

## 신형소결체 하나로 조사시험용 무계장 캡슐의 스프링 설계

Design of Springs in Non-instrumented Capsule for the HANARO Irradiation Test of Advanced UO<sub>2</sub> Fuel

김대호, 이찬복, 강홍석, 방제진, 김영민, 양용식  
정연호, 김봉구, 오종명, 류정수, 강영환

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

고연소도 경수로 핵연료용으로 개발된 큰결정립 UO<sub>2</sub> 소결체의 하나로 노내 조사시험을 위해 무계장 캡슐이 설계되었다. 이 무계장 캡슐은 약 30개월 동안 하나로 OR홀에 장전되어 조사될 계획이다. 조사시험용 무계장캡슐의 구조 중에는 상단스프링, 하단스프링, 플레넘스프링 및 시험봉누름스프링 등 4종의 스프링이 장착된다. 장기간 운전에 따른 캡슐의 구조건전성 확보를 위해 스프링 특성시험을 통하여 최적의 스프링을 설계하였다.

### Abstract

Non-instrumented capsule was designed to irradiate the large grain UO<sub>2</sub> pellet developed for the high burn-up LWR fuel in the HANARO reactor. The non-instrumented capsule will be irradiated for about 30 months in HANARO Outside-core(OR) region. In the non-instrumented capsule, there are four different springs such as top guide spring, bottom spring, plenum spring and fuel rod hol-down spring. To ensure the mechanical integrity of non-instrumented capsule during the long term operation, those springs were designed after the spring characteristic tests.

## 1. 서 론

원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행중인 “경수로용 신형핵연료 기술 개발” 과제에서는 핵연료의 안전성과 고연소도화를 추구하기 위해 개발된 큰결정립  $UO_2$  소결체의 노내 연소시험을 위해 하나로 노내조사시험을 계획 중에 있다. 이를 위해 시험봉의 핵적특성 및 예비 성능시험이 수행되었으며 이를 근거로 한 시험봉 제조 및 하나로 조사시험용 무게장 캡슐을 그림 1.과 같이 설계.제작하였다.

신형소결체의 조사시험용 무게장캡슐[1,2,3]에는 하단스프링, 상단스프링, 프레넘스프링 및 시험봉누름스프링 등 4종의 스프링이 사용된다. 4종의 스프링에 대한 압축과 풀림(Load/Unload)을 반복하여 스프링 특성시험을 수행하였다. 시험을 통해 스프링의 최적화를 수행하고, 최적화된 스프링의 반복 시험을 수행하였다. 무게장 캡슐은 하나로의 Outer Core(OR)홀에 장착하게되는데 OR홀의 외벽 두께가 대략 1.25mm 정도의 산화 처리된 지르코늄 합금으로 되어 있다. 따라서 하나로의 노심 보호차원에서 OR홀의 외벽을 보호하여야하는 제한조건에 만족할 수 있도록 상단스프링의 설계 및 재료의 선택에 신중할 필요가 있다. 또한 캡슐의 하단스프링의 경우 하단고정판의 마모제한조건을 만족하여야 한다. 과도한 마모는 캡슐의 지나친 진동을 유발시킴으로서 하나로 노심외벽에 손상을 주게 되므로 적당한 스프링력과 캡슐부품의 고정역할을 할 수 있도록 설계되어야 한다. 프레넘 스프링의 경우 시험봉 성능분석을 통하여 봉내압과 프레넘 공간을 고려하여 스프링력을 설계하여야 한다. 프레넘 스프링력이 강할 경우 연소중 핵분열기체의 봉내압으로 인하여 봉단마개가 이탈할 수 있으므로 설계에 신중할 필요가 있다. 따라서 연소중 핵분열기체의 발생량과 이로 인한 봉내압 계산이 정확하게 수행되어야하며, 이때의 프레넘 공간을 충분하게 확보하여야 한다. 마지막으로 시험봉 누름스프링은 하나로의 냉각 유체가 캡슐 내에 지나가면서 발생할 수 있는 시험봉의 진동 및 상하유격을 고정하는 역할을 할 수 있도록 고안된 스프링이다. 하나로에서는 설계유량이 12.7 kg/s로 제한하고 있으며, 이때의 압력강하량은 200 kPa 이상을 유지하도록 설정하고 있다. 현재의 본 무게장 캡슐 내에 흘러가는 유량은 7.45 kg/s로 이때의 유속은 대략 9.4 m/s로 상당히 빠른 유속을 보인다. 따라서 이러한 유속에서 시험봉의 진동을 고정하기 위해 채택된 것이 시험봉 누름스프링이다.

큰결정립 신형  $UO_2$  소결체의 하나로시험용 캡슐은 70,000 MWd/MTU까지 연소시키기 위해서는 5년여의 장기간 조사가 필요하며 이를 위해서는 캡슐의 내구성이 확보가 필수적이다. 따라서, 단계적으로 대략 2.5년 정도의 내구성을 확보하고 노내 조사기간 중 시험 핵연료봉의 냉각과 우회류 및 회전류에 의한 진동 등을 최소화하여 캡슐의 마모 최소화를 동시에 만족시키도록 캡슐의 설계 최적화를 시도하였다. Dupic 핵연료의 조사시험

을 위해 개발된 무게장캡슐의 설계를[4,5] 기본으로 하여 장기간의 연소되기 때문에 시험 핵연료봉 및 캡슐의 건정성 유지 및 하나로 OR 홀의 안전성 확보에 최우선적인 관심을 두고 설계하였다. 이에 따라 조사시험용 무게장캡슐에 사용된 4종의 스프링 해석결과를 정리하였다. 이는 앞으로 무게장 캡슐 제작 시 스프링에 대한 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

