

크립캡슐 02S-08K 설계 및 제작 (Design and Fabrication of Creep Capsule 02S-08K)

조만순, 강영환, 박승재, 손재민, 주기남, 김영진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 구조재료에 이용되는 지르코늄 합금, 스테인레스강, Cr-Ni강 등에 대한 크립 시험을 하나로에서 수행하기 위하여 크립캡슐(02S-08K)을 설계·제작하였다. 시험목적은 노심에서 조사중 발생하는 크립현상을 실시간으로 측정하기 위한 것으로 하나로 노심에 캡슐을 장전하여 하중부과장치와 변위측정을 위한 LVDT의 건전성을 확인하고 온도, 압력 및 열전달계수와 같이 설계 단계에서 산정된 설계인자들을 확인하기 위한 것이다. 전단계 크립조사시험에서는 중성자속이 매우 낮은 IP공에서 시험을 하였기 때문에 보호관이 짧은 무게장 캡슐 개념으로 설계하였다. 그러나 02S-08K 캡슐은 중성자속이 높은 노심조사공 CT에 장전할 예정이므로 보호관을 5m정도로 높여 방사선으로 인한 손상을 받지 않도록 하였다. 시편에 온도를 올리기 위해 시편 주위에 감기는 주히터와 함께 히터의 손상시에도 시편을 가열할 수 있도록 외부 열매체에도 보조히터를 설치하였다. 시편에 응력을 부과하는 장치인 하중부과장치에 대해서는 STS316LN 시편에 대해 크립시험에 요구되는 응력조건을 만족한다는 것을 노외시험을 통해 확인하였다. 본 캡슐에 대한 조사시험은 2003년 10월 중에 28일 동안 수행할 계획이며, 조사온도 600°C에서 크립편상을 관찰하고 크립 rate를 산정할 계획이다. 이 시험을 통해 중성자속이 높은 노심 조사공에서 크립시험에 대한 캡슐, 부품 및 계장품들의 건정성을 확인하므로써 복수시편을 장전하는 크립캡슐의 설계에 대한 기초자료를 확보할 계획이다.

Abstract

The creep capsule(02S-08K) was designed and manufactured in order to examine

creep behavior for zirconium alloy, stainless steel, Cr-Ni steel which will be used for reactor structural material such as pressure vessel of the advanced reactor. The purpose of test is to confirm the integrity of the loading unit and LVDT in the in-core irradiation condition and to evaluate the design parameters such as temperature, pressure and heat transfer coefficient estimated in the design stage. The previous irradiation creep test was performed at IP hole at which neutron flux is very low, so the capsule was designed with the concept of non-instrumentation capsule of which protection tube was very short. But this capsule has the stainless steel protection tube of 5m length in order that it should not be damaged in the environment of high radiation. In order to control the temperature of the specimen, the main heater around the specimen is located around the specimen and the sub-heater is wound around the outside Al thermal media. The out-core experiment for the loading unit was performed and proved to give the force satisfying the stress condition of 250MPa required for creep test at 600°C for STS316LN specimen with 3.8mm diameter. The irradiation test of this capsule will be performed for 28 days in the CT hole in October, 2003. In the test, the neutron fluence will be $2.84 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ at 600°C. In the in-core irradiation test, the integrity for the capsule parts and the instruments will be confirmed and the data will be stored up to design the creep capsule for multi-specimen.

1. 서 론

크립시험은 고온에서 재료시편에 파단이 일어나지 않는 하중을 부과하여 시간에 따른 변형정도를 파악하기 위한 시험이다. 원자로의 구조재료에 대한 크립파단 시험은 재료의 건전성을 평가하기 위한 실험으로 고온에서 조사량에 따른 재료의 기계적 특성 변화를 파악하기 위한 것이다.

한국원자력연구소에서는 차세대원자로를 비롯한 신형원자로의 압력용기와 같은 원자로 구조재료에 이용되는 지르코늄 합금, 스테인레스강, Cr-Ni강 등에 대한 크립시험을 하나로에서 수행하기 위한 캡슐을 제작 중이다. O2S-08K 캡슐은 하나로 노심에 장시간 장전하여 조사크립시험을 수행하기 위해 제작을 목표로 하는 복수시편장전용 크립캡슐을 설계하기 위한 캡슐로 제작되었다.

