2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

조사크립 캡슐의 예비설계

Preliminary Design of the In-pile Creep Capsule

조만순, 박승재, 주기남, 김도식, 손재민, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로를 이용한 조사크립시험을 수행하기 위한 준비 단계로 노내에 장전된 캡슐 내부에서의 온도, 압력과 같은 설계 파라메터를 확인하기 위한 시험용 크립캡슐의 설계 및 제작에 대하여 설계요건을 기술하고 구조설계, 열설계 및 강도설계 등의 예비설계를 수행하였다. 조사시험은 노심외부의 IP공에서 수행하고 평균중성자조사량은 $5x10^{20}n/cm^2$, 조사 목표온도는 400℃인 조건에서 알루미늄 시편을 장전하여 시험한다. 구조설계에서는 시편부, 하중전달부, LVDT부의 설계에 대해 기술하였다. 본 캡슐의 외통은 직경 50mm인 스테인레스강을 사용하며 외통의 강도설계를 수행하여 건전함을 확인하였다. 열설계에서는 노심 밖의 IP공에서는 냉각수가 흐르지 않기 때문에 열계산을 위해 자연대류에 의한 표면 열전달계수를 산정하여 제시하였다. 상세설계 시 이 값을 이용하여 열계산을 수행하하면서 시편과 열매체 사이의 갭을 조절하므로써 시편의 목표온도를 계산할 수 있다. 본 캡슐의 설계 제작 후 하나로에서의 조사시험을 통해 이 표면 열전달계수의 타당성을 확인할 필요가 있다. 하중부과시험에서는 2가지의 상용벨로우즈에 대해 외부에서 가하는 가스압력에 따라 하중전달봉에서의 발생력이 선형적으로 비례함을 확인하였다. 실험을 통해 모컵캡슐에서 사용한 외부가스 공급장치의 가압을 위한 콤프레서와 같은 별도의 드라이빙 메카니즘을 사용하지 않고 헬륨봄베의 압력만으로도 크립시험에 적합한 하중을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

Abstract

In order to prove the temperature and the pressure etc. estimated in the design as the preparatory stage of the in-core irradiation creep test, a capsule for creep test in HANARO is being designed and fabricated. In this design, the design requirements and capsule configuration have been established and heat transfer and stress analysis have been performed. The irradiation test will be performed using aluminium specimen at the IP hole to the fluence of $5x10^{20}n/cm^2$ and the target temperature of 400℃. The specimen part, the loading mechanism and the displacement

measuring part have been described in the structural design. The structural analysis for the exterior tube, which is of stainless steel having a diameter of 50mm, were carried out and showed that the integrity of the tube is satisfied. In thermal design, the surface heat transfer coefficient for the tube in the IP hole, which has no flow but by natural convection, was estimated. This coefficient will be used to adjust the target temperature of the specimen by the calculation of the temperature of the inner layers in the detail design. This value should be verified through the irradiation test of this capsule in the HANARO. In the experiment for the loading unit, the load occurred to the specimen has been confirmed to be linearly proportional to the gas pressure. By this result of load test, it has been confirmed that additional driving mechanism like compressor is unnecessary to get the load suitable for the irradiation creep test.

1. 서 론

크립시험은 고온에서 재료시편에 일정하중을 부과하여 변형정도를 파악하기 위한 시험이다. 원자로의 구조재료인 지르코늄 합금, SUS304 등과 CR-Ni강, 바나듐 합금 등에 대한 크립파단 시험은 재료의 건전성을 평가하기 위한 실험으로 조사(irradiation)량에 따른 재료의 기계적 특성 변화를 파악하기 위한 것이다. 노내에서의 크립파단시험용 조사캡슐을 구성하는 각 부품들은 복잡한 구조로 되어 있으며 조사공의 한정된 부피 제한 때문에 소형화가 필요하다.

한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 원자력 재료의 조사효과 평가를 위한 캡슐을 개발하기 위하여 많은 연구를 수행하여 왔다.[1-3] 그러나 가동 중인 원자로의 노심에서 재료의 기계적 특성변화를 조사하는 특수한 목적을 가진 실험은 선진국에서는 많이 수행되어 왔지만 하나로에서는 수행된 적이 없다. 특수한 목적을 가진 캡슐은 gas sweep 캡슐, elongation measuring and creep rate measuring 캡슐, saturated temperature 캡슐, temperature ramping 캡슐 및 neutron tailoring 캡슐 등 다양한 종류의 캡슐이 있는데 하나로에서는 이중에서 먼저 재료분야에서 요구사항이 많은 크립캡슐을 제작하여 재료의 크립변형 실험을 수행할 예정이다.

