'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 캡슐의 설계개선

Design Improvement of HANARO Capsule

강영환, 류정수, 김도식, 오종명
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이영신, 고재화
충남대학교

요 약

HANARO (Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor) 노심 조사공(CT, IR1&2)에 설치되어 이용하는 조사시험용 계장캡슐의 안전성을 높이기 위한 구조건전성 평가가 상용 유한요소 전산프로그램인 ANSYS를 이용하여 수행되었으며, 캡슐의 중요 제원이 결정되었다. 본 연구에서는 평가 결과를 토대로 캡슐 주요 부품인 상부 와이어 스프링과 하단부 guide pin의 설계 최적화가 이루어졌으며, 시험결과 ASME Code에서 규정하는 하중조건에 대한 구조적 기준치를 만족함을 보였다.

Abstract

Instrumented capsules are one of the irradiation facilities in the HANARO (Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor) core. The structural integrity of this structures under seismic loads and during irradiation in the reactor are issues of major concern to enhance the capsule safety. Based on the structural integrity results carried out using the finite element program, ANSYS, major components of the capsule top guide spring and the bottom guide pin are optimized through material tests.

1. 서언

하나로를 이용하여 발전소 사용재료의 조사시험을 수행하기 위한 계장 캡슐개발이 완료되어 활용중이다. 이들 캡슐은 하나로 노심 영역 조사공 CT, IR1&2 에 장전되어 시험이 수행

된다. 그러나 하나로 노심은 강제 순환방식의 냉각수 흐름이 있어 조사시험중 캡슐 및 관련 구조물들의 구조건전성이 매우 중요하게 된다.

그러므로 원자로 수조 내 최하단 플랫폼 구조물 위치(EL. 78.78m)에는 계장 캡슐을 고정하기 위한 장치가 기 설치된 H-비임(Beam)과 채널브라켓(Channel Bracket)을 이용한 기지판 위에 설치되었으며, 전체 구조물은 수조(Reactor Pool)에 잠기게 된다. 고정장치가 설치될 기지판은 85mm의 높이 차이를 가지고 3개의 고정 장치가 설치될 수 있도록 설계되었다.

계장캡슐 및 고정장치에 대한 현재 설계 등급상 안전등급은 NNS, 내진등급은 II급이므로 인접한 안전등급 설비의 구조적 건전성에 주는 영향을 검토하기 위하여 계장캡슐(Instrumented Capsule), 고정장치(Clamp Arm), 기지판(Base Plate), 플랫폼(Platform), 수조벽(Reactor Pool Wall)등을 해석모델로 선정하고, ASME B&PV Code, Section III, Div. 1, Part NF에서 규정하는 조건 즉, 정하중(Dead Loads), 안전운전지진(OBE)과 운전정지지진(SSE)으로 인한 지진하중 등의 모든 하중조건에 대하여 구조건전성을 분석하였다[1 4]. 보수적인 평가를 위하여 내진등급 1급에 적용하는 지진하중에 대하여 구조건전성을 평가한 바 있으며, 특히 조사시험중 FIV (flow-induced vibration)로 인한 캡슐의 안전성을 높이기 위하여 침니(chimney) 내에 새로운 지지구조물을 추가로 설치하는 경우에 대하여서도 평가를 하였다[5 8].

본 논문은 구조건전성 평가 결과에 따른 캡슐 및 관련 구조물들의 주요부품인 캡슐 상부 와이어 스프링 및 하단부 guide pin에 대하여 설계 최적화된 내용을 서술한다.

2. 본론

가. 계장캡슐 보호관에 대한 내진해석 및 설계개선

1) 초기 계장캡슐 모델링

CT/IR 계장 캡슐의 구조해석 모델은 캡슐 고정장치 구조물의 robot arm 및 고정장치에 대한 기존 해석자료[3]를 일부 수정하여 활용하였다. 계장 캡슐용 보호관은 S.S. 304 재질로 만들어 졌다. 3종의 전체 길이는 각각 5558mm이다. 노심과 접하는 하단부의 길이는 910mm이며, 외경과 내경이 60mm와 56mm이다. 하단부 캡슐에는 최대 10kg의 내용물이 채워질 수 있다. 상단부는 길이가 4648mm이며, 초기 설계에서는 외경이 34mm이고, 두께가 1.65mm이다. 계장캡슐의 경계조건으로는 상부 끝단에서 3개의 보호관에 따라 180mm - 350mm 위치에서 Robot arm에 의해 모든 방향으로 지지되어 있고, 하부 끝단은 수평/수직 변위가 구속되어 있다. 하부로부터 820mm 위치에서는 수평방향으로 6곳에서 스프링에 의해 유동관과 연결되어 수평변위를 잡아주고 있다. 초기 스프링 강성은 15N/mm로 설계되었다. 그리고 하부 끝단으로부터 3045mm 위치에서는 원자로의 침니 상단에 설치되는 침니내부지지대가 계장캡슐의 중간 부분을 잡아주어 계장캡슐의 수평운동을 제어한다(Fig.1 참조). 해석 모델링에서 보호관은 상부 15개, 하부 6개의 3차원 빔요소를 이용하고, 유동관은 4절점 평판요소로 모델링하였다. 계장캡슐은 수중에 있으므로 동적해석시 초기설계 모델의 부가질량[9]을 산정하여 구조물의 질량에 합하여 해석하였다. 부가집중 질량은 보호관의 고유진동수에 크게 영향을 주며, 보호관의 외경이 바뀌면 이에 따라 부가질량도 바뀐다. CT/IR 보호관 3개와 robot arm 고정장치를 모델링하기 위해 사용한 전체 절점수는 552개 이고, 요소수는 집중질량 요소 285개, 보요소 27개, 쉘요소 409개, 빔요소 63개 및 스프링요소 16개를 포함하여 전체 800개이다.