노내에서 크립시험을 하기 위한 캡슐은 조사공의 한정된 부피에 들어가야 하는 제한 때문에 소형화가 필요하다. 따라서 캡슐 내부에는 요구되는 시편 뿐 아니라 하중을 부과하는 장치와 변위를 측정하는 장치 등이 포함되어야 하므로 각 구성부품들은 복잡한 구조로 조립되어 있다[1-2]. 하나로를 이용하여 방사선 환경에서 원자력 재료에 대한 재료의 특성변화를 조사하기 위하여 재료캡슐을 비롯한 여러가지 캡슐을 개발하기 위하여 많은 연구가 수행되었다[3-5]. 가동 중인 원자로의 노심에서 재료의 기계적 특성변화를 조사하는 특수한 목적을 가진 실험은 선진국에서는 많이 수행되어 왔다. 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 조사크립변형 실험을 수행 중이다. 선진국에서는 재료의 조사크립 특성을 평가하기 위해서 다양한 형태의 크립캡슐을 제작하여 조사크립 시험을 수행하

고 있다. 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 거동특성 연구에 크립캡슐이 사용되었다. 특히 러시아의 IPPE에서는 코어의 중성자속이 $8.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 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[6]. 일본에서는 동력로와 고속증식로의 구조재료인 Zr합금, STS304 등에 대한 in-pile 크립시험을 수행하였다[7].

국내에서도 하나로를 이용하여 조사크립 시험을 수행하기 위하여 노외시험용 캡슐의 개념설계와 벨로우즈를 비롯한 하중부과장치의 설계, 그립(grip)과 하중전달봉(pull rod)과 같은 하중전달장치의 연구 등 크립캡슐에 필요한 요소기술에 대한 연구를 진행해 왔다[1-2 & 8]. 원자력연구소에서는 크립캡슐을 제작하여 out-core 시험공에서 조사시험을 수행하였다[9]. Y. Choi 등은 하나로에서 조사시험을 할 수 있는 크립캡슐의 개념설계를 수행하고 모형을 제작하였다[10].

2. 크립캡슐(02S-08K) 설계 및 시험 개요

본 크립캡슐은 하나로를 이용하는 표준형 복수시편장전용 크립캡슐을 제작하기 위해 노내 특성과 캡슐 및 부품의 건전성을 조사하는 캡슐로 제작되었다. 캡슐 제작 자료 수집을 위해 캡슐을 하나로의 노심에 장전하여 실제 조사시험 중 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 설계 및 제작에 반영한다. 본 캡슐은 설계자료의 생산 목적 외에도 노내시험을 통해 크립시험을 하는 조사공의 특성을 분석하고 장기간 시험시의 캡슐의 건전성을 확보하기 위한 목적으로 제작·시험된다. 캡슐이 장전되는 조사공은 CT공으로 이 조사공에서 28일 간의 장기간 시험은 수행된 적이 없다. 핵적 특성은 조사 후 크립캡슐에 장착된 F/M(fluence monitor)의 분석을 통해 설계단계에서 구한 중성자속을 비교하여 분석된다. 이 조사공에서의 열적 특성을 구하기 위해서는 설계단계에서 산정된 온도분포와 조사시험 시 측정된 값을 비교하여 설계값의 타당성을 검증한다.

캡슐의 건전성 평가는 28일간의 조사시험을 통해 노심의 고방사선 환경에서 캡슐 내부품들이 성능과 건전성을 유지하는지 검증하기 위한 것이다. 실시간으로 크립시험의 건전성을 확인하기 위하여 하중부과 장치와 변위 측정을 위한 LVDT의 작동을 확인한다. 하나로 노심공에 장전된 상태에서 하중부과 장치를 작동시켜 시편에 원하는 응력을 가할 수 있는지를 조사하고, 벨로우즈를 둘러싼 외통에서의 누설여부를 조사한다. 캡슐본체 내부의 진공작동을 확인하기 위해서 외부에서 진공을 변화시켜 시편의 온도가 변화하는 상황을 측정한다.