선진국에서는 재료의 조사크립 특성을 평가하기 위해서 다양한 형태의 크립캡슐을 제작하여 조사크립 시험을 수행하고 있다. 국내에서도 하나로를 이용하여 조사크립 시험을 수행하기 위하여 캡슐의 제작 및 실제 노내 캡슐을 모사한 노외시험용 캡슐의 개념설계와 벨로우즈를 비롯한 하중부과장치의 설계, 그립(grip)과 하중전달봉(pull rod)과 같은 하중전달장치의 연구 등 크립캡슐에 필요한 요소기술에 대한 연구가 진행되고 있다.[4-6]

조사크립 시험용 캡슐은 미국, 일본, 러시아 및 유럽의 원자력 선진국에서 다양한 형태로 제작되어 구조재료의 조사크립 특성, 핵연료의 크립 특성 등의 연구에 활용되어 왔다. 미국에서는 ORNL 및 Westinghouse 등의 연구로에서 그라파이트의 변형 거동, 액금로 구조재료의 크립 거동에 대한 연구에 조사크립 캡슐이 사용되었다. 유럽에서는 벨기에, 독일, 프랑스 및 러시아에서 원자로구조재료의 크립 특성연구 및 핵연료의 변형 거동특성연구에 크립캡슐이 사용되었다. 특히 러시아의 IPPE에서는 코어의 중성자속이

$8.6x10^{14}n/cm^2 \cdot s$인 BR-10 연구로를 이용한 조사시험 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 연구대상 재료는 cladding 재료, 핵연료, 반사체 재료 등으로 오스테나이트 Cr-Ni강, 바나듐 합금에 대한 조사중 크립시험, 합금강에 일축 인장, 비틀림 하중부과 시험, 핵연료의 크립시험 및 cladding 재료에 대한 in-pile 피로 및 thermocycling 실험 등을 수행하였다.[7] 일본에서는 동력로와 고속증식로의 구조재료인 Zr합금, SUS304 등에 대한 in-pile 크립시험을 수행하였다.[8]

국내에서는 Y. Choi등이 하나로에서 조사시험을 할 수 있는 크립캡슐의 개념설계를 수행하고 모컵을 제작한 바가 있다.[9] 이 모컵은 하중부가 장치로 SUS316L 재질의 벨로우즈를 사용하였으며 시편지지부, 이음쇠 및 그립 등의 건전성 확인에 이용되었다. 본 논문에서는 크립캡슐을 설계 제작하는데 있어서 내부의 압력, 온도, 시편의 조사량과 같은 각종 설계 파라메터와 벨로우즈와 히터의 건전성, 본체와 벨로우즈 실린더의 누설 확인 등 제작된 캡슐의 건전성을 확인하는 설계와 계획에 대해 검토한다.

2. 크립캡슐 설계 요건

크립시험은 고온에서 재료시편에 일정하중을 부과하여 변형정도를 파악하기 위한 시험이다. 크립캡슐을 하나로에 장전하여 시험하기 전에 노외에서 모의시험을 수행하여 실제 조사시험 중 발생할 수 있는 문제점 및 캡슐 제작시의 설계 및 제작의 고려 사항을 파악하는 것이 중요하다.

크립캡슐은 하중을 가하는 부분, 변형을 측정하는 부분, 시편의 온도를 조절하는 부분으로 구분할 수 있으며 이들을 위한 외부장치로 캡슐본체, 하중부과와 온도제어에 관련된 제어부, 변형량과 하중 측정에 관련된 데이터 수발부가 있다. 캡슐 본체는 각 부분품들을 수용하고 지지해 주는 부분으로 벨로우즈를 포함한 하중부과장치, 하중전달봉, 요크 및 시편그립과 시편 온도조절을 위한 히터, 내부 압력 조절을 위한 헬륨배관, 변위 측정을 위한 LVDT, 로드셀과 슬라이딩 부위를 위한 베어링부를 포함한다. 하중부과장치는 금속벨로우즈에 가스압력을 가하여 하중전달봉에 힘을 전달하고 요크와 그립을 통해 시편에 필요한 하중을 전달하는 장치이다.

