

핵연료봉 프레팅마멸에서 마멸깊이와 접촉하중 감소사이의 관계

이영호[†] · 김형규

한국원자력연구소

The Relationship between a Wear Depth and a Decrease of the Contacting Force in the Nuclear Fuel Fretting

Young-Ho Lee[†] and Hyung-Kyu Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract – Sliding wear tests have been performed to evaluate the effect of normal load decrease on the wear depth of nuclear fuel rods in room temperature air. The objectives of this study are to quantitatively evaluate the supporting ability of spacer grid springs, to estimate the wear depth by using the contacting force decrease and to compare the wear behavior with increasing test cycles (up to 10^7) at each spring condition. The result showed that the contacting load decrease depends on the spring shape and the applied slip amplitude. The estimated wear depth is smaller when compared with measured wear depth. Based on the test results, the wear mechanism, the role of wear debris layer and the spring shape effect were discussed.

Key words – sliding wear test, contacting force, nuclear fuel fretting, wear depth, spring shape effect.

1. 서 론

경수로형 핵연료집합체(Fuel Assembly)에서 발생하는 프레팅 마멸현상은 원전 가동초기부터 중요한 열화기구로 인식되고 있어, 신규 핵연료집합체의 상용화 단계 전에 내구성 검증을 위한 평가를 반드시 수행하고 있다. 이러한 이유는 원자력발전소 노심의 가동조건 특성상 유체유발진동(Flow-Induced Vibration, FIV)을 완전히 억제할 수 없어 연료봉과 이를 지지하는 스프링/딴플 사이에서 프레팅 마멸손상이 빈번히 발생하기 때문이다. 일반적으로 연료봉의 프레팅 마멸손상을 억제하거나 내마멸성을 향상시키기 위해서 기계적 및 재료학적 등의 다양한 접근방법을 고려할 수 있다. 이 중에서 스프링/딴플의 형상변경에 따른 접촉조건 개선은 다른 방법(표면 코팅, 재질 개선 등)에 비하여 개발 및 적용까지의 상대적인 시간이 매우 짧아 핵연료집합체의 마

멸특성 개선에 우선적으로 적용되고 있다.

현재까지 프레팅 마멸실험을 수행하여 다양한 종류의 스프링 형상에 대한 내마멸성 평가결과로부터 최적의 스프링 형상을 도출하기 위한 연구결과는 기존의 문헌을 참고할 수 있다[1,2]. 기존의 문헌에서 보이고 있는 내마멸성 평가는 일정한 실험조건(하중, 미끄럼변위 및 사이클 등)에서 마멸부피, 마멸면적 및 최대마멸깊이 결과를 이용하여 평가하였다. 그러나 스프링/딴플의 고유 역할은 핵연료집합체 내부에서 길이가 긴 연료봉을 가동조건하에서 일정한 위치에 고정하는 것이다. 여기서, 가동 중 발생하는 핵연료봉의 프레팅 손상을 살펴보면 초기에는 스프링/딴플에 의해 일정한 하중으로 접촉하고 있으나 가동시간이 증가함에 따라 중성자 조사 및 열적 취화에 의해 스프링/딴플의 역할을 상실하게 되어 최종적으로 스프링/딴플과 핵연료봉 사이에 간격이 발생하기도 한다. 이것은 유체유발진동에 의한 마멸조건이 미끄럼 마멸상태에서 충격/미끄럼 마멸로의 천이를 의미한다.