본 캡슐에 대한 조사시험은 2003년 10월 중에 하나로 노심조사공인 CT공에서 수행할 계획이며, 중성자조사량은 $2.84 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$, 조사목표온도 600°C에서 STS316LN 시편을 장착하여 시험한다.

1) 시편부 및 히터 설계

시편은 게이지부의 길이가 그림 1과 같이 25mm 직경 3.8mm인 STS316LN 재질을 사용하였다. 시편 온도조절장치는 진공계통, 헬륨공급계통, 히터, 온도측정장치 및 콘트롤러로 구성된다. 시편의 온도는 최대 600°C까지 상승된다. 시료부의 온도는 본체 내부의 진공도를 ~5torr까지 조절하여 감마 발열만으로 조사 목표온도보다 높아지는 경우에는 He 압력의 조절로 냉각을 용이하게 하고 목표온도보다 낮아지는 경

우에는 히터로 가열한다. 히터는 주히터와 보조히터로 구성된다. 주히터는 2.5kW 용량의 코일상의 히터로 시편을 둘러싸고 있는 STS304 봉에 감아 시편에 열을 가할 수 있도록 하였다. 보조히터는 주히터의 고장시 사용하는 히터로 주히터 외부에 위치한 AI 열매체에 감겨있다. 시험응력의 최대값은 항복강도보다 높은 200~230MPa로 계획하고 있다. 이때 시편 주위 그림에서는 231~266kg이 하중이 요구된다.

2) 본체 설계

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 및 온도 측정과 압력제어를 위한 T/C, 배관 등을 포함한다. 하중부과장치는 벨로우즈에 가스압력을 가하여 하중전달봉에 힘을 전달하고 요크와 그림을 통해 시편에 필요한 하중을 전달하는 장치이다. 목표 온도에 도달하기 위해서는 본체내의 진공도를 조절하여 열방출을 제어하므로써 목표온도 근처까지 올리고 시편주위에 설치된 히터에 의해 미세 제어하여 원하는 온도에 다르게 한다. 캡슐본체 내부의 압력은 진공펌프와 헬륨공급장치에 의해 조절되는데 내부 헬륨가스의 압력을 1기압~5torr 사이에서 유지한다.

캡슐의 외통은 직경 60mm의 STS316 튜브를 사용하며, 내부 재질로는 감마열에 의해 발생하는 열을 제거하기 위해 AI-1050을 사용하고 하중을 받거나 전달하는 부위에는 구조적 건전성을 확보하기 위해 STS304를 사용하였다. 그림 2 및 3은 크립캡슐의 시편부 부품과 조립된 모습을 보여준다.

하중부과장치는 벨로우즈 외에도 요크, 하중전달봉, 시편 그립과 가압장치로 구성된다. 하중부과장치는 그림 4-1 및 4-2와 같다. 벨로우즈의 재질은 하스텔로이강이며, 직경 34mm, 스프링상수는 1.2kg/mm이다. 벨로우즈는 제작시 상온에서부터 150℃간격으로 단계적으로 승온하여 600℃까지 가열·냉각을 2회 행하여 변형처리하고 담금질을 하였다. 벨로우즈의 특성은 표 2와 같다. 변위량의 측정에는 LVDT가 사용되었다. 변위량이 LVDT에서 감지되면 전기적 신호를 발생시키고 이것을 정량화하여 시편의 변위를 측정할 수 있게 한 장치이다. 사용된 LVDT의 특성은 표 3과 같다. LVDT는 시편의 과단검출에도 사용되는데 LVDT와 연결된 제어장치에서 변위량이 최대변위량인 15mm에 이르면 과단으로 간주하도록 설계하였다. 크립시험 중 시험변수 데이터는 측정 및 데이터 수발장치에 의해 수행된다. 측정되는 데이터는 시편에서의 응력, 변위, 온도 및 본체 내부, 하중부과장치에서의 압력이다. 온도측정은 시편 및 시편과 같은 높이에서 외통 쪽을 향하여 5개의 T/C를 장착하여 반경에 따른 온도변화를 측정하도록 하였으며 상부와 하부에는 LVDT부, 하중부과장치부 및 연결 금구에 3개의 T/C를 장착하였다.