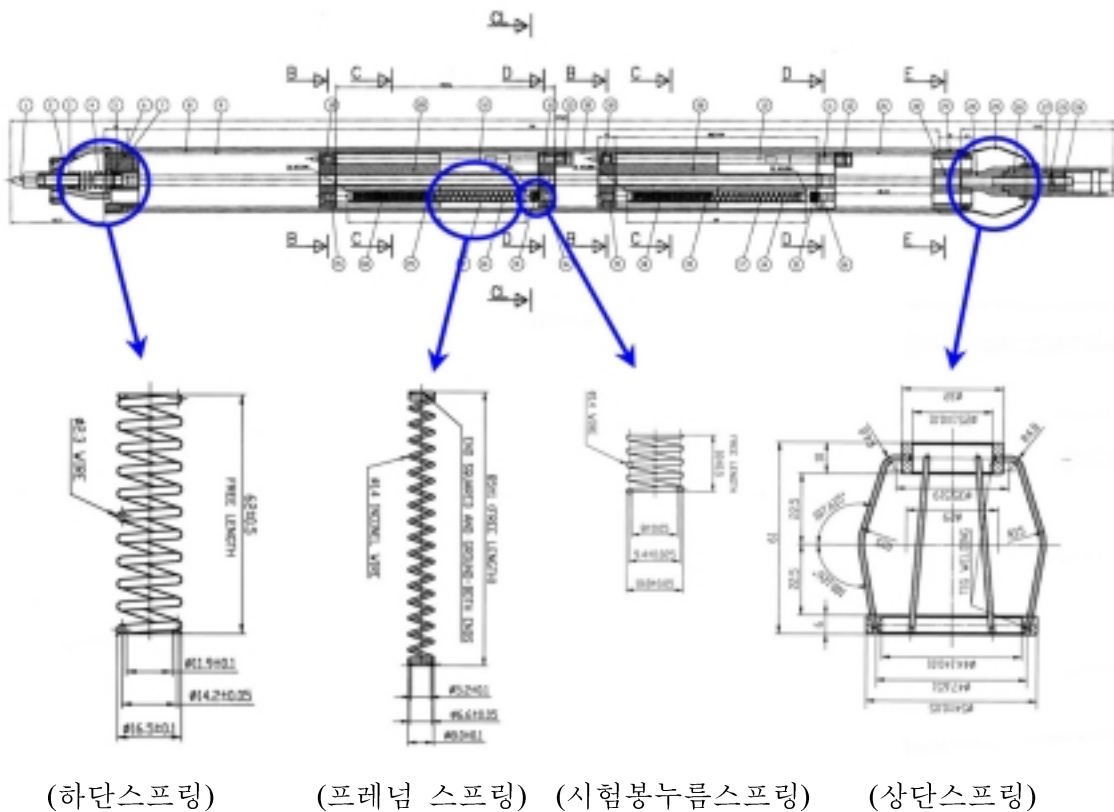


그림 1. 신형 UO<sub>2</sub> 소결체 노내시험용 캡슐 및 스프링

## 2. 스프링 시험장비

4종의 스프링 중 상단스프링이 활보형태의 선스프링이고 나머지 3종의 스프링은 코일 스프링이다. 이를 측정하기 위해 압축과 풀림(Load/Unload) 측정이 가능한 시험기를 선택하여 스프링력 계산을 수행하였다. 10 Ton<sub>max</sub>에서 1000℃의 용량을 갖는 상.고온의 인장 시험기로 모델명 TSM-100을 사용하였으며, RED-02의 컨트롤 박스가 부착되어 있다. 이 인장/압축 시험기는 TMaster 프로그램(Version TM103M)이 장착되어 시험범위의 설정 및 압축과 풀림(Load/Unload)의 반복 시험결과를 자동 취득하여 정리한다.

상단스프링의 경우 시편을 고정하기 위한 그림 2와 같이 치구를 사용하여 스프링의

한쪽방향을 고정한 채 스프링의 강성을 측정하였다. 3종의 코일 스프링은 원통형의 튜브를 고정하여 시험을 수행하였다.

