

핵연료봉 프레팅마멸 시험기 개발

김형규*, 하재욱**, 윤경호*, 강홍석*, 송기남*

* 한국원자력연구소

** 경북대학교 대학원 기계공학과

Development of Fuel Rod Fretting Wear Tester

Hyung-Kyu Kim*, Jae-Wook Ha**, Kyung-Ho Yoon*, Heung-Seok Kang*, Kee-Nam Song*

* Korea Atomic Energy Research Institute

** Graduate School, Dept. Mechanical Engineering, Kyungpook National University

ABSTRACT – A fretting wear tester is developed for experimental study on the fuel fretting problem of light water reactor. The feature of the developed tester is it can simulate the existence of gap between spring and fuel rod as well as different contacting force including the just-contact condition (0 N on the contact). Used are a servo-motor, an eccentric cylinder and lever mechanism for driving system. A spacer grid cell is constituted with four strap segments (each segment has a spring). This fretting wear tester can also be used as a fatigue tester of a spacer grid spring with the frequency of more than 10 Hz. It is required to simulate the frequency of the vibrating fuel rod due to flow-induced vibration in a reactor. In fretting wear test, up to two span-length of a fuel cladding tube can be accommodated. A specimen of cladding tube of one span-length is specially designed, which can be extended for two-span test. For fatigue test, a device for clamping the spring fixture is installed additionally. Presently, the tester is designed for the condition of air environment and room temperature. The variation of the reciprocal distance is measured to check the stability of input force, which will be exerted to the cladding (for fretting wear test) and the spring (for fatigue test) specimen.

Key Words: Fretting wear tester, Gap between spring and fuel rod, Lever mechanism

1. 서론

핵연료집합체(Fuel Assembly)를 구성하는 부품 중 하나인 지지격자체(Spacer Grid)는 핵연료봉(Fuel Rod)을 핵연료집합체 내의 공간상에 정해진 위치에 있도록 하는 중요한 부품이다. 이때 지지격자체를 구성하는 지지격자판에는 핵연료봉의 지지를 위하여 스프링과 덤플이 가공되어 있으며 지지격자판들이 서로 직교하며 조립되어 핵연료봉이 삽입될 수 있는 셀을 구성하고 있다(Fig. 1 참조). 따라서 핵연료봉의 지지력은 하나의 셀 내의 스프링 및 덤플들과 핵연료봉 사이의 접촉면에 존재하는 마찰력이 된다.

핵연료의 설계 시에는 이 마찰력에 의한 지지 기능이 핵연료의 수명 말까지 유지되

도록 스프링 또는 덤플의 변위와 그에 따른 초기의 하중을 설정한다. 그러나 원자로 내의 냉각수 유동에 의해 유체유발 진동(Flow-Induced Vibration)이 발생하면, 접촉면에서는 상대운동이 발생하게 되고 이로 인해 접촉면이 마멸하게 되는 현상, 즉 프레팅마멸(Fretting Wear)이 발생하게 된다. 이때 마멸이 과도하게 발생할 경우, 핵연료봉 피복관에 구멍을 발생시킬 수 있으며 내부의 방사성 물질이 원자로 내부로 유출되는 심각한 사고를 야기하기도 한다.

따라서 원자력발전소의 안전성 및 경제성을 향상시키기 위해 핵연료봉의 프레팅마멸을 억제하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 이에 대한 실험적 연구로서 시편단위의 지지격자 스프링(또는 덤플)과 핵연료봉 피

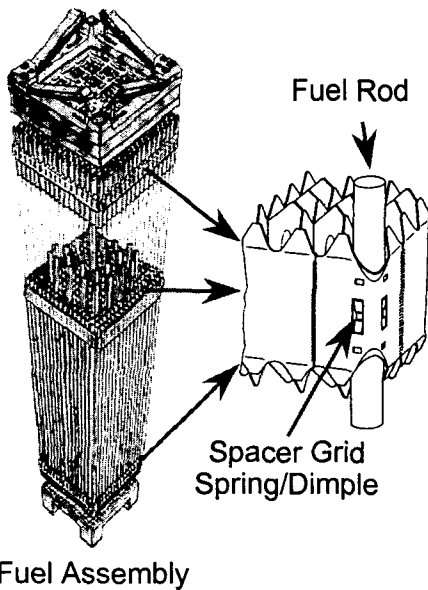


Fig. 1. Contact between fuel rod and spacer grid.

