

고온고압수중에서 접촉형상에 따른 마멸거동 분석

송주선¹, 김형규¹, 이영호¹(한국원자력연구소), 김재훈²(충남대학교 기계설계공학과)

Analysis of Wear Behaviour Corresponding to Contact Shape in High Temperature and High Pressure Environment

¹Ju-Sun Song*, ¹Hyung-Kyu Kim, ¹Young-Ho Lee(Korea Atomic Energy Research Institute) bruce95@cnu.ac.kr, ²Jae-Hoon Kim(Mech. Design. Eng. Dept., Chungnam Univ.) Kimjhoon@cnu.ac.kr

ABSTRACT

In this paper, fretting wear tests were conducted in air at room temperature (RT) and in water at high temperature and high pressure (HTHP) environment to analyze the wear characteristic. As for the supporting condition between the tube and spring/dimple, the gap of 0.2 mm in air at RT and the normal force of 10 N and the slip of 50 μ m in water at HTHP were applied. Four different shapes of spring/dimple specimen (type A, B, C, D) were used. Detail examination of wear scar was also performed using SEM micrographs. As a result, in the case of the spring of truncated wedge, severer wear occurs than the others. Protrusion part was found and larger in air at RT. It is thought that the difference in the wear volume and the protrusion is caused by the different wear mechanism corresponding to the different environment.

Key Words: SEM micrographs, Protrusion, Wear mechanism

1. 서론

프레팅 마멸은 구조물의 작동시 두 접촉면 사이의 미세한 진동에 의해 발생하는 것으로서, 이러한 손상은 접촉하는 물체의 접촉하중, 상대 미끄럼 변위, 접촉형상 등 주변 분위기와 같은 여러 인자의 영향을 받는다. 그런데 이들 인자는 상호 연계되어 있는 경우가 많은데 예를 들면 접촉하중이 큰 경우에는 미끄럼 변위가 작아지며 동일한 접촉 수직하중에서도 접촉형상에 따라 접촉면에서 전단하중의 크기가 달라져 마멸이 발생하는 형태와 영역이 달라지기도 한다. 또한 접촉부 주위의 온도가 상승하면 재료 상수의 변화도 고려할 수 있을 뿐 아니라 재료의 열 변형(소성변형)으로 인해 마멸 기구가 변화하기도 한다.

이러한 환경적인 요인을 고려해야 할 필요가 있는 마멸분석의 예로 원자력 발전소에서 원자로 내부의 핵연료 피복관과 스프링 또는 딴플 시편으로 이루어진 지지격자

체 사이에서 발생하는 프레팅 마멸을 들 수 있다. 핵연료 프레팅 마멸 손상은 원자로 운전 중 핵연료 주위를 흐르는 냉각수의 유동에 의해 핵연료봉이 진동(유체유발 진동)을 할 때에 핵연료봉과 핵연료봉을 지지하는 지지격자 스프링(또는 딴플)의 접촉부에 발생하게 된다. 이때 마멸로 인하여 핵연료봉이 천공될 경우, 핵연료봉 내부의 방사성 기체가 원자로 내부로 유출되는 사고가 발생하므로 원자력 발전의 안정성과 경제성을 생각할 때 핵연료 손상 중 매우 중요하게 고려하여야 하는 사항이다. 따라서 핵연료 프레팅 마멸은 손상저감 핵연료개발을 위해 세계적으로 많은 관심을 두고 있는 연구분야이다.

본 연구는 주위 환경의 변화에 따른 핵연료 프레팅 마멸기구의 차이와 현상을 파악하기 위해 상온과 고온에서 서로 다른 접촉형상을 가지는 네 종류의 스프링/딴플



Fig. 1 Schematic diagram of HTHP wear tester.

Table 1. Characteristics for each specimen

	축방향	횡방향	접촉끝단 형상
Type A	모따기형	오목형	flat
Type B			round
Type C	볼록형	오목형	3점 접촉
Type D			1점 접촉

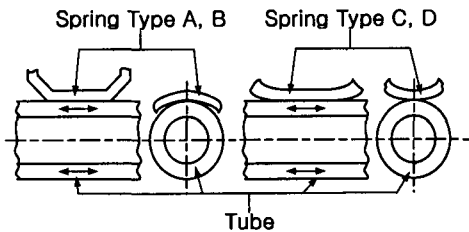


Fig. 2 Contact shape for each spring.