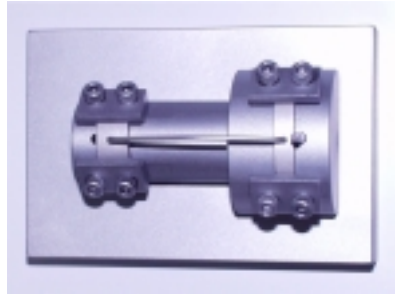


그림 2. 상단 스프링 시험용 치구

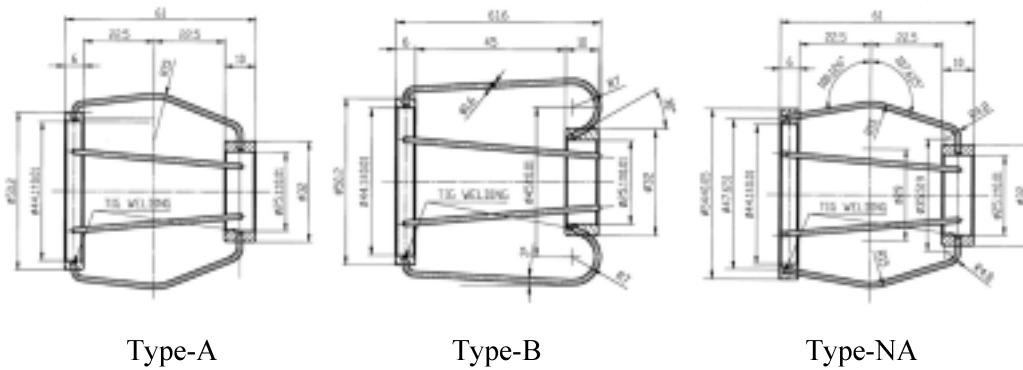
### 3. 스프링 특성 및 강성

#### 3.1 상단 스프링(Top Guide Spring)

상단스프링은 하나로 노심벽과 직접 접촉하는 유일한 부분으로 하나로 18봉 핵연료를 참조하는 3개의 활보를 갖고 약 30° 가량 방향성을 갖는 스프링(그림 3. 참조)이 채택되어 사용되었다. 그러나 이 스프링을 캡슐에 적용하여 사용할 경우 단기간의 하나로 노내 시험시에는 큰 무리없이 사용이 가능한 것으로 판명되었으나 장기간(2.5년)의 하나로 노내시험 적용시에는 다소 무리가 따른다. 이는 스프링 활보의 마모와 스프링의 파손으로 연결될 가능성이 높고 장기간의 OR홀 벽의 마모도 고려되어야 하는 문제를 갖고 있다. 또한, 3개의 스프링이 장착된 하나로 18봉 또는 36봉 핵연료는 설계유량 12.7 kg/s에서 비대칭 진동현상이 관측되었다.[6,7] 고유진동수와 진폭을 분석한 결과 x 및 y 방향으로의 방향성을 가지고 있으며, 각기 고유진동수와 진폭이 일치하지 않는다. 이는 상부 스프링의 비대칭으로 인해 방향에 따른 강성이 다르고 하단연료부의 질량분포도 엄밀하게는 x 및 y 좌표를 기준으로 대칭이 되지 않을 것으로 판단되어, 이로 인해 발생하는 진동에 의한 마모를 최소화하기 위해 스프링의 개수 및 방향성을 고려하여 설계변경을 시도하였다. Dupic 캡슐의 경우, 하나로 18봉 연료의 상단고정체 스프링과 동일한 구조와 동일한 스프링력을 갖는다. 이때의 스프링력은 20N/mm이며 이를 3년의 중성자 조사기간을 거치면 대략 11%의 스프링력이 감소되어 18N/mm 정도인 것으로 분석[8]되었다. 이때 강성이 커지면 소성변형과 조사이완(Irradiation Relaxation)도 커지므로 스프링이 위치하는 부분에서의 중성자속을 고려하여야 한다. 현재 스프링 위치에서의 중성자속은 최대 약  $6 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  (0.821 Mev 이상)이므로 3년 동안의 fluence는  $5.46 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 이 된다. 이를 6개의 스프링을 등간격으로 배열하고, OR홀 벽에서 수직으로 배치하여 그림 3에서 보는 것과 같이 변경하였다. 이때의 스프링력을 40 N/mm이며, 3년간의 중성자 조사에 의해 35 N/mm 정도로 감소할 것으로 예상된다.

상기의 해석결과를 이용하여 3가지의 스프링형상에 대한 특성시험을 수행하였다. 그림 3의 형상 중 Type-A와 Type-B를 선택하였으며 이 두가지중 성능면에서 우수한 Type-A를 최적화하여 Type-NA와 같이 일부 수정을 통해 같은 방법으로 스프링 특성시험을 수행하였다. 3가지 스프링의 제원은 그림 3의 도면에 명시된 수치와 같다.

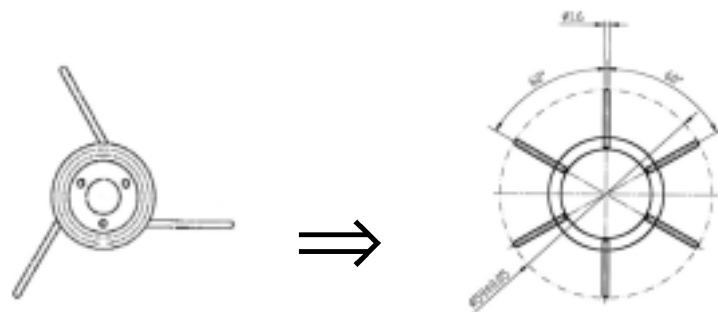
스프링 활보의 재질은 인코넬 X-750을 사용하였으며 직경은 기존의 상단스프링과 동일한  $\phi 1.6$  mm를 사용하였다. 시편은 활보만을 분리하여 그림 2의 시험치구에 장착하고 압축과 풀림(Load/Unload)을 반복하여 2회 시험하였다. 이때 시험치구의 하단부분은 고정핀을 이용하여 스프링이 한쪽 방향으로 슬라이딩이 가능하게 조절하여 시편의 4개를 시험하였으며, 별도로 2개의 스프링 활보시편은 방향성을 제한하여 양쪽방향을 모두 고정시켜 스프링의 변형 상태를 확인하였다. 본 논문에서는 각 시편에 대한 평균 스프링 강성을 표기한다.



