2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료봉/지지격자 스프링의 접촉형상에 따른 마멸입자 거동

Wear Debris Behaviour corresponding to the Contact Shape between Fuel Rod and Grid Spring

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

김용환, 전경락
한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

지지격자 스프링과 피복관의 접촉부 형상에 영향을 받는 마멸 입자의 거동을 실험적으로 분석하였다. 세 가지의 서로 다른 접촉 형상을 갖는 스프링을 피복관 시편에 접촉시켜 상온 공기 중의 미끄럼 마멸시험을 수행하였으며 이때 실험 조건으로는 10, 30 N 의 접촉 하중과 10 ~ 100 μm 의 미끄럼 변위를 가하였다. 미끄럼 반복수가 10^5 사이클이 되었을 때 피복관 시편에 발생한 마멸 형상을 관찰하고 마멸 길이를 측정하였다. 결과로서 접촉부가 볼록한 스프링에 의한 incomplete contact 상태일 때 접촉 하중과 미끄럼 변위의 증가에 따른 마멸 길이의 증가가 현저하였으며, 이것을 접촉부로부터 생성된 마멸 입자의 방출 거동 중 나타나는 연마마멸로서 설명하였다. 한편 접촉부 형상은 마멸 입자의 방출 거동에 영향을 주며 따라서 프레팅마멸 기구의 일부인 연마마멸의 거동에도 영향을 미치게 된다. 한편 본 연구에서의 다점 지지 스프링에 대한 마멸실험 결과 접촉 하중에 따라 핵연료봉을 지지하는 주된 위치가 이동하는 것을 발견하였다.

Abstract

Wear debris behaviours were experimentally analyzed which was affected by the contact shape between the cladding tubes and grid springs. The spring specimens of three different contact shapes were experimented in air at room temperature environment. 10 and 30 N were applied for the contact force with the slip ranges of 10 ~ 100 μm. Shape and length of wear scar on the tube specimens were examined when the reciprocating cycle reached 10^5. As results, considerable increase in wear length was found corresponding to the increase of contact force and slip range in the case of incomplete contact induced by convex springs. This was explained as an abrasive wear occurring during debris dispersion. Contact shape affects debris dispersion behaviour so does abrasive wear, that is a part of fretting wear mechanism. Wear by the multi-point contact spring presently used in the experiments showed that the primary supporting location moved depending on the contact force.

1. 서 론

두 물체가 수직 하중을 갖고 접촉하는 상태에서 상대 운동이 발생하면 접촉부에는 마멸 손상이 발생한다. 마멸의 진행은 재료가 접촉면으로부터 마멸입자가 생성되고 계속되는 상대 운동에 의해 접촉면으로부터 이탈하여 방출되는 과정의 반복이다. 따라서 마멸 손상을 줄이는 방안으로 마멸입자의 생성을 억제하거나 마멸입자의 생성-이탈-방출의 사이클을 지연시키는 것을 제안할 수 있다. 마멸입자의 생성은 상대 운동이 있는 접촉 상태에서 발생하는 마찰에너지의 방출로 설명하기도 하며 이는 응착마멸(adhesive wear)인 경우에 많이 도입하는 이론이기도 하다. 이때 에너지의 방출은 접촉 하중과 상대 운동에 의한 접촉부에서의 미끄럼 변위의 곱으로 수식화 할 수 있다. 그러나 접촉 하중이 동일한 경우에도 접촉면 내에서의 접촉 응력 분포가 달라진다면 마찰에너지 방출 개념과 유사하게 마찰에너지밀도 방출을 생각할 수 있으며 접촉면 내에서 방출되는 마찰에너지밀도의 분포에 따라 접촉면 내의 영역별로 마멸의 정도가 달라지게 된다는 것을 생각할 수 있다.

실제로 동일한 접촉 하중이 작용하는 경우, 접촉 형상을 달리 하면 접촉 응력의 분포를 변화시킬 수 있다. 이것은 접촉역학을 응용한 것으로서 본 논문의 주저자에 의해 여러 접촉형상에 대한 분석 결과가 발표된 적이 있다[1-3]. 접촉 응력을 이용한 마찰에너지밀도의 개념은 핵연료봉의 프레팅마멸 연구에 유용하게 적용할 수 있다. 핵연료봉 프레팅마멸에 대한 설계기준은 피복관 두께와 관련한 것이 일반적이다. 그 이유는 원자로 운전 중 핵연료봉 내에 포집되는 방사성 생성기체가 핵연료봉 외부로 유출되는 것을 방지하여야 하는 것이 핵연료봉 프레팅마멸과 관련한 설계기준이 되고, 이때의 유출은 피복관이 천공된 경우에 발생하기 때문이다. 이때 핵연료봉을 지지하는 지지격자 스프링에 의한 접촉력이 동일 하더라도 접촉형상, 즉 스프링과 피복관이 접촉하는 형상에 따라 마멸 깊이가 변할 수 있으며 이것은 마찰에너지밀도의 개념으로부터 유추할 수 있다. 이에 대해 동일한 프레팅 조건에서 지지격자 스프링의 형상에 따라 마멸 현상이 달라지는 결과를 실험적으로 확인하기도 하였다[4].

