2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

경수로용 고연소도 핵연료 큰결정립 UO_2 소결체의 하나로 조사시험용 무계장캡슐의 설계최적화

Non-instrumented Capsule Design of HANARO Irradiation Test for the High Burn-up Large Grain UO_2 Pellets

김대호, 이찬복, 오동석, 강흥석, 방제건, 김영민, 양용식
정연호, 서철교, 김봉구, 오종명, 류정수, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 개발된 큰결정립 UO_2 소결체의 하나로 노내 조사시험을 위한 무계장 캡슐을 설계하였다. 시험용 큰결정립 UO_2 소결체는 연소도 70 MWD/kgU 이상까지 하나로에서 연소시킬 계획이다. 70 MWD/kgU 이상까지 연소하기 위해서는 대략 60개월 의 연소기간이 필요하며 캡슐의 건전성 확보를 위하여 30개월 연소후 새로운 캡슐로 교체할 계획이다. 하나로 캡슐 조사시험에 요구되는 ONB(Onset of Nucleate Boiling) 및 핵연료 용융 방지 등의 안전 요건을 만족시키면서, 캡슐의 열수력 및 기계적 건전성이 확보되고 캡슐이 마모 손상 없이 장기간 동안 하나로에서 조사될 수 있도록 캡슐의 최적화 설계를 수행하였다.

Abstract

Non-instrumented capsule was designed to irradiate the large grain UO_2 pellet developed for the high burn-up LWR fuel in the HANARO in-pile capsule. UO_2 pellets will be irradiated up to the burn-up higher than 70 MWD/kgU in HANARO. To irradiate the UO_2 pellets up to the burn-up 70 MWD/kgU, need the time about 60 months and ensure the integrity of non-instrumented capsule for 30 months until replace the new capsule. In addition, to satisfy the safety criteria of HANARO such as prevention of ONB(Onset of Nucleate Boiling), fuel melting and wear damage of the capsule during the long term irradiation, design of the non-instrumented capsule was optimized.

1. 서 론

경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 개발된 큰 결정립 신형 UO_2 소결체의 노내 성능 시험을 통한 검증을 위해 하나로에서의 캡슐 조사시험을 추진 중에 있다.[1,2] 캡슐 조사시험은 경수로 핵연료의 출력 및 온도 조건과 유사하거나 보수적인 조건에서 수행될 예정이며, 조사후에는 핵분열 기체방출, 소결체의 안정성 및 고연소도에서의 결정립 세분화 및 핵분열기체 기포 생성 등과 같은 Rim effects 검사 등이 수행될 예정이다.

하나로 노내 캡슐에 장전될 시험봉의 UO_2 소결체는 고연소도용으로 개발되었으며 별도의 화합물 첨가제를 사용하지 않고 1300℃에서 4시간 공기분위기에 열처리된 U_3O_8 단결정을 소결체 제조공정에 4 ~ 6% 첨가하여 제조한 큰결정립 소결체이다. 이때 성장되는 결정립의 크기는 12 ~ 20 ㎛(기존 소결체 결정립 크기는 6 ~ 8 ㎛)이다. 이 기술은 현재 한전 원자력연료주식회사에서 양산공정 실증시험 중에 있으며 현재 우수한 결과를 보이고 있다. 큰 결정립 UO_2 소결체의 연소 성능 향상을 검증하기 위해 기존의 UO_2 소결체와 함께 동일한 연소조건에서 하나로에서 조사시험을 수행할 계획이다.

개발된 큰결정립 UO_2 소결체의 하나로 캡슐 노내 조사시험을 위한 시험봉을 분석하였다. 시험봉의 충진가스의 종류 및 압력을 조절하여 시험봉의 온도 조건을 경수로 핵연료의 실제 연소조건과 동일하도록 하였다. 시험봉의 제원은 경수로용 핵연료와 동일하게 하고, 시험봉의 성능을 분석한 결과 충진기체로는 100% Helium 1기압, 캡슐의 냉각수 유량 7.447 kg/sec 등의 조건이 최적인 것으로 확인하였으며, 최대선출력 750 W/cm까지 핵연료보 용융 및 ONB가 일어나지 않는 것으로 나타났다.