[†]주저자 · 책임저자 : leeyh@kaeri.re.kr

여기서 연료봉과 스프링/덤플사이의 접촉조건을 살펴보면 스프링/덤플의 변형량에 의해 연료봉이 지지되며 변형량은 스프링/덤플의 강성(Stiffness)에 따라 다르다. 만약 노심 초기에 접촉면에서 마멸이 빠르게 발생하게 되면 마멸깊이 증가에 따라 초기 변형량이 감소하게 된다. 이러한 변형량의 감소는 연료봉과 스프링/덤플사이의 접촉하중이 감소하는 결과를 가져오게 되며 과도한 마멸이 발생하게 되면 마멸깊이 증가에 따른 스프링의 변형량도 소멸되어 중성자 조사나 열적 열화현상 없이 충격/미끄럼 마멸로 천이될 가능성이 있다. 이것은 스프링/덤플의 고유한 역할인 연료봉 지지력의 상실을 의미하므로 신규 스프링/덤플의 형상을 설계할 때 충분히 고려해야 할 사항으로 판단된다. 이에 따라 본 연구에서는 기존의 두 가지 형상의 스프링을 이용하여 프레팅 마멸동안 변화되는 연료봉 지지력을 평가하였다. 실험과정에서 발생한 접촉하중의 감소를 이용하여 스프링의 변형량 감소를 추정하였고 이것을 이용하여 마멸깊이를 예측하여 실제 결과와 비교하였다.

2. 실험 과정

2-1. 시편

Fig. 1에 본 실험에 사용된 스프링과 연료봉 사이의 접촉조건을 나타내었다. 스프링 A는 오목한 형상을 가지고 있어 연료봉을 원주방향으로 감싸는 면접촉 조건을 가지며 스프링의 지지부가 연료봉의 횡방향으로 배열되어 있다. 이에 반해 스프링 B는 볼록한 형상을 가지고 있어 연료봉과 접촉할 때 축방향으로 선접촉을 이루고 스프링의 지지부가 연료봉의 축방향에 배열된 특징을 갖고 있다. 스프링 및 연료봉 시편의 재질은 지르코늄합금으로 상용 핵연료집합체 부품으로 널리 사용되는 것이다. 실험을 수행하기 전 스프링의 기계적 특성을 파악하기 위해 하중-변위곡선을 마멸시험 전에 산출하였다.

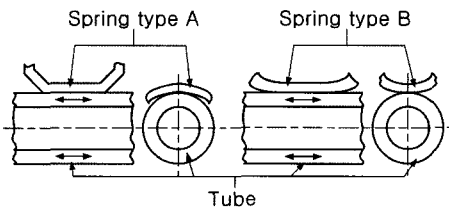


Fig. 1. Schematic view of the spring shape and contact condition with fuel rod specimen.

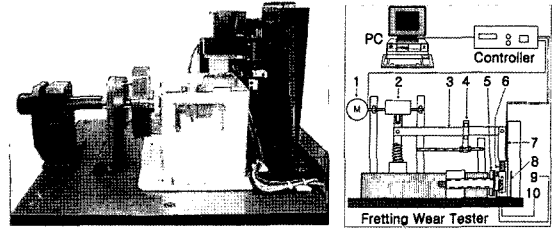


Fig. 2. Schematic view of fretting wear tester for room temperature air and water condition.

2-2. 마멸시험 및 결과분석

본 실험에 사용된 상온 프레팅 마멸시험기의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 연료봉 시편은 축방향으로 왕복운동하는 치구에 부착하였고 수평방향에 스프링 시편을 장착하였다. 연료봉에 접촉하는 스프링이 프레팅 마멸과정동안 감소하는 접촉력을 비교하기 위하여 모든 시험에 10 N의 동일한 수직하중을 적용하였다. 마멸시험은 상온에서 50, 100 μm의 미끄럼 진폭을 적용하여 최대 10⁷ 사이클까지 수행하였다. 실험을 수행한 뒤 표면조도계를 이용하여 마멸부피 및 최대 마멸깊이를 측정하여 마멸결과를 비교하였고 광학현미경을 이용하여 마멸면의 크기와 형상을 분석하였다. 상온 프레팅 마멸시험기와 마멸측정/분석과 관련된 내용은 기존의 문헌을 참고할 수 있다[3,4].

2-3. 마멸깊이 예측

프레팅 마멸시험과정 동안 발생한 접촉하중의 감소는 실험 초기 설정한 하중값과 실험을 완료할 때의 하중값의 차(ΔP)로 나타나며 하중-변위곡선으로부터 스프링의 변형량 감소(Δδ)를 예측할 수 있다. 만약 접촉 형상 등의 마멸 영향인자를 고려하지 않고 동일한 재질을 가지는 연료봉과 스프링에서 동일한 깊이의 마멸이 발생한다고 가정하면 연료봉의 마멸깊이는 1/2·Δδ로 표현할 수 있다. 즉,

$$P = K \cdot \Delta\delta \quad (1)$$

$$D_s = 1/2 \cdot \Delta\delta \quad (2)$$

여기서 K는 스프링 강성(Stiffness), D_s(supposed depth)는 추정된 마멸깊이이다.