2) 지진응답변위 해석

육각 침니구조물과 반사판용기(reflector vessel), DUPIC 핵연료 및 동위원소 보호관 등 침니 내부지지대 관련 구조물을 모두 포함한 전체구조물의 고유진동수 해석 결과, CT/IR 보호관의 고유진동수는 8.86Hz로 침니내부지지대가 없는 경우의 5.56Hz보다 커졌다.

SSE 하중에 대하여 원자로건물 시간이력해석에서 구한 각 위치의 층응답스펙트럼 중에서 수평방향의 경우(0.2g) 변위 고정점인 계장캡슐 상단 지지점(78.73m)과 유동관 하부지지점 및 침니구조물 하단에서의 층응답스펙트럼을 포함하도록 이들 중 최대값을 사용하고, 수직방향의 경우(0.13g)는 건물전체를 포괄하는 층응답스펙트럼을 사용하였다.

지진응답 스펙트럼 해석은 SSE 경우에 대하여 X,Y,Z 방향 모두를 각각 구한 뒤 이를 SRSS법으로 조합하고 관심 변위값을 추출하였다. 층응답스펙트럼 해석결과에 대한 변위 제한은 조사공(유동관)에 설치되는 시험관은 유동관과 스프링으로 연계되어 있어, 지진 시 두 부품의 상호연계에 의해 나타나는 유동관 최대 변위는 유동관과 근접 유동관 사이의 접촉을 방지하기 위하여 둘 사이 실측간격의 절반값으로 IR1은 0.65mm, IR2는 0.5mm, CT는 0.6mm 이다. 그리고 스프링이 설치되는 공간거리는 최대 7.2mm로 스프링 자체의 두께를 제외하고 스프링이 변형할 수 있는 최대값을 4.5mm로 설정할 수 있다.

지진응답변위 해석결과 유동관과 연결된 계장캡슐 보호관의 변위는 3.95mm로 제한값 4.5mm 보다 작게 나타났다. 유동관의 최대 변위는 CT에서 0.933mm, IR1과 IR2에서 0.965mm와 1.03mm로 나타나 변위제한조건인 0.6mm를 초과하여 설계 변경이 요구된다[6].

3) 설계변경에 따른 지진응답변위 해석

침니내부지지대를 도입하여 기존 설계된 계장캡슐 보호관을 중간에서 지지한 경우에 대한 지진응답 해석결과 유동관의 변위 제한조건을 충족하지 못하였다. 이로부터 1) 계장캡슐 시험관과 유동관 사이의 스프링 강성조절, 2) 계장캡슐 보호관 상부부분의 직경 및 두께 변경, 3) 계장캡슐 내용물 중량변경 등에 대하여 설계변경이 가능하다.

지진해석 결과로부터 계장캡슐 보호관의 두께 증가는 변위 응답을 약간 줄여 준다. 그리고 계장캡슐 보호관의 외부 직경을 크게 하면 유동관 응답변위를 크게 감소시킨다. 또한 경우 1과 2에서 보는 바와같이 계장캡슐 보호관의 시험내용물 질량이 10kg에서 7.2kg으로 감소하면 응답 변위가 작아 진다. 계장캡슐 보호관과 유동관 사이에 설치되는 스프링 강성을 줄이면 유동관의 응답 변위가 크게 감소하나 스프링 변형량은 상대적으로 커진다. 이로부터 계장캡슐 보호관의 시험내용물 질량을 10kg에서 7.2kg으로 줄이고, 유동관과 연결되는 계장캡슐 지지 스프링의 강성을 절반(7.5N/mm)으로 줄인 상태에서 계장캡슐 보호관 상부 직경을 34mm보다 크게 하는 설계조건을 채택하기로 하였다.