큰결정립 신형 UO_2 소결체의 하나로시험용 캡슐은 그 동안 Dupic 핵연료의 조사 시험을 위해 개발된 무계장캡슐의 설계를[3,4] 기본으로 하여, 신형 소결체의 조사 요건에 따른 설계개선을 수행하였다. 큰결정립 신형 소결체는 70 MWD/kgU 이상의 연소도까지 고온 및 고출력에서 장기간 연소되기 때문에 시험 핵연료봉 및 캡슐의 건정성 유지 및 하나로 Outside Core(OR 홀)의 안전성 확보에 최우선적인 관심을 두고 설계하였다. 또한 6 개의 시험봉을 일시에 조사하기 위해 그림 1과 같이 상하의 2층 구조로 하여 각각 시험봉을 3 개씩 배치할 예정이다. 그리하여 연소도 35 MWD/kgU에 도달하면 조사후 핫셀에서 하나의 시험봉 다발을 인출하여 중간 연소도에서의 신형 UO_2 소결체의 성능을 조사후 시험을 통해 검사할 예정이다. 다른 시험 핵연료봉 다발은 새로운 캡슐에 넣어서 하나로에 재장전되어 70 MWD/kgU 이상까지 조사할 계획이다. 하나로에서의 총 연소기간은 하나로의 운전 효율, 약 75 %를 고려하면 5년 정도 소요될 것으로 예상된다.

본 논문에서는 큰결정립 신형 UO_2 소결체의 하나로 조사시험을 위하여 5 년여의 장기간 조사에 따른 캡슐의 내구성이 확보되어야 하나, 단계적으로 대략 2.5년 정도의 내구성을 확보하고 노내 조사기간 중의 시험 핵연료봉의 냉각과 우회류 및 회전류에 의한 진동등을 최소화하고 캡슐의 마모 최소화를 동시에 만족시키도록 캡슐의 설계 최적화를 시도하였다.

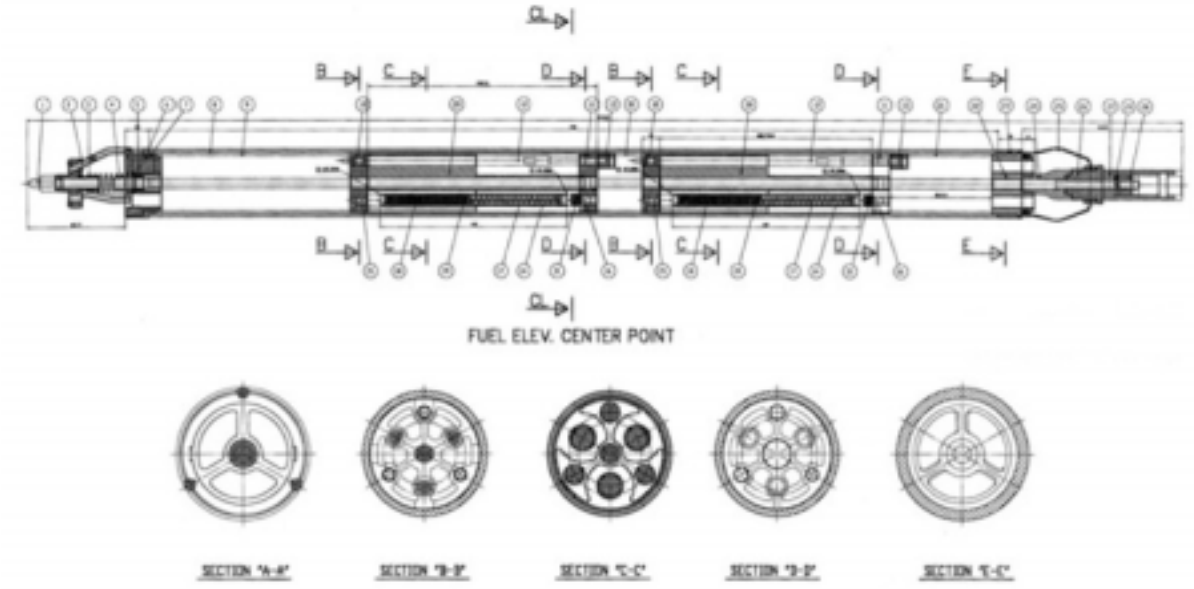


그림 1. 신형 UO_2 소결체 노내시험용 캡슐 개략도[5]

2. 구조별 특성

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 중의 시험 핵연료봉의 냉각과 우회류 및 회전류에 의한 진동 등을 최소화하여 캡슐의 마모 최소화를 동시에 만족시키도록 캡슐의 설계 최적화를 시도하였다. Dupic 핵연료의 조사시험을 위해 개발된 무계장캡슐의 설계를[3,4] 기본으로 하여 장기간의 연소되기 때문에 시험 핵연료봉 및 캡슐의 건정성 유지 및 하나로 OR 홀의 안전성 확보에 최우선적인 관심을 두고 설계하였다.