Type-A

Type-B

Type-NA



기존 상단스프링

변경 상단스프링

그림 3. 상단고정체 스프링 구조도

스프링의 최외곽 직경이  $\phi 61.2$ mm로 OR홀의 내벽직경  $\phi 60$ mm를 적용하면 설계상 1.2mm가 놀리게 되므로 이를 고려하여 2배의 변형을 반영한 2.5mm의 Load/Unload의 2회 반복시험을 수행하였다. 시편은 TSM-100 인장압축시험기를 이용하여 특성시험을 수행한

결과 그림 4에서 보는 것과 같은 스프링 시편 하단부에서 굴곡현상이 발생하여 변형이 일어나는 것을 확인하였다. 최적화된 Type-NA는 이런 굴곡현상을 없애기 위해 하단부 활보의 절곡부분을 없애고 고정틀을 두껍게 설계변경하여 제조하였다. Type-NA 스프링에서는 Type-A나 Type-B처럼 굴곡현상은 나타나지 않았다.

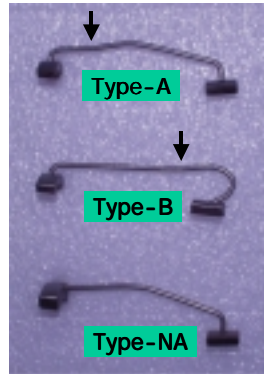


그림 4. 상단 스프링 시편의 굴곡 현상

Type-A의 스프링 특성시험 결과는 표 1과 같으며 특성곡선은 그림 5와 같다. 표 1에서처럼 스프링력의 값은 1.2 mm 위치와 0.9 mm 위치에서의 값을 표시하였다. 1.2 mm에서의 강성이 강할 경우 기술적 검토 결과를 이용하여 0.9mm의 부하값이 적정할 것으로 판단되어 이 위치에서의 값을 활용하였다.

표 1. 상단 스프링의 Load/Unload 스프링 강성 결과표

시편 구분	Load/Unload (kgf/1.2mm)	Load/Unload (kgf/0.9mm)	비 고
Type-A	4.315/1.170	3.407/0.508	k = 3.6 kgf/mm
	4.407/1.079	3.356/0.740	
Type-B	19.529/0.542	16.901/0.523	k = 17.5 kgf/mm
	21.703/0.340	19.987/0.398	
Type-NA	8.274/0.537	6.760/0.259	k = 6.9 kgf/mm
	8.237/1.056	6.665/0.395	

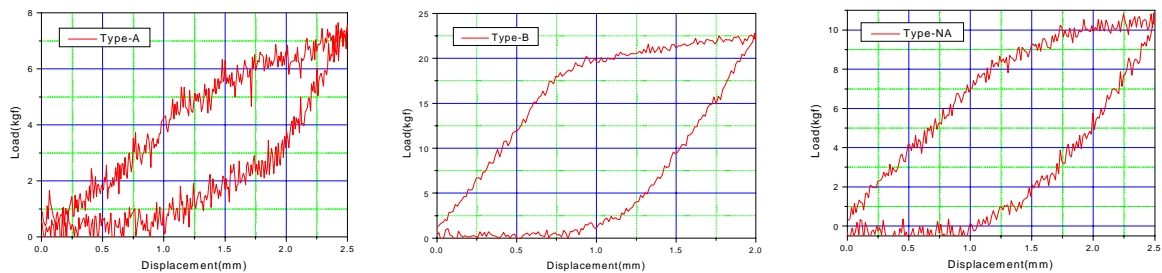


그림 5. 상단 스프링 변위 vs. Load 특성곡선

직경 1.6 mm의 인코넬 x-750 재질로 제조된 상단스프링은 캡슐의 균형적인 보강을 위해 기존의 3개 활보를 6개로 보강하여 제조되었다. 2종류를 선행 제조하여 스프링 특성시험을 수행하였으며, 특성시험결과를 보강하여 최적화된 상단스프링을 제조하고 이에 대한 강성시험을 수행하였다. 모두 3종류의 상단스프링에 대한 특성시험 결과 Type-A가 성능상 우수한 것으로 나타났으나, 실제 시험결과 과부하에 대하여 스프링 활보의 굴곡 변형이 일어나므로 장기적인 운전에 적합하지 않은 것으로 판명되었으며, Type-B의 경우 스프링력이 과도하게 강하여 OR홀 벽면 또는 스프링 활보의 마모가 우려되며 캡슐의 장착 복원이 어려울 것으로 판단된다. 최적화된 Type-NA는 Type-A에 비해 스프링력이 약간 강하나 실제 캡슐의 상단을 지지하면서 스프링 활보의 변형이 일어나지 않도록 설계되었다. Type-A의 경우 평균 스프링 강성은 평균 3.6 kgf/mm이며, Type-B는 17.5 kg/mm이었다. 최적화된 Type-NA는 평균 6.9 kgf/mm이다. 상단스프링은 OR홀 벽과 수직하게 작용함으로 너무 강하거나 너무 약할 경우 캡슐과 하나로 OR홀 벽에 영향을 준다. 이 상단스프링의 수직 스프링력은 하단 눌림 스프링이 캡슐을 컵 스파이더에 장착하고 제 위치로 잡아올리는 스프링력보다 지나치게 클 경우 장전에 따른 또다른 문제를 야기시키므로 적절한 스프링력을 보유하여야 한다. 상단스프링의 수직 스프링력은 수평의 마찰계수 등을 고려하여 대략 30% 수준이므로 실제 하단스프링의 스프링력보다 상단스프링의 수평스프링력은 작아야 한다. 하단스프링의 스프링력은 장전시 대략 17 kgf이므로 캡슐의 장착시 복원력인 상단스프링의 수직력보다 크므로 장전에 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