복판 사이 또는 피복판과 피복판 사이의 접촉에 의한 마멸 특성을 분석하는 소규모 단위의 시험[1,2]과 핵연료집합체를 유동장에 놓이게 한 후 유체유발 진동 시험에 의해 나타나는 마멸을 분석하는 주로 핵연료 설계 및 제조자에 의해 주로 수행되는 대규모 시험으로 구분된다. 이때 시험조건으로서 원자로 내에서의 지지격자 스프링(또는 딴플)과 핵연료봉 사이의 접촉 조건, 분위기 등을 모사하고자 하나, 실제 원자로 내의 조건을 완벽히 모사하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 어느 한가지 종류의 시험으로 핵연료봉의 마멸을 억제하는 방법을 도출하기는 어렵다.

한편, 원자로 내에서의 열적, 조사적 조건에 의해 원자로 운전 중 지지격자 스프링(또는 딴플)과 핵연료봉 사이의 접촉 조건이 변하게 된다. 즉 원자로 운전 조건에서는 지지격자 스프링 제조 시의 초기 스프링 상수가 저하하거나 스프링이 소성 변형하여 핵연료봉과 접촉하지 못하고 간격이 발생할 수 있다. 이때 원자로 냉각수 유동에 의한 핵연료봉의 진폭은 크게 증가하게 되며 핵연료봉과 지지격자 스프링(또는 딴플) 사이에 Tapping 또는 Impacting 이라 표현되는 충격이 지속적으로 발생한다.

프레팅마멸 과정은 접촉면에서의 응착마멸(adhesive wear)로부터 시작하여 접촉면에

마멸입자가 발생하고, 마멸입자를 포함하는 접촉면에서 연마(abrasion)가 발생하며 이와 같은 사이클이 반복되는 것이므로[3], 마멸입자의 이탈속도가 빠를 경우 마멸이 증가하게 된다고 볼 수 있다. 이러한 이유로 지지격자 스프링(또는 딴플)과 핵연료봉 사이에 충격이 있는 경우에는, 지속적인 접촉이 있는 경우에 비해 마멸입자의 이탈이 더욱 쉬워질 것으로 생각할 수 있고, 따라서 마멸이 더욱 심하게 발생할 수도 있을 것이라 예상할 수 있다.

본 논문을 통해 발표할 시험장비는 기존의 접촉에 의한 마멸시험 장비[4]를 보완하여 충격을 모사할 수 있게끔 새로이 개발한 것이다. 또한 개발된 장비는 지지격자 스프링(또는 딴플)과 핵연료봉 사이의 접촉 수직 하중 뿐 아니라 지지격자체 사이의 거리(span)을 변화시킬 수 있도록 설계하여 다양한 접촉 조건에서 시험할 수 있도록 하였다

2. 프레팅마멸 시험기의 구성부

원자로 내 핵연료봉의 프레팅 현상을 모사하기 위해서는 하중, 진폭, 주파수, 온도, 압력, 수화학적 조건 등 여러 인자를 고려해야 한다. 개발된 시험장비에서는 기계적 관점에서의 조건(하중, 진폭, 주파수 등)을 고려하여 설계하였으며, 하나의 셀이 구성된 지지격자체 단위에서 발생하는 프레팅마멸 현상을 모사하는데 중점을 두었다. 이번에 개발된 시험장비는 크게 구동부, 시편고정부, 그리고 베드와 제어부(Control Unit)의 세 단위로 구분할 수 있다. Fig. 2 에는 시험장비의 사진과 개략적인 구성을 보여 주고 있다.