시편을 가지고 실험을 수행한 결과이다. 주된 분석의 대상은 마멸부의 형상과 크기(부피, 최대깊이, 등가마멸깊이(De))이며 특히 마멸면에서의 입자거동과 마멸기구의 분석을 위해 주사형 전자현미경(SEM)에 의한

관찰 결과를 토의하였다.

2. 실험

2.1 시험기

본 연구에 사용된 고온고압 프레팅마멸 시험기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 시험기는 압력용기, 시편 치구부, 충격부, 미끄럼부 및 계측부로 구성되어 있다. 시편 배열 상태는 ①부분을 확대한 것과 같다. 고온고압 수중 시험에서는 튜브 시편이 길이방향으로 직선 왕복 운동하며 여기에 스프링 시편이 튜브의 반경 방향으로 직선 왕복 운동하는 형태이다.

한편 본 논문에서의 상온 시험에 사용된 시험기는 회전속도를 가변할 수 있는 서보모터와 편심 원통, 링트 및 지렛대기구를 이용하여 진동수, 진동변위를 조절하고 시편 사이의 접촉력 및 간격 등을 변화시킬 수 있도록 설계되었으며 중앙봉을 상하방향으로 가진함으로써 튜브가 시이소오 운동을 하는 특징이 있다. 각각의 시험기에 대한 상세한 설명은 참고문헌[1,2]에 기술되어 있다.

2.2 시편

본 실험에 사용된 스프링/덤플 시편의 특징을 Table 1에 정리하였다. 상온, 고온 실험에서 사용된 튜브시편의 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm이다. 단, 상온 시험의 경우 마멸이 발생하는 튜브시편에 미끄럼 변위가 발생할 수 있도록 하는 중앙봉(center rod)의 길이는 467 mm이며 양 끝에 마멸부를 위한 앞의 튜브 시편(길이 55 mm)을 설치하고 다시 그 바깥쪽에 실제 핵연료봉의 무게와 유사하게 하기 위해 추를 설치하였다.

튜브와 스프링 시편은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 핵연료봉 피복관과 지지격자체로부터 절취한 것으로 지르코늄계 합금이다. 한편 프레팅 튜브시편과 스프링/덤플 시편과의 접촉형상은 Fig. 2와 같이 type A 및 B의 경우 스프링 부분에서 횡방향으로는 오목하고 축방향으로는 모따기 형상인데 반해 type C 및 D의 경우는 축방향과 횡방향에서 모두 볼록한 형상을 하고 있다.

2.3 실험 방법

실험은 상온 공기중과 고온고압 수중 상태에서 수행하였으며 이때 상온 실험인 경우에는 튜브집합체 시편의 중앙(즉, 중앙부의 중앙)을 시험기의 구동장치에 연결하여 상하방향의 변위범위를 0.7 mm 로 하고 접촉조건으로 0.2 mm 의 간격을 주어 30 Hz 로 가진하였으며 후자인 경우는 50 μ m 의 미끄럼을 주고 10 N 의 수직하중을 반복적으로 가했다. 실험은 각각 두 번씩 반복 수행되었다.

각각의 스프링/딴플 시편에 대한 마멸형상을 관찰하기 위해 광학 현미경을 이용해 마멸면을 촬영하고 또한 SURFTTEST SV-600 장비를 이용해 마멸궤적을 취득하였다. 마지막으로 마멸량과 마멸깊이를 측정 한 후 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 마멸면을 상세히 관찰 하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 각 시편(Spring)에 대한 마멸형상

Table 1 은 상온과 고온고압 상태에서 실험하여 취득된 마멸면의 형상을 나타낸다. 여기서 RT 는 상온, HTHP 는 고온고압조건을 의미하며 각 마멸형상 밑의 x 와 y 는 각각 마멸의 가로 및 세로 방향 최대치수를 나타낸 것이다.

