

노내시험용 크립캡슐의 설계 및 시험 계획 (Design and Test Plan of Creep Capsule for In-core Irradiation Test)

조만순, 박승재, 주기남, 김도식, 손재민, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

차세대원자로를 비롯한 신형원자로의 압력용기와 같은 원자로 구조재료에 이용되는 지르코늄 합금, STS304, Cr-Ni강 등에 대한 크립시험을 하나로에서 수행하기 위하여 노내시험용 크립캡슐(01S-01K)을 설계·제작하였다. 시험목적은 노심에서 실시간으로 크립시험을 실험으로 확인하기 위해 하나로 노내에 캡슐을 장전하여 하중부과장치와 변위측정을 위한 LVDT의 건전성을 확인하고 온도, 압력 및 열전달계수와 같이 설계 단계에서 산정된 파라미터들을 확인하기 위한 것이다. 시편에 응력을 부과하는 장치인 하중부과장치를 설계·제작하여 STS304 시편에 대해 실험에 요구되는 응력조건을 만족한다는 것을 노외실험을 통해 확인하였다. 조사시험 경험이 없는 IP공에 대한 감마열량, 중성자속과 같은 핵적특성을 구하고 열계산을 위해 이 조사공에서의 표면열전달계수를 산정하였으며, 이를 토대로 온도분포를 계산하였다. 본 캡슐에 대한 조사시험은 2002년 5월경에 하나로 노내에 위치한 외부 조사공인 IP-11공에서 10일 동안 수행할 계획이며, 평균 중성자조사량은 $5 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$, 조사 목표온도 400°C 에서 시험한다. 노내 조사시험에서는 측정되는 온도와 설계값을 비교하여 설계에 사용된 열전달계수의 타당성을 검토하고 시편의 목표온도 도달여부를 확인하며 노내에서의 캡슐의 건전성을 입증할 계획이다.

Abstract

The creep capsule(01S-01K) for in-core irradiation test was designed and manufactured in order to examine creep behavior for zirconium alloy, STS304, 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 condition loaded in the in-core irradiation hole and to evaluate the

design parameters such as temperature, pressure and heat transfer coefficient estimated in the design stage. The out-core experiment for the loading unit was performed and proved to give the force satisfying the stress condition of 150 MPa required for creep test at 400°C for STS304 specimen with 2mm diameter. The nuclear properties such as gamma heat, neutron fluence were investigated for IP hole at which the irradiation test has never performed, and heat transfer coefficient was proposed for estimation of temperature distribution inside the capsule. The irradiation test of this capsule will be performed for 10 days in the IP-11 of the outside irradiation holes located around the core in May, 2002. In the test, the neutron fluence will be $5 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$ at 400°C of the destination temperature for irradiation. In the in-core irradiation test, the heat transfer coefficient used in design will be reviewed through comparison between the measuring and the design values. The destination temperature at specimen will be checked, and the integrity of the capsule and its parts will be verified.

1. 서 론

크립시험은 고온에서 재료시편에 파단이 일어나지 않는 하중을 부과하여 시간에 따른 변형정도를 파악하기 위한 시험이다. 원자로의 구조재료인 지르코늄 합금, STS304 등에 대한 크립시험은 재료의 건전성을 평가하기 위한 실험으로 조사(irradiation)량에 따른 재료의 기계적 특성 변화를 파악하기 위한 것이다.

한국원자력연구소에서는 차세대원자로를 비롯한 신형원자로의 압력용기와 같은 원자로 구조재료에 이용되는 지르코늄 합금, STS304, Cr-Ni강 등에 대한 크립시험을 하나로에서 수행하기 위하여 노내시험용 크립캡슐(O1S-O1K)을 설계·제작하였다. 본 캡슐은 하나로에서 1,000시간 이상의 장기간 장전시험이 필요한 조사 크립시험을 수행하기 전단계의 노내시험용 캡슐로 제작되었다.