이러한 설계조건에서 좀더 합리적인 계장캡슐 보호관의 치수는 보호관의 직경을 최대한 줄이는 설계를 지향하기 때문에 이를 찾기 위하여 계장캡슐 직경 및 두께를 다양하게 변화시키면서 응답변위에 주는 영향을 평가하였다. 계장캡슐 설계치수변경을 조합하여 실현 가능한 해석결과를 Table 1과 같이 채택하였다.

해석결과는 Table 2와 같으며, 경우 1 및 경우 2가 시험관 3개를 동시에 장착한 경우 스프링 및 유동관 변위제한조건을 충족하고 있고, 경우 3은 CT와 IR1이 변위제한조건을 충족하고 있다. 이로부터 3개 시험공에 계장캡슐을 동시에 장착할 경우는 계장캡슐 보호관 중간부분 직경을 34mm에서 60.5mm로, 두께를 2.8mm 이상으로 하고 스프링을 장착하는 Part

D 부위의 직경을 42.7mm 이상으로 유지하는 것이 요구된다.

또한 경우 3에서 CT 시험관만 장착할 때 유동관 변위가 0.596mm에서 0.585mm로, 시험관지지 스프링 위치에서의 시험관 변위는 4.5mm에서 4.38mm로 줄어들었으며, 다른 경우에서도 비슷하게 감소하였다.

나. 캡슐 상부 와이어 스프링의 설계 개선

1) 설계요구사항

노심에서 재료조사시험을 수행하기 위해서는 캡슐 및 관련 설비의 구조건전성이 만족되어야 한다. 이 일환으로 AMSE B&PV Code, Section Ⅲ, Div. 1, Part NF에 규정하는 조건 즉, 정하중(Dead Loads), 운전기준지진(Operationg Basic Earthquake:OBE)과 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake:SSE)에 따른 내진해석 및 구조해석이 수행되었다. 특히 캡슐이 설치되는 노심 조사공은 강제대류 영역으로서 캡슐 주요부품들의 설계 요구조건 또한 매우 중요하다.

노심에서 유체에 의한 진동으로 인접 구조물에 간섭이 예상되지만, 침니 고정장치를 사용할 경우 하나로 노심에 설치되는 계장캡슐 구조물은 허용기준을 만족하며 구조적 안전성을 보다 증대시키게 된다[3].

와이어 스프링은 Fig. 2에 제시된 바와 같이 링에 60° 간격으로 용접되었고 캡슐본체의 상부에 부착되었다. 이 때 캡슐 구조물의 내진해석 결과는 와이어 스프링이 캡슐 변위에 중대한 영향을 미치게 된다[1]. 와이어 직경과 스프링 길이의 변화에 대한 스프링 상수는 와이어 직경이 증가함에 따라, 스프링 길이가 감소함에 따라 증가함을 알 수 있다. 또한 내진해석과 실험 데이터를 토대로 스프링의 형상은 접촉점에서 대칭, 와이어의 치수는 직경이 2.0mm, 길이가 180mm 그리고 스프링 개수는 6개로 최적화하였다[2,4].

하나로 노심 내에서 캡슐의 구조적 안전성 개선을 위한 기하학적 구조의 변경 및 침니 고정장치의 추가로 인하여 상부 가이드 스프링에 대한 설계 변경이 요구되었다. 역학적 해석 결과를 토대로 침니 고정장치를 추가로 설치하였을 때, 캡슐의 구조적 건전성 유지를 위한 스프링 상수는 7.5N/mm이고, 스프링 설계 변수인 스프링 형상, 와이어 직경 및 스프링의 길이 등을 고려하여 상부 가이드 스프링의 최적화를 위한 시험을 수행하였다.

2) 실험 및 결과

시험방법은 일반적으로 사용되는 만능시험기를 이용한 압축시험으로 5kgf load cell을 사용하였고, chart speed는 50mm/min , cross head speed는 1.0mm/min의 상태에서 시험하였다.

스프링 상수의 계산은 고전적인 힘과 변위의 관계인 Hook's law, $F = k\delta$ 로부터 $k = F/\delta$ 에 의하여 구해지며, k는 선형 스프링상수(N/mm), F는 적용힘(N), δ는 변위(mm)를 나타낸다.

재질이 SUS304인 스프링을 사용한 1차 시험에서, 스프링의 형상이 접촉점을 기준으로 양쪽 대칭이 되도록 설계하였다. 6개의 와이어 스프링이 assembly를 이룰 때, 스프링 양단에서의 조건은 한쪽 단을 고정단으로 나머지 단의 U_x를 자유로 고려하였다. 스프링 와이어의 직경 Φ=2.6mm이고 길이 l=180mm일 때, 스프링 상수 k=7.73N/mm의 값을 얻었고 약간의 소성변형이 발생하였다. 스프링 상수 k=7 8N/mm의 값이 예상되는 스프링의 크기는 와이

어 직경이 2.6mm일 때 스프링의 길이가 170 190mm이고, 스프링의 길이가 180mm일 때 와이어 직경은 2.5 2.7mm이다.

