 중에서 접촉 수직 하중을 받고있는 경우, 접촉은 하고 있으나 수직 하중이 작용하지 않는 Just-contact 인 경우와 간격이 존재하는 경우에 대해 시험을 수행하였다. 접촉 수직 하중을 받는



(a) Type A (b) Type B

그림 3. 지지격자 셀 내에서의 시편 접촉 상태.

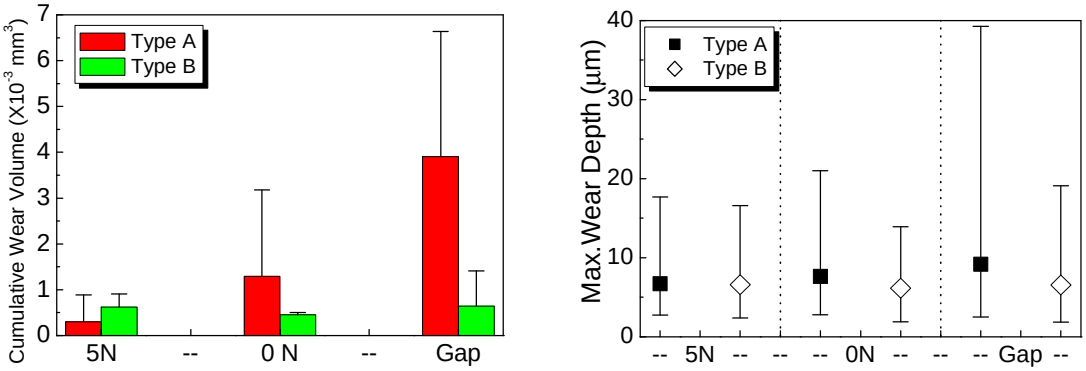
경우에는 수직 하중을 5N 으로 설정 하였고, 핵연료봉과 스프링/딤플 사이의 간격이 존재하는 경우에는 간격을 0.1 mm 로 정하였다. 5N 의 수직하중이 가해지는 경우에는 구성된 지지격자체에서 핵연료봉 시편과 스프링/딤플이 받는 접촉 수직 하중의 로드셀 값이 5N 이 될 때까지 가변 치구를 이송하여 하중을 부여하였고, Just-contact 인 경우에는 임의의 수직하중을 가하여 로드셀에서 읽혀지는 값이 양의 값이 되게 한 다음에 가변 치구 이송놉을 하중을 가하는 방향의 반대방향으로 돌려서 로드셀에서 나오는 값이 0 이 되는 시점을 Just-contact 으로 하였다. 스프링/딤플과 핵연료봉 시편의 간격이 존재하는 경우에는 먼저 Just-contact 상태로 조정하고 이 상태에서 읽혀진 다이얼 인디게이터의 값으로부터 0.1 mm 를 뺀 값까지 가변치구 이송놉을 돌려서 간격을 맞추었다. 두 개의 지지 격자체 사이(Span)의 중심부를 0.7 mm 변위로 진동하게 하였고 핵연료봉 시편에 가하는 진동 주파수는 30 Hz 로 하였으며 시험완료까지의 가진 횟수는 10^6 회로 하였다. 두 가지 형상의 시편에 대해 5N, Just-contact 상태 및 0.1 mm 간격조건에 대해 시험한 것을 1 회로 하여 스프링과 딤플의 위치를 바꿔서 2 회씩 반복 실시하여 총 4 회의 시험을 하였다.

시험 전에 각 시편은 초음파세척기로 아세톤 용액에서 세척한 후 건조 시켜 사용하였고, 시험 후 두 개의 핵연료봉 시편에 발생한 마멸흔적을 현미경을 통해 전체적인 외부 형상 및 치수를 측정한 다음, 표면 거칠기 측정장비로 마멸궤적과 마멸깊이를 측정하였으며 여기에서 얻은 마멸부의 3 차원 데이터로부터 기 개발된 마멸부피 계산 프로그램[3]을 이용하여 마멸 부피를 계산하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 지지 조건과 시편형상에 따른 마멸량과 마멸 깊이

그림 4(a)에서 보여주듯이 시편 A 의 경우 지지조건이 5 N, Just-contact 그리고 간격이 있는 경우의 순으로 마멸이 더 크게 나타났다. 또한 마멸량의 분산정도가 커지는 것을 알 수 있는데, 이것 은 핵연료봉과 스프링/딤플 사이의 충격력이 마멸증가에 크게 기여하고 있으며, 또한 충격력이 시험



(a) 마멸 부피의 비교 (b) 마멸 깊이의 비교

그림 4. 접촉 조건 및 지지격자 시편에 따른 마멸의 비교.