하중을 가하기 위해서는 외부에 헬륨봄베가 필요하며 헬륨가스를 벨로우즈실린더까지 공급하기 위한 배관이 필요하다. 헬륨봄베의 헬륨가스 압력을 증폭하기 위한 콤프레서와 같은 부스팅 장치는 노내에서 크립시험이 500~3,000시간 정도의 장시간이 필요하므로 실험의 지속성과 안전성을 고려하여 설치되지 않는다.

온도는 본체내의 진공도를 조절하여 열 방출을 제어하므로써 변화시키고 시편주위에 설치된 히터에 의해 미세 제어하여 원하는 온도에 다다르게 한다. 변위는 캡슐내 상부에 설치된 LVDT에 의해 측정한다. LVDT는 변위측정 외에도 시편의 파단감지에 사용된다.

본 캡슐은 여러 가지 온도 압력과 같은 설계 변수를 확인하기 위한 시험캡슐이기 때문에 하나로의 in-core공에 장전하지 않고 core 외부의 IP공에 장전한다. 하나로에는 17개의 IP공이 있으며 내부 노심에서 중성자속을 높이기 위해 IP3, IP11, IP15를 제외한 모든 IP공은 알루미늄 통을 사용하여 막아 놓았다. 이 시험은 평균 중성자조사량이 $5x10^{20}n/cm^2$, 감마가열률(gamma heating rate)이 스테인레스 강에 대해 약 1.5W/g, 알루미늄에 대해 1.2W/g인 분위기에서 조사된다. 본 캡슐에서는 설계 특성을 확인하기 위한 목적이므로 Al-1050 재질의 시편 1개만을 장전한다. 시편은 직경 5mm, 길이 50mm로 게이지부의 직경은 2.5mm, 길이는 12.5mm이다. 그림 1과 2에

시편의 상세한 형상 및 하중부과시험장치를 나타내었다. 조사시험 시 시편에 부가되는 응력은 20kg/mm^{2}이다. 예상파단시간은 250시간의 범위를 고려한다. 캡슐본체는 캡슐의 각 부품들을 수용하고 지지해 주는 골격에 해당되는 부분이다. 본체의 외통은 노내에서 사용되는 점을 고려하여 하나로에서 조사시험을 수행해 온 재료캡슐과 같은 스테인레스 튜브로 제작하고 외경은 50mm로 한다. 캡슐본체 내부의 압력은 진공펌프와 헬륨공급장치에 의해 조절되는데 내부 헬륨가스의 압력을 1기압~10^{-3}torr 사이에서 유지한다.[5]

3. 구조설계

조사캡슐의 개략적인 구조는 그림 3~6과 같다. 각각의 그림은 전체개요도와 시편부, LVDT부, 벨로우즈부 구조를 보여 준다. 온도계측은 각 주요부에 부착된 크로멜·알루멜(C/A)열전대에 의해 측정한다. 시험편의 온도는 게이지부에 말아 놓은 직경 0.5mm C/A 열전대에 의해 온도를 측정하고 제어한다. C/A 열전대는 시험편에 부착된 시편, pull rod, 벨로우즈 외통, 베어링, 그립, 변위측정부에 7개가 설치된다.

시험편에 대한 하중 부가는 시험편의 하단을 고정핀에 의해 외통관에 고정하고 다른 방향은 용접형 벨로우즈에 접속하여, 벨로우즈에 외압을 가해 주므로써 벨로우즈가 압축되어 시편에 응력을 가한다. 각 마찰부의 베어링에 대해서는 그라파이트 재질을 사용한다. 갭은 하중부가와 열팽창에 의한 미끄러짐에서 걸림이 없도록 설계한다.

3.1 시편부

시편부의 구조는 그림 4와 같다. 시편 온도조절장치는 진공펌프, 헬륨공급계통, 히터, 온도측정장치 및 콘트롤러로 구성된다. 온도를 일정하게 하기 위해서는 온도조절장치에 대한 적당한 단열이 필요하다. 시편의 온도는 최대 400℃까지 상승된다. 시료부의 온도는 본체 내부의 진공도를 ~10^{-3}torr까지 조절하여 감마 발열만으로 조사목표온도보다 높아지는 경우에는 냉각이 필요하고 목표온도보다 낮아지는 경우에는 가열이 필요하다. 히터의 구조는 기본적으로는 코일상의 히터를 감아서 알루미늄 봉에 감는 구조로 하여 시편에 일정한 열을 가할 수 있도록 한다. 조사중에는 감마발열에 의해 온도분포가 발생하기 때문에 노외시험에서는 완전한 모의가 불가능하지만 노외 모의시험을 통해 히터의 사양과 성능을 검증한다.