3. 온도계산

캡슐 내부의 온도를 결정하는데 있어서 가장 중요한 것은 내부 부품 사이의 간격을 정하는 것이다. 시편이 있는 위치에서 캡슐 부품 사이에 있는 간격은 시편과 히터 사이, 히터와 열매체 사이 및 열매체와 외통 사이이다. 시편부는 열전달을 위해 스테인레스강 재질로 채워져 있으며 서로 접촉해 놓았기 때문에 단일 부품으로 간주하였다. 캡슐 내부의 온도를 계산하기 위해서는 GENGTC, Heating 7.2f 또는 ANSYS 등의 전산

프로그램들이 많이 이용되고 있다[11]. 01S-01K 크립캡슐은 시편부 및 상하 중요부위의 단면이 동심원을 이루고 있어서 프로그램의 운용이 가장 간단한 GENGTC code와 2차원 열계산을 하는 ANSYS code를 이용하여 캡슐 각 부분의 온도를 계산하였다. 본 캡슐의 경우 발열량이 가장 높은 부위가 시편 위치이며 중심위치를 기준으로 볼 때 다른 부분은 빈 공간이며 재료가 채워진 부분은 시편부 밖에 없으므로 시편부의 온도가 가장 높다. 그러므로 시편위치의 단면에 대한 온도계산을 나타내었다. CT공에서의 중성자속과 감마발열량은 표 3~4와 같다.

열계산에서 냉각수 온도는 36℃로 설정하였다. 열발산 방식은 캡슐 내부에서는 전도 방식으로 열이 밖으로 전달되고 외통에서는 대류에 의한 열전달 방식으로 열이 냉각수로 발산된다. CT공에서의 감마발열량 분포는 그림 5와 같다. 온도계산시 캡슐 내부의 압력은 1기압으로 설정하였다. 온도계산시에 사용된 시편부위의 단면적은 그림 6과 같다. 시편부 단면에 대해 갭간격과 히터 출력에 따른 온도분포는 그림 7 및 그림 8과 같다.

그림 7은 갭간격을 변화시켰을 때의 온도분포를 보여 준다. 여기서는 히터를 켜지 않은 상태에서 갭간격을 0.1mm에서 0.6mm까지에 변화시켰을 때의 온도 변화를 보여 준다. 갭간격만의 조정에 의해 설계 목표 온도 600℃에 근처에 도달하기 위해서는 갭을 0.3~0.5mm로 할 필요가 있다. 그림에서 시편에서의 온도를 조사하면 갭간격이 0.3mm일 때 시편에서의 온도는 487℃이며, 0.4mm일 때 539℃, 0.5mm일 때 588℃이다. 목표온도 600℃에 도달하기 위해서 나머지 온도는 히터를 선정하여 가열해 주어야 한다. 이 계산 결과로부터 갭간격을 0.4mm로 선정하였다.

그림 8은 갭을 0.4mm(내부진공 1기압)로 정한 상태에서 히터의 출력을 증가시킬 경우 캡슐내부의 온도계산 결과를 나타내고 있다. 시편의 온도는 히터 출력이 없을 때인 539℃로 부터 히터출력을 0.5kW 증가시킴에 따라 581℃, 619℃, 652℃로 증가한다. 따라서 목표온도 600℃는 갭간격 0.4mm 히터출력 0.5~1.0kW 사이에서 도달될 수 있다. 캡슐표면 온도는 하나로에서의 ONB 조건인 124℃이하가 되어야 한다. 위 두가지 경우 모두 46~49℃의 범위에 있다. 그러므로 어떠한 경우에도 외통의 온도는 ONB 조건을 만족한다.