Fig. 2 와 2.2 절에서 언급한 바와같이 스프링 부분에서 횡방향으로는 오목하고 축방향으로는 모따기 형상인 type A 및 type B 에서 발생한 마멸형상은 양끝에서 삼각형 형상의 마멸이 나타나며 내부로 확장되어 세로 방향이 오목한 직사각형 형태(type B, RT) 로 나타나는 것을 알 수 있다. 양 끝단의 삼각형 형태 마멸은 충격 시에 접촉부 끝단의 모따기 형상(wedge 모양)에 의해 ploughing(흙 파기)현상이 발생한 것으로 판단된다. Type C 및 type D 와 같은 경우는 축방향과 종방향에서 접촉부의 형상이 블록하므로 나타나는 마멸형상은 끝이 약간 뾰족한 타원형의 모양이 생긴다.

이로부터 상온과 고온고압 조건에서의 마멸형상을 비교할 때 미끄럼 운동의 형태가 다소 다르더라도 스프링 형상이 같으면

마멸형상이 유사하게 나타남을 알 수 있다.

상온과 고온고압 실험에서 마멸입자들의 집적도를 비교할 때 상온에서는 마멸입자들이 덩어리를 형성해 군데 군데 까맣게 응착되어 있는 반면에 고온고압 조건인 경우 마멸면의 양 끝이 높은 온도에 의해 산화되어 있는 것을 알 수 있고 규칙적인 충격에 의해 부딪힌 접촉면을 제외하면 유동의 흐름에 의해 마멸입자들이 거의 씻겨 제거된 것을 알 수 있다.

3.2 각 시편(Spring)에 의한 마멸궤적

Fig. 3 은 SURFTTEST SV-600 장비를 이용해 stylus 로 마멸부를 측정하였을 때 나타나는 마멸궤적을 보여준다. 마멸깊이에 있어서도 Table 2 의 마멸현상과 같이 상온 실험에서의 마멸궤적이 고온고압실험에서 보다 크게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 공기중 실험인 경우 수중 실험에서 보다 위로 돌출(protrusion)된 부분이 많은 것을

Table 2. Wear scar for each spring specimen

		Spring specimens			
		Type A		Type B	
C o n d i t i o n		HTHP	RT	HTHP	RT
		x: 0.78, y: 4.17	x: 0.75, y: 4.43	x: 0.47, y: 4.54	x: 0.81, y: 4.67
		Type C		Type D	
	HTHP	RT	HTHP	RT	
	x: 0.44, y: 1.17	x: 0.93, y: 2.6	x: 0.3, y: 2.36	x: 0.75, y: 3.0	

*RT: room temperature, HTHP: high pressure high temperature.

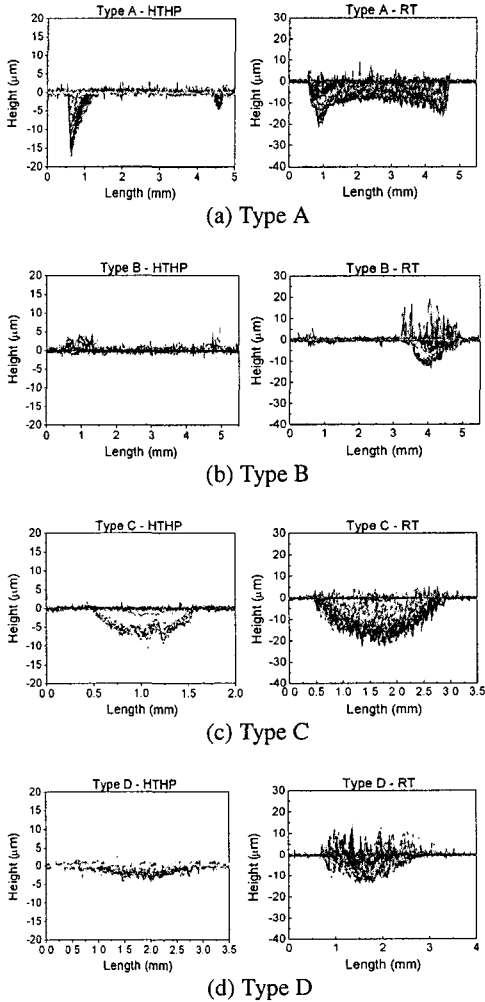


Fig. 3 Wear traces for each spring contact.