때마다 많은 편차를 갖는다는 것을 의미한다.

그러나 시편 B 의 경우는 지지조건의 변화에 따른 마멸량의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며 마멸량의 편차도 상대적으로 적었다. 이는 실제의 원자로 내 핵연료집합체에서도 일어나는 현상으로 추정된다.

지지력이 감소함에 따라 시편 A 가 시편 B 에 의한 접촉에서 보다 마멸량이 커지는 이유를 분석하기 위한 하나의 방법으로 마멸에 주도적으로 기여하는 접선방향(즉 접촉면 전단방향)의 트랙션 을 고려할 수 있다. 그림 5 과 같이 Center rod 가 움직일 때 스프링 또는 딤플 시편의 위치에서 핵연료봉 시편이 기울어지는 각도를 α라고 하면 이 각도에 의한 접촉부의 전단 트랙션은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = F \sin a \qquad (1)$$

여기서 F 는 두 시편의 접촉 시 연직방향의 하중이며 Q 는 접촉 전단하중이다. 한편 그림 5 에 도시한 것과 같이 핵연료봉 시편과 스프링 시편이 접촉할 때의 기하학적 형상은 시편 A 의 경우 쐐기(Wedge)형상, 그리고 시편 B 의 경우 2 차원 곡면형상으로 볼 수 있다. 이러한 형상에서 접촉 트랙션을 분석한 앞선 연구결과[4]를 참고할 때 전단 트랙션의 분포는 각 시편에 대해 그림 5 에서 점선으로 나타내어진 q_A 와 q_B 와 같이 다른 형상으로 나타내어지며 convex 형태의 시편 B 의 경우에 비해 Truncated wedge 인 시편 A 인 경우에 접촉 트랙션의 최대값이 더 크게 된다. 즉 같은 각도 α의 조건에서 Truncated wedge 인 시편 A 에서는 평탄부 끝 단의 기울기가 달라지는 양 경계에서 트랙션 값이 급격히 증가하나 convex 한 시편 B 는 접촉부 경계 부근에서 나타나는 최대 트랙션이 일정한 값을 가지게 된다. 접촉력이 존재함에 따라 α는 작아지며 시편 A 는 스프링/딤플의 평탄부를 따라 접촉영역이 넓어지게 되어 트랙션의 크기가 줄어들게 된다. 그러나 시편 B 의 경우 완만한 곡면을 가지므로 전단 트랙션이 각도 α의 영향을 크게 받지 않는다.