3. 실험결과 및 토의

3-1. 하중-변위 곡선

프레팅 마멸실험을 수행하기 전에 두 가지 형상의

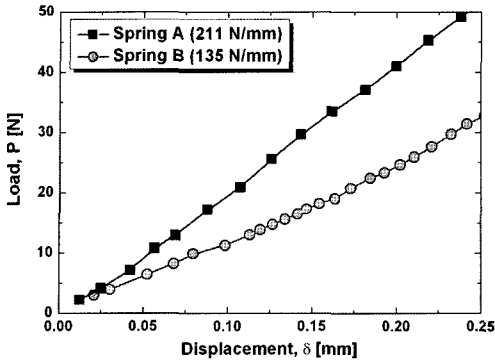


Fig. 3. Results of P- δ curve at spring A and B; Note that spring stiffness of spring A is about 40% larger than that of spring B.

스프링에 대한 하중-변위 곡선을 구하였으며 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과 스프링 A의 강성이 스프링 B에 비해 약 40%정도 큰 값을 보이고 있다. 이것은 일정한 하중(여기서는 10 N의 수직하중)하에서 스프링의 변형량이 상대적으로 작다는 것을 의미한다.

스프링 강성은 형상에 크게 의존하며 핵연료 집합체의 지지격자체에서 적절한 스프링력으로 연료봉을 지지하도록 강성을 설계하게 된다.

지지격자체의 스프링 강성이 클 경우, 용접공정을 포함하는 지지격자체의 제조 중에 설계상의 스프링의 위치를 유지하지 못할 때에는, 핵연료집합체에 연료봉을 삽입하는 과정에서 각 스프링별 지지력의 분포가 불균일할 가능성이 커진다. 이와는 반대로 스프링 강성이 너무 작을 경우에는 설계상의 접촉력이 작용하지 못할 가능성이 있다. 따라서 핵연료봉을 지지하는 지지격자체 스프링의 강성은 매우 중요한 의미를 가진다.

3-2. 접촉하중의 변화

프레팅 마멸시험과정에서 발생한 접촉하중의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 사이클이 증가함에 따라 접촉하중의 감소는 스프링 A에서 더욱 빠르게 나타났으며 미끄럼 진폭이 클 경우 다소 크게 나타난 것을 알 수 있다. 연료봉과 면접촉을 이루는 형상을 가진 스프링 A는 시험초기부터 두 가지 미끄럼 진폭(50 및 100 μm) 조건 모두에서 급격히 접촉하중이 감소하는 반면 스프링 B는 서서히 감소하는 경향이 명확히 나타났다. 특히 스프링 B의 50 μm 조건에서는 접촉하중의 감소가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 기존의 미끄럼 마멸시험 결과에서 나타난 경향과 매우 유사하다

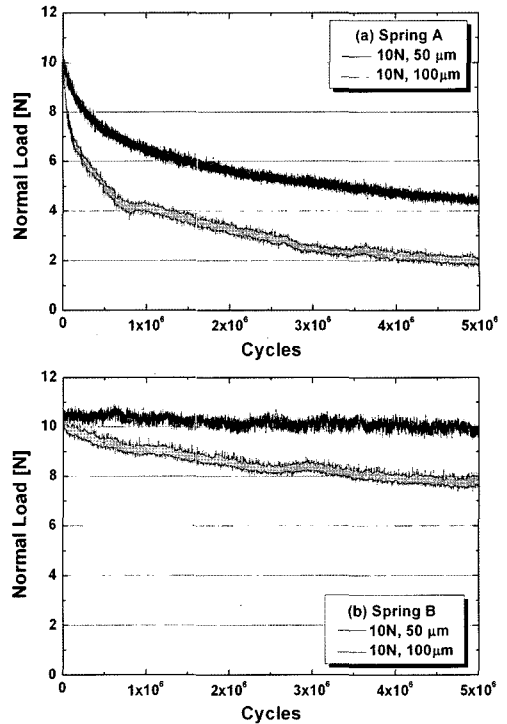


Fig. 4. Variation of contacting loads with increasing fretting cycles.

