

고온고압조건하에서의 핵연료 피복관 지지스프링의 하중-변위 특성 분석

이영호[†] · 김형규* · 정연호*

Analysis of Grid Spring Characteristic of Fuel Assembly in High Temperature and High Pressure Environment

Young-Ho Lee, Hyung-Kyu Kim, Youn-Ho Jung

Key Words : Spring stiffness(스프링 강성), P- δ test(하중-변위시험), high temperature and high pressure(고온고압), spring shape effect(스프링형상영향)

Abstract

To evaluate the variation of spring stiffness in nuclear plant operating condition, load-displacement tests (P- δ test) were performed using two kinds of space grid springs in high temperature and high pressure water. With increasing temperature, stiffness of each spring gradually decreased except 100 ~ 150 °C. It is apparently showed that spring with convex shape had a relatively high stability of spring stiffness at high temperature compared with I-shaped spring. It is suggested that the variation of spring stiffness with temperature and spring shape should be considered as an important variable in the design and analysis of the fuel assembly.

1. 서 론

국내 경수로형 원자력발전소 내부에서 핵반응이 일어나는 압력용기의 환경조건은 약 320°C 및 15 MPa 의 고온고압 물속환경이며, 이러한 조건하에서 핵연료집합체의 건전성은 원자력발전소의 안전성과 직결되는 매우 중요한 요소이다. 그러나 최근 들어 핵연료 피복관과 이를 지지하는 지지격자체 스프링(혹은 덤플)사이에서 핵연료의 핵반응과정에서 생성된 열을 2 차측으로 전달하는 빠른 유속의 냉각수에 의한 유체유발진동으로 인해 접촉면에서 프레팅 손상이 빈번하게 발생하고 있다. 이에 따라 프레팅 손상을 억제하기 위한 다양한 노력을 수행하였으며 이 중에서 스프링 형상을 개선하여 핵연료봉과 스프링과의 접촉형상을 개선하는 방법을 널리 사용하고 있다. 이에

따라 한국원자력연구소에서는 여러 가지 종류의 스프링 형상이 개발되었는데 이 중에서 몇 가지 뛰어난 성능을 가지는 것으로 판단된 스프링에 대하여 상용화를 위한 다양한 실험이 수행 중에 있다.

새로운 형상을 가진 스프링이 개발될 경우, 가장 우선적으로 수행하는 시험은 하중-변위곡선을 구하는 것이며, 이것은 스프링이 핵연료봉을 건전하게 지지해 줄 수 있는 능력을 검증하는 시험이다. 그러나 현재까지 핵연료 설계 및 개발관련 기관에서는 상온 공기중에서 시험한 결과와 설계가 적용될 온도에서의 탄성계수(Elastic modulus) 값과 프와송비 (Poisson ratio)를 이용하여 하나의 특정한 온도에서 계산된 결과를 실제 핵연료의 해석 및 설계시 적용하고 있다.

그러나 열유체, 기계 및 진동등과 같이 다양한 관점에서 개선된 다소 복잡한 형상의 스프링은 가동환경조건에서 발생하는 열팽창으로 인하여 형상변화의 불규칙성을 가져오게 된다. 결국 핵연료 피복관을 지지하는 스프링의 강성(Stiffness)은 형상에 의존하기 때문에 단지 실제 가동온도

[†] 한국원자력연구소 경수로연료개발부
E-mail : ex-leeyh@kaeri.re.kr
TEL : (042) 868-8761 FAX : (042) 863-0565

* 한국원자력연구소 경수로연료개발부

조건의 탄성계수와 프와송비만을 고려한 보정값을 사용하여 설계할 경우 정확한 가동온도에서의 스프링 강성을 반영하지 못하는 단점이 있다.

이에 따라 본 논문에서는 핵연료봉의 프레팅 마멸 연구를 위해 개발된 고온고압 프레팅 마멸 시험기를 이용하여 연료봉과 스프링이 고온고압 상태에서 접촉하는 환경을 실제와 같이 모사하고 이때 스프링의 접촉하중-변위를 측정하였다. 실험결과를 기존의 자료와 비교하였으며 온도 및 압력변화에 따른 스프링 특성변화를 분석하였다.