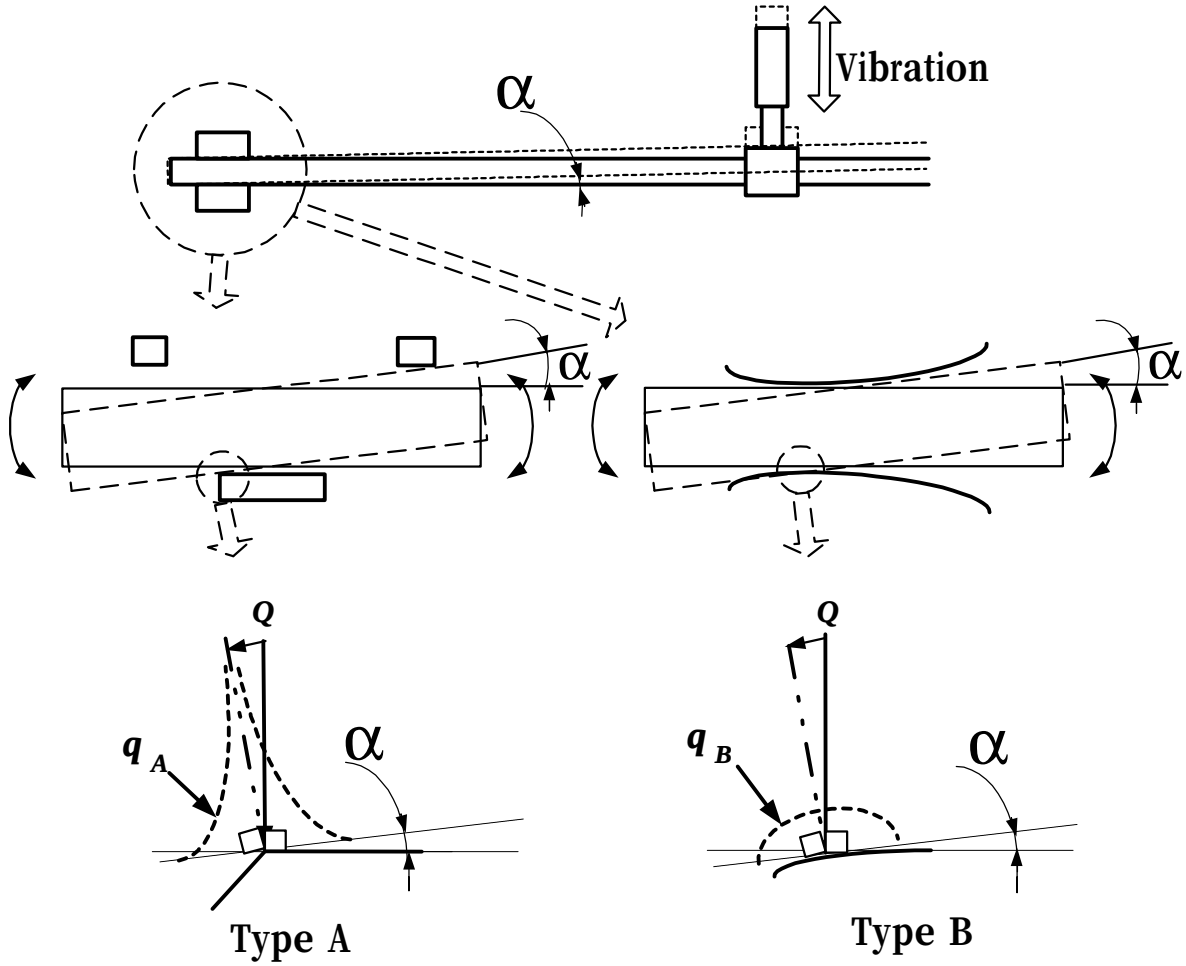


그림 5. 스프링 형상에 따른 접촉 트랙션 분포의 개략도.

한편 그림 4(a)에서 지지력이 존재하는 경우 시편 B에 의한 마멸량이 시편 A에 의한 것보다 더 많은 것을 알 수 있다. 이것은 시편 B와 핵연료봉 시편 사이에는 명백한 비등각 및 불완전 접촉(Non-conformal and Incomplete Contact)으로서 접촉력이 증가하면 접촉폭과 길이가 증가하기 때문이다. 그러나 시편-A와 핵연료봉 시편과의 접촉에서는 접촉력이 증가할 때 축방향으로는 접촉길이가 거의 증가하지 않으며 폭방향으로만 접촉구간이 증가한다. 즉 시편 A에 의한 접촉은 축방향으로는 거의 완전 접촉(Complete Contact)에 가까우며 폭방향으로는 거의 등각접촉(Conformal Contact)에 가깝다.

따라서 그림 4(a)에서의 마멸량의 차이는 스프링의 기하학적 형태에 따른 접촉부위의 접촉 트랙션의 차이와 스프링의 접촉 형태에 따른 접촉면적의 증가에 따른 종합적인 결과로 생각된다. 이상의 결과에서 접촉력이 존재할 때에는 시편 A 가 마멸에 대해 우수하며 접촉력이 없는 경우에는 시편 B 가 마멸저항이 큰 것으로 볼 수 있다.

한편 그림 4(b)로부터 접촉력이 작용할 때와 접촉부에 간격이 존재할 때, 각 경우에 대해 마멸깊이의 차이는 마멸량의 차이에 비해 현저하지 않음을 알 수 있다. 이것은 접촉력이 줄어들며 증가하는 마멸량의 증가가 깊이 방향으로 마멸이 증가된 데에 기인하기 보다는 접촉면에서의 마멸영역, 즉 마멸면적이 확장하는 데에 따른 것이라 판단되어진다.