한편, 프레팅마멸의 기구는 일반적으로 응착마멸로 시작되어 접촉면에서 마멸 입자가 생성되고 생성된 마멸 입자에 의해 연마마멸(abrasive wear)이 진행되며, 최종으로 마멸 입자가 접촉면으로부터 이탈하여 방출된 후 다시 새로운 접촉면에서의 응착마멸이 시작되는 사이클이 반복되는 것으로 알려져 있다. 이때 연마마멸을 저감하기 위해서는 접촉면으로부터 마멸 입자의 방출이 용이하여야 하는 것으로 생각할 수 있으나 이 경우 응착마멸로의 사이클 진행 속도가 빠르게 되어 최종적인 마멸은 오히려 크게 될 수도 있다는 문제점을 생각할 수 있다. 따라서 프레팅마멸 현상에서 연마마멸의 거동은 응착마멸 못지 않게 연구하여야 할 분야이다. 또한 접촉면 상에서의 연마마멸 외에, 접촉 경계에 인접한, 접촉부 바깥쪽에 형성되는 기하학적 형상(틈새)은 마멸 입자의 방출 거동에 또 다른 영향을 미친다. 즉 접촉부 경계에서 마멸 입자가 방출되는 용이성에 따라 앞서 언급한 마멸 과정의 사이클 속도가 영향을 받을 수 있다. 이 용이성은 접촉 형상에 의존하게 되므로 (즉 틈새의 크기로부터 결정되므로) 프레팅마멸의 억제를 위해 접촉 형상을 개선하는 또 다른 이유가 된다.

본 논문은 핵연료봉 프레팅마멸과 관련한 연구의 일부로서 세 가지의 특징적인 접촉부 형상을 갖는 지지격자 스프링을 사용하여 접촉 형상에 따른 마멸 입자의 방출 거동을 실험적으로 분석한 결과이다. 본 논문에서의 주된 관점은 마멸 입자 방출거동에 미치는 접촉부에서의 기하학적 형상에 대한 영향을 고찰한 것이므로 핵연료봉의 프레팅마멸 손상을 포함하여 일반적인 연마마멸 손상분석에도 적용할 수 있다고 사료된다.

2. 시 험

2.1 시편

본 연구의 실험에 사용한 지지격자 스프링 시편과 핵연료봉 피복관 시편의 재질은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 지르코늄계 합금으로 되어 있다. 사용된 재료의 기계적 성질과 화학 성분을 표 1 에 보여 준다. 한편 피복관 시편의 치수로서 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 상용 핵연료봉의 제조에 사용되는 것을 50 mm 의 길이로 절단하여 채취하였다. 본 연구에서 사용한 스프링 시편은 핵연료봉과 접촉하는 부분의 형상이 서로 다른 세 가지 종류를 사용하였으며 각각을 A 형, B 형 및 C 형이라 하였다. A 형은 핵연료봉 표면을 감싸는 구조로 되어 있어 핵연료봉의 축 방향으로는 편평한 형상을 갖고 있으며 축 방향에 수직한 방향으로는 concave 하고, 이에 대해 B 형은 핵연료봉의 축 방향 및 그에 수직한 방향 모두 볼록한 형상을 갖고 있는 스프링이다. 또 C 형은 핵연료봉의 축 방향으로 세 군데의 볼록한 형상을 갖고 있으며 그에 수직한 방향으로는 편평한 형상을 갖고 있는 스프링이다. 사용한 세 가지 종류의 스프링과 핵연료봉과의 접촉부를 나타낸 개략도를 그림 1 에 보여 주고 있다.

표 1. 실험에 사용한 지르코늄계 합금의 기계적 성질과 화학 성분

Mechanical properties (at room temperature)			
Tensile strength	Yield strength (0.2% offset)	Elastic Modulus	Poisson's Ratio
470 MPa	315 MPa	136.6 GPa	0.294

Chemical composition (wt. %)						
Sn	Fe	Cr	O	C	Si	Zr
1.28	0.22	0.12	0.114	0.013	0.010	base

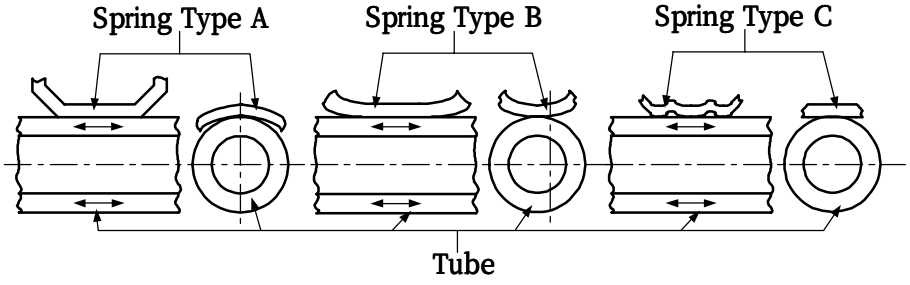

그림 1. 실험에 사용한 지지격자 스프링 및 핵연료봉 시편의 접촉 형상.