2차 시험은 시편의 재질을 Inconel(열처리 조건 : AMS 5671)로 하였고, 와이어 직경은 2.6mm이고 스프링 길이는 170mm, 180mm, 190mm인 세 종류의 시편을 제작하였다. 시편 고정용 지그 및 시편은 Fig. 3과 같다. 시험은 초기 변위 δ=1mm를 포함하고 내진안전성을 고려하여 δ=5mm까지 시험을 하였고, 소성변형의 영향을 검토하기 위하여 최대 δ=7mm (스프링길이 180mm)까지 추가로 시험하였다. Inconel 재료의 시험결과를 Table 3과 Fig. 4에 제시하였다. Table 1은 시편의 길이 l=170mm, 180mm일 때 각각 변위 δ=5, 6 또는 7mm까지 하중을 가했을 때의 스프링 상수 값을 나타낸 것이다. Fig. 4는 길이가 180mm인 시편에 변위 δ=7mm될 때까지 하중을 가했을 때의 하중에 대한 변위의 변화를 나타내는 곡선이며, 그림에서 보는 바와 같이 소성변형이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

다. 캡슐 하단부 guide pin의 건전성 개선

캡슐 하단부 guide part는 캡슐 본체를 하나로 원자로 내의 육각형 조사공에 고정하는 역할을 한다. 캡슐의 고정은 최상부에서의 회전 등의 방법으로 수행하므로, 이에 의한 비틀림 응력 등으로 인하여 캡슐 하단부 guide pin은 전체 구조에 대하여 가장 취약한 부위 중의 하나이다[9]. 실제 조사시험 후 캡슐 검사과정에서 guide pin 하나가 절단된 사례가 있으며, 이를 방지하기 위하여 guide pin 상부에 ring을 보강하여 캡슐 하단부 guide pin의 건전성을 확보하고자 하였다.

1) 해석 및 실험모델

(1) 유한요소 해석모델[10]

유한요소 모델링은 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하여 수행하였고, 해석 모델에서 사용한 요소는 SOLID 72(3D 4-node tetrahedral structural solid with rotations) 이다.

Guide pin의 재질은 Zircaloy-4 그리고 guide pin 상부에 보강된 높이 18mm 두께 5mm인 링의 재질은 SUS304이며, 이 들의 물성치[11]는 Table 4에 나타낸 바와 같다.

유한요소 해석에서 구속조건은 하단부를 완전고정으로 하였으며, 하중조건은 캡슐 길이방향으로의 단축 인장하중(Fig. 5(a))과 guide pin 하나에만 횡방향 굽힘하중(Fig. 5(b))을 작용시키는 경우에 대하여 해석하였다.

(2) 실험모델

시험에 사용된 모델은 Fig. 5와 같이 높이 18mm 두께 5mm인 ring으로 보강하고, guide pin의 상단 및 하단부를 모두 용접한 시편이다. 또한 guide pin의 상단에 ring을 보강함으로서 확보되는 안전성을 확인하기 위하여 기존의 ring을 보강하지 않은 시편도 준비하였다. 각 시편에서 guide pin 상 하단은 전자비임용접법(electron beam welding)으로 용접되었다.

인장시험은 각 시편에 대하여 캡슐 길이방향의 단축 인장하중 그리고 굽힘시험은 guide pin 하나에만 횡방향 굽힘하중을 부하하였다. 각 하중조건에 대하여 하중부하속도는 1mm/min로 하였으며, 시험중의 하중 및 변위신호는 시험기에 연결된 자료수집시스템을 통하여 연속적으로 저장하였다.

2) 해석결과

Fig. 6은 캡슐 길이방향 단축 인장하중에 대한 응력분포를 나타낸 것이며, ring에 길이방향 인장하중이 작용할 때 guide pin의 구부러진 곳에서 최대응력 419.5MPa이 발생하였다. 또한 guide pin 하나에 횡방향 굽힘하중이 가해지는 경우에는 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 guide pin 하단의 연결부에서 최대응력 411.8MPa이 나타났다. 한편 링으로 보강하지 않았을 경우 guide pin 하나에 횡방향 굽힘하중이 가해질 때의 최대응력은 415.9MPa로 얻어졌다 (Fig. 7(b)). 이와 같이 guide pin 중 하나에만 굽힘하중을 작용시켰을 때, guide pin에 사용되는 Zircaloy-4의 인장강도(=415MPa)에 상당하는 작용하중을 검토한 결과 ring을 보강한 경우가 그렇지 않은 것보다 약 3배정도 높은 굽힘하중을 나타내었다.