4. 하중부과시험

크립시험은 시편에 일정한 응력을 500~3,000시간 범위에 걸쳐 장시간 부가해야 한다. 크립캡슐이 조립된 상태에서는 외부에서 가하는 가스압력만을 측정할 수 있기 때문에 조립 전 하중부과장치의 가스압력과 하중전달봉에서의 발생하는 하중과의 관계를 구해야 하고 그 결과로부터 시편에 가해지는 응력을 얻을 수 있다. 가스압력과 하중의 관계를 구하기 위해 그림 9와 같이 실제 크립캡슐에 장착되는 것과 동일한 벨로우즈를 노외시험장치에 부착하여 로드셀에서의 하중을 측정하여 가스압력에 따른 하중전도의 결과를 얻었다. 이 장치는 외경 34mm의 벨로우즈에 플랜지로 하부를 막고 직경 10mm의 하중전달봉을 연결하여 외부에서 헬륨가스에 의해 하중을 전달할 수 있도록 한 장치이다. 노외하중부과 장치에서 구한 압력-하중관계는 그림 10과 같다. 벨로우즈 No.1과 No.2는 크립캡슐 설계단계에서 하중부과장치의 유효성과 건전성을 시험하기 위해 제작된 장치로 하나로에 장전되는 것과 재질이 다르다. 이 벨로우즈의 외경은 32mm, 스프링상수는 0.1과 0.3kg/mm이다. 벨로우즈 No.3(φ23mm)는 01S-01K에 사용된 벨로우즈로 목표하중이 150MPa이다.

본 크립캡슐에서는 캡슐의 외경이 60mm이므로 직경 34mm의 벨로우즈를 사용할 수 있다. 운전시 벨로우즈의 내외부의 압력차이는 최대 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 고려하여 이 압력에 견딜 수 있도록 벨로우즈 산의 두께가 두껍고 스프링상수가 큰 벨로우즈를 사용하였다. 이 그래프로부터 가스압력과 하중과의 관계식은

$$F=2.95608+6.17075P \quad (1)$$

여기서 P 는 kg/cm^2 , F 는 kgf 으로 표시되는 단위이다.

이 관계를 제어장치에 입력시켜 시편에 걸리는 응력으로 표시하기 위해서 F 를 시편의 단면적으로 나누고 응력단위인 MPa 로 환산하였다. 제어장치에 입력된 가스압력과 응력의 관계식은

$$\sigma=2.5544+5.3322P(\text{MPa}) \quad (2)$$

여기서 P 는 kg/cm^2 , σ 는 MPa 로 표시되는 단위이다.

이 결과로부터 시험응력인 $200\sim 230\text{MPa}$ 을 얻을 수 있는 헬륨가스의 압력은 $37.03\sim 42.65\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다. 하중시험을 통해 발생력은 가해지는 가스압력에 선형적으로 비례함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 크립캡슐은 하나로를 이용하는 표준형 복수시편장전용 크립캡슐을 제작하기 위해 노내 특성과 캡슐 및 부품의 건전성을 조사하기 위하여 제작되었다. 시험은 설계자료의 생산 목적 외에도 노내시험을 통해 크립시험을 하는 조사공의 특성을 분석하고 장기간 시험시의 캡슐의 건전성을 확보하기 위하여 수행된다. 이 캡슐은 중성자속이 높은 노심시험공 CT에서 조사시험할 예정이므로 보호관을 5m정도로 높여 방사선으로 인한 손상을 받지 않도록 하였다. 시편에 온도를 올리기 위해 시편 주위에 위치한 주히터와 함께 히터의 손상시에도 시편을 가열할 수 있도록 외부 열매체에도 보조히터를 설치하였다. 시편에 응력을 부과하는 장치인 하중부과장치에 대해서는 STS316LN 시편에 대해 크립실험에 요구되는 응력조건을 만족한다는 것을 노외실험을 통해 확인하였다. 본 캡슐에 대한 조사시험은 2003년 10월 중에 28일 동안 수행할 계획이며, 조사온도 600°C 에서 크립편상을 관찰하고 크립 rate를 산정할 계획이다. 이 시험을 통해 중성자속이 높은 노심 조사공에서 크립시험에 대한 캡슐, 부품 및 계장품들의 건정성을 확인하므로써 복수시편을 장전하는 크립캡슐의 설계에 대한 기초자료를 확보할 계획이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 최용 외, “지르코늄 합금의 조사크립 시험장치 개념설계”, ‘99 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 1999.
2. 조만순 외, “조사크립 캡슐의 예비설계”, ‘01 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2001.
3. K. N. Choo, et als, “Design and Fabrcation of HANARO Instrumented Capsule for Irradiation Test of Reactor Vessel, Core, Pressure Tube Materials,” ‘01 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집. 2001.
4. 강영환 외, “ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석,” ‘99 원자력학회 춘계학술대회 논문집. 1999.
5. 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.
6. 맹완영 외, “노외시험용 특수캡슐 개발”, KAERI 기술보고서, KAERI/TR-1563/00, 2000.
7. 齊藤 隆 외, “고속로용 구조재의 크립과단시험용 조사캡슐의 설계/제작 및 조사시험, JAERI 메모 62-029, 1987
8. 조만순 외, “조사크립 캡슐의 설계요건 및 하중부과 장치 실험”, ‘01 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2001.
9. 조만순 외, “크립캡슐(01S-01K)의 온도분포 계산과 구조적 건전성 해석”, ‘03 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2003.
10. 최용 외, “지르코늄 합금의 조사크립 시험방법 연구”, KAERI 기술보고서, KAERI/CM-404/99, 1999.
11. GENGTC-JB, 조사용 캡슐 내 온도평가 프로그램, JAERI-M-87-148, 1987