시료홀더는 시편을 장시간동안 고온에서 유지하기 위해 충분한 강도를 가져야 한다. 이 때문에 재료의 선택은 고온에서 내식성과 강도, 조직의 안전성 및 중성자 조사에 의한 고온취화 등에 유의하여야 한다. 현재의 시험은 실제의 크립캡슐 시험과는 달리 노심 바깥에서 행하므로 온도가 400℃ 이하로 예상되어 스테인레스 강을 열처리하여 사용한다.

3.2 LVDT부

LVDT부의 구조는 그림 5와 같다. 크립파단 시험에서는 시편의 변위량, 파단여부 및 파단시간을 측정하는 것이 매우 중요하다. 변위량의 측정에는 LVDT라고 불리는 선형 전위차등변압기가 사용되는데 변위량이 LVDT에 전달되면 전기적 신호를 발생시키고 이것을 정량화하여 시편의 변위를 측정할 수 있게 한 장치이다. LVDT의 설계요건은 표 1과 같다. 크립시험 중 시험변수 데이터는 측정 및 데이터 수발장치에

의해 수행된다. 측정되는 데이터는 하중, 크립변형, 온도, 파단 및 파단시간 등이다. 측정부는 LVDT, 로드셀, 압력계 및 변형률게이지부로 구성된다. 센서로부터 오는 시험데이터는 A/D콘버터를 통해 데이터처리계통으로 전달되며 크립변형은 LVDT에 의해 0~10mm 범위에서 측정된다.

3.3 하중전달부

하중부과장치는 가스압이나 스텝핑 모터에 의해 시편에 하중을 가하는 장치로 본 캡슐에서는 벨로우즈로 둘러 싸인 원판에 가스압력을 가하여 수축, 팽창되더라도 가스의 누설이 없이 응력을 부과하는 장치를 모델로 한다. 하중부과장치는 벨로우즈 외에도 요크, 하중전달봉, 시편 그립과 벨로우즈 내부의 가스압력 조절장치로 구성된다. 하중부과장치의 벨로우즈부에 대한 설계도면은 그림 6과 같다. 본 시험용 캡슐에서는 시편에 가해지는 하중의 목표치는 100kg이 되도록 설계하였다. 이 하중은 게이지부의 직경이 2.5mm인 A1 시편에 20kg/mm^{2}의 응력을 가할 수 있는 하중으로 조사크립 시험에 요구되는 하중 조건을 만족한다. 벨로우즈의 재질은 스테인레스강이며, 스프링상수는 0.4kg/mm이다. 이 벨로우즈는 제작 시 상온에서부터 150℃간격으로 단계적으로 승온하여 600℃까지 가열·냉각을 2회 행하여 변형처리하고 담금질을 하였다.

시편의 하중방향을 바로 유지하기 하중전달봉(pull rod)과 요크봉은 베어링으로 지지한다. 베어링부의 간극은 조사시의 감마발열로 온도가 올라간 상태에 있어서도 적정한 간극을 유지하고 교착되지 않도록 하여 슬라이딩에 수반된 마찰저항을 시편에 걸리는 하중에 대해 무시할 수 있도록 한다. 베어링 재질로는 하중전달봉과 요크봉에 대해 고온에서도 윤활성이 우수한 그라파이트 재질로 한다. 시료홀더는 장시간 동안 고온에서 유지하기 위해 충분한 강도를 가져야 한다. 시료홀더는 고온에서의 내식성과 강도, 고온에서 조직의 안전성, 중성자 조사에 의한 고온취화에 강한 재질을 사용한다.