[2]. 접촉하중의 감소가 거의 발생하지 않은 것으로부터 깊이 방향으로의 마멸진행이 다소 느리게 발생한다는 것을 예상할 수 있다. 결국 마멸이 발생하더라도 깊이 방향보다는 마멸면이 확장되었거나 발생한 마멸입자가 층을 형성함으로써 접촉력의 감소가 진행되지 않는 것으로 생각된다[5]. 이를 확인하기 위하여 마멸부에 대한 기본적인 데이터를 측정하여 비교할 필요가 있다.

3-3. 마멸시험 결과 비교

시험결과로부터, 스프링 A의 경우, 50 μm 조건에서는 0.7149 N/10⁶ cycle, 100 μm 조건에서는 1.091 N/10⁶ cycle의 하중감소속도를 보였다. 반면 스프링 B의 경우, 50 및 100 μm 조건에서 각각 0.1001 및 0.3569 N/10⁶ cycle로 나타났다. 그러나 이 값은 하중감소가 사이클 증가에 따라 선형적으로 감소하는 것을 가정한 것이므로, 초기 급격한 마멸이 10⁶ 사이클까지 발생하는 스프링 A의 경우 이 값보다 더 크게 나타날 수 있으나 사이클이 더욱 증가할 때 위 값에 수렴하는 것으로 생각된다.

Table 1. Comparison of wear test results

Spring	A		B	
Slip Amp. [μm]	50	100	50	100
Vol. [mm^3]	0.095	0.166	0.018	0.112
Depth [μm]	60.8	65.5	25.0	52.8
Area [mm^2]	-	6.62	-	7.63
Esti.D [μm]	16.4	20.5	1.88	20.2

마멸실험을 수행한 후 2차원 표면조도계 및 광학현미경을 이용하여 마멸부피, 최대마멸깊이 및 마멸면적을 구하였다. 또한 상술한 바와 같이 마멸시험결과 나타난 접촉하중의 변화로부터 마멸깊이를 예측하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 그 결과 실제 측정된 최대마멸깊이는 예측값에 비해 매우 큰 값을 보이고 있다(특히 스프링 A(50 및 100 μm) 및 스프링 B(50 μm)조건에서 매우 큰 차이를 보임). 또한 스프링 A의 경우 미끄럼 진폭이 클수록 두 값 사이의 편차가 증가하였고 연료봉에서만 마멸이 발생한다고 가정할 때에도 측정결과 나타난 값이 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 스프링 형상에 따라 접촉면에서의 마멸기구가 서로 상이함을 의미하며 이를 확인하기 위해서는 보다 자세한 결과해석이 필요하다.

3-4. 마멸시험 결과 비교

Fig. 5에 마멸면에 대한 광학현미경 관찰결과를 나

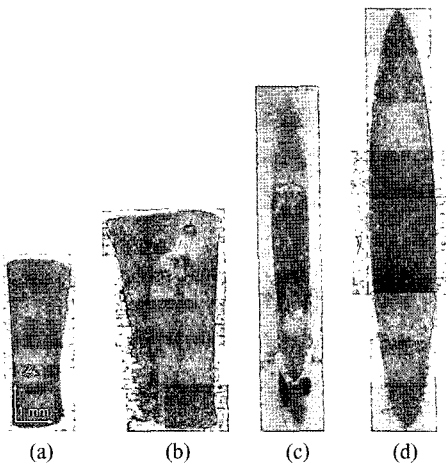


Fig. 5. OM results after wear tests (the same magnification); (a) spring A at 50 μm , (b) spring A at 100 μm , (c) spring B at 50 μm , (d) spring B at 100 μm .