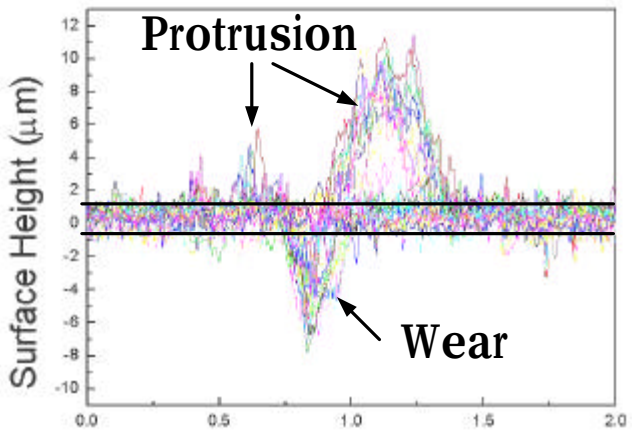


그림 6. 마멸흔에서 융기부의 정의.

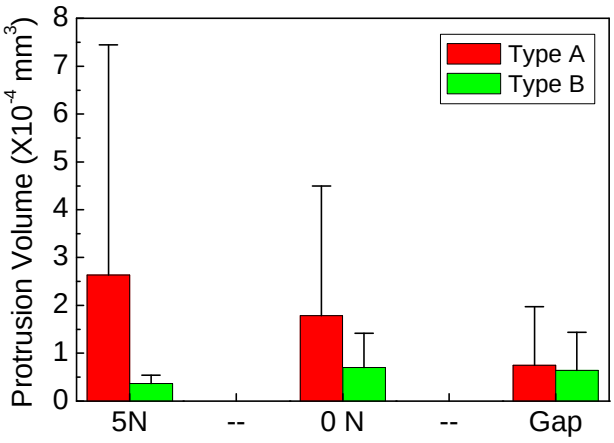


그림 7. 지지조건에 따른 융기부의 부피

3.2 융기부에 대한 고찰

그림 6 과 같이 핵연료봉의 마멸면을 측정한 2차원 데이터를 보면 마멸면 주위에 표면의 높이보다 더 높게 측정된 부분이 존재한다. 이것은 소성유동에 의해 재료의 기지층이 밀려 올라갔거나 마멸입자들이 이탈하지 못하고 집적된 경우, 또는 접촉한 스프링 또는 딤플의 마멸입자가 이착(移着)된 것이다. 측정된 마멸면의 데이터를 이용하여 연료봉 튜브시편 표면 위로 융기된 부분의 양을 조사하였다. 그림 7에서와 같이 시편 A에 의한 접촉이 시편 B에 비해 융기부의 부피가 큰 것 알 수 있다. 이것은 스프링 또는 딤플의 기하학적 형상에 의한 것으로 사료된다. 즉 시편 A에 의한 접촉부분의 기하학적 형상이 그림 3(a) 과 같이 폭방향으로 튜브형태의 핵연료봉을 감싸는 형태이므로 마멸입자의 이탈이 상대적으로 용이하지 못한 것으로 판단되어진다. 이에 반해서 시편 B는 그림 3(b)에서 보여주듯이 기하학적 형상이 마멸입자의 이탈을 방해하지 않음으로 시편 A에 비해 융기부가 적게 나타난다. 그림 7에서 시편 A의 경우 5 N, Just-contact, Gap조건의 순으로 융기부의 부피가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 접촉력이 존재할 때에는 소성유동에 의해 마멸입

표 2. 융기부와 마멸부피의 비가 큰 경우와 작은 경우의 마멸흔 개수

Protrusion / Wear	5N		0N		Gap	
	Type A	Type B	Type A	Type B	Type A	Type B
>1	9	6	5	5	4	1
<1	7	12	15	14	15	15
Total	16	18	20	19	19	16

자들이 밀려 올려지거나 마멸입자의 이탈이 수월하지 못하여 마멸입자가 집적된 결과로 보여진다.

결과적으로 접촉력이 줄어들어 간격이 존재하게 되면 마멸입자이탈의 용이성에 대한 스프링의 기하학적 형상의 영향이 줄어들므로 시편 A와 시편 B의 융기부의 부피가 비슷해지는 것으로 생각된다.