A 형 스프링은 핵연료봉과의 접촉 형상이 가능한 한 등각접촉(conformal contact)이 되도록 하여 접촉면적을 증가시킴으로써 접촉하중의 분산이 넓게 되도록 하는 것을 목적으로 한 것이다. 즉 핵연료봉과 지지격자 스프링 사이의 접촉부에서 발생하는 마멸이 접촉부에서의 마찰에너지 방출에 의한 것이라 생각할 때 동일한 접촉력이 작용하더라도 접촉응력을 분산시키면 마멸면적이 넓어지게 되고 이로 인해 국부적인 마멸깊이는 줄어들 것이라 생각하여 고안된 스프링이다. 한편 A 형 스프링에서 핵연료봉 축 방향으로의 접촉부 끝단은 그림 1 에서 보여 주는 것과 같이 절삭가공에서의 모따기(chamfering)와 같은 코이닝(coining) 가공처리를 하였으며 이것은 핵연료봉을 지지격자체 내로 장입할 때 핵연료봉의 표면에 발생될 수 있는 흠(scratch)을 가능한 줄이기 위해 일반적으로 사용하는 가공 공정이다.

B 형은 스프링을 구성하는 판재의 두께가 A 형 또는 C 형에 비해 얇은 판재를 사용하여 전체를 볼록하게 가공한 것이다. 이것은 핵연료봉이 지지격자체 내부로 장입될 때 핵연료봉과의 접촉길이를 상대적으로 길게 하여 접촉응력을 분산시키고자 한 것이다. 즉 A 형은 핵연료봉의 원주방향을 따라 접촉하중이 분산되도록 한 것이며 B 형은 축 방향으로의 분산을 의도한 것이다.

이에 비하여 C 형의 개념은 하나의 스프링에 의한 핵연료봉과의 접촉부 개소를 증대 시킴으로써 접촉하중의 분산을 꾀한 것으로 다점 지지 스프링이라 할 수 있다. 즉, 스프링이 핵연료봉에 의해 눌려질 때 처음에는 중앙의 가장 높은 마루에서 접촉을 시작하고 하중이 증가함에 따라 축방향으로 서로 떨어진 세 군데에서 접촉하도록 되어 있다. 이때 접촉부의 수가 A 형 및 B 형에서 각각 하나인 것에 비해 셋으로 증가함으로 인해 접촉하중이 분산되도록 한 것이다. 결론적으로 지지격자 스프링과의 접촉으로 인한 핵연료봉 프레팅마멸을 저감하기 위해 세 가지 스프링 모두 접촉하중을 분산하는 방법을 사용한 것이나 그 방법이 서로 다른 것이라 요약할 수 있다.

한편, 각 형상의 스프링과 핵연료봉 사이의 축 방향 접촉부 길이는 A 형의 경우 complete contact 에 가까운 접촉형상을 가지므로 스프링의 편평한 부분의 길이와 거의 같을 것으로 예상되었으며 이때 양단의 코이닝 부위를 제외한 평탄부의 길이는 4.1 ± 0.02 mm 이었다. 이에 비해 B 형과 C 형의 경우는 완전한 incomplete contact 의 접촉상태가 되어 접촉하중에 따라 접촉부 길이가 변하게 된다. 따라서 B 형과 C 형의 경우, 접촉부 길이를 미리 예상하기는 힘들며 마멸실험을 진행한 후 시편에 나타난 마멸 흔적을 조사함으로써 접촉부 길이를 추정할 수 있다.

마멸실험을 시작하기 전, 모든 시편은 아세톤으로 세척한 후 건조시켜 사용하였다. 한편 실험 후 마멸의 정량적 분석을 위해 실험을 시작하기 전 시편의 표면 거칠기를 측정하였으며 그 결과, 핵연료봉 피복관 시편의 평균 거칠기(*Ra*)는 0.76 μm, 스프링 시편은 0.67 μm 이었다.

2.2 프레팅마멸 실험장치

본 연구에 사용한 프레팅마멸 실험기의 개략을 그림 2 에 보여 준다. 이 마멸실험기는 핵연료봉 피복관 시편과 지지격자 스프링/또는 딤플 시편을 접촉시킨 후 접촉부에 상대 미끄럼이 발생토록 하는 미끄럼마멸 실험기이다. 사용한 장비에 대한 구조 및 실험방법에 대한 상세한 내용은 이미 발표되었으므로[5] 본 논문에서는 생략하였다.

