

## 조사크립 캡슐의 설계요건 및 하중부과 장치 실험

### Design Requirement of In-pile Creep Capsule and Experiment for the Loading Unit

조만순, 강영환, 김봉구, 주기남, 김도식, 손재민,

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

하나로를 이용한 조사크립시험을 수행하기 위한 크립캡슐 설계 및 제작을 위하여 개념적 설계로 제작된 캡슐모형을 바탕으로 설계요건을 기술하고 주요 요소설계의 하나인 하중부과 장치에 대한 실험을 수행하였다. 설계요건에서는 하나로에서 조사할 수 있는 실제 캡슐에 대한 설계 고려사항을 기술하였으며 모캡캡슐의 개념설계에서 다루지 않은 과단검출기를 도입하여 변위량의 측정뿐 아니라 과단감지를 명확히 할 수 있도록 하므로써 시편과단의 오감지로 인한 실험의 오류를 방지하도록 하였다. 하중부과 장치에 대한 실험은 벨로우즈에 가스압력을 가해 하중전달봉(push rod)을 이동시켜 시편에 하중을 가하는 장치인 하중부과시험에서 모캡캡슐의 하중전달기구(mechanism)를 검토하고 2가지의 상용 벨로우즈에 대해 외부에서 가하는 가스압력에 따라 벨로우즈가 시편에 가하는 하중을 구하였다. 실험을 통해 모캡캡슐에서 사용한 외부가스 공급장치에 대한 가압용 부스팅 장치를 사용하지 않고 헬륨봄베만으로도 크립시험에 적합한 하중인 60~80kg을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 실제 캡슐의 제작에서는 장기간 노내에서 유지되어야 한다는 점을 고려하여 다이어프램 이 두꺼운 벨로우즈를 사용하는 방안을 제시하였다.

#### Abstract

Design requirement was described for design and manufacture of the in-pile creep capsule to test the creep behavior of various materials using HANARO, and the experiment for the loading unit was carried out as one of the design requisites. In the design requirement, some points to be considered for the real irradiation capsule were described and the concept for the fracture detectors were introduced which was not treated in the mock-up capsule. Detectors like LVDT and the strain gauge for high temperature are not only used to measure the displacement but to detect fracture of the specimen. They prevent failure of the experiment due to wrong detection of the specimen fracture. In the experiment for the loading unit, the loading

mechanism in the mock-up capsule was reviewed and the force by the gas pressure into the bellows was investigated according to the gas pressure for the two commercial bellows. Through this experiment, the fact that the load 60~80kg suitable for the irradiation creep experiment was obtained without any boosting device in the He gas supply system was confirmed. Use of bellows whose diaphragms are more thick was recommended paying regards to the long term experiment in the reactor.

## 1. 서 론

원자로의 구조재료인 지르코늄 합금, SUS304 등과 CR-Ni강, 마나뎀 합금 등에 대한 크립과단시험은 재료의 건전성을 평가하기 위한 매우 중요한 실험으로 조사(irradiation) 량에 따른 재료의 기계적 특성 변화를 파악하기 위한 것이다. 한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 원자력 재료의 조사효과 평가를 위한 캡슐을 개발하기 위하여 많은 연구를 수행하여 왔다.[1-4] 그러나 가동 중인 원자로의 노심에서 재료의 기계적 특성 변화를 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.

연구로를 활용한 캡슐조사시험은 다양한 운전조건을 구현하고 조사시험 변수를 조절할 수 있으므로, 여러 가지 원자력 재료의 실제 사용조건을 그대로 모사할 수 있다. 또한 중성자속이 높아 조사시험 기간을 크게 단축하여 단기간에 원자력 관련 재료 및 구조물의 조사성능 예측 및 평가를 가능하게 한다. 원자로 재료가 조사 받을 때의 거동 변화를 평가하기 위해서 실제 원자력발전소의 노내에서 시험하는 것은 어려우므로 연구용 원자로에서 실제 분위기와 유사한 환경을 조성한 후 모의시험을 한다.