4. 열설계

캡슐의 구성 부품은 조사환경 하에서 감마선에 의해 발열된다. 조사중 캡슐 각부의 온도는 열설계를 하여 결정하고 이 온도에 따라서 각부의 재질과 치수를 결정한다. 본 캡슐은 노심 바깥의 시험공인 IP공을 이용하며, 감마 발열률의 피크값은 SUS304 재질에 대해 1.5W/g, 알루미늄에 대해 최대 1.3W/g로 추정된다. 열계산은 시편 주위의 단면형상이 대칭을 이루는 1차원 구조이므로 1차원 열계산 코드인 GENGTC를 사용하여 계산한다. 시편 중심온도는 계산으로 370℃ 전후가 되도록 캡슐 층을 결정하고 시편 주위의 히터에 의해 조사목표 온도인 400±5℃까지 승온하여 제어하는 개념을 채택하였다.

본 캡슐에 대한 열설계의 주요 성질인 자연대류의 평균열전달계수는 다음과 같은 함수형태로 표시된다.[10]

$$Nu_f = C(Gr_f \mathrm{Pr}_f)^m \qquad (1)$$

윗 식에서 아래첨자 f는 유체의 성질을 구할 때 다음과 같이 정의되는 막온도(film temperature)에서 해당되는 값을 구한다는 뜻이다.

여기서,

$$T_f = \frac{T_\infty + T_w}{2}$$

$$Gr = \frac{g\beta (T_w - T_\infty) x^3}{\nu^2}$$

$$\Pr = \nu / \alpha$$

본 캡슐의 형태에 대한 $Gr_f \Pr_f$의 값을 구하면 1.53 x 10^8이 된다.
수직원통에 대한 C의 값은 0.59, m의 값은 1/4이다.
이 값으로부터 구한 표면 열전달계수 h는 845W/m^2℃이다.

5. 강도계산

캡슐외통관에서 발생되는 열응력의 최대값 σ_{max}는 다음과 같다.

$$\sigma_{tmax} = \frac{\alpha E(t^1 - t^2)}{2(1-\nu)} \qquad (2)$$

여기서, α(선팽창계수) : 16.2 x 10^{-6}℃$^{-1}$
E(Young's modulus) : 1.96 x 10^4kg/mm^2
ν(poisson 비) : 0.28
t^1(외통내면온도) : 55℃
t^2(외통외면온도) : 60℃

따라서, $\sigma_{tmax} = 1.1\ kg/mm^2$

외부 냉각수에는 압력이 걸리지 않으므로 냉각수에 의한 외압 σ_o는 무시할 수 있다. 외통관의 허용응력 σ_a 는 ASME SEC.III에 따라서 구하여 14.1kg/mm^2 (at100℃)로 하였다.
응력평가는,

$$|\sigma_o| + \sigma_{tmax} = 1.1 < 3\sigma_a = 42.3$$

으로 되어 만족하므로 외통의 강도는 충분하다.

6. 하중부과시험

크립시험은 시편에 일정한 응력을 500~3,000시간 범위에 걸쳐 장시간 부가해야 하기 때문에 캡슐을 제작하기 전에 벨로우즈의 변위 및 온도 등에 의한 하중 특성을 파악해야 한다. 실험에서는 그림 2와 같이 외경 32mm의 원판에 직경 6mm의 하중전달봉(pull rod)을 달아 하부에서 헬륨가스로 하중을 가한다. 하부 원판에 가해지는 힘으로부터 벨로우즈의 수축에 의한 반력을 빼면 유효하중이 된다. 벨로우즈의 변위에 따른 하중감소분을 구하기 위하여 벨로우즈의 변위를 고려한 실험을 하였다. 이를 위해 벨로우즈를 0~10mm까지 왕복 이동시켜 각 변위마다의 압력을 측정하였다. 그림 7과 8은 가스압력과 발생력을 보여 준다. 벨로우즈의 반력을 고려하기 위해 시

편의 변위가 4mm일 때의 하중값을 구하였다. 벨로우즈 No.1은 스프링상수가 0.1kg/mm로 매우 낮아서 반력이 작다. 따라서 벨로우즈에 가한 He 가스압력이 50kg/cm^{2}까지 증가할 때 최대로 얻어지는 하중은 150kg에 이른다. 그림으로부터 이 벨로우즈를 사용할 경우에는 가스압력을 35kg/cm^{2}을 가하면 100kg의 하중을 얻을 수 있다. 벨로우즈 No.2는 스프링 상수가 0.3kg/mm인 벨로우즈로 헬륨가스의 압력이 50kg/cm^{2}에 이를 때 로드셀에서의 하중은 146.5kg이다. 이 하중도 또한 시편에 57kg/mm^{2}의 응력을 발생시켜 시편에서 요구되는 하중조건을 만족시킨다.