2.1. 구동부

프레팅마멸이란 매우 작은 진폭의 왕복 상대운동을 하는 재료들의 접촉면에서 발생하는 표면 손상을 말한다[5,6]. 이러한 작은 진폭의 상대운동을 시험에서 구현하기 위해 구동부는 Fig. 3 에서 보여주는 것과 같이 무단변속이 가능한 서보모터와 이것에 타이밍 벨트로 연결된 편심원통, 편심원통에 접촉하는 베어링과 여기에 연결된 지렛대 및 지

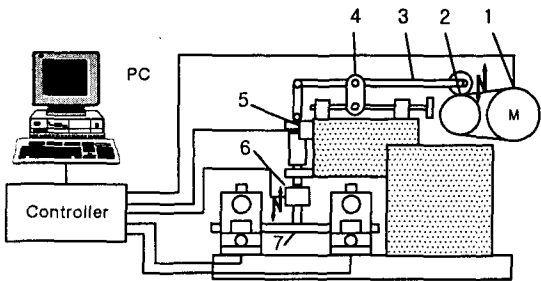
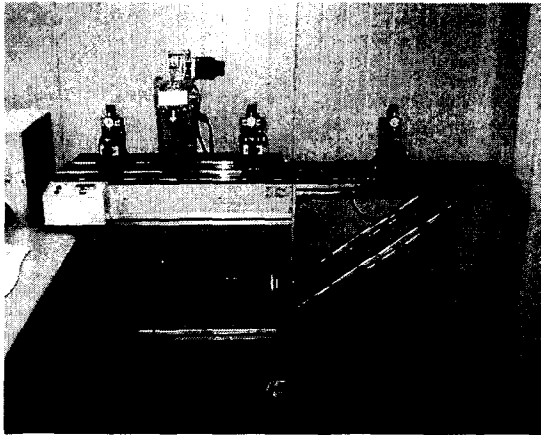


Fig. 2. Photograph and Schematic diagram of fretting wear tester;
 1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: LVDT, 6: Load Cell, 7: Tube Specimen.

랫대 힌지부로 구성하였다. 편심원통에서 발생하는 일정한 변위는 지렛대 힌지부의 이송에 의하여 시편에 가하는 변위 범위를 조정할 수 있도록 설계하였고, 어느 특정한 변위 범위로 고정할 경우를 위해 힌지부에는 관통볼트를 설치하였다.

지렛대를 통한 변위는 연직 방향으로 전달되어 핵연료봉 시편에 상하 방향의 진동을 발생시키게 된다. 이때, 가하는 변위에 의해 시편에 전달되는 하중을 측정하기 위하여 Load Cell 을 설치하였으며, 이와 함께 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 를 설치하여 시험 중 시편에 작용하는 변위 범위를 실시간으로 측정할 수 있게 하였다. Fig. 4 에 Load Cell 과 LVDT 의 위치를 보여 주고 있으며, LVDT 를 하중전달 경로의 끝단에 설치한 이유는, 하중 경로 상의 기계적 체결부위에 존재하는 틈새로 인해 발생할 수 있는 모든 오차가 표시되는 변위에 나타나도록 하여 실제 시편이 진동하는 진

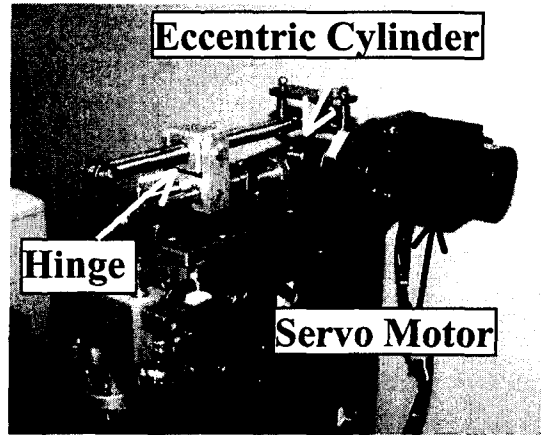


Fig. 3. Driving assembly.

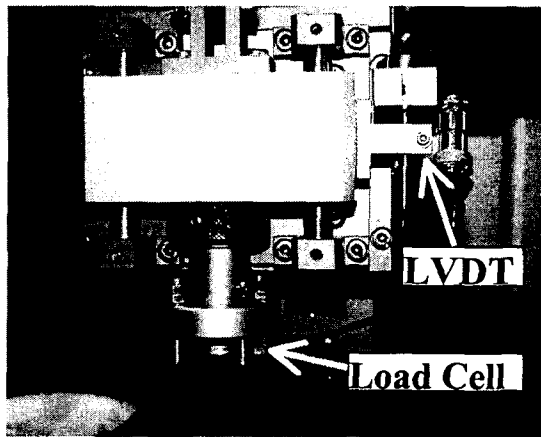


Fig. 4. Load cell and LVDT.