3) 실험결과

Guide pin의 상 하단부를 모두 용접한 시편에 대한 캡슐 길이방향 단축 인장하중하의 하중-변위 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 실험중 guide pin과 ring의 용접부에서 파단이 발생할 때의 인장하중은 1512.9N이며, 이 하중은 유한요소 해석으로부터 결정된 최대 인장하중 2215N보다 낮은 값을 보인다. 이는 실험 중 guide pin (Zircaloy-4)과 ring (SUS304)의 이종재질에 대한 용접부에서 조기 파손이 발생하였기 때문이며, 이로 인하여 캡슐 하단부 guide part를 하나의 몸체로 모델링한 해석모델의 경우보다 낮은 인장하중을 나타내게 된다. 이와 같이 인장하중이 작용되는 경우 guide pin 상부와 ring의 용접부에 이종 재질에 대한 최적의 용접법을 사용함으로서, 본 시험에서 얻어진 파단하중보다 큰 최대 인장하중을 나타낼 것으로 사료된다.

한편 Fig. 9는 ring을 보강한 시편과 보강하지 않은 시편의 guide pin중 하나에만 횡방향 굽힘하중을 작용시켰을 때의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 guide pin 상부에 ring을 보강한 경우(2703.7N)가 그렇지 않은 것(845.2N)보다 약 3배정도 높은 굽힘하중을 나타낸다.

3. 결론

하나로 침니내부지지대를 사용하고 계장캡슐에 대한 통특성 및 지진응답해석을 수행하여 유동관의 허용변위를 초과하지 않도록 계장캡슐을 설계 변경하였다. 침니내부지지대의 설치로 CT/IR 보호관의 1차 고유진동수가 5.6 Hz에서 8.2Hz로 증가하는 것으로 나타나 보호관의 변위와 유체 유발진동을 억제하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 내진해석결과 SSE 설계지진하중에 대하여 CT 및 IR1에서 계장캡슐 시험공의 유동관 상단 변위가 상부 및 스프링 위치의 보호관 직경이 각각 48.6mm와 42.7mm 이상 되어야 변위제한조건을 만족하였다. 그리고 CT, IR1 및 IR2에 동시에 설치하는 경우 상부 및 스프링 위치의 보호관 직경이 각각 60.5mm와 42.7mm 이상 되어야 변위제한조건을 만족하였다.

스프링 재질을 SUS304로 하여 시험한 결과 약간의 소성변형이 발생하였으나, Inconel 재질을 이용하여 시험한 결과 소성변형이 없는 탄성변형만을 나타내었다. 시편의 길이가 170 mm, 180mm, 190mm인 경우에 대하여 평균 스프링 상수 값이 각각 7.3N/mm, 6N/mm, 5,1N/mm로 시편의 길이가 증가할수록 스프링 상수값이 작아졌다. 즉 시편에 작용한 하중의 증가에 대한 변위의 변화는 선형적으로 증가하였고, 제하(unloading) 시에는 모두 소성변형이 없는 탄성변형만을 나타내었다. 실제 와이어 스프링 assembly에서는 스프링 상수 값이

약간 증가될 것으로 예상되며, 내진안전성이 확보된 스프링 상수 k=7.5N/mm를 갖기 위해서는 길이가 170 180mm인 스프링의 사용이 요구된다. k=7.5N/mm의 기준으로 보면 와이어 직경이 2.6mm일 때, 스프링의 길이는 결과치보다 약간 짧은 175mm가 적절한 것으로 고려된다.

캡슐 하단부의 guide pin 상부에 ring을 보강한 경우와 보강하지 않은 경우에 대한 응력해석 및 실험을 수행하였으며, 이의 결과로부터 ring을 사용함으로서 캡슐 하단부 guide pin의 건전성이 개선될 수 있음을 알았다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

[1] Kang, Y. H., Lee, Y. S. and Choi, M. H., 1996, "A Study on the Seismic Analysis for HANARO Capsules and Capsule Supporting Systems," 11th World Conference on Earthquake Engineering (11WCEE), Paper No. 875, Mexico.

[2] 강영환, 류정수, 이영신, 최명환, 1995, "하나로에 설치될 계장캡슐 및 고정장치의 구조건전성 평가," '95 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, pp. 443 449.

[3] KAERI/TR-601/96, 1996, "하나로에 설치될 계장캡슐 및 고정장치의 구조건전성 평가보고서," 한국원자력연구소.

[4] Kang, Y. H., Lee, Y. S. and Choi, M. H., 1997, "Structural Analysis of the HANARO Instrumented Capsule for Material Irradiation Tests," Trans. of the 14th SMiRT, pp. 71 77, Lyon, France.

[5] 강영환, 최창웅, 이영신, 최명환, 신도섭, 1998, "진동시험을 통한 하나로 조사캡슐의 구조해석," '98 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, Paper No. 60.

[6] 이재한, 류정수, 조영갑, 강영환, 우종섭, 1999, "하나로 침니 내부지지대에 대한 동특성 및 지진응답 영향 해석," '99 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, pp. 423.