하중시험을 통해 발생력은 가해지는 가스압력에 선형적으로 비례함을 확인할 수 있었다. 또한 헬륨봄베에서 원판에 가해지는 압력만으로도 요구되는 하중인 100kg을 얻을 수 있기 때문에 시편에 가해지는 하중을 증가시키기 위한 별도의 드라이빙 장치가 필요 없다는 것을 확인하였다.

7. 결론

하나로를 이용한 조사크립시험을 수행하기 위한 전단계로 노내에 장전된 캡슐 내부에서의 온도와 압력과 같은 설계 파라메터를 확인하기 위한 시험용 크립캡슐의 설계 및 제작을 위하여 설계요건을 기술하고 구조설계, 열설계 및 강도설계 등의 예비설계를 수행하였다. 설계요건에서는 하나로에서 조사할 수 있는 실제 캡슐에 대한 설계 고려사항을 기술하였으며 개념설계에서 다루지 않은 구조를 상세히 기술하였다. 구조설계에서는 시편부, 하중전달부, LVDT부에 대해 기술하였으며 강도설계에서는 외통의 강도설계를 수행하여 건전함을 확인하였다. 열설계에서는 캡슐에 대한 조사시험을 노심 외부의 IP공에서 수행한 경험이 없기 때문에 열계산을 위해 자연대류에 의한 표면열전달계수를 제시하였다. 추후 상세설계시 이 값을 이용하여 열계산을 수행하여 시편과 열매체 사이의 갭을 조절하므로써 시편의 목표온도를 계산할 수 있다. 캡슐의 설계 제작 후 하나로에서의 조사시험을 통해 이 표면 열전달계수의 타당성을 확인할 필요가 있다. 하중부과시험에서는 2가지의 상용벨로우즈에 대해 외부에서 가하는 가스압력에 따라 하중전달봉에서의 발생력이 선형적으로 비례함을 확인하였다. 실험을 통해 모컵캡슐에서 사용한 외부가스공급장치에 가압을 위한 콤프레서와 같은 별도의 드라이빙 메카니즘을 사용하지 않고 헬륨봄베의 압력만으로도 크립시험에 적합한 하중을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력중장기사업 중 조사시험용 캡슐 개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강영환 외, “ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석,” ‘99 원자력학회 추계학술대회 논문집. 1999.

2. K. N. Choo, et als, "Irradiation of Reactor Materials using an Instrumented

Capsule in HANARO," Proceedings of The Sixth Asian Symposium on Research Reactor, Mito, Japan, pp. 279～284., 1999.
3. 강영환 외, "하나로 캡슐의 설계개선," '00 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2000.
4. 최용 외, "지르코늄 합금의 조사크립 시험장치 개념설계", '99 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1999.
5. 조만순 외, "조사크립 캡슐의 설계요건 및 하중부과 장치 실험", '01 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2001.
6. 최용 외, "지르코늄 합금의 조사크립 시험장치 제작 및 성능 평가", '00 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2000.
7. 맹완영 외, "노외시험용 특수캡슐 개발", KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1563/00, 2000.
8. 齊藤 隆 외, " 고속로용 구조재의 크립파단시험용 조사캡슐의 설계/제작 및 조사시험, JAERI 메모 62-029, 1987
9. 최용 외, "지르코늄 합금의 조사크립 시험방법 연구", KAERI 기술보고서, KAERI/CM-404/99, 1999.
10. J. P. Holman, Heat Transfer Fourth Edition, pp. 300～307, McGraw Hill

표 1 LVDT 설계요건

항목	사양
설계온도(최고사용온도)	300℃
설계압력(최고사용압력)	18kg/cm^2
사용 분위기	헬륨가스
변위 측정범위	±10mm
사용환경	중성자속 5x10^{14}n/cm^2·s 에서 원자로에서 3,000시간 조사
최소검출 감도	0.01mm
외관 크기	외경 14mm 길이 100mm이하