2.1 상단고정체 스프링(Top Guide Spring Assembly)

상단고정체 스프링은 캡슐이 하나로의 OR벽에 유일하게 접촉하는 부위로 캡슐의 진동흡수 및 상단부의 고정역할을 수행하며 재질은 Inconel-x750이다. 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[6]되었다.

또한, 3개의 스프링이 장착된 하나로 18봉 또는 36봉 핵연료는 설계유량 12.7 kg/s에서 비대칭 진동현상이 관측되었다. 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 발생되는 진동에 의한 마모를 최소화하기 위해 스프링의 개수 및 방향성을 고려하여 설계변경을 시도하였다.

그림 2에서 보는 것과 같이 기존 18봉의 상단고정체 스프링은 3개로 약 30˚가량 한 방방으로 누워 있다. 이를 6개의 스프링을 등간격으로 배열하고, OR홀 벽에서 수직으로 배치하여 그림에서 보는 것과 같이 변경하였다. 이때의 스프링력을 40N/mm이며, 3년간의 중성자 조사에 의해 35N/mm 정도로 감소할 것으로 예상된다.

구조상으로는 기존의 스프링의 경우 상단고정체에 용접되어 있는 반면에 변경된 스프링은 상하의 유격만큼의 이동이 가능하고 좌우 회전이 가능토록 하여 캡슐 장착시 OR홀 벽에 간섭을 최소화하였다. 스프링과 캡슐몸체와의 간섭이 축소되어 진동에 의한 마모가 줄어 들것으로 판단된다.

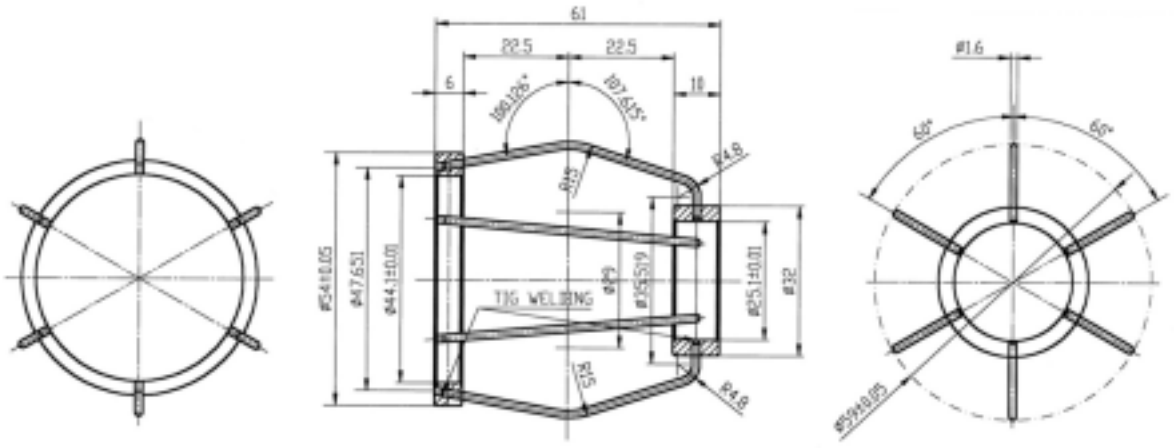
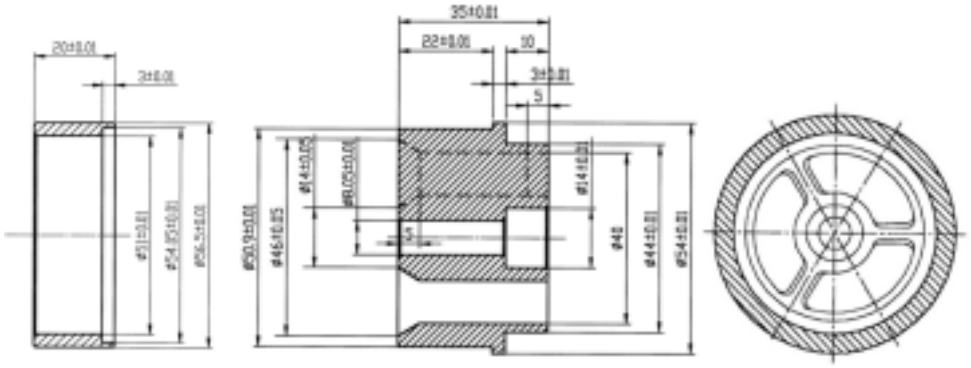