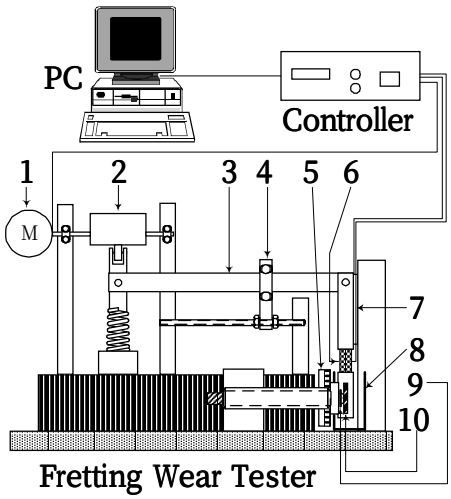

그림 2. 미끄럼마멸 실험기 개략도; 1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Hinge, 5: Rotating Device, 6: Biaxial Loadcell, 7: LVDT, 8: Water Tank, 9: Stationary Specimen (Spring), 10: Oscillatory Specimen (Tube).

2.3 실험 방법

본 연구에서의 프레팅마멸 실험은 상온, 공기 중에서 수행하였다. 이때 스프링과 피복관 시편 사이의 미끄럼 변위 범위(진폭의 두 배)를 10, 30, 50, 80, 100, μm 으로 하였으며 각각의 범위에 대해 10, 30 N 의 접촉 수직력이 작용하는 경우에 대해 실험하였다. 시편 사이의 상대 미끄럼 방향은 핵연료봉의 축 방향으로 하였다. 상대 운동의 반복 주파수는 30 Hz 로 하였으며 각 실험 종료 시의 미끄럼 반복횟수는 100,000 회로 고정하여 접촉 형상의 차이에 의한 상대적 비교를 할 수 있도록 하였다.

각각의 실험이 끝난 후 100,000 회 중에 기록된 실험변수(접촉 수직력, 접촉 전단력 및 미끄럼 변위)를 도시하여 분석하였다. 피복관 시편의 표면에 발생한 마멸 흔적을 측정 현미경을 이용하여 전체적인 외부 형상 및 치수를 측정하고, 표면 거칠기 측정장비에서 마멸부의 깊이를 측정하였다. 표면 거칠기 측정장비에서 생성되는 마멸부의 3 차원 데이터로부터 마멸 부피를 계산하였으며 이 때, 개발된 마멸부피 계산 프로그램[6]을 이용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마멸부 관찰

각 시험조건에서 피복관 표면에 발생한 마멸면을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며 각 스프링의 형상 특징에 따라 마멸면 형상이 달라지게 됨을 발견하였다. 이때 특징적인 마멸형상을 정리하여 그림 3 에 나타내었다. 그림 3 에서 볼 때, A 형 스프링에 의한 마멸시험에서는 10 N-50 μm 과 30 N-80 μm 이하의 접촉 수직하중과 미끄럼 변위에서는 접촉부의 양 끝에서 마멸이 관찰되어 마멸면이 분리되어 있는 특징을 보였으며 이 조건 보다 큰 경우일 때에는(10 N 일 때 80 및 100 μm, 30 N 일 때 100 μm) 전체 접촉면에서 마멸이 발생하였다. 그리고 마멸면의 양 끝 사이의 거리는 거의 변화가 없는 것으로 관찰되었다.

Type	10 N-50 μm	10 N-80 μm	30 N-80 μm	30 N-100 μm
A				
B				
C				

그림 3. 각 형상의 스프링에 의한 피복관 표면에서의 마멸 형상 (마멸 길이는 표 2 참조, 가로 세로의 비는 유지되어 있음).

그러나 B 형 스프링에 의해서는 A 형 스프링에서 볼 수 있었던 분리된 마멸 형상을 관찰할 수 없었으며 전체 접촉면에서 미끄럼이 발생하였다. 단, 접촉 하중이 클수록, 또 동일 하중에서는 미끄럼 변위가 클수록 마멸 길이가 길어지는 것을 알 수 있었는데 하중의 증가에 따라 마멸 길이가 증가하는 것은 앞서 언급한 것과 같은 incomplete contact 에서의 특징적인 현상이나 미끄럼 변위의 증가에 따라 마멸 길이가 현저히 증가한 것은 매우 흥미로운 결과이다. 이에 대해 본 연구에서는 마멸입자의 거동을 고려하게 되었으며 3.3 절에서 상세히 고찰하였다.