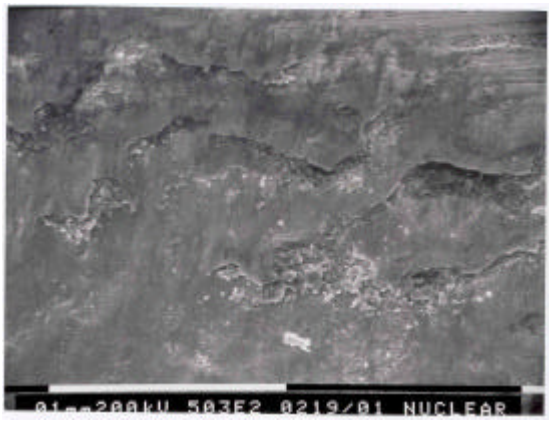
표 2 는 각 시편에 대해 융기부가 존재하는 경우 융기부와 마멸부피의 비가 큰 경우와 작은 경우의 마멸흔 개수를 비교한 것이다. 융기부의 부피와 마멸 부피와의 비가 1 보다 큰 것은 스프링 또는 딤플에서 마멸된 입자가 핵연료봉 시편으로 이착된 것으로 볼 수 있으며 시편 A에서 접촉력이 존재하는 경우 많이 나타났다. 이것은 접촉력이 존재하는 조건에서 시편 B보다 시편 A에 의한 접촉일 때 마멸량이 더 적게 나타난 이유로도 추정된다.

이상의 분석을 고찰하기 위한 하나의 방법으로 SEM을 사용하여 마멸면에 대해 미시적 관찰을 하였다.

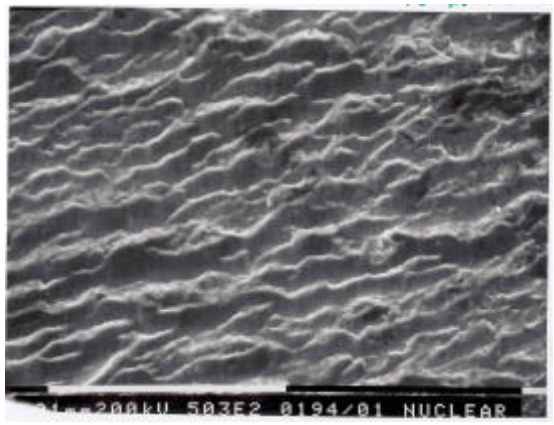
3.3 마멸면의 미시적 관찰

접촉력이 존재할 때 시편 A는 마멸면에서 소성유동의 흔적이 관찰되었고 이탈하지 못한 마멸입자가 집적된 층이 보였다. 이것은 접촉력이 존재할 때 시편 A의 마멸기구는 소성유동에 의해 마멸입자가 집적된 층이 형성된 후, 마멸입자 층에 균열이 전파되어 이탈되는 것임을 보여준다. 한편, 마멸면에 잔류하는 마멸입자층은 마치 표면을 코팅(Coating)한 효과와 같이 마멸에 저항성을 보이게 되며 상대적으로 따라서 낮은 마멸량을 가지게 된 것으로 판단된다. 마멸면의 가장자리에는 기지변형층과 소성유동에 의해 마멸입자층이 밀린 흔적이 관찰되었고 이것은 접촉력이 존재할 때 시편 A의 경우 융기부의 부피가 큰 이유의 하나로도 분석된다. 시편 B의 경우는 마멸입자층의 소성유동보다 기지변형층이 선명하게 관찰되어진다. 마멸면에서 마멸입자의 양이 시편 A에 비해 적게 나타났으며 마멸입자와 마멸입자층은 마멸면의 가장자리에서 주로 관찰되었고 이것은 수직하중이 존재하더라도 시편의 기하학적 형태에 의해 마멸입자의 이탈과 방출이 수월하게 이루어진 것으로 보인다.