그림 2. 상단고정체 스프링 구조도

2.2 상.하단고정체(Top & Bottom End Plate)

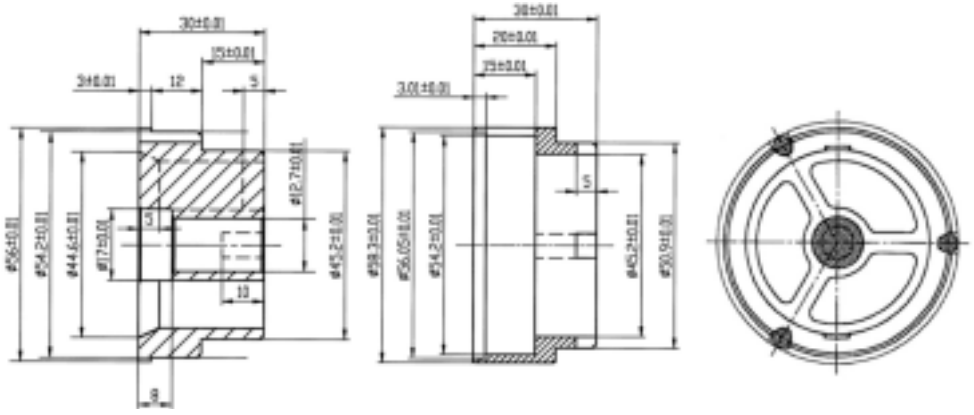
상.하단고정체는 캡슐의 중심 유지와 OR홀 벽에 가장 근접하는 부품으로 진동 및 기타 캡슐의 상하 구조적 건전성 확보에 중요한 부품이다. 상단고정체(Top End Plate)는 상단스프링의 하단부 고정틀 역할을 수행하면서 동시에 내통(Inner Tube)을 누름으로서 내부 구조물의 흔들림이 없도록 눌림 고정체 역할을 하게 된다. 그림 3에서와 같이 상단고정체는 이종 재질의 2개 부품으로 구성되어 있다. Stainless Steel 재질의 주 몸체에 알루미늄 재질의 덮개가 씌어져 하나로 OR홀 벽에 손상이 가지 않도록 연한 재질을 이용하였다. 내부의 몸체는 내통을 누르고, 덮개는 외통(Outer Tube)을 고정하게된다. 몸체의 중앙부는 적당한 챔퍼를 주어 유체의 흐름을 원활하게 하여 캡슐에 간섭이 일어나지 않도록 하였으며 추후 계장선의 설치에 따른 공간확보에 도움이 될 것으로 판단된다.



덮개부(Cover) 몸체 상단면

그림 3. 상단고정체(Top End Plate) 구조도

하단고정체(Bottom End Plate)는 그림 4와 같이 캡슐 몸통이 회전하지 않도록 잡아 주는 3개의 Guide Arm을 고정하는 홈이 있고 상단고정체와 같은 이종 재질의 2개 부품으로 설계되었다. 덮개부분은 내통의 하단부를 받쳐주고 회전하지 않도록 4개의 홈이 있으며 외통의 하단부를 받쳐주게 되어 있다. 몸체부분은 중심봉(Central Rod)을 고정하는 부싱와 접촉하게 되어 있고 몸통부를 받쳐주는 하단스프링과 접촉하게 되어 있어 Stainless Steel의 강한 재질이 적합하다. 특히 3개의 Guide Arm이 닿이는 홈은 알루미늄과 스테인레스가 함께 지지함으로서 회전 및 진동모드에 의한 마모를 최소화할 수 있다. 중앙의 유체 통과부위를 가능한 크게 하여 유체의 흐름에 따라 캡슐에 미치는 진동을 최소화하였다.