한편 C 형 스프링을 이용한 시험 결과로 얻은 피복관 표면에서의 마멸 형상은 하중 및 미끄럼 변위의 영향이 복합적으로 나타난 것으로 생각되었다. 즉, 접촉 하중이 10 N 일 때에는 스프링 중앙부의 가장 높은 마루에서만 피복관과 접촉하고 있음을 알 수 있으며 30 N 으로 증가할 때 양 옆의 마루에서도 접촉이 발생하여 피복관과 스프링이 축 방향으로 세 군데의 접촉부가 존재하게 되는 것을 알 수 있다. 또한 한 군데에서만 접촉하는 10 N 의 경우에는 미끄럼 변위의 증가에 따라 마멸 길이와 폭이 모두 증가하였으며 세 군데에서 접촉하는 30 N 의 조건에서는 이러한 현상이 중

앙 마멸부 보다 양 쪽의 마루부분에서 발생한 마멸에서 더욱 뚜렷이 나타났다. 접촉 하중이 증가함에 따라 마멸부의 개수가 증가하는 것은 그림 1 에서 나타낸 스프링의 구조에서 예상할 수 있었던 것이다. 그러나 접촉 하중과 접촉부의 개수에 대한 상관 관계를 분명히 이해하기 위해서는 별도의 분석이 필요하게 되었다.

3.2 C 형 스프링에서의 접촉 하중과 접촉부와의 관계 분석

접촉 수직하중에 따라 마멸면 개수가 변하는 C 형 스프링에 대하여 하중에 따른 스프링의 변형거동을 좀 더 상세히 분석하기 위해 스프링의 표면 궤적 측정과 특성시험을 수행하였다. 표면 궤적을 측정하기 위해 본 연구에서는 마멸 깊이 및 부피의 정량화를 위해 마멸부 궤적을 측정하는 기기인 표면 거칠기 측정장비를 이용하였으며 스프링의 하중 대 변위 특성을 얻기 위한 특성시험에는 INSTRON 4505 만능인장 시험기를 이용하였다.

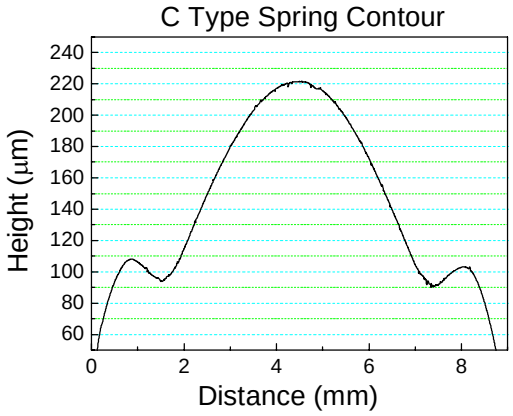

그림 4. C 형 스프링의 표면 궤적.

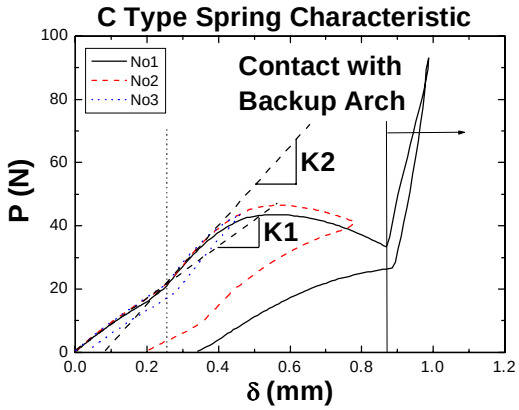

그림 5. C 형 스프링의 특성곡선.

그림 4 에는 C 형 스프링의 표면 궤적을 보여 주고 있으며 그림 5 에는 특성시험 결과를 나타낸다. 그림 4 로부터 스프링 중앙부 마루와 양 옆의 마루와의 높이 차는 약 0.11 mm 임을 알 수 있다. 그러나 그림 5 에서 보면 스프링의 중앙부에 하중이 작용을 시작하고 나서 양 옆의 마루에 하중이 가해지는 시점인 하중-변위 곡선 상의 변곡점(즉 기울기가 K1 에서 K2 로 변하는 점)이 되고 이때의 변위가 약 2.5 mm 임을 알 수 있다. 이 값은 표면 궤적에서 측정된 0.11 mm 와는 많은 차이가 있다. 이로부터 스프링에 가하는 하중이 증가함에 따라 C 형 스프링의 표면 궤적이 상당히 변한다는 것을 알 수 있고 이때의 거동은 매우 복잡할 것으로 예상된다. 한편 그림 5 의 특성 곡선으로부터 접촉 하중 10 N 일 때에는 스프링과 피복관 사이에 한 군데의 접촉이 발생하며 30 N 일 때에는 세 군데의 접촉이 발생하게 됨을 명백히 알 수 있다.