표 1 Bellows 특성

항목	사양
재질	Hastelloy C-276 cold reduced
최대 운전 압력(ΔP)	50kg/cm ²
Free length	74.5
최대 압축 길이	56.5
Cycle 수명	19,314
외/내경	34/23mm
Leaflet 두께	0.14mm
Convolutions	52
No of plies	2

표 2 LVDT 특성

항목	사양
설계온도(사용온도)	600℃
운전 압력	50kg/cm ²
사용 분위기	헬륨가스
변위 측정범위	±15mm
최소검출 감도	0.01mm
외관 크기	220mmL/2m integral MI

표 3 중성자 조사량(24MW for 28 days)

E > 0.1 Mev						E > 0.1 Mev			
Height (cm)		C-ST316 (inner)		C-ST304 (middle)		C-ST316 (inner)		C-ST304 (middle)	
lower	upper		fsd		fsd		fsd		fsd
-24.2	-17.5	5.04E+20	0.0280	4.99E+20	0.0123	2.45E+20	0.028	2.40E+20	0.0121
-17.5	-10.8	5.70E+20	0.0264	5.63E+20	0.0116	2.72E+20	0.0267	2.66E+20	0.0115
-10.8	4.0	5.93E+20	0.0254	5.90E+20	0.0113	2.84E+20	0.0254	2.84E+20	0.0111

표 4 구조재 및 시편에서의 발열량(W/g)

	Height (cm)		Mass(g)	Total (W/g)	fsd	발열량(W)
	lower	upper				
A-ST304	-54.2	-44.2	473.50	0.60	0.0183	284.10
	-44.2	-34.2	473.50	1.84	0.0100	871.24
A-AL1050	-54.2	-44.2	447.87	0.50	0.0134	223.94
	-44.2	-34.2	447.87	1.50	0.0075	671.81
B-AL1050	-34.2	-24.2	537.73	3.07	0.0053	1650.83
C-ST316 (inner)	-24.2	-17.5	10.57	4.72	0.0206	49.89
	-17.5	-10.8	10.56	5.54	0.0191	58.50
	-10.8	-4.0	10.60	5.73	0.0189	60.74
C-ST304 (middle)	-24.2	-17.5	227.78	4.75	0.0084	1081.96
	-17.5	-10.8	227.44	5.44	0.0079	1237.27
	-10.8	-4.0	228.46	5.65	0.0077	1242.82
C-AL1050	-24.2	-17.5	348.13	4.19	0.0053	1458.66
	-17.5	-10.8	347.62	4.78	0.0050	1661.62
	-10.8	-4.0	349.17	5.01	0.0048	1749.34
D-AL1050	-4.0	5.2	591.91	4.71	0.0044	2787.90
	5.2	14.5	591.91	3.80	0.0049	2787.85
	14.5	23.7	591.91	2.69	0.0059	1592.24
	23.7	32.9	591.91	1.66	0.0075	982.57
Tube(외통)	-54.2	-44.2	286.07	0.60	0.0145	171.64
	-44.2	-34.2	286.07	1.75	0.0082	500.62
	-34.2	-24.2	286.07	3.53	0.0056	1009.87
	-24.2	-17.5	192.53	4.81	0.0057	926.03
	-17.5	-10.8	192.24	5.48	0.0054	1053.48
	-10.8	-4.0	193.10	5.78	0.0053	1116.12
	-4.0	5.2	263.90	5.47	0.0048	1443.53
	5.2	14.5	263.90	4.47	0.0053	1179.63
	14.5	23.7	263.90	3.13	0.0064	826.01
	23.7	32.9	263.90	1.95	0.0081	514.61