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(push rod)과 같은 하중전달장치의 연구 등 크립캡슐에 필요한 요소기술에 대한 연구가 진행되고 있다.[5-6]

조사크립시험용 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  $8.6 \times 10^{14}$  neutron/cm<sup>2</sup> · s인 BR-10 연구로를 이용한 조사시험 연구가 활발하게 이루어지고

있다. 연구대상 재료는 cladding 재료, 핵연료, 반사체 재료 등으로 오스테나이트 Cr-Ni 강, 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. 일본에서는 동력로와 고속증식로의 구조재료인 Zr합금, SUS304 등에 대한 in-pile 크립시험을 수행하였다.[7] 크립시험에는 시편에 가해지는 부하응력의 파악 및 파단 검출이 중요하다. 하중부과 방식은 가스압력을 벨로우즈에 가하여 힘으로 바꾸고 축봉을 이용하여 전달하는 방식을 사용하였다. 시편의 파단검출에는 정확한 파단검출을 위해 1개의 시편에 2종류의 검출기인 LVDT와 고온변형률계이치를 사용하였다.[8]

국내에서는 Y. Choi 등이 하나로에서 조사시험을 할 수 있는 크립캡슐의 개념설계를 수행하고 모형을 제작한 바가 있다.[9] 이 모형은 하중부가 장치로 SUS316L 재질의 벨로우즈를 사용하였으며 시편지지부, 이음쇠 및 그림 등의 건전성 확인에 이용되었다.

본 논문에서는 in-pile 크립캡슐의 설계요건을 기술하고 벨로우즈 및 벨로우즈를 이용한 하중부과장치의 부하응력 특성을 파악하여 조사크립캡슐 설계 및 제작의 기본자료를 제공하고자 한다.

## 2. 크립캡슐의 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 크게 하중을 가하는 부분, 변형을 측정하는 부분, 시편의 온도를 조절하는 부분으로 구분할 수 있다. 또한 이를 위한 외부 장치로서 캡슐본체, 하중부과와 온도제어에 관련된 압력 조절부, 변형량과 하중 측정에 관련된 데이터 수발부가 있다.

하나로의 노심에서 캡슐 시험은 평균 중성자조사량이  $5 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ , 감마가열률 (gamma heating rate)의 최대값이 4.8W/g인 분위기에서 조사되며 시편에 요구되는 온도는  $600 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 범위이다. 조사시험에 요구되는 크립시편은 1개의 캡슐에 2개의 시편을 장전하는 것을 목표로 하며 노외 성능시험용 캡슐의 제작에서는 1개의 시편만을 포함하는 캡슐을 제작한다. 조사시험에 사용될 시편의 재료는 SUS304와 Zr합금 등이 필요하지만 노외성능시험용 캡슐의 성능시험에서는 SUS304재질을 사용하는 것으로 하여 캡슐을 제작한다. 시편은 직경 5mm, 길이 50mm로 게이지부의 직경은 1.8mm, 길이는 10mm이다. 그림 1에 시편의 상세한 형상과 치수를 표시하였다. 조사시험은 CT공이나 IR공에서 하며 조사시험시 시편에 부가되는 응력은 20~30kg/mm<sup>2</sup>이다. 예상파단시간은 500~3,000시간의 범위를 고려한다.

캡슐본체는 캡슐의 각 부품들을 수용하고 지지해 주는 골격에 해당되는 부분이다. 본체의 외통은 노내에서 사용되는 점을 고려하여 하나로에서 조사시험을 수행해 온 재료캡슐과 같은 스테인레스강의 튜브로 제작하고 외경은 60mm로 한다. 캡슐본체 내부의 압력은 진공펌프와 헬륨공급장치에 의해 조절되는데 내부 헬륨가스의 압력을 1기압~ $10^{-3}$ torr 사이에서 유지한다.