### 3.2 하단 스프링(Bottom Spring)

캡슐의 가장 하단에 위치한 Rod Tip이 스파이더 컵에 고정하기 위해 캡슐의 중심축(Central Rod)이 압축 후 하단스프링에 의해 일정 간격으로 복원하여 캡슐을 유지시켜 주게 된다. 이때 하단스프링은 일정간격에서의 스프링력을 유지하게 되는데 이 스프링력은 상단스프링의 측면의 스프링력보다 커야하고 너무커서 지지상태를 유지하는 Rod Tip 스파이더와 스파이더 컵에 손상을 주어서는 안된다. 또한 4kg의 캡슐 전체무게 이상의 스프링력을 확보해야한다. 하단스프링은 하나로 핵연료와 동일하게 직경  $\phi 2.3$  mm인 Inconel x-750으로 제작된 코일형태의 스프링으로 그림 6과 같이 길이는 장착전 62 mm이고 장착후 44.67 mm를 유지하게 된다. 이때 최대 하중시 27 mm까지 눌릴 수 있다. 코일의 유효 감김수는 9번이며 코일의 원주는  $\phi 16.5$  mm의 외경과  $\phi 11.9$  mm의 내경을 갖는다.

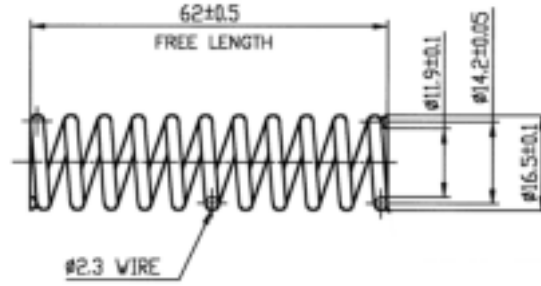


그림 6. 신형핵연료 캡슐 하단 스프링(Type-C) 개략도

시편은 Type-C로 명명하고 시편 C-1부터 4개의 시편을 상기의 시험기를 이용하여 반복실험을 하고 마지막 C-4시편은 스프링이 완전하게 접촉이 될 수 있도록 변위의 제한을 주지 않고 Load 시험을 수행하였다. 시험결과는 표 2와 같이 우선 10mm가 눌렸을 때 스프링력과 장전시 스프링이 유지되는 17.3mm에서의 스프링력을 확인하였다. 시험결과 스프링 강성은 1.0 kgf/mm이며 특성곡선은 그림 7과 같다.

표 2. 하단 스프링의 Load/Unload 스프링 강성 결과표

시편 번호	Load/Unload (kgf/10mm)	Load/Unload (kgf/17.33mm)	비 고
Type-C	9.940/9.648	16.158/16.628	k = 1.0 kgf/mm
	10.176/9.732	16.582/16.236	
	10.062/9.571	17.052/17.312	
Free Load	10.979	17.978	40.487 kgf (35mm Contact)

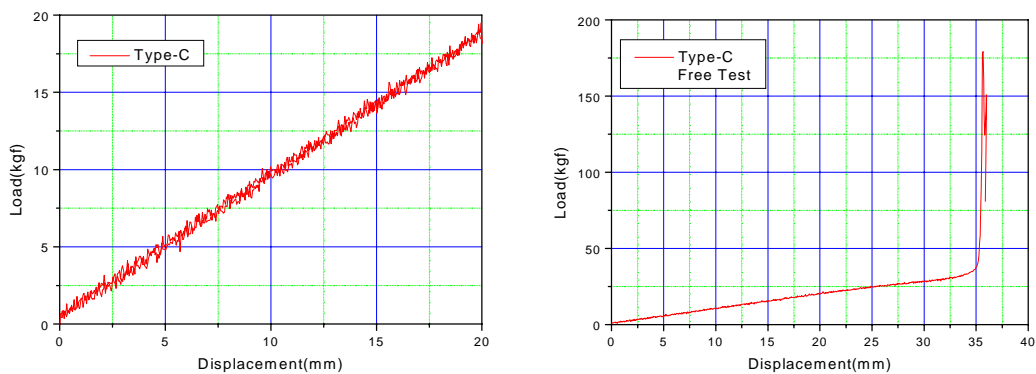


그림 7. 하단 스프링 변위 vs. Load 특성곡선

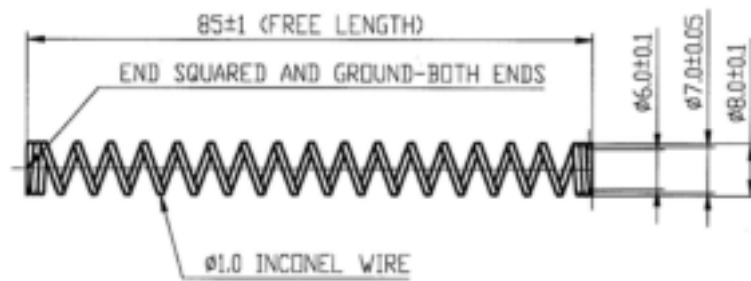
직경  $\phi 2.3$  mm Inconel x-750 재질의 하단 코일스프링은 장착 전 62 mm 자유길이를 갖고 있다가 장착시 30 mm 이상 눌린 후 장착이 완료되면 17.33mm의 눌림상태를 유지