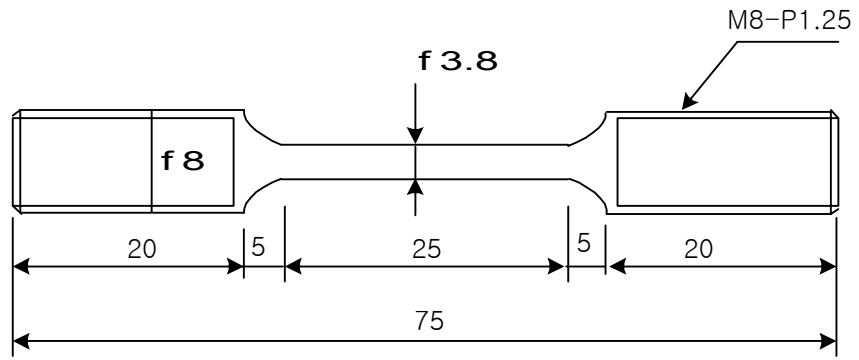


그림 1 02S-08K 크립캡슐 시편



그림 2 크립캡슐 시편부 부품



그림 3 시편부와 히터(조립 후)

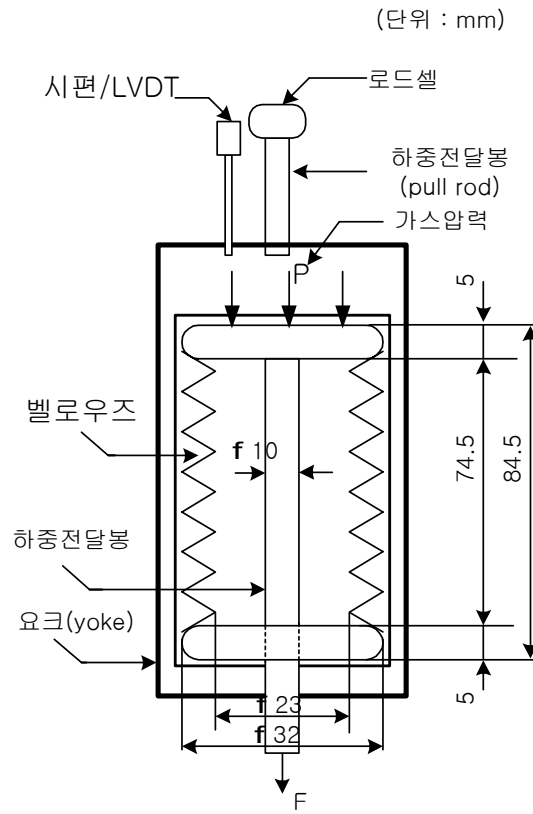


그림 4-1 노외 하중부과 시험장치 개념도



그림 4-2 노외 하중부과장치 모습

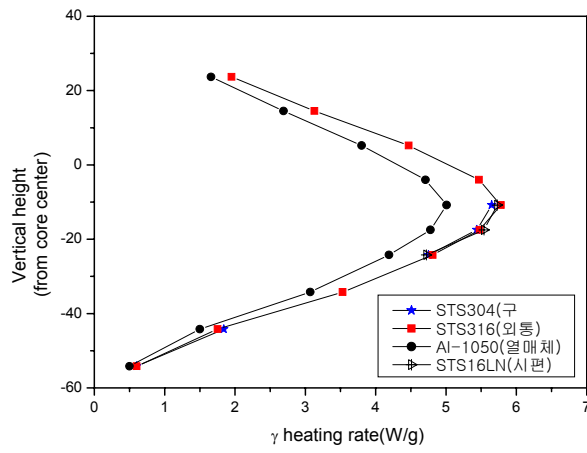


그림 5 02S-08K 캡슐의 감마발열량
(CT at 24MW)