2. 실험과정

2.1 시편

본 시험에 사용된 핵연료집합체 지지격자 스프링은 핵연료봉과 접촉하는 부분이 볼록한 형상의 A 형 스프링과 하중에 따라 접촉점의 개수가 변화하는 B 형 스프링이었다. 이 두가지의 스프링은 하중이 증가함에 따라 접촉길이(혹은 면적)이 증가하는 유사한 특징을 가지며 Fig. 1에 대략적인 스프링 형상을 나타내었다. 실험에 사용된 시편의 재질은 Zirlo 이며[1] 이 합금은 현재 국내외에서 핵연료 피복관을 포함한 노심구조물에 널리 사용되는 지르코늄 합금인 Zircaloy-4를 개선한 합금으로 Table 1에 개략적인 합금조성을 나타내었다.

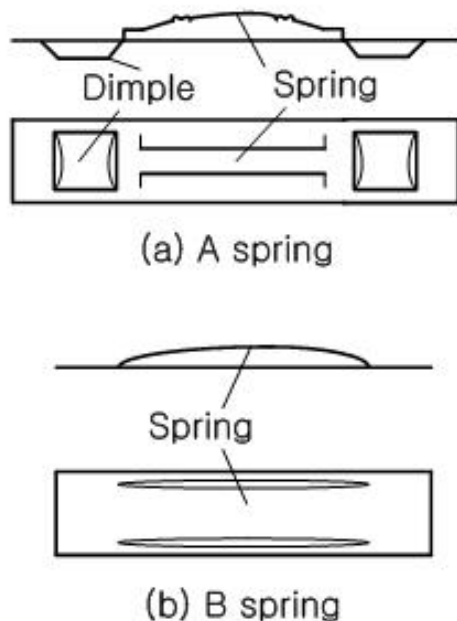


Fig. 1 Schematic views of tested springs.

Table 1 Chemical composition of spring specimen (wt%)

Element	Nb	Sn	Fe	O	Zr
contents	1.00	0.99	0.11	0.113	Bal.

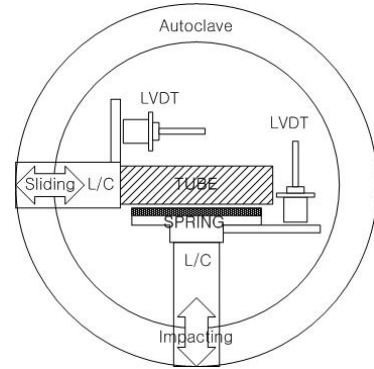


Fig. 2 Top view of specimen array in autoclave of high temperature and pressure fretting tester.

2.2 시험장치

고온고압환경에서 실험을 수행하기 위해서는 기존의 상온에서 수행된 하중-변위 시험장치의 설계변경 및 고온고압유지를 위한 장비가 부착되어야 한다. 그러나 본 실험에서는 핵연료 피복관과 지지격자체 스프링(혹은 덤플)사이의 유체유발진동에 의한 프레팅 마멸을 모사하기 위하여 제작된 고온고압 마멸시험기와 실험과정중에서 하중을 측정할 수 있는 특별한 하중센서를 사용하였다. 고온고압 마멸시험기의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 시험장비는 320℃의 온도, 15 MPa의 압력의 고온고압 물속에서 실험이 가능하며 구동방식, 데이터 측정과 관련된 상세한 내용은 기존의 문헌[2]에 자세히 설명되었다.

스프링에 작용하는 하중을 측정하기 위한 하중센서는 Fig. 2의 Sliding 측에 설치하여 스프링에 의해 피복관(Tube)이 굽힘하중을 받을 때의 변형률을 측정하는 방식으로 제작하였으며 센서의 감도를 결정하기 위해 다음과 같은 재료역학적 방법을 응용하였다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_b d}{EI} \quad (1)$$

여기서, M_b 는 하중 작용점으로부터 센서까지의 거리, d 는 센서취부에서 반경방향으로 센서가 위치한 거리이며 E 및 I 는 각각 센서취부의 탄성계수와 단면 2차모멘트이다.