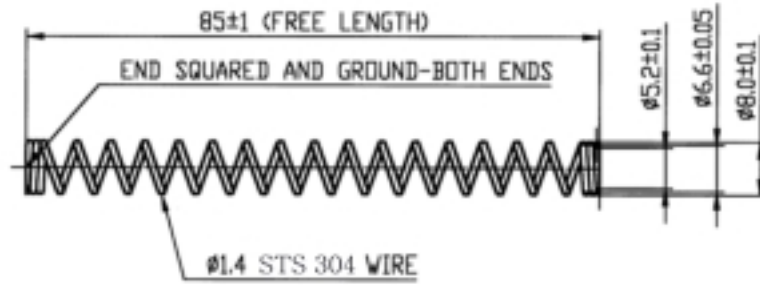
하게 된다. 이때의 스프링이 갖는 평균 스프링력은 대략 17 kgf를 갖는다. 스프링 강성은 약 1.0 kgf/mm으로 상단스프링이 갖는 스프링력의 수직력에 대응하는 충분한 힘이라고 판단된다. 또한 적당한 스프링력이 스파이더 컵에 작용하여 캡슐전체를 지지하는데 적당하다고 판단된다. 하단스프링을 제한없이 압축한 결과 설계치와 상충하는 35mm에서 접촉되는 것을 확인하였으며 이때의 스프링력은 40.487 kgf로 나타났다. 실제 캡슐의 무게가 대략 4 kg임을 감안하면 적절한 스프링력으로 판단할 수 있다.

### 3.3 프레넘 스프링(Fuel Plenum Spring)

프레넘은 소결체가 연소하면서 발생하는 핵분열기체의 수집공간으로 프레넘 스프링은 핵분열기체의 수집공간 확보와 시험봉내 소결체의 흔들림을 방지하고 소결체가 연소하면서 발생할 수 있는 위치변화를 최소화하도록 하는 역할을 수행하게 된다. 프레넘 스프링은 시험봉내의 상단에 위치하여 상부는 상단 봉단마개와 접촉하고 하부는  $Al_2O_3$ 의 알루미늄 디스크에 접촉하도록 되어 있다. 현재 상용연료에 사용되는 프레넘 스프링은 Inconel 재질의 스프링과 Stainless steel 재질의 스프링으로 2가지 종류를 사용하고 있다. 본 캡슐에서는 직경  $\phi 1.4$  mm의 STS-304 재질로 제작된 코일형태의 프레넘 스프링으로 Ventage-5H 상용연료에 사용되는 프레넘 스프링을 캡슐 시험봉의 프레넘을 고려하여 제작된 스프링이다. 프레넘 스프링의 특성시험을 위해 우선 직경  $\phi 1.0$  mm의 Inconel x-750 재질로 제작된 코일형태의 Type-D 프레넘 스프링과 직경  $\phi 1.4$  mm의 STS-304 재질의 Type-ND 스프링으로 2가지를 가지고 특성시험을 수행하였다. 그림 8과 같이 프레넘 스프링의 스프링길이는 85mm이고 원주직경은  $\phi 8.0$  mm의 외경으로 제조되었다. 장착전 85 mm에서 시험봉에 장입하여 봉단마개를 용접한 상태의 프레넘 스프링의 길이는 약 5mm가 압축하게 되어 있다.



(Type-D)



(Type-ND)

그림 8. 신형핵연료 캡슐 프레넘 스프링 개략도

2종류의 프레넘 스프링에 대한 압축과 풀림(Load/Unload)를 반복하여 스프링의 특성 변화를 확인하였다. 시편은 Type-D와 Type-ND로 명명하고 각각의 Type에 대해 4개의 시편을 상기 방법에 의거하여 반복실험을 하였다. Type-D의 프레넘 스프링은 15mm를 눌러 변위에 따른 스프링의 Load 및 Unload를 1회 실험하고 Type-NC는 10mm를 눌러 변위에 따른 Load 및 Unload를 2회 반복 시험하여 스프링력을 확인한다. 실제 5mm가 눌리므로 표 3과 같이 5mm와 10mm 위치에서의 스프링력을 확인하였다. 변위에 따른 스프링 특성 곡선은 그림 9와 같다.

표 3. 프레넘 스프링 Load/Unload 스프링 강성 결과표

시편 번호	Load/Unload (kgf/5mm)	Load/Unload (kgf/10mm)	비 고
Type-D	1.732/1.770	2.707/2.268	k = 0.3 kgf/mm
	1.679/1.630	2.620/2.008	
Type-NC	3.676/9.011	7.112/6.810	k = 0.7 kgf/mm
	3.578/3.160	6.893/6.749	