하중부과장치는 벨로우즈나 스텝핑 모터에 의해 시편에 하중을 가하는 장치로 본 캡슐에서는 금속 벨로우즈에 가스압력을 부과하여 벨로우즈가 수축, 팽창되더라도 가스의 누설이 없이 응력을 부과하는 장치를 모델로 한다. 벨로우즈는 제작방식에

따라 성형벨로우즈와 용접형벨로우즈로 구분할 수 있다. 크립캡슐에서는 조사시의 고온강도 측면에서 벨로우즈 상용압력은 가능한 한 낮게 유지하고 벨로우즈에 의한 발생력은 크게 되도록 하는 것이 바람직하다. 이 때문에 본 캡슐에서는 하중의 변화 특성이 직선적이고 일정하며 신축률과 내압성이 우수한 용접벨로우즈를 사용한다. 용접형벨로우즈와 성형벨로우즈의 특성비교는 표 1과 같다. 하중부과장치는 벨로우즈 외에도 요크, 하중전달봉, 시편 그립과 벨로우즈 내부의 가스압력 조절장치로 구성된다. 벨로우즈에 의해 시편에 가해지는 최대하중은 100kg이 되어야 한다. 이 하중은 게이지부의 직경이 1.8mm인 SUS304 시편에 39kg/mm<sup>2</sup>의 응력을 가할 수 있는 하중으로 조사크립 시험에 요구되는 하중 조건을 만족한다. 벨로우즈의 재질은 스테인레스강, 인코넬, 티타늄 중 위의 하중조건에서 3,000시간까지 견디는 재질을 선정하며 캡슐 내에서 벨로우즈의 교환이 가능하도록 한다.

시편 온도조절장치는 진공펌프, 헬륨공급계통, 히터, 온도측정장치 및 콘트롤러로 구성된다. 온도를 일정하게 하기 위해서는 온도조절 장치에 대한 적당한 단열이 필요하다. 시편의 온도는 최대 600℃까지 상승된다. 시료부의 온도가 본체 내부의 진공도를  $\sim 10^{-3}$  torr까지 조절하여 감마발열만으로 조사 목표온도보다 높아지는 경우에는 냉각이 필요하고 목표온도보다 낮아지는 경우에는 가열이 필요하다. 히터의 구조는 기본적으로는 코일상의 히터를 감아서 알루미늄에 주입하는 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.

시편의 하중방향을 바로 유지하기 하중전달봉(push rod)과 요크봉은 베어링으로 지지한다. 베어링부의 간극은 조사시의 감마발열로 온도가 올라간 상태에 있어서도 적절한 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 재질로 인코넬718재 또는 동등한 재질이어야 한다.

크립파단 시험에서는 시편의 변위량, 파단여부 및 파단시간을 측정하는 것이 매우 중요하다. 변위량의 측정에는 LVDT라고 불리는 선형전위차등변압기가 사용되는데 변위량이 LVDT에 전달되면 전기적 신호를 발생시키고 이것을 정량화하여 시편의 변위를 측정할 수 있게 한 장치이다. 파단에 관해서는 파단여부가 잘못 감지되는 경우에는 노내시험의 신뢰성에 문제를 일으킬 수도 있으므로 파단검출을 2중으로 한다. 그 하나는 늘어난 길이에 따라 파단을 검출할 수 있는 LVDT이고 다른 하나는 고온에서 사용 가능한 변형률게이지이다. LVDT는 예측된 길이 이상의 변위량이 감지되면 파단으로 간주한다. LVDT의 설계조건은 표 2와 같다. 시편의 파단을 검출하기 위한 다른 한가지는 고온변형률게이지로 변형률(strain)이 증가하지 않는 위치인 요크봉 윗면에 붙여 시편이 파단되면 요크가 벽면에 부딪혀 변형률이 증가하므로 급격한 출력변화가 발생되어 파단을 확인한다.

크립시험 중 시험변수 데이터는 측정 및 데이터 수발장치에 의해 수행된다. 측정되는 데이터는 하중, 크립변형, 온도, 파단 및 파단시간 등이다. 측정부는 LVDT, 로드

셀, 압력계 및 변형률게이지부로 구성된다. 센서로부터 오는 시험데이터는 A/D컨버터를 통해 데이터처리계통으로 전달되며 크립변형은 LVDT에 의해 0~10mm 범위에서 측정된다.