3.3 마멸부의 정량적 분석 및 마멸입자 거동

그림 3 에서 보여 주는 마멸면의 치수로서 마멸 길이를 치수 측정장치가 부착된 광학 현미경으로 조사하였으며 그 결과를 표 2 에 나타내고 있다. 우선 하중의 증가에 따라 접촉부의 개수에 변

화가 없는 A 형 및 B 형 스프링에 의한 결과를 서로 비교하면 A 형 스프링의 경우, 마멸부의 길이는 하중이나 미끄럼 변위의 변화에 따라 거의 변화가 없으며 스프링의 평탄부 길이(4.1 ± 0.02 mm)와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 10 N 인 경우 50 μm 에서 80 μm 으로 30 μm 의 미끄럼 변위가 증가할 때 마멸 길이의 증가는 0.03 mm 가 증가하여 마멸 길이 증가율이 0.7%(= (4.24-4.21)/4.21X100)에 불과 하였고, 30 N 에서는 80 μm 으로부터 100 μm 으로 20 μm 증가할 때 마멸 길이가 0.09 mm 증가하여 마멸 길이 증가율이 2.1%이었다.

그러나 B 형 스프링의 경우에는 동일한 미끄럼 변위(즉 80 μm)를 가한 경우를 고려할 때 하중이 10 N 에서 30 N 으로 증가함에 따라 마멸 길이가 2 배 이상 증가하였다. 이것은 앞서 언급한 대로 incomplete contact 의 전형적인 현상으로 이해할 수 있다. 그러나 동일한 접촉 하중에서 미끄럼 변위의 증가에 따른 마멸 길이의 증가는 미끄럼 변위 값의 증가량에 비해 상당히 많이 증가한 것을 알 수 있다. 즉, 10 N 일 때 30 μm 의 미끄럼 변위 증가가 있었을 때 마멸 길이의 증가는 1.00 mm 이었고 30 N 일 때에는 1.80 mm 가 증가함으로써 미끄럼 변위의 증가량보다 33 배 ~ 60 배가 증가하였다. 미끄럼 변위의 증가에 따른 마멸 길이 증가율을 생각할 때 10 N 에서는 30.7%, 30 N 일 때에는 18.7%가 된다. 이러한 증가량은 단순히 미끄럼 변위의 크기가 증가한 이유만으로 설명할 수 없으며 스프링과 피복관 사이의 접촉에서 생성된 마멸입자의 거동에 대한 설명이 필요하다.

표 2. 마멸부의 길이 (그림 3 참조)

Condition / Spring	10 N -50 μm	10 N -80 μm	30 N -80 μm	30 N -100 μm
Type A	4.21 mm	4.24 mm	4.24 mm	4.33 mm
Type B	3.26 mm	4.26 mm	9.61 mm	11.41 mm
Type C	1.27 mm	1.91 mm	0.91/1.41/0.93* mm	1.06/1.42/0.96* mm

* 그림 3 에서 상부/중앙/하부 마멸의 길이

그림 1 을 살펴 보면 A 형 및 B 형 스프링이 피복관과 접촉할 때 접촉부 끝단에 형성되는 틈새는 A 형의 경우 코이닝되어 있어 피복관과의 사이가 상대적으로 넓으나 B 형에서는 매우 좁은 틈이 형성되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서의 프레팅마멸 실험에서 피복관과 스프링의 상대 운동 방향은 피복관의 축 방향으로서 접촉면에서 생성된 마멸입자는 주로 피복관의 축 방향(연직 상하 방향)으로 이탈할 것으로 예상할 수 있다. 이때 접촉부 끝단에서의 틈새가 좁으면 마멸입자가 쉽게 이탈하지 못하고 틈새에 잔류할 가능성이 높다. 이 경우, 마멸입자에 의한 연마마멸이 진행되게 되며 따라서 마멸부의 길이가 길어지게 된다고 생각된다. 이와 같은 이유로 접촉부 끝단에 코이닝 가공되어 틈새가 넓은 A 형 스프링의 경우에는 마멸입자의 이탈이 용이하여 접촉부 길이의 증가가 거의 없었다고 생각된다.

한편 이러한 현상은 접촉부의 폭 방향으로는 반대로 나타나게 되는 데 A 형에서는 피복관을 감싸는 형상이 되어 마멸입자의 이탈이 용이하지 못하나 B 형에서는 두개의 원통형이 접촉하는 형상이 되어 상대적으로 마멸입자의 이탈이 쉽다. 이로 인하여 폭 방향으로의 마멸면 크기는 미끄

럼 변위가 증가함에 따라 A 형에서는 현저히 증가하지만 B 형에서는 거의 증가하지 않게 되는 것으로 생각된다.