노내에서의 크립시험을 하기 위한 캡슐은 조사공과 구조적으로 양립되어야 하기 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] 한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 방사선 환경에서 원자력 재료에 대한 재료의 특성변화를 조사하기 위하여 재료캡슐을 비롯한 여러가지 캡슐을 개발하기 위하여 많은 연구를 수행하여 왔다.[3-5] 가동 중인 원자로의 노심에서 재료의 기계적 특성변화를 조사하는 특수한 목적을 가진 실험은 선진국에서는 많이 수행되어 왔지만 하나로에서는 수행된 적이 없다.

선진국에서는 재료의 조사크립 특성을 평가하기 위해서 다양한 형태의 크립캡슐을 제작하여 조사크립 시험을 수행하고 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 특성 연구 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 하중

부과 시험, 핵연료의 크립시험 및 cladding 재료에 대한 in-pile 피로 및 thermocycling 실험 등을 수행하였다.[7] 일본에서는 동력로와 고속증식로의 구조재료인 Zr합금, STS304 등에 대한 in-pile 크립시험을 수행하였다.[8]

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 & 9] Y. Choi 등이 하나로에서 조사시험을 할 수 있는 크립캡슐의 개념설계를 수행하고 모형을 제작하였다.[10] 이 모형은 하중부과장치로 STS316L 재료의 벨로우즈를 사용하였으며 시편지지부, 이음쇠 및 그립 등의 건전성 확인에 이용되었다.

본 캡슐에 대한 노내에서의 조사시험은 2002년 5월경에 하나로 노내의 외부 조사공인 IP-11공에서 10일 동안 수행할 계획이다.

2. 크립캡슐 설계

본 크립캡슐은 하나로를 이용하는 표준형 크립캡슐을 제작하기에 앞서 노내 특성과 장기간 시험시 캡슐의 건전성을 조사하기 위한 시험용 캡슐이다. 하나로의 노내에 장전하여 실제 조사시험 중 발생할 수 있는 문제점을 파악하여 설계 및 제작에 피드백(feedback) 시키는 것은 매우 중요하다.

본 캡슐은 표준형 크립캡슐의 설계자료 생산 목적 외에도 노내시험을 통해 크립시험을 하는 조사공의 특성을 분석하고 장기간 시험시의 캡슐의 건전성을 확보하기 위한 목적으로 제작·시험된다. 캡슐이 장전되는 조사공은 노심 외부에 위치한 IP-11공으로 이 조사공은 노심 중앙에서부터 외곽에 놓여 있고 냉각수가 흐르지 않을 뿐 아니라 핵연료의 삽입 및 인출이 없기 때문에 장기간 장전되어 있더라도 하나로의 운전으로 인한 간섭을 받지 않는다. 현재 IP-11공은 주로 동위원소생산을 위하여 이용되고 있다. 이 조사공에 대한 핵적·열적 특성에 대한 자료는 현재까지 확보되지 않아 본 캡슐의 장전 시험을 통해 핵적·열적 특성을 평가하는 것이 중요하다. 핵적 특성은 조사 후 크립캡슐에 장착된 F/M(flucence monitor)의 분석을 통해 설계단계에서 구한 중성자속을 비교하여 분석된다. 이 조사공에서의 열적특성을 구하기 위해서는 설계단계에서 산정된 열전달계수의 타당성을 검증하여야 한다. 이를 위해서 이 열전달계수를 이용하여 구한 온도분포와 실험에서 측정된 값을 비교하여 산정된 값의 타당성을 검증한다.

1) 시편부 및 히터 설계

시편은 게이지부의 길이가 그림 1과 같이 12.5mm 직경 2mm인 STS304 재질을 사용하였다. 시편 온도조절장치는 진공펌프, 헬륨공급계통, 히터, 온도측정장치 및 콘트롤러로 구성된다. 시편의 온도는 최대 400℃까지 상승된다. 시료부의 온도는 본체 내부의 진공도를 ~5torr까지 조절하여 감마 발열만으로 조사 목표온도보다 높아지는 경우에는 He 압력의 조절로 냉각을 용이하게 하고 목표온도보다 낮아지는 경우에는 히터로 가열한다. 히터의 구조는 2kW 용량의 코일상의 히터를 STS304 봉에 감아 시편에 열을 가할 수 있도록 하였다. 시료홀더는 시편을 장시간 동안 고온에서 유지하기 위해 충분한 강도를 가져야 하므로 STS304를 사용하여 고온에서 내식성과 강도, 조직의 안전성 및 중성자 조사에 의한 고온 취화 등에 견디도록 하였다. STS304 재료에 대한 온도에 따른 항복강도는 표 1과 같다. 본 시험에서는 시험응력의 최대값을 400℃에서의 항복강도보다 높은 150MPa로 하였으며 시편에 가해지는 응력은 48kg/mm²이다.