### 3. 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 충분히 파악해야 한다. 하중부과시험의 목적은 조사시험시 가하는 가스압력에 의한 하중을 최소한으로 감소시키면서 장시간에 걸친 압축과 인장에 따른 변형 및 내외부의 높은 압력차이를 견딜 수 있는 두께를 가진 벨로우즈를 찾아내는데 있다. 본 실험에서는 그림 2에서와 같이 외경 32mm의 원판에 직경 6mm의 하중전달봉(push rod)을 달아 하부에서 He가스로 하중을 가한다. 하부 원판에 가해지는 힘으로부터 벨로우즈의 수축에 의한 반력을 빼면 유효하중이 되는데 유효하중을 최대로 하면서 동시에 벨로우즈의 다이어프램의 두께를 두껍게 하여 장기간의 변형과 압력차이에서도 파손이 생기지 않는 벨로우즈를 선택해야 한다. 벨로우즈의 변위에 따른 하중감소분을 구하기 위하여 벨로우즈의 변위를 고려한 실험을 하였다. 이를 위해 벨로우즈를 0~10mm까지 왕복 이동시켜 각 변위마다의 압력을 측정하였다.

캡슐 조사시의 감마발열에 의해 벨로우즈와 캡슐 각 부의 온도가 상승하는데 이 때문에 열팽창에 의해 벨로우즈가 수축하고 벨로우즈의 반력이 증가하며 하중감소가 발생한다. 시편 상부 슬라이딩부의 접촉저항도 커져서 하중감소가 발생한다. 이러한 열팽창을 고려한 하중시험을 하는 것이 중요하지만 캡슐 제작 전에 벨로우즈의 특성을 파악하고 외부가스의 압력과 시편에 가해지는 하중과의 관계를 조사하는 것이 중요하다. 이를 위해 그림 3~4와 같은 하중부과장치를 제작하여 실험하였다. 각각의 부품은 SUS304를 사용하여 정밀가공을 통해 제작되었다. 하중부과장치는 가스압에 의해 벨로우즈의 가운데에 연결된 봉에 힘을 가하여 봉의 끝에 연결된 로드셀에서 가해진 하중을 측정하는 장치이다. 조사온도 조건을 고려하기 위해서는 캡슐본체를 제작하고 각 부위의 온도를 모의하기 위해 히터를 내장해야 하는데 현재의 실험에서는 온도조건의 변화는 고려하지 않았다. 본 시험에서 사용된 벨로우즈의 특성은 표 3과 같다.

### 4. 하중부과시험 결과

하중부과 시험시 사용하는 가스는 실제 하나로에서 사용할 예정인 He 가스를 사용하여 시험 전 장치의 He 누설 여부를 검사하였다. 장치의 He 누설률 기준은 재료 캡슐에서 사용한  $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력에서 누설률이  $4 \times 10^{-6} \text{atm} \cdot \text{cm}^3/\text{sec}$  이하로 검사결과 기준을 만족하였다.

하중부과 실험에서 구하는 조건은 하중조건과 벨로우즈의 내구성이 있다. 이중 하중조건은 He가스의 압력  $0 \sim 50\text{kg}/\text{cm}^2$  범위에서 발생력이 최소  $100\text{kg}/\text{mm}^2$ 이 되어야 한다.  $100\text{kg}/\text{mm}^2$ 의 하중은 직경이 1.8mm인 시편에  $39\text{kg}/\text{mm}^2$ 을 가하는 하중으로 조사크립 시험에서 요구되는 하중조건인  $20 \sim 30\text{kg}/\text{mm}^2$ 을 만족할 뿐 아니라 베어링부와 고온에서의 벨로우즈의 하중감소분을 고려한 하중이다.

**그림 5**는 벨로우즈 No.1과 No.2로부터 구한 가스 압력과 하중선도이다. 두 경우

모두 벨로우즈의 반력을 고려하기 위해 변위 4mm에서의 하중값을 구하였다. 벨로우즈 No.1은 스프링상수가 0.1kg/mm로 매우 낮아서 반력이 작다. 따라서 벨로우즈에 가한 He 가스압력이 50kg/cm<sup>2</sup>까지 증가할 때 최대로 얻어지는 하중은 150kg에 이른다. 그림으로부터 이 벨로우즈를 사용할 경우에는 가스압력을 35kg/cm<sup>2</sup>을 가하면 100kg의 하중을 얻을 수 있다. 벨로우즈 No.2는 스프링 상수가 0.3kg/mm인 벨로우즈로 헬륨가스의 압력이 50kg/cm<sup>2</sup>에 이를 때 로드셀에서의 하중은 146.5kg이다. 이 하중도 또한 시편에 57kg/mm<sup>2</sup>의 응력을 발생시켜 시편에서 요구되는 하중조건을 만족시킨다. 이 경우에는 벨로우즈의 수축으로 인한 반력이 크므로 유효 하중이 벨로우즈 No.1보다 작다는 것을 알 수 있다.