한편 C 형에서는 피복관의 축 방향을 따라서는 B 형 스프링과 같은 접촉 형상(convex)을 가지며 축 방향에 수직한 방향(마멸 폭 방향)으로는 피복관의 원통 형상과 스프링의 편평한 면이 접촉하는 상태가 되어 마멸 입자의 이탈 용이성 관점에서 A 형과 B 형의 중간에 해당한다. 또 C 형에서는 접촉 하중의 크기에 따라 마멸부의 개수가 변하므로 10 N, 30 N 각각에 대한 분석을 수행하였다. 표 2 에서 알 수 있듯이 10 N 의 하중이 가해졌을 때 미끄럼 변위가 50 μm 에서 80 μm 으로 증가함에 따라 마멸부의 길이가 0.64 mm 증가하였으며 따라서 마멸 길이 증가율은 50.4%로 계산된다. 한편 30 N 의 접촉 하중이 가해졌을 때 미끄럼 변위가 80 μm 에서 100 μm 으로 증가함에 따라 나타나는 세 군데의 마멸부의 길이 증가는 상부 마멸에서 0.15 mm(증가율 16.5%), 중앙 마멸은 0.01 mm(증가율 0.7%) 그리고 하부 마멸에서는 0.03 mm(증가율 3.2%)를 나타내었으며 이를 합산하여 전체 마멸에 대해 고려하면 마멸 길이의 증가가 0.19 mm 에 증가율이 5.8%로 계산된다. 이상을 종합하여 각 스프링 형상에 대한 마멸 길이 증가율을 요약하면 표 3 으로 정리할 수 있다.

표 3. 마멸부의 길이 증가량 및 증가율 (표 2 참조)

Condition / Spring	10 N; 50 μm → 80 μm		30 N; 80 μm → 100 μm	
	Wear Length Increase	Increase Rate	Wear Length Increase	Increase Rate
Type A	0.03 mm	0.7%	0.09 mm	2.1%
Type B	1.00 mm	30.7%	1.80 mm	18.7%
Type C	0.64 mm	50.4%	0.15/0.01/0.03* mm, Total 0.19 mm	16.5/0.7/3.2*%, Total 5.8%

* 그림 3 에서 상부/중앙/하부 마멸의 길이

3.4 연마마멸 거동 및 C 형 스프링의 핵연료봉 지지부 고찰

표 3 에서 특별히 관심을 가질 수 있는 결과는 A 형에 비해 상대적으로 유사한 접촉 형상을 갖고 있는 B 형과 C 형 스프링 상호 간의 비교를 통해 얻을 수 있다. 동이ㅏㄹ 하중에서 미끄럼 변위의 증가에 따른 마멸 길이의 증가를 피복관과 스프링의 접촉부 끝단에 형성되는 틈새에 마멸 입자가 집적되어 연마마멸이 발생하는 것으로 생각할 때, 접촉 하중이 10 N 일 때에는 B 형에 비해 핵연료봉과 C 형 스프링의 틈새가 더 좁게 형성되며 30 N 이 되면 그 반대가 되었다고 생각된다. C 형 스프링에서 하중의 증가에 따른 형상의 변화는 매우 복잡할 것이므로 이러한 사항은 유한요소 해석 등을 이용하여 확인해 볼 수 있는 사항이다. 한편, 10 N 의 하중에서 접촉되었던 중앙 마루의 위치에서 30 N 의 경우에는 오히려 10 N 에서 보다 마멸 길이가 짧고 마멸 길이 증가가 거의 없다는 것(증가율이 0.7%이므로)으로부터 접촉 하중 증가에 따라 피복관을 주로 지지하는 기능은 스프링의 중앙부로부터 양 옆의 마루로 이동하게 된다는 것을 예상할 수 있다. 이러한 현상을 좀 더 명백히 확인하기 위해 마멸부의 깊이와 부피를 분석하였다.

그림 6 과 7 에는 30 N-80 μm 및 30 N-100 μm 의 조건에서 C 형 스프링에 의해 피복관 시편 표

면에 나타난 마멸의 세 위치에 대해 각각의 마멸 깊이와 부피를 서로 비교하고 있다. 여기서 스프링의 중앙부와의 접촉에 의한 마멸보다 양 옆의 마루 부위와의 접촉에 의한 마멸 깊이와 부피가 더 큰 것을 확인할 수 있으며 따라서 C 형 스프링의 경우 하중이 증가함에 따라 핵연료봉을 지지하는 기능이 중앙에서 양 옆의 마루 부위로 이동하게 된다는 것이 분명하다. 한편 그림 7 에서 총 마멸 부피를 비교한 결과로부터 미끄럼 변위가 80 μm 에서 100 μm 으로 증가할 때 마멸 부피의 현저한 증가가 발생한 것을 알 수 있어 앞선 연구[7]에서 A 형 및 B 형에서 확인하였던 것과 같이 C 형 스프링에서도 30 N 에서의 임계진폭이 80 μm ~ 100 μm 에 존재한다는 것을 알 수 있었다.