몸체 덮개(Cover) 하단면

그림 4. 하단고정체(Top End Plate) 구조도

2.3 하단안내집합체(Bottom Guide Assembly)

하단안내집합체는 그림 5와 같이 Guide 몸체, 알루미늄 Seating Ring 및 삼발이

(Guide Arm)으로 구성되어 있다. 재질은 Zircaloy-4 ASTM B351-85 Grade R60804이며 삼발이와 몸통부분은 EB 용접을 한다. 기존의 Guide와 큰차이는 없으나 삼발이(Guide Arm)의 끝단부분의 기존 반달형 적삭부분을 없애고 Arm의 직경 굵기를 그대로 끝단까지 이어지도록 설계하였으며, 하단고정체의 삼발이 삽입 홈에 중심으로부터 각각 60° 의 각을 주어 삼발이가 회전 진동 모드에 의해 견디도록 설계되었다. 홈의 접촉되는 길이는 17 mm를 주어 장전시 간섭이 일어나지 않도록 설계되었으며 Guide 모체의 Central Rod와 접촉하는 부분은 산화처리를 통해 마찰 및 진동에 의한 마모가 없도록 설계하였다.

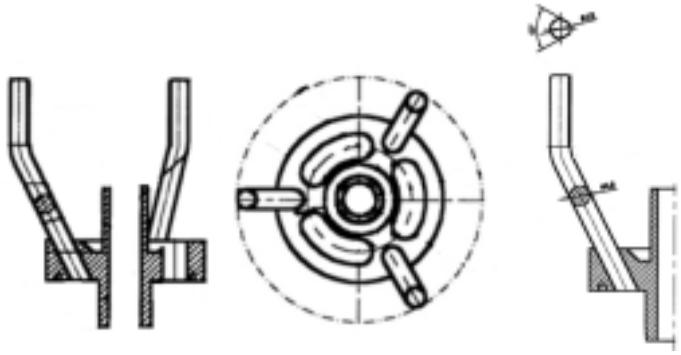
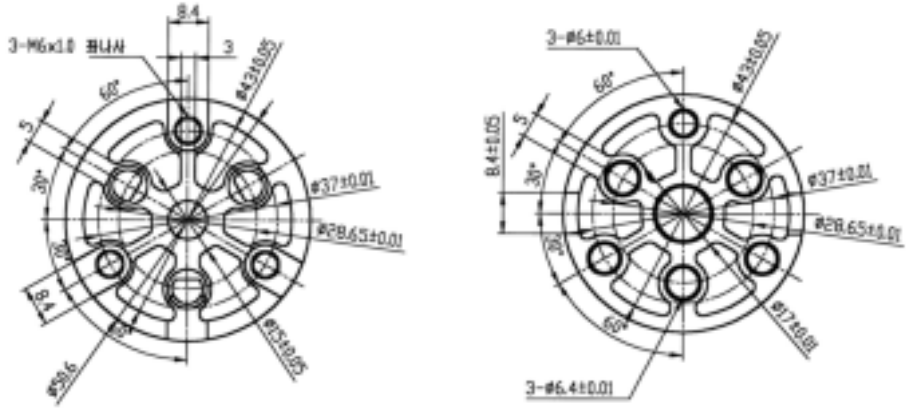


그림 5. 하단안내집합체(Bottom Guide Assembly) 부품도

2.4 시험봉 집합체(Bottom Guide Assembly)

2.4.1 상단 및 하단 하우징(Upper and Lower Housing)

시험봉 집합체의 상단 및 하단 하우징(그림 6참조)은 시험봉을 고정하는 역할을 수행하게 된다. 기존의 알루미늄 재질을 STS-304로 재질변경을 수행하여 지지봉(Support Rod)과의 확고한 고정역할 수행할 수 있도록 하였다. 아울러 지지봉의 회전에 의한 풀림을 방지하기 위해 하우징의 하단부에는 좌나사로 깎고 상단부에는 우나사로하여 체결시 회전을 방지하도록 하였다.