[7] KANG, Y. H., Lee, Y. S., Choi, M. H. and Shin, D. S., 1999, "Structural Analysis for the HANARO Irradiation Capsule Through Vibration Test," The Sixth Asian Symposium on Research Reactor, pp. 227 232.

[8] KAERI/TR-1398/99, 1999, "하나로 침니 내부지지대에 대한 구조건전성 평가," 한국원자력연구소.

[9] Blevins, R. O., 1979, "Formula for Natural Frequency and Mode Shape," VNR.

[10] KAERI/RR-1760/96, 1996, "계장캡슐 활용 기술 개발," 한국원자력연구소.

[11] HAN-IC-CR-99-013, 1999, "계장캡슐 하단부 Guide Pin 건전성개선," 조사시험용 캡슐 개발 및 활용분야 내부통신문.

[12] Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals, 1990, Metals Handbook, 9th Edition, Vol. 3, ASM.

Table 1. Combinations of dimension for designed instrumented capsule

Case No.	Test Tube Dimension (D_o/t, mm)					Internal Mass of Test Tube
	Upper (A)	Middle (B)	Middle (C)	Spring (D)	Capsule (E)	
1	34/1.65	34/1.65	60.0/2.0	60/2.0	60/2.0	7.2 Kg
2	34/1.65	34/1.65	60.5/2.8	42.7/2.8	60/2.0	7.2 Kg
3	34/2.8	48.6/2.8	48.6/2.8	42.7/2.8	60/2.0	7.2 Kg

Table 2. Displacement of seismic response with dimension of designed instrumented capsule

		limit (mm)	Case 1	Case 2	Case 3
Displ. of Test Tube (mm)	IR2	4.5	3.58	3.44	3.97
	CT	4.5	**3.95**	**4.34**	**4.50**
	IR1	4.5	3.53	3.50	3.89
Max. Displ. of Flow Tube (mm)	IR2	0.50	**0.499**	**0.481**	0.556
	CT	0.60	**0.532**	**0.586**	**0.596**
	IR1	0.65	**0.480**	**0.476**	**0.556**