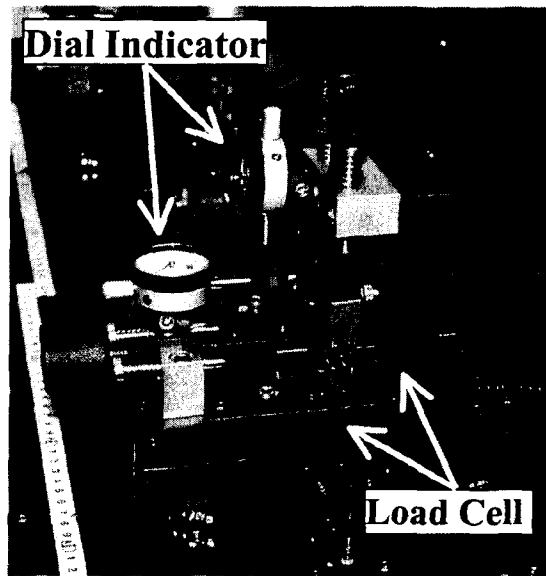


Fig. 5. Spring specimen fixture.

폭(변위)을 측정할 수 있게 하기 위함이었다. 시험 중에 발생할 수 있는 구동부의 미세한 진동이 시편에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 구동부를 강건한 기둥에 설치하였으며, 기둥과 시험장비의 베드사이에는 방진용 패드를 설치하였다.

2.2. 스프링 시편 고정부

본 시험장비는 하나의 지지격자 셀을 구성하기 위해 지지격자판 4 개를 조합하여 실제 원자로 내에서 핵연료봉과 스프링(또는 덤플)이 접촉하는 여러 가지 경우를 모사할 수 있도록 하였다. 즉, 핵연료봉과 지지격자 스프링(또는 덤플) 사이의 간격이 존재하는 경우를 포함하여, 하나의 셀을 구성하는 각각의 스프링이 핵연료봉에 가하는 힘이 다를 경우에 대한 프레팅마멸 시험이 가능토록 한 것이다.

이를 위해 스프링 시편 고정부는 하나의 셀을 구성하는 지지격자판 시편 4 개를 각각의 블록형 치구에 고정하고 이것을 서로 독립적으로 움직일 수 있도록 하였다. 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 힘과 간격을 조절하기 위하여, 직교하는 2 개의 Load Cell 과 2 개의 Dial Indicator 를 각각의 스프링 시편 고정부에 장착하였으며, 이로부터 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이에 작용하는 힘을 실시간으로 측정하고 틈새 거리를 정량화 할 수 있도록 하였다. Fig. 5 는 스프링 시편 고정부의 모습과 Load Cell 의 위치, 그리고 Dial Indicator 의 모습을 보여준다.

2.3. 베드와 제어부

베드는 구동부와 스프링 시편 고정부를 지지하는 시험장비의 몸체이다. 핵연료는 축방향으로 여러 개의 지지격자체가 있으며 원자로 냉각수의 유동에 의한 핵연료봉의 진동은 지지격자체 사이의 거리(Span)에 영향을 받는다. 이를 고려하기 위해, 개발된 시험장비에는 3 개의 스프링 시편 고정부를 설치하여 최대 두 개의 span 을 구성할 수 있도록 하였고, 이때 스프링 시편 고정부 사이의 거리를 조절할 수 있도록 설계하였다. 즉, 각 스프링 시편 고정부 사이의 거리

는 지지격자체 사이의 거리가 되며, 핵연료의 종류에 따라 달라질 수 있는 지지격자체 간의 거리 변화에 따른 시험이 가능하도록 하였다. 스프링 시편 고정부의 정확한 이동을 가능하게 하기 위해 시편 고정부를 안내하는 레일을 베드 위에 설치 하였고, 레일을 따라 자를 부착하여 위치를 정확히 설정할 수 있도록 하였다.