2) 캡슐 설계

크립캡슐은 하중을 가하는 부분, 변형을 측정하는 부분, 시편의 온도를 조절하는 부분으로 구분할 수 있으며 이들을 위한 외부장치로 캡슐본체, 하중부과와 온도제어에 관련된 제어부, 변위량과 하중 측정에 관련된 데이터 수발부가 있다. 캡슐 본체는 각 부분품들을 수용하고 지지해 주는 부분으로 벨로우즈를 포함한 하중부과장치, 하중 전달봉, 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 금속벨로우즈에 가스압력을 가하여 하중전달봉에 힘을 전달하고 요크와 그립을 통해 시편에 필요한 하중을 전달하는 장치이다. 온도는 본체 내의 진공도를 조절하여 열방출을 제어하므로써 변화시키고 시편주위에 설치된 히터에 의해 미세 제어하여 원하는 온도에 다다르게 한다.

크립캡슐의 외통은 직경 56mm의 STS316 튜브를 사용하며, 내부 재질로는 감마열에 의해 발생하는 열을 제거하기 위해 Al-1050을 사용하고 하중을 받거나 전달하는 부위에는 구조적 건전성을 확보하기 위해 STS304를 사용하였다. 그림 2 및 3은 크립캡슐의 시편부 부품과 조립된 모습을 보여준다. 캡슐본체 내부의 압력은 진공펌프와 헬륨공급장치에 의해 조절되는데 내부 헬륨가스의 압력을 1기압~5torr 사이에서 유지한다.

하중부과장치는 벨로우즈 외에도 요크, 하중전달봉, 시편 그립과 가압장치로 구성된다. 하중부과장치는 그림 4와 같다. 벨로우즈의 재질은 하스텔로이강이며, 스프링상수는 1.8kg/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 파단검출에도 사용되는데 LVDT와 연결된 제어장치에서 변위량이 최대변위량인 15mm에 이르면 파단으로 간주하도록 설계하였다. 크립시험 중 시험변수 데이터는 측정 및 데이터 수발장치에 의해 수행된다. 측정되는 데이터는 시편에서의 응력, 변위, 온도 및 내부와 하중부과장치에서의 압력 등이다. 온도측정은 시편 및 시편과 같은 높이에서 외통 쪽을 향하여 4개의 T/C를 장착하여 반경에 따른 온도변화를 측정하도록 하였으며 상부와 하부에는 시편홀더부, LVDT부, 하중부과장치부 및 연결 금구에 각각 4개의 T/C를 장착하였다.

3. 온도계산

캡슐의 구성 부품은 조사환경 하에서 감마선에 의해 발열된다. 조사중 캡슐 각부의 중성자속과 감마량은 위치와 재질에 따라 다르므로 위치에 따른 감마선 분포를 산정하고 온도평가를 해야 한다. 본 캡슐의 조사시험을 수행할 IP-11공에서의 중성자속과 감마선에 의한 발열량은 표 4와 5 및 그림 5와 같으며 시편 위치에서의 캡슐의 단면은 그림 6과 같다.[11] 감마 발열량의 피크값은 시편에 대해 0.86W/g, 알루미늄 열매체에 대해 최대 0.45W/g이다. 열계산은 시편 주위의 단면형상이 대칭을 이루는 구조이므로 1차원 열계산 코드인 GENGTC를 사용하여 계산하였다.