벨로우즈 No.1과 No.2에 대한 하중시험을 통해 헬륨bomb의 압력만으로 요구되는 하중인 100kg을 얻을 수 있으며 실제 캡슐에서 파단되지 않도록 벨로우즈의 다이어프램을 더 두껍게 하여 할 수 있는 여유가 있다. 이 실험을 통해 벨로우즈 No.2보다 스프링상수가 큰 벨로우즈를 선택하더라도 조사시험시 요구되는 하중조건을 만족할 수 있다는 것을 확인하였다.

표 4는 벨로우즈 No.2에 대한 하중시험결과로 이 경우에는 벨로우즈의 변위로 인한 하중감소분으로 작용하는 반력을 고려하기 위해 로드셀을 0~10mm사이의 범위에서 위로 움직이면서 시험한 결과이다. 그림 6에 벨로우즈의 변위를 고려한 하중시험 결과를 나타내었다. 그림으로부터 각 조건에서의 측정값은 거의 직선적으로 변하고 발생력은 벨로우즈의 반력때문에 벨로우즈의 변위의 증가와 함께 감소한다.

실제 조사시험 캡슐에서는 베어링부에서의 저항으로 인한 하중 감소분을 고려해야 할 뿐만 아니라 크립시험이 고온에서 이루어지므로 벨로우즈의 팽창에 의한 하중감소를 감안하여 여유하중을 고려해야 한다.

## 5. 결론

하나로를 이용한 조사크립시험을 수행하기 위한 크립캡슐 설계 및 제작을 위하여 개념적 설계로 제작된 캡슐모형을 바탕으로 설계요건을 기술하고 주요 요소설계의 하나인 하중부과 장치에 대한 실험을 수행하였다. 설계요건에서는 하나로에서 조사할 수 있는 실제 캡슐에 대한 설계 고려사항을 기술하였다. 모캡캡슐 개념설계에 서 다루지 않은 파단검출기를 도입하여 변위량의 측정뿐 아니라 파단감지를 명확히 할 수 있도록 하므로써 시편파단의 오감지로 인한 실험의 오류를 방지하도록 하였다. 하중부과 장치에 대한 실험은 벨로우즈에 가스압력을 가해 하중전달봉(push rod)을 이동시켜 시편에 하중을 가하는 장치인 하중부과시험에서 모캡캡슐의 하중전달기구(mechanism)를 검토하고 2가지의 상용 벨로우즈에 대해 외부에서 가하는 가스압력에 따라 하중전달봉(push rod)에서의 하중을 구하였다. 실험을 통해 모캡캡슐에서 사용한 외부가스 공급장치에 가압용 부스팅 장치를 사용하지 않고 헬륨bomb의 압력만으로도 크립시험에 적합한 하중을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 실제 캡슐의 제작에서는 베어링부와 고온실험에 따른 하중 감소분을 고려하여야 하며 장기간의 시험에서도 파단되지 않는 벨로우즈가 검토되어야 한다. 이를 위해 다이어프램의 재질을 더 두꺼운 것으로 사용하고 벨로우즈의 재질을 SUS316L보다는 장기간에 걸친 하중 시험에 내구성이 강한 재질의 선택을 검토하여야 한다. 노내실험용 캡슐에 적합한 하중부과장치의 제작을 위해서는 강도와 복원력이 우수한 인코넬 또는 하스텔

로이 재질에 대한 벨로우즈에 대한 연구가 필요하다. 따라서 앞으로는 벨로우즈의 스프링상수의 변경과 복원력과 강성이 뛰어난 재질의 선정 이외에도 하중부과 장치의 온도에 따른 영향 분석 등 보다 구체적인 설계/제작 방안의 검토가 요구된다.