하단 하우징 상단 하우징

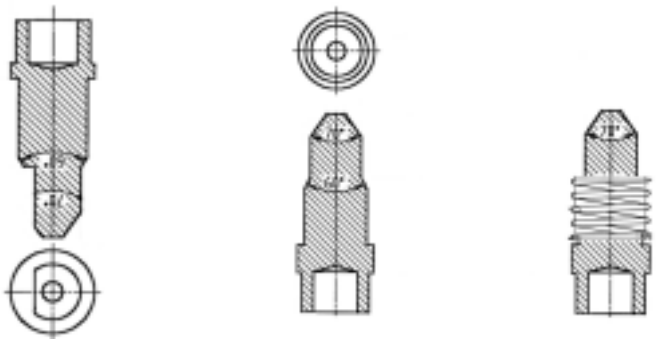
그림 6. 상단 및 하단 하우징(Upper and Lower Housing) 부품도

2.4.2 하우징 지지봉(Housing Support Rod)

지지봉의 하단부는 하단 하우징과 체결이 가능하도록 좌나사산으로 가공하였고 하우징의 재질과 이종의 STS-316의 재질로 변경하여 체결시 동종재질의 물리적 변형을 최소화하였다.

2.4.3 시험봉 봉단마개(Fuel Rod End Cap)

시험봉의 봉단마개는 그림 7과 같이 상단 및 하단 봉단마개가 있다. 하단 봉단마개는 시험봉의 회전을 방지하도록 반달형으로 가공하여 하단하우징과 체결토록 하였다. 상단 봉단마개는 빠른 유체의 흐름에 의한 시험봉의 상하 움직임으로 인해 진동에 따른 마모 또는 손상이 되지 않도록 시험봉 누름 스프링을 체결한다. 이때 누름스프링을 고정할 수 있도록 봉단마개 윗부분을 계단식 단을 두어 스프링이 고정되도록 설계변경을 수행하였다.



하단봉단마개　　상단봉단마개　　시험봉누름스프링

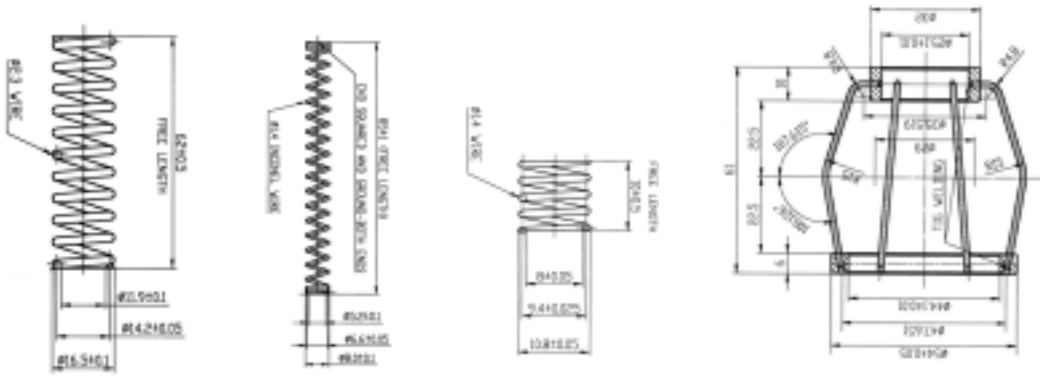
그림 7. 상단 및 하단 하우징(Upper and Lower Housing) 부품도

2.4.4 중성자 흡수관(Hafnium Tube)

큰결정립 UO_2 소결체의 조사시험봉의 설계요건은 경수로 핵연료 소결체의 연소 조건과 유사한 조건에서 연소도 70 MWD/kgU 이상까지 연소되어야 한다. 따라서 시험봉의 선출력은 500 - 200 w/cm의 범위에서 연소되어야 하나 하나로의 운전조건이 이 범위를 벗어나는 경우 원하는 연소조건을 맞추기 힘들다. U-235 4.5 w/o 농축도의 핵연료를 하나로 OR 홀에서 조사할 때, 핵연료의 출력변화에 대한 노심 핵설계 계산을 한 결과, 중성자 속이 높아서 조사 초기에는 중성자 흡수물질을 사용하여 시험봉의 출력을 감소시킬 필요가 있었다[7]. 중성자 흡수물질로는 Hf을 사용하는 경우, 시험봉의 출력을 크고 균일하게 유지시킬 수 있었다. Hf을 사용할 경우, 2.5 년 조사후에 새로운 캡슐로 대체할 때는 Hf을 제거해야한다. 시험봉의 조사조건을 최대 선출력 500 w/cm 이하로 유지하고, 최단 기간 동안 급격한 출력의 변화 없이 연소도 70 MWD/kgU 이상까지 조사시키기 위해서는 중성자 흡수물질로써 전반기에는 Hf을 사용하고, 후반기에는 Boron을 사용할 계획이다. Hafnium Tube는 시험봉집합체의 상단하우징 끝까지 덮도록 하여 추후 핫셀에서 손쉽게 분해가 될 수 있도록 제조하였다.