2.3 시험범위

상술한 바와 같이 본 실험에 사용된 하중-변위 곡선 시험기는 기존의 마멸시험기를 이용하였다. 기존의 상온 압축시험기에서는 하중을 시험장치에서 일정한 속도로 인가하였으며 그때의 변위를 실시간으로 측정하여 하중-변위 곡선을 구하게 되나 본 고온고압 마멸시험기의 경우, 핵연료 피복관과 스프링이 접촉한 시점에서 이송거리를 0.1 mm(100 μm)씩 이동시킬때 측정된 하중을 저장하였으며 최대 0.5 mm 까지 측정하였다. 이러한 이송거리의 제한은 일반적으로 50 N 이하의 변위영역에서 스프링이 피복관을 지지하기 때문이다. 또한 고온고압 마멸시험기의 개략적인 모습에서 나타낸 것과 같이 과도한 하중을 인가할 경우, 힘센서가 부착된 축에서 과도한 굽힘이 야기 될 수 있다. 또한 이러한 현상이 발생하게 되면 실제 측정된 데이터에 스프링과 피복관사이의 접촉에 의한 변형과 축의 변형이 동시에 포함 할 가능성이 있어 가급적 탄성영역에서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 기존 결과와의 비교

상온 물속에서 수행된 두 가지 스프링의 하중-변위곡선을 기존의 상온 공기분위기에서 자료와 비교하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 결과로부터 고온고압 마멸시험기를 이용한 상온 물속에서의 하중값이 기존의 결과에 비해 다소 높은 경향을 보이고 있는데, B 스프링에서는 그 차이가 크게 나타난 반면 A 스프링에서는 거의 유사한 결과를 보이고 있다.

B 스프링의 경우 스프링 형상이 불룩하며 초기 접촉은 스프링의 최상부에서 발생하게 된다. 이때 하중이 증가함에 따라 핵연료봉을 지지하는 축에 굽힘이 가해지게 되며 이에 따라 접촉위치는 스프링의 구배에 따라 힘센서가 위치한 방향으로 가까워지게 된다. 이에 따라 상대적으로 큰 신호값이 나온 것으로 예상되며 변위가 계속 증가함에 따라 접촉점의 위치변화는 거의 없어지고 상온 공기분위기에서 수행한 결과와 유사한 값을 가지는 것으로 생각된다. 반면 A 스프링에서는 공기분위기에서 수행된 결과와 잘 일치하는 것으로 보이며 이것은 접촉면(혹은 길이)이 연료봉의 축방향으로 길며 스프링의 강성 또한 작기 때문

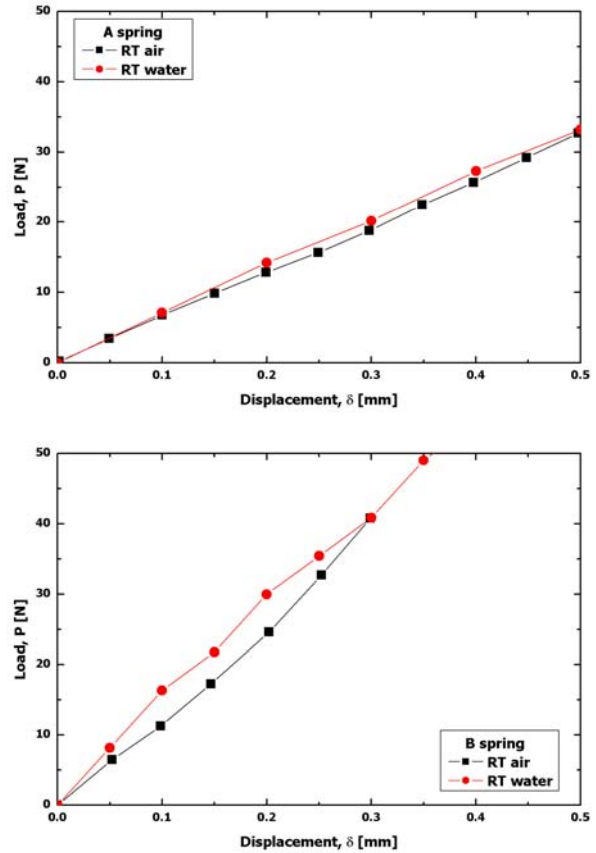
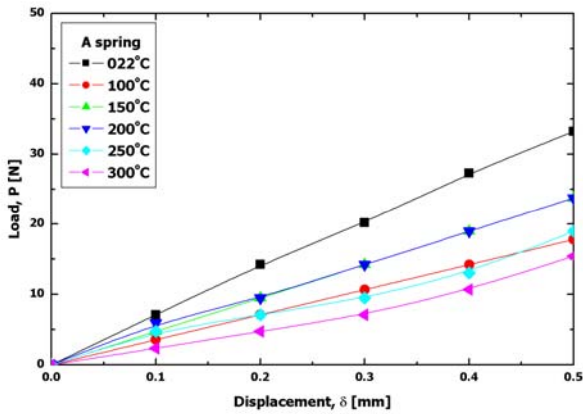


Fig. 3 Comparison of load-displacement test result at room temperature: Spring B shows relatively high stiffness compared with spring A.