## 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 춘계 학술대회 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, "조사시험용 캡슐개발 및 활용," KAERI Report, KAERI/RR- 2038/99, 1999.
4. 강영환 외, "하나로 캡슐의 설계개선," '00 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2000.
5. 최용 외, "지르코늄 합금의 조사크립 시험장치 개념설계," '99 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 1999.
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 크립과단시험용 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.

표 1 용접형벨로우즈와 성형벨로우즈의 특성 비교\*

	용접형벨로우즈	성형벨로우즈
재질	SUS, Hastelloy, 티타늄, monel, 인코넬 등 용접 가능한 재질	전연성이 좋은 재료에 한함
Span	구조적으로 크게 할 수 있음	재료의 연신률에 의해 제한
길이	무제한	성형기와 금형의 크기에 따라 제한됨
피치	작다	크다
스프링 특성	스프링상수를 작게 할 수 있으며 스프링 하중 변화 특성이 직선적이고 일정함	스프링 하중 특성이 비교적 양호하지만 한계가 있음
Hysterisis	무시할 수 있음	크다
신축률	매우 크다	작다
체적변화율	Nesting 설계에 의해 완전 밀착이 가능하므로 매우 크다	Die pitch에 의해 완전 밀착이 불가능하고 1산당 피치가 크므로 작다
내압성	300~500kg/cm <sup>2</sup> 범위	30~50kg/cm <sup>2</sup> 범위
내구성	구조적으로 금속 박판에 생기는 응력을 매우 작게할 수 있다. 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>11</sup> 정도까지 가능	작다
가격	비교적 고가	표준 재료, size인 경우 저가

\* 한국셀마스터(주) 제공

표 2 LVDT 설계요건

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



표 3 시험에 사용된 벨로우즈의 특성

	벨로우즈 No. 1	벨로우즈 No. 2
재질	SUS316L	SUS316L
스프링 상수	0.1kg/mm	0.3kg/mm
외경	32mm	32mm
내경	19mm	19mm
다이하프랩 두께	0.04in	0.06in
자유장(free length)	65mm	65mm
인장길이(extended length)	80mm	80mm
압축길이(compressed length)	35mm	45mm
convolution 수	70	55
최고 사용온도	250℃	250℃
수명	1,000회 이상	1,000회 이상