발견할 수 있는데 이것은 유동의 흐름에 의해 마멸입자들이 쉽게 이탈하는 수중 실험과는 달리 상온 공기중에서의 실험은 마멸입자들이 부분적으로 마멸면에 쌓여 응착된 결과로 발생하게 되는 것이다.

3.3 각 시편(Spring)에 대한 마멸량 고찰

Fig. 4에 고온고압 실험에 의한 접촉형상에 따른 각 시편의 마멸량(마멸부피, 최대마멸깊이, 등가마멸깊이(D_e))을 나타내었다.

우선 Fig. 5(a)를 보면 type A의 마멸부피가 다른 시편보다 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 틈새조건에서 튜브가 임의대로 진동함에 따라 양 끝단이 코닝 되어있는 시편의 특이한 접촉부 형상(모따기형상)에 의해 ploughing 효과가 발생한 것으로 판단할 수 있다. Fig. 4(b)는 마멸면의 최대 깊이를 나타내는데 Fig. 4(a)의 마멸부피와 유사한 결과를 보여주고 있다. 따라서 마멸부피가 크면 접촉부에 심한 마멸을 일으켜 마멸깊이도 상대적으로 커진다고 판단할 수 있다.

한편, Fig. 4(c)는 마멸부피를 마멸면적으

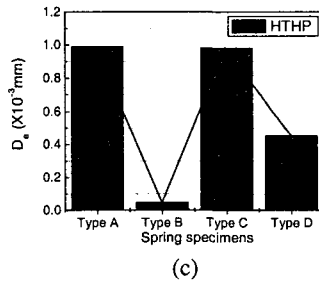
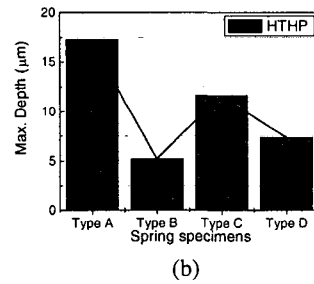
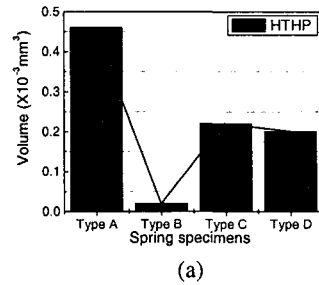


Fig. 4 Wear volume, Max.depth, D_e for each specimen.

로 나눈 것을 De 로 정의한 것이다. 특이한 점은 type C 의 De 값이 다른 시편들보다 현저히 커진 것을 알 수 있다. 스프링 type C 의 경우 튜브와의 불룩한 접촉 형상에 의해 마멸이 국부적으로 심하게 발생하게 되고 이에 따라 마멸면적은 상대적으로 작아져 De 가 크게 나타난 것으로 추정할 수 있다.

접촉부에 가해지는 접촉하중의 형태로서는 상온 시험의 경우 튜브의 시이소오 운동에 의해 접촉부에서 pitching 현상이 나타나는 반면에 고온 시험에서는 direct impact 의 현상이 나타난다. Pitching 의 경우 접촉부 경계에서의 ploughing 현상이 좀 더 지배적으로 나타남을 알 수 있다.

3.4 온도 분위기에 따른 SEM 분석

상온과 고온에서 마멸에 영향을 미치는 마멸기구의 차이점을 파악하기 위해 대표적인 마멸면을 Fig. 5 과 Fig. 6 에 각각 나타내었다.

먼저 상온실험에서의 SEM 사진을 보면 두 시편 모두 충격에 의한 마멸로 인해 마멸

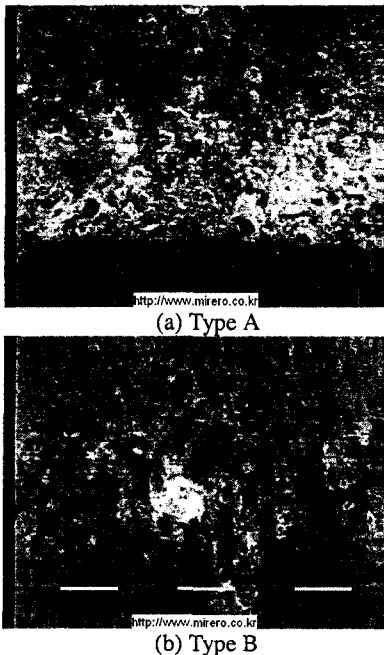


Fig. 5 Worn surface from RT tests(X 100).