3. 스프링 구조특성

경수로용 신형핵연료 큰결정립 UO_2 소결체 노내조사시험을 위한 무계장캡슐에는 4종의 스프링이 사용된다. 상단스프링, 하단스프링, 프레넘 스프링 및 시험봉 누름스프링으로 그림 8과 같다. 4종의 스프링 중 상단스프링이 활보형태의 선스프링이고 나머지 3종의 스프링은 코일 스프링이다



하단스프링　　프레넘 스프링　시험봉누름스프링　　상단스프링

그림 8. 상단스프링(Top Guide Spring Assembly) 후보모형

3.1 상단 스프링(Top Guide Spring)

무계장캡슐은 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 상단 스프링의 설계 및 재질의 선택에 신중할 필요가 있다. 하나로의 18봉 핵연료의 경우 3개의 활보를 갖고 약 30° 가량 방향성을 갖는 스프링이 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. 실제 상단 스프링에 의한 마모는 방향에 따른 강성의 차이와 횡방향 진동모드, 회전진동모드 및 강체 진동모드[6] 등의 진동에 따른 마모 손상을 생각할 수 있다. 따라서 개선된 상단 스프링은 하나로 연료의 3개 활보로 구성된 스프링보다는 새로운 개념의 진동 및 진폭을 고려한 방향성 스프링 개념도입이 필요하다.

먼저, 상단 스프링의 강성을 보강하기 위해서는 4개 또는 6개의 활보를 이용하고 방향은 몸체에서 수직성을 갖도록 하는 단일 스프링을 채택하여 스프링강성을 증가시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이때 강성이 커지면 소성변형과 조사이완(Irradiation

Relaxation)도 커지므로 스프링이 위치하는 부분에서의 중성자속을 고려하여야 한다. 현재 스프링 위치에서의 중성자속은 최대 약 6 x 10^{12} n/cm^2.s (0.821 Mev 이상)이므로 3년 동안의 fluence는 5.46 x 10^{20}이 된다. 이 경우 스프링력은 초기 스프링력의 약 11%를 잃어버리게 된다. 따라서 재료의 strain을 무시한다면 현재 설계된 스프링의 강성 20 N/mm는 18 N/mm 이하가 된다고 예측할 수 있다. 만일 스프링의 강성을 2배로 증가시킨다면 초기 강성은 40 N/mm 가 되고 수명 말기에는 약 35 N/mm가 되므로 대략 5 N/mm가량의 스프링력 이완을 고려해야 한다. 따라서, 개선된 스프링은 6개의 활보를 갖고 중심에 수직성을 갖도록 하여 운전중 활보의 손상으로 인하여 캡슐의 몸체가 하나로 OR홀의 벽면에 부딪히지 않도록 변경하였다. 스프링 활보의 재질은 인코넬 X-750을 사용하였으며 직경은 하나로 핵연료의 상단스프링과 동일한 Ø1.6 mm를 사용하였다.

3.2 하단 스프링(Bottom Guide Spring)

캡슐의 가장 하단에 위치한 Rod Tip이 그리드에 고정하기 위해 캡슐의 중심축(Central Rod)이 압축 후 하단스프링에 의해 일정 간격으로 복원하여 캡슐을 유지시켜주게 된다. 이때 하단스프링은 일정간격에서의 스프링력을 유지하게 되는데 이 스프링력은 상단스프링의 측면의 스프링력보다 커야하고 너무커서 지지상태를 유지하는 Rod Tip과 그리드에 손상을 주어서는 안된다. 또한 캡슐의 전체무게 이상의 스프링력을 확보해야하는 것도 당연하다. 하단스프링은 하나로 핵연료의 직경 ϕ2.3 mm Inconel x-750 재질로 제작된 코일형태의 스프링으로 길이는 장착전 62 mm 이고 장착후 44.67 mm를 유지하게 된다. 이때 최대 하중시 27 mm까지 눌릴 수 있다. 코일의 유효 감김수는 9번이며 코일의 원주는 ϕ16.5 mm의 외경과 ϕ11.9 mm의 내경을 갖는다.