표 2 벨로우즈의 변위를 고려한 발생력

벨로우즈 가압력	발생력(kg)				
	변위량 0mm	변위량 2mm	변위량 4mm	변위량 6mm	변위량 8mm
5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0
15	37.2	36.6	36.0	35.4	34.8
25	69.5	68.9	68.2	67.5	66.9
40	118.4	117.7	117.0	116.2	115.6
50	148.0	147.2	146.4	145.8	145.1
60	180.8	180.1	179.5	178.8	178.2

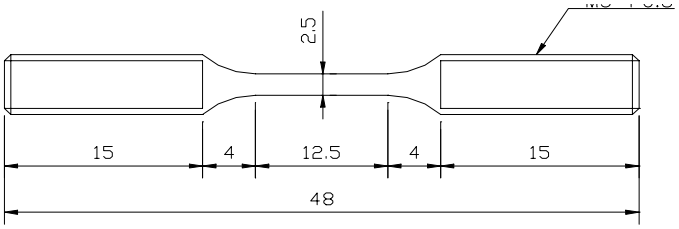

그림 1 조사크립 시편

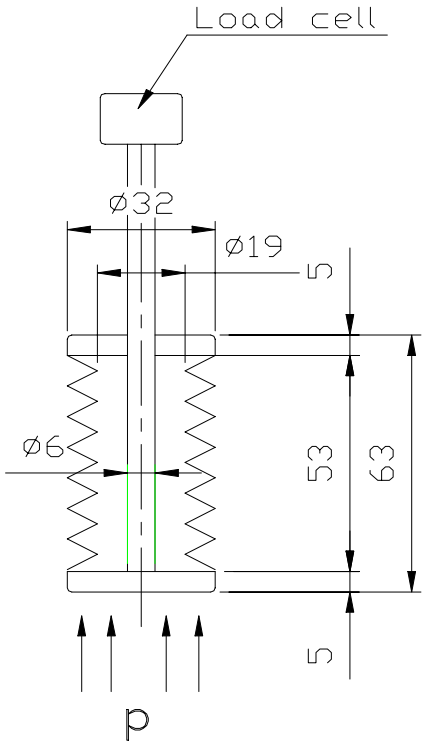