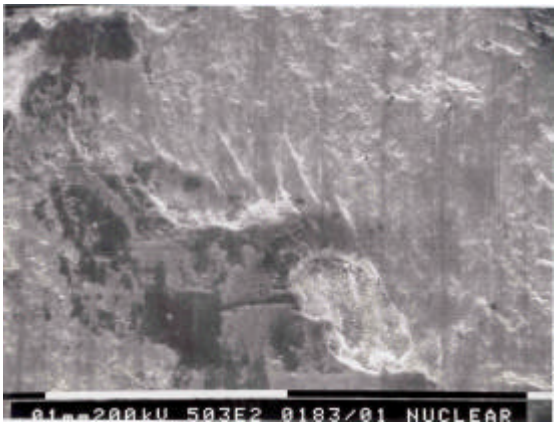
접촉력이 없는 Just-contact 조건에서는 시편 A에 의한 접촉의 경우 마멸입자의 크기는 접촉력이 존재할 때 보다 더 작게 나타났고 마멸입자층의 형성도 잘 나타나지 않았다. 이것은 마멸입자의 이탈이 수월하게 나타난 결과로 보여진다. 시편 B인 경우 마멸면의 가장자리에 마멸입자층이 눌



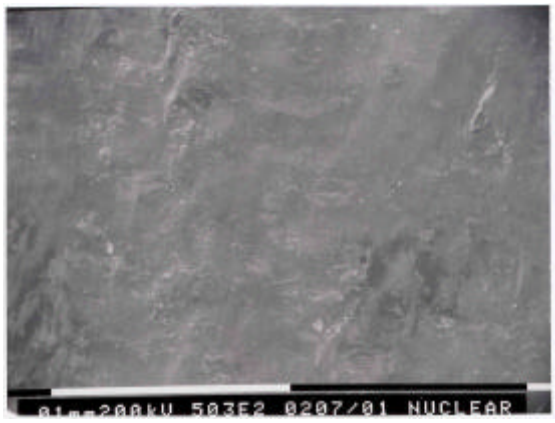
(a) 시편 A, 5 N



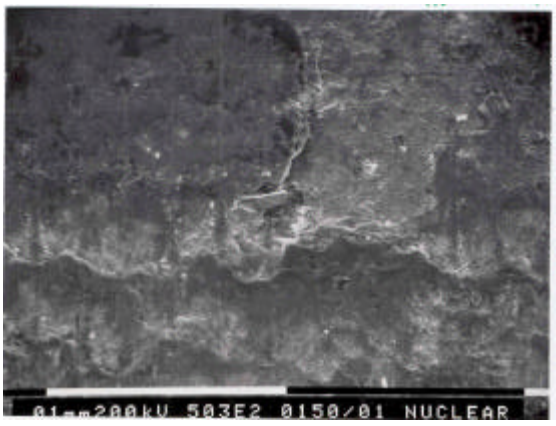
(b) 시편 B, 5 N



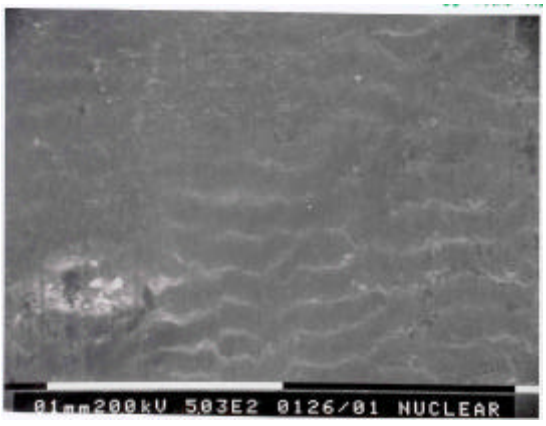
(a) 시편 A, 0 N



(b) 시편 B, 0 N



(a) 시편 A, Gap



(b) 시편 B, Gap

그림 8. 지지조건 및 스프링 형상에 따른 핵연료봉 마멸면에서의 SEM 관찰 결과.

린 형태로 관찰되어지는데 이것은 충격에 의한 햄머링효과에 의해 형성된 것으로 보여지며 그림 7 에서의 결과와 같이 시편 B가 접촉력이 존재할 때 보다 접촉력이 존재하지 않을 때가 많은 융기부가 형성되는 이유로 생각된다.