베드의 하부에는 시험 중 측정되는 데이터들의 수집과 제어를 위해 제어부를 설치하였다. 시험 데이터로서 1 개의 LVDT 와 7 개의 Load Cell 에서 얻은 변위 값과 하중 값이 실시간으로 PC 로 보내지며, 모니터에서 확인할 수 있도록 하였다.

3. 시편

핵연료봉 프레팅마멸 시험을 위해 사용되는 시편은 핵연료봉 시편과 지지격자 스프링(또는 덤플) 시편 두 가지이다. 핵연료봉 시편은 스프링 시편 고정부를 관통할 수 있을 정도의 길이(대개 500 mm 이상)를 가져야 하므로 핵연료봉 튜브 원자재로부터 소요되는 길이를 절단하여 사용할 경우 시편의 길이가 상당히 길어진다. 그러나 스프링과의 접촉부에서만 마멸이 발생하므로 이와 같이 절단할 경우 튜브 시편의 불필요한 소모가 상당히 크게 되며 마멸을 측정하기가 어려워진다.

따라서 스프링과의 접촉부만 취하여 마멸을 측정할 수 있도록 핵연료봉 시편을 Fig. 6 과 같이 설계하였다. 즉 핵연료봉 시편의 가운데 부분은 반영구적으로 쓸 수 있게 하였고(Center Rod), 지지격자체와 접촉하는, 마멸이 일어나는, 부분만 교체할 수 있도록 하였다(Fretting Tube Specimen). 또 여기에 연결된 양 끝 단의 확장 봉(Extension Rod)에는 인접 span 의 핵연료봉 무게를 모멘트로 고려하기 위하여 추를 부착하였고 그 위치를 이동할 수 있도록 하였다. 한편 중앙의 긴 봉(Center Rod)은 실제 핵연료봉과 같은 무게를 갖도록 하기 위해 튜브 내에 납을 삽입하여 제작하였다.

핵연료봉과 지지격자 스프링(또는 덤플) 사이의 힘이나 간격을 조절하기 위해 하나의 셀을 구성하는 4 개의 스프링 시편은 각

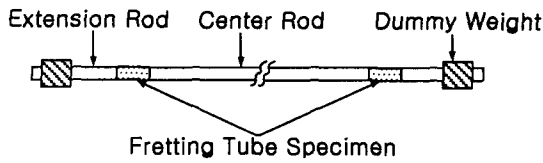


Fig. 6 Schematic diagram of the rod specimen.

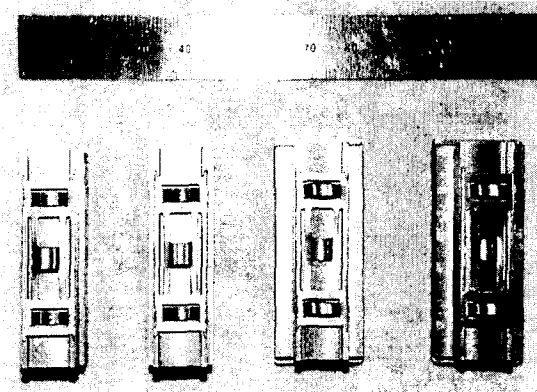


Fig. 7. Spring specimens pasted on the blocks.

각 4 개의 시편고정 블록에 접착제로써 고정되도록 하였다. Fig. 7 에는 시편고정 블록과 여기에 부착된 스프링 시편을 보여 준다.

4. 성능 시험

핵연료봉의 진동 진폭은 편심원통의 편심량과 지렛대 힌지점의 위치에 따라 결정된다. 이때 힌지점은 지렛대 길이 내에서 일정 범위만 이동 가능하므로 다양한 범위의 변위를 발생시키기 위해서는 편심량을 달리한 여러 개의 편심원통이 필요하다. 여기서는 편심원통의 편심량이 0.4 mm 일 때 힌지점을 이동 가능한 범위 중 모터쪽에 가장 가까운 지점을 시작점으로 하여 가장 멀리 이동한 위치까지 4 단계로 나누어 20 mm 씩 전진시켜가며 진폭 특성을 파악하였다.