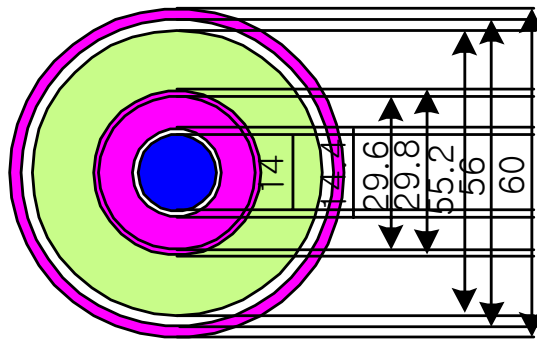


그림 6 02S-08K 크립캡슐 시편부 단면
(시편 STS316LN/히터 STS304/
열매체 Al-1050/외통 STS316)

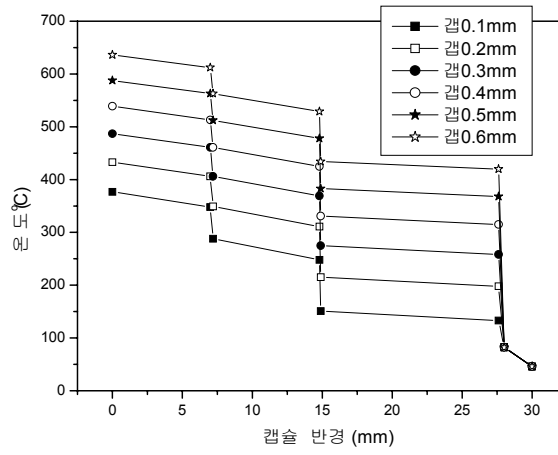


그림 7 02S-08K 크립캡슐 온도분포 (갭변화 0.1~0.6mm)

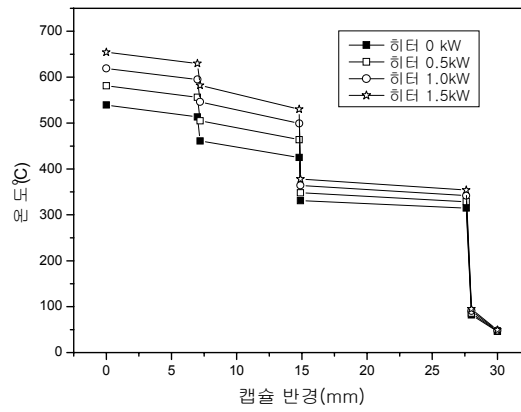


그림 8 크립캡슐 02S-08K 온도분포 (갭=0.4mm)



그림 9 벨로우즈

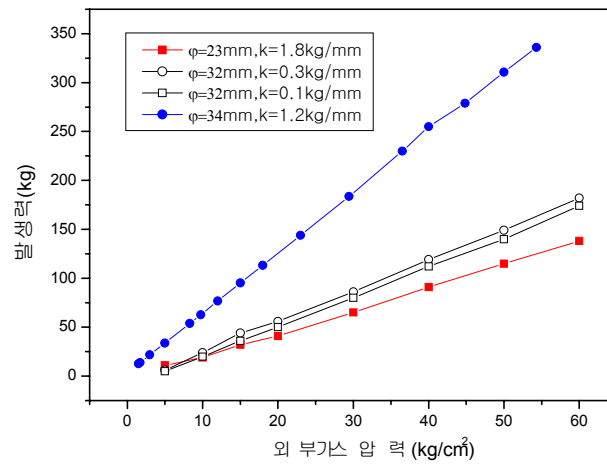


그림 10 벨로우즈에서의 가압력과 발생력