간격이 존재하는 Gap 조건에서는 시편 A의 경우 접촉력이 존재할 때보다 간격이 좁은 물결 무늬의 소성유동 흔적이 마멸흔의 양 끝단에서 관찰 되었고 마멸흔의 가운데 부분은 마멸입자가 햄머링 효과에 의해 고착된 부분이 보인다. 마멸면의 가장자리에는 접촉력이 존재할 때 보다 큰 마

멸입자와 마멸입자층이 깨진 것으로 보이는 큰 입자들이 관찰 되었는데 이것은 보다 큰 마멸입자의 이탈이 상대적으로 수월하여 간격이 존재할 때 마멸량이 큰 이유로 판단된다. 시편 B의 경우도 시편 A와 같이 간격이 좁은 물결 무늬의 소성유동 흔적이 마멸흔의 양 끝단에서 관찰 되었고 마멸흔의 가운데 부분은 마멸입자가 고착된 것으로 보이는 부분이 존재하였다. 그러나 시편 A에 비해 소성유동에 의한 파도 무늬의 주름은 적게 나타났으며 이는 시편 B의 볼록한 형상으로 인해 충격하중이 큰 소성변형을 주지 못하는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 시편 A는 간격이 존재할 때 충격으로 인한 마멸입자의 이탈이 수월하므로 마멸량이 커지며 시편 B는 볼록한 형상으로 인해 충격하중이 마멸입자의 이탈에 많은 기여를 못하므로 지지조건이 달라짐에도 불구하고 마멸량의 차이가 크게 나타나지 않은 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 원자로내의 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉 사이에서 발생 가능성이 있는 지지조건 3 가지, 즉 접촉력이 있는 경우 및 접촉력과 간격이 없는 경우와 간격이 0.1 mm 존재할 때를 모사하고 기하학적 형상이 서로 상이한 두 가지 모양의 스프링/딤플로 지지격자체 단위를 모사하여 셀 단위 프레팅마멸 시험을 수행한 것으로 다음의 결론을 얻었다.

1. 지지격자 스프링/딤플의 형상에 따라 마멸의 정도가 크게 달라진다. Truncated wedge 형태의 스프링은 접촉력이 없어지고 간격이 발생함에 따라 크게 마멸이 증가하는 반면 convex 형태의 스프링은 거의 일정한 마멸량을 가진다. 그러나 접촉력이 존재하면 Truncated wedge 형태의 스프링이 convex 형태의 스프링보다 마멸 저항성이 우수하다.
2. 마멸량의 차이는 스프링의 기하학적 형태에 따른 접촉부위의 접촉 트랙션의 차이와 스프링의 접촉 형태에 따른 접촉면적의 증가에 따른 종합적인 결과이다. 접촉력이 없는 경우 Truncated wedge 형태의 스프링은 평탄부의 양 끝 단에서 큰 접촉 트랙션을 가지므로 convex 형태의 스프링보다 큰 마멸량을 가진다. 접촉력이 존재하면, 비등각 및 불완전 접촉을 하는 시편은 접촉폭과 길이가 증가하고, 축방향으로는 거의 완전 접촉에 가까우며 폭방향으로는 거의 등각접촉인 시편은 축방향으로 접촉길이가 거의 증가하지 않으며 폭방향으로만 접촉구간이 증가하므로 Truncated wedge 형태의 스프링보다 convex 형태의 스프링에서의 마멸량이 많았다. 따라서 핵연료봉의 마멸을 줄이기 위해 접촉 트랙션이 작고 접촉력이 증가하더라도 접촉면적의 증가가 상대적으로 적은 스프링/딤플 형상의 개발이 필요하다.
3. 스프링/딤플의 기하학적 형상에 의해 마멸입자 이탈의 용이성이 변한다. 즉 건전한 지지조건 하에서 마멸입자의 이탈을 방해하는 형상의 스프링/딤플이 우수한 마멸저항성을 가진다. 간격이 존재하게 됨에 따라 스프링/딤플의 기하학적 형상에 따른 마멸입자 이탈의 용이성이 마멸에 미치는 영향은 줄어든다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. **김형규 외** 4**인**, **한국윤활학회** 2001 **추계학술대회 논문집** 245-251.

2. **김형규 외** 4**인**, **한국원자력학회** 2002 **춘계학술대회 논문집**.

3. **김형규 외** 4**인**, Program “WEARVOL”, 2001-01-12-7083.

4. Hyung-Kyu Kim, Heung-Seok Kang and Kee-Nam Song, KSTLE International Journal, Vol.2, No. 2, 2001, 89-92.