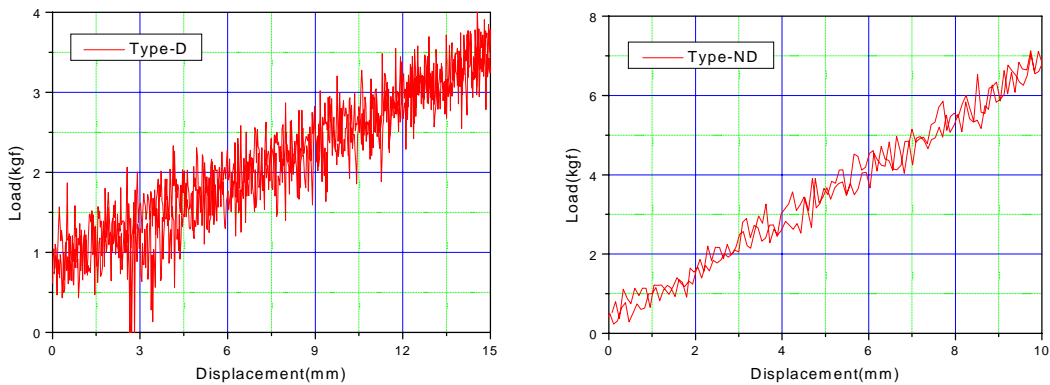


그림 9. 프레넘 스프링 변위 vs. Load 특성곡선

직경  $\phi 1.0$  mm Inconel x-750 재질의 Type-D 프레넘 코일스프링은 시험중 상하 노이즈가 많아 취득자료의 상하격차가 크게 나타났다. 이는 스프링의 신축성이 좋고 스프링이 눌리는 과정에서 직진도 유지가 되지 않고 치구의 측면과 접촉되어 나타나는 노이즈로 판단된다. 이는 실제 시험봉을 제작하여 캡슐에 장착할 경우 진동에 의한 노이즈로 관측될 것으로 판단되며 시험봉의 프레넘 스프링으로 사용이 적합하지 않을 것으로 판단된다. Type-D의 장착 후 5 mm 눌렀을 때 스프링력은 평균 1.5 kgf로 관측되었으며 0.3 kgf/mm의 스프링 강성을 갖는다. 반면에 직경  $\phi 1.4$  mm Stainless Steel 304 재질의 Type-ND 프레넘 코일스프링은 특성곡선에서처럼 노이즈가 적게 나타났으며 5 mm 눌렀을 때 평균 3.5 kgf로 측정되었다. 이때 스프링 강성은 0.7 kgf/mm 이다. 따라서 시험봉 내에 프레넘 스프링으로 Type-ND의 스프링이 적절한 것으로 판단된다.

### 3.4 시험봉 누름 스프링(Fuel Hold-down Spring)

시험봉 누름스프링은 하나로 냉각 유체가 캡슐 내에 지나가면서 발생할 수 있는 시험봉의 진동 및 상하유격을 고정하는 역할을 할 수 있도록 고안된 스프링이다. 하나로에서는 설계유량이 12.7 kg/s로 제한하고 있으며, 이때의 압력강하량은 200 kPa 이상을 유지하도록 설정하고 있다. 현재의 본 무게장 캡슐 내에 흘러가는 유량은 7.45 kg/s로 이때의 유속은 대략 9.4 m/s로 상당히 빠른 유속을 보인다. 따라서 이러한 유속에서 시험봉의 진동을 고정하기 위해 채택된 것이 시험봉 누름스프링이다. 시험봉 누름스프링의 선택을 위해 그림 10과 같이 직경  $\phi 1.0$  mm의 Inconel x-750 재질로 제작된 Type-E 스프링과 직경  $\phi 1.4$  mm의 STS-304 재질로 제작된 Type-NE의 코일형태 스프링으로 길이는 10mm이며 장전시 2.5 mm가 눌리게 된다. 이때 스프링은 상단하우징과 시험봉의 상단 봉단마개 사이에 위치하게 되는데 봉단마개의 끝단은 계단식 단을 두어 스프링이 고정되도록 설계변경을 수행되었다.

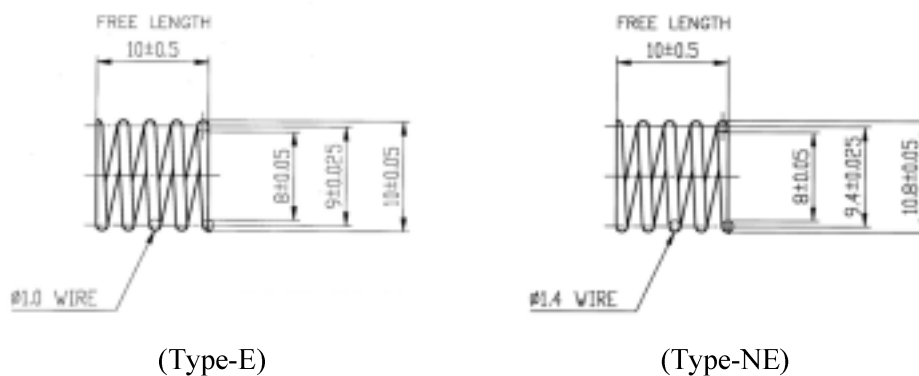


그림 10. 신형핵연료 캡슐 시험봉 누름스프링 개략도

두 종류의 시험봉 누름스프링의 시편을 압축과 풀림(Load/Unload)를 반복하여 스프링의 특성변화를 확인하였다. 시험봉 누름 스프링은 3.0 mm를 눌러 변위에 따른 스프링의 압축 및 풀림(Load/Unload)을 실험하여 스프링 강성을 확인하였다. 실제 시험봉 누름스프링은 2.5mm가 눌리므로 표 4과 같이 2.5mm와 3mm 위치에서의 스프링력을 확인하였다. 변위에 따른 스프링 특성곡선은 그림 11과 같다.

표 4. 시험봉 누름스프링 Load/Unload 스프링 강성 결과표

시편 번호	Load/Unload (kgf/2.5mm)	Load/Unload (kgf/3mm)	비 고
Type-E	1.657/1.132	1.854/1.494	k = 0.6 kgf/mm
	1.614/1.512	1.926/1.552	
Type-NE	5.470/5.406	7.210/7.047	k = 2.3 kgf/mm
	5.521/5.260	6.850/6.561	