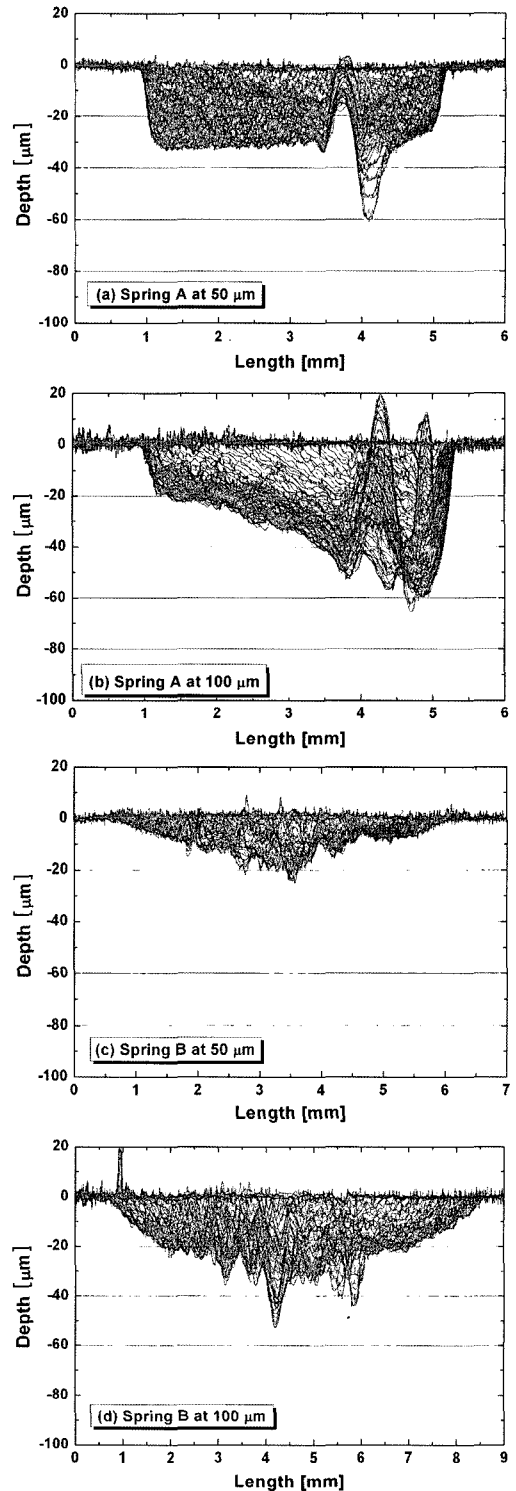


Fig. 6. Measurement results of 2-D surface profile of worn surface.

타내었다. 두 스프링 조건 모두 접촉면에서 마멸과정 중 생성된 입자가 잔류하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 스프링 A조건에서는 두 가지 특징적인 현상이 관찰되었는데, 첫째로 미세한 마멸입자로 구성된 마멸 입자층이 잘 발달된 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 6에 나타난 마멸부의 궤적으로부터 이러한 마멸입자층이 기존의 연료봉 표면보다 오히려 더 높게 올라간 것으로부터 확인할 수 있다. 두 번째로 돌출부의 위치는 접촉부의 중심보다 아래쪽에서 집중되는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 스프링 A조건에서는 마멸입자에 의한 third-body abrasion의 발생이 가능한 것으로 생각된다. 한편 마멸과정에서 발생한 마멸입자는 자중에 의해 아래로 떨어지는 과정에서 접촉면내부에 잔류하게 되어 마멸 입자층을 형성하게 된다. 이때 마멸입자층에 의한 돌출부가 see-saw운동의 중심으로 작용하게 되어 최대마멸깊이가 스프링과 접촉하는 연료봉의 아래쪽에서 발생하게 되어 최대마멸깊이가 예측된 값에 비해 매우 크게 나타난 것으로 생각할 수 있었다.