이 시험의 목적은 핵연료봉 프레팅마멸

시험 시, 시험 조건으로 주게 될 변위 범위와 시험 조건의 안정성을 파악하고자 한 것이다. 이 시험에서 핵연료봉에 가하는 진동 주파수는 30 Hz 로 하였고 지지격자 스프링과는 접촉되지 않은 상태에서 수행하였다. Table 1 및 Fig. 8 에 나타낸 시험결과로부터 간헐적인 첨두(peak)가 나타나기도 하였지만 대체로 안정적인 진폭이 유지되었다. 이때, 첨두의 최대 및 최소값의 차이 중 가장 큰 값이 0.027 mm 로 측정되었다.

두 개의 인접한 지지격자체 사이에서 핵연료봉이 진동하고, 이에 의한 휨이 발생할 때 변형된 형상을 원호라 가정하면, 핵연료봉과 지지격자 스프링(또는 덤플) 사이의 접촉부분에서 발생하는 축방향의 미끄럼 변위 범위의 근사값은 다음 식으로부터 추정할 수 있다.

$$h = R \cdot \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) = \frac{l}{\sin(\theta/2)} \cdot \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right), \quad (1)$$

여기서 R 은 하나의 span 에서 휨 방향으로 처진 핵연료봉의 형태를 원호로 가정하였을 때, 그 원의 반지름이며 l 은 span 길이의 1/2 이고, θ 는 상기 원호와 R 로 구성되는 부채꼴의 내부 각이다. 이제 접촉부에서의 미끄럼 변위, δ 는 다음 식으로 구해진다.

$$\delta = \frac{R\theta}{2} - l \quad (2)$$

식 (2)로부터 span 중앙에서 발생하는 0.027 mm 의 처짐량 차이는 접촉부에서의 미끄럼 거리 차이를 약 0.002 μ m 이하로 발생시키므로 마멸에 미치는 영향은 아주 작다고 사료된다. 따라서, 개발된 장비는 핵연료봉의 프레팅마멸 시험을 위해 충분히 허

Table 1. Characteristic result of the vibrating range at some specified positions of hinge with the cylinder of eccentricity, 0.4 mm.

(Unit: mm)					
Distance	Average Range	Standard Deviation	Max	Min	Difference (Max - Min)
0	0.228	0.006	0.246	0.219	0.027
20	0.178	0.006	0.194	0.169	0.025
40	0.116	0.004	0.130	0.110	0.020
60	0.077	0.005	0.093	0.070	0.023

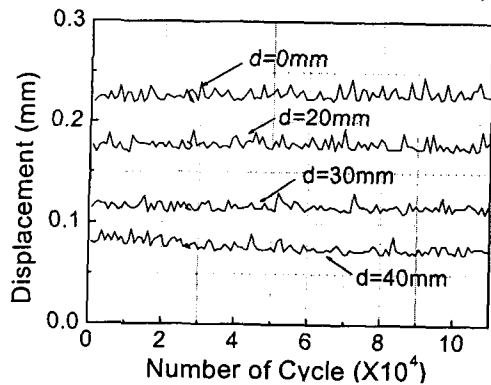


Fig. 8. Variation of displacement.

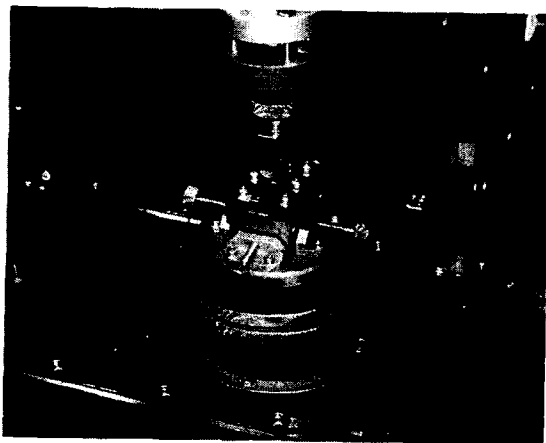


Fig. 9. Fixture and loading bar set-up for spring fatigue test.