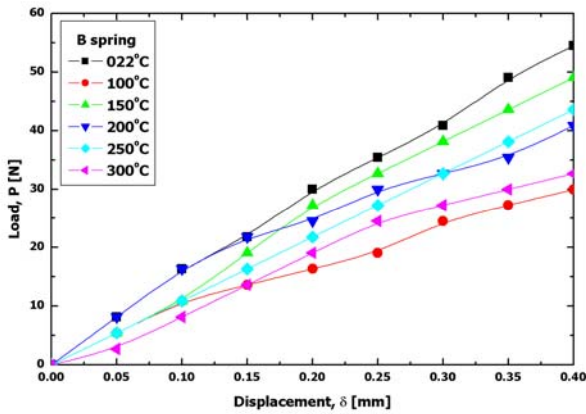
에 변위증가에 따른 연료봉축의 굽힘이 작아 접촉면의 변화가 크게 나타나지 않기 때문으로 사료된다.

3.2 온도의 영향

일반적으로 온도의 증가는 재질 탄성계수의 감소, 연신률의 증가와 스프링 형상에 따라 열팽창으로 인한 변형의 불균일성을 가져올 수 있다. 특히 스프링 형상이 복잡하며 스프링 제작은 판상의 지르코늄합금으로부터 punching으로 제작하는 것이 일반적인데 이때에는 스프링 형상에 따라 변형의 불균일이 발생하게 되며 차후 변형에 의한 잔류응력은 열처리과정 후에도 남아있게 된다. 따라서 고온에서 장시간 노출된 시편에 대한 하중-변위곡선을 획득하게 되면 부가적인 열처리가 작용하여 시간에 따른 하중-변위곡선이 틀려질 가능성 또한 포함하고 있다. 그러나 본 실험에서는 이러한 장시간의 시험에 따른 영향을 충분히 고려하지 않았으나 시험조건을 일정하게 하여 고온 노출 시간에 따른 영향을 배제하였다. 탄성영역에서의 고온 하중-변위곡선 시험은 상온



(a) A spring



(b) B spring

Fig. 4 Effect of temperature on the variation of load-displacement of each spring.

에서부터 시작하여 각 시험온도까지 5°C/분의 속도로 온도를 증가시켜 실험을 수행하였다.

A 및 B 스프링의 하중-변위곡선에 미치는 온도의 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 온도 증가에 따라 같은 변위에서의 하중값은 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한 두 스프링 모두 100°C에서 급격한 하중의 감소가 발생하였으며 150°C이상에서 다시 증가하였다가 계속적인 온도 증가에 따라 지지하중이 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 온도 변화에 따른 지지하중의 감소는 재질특성의 변화와 스프링 영향에 따른 복잡한 열팽창 모두가 작용한 것으로 판단된다.

그러나 100°C에서의 급격한 하중의 감소는 예상과는 매우 다른 경향이다. 일반적으로 하중의 감소는 온도변화에 따라 민감하게 변화하며 온도가 증가함에 따라 하중은 서서히 감소하는 것이 일반적이다. 특히 지르코늄합금에서 온도변화에 따른 인장강도 및 연신률의 변화가 동적변형시효가 발생하는 온도가 300°C 근처임을 고려해 볼 때

100°C에서의 온도증가에 따른 재질변화로 발생하는 하중 감소보다는 온도증가와 복잡한 스프링 형상에 따른 열팽창의 영향이 우세하게 나타난 것으로 사료되나 보다 정확한 원인의 규명이 필요하다.

3.3 스프링 특성변화

0.3 mm의 변위에서 온도증가에 따른 스프링의 지지하중의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 100°C에서 나타난 하중의 감소가 두 스프링 모두 명확히 나타났으며 A 스프링의 경우 150 ~ 200°C 사이에서 하중의 변화가 없는 반면 B 스프링에서는 200 ~ 250°C 사이에서 하중의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 핵연료봉을 지지하는 지지격자체 스프링의 지지하중의 변화가 가급적 작동온도에서 큰 변화가 없는 것이 이상적이므로 본 실험결과에서는 고온에서 B 스프링이 상대적으로 견고히 핵연료봉을 지지하는 것을 알 수 있다.