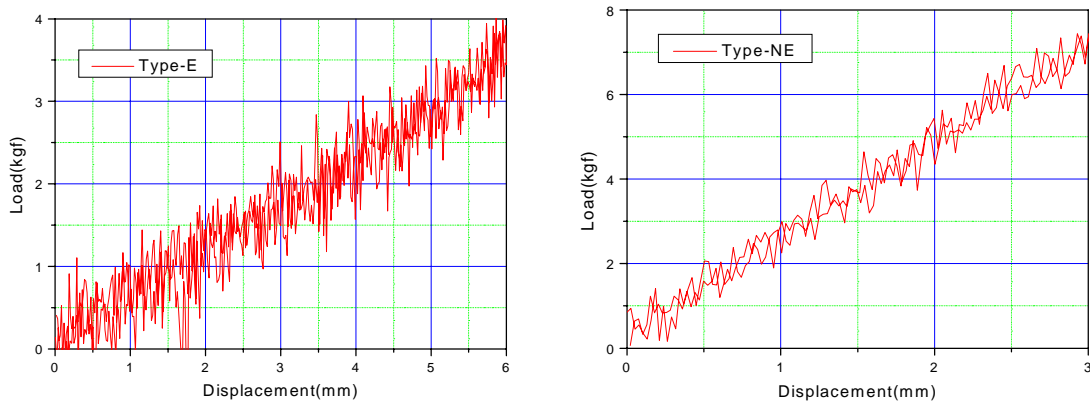


그림 11. 시험봉 누름스프링 변위 vs. Load 특성곡선

직경  $\phi 1.0$  mm Inconel x-750 재질의 Type-E 시험봉 누름스프링은 시험중 상하 노이즈에 의한 취득자료의 상하격차가 심하게 나타났으며, 실제 6mm까지 압축과 풀림을 시험하였다. 그러나 스프링의 신축성이 크고 스프링이 눌리는 과정에서 치구의 측면과 접촉되어 노이즈가 많이 나타났다. 이때의 Type-E의 스프링 강성은 0.6 kgf/mm로 2.5mm가 눌린 상태에서의 스프링력은 대략 1.6 kgf 정도이다. 캡슐내에 흐르는 유량의 유속이 9.4 m/s로 시험봉 주의를 흐르게 될 경우 Type-E의 스프링은 강성면에서 부적절할 것으로 판단된다. 직경  $\phi 1.4$  mm STS-304 재질의 Type-NE 시험봉 누름스프링은 강성면에서 Type-E 보다 4배의 강성을 보이며 실제 시험봉의 고정측면에서 효과적인 성능을 보인다. Type-NE의 스프링강성은 2.3 kgf/mm이며 2.5mm 눌린상태에서의 스프링력은 5.5 kgf 이

다. 시험봉의 성능분석 결과[1]에 의하면 시험봉의 조사성장이 5년동안 대략 0.2mm 정도 임을 감안하면 시험봉의 상하 고정을 위해 Type-NE의 시험봉 누름스프링이 적당한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

고연소도 경수로 핵연료용으로 개발된 큰결정립  $UO_2$  소결체는 하나로에서 약 5년간 연소도 70 MWd/kgU까지의 노내 조사시험을 수행하게 된다. 하나로 OR홀에 장전될 조사 시험용 무게장캡슐은 하나의 제한조건인 설계유량이 12.7 kg/s 이하, 압력강하량 200 kPa 이상을 만족하는 운전조건에서 구조적 건전성을 유지하여야 한다. 무게장캡슐은 약 2.5년 조사후 시험봉집합체 1개를 인출하여 조사후 성능시험을 수행하고 나머지 1개의 시험봉 집합체는 새로운 캡슐에 장착하여 목표연소도까지 조사시험을 수행하도록 되어 있어 핫셀내에서 분해조립이 용이해야 한다. 이에 따라 신형소결체의 조사시험용 무게장 캡슐에 장착되어 있는 하단스프링, 상단스프링, 프레넘스프링 및 시험봉누름스프링 등 4종의 스프링에 대한 압축 및 풀림(Load/Unload)을 반복하여 최적의 스프링을 설계하였다. 시험결과 상단스프링은 6.9 kgf/mm의 강성을 보였으며, 하단스프링은 1.0 kgf/mm로 하나의 0.8 kgf/mm보다 약간 크게 나타났다. 프레넘 스프링의 강성은 0.7 kgf/mm이었으며 시험봉 누름스프링은 2.3 kgf/mm로 4종의 스프링이 장기간 시험예정인 캡슐의 구조적 건전성 확보에 타당한 것으로 판단된다.

#### 5. 후기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 지원으로 수행되었다. 본 연구를 도움을 주신 하나로이용기술개발팀, 한라운영기술개발팀 및 DUPIC 핵연료개발팀에 감사드립니다.

#### 6. 참고문헌

- [1] 김대호 외 “고연소도 신형  $UO_2$  소결체의 하나로 캡슐 조사시험을 위한 시험봉 설계,” 2000 추계원자력학회, 2001. 4.
- [2] 이찬복 외 “경수로 핵연료용 큰결정립  $UO_2$  소결체 조사시험, HANARO Workshop 2000, 2000. 12.
- [3] 김대호 외 “경수로용 고연소도 핵연료 큰결정립  $UO_2$  소결체의 하나로 조사시험용 무게장캡슐의 설계최적화,” 2001 추계원자력학회, 2001. 10.

- [4] 배기광 외 “DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석보고서,” KAERI/TR-1157/98, 1998.10.
- [5] 송기찬 외, “DUPIC 핵연료 조사 시험계획서,” KAERI/TR-1545/2000, 2000. 4.
- [6] 조영갑 외 “하나로 핵연료 마모감소를 위한 설계 개선”, KAERI/TR-1594/2000, 2000. 6.
- [7] 이영신 외 “하나로 시험 연료 동특성 연구”, KAERI/CM-161/1996, 1997. 6.
- [8] 강홍석, "진동 및 마모손상 저감 측면에서 제안하는 조사 시험봉 설계 개선 방안", AF-TM-FP-00002. Rev.1, KAERI, 2000.9.