용할 수 있는 값 이내의 진폭 안정성을 갖고 있다고 판단된다.

결과적으로 편심량이 0.4 mm 인 편심원통을 사용하였을 경우, 핵연료봉 시편을 가진 하는 변위대역은 0.08 mm ~ 0.23 mm 이었다. 이 범위 이외의 변위가 필요한 시험을 위해서는 편심량을 달리한 편심원통을 사용하게 되며 이때, 앞의 실험 데이터를 기초로 하여 편심량을 설계할 수 있다.

5. 스프링 피로시험에의 활용

개발된 프레팅마멸 시험장비의 구동부 끝단에 핵연료봉 시편을 연결하는 대신, 지지격자 스프링(또는 덤플)에 하중을 가할 수 있는 장치를 연결하면 스프링(또는 덤플)의

피로시험을 수행할 수 있다. 원자로 냉각수 유동에 의한 핵연료봉의 진동으로부터 지지격자 스프링(또는 덤플)에 작용하는 피로하중은 그 반복 주파수가 수십 Hz 이다.

기계공학에서 일반적으로 사용하는 유압식 피로시험기의 허용 반복하중 주파수가 대개 10 Hz 미만이므로, 본 장비를 스프링(또는 덤플)의 피로시험에 사용하는 것이 지지격자 스프링에 작용하는 피로하중의 주파수 조건을 모사하기에 적절하다. 이를 위해 장비의 베드에는 지지격자판 단위의 스프링(또는 덤플) 시편을 고정할 수 있는 장치를 마련하였으며 이를 Fig. 9 에 보여 준다.

6. 결 언

본 논문에 소개한 시험장비는 상온, 공기 중에서 최대 두 개의 span 에서 지지격자체 셀 단위의 핵연료봉 프레팅마멸 시험을 수행하기 위해 개발되었으며 다음과 같은 시험조건을 모사할 수 있다.

- 핵연료봉과 지지격자 스프링 사이에 간격이 존재하는 경우
- 핵연료봉과 지지격자 스프링 사이의 접촉하중이 지지격자체에 따라 다른 경우
- 인접 지지격자체 사이의 거리가 상이한 경우
- 인접 지지격자체의 스프링(또는 덤플)의 형상이 상이한 경우

한편 장비의 구동부에 지지격자 스프링(또는 덤플)에 하중을 가할 수 있는 장치를 부착하여 핵연료봉의 유체유발 진동에 해당하는 높은 진동수로 스프링(또는 덤플)에 대한 피로시험도 가능하도록 설계하였다.

개발된 장비를 이용하여 상기한 여러 조건에 대한 시험을 수행하면 지지격자 스프링(또는 덤플)과 핵연료봉 사이의 기계적 접촉조건(미끄럼, 충격 등)에 따른 프레팅마멸 현상을 분석할 수 있을 것으로 기대 된다. 그러나 핵연료봉의 프레팅마멸 거동을 좀 더 명확히 분석하기 위해서는 온도, 압력, 수화학적 분위기 등에 있어서도 실제 원자로 내의 조건으로 시험해야 할 필요가 있다. 이를 위해서 향후 고온, 고압의 수중 분위기에서 시험할 수 있는 장비를 개발할 필요가 있으며, 이때 본 논문에서 발표한 시험

장비의 설계 경험이 활용될 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김형규 외 4 인, “미끄럼 방향과 접촉부 형상에 따른 핵연료봉 프레팅마멸의 시험 분석,” 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집, 논문번호 59.
2. 김형규 외 3 인, “지르칼로이-4 튜브 및 지지부의 접촉조건과 미끄럼 상태의 차이,” 한국윤활학회 2001 춘계학술대회 논문집, pp.81-88.
3. Ko, P.L., “Metallic wear – a review with special references to vibration-induced wear in power plant components,” Tribology International, Vol.20, No.2, pp.66-78, 1987.
4. 김형규 외 4 인, “프레팅마멸 시험장비 개발,” KAERI/TR-1570/2000, 한국원자력연구소, 2000.
5. OECD, “Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication,” OECD Pub., Paris, 1969.
6. Waterhouse R. B., “Fretting Corrosion,” Pergamon Press, pp.36, 1975.