반면 스프링 B의 경우, 상대적으로 낮은 스프링 강

성에 따라 스프링의 변형량이 크고 이에 따라 접촉면적이 증가하며 마멸과정 동안 접촉하중의 감소가 상대적으로 작고 접촉부 중심에서의 상대적인 접촉응력이 크게 작용하기 때문에 생성된 마멸입자가 자중에 의해서도 크게 위치변화를 일으키지 않는 것으로 보인다. 또한 Fig. 7에 나타난 마찰계수(여기서는 수직하중에 대한 전단하중 변화량의 비, $\mu = \Delta L_s / 2 \cdot L_n$ 로 정의함)의 변화로부터 스프링 B조건에서 매우 안정된 마찰계수가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 안정화된 마찰계수는 시험 초기부터 접촉면에서의 마멸입자층 형성이 용이한 것을 의미하며 결국 연료봉이 깊이방향으로 마멸이 발생하더라도 마멸입자에 의해 접촉하중 감소가 매우 느리게 발생한 것으로 보인다. 결국 깊이방향으로의 마멸은 상대적으로 작게 발생하고 접촉부 중심에서 마멸입자층이 우세하게 나타나며 스프링 형상이 블록하기 때문에 스프링 A와는 달리 see-saw운동이 발생하더라도 third-body abrasion에 의한 과도한 마멸은 발생하지 않는 것으로 생각된다.

4. 결 론

두 가지 스프링 형상에 따른 연료봉 지지력을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 사이클 증가에 따른 접촉하중의 감소를 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사이클이 증가함에 따라 스프링 A조건에서 접촉하중이 매우 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 50 μm 의 미끄럼진폭에서 스프링 B조건은 접촉하중의 변화가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.

(2) 연료봉 지지력의 관점에서 볼 때 형상이 블록하고 스프링 강성이 상대적으로 작은 스프링 B조건이 초기 과도 마멸조건에서도 연료봉을 잘 지지할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 스프링 A에서 예측된 마멸깊이에 비해 크게 나타난 최대마멸깊이의 원인은 자중에 의해 아래쪽에 형성된 마멸입자층의 돌출부가 see-saw운동의 중심으로 작용하여 과도한 마멸이 발생한 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

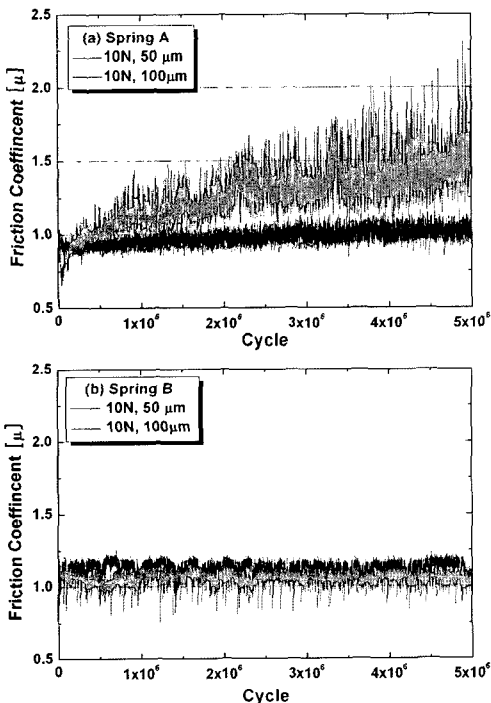


Fig. 7. Measurement results of 2-D surface profile of worn surface.

참고 문헌

1. 이영호 외, “접촉하중과 마멸면적을 고려한 스프링으로 지지된 튜브의 마멸경향 평가,” 2005년도 춘계 윤활학회 논문집, 2005.
2. Y.-H. Lee and H.-K. Kim, “Comparison of a supporting ability of spacer grid springs under fretting wear condition in room temperature air,” Proc. of KNS Autumn Conference, 2005.
3. 김형규 외, “핵연료봉 프레팅 마멸시험기 개발,” 2001년도 한국윤활학회 추계윤활대회 논문집, 2001.
4. 이영호 외, “마멸손상 평가의 신뢰도 제고를 위한 측정 자동화 및 분석방법 개선,” KAERI/TR-2479/2003, 2003.
5. Y.-H. Lee, H.-K. Kim *et al.*, “A study on wear mechanism of tube fretting affected by support shapes,” Proceedings of KSTLE 2002 Autumn Conference, 2002.