표 4 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

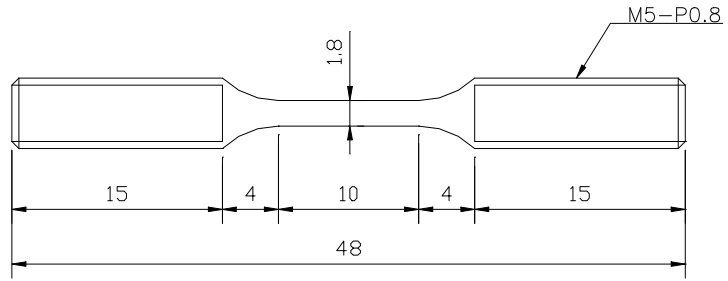


그림 1 크립 조사 시편

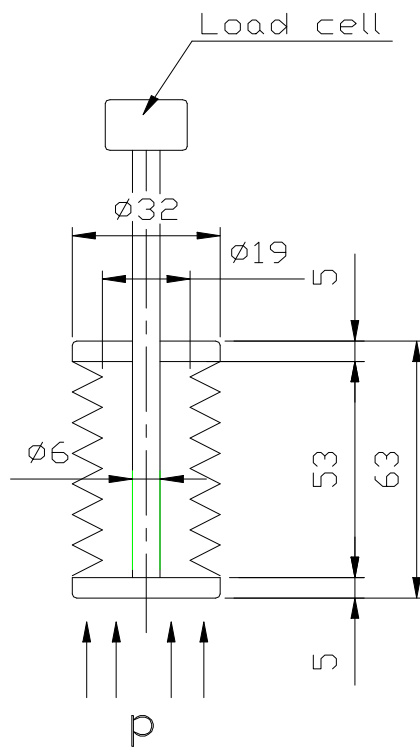


그림 2 실험장치의 벨로우즈와 하중전달부

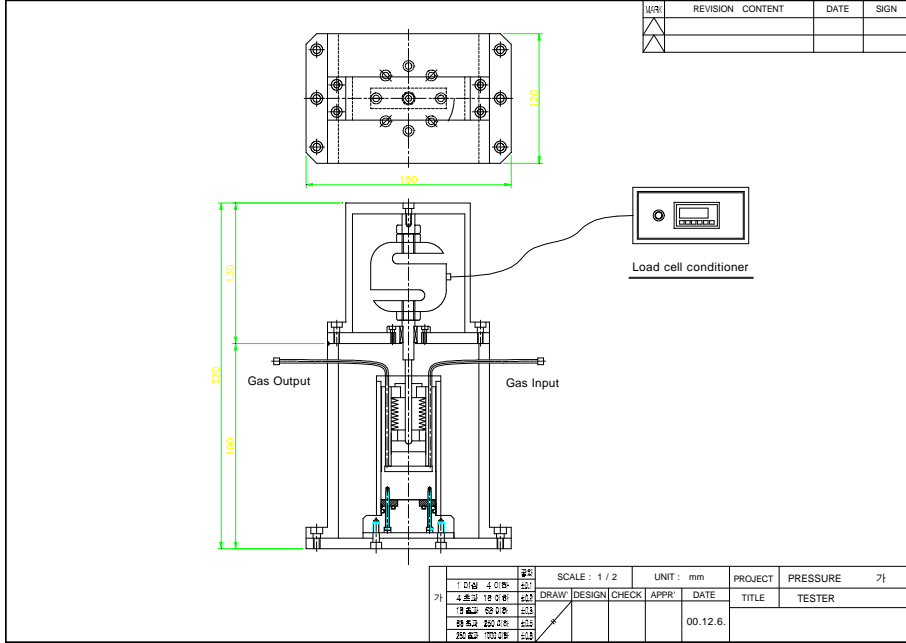


그림 3 하중부과 장치 도면



그림 4 하중부과 장치의 모습

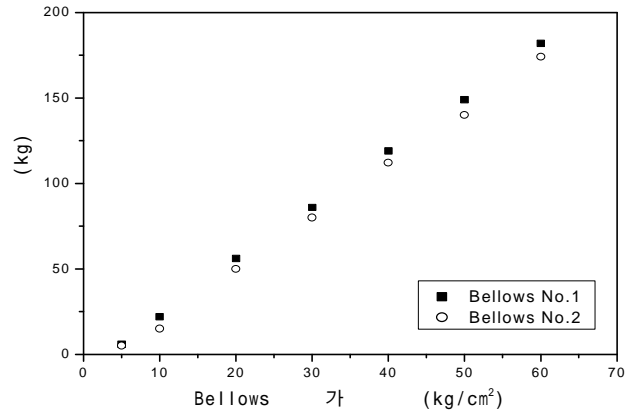


그림 5 외부가스 압력과 발생력(변위 4mm)

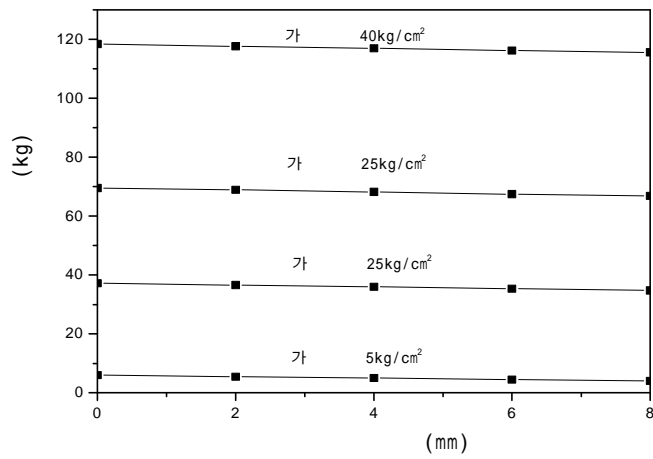


그림 6 벨로우즈 변위에 따른 하중 변화