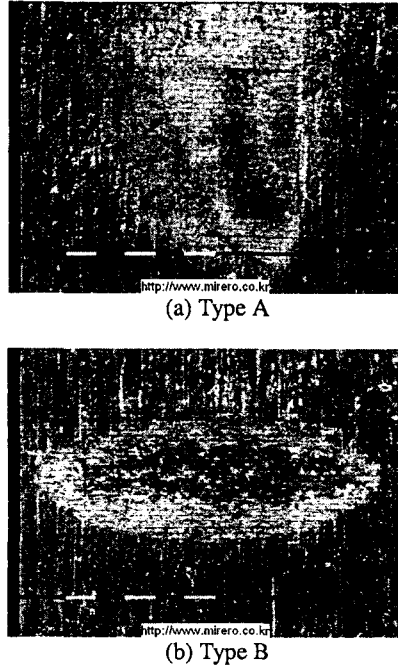


Fig. 6 Worn surface in HTHP (X 100).

입자들이 작은 알갱이와 약간 큰 덩어리들로 복합적으로 이루어져 가장자리에 부분적으로 쌓여있는 것을 알 수 있고, 표면에 잔류가 생기며 마멸입자가 군데 군데 떨어져 나간 것을 관찰할 수 있다. 고온실험인 경우에는 마멸입자가 얇은 형태로서 접촉면에 붙어있고, 높은 온도와 압력에 의해 마멸 가장자리에 산화층이 형성되어 있는 것을 알 수 있다.

또한 접촉부 주위에 발생하는 유동에 의해 상온 공기중에서의 실험보다 마멸입자의 이탈이 훨씬 자유로워 가장자리 부분엔 마멸입자가 거의 확인되지 않을 정도로 많이 씻겨져 내려간 것을 관찰할 수 있고 단지 연속적으로 규칙적인 충격이 행해진 마멸면의 안쪽 만이 응착마멸에 의해 마멸입자들이 잘게 쪼개져 가운데 집적되어 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 상온 공기중 실험과 고온고압 수중 실험에서 접촉부의 형상이 다른 각 시편으로부터 얻어진 마멸형상과 마멸량 등을

분석한 실험적 연구로서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 일반적으로 마멸부피가 크면 최대마멸 깊이 및 등가마멸깊이, De 값도 커진다. 그러나 국부적인 마멸의 발생이 우세한 경우에는 상대적으로 마멸면적이 작아져 De 값이 증가한다.
- 2) 튜브의 표면에 잔류하는 마멸입자의 양을 비교할 때, 상온 공기중 실험에서는 이탈하지 못한 마멸입자들이 표면에 쌓여 들출되는 현상이 나타나지만 수중에서 수행된 고온고압 실험에서는 접촉부 주위의 마멸입자들의 이탈이 접촉부 주위의 유동에 의해 훨씬 자유로운 것을 발견하였다. 이것은 수중 고온고압 실험에서 마멸면의 안쪽 부분만이 응착마멸에 의해 마멸입자들이 잘게 부서진 후 가운데 집적되어 있는 것을 관찰할 수 있었던 것으로부터 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 김형규 외 4 인, “ 핵연료봉 프레팅마멸 시험기 개발”, 한국윤활학회지, 제 1 권, 제 2 호, pp.245-251, 2001.
2. 김형규 외 2 인, “ 고온고압 프레팅마멸 시험기 개발”, 한국윤활학회지, 제 1 권, 제 1 호, pp.251-257, 2003.
3. 송주선 외 3 인, “ 핵연료봉 프레팅마멸에서 접촉부의 미끄럼진폭 예측”, 한국원자력학회지, vol. 1, 7 분과, 2004.