3.3 프레넘 스프링(Fuel Plenum Spring)

프레넘은 소결체가 연소하면서 발생되는 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_3의 알루미나 디스크에 접촉하도록 되어 있다. 현재 상용연료에 사용되는 프레넘 스프링은 Inconel 재질의 스프링과 Stainless steel 재질의 스프링으로 2가지 종류를 사용하고 있다. 본 캡슐에서는 직경 ϕ1.4 mm의 STS-304 재질로 제작된 코일형태의 프레넘 스프링으로 Ventage-5H 상용연료에 사용되는 프레넘 스프링을 캡슐 시험봉의 프레넘을 고려하여 제작된 스프링이다. 그림 8과 같이 프레넘 스프링의 스프링길이는 85mm이고 원주직경은 ϕ8.0 mm의 외경으로 제조되었다. 장착전 85 mm에서 시험봉에 장입하여 봉단마개를 용접한 상태의 프레넘 스프링의 길이는 약 5mm가 압축하게 되어 있다.

3.4 시험봉 누름 스프링(Fuel Hold-down Spring)

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 무계장 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 직경은 ϕ1.4 mm의 STS-304 재질로 제작된 코일형태의 스프링으로 길이는 10mm이며 장전시 5.65mm가 눌리게 된다. 이때 스프링은 상단하우징과 시험봉의 상단 봉단마개 사이에 위치하게 되는데 봉단마개의 끝단은 계단식 단을 두어 스프링이 고정되도록 설계변경을 수행하였다.

4. 결 론

경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 개발된 큰결정립 UO_2 소결체는 하나로에서 5년(60개월)간 연소도 70 MWd/kgU까지의 노내 조사시험을 수행하게 된다. 2.5년후 2개의 시험봉집합체중 1개를 인출하여 조사후 성능시험을 수행하고 나머지 1개의 시험봉집합체는 새로운 캡슐에 장착하여 목표연소도까지 조사시험을 수행할 계획이다. 2.5년간 노내조사시험을 위해서는 구조적 건전성이 확보되고 핫셀내에서 분해조립이 용이한 무계장캡슐의 도입이 불가피하다. 또한, 하나로에서는 설계유량이 12.7 kg/s로 제한하고 있고, 이때의 압력강하량은 200 kPa 이상을 유지하도록 설정하고 있다. 현재의 본 무계장 캡슐 내에 흘러가는 유량은 7.45 kg/s로 이때의 유속은 대략 9.4 m/s로 상당히 빠른 유속을 보인다. 이러한 조건에서 2.5년을 견딜 수 있는 무계장캡슐을 설계하기 위해 DUPIC 핵연료에 사용되었던 DUPIC-1 무계장 캡슐을 이용하여 설계최적화를 수행하였으며, 한국원자력연구소 열유동시험실에서 100일간의 노외 내구성 시험을 수행 중에 있다. 주요 설계최적화 부품은 하단안내집합체, 상.하단고정체, 시험봉집합체 부품 및 캡슐내 4종의 스프링이 최적화되어 전체적인 구조적 건전성과 내구성이 충분히 확보되었다.

4. 후기

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

5. 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] 배기광 외 “DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석보고서,” KAERI/TR-1157/98, 1998.10.

[4] 송기찬 외, “DUPIC 핵연료 조사 시험계획서,” KAERI/TR-1545/2000, 2000. 4.
[5] 김봉구 외 "신형소결체 하나로 조사캡슐 개략도“, HAN-IC-CR-00-021, 2000. 8.
[6] 강흥석, "진동 및 마모손상 저감 측면에서 제안하는 조사 시험봉 설계 개선 방안 ", AF-TM-FP-00002. Rev.1, KAERI, 2000.9.
[7] 서철교, "고연소도 신형 UO_2 소결체의 조사 시험을 위한 예비 핵특성 분석", HAN-RR-CR-900-00-082, KAERI, 2000.11.