또한 초기 핵연료 집합체 장입시 각각의 핵연

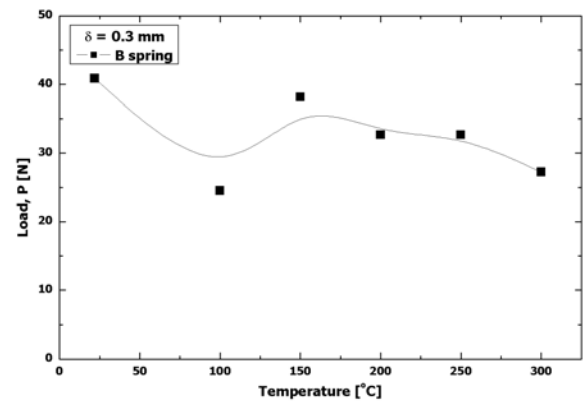
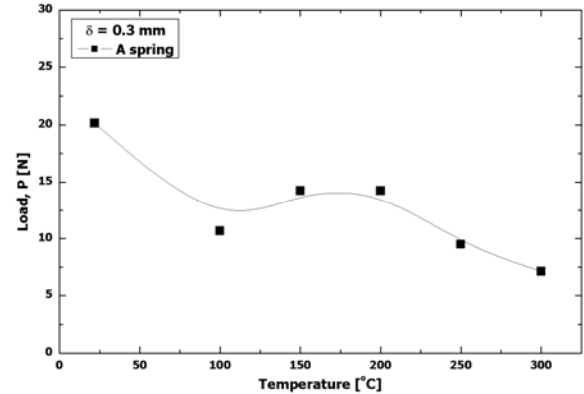


Fig. 5 Variation of supporting load with temperature at the displacement of 0.3 mm.

료봉과 스프링 사이에 작용하는 접촉하중은 제작 과정의 공차 등에 의해 다소 차이를 보이는 것이 일반적이다. 이때 연료봉과 스프링 사이에 일정한 크기의 접촉하중이 존재하게 되며 이러한 접촉하중은 핵연료 장전 후 온도증가에 따라 서서히 감소하게 된다. 여기서 초기 장입시의 접촉하중을 30 N 으로 가정하고 온도변화에 따라 스프링에 가해진 변위의 변화가 없다면 온도증가에 따른 접촉하중의 감소는 Table 2 와 같이 백분율로 나타낼 수 있다. 그 결과 가동온도와 유사한 300℃에서의 접촉하중은 A 스프링의 경우 상온의 39%, B 스프링의 경우 상온의 64%로 감소하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 온도에 따른 스프링 강성의 감소는 스프링 형상에 따라 다르게 나타나며 결국 적절한 형상의 개선으로 강성저하를 최대한 방지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 2 Variation of supporting load percentage with increasing temperature

Temperature (°C)	22	100	150	200	250	300
A spring (%)	100	52	70	70	48	39
B spring (%)	100	55	91	82	73	64

4. 결 론

고온고압 물속에서 핵연료집합체의 지지격자체 스프링에 대한 하중-변위시험을 두가지 형상을 가지는 스프링에 대하여 고온고압 마멸시험기를 이용하여 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 상온 공기분위기에서 수행된 결과는 고온고압 마멸시험기를 이용한 결과와 잘 일치하였다.
- 2) 온도가 증가함에 따라 스프링의 강성은 서서히 감소하는 경향이 두 스프링 모두 나타났으나 온도에 따라 선형적으로 감소하지는 않았다.
- 3) 스프링 형상에 따라 고온에서 핵연료봉을 지지하는 스프링의 강성은 스프링 형상이 볼록한 B 스프링이 큰 값을 보였다.
- 4) 상온에서 획득한 결과를 이용하여 온도 증가에 따른 재질특성의 변화(탄성계수, 프와송비 등)를 보상하여 수행되는 핵연료집합체의 설계에서는 스프링 형상에 따른 변화하는 온도의

영향을 충분히 고려할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) G.P. Sabol, G.R. Kilp, M.G. Balfour, E. Roberts., 1989, ASTM STP 1023, pp. 227-235.
- (2) Hyung-Kyu Kim, Young-Ho Lee, Youn-Ho Jung, 2003, Development of high temperature and high pressure fretting wear tester, Proceedings of KSTLE 2003 Spring Conference, pp. 251-257.