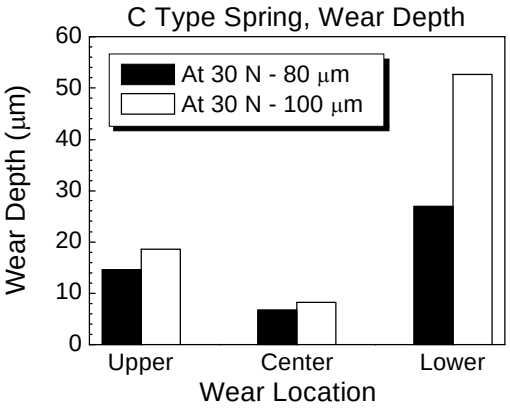

그림 6. C 형 스프링에 의한 30 N-80 μm 실험 결과 각 위치의 마멸깊이.

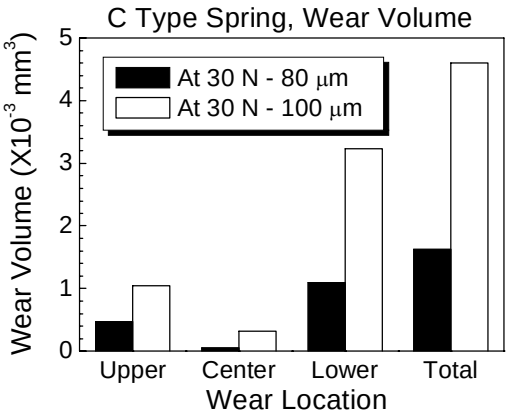

그림 7. C 형 스프링에 의한 30 N-80 μm 실험 결과 각 위치의 마멸부피.

A 형 스프링의 시험 결과에서 볼 수 있었듯이 미끄럼 변위의 증가에 따라 나타난 횡 방향으로의 마멸 영역 확장과, B 형과 C 형 스프링을 이용한 실험에서 볼 수 있었던, 하중에 따른 마멸 증가율 변화는 모두 접촉면에서 생성된 마멸 입자의 이탈 중에 발생하는 연마마멸로 설명할 수 있으며 이로부터 핵연료봉 프레팅마멸의 분석을 위해서는 응착마멸 외에 연마마멸도 고려하여야 한다고 사료된다. 한편 같은 접촉 형상 개념의 B 형과 C 형 스프링에서 관찰된 마멸 거동의 하중 의존성은 하중의 증가에 따라 접촉부의 형상 변형으로부터 발생하는 것이므로 마멸 억제를 위한 지지격자 스프링의 형상 개발 시 접촉 하중에 따른 스프링의 변형 거동을 함께 고려하여야 할 필요가 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 접촉 형상에 따라 핵연료봉의 프레팅마멸 시 마멸 입자의 거동을 시험적으로 분석하여 다름과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 접촉 경계의 바깥 쪽으로 형성되는 틈새가 작으면 마멸부가 접촉면의 크기보다 현저히 크게 나타난다. 즉, 핵연료봉의 원주 방향으로 틈새가 작은 경우에는 마멸 폭이 증가하며 축 방향으로의 틈새가 작은 경우에는 마멸 길이가 증가한다. 이때 마멸 길이 또는 폭의

증가는 틈새에 집적된 마멸 입자에 의해 연마마멸이 발생하는 현상으로 설명할 수 있다. 즉, 접촉면에서의 마멸 입자 방출 거동은 접촉 형상의 영향을 받는다.

2) 응착마멸에서는 접촉면 응력장이 중요 파라미터이며, 접촉 형상은 접촉면 응력장에 영향을 미친다. 본 연구 결과, 연마마멸 역시 접촉 형상에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 프레팅마멸 기구는 응착마멸과 연마마멸의 반복이므로 접촉 형상은 프레팅마멸 억제를 위한 파라미터가 될 수 있다. 즉 지지격자 스프링에서 핵연료봉과 접촉하는 부위의 형상을 개선하는 것은 핵연료봉 프레팅마멸의 억제를 위한 효과적인 방안이 된다.

3) 다점 지지 스프링을 사용할 경우 접촉 하중의 변화에 따라 핵연료봉을 주로 지지하는 위치가 이동할 수 있으며 이것은 본 연구에서 수행한 미끄럼 마멸실험을 통해 확인할 수 있다. 다점 지지 스프링에 의한 핵연료봉 프레팅마멸 거동은 스프링에 하중이 가해질 때의 지지 점 개수 및 지지 위치의 변화 등, 스프링 변형 거동과 밀접한 관련이 있으므로 설계 시에 이를 고려하여야 할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. H.-K. Kim and S.-B. Lee, *Theo. Appl. Fract. Mech*., 36 (2001) 125-139.
2. H.-K. Kim et al., *KSTLE Int. Journal*, 3 (2002) 60-67.
3. H.-K. Kim et al., 대한기계학회 2001 추계학술대회 눈문집, 389-395.
4. H.-K. Kim et al., *Wear*, 250 (2001) 535-543.
5. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집, 논문번호 59.
6. 김형규, 김선재, 한국윤활학회지, 17 (2001) 33-39.
7. H.-K. Kim et al., *The 6th International Tribology Conference* (2002) 725-732.