그림 2 실험장치의 벨로우즈와 하중전달봉

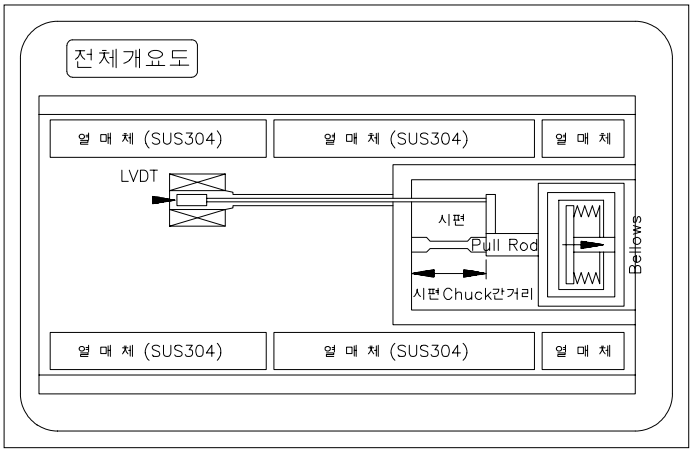

그림 3 크립캡슐 전체개요도

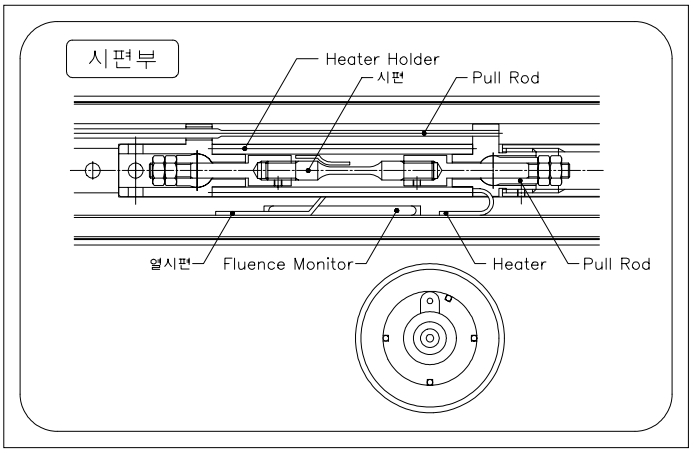

그림 4 크립캡슐 시편부

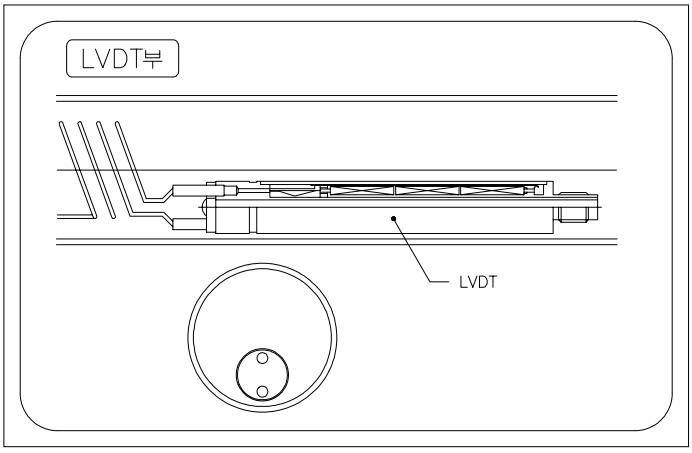

그림 5 크립캡슐 LVDT부

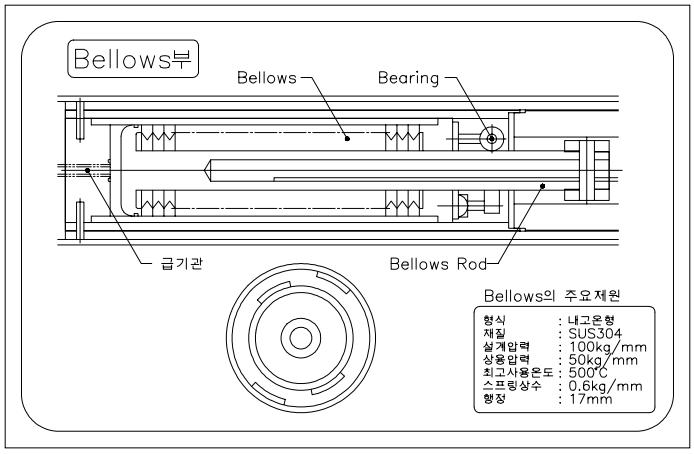

그림 6 크립 캡슐 벨루우즈부

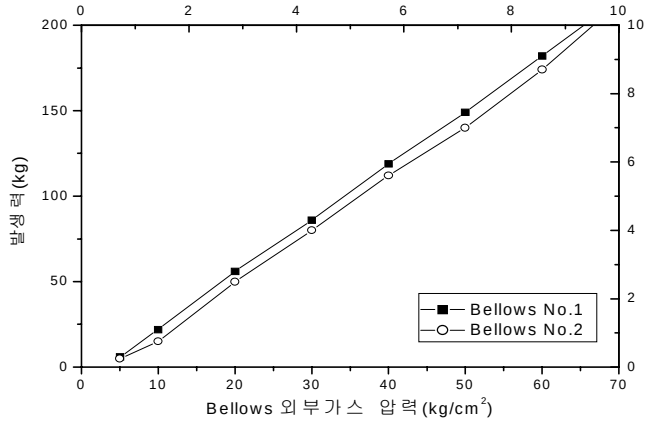

그림 7 가스압력과 발생력

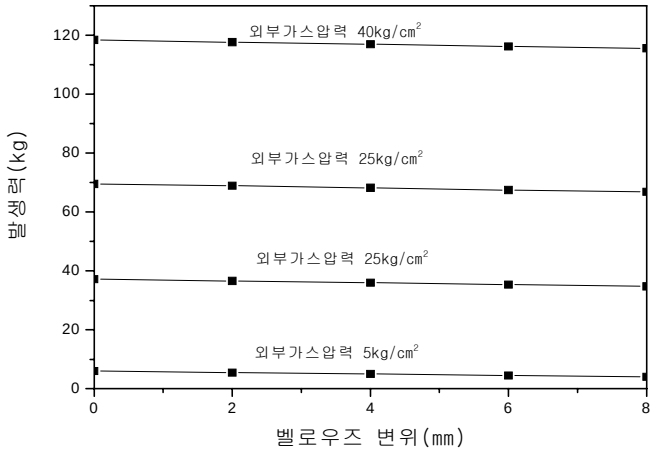

그림 8 벨로우즈 변위에 따른 하중 변화