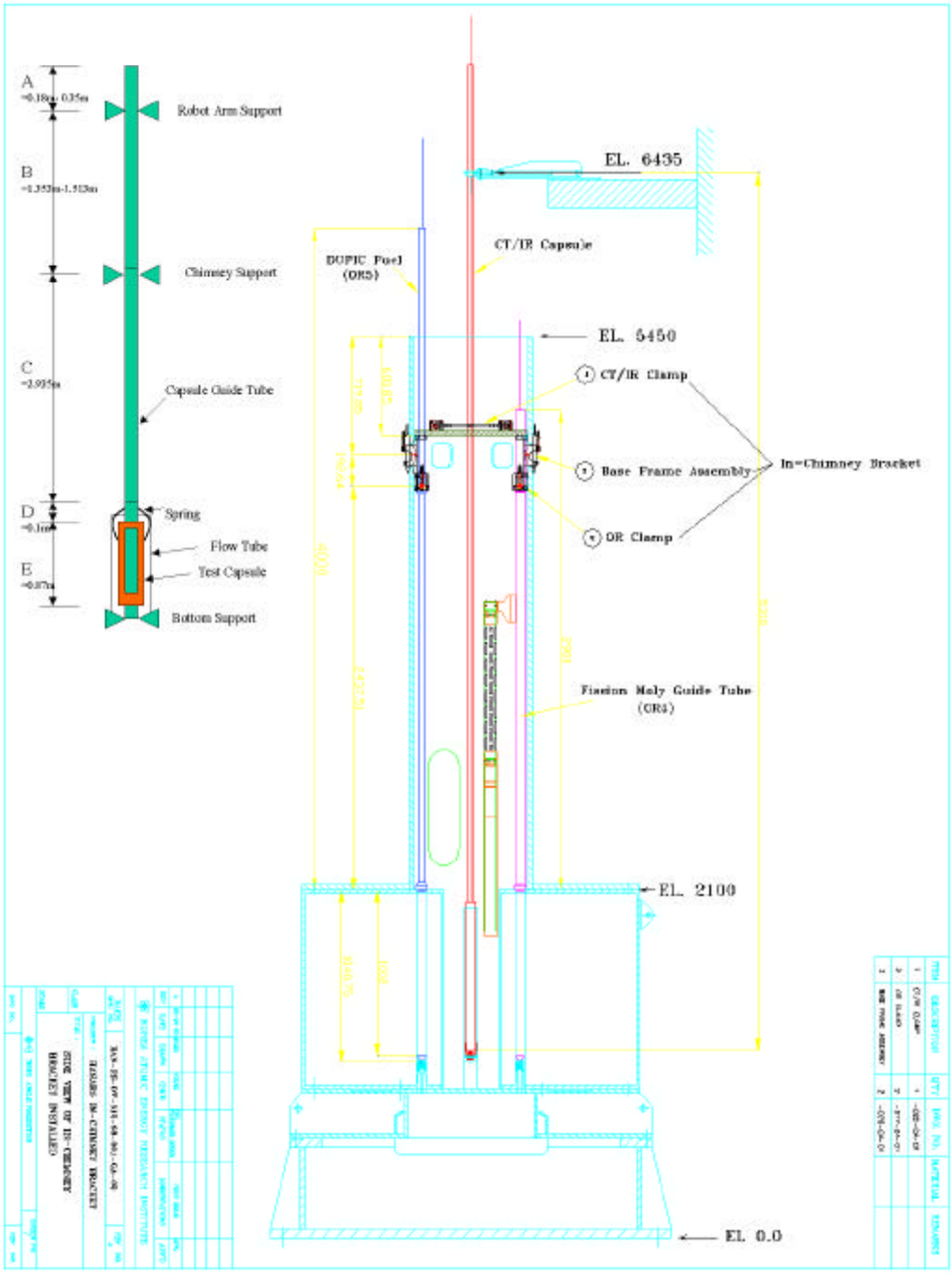


Figure 1. Side view of in-chimney bracket

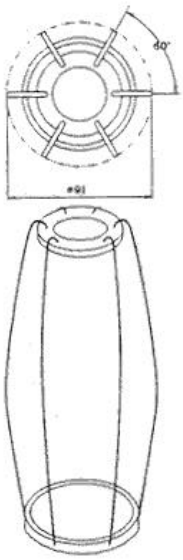


Figure 2. The shape of wire spring assembly

Figure 3. Test specimens and zig

Table 3. Result data of spring compression test

Parameter \ Length	170 mm		180 mm		
	Experiment		Experiment		
Load (kgf)	3.7	4.5	3.1	3.7	4.25
Displacement (mm)	5	6	5	6	7
Spring constant (N/mm)	7.25	7.35	6.08	6.04	5.95

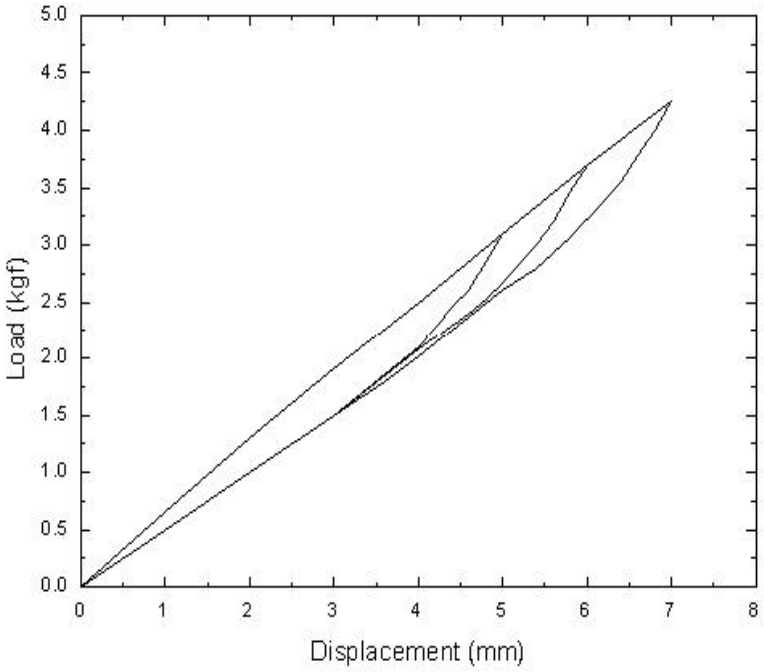
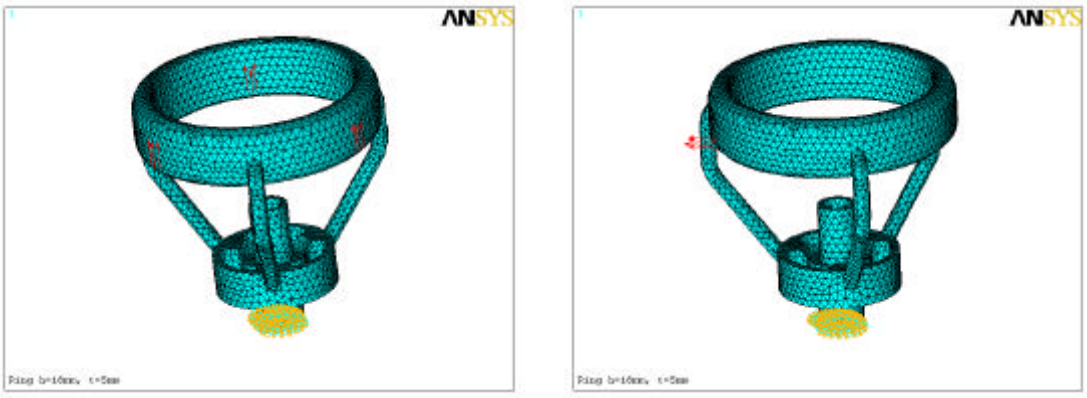


Figure 4. P-δ curve under compressive load
l=180 mm (δ=5mm, 6mm, 7mm)

Table 4. Material properties

Material properties	Zircaloy-4	SUS304
Young's module(E)	94.3GPa	193GPa
Mass density(ρ)	6500kg/m^3	7913kg/m^3
Poisson's ratio(ν)	0.35	0.27
Ultimate strength(σ_u)	415MPa	515MPa
Yield strength(σ_y)	240MPa	205MPa
Allowable stress($0.6\sigma_y$)	144MPa	123MPa



(a) Uniaxial tensile load (b) Transverse bending load

Figure 5. FE mesh, load and boundary conditions

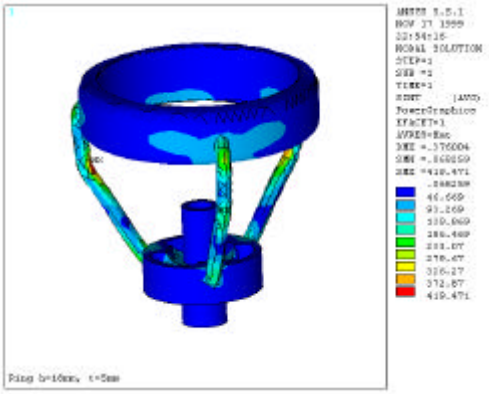
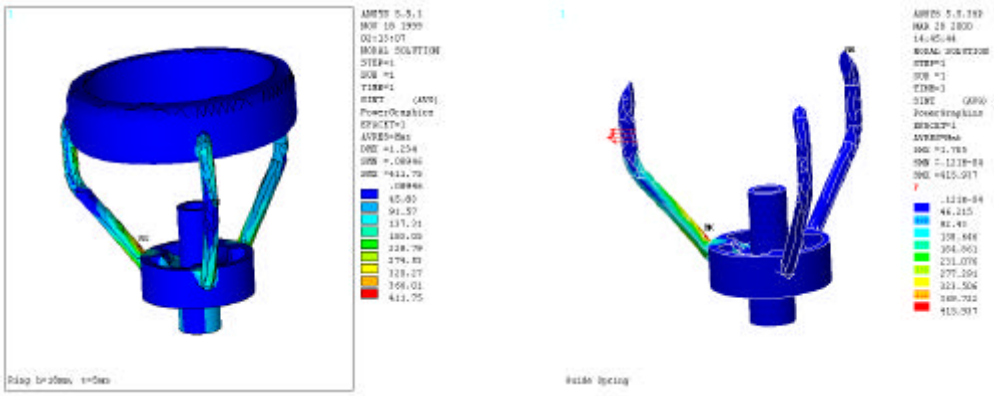


Figure 6. Stress distribution under tensile load



(a) Guide pin with ring (b) Guide pin without ring

Figure 7. Stress distribution under bending load

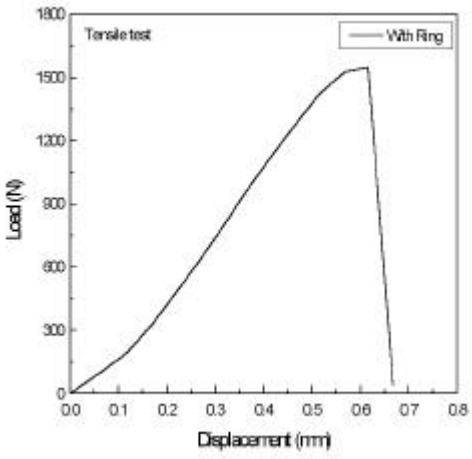


Figure 8. P-δ curve under tensile load

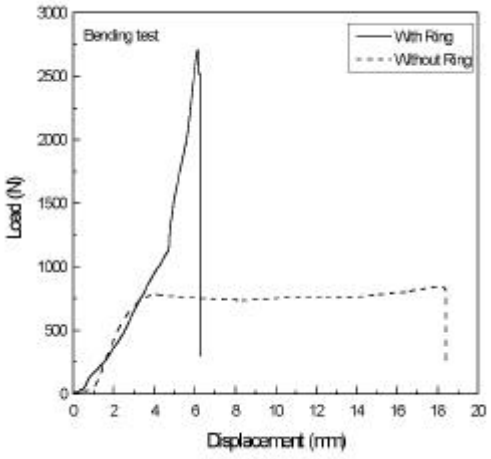


Figure 9. P-δ curve under bending load