본 캡슐에 대한 열설계의 주요 성질인 자연대류의 평균열전달계수는 다음과 같은 함수 형태로 표시된다.[12]

난류 영역에서,

$$Nu_x = 0.17(Gr^*Pr)^{1/4} \quad (1)$$

윗 식에서 $Pr = \nu / \alpha$, $Gr^* Gr_x^* = Gr_x Nu_x = \frac{g\beta q_w x^4}{k\nu^2}$ 이며, $Gr^* Pr$ 의 값이 10^{14} 이상이면 완전난류 영역으로 가정된다. 이 식은 q_w 가 일정하며 $2 \times 10^{13} < Gr^* Pr < 10^{16}$ 인 경우에 적용된다.

본 캡슐의 형태에 대한 $Gr^* Pr$ 의 값을 구하면 1.4755×10^{15} , Nu_x 는 1053.5이다. 이 값으로부터 평균열전달계수 h_{avg} 를 구하면 $880 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 가 된다.

조사시험 중 시편이 원자로 출력 상승으로 인해 일정 온도로 상승하면 캡슐 내 He 압력 및 히터 출력을 조절하여 목표온도인 400°C 에 도달하게 한다. 이 값을 열전달 방정식에 적용하여 GENGTC 코드를 이용하여 온도계산을 한 계산결과는 갭 간격과 히터 출력을 변화시킬 때 시편 주위의 온도분포에 대하여 그림 7 및 8과 같이 나타난다. 그림 7은 캡슐 내부의 갭을 0.1mm로 일정하게 유지한 상태에서 히터와 진공을 변화시켰을 때의 온도 변화를 나타낸 것으로 히터출력을 20%(400W)만 증가시키더라도 외통 표면에서의 온도는 비등온도(120°C)를 초과한다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 IP 조사공은 냉각수가 흐르지 않아 자연대류에 의해서만 발열되므로 외부열원에 의한 영향에 민감하게 온도가 변한다는 사실을 보여 준다. 그림 8은 히터 출력을 400W로 일정하게 놓은 상태에서 외통에서의 온도가 비등점(boiling temperature) 이하인 조건을 만족하면서 시편의 온도를 증가시키기 위해 시편 내부의 갭을 증가시킬 때의 온도분포를 보여준다. 이 결과에 의하면 내부에서의 갭을 증대시킴에 따라 외통에서의 온도를 비등점 이하인 110°C 를 만족하면서 시편의 온도를 375°C 까지 증대시킬 수 있다.

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 하중의 관계를 구해야 하고 그 결과로부터 시편에 가해지는 응력을 얻을 수 있다. 가스압력과 하중의 관계를 구하기 위해 그림9와 같은 실제 크립캡슐에 장착되는 것과 동일한 벨로우즈를 노외시험장치에 부착하여 로드셀에서의 하중을 측정하여 그림 10과 같은 가스압력에 따른 하중전도의 결과를 얻었다. 이 장치는 외경 23mm의 벨로우즈에 플랜지로 하부를 막고 직경 10mm의 하중전달봉을 연결하여 외부에서 헬륨가스에 의해 하중을 전달할 수 있도록 한 장치이다. 벨로우즈 No.1과 No.2는 외경 32mm, 스프링상수가 0.1과 0.3kg/mm인 벨로우즈에 대한 하중 실험 결과이며 캡슐 외통의 직경이 65mm이상인 경우에 사용될 수 있다. 본 크립캡슐은 직경 60mm의 IP조사공에 장착되는 외경 56mm인 캡슐이므로 외경이 더 작은 벨로우즈를 사용하였다. 또한 운전시 벨로우즈의 내외부의 압력차이는 최대 50 kg/cm^2 으로 고려하여 이 압력에 견딜 수 있도록 벨로우즈 산의 두께가 두껍고 스프링상수가 큰 벨로우즈를 사용하였다. 이 그래프로부터 가스압력과 하중과의 관계식은

$$F = -3.68721 + 2.35434P \quad (2)$$

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

$$\sigma = -11.5079 + 7.3479P \quad (3)$$

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

이 결과로부터 시험응력인 150MPa을 얻을 수 있는 헬륨가스의 압력은 21.95kg/cm²이다. 하중시험을 통해 발생력은 가해지는 가스압력에 선형적으로 비례함을 확인할 수 있었다.

5. 조사 시험 계획

캡슐의 건전성 평가는 10일간의 조사시험을 통해 방사선 환경에서 캡슐 내 부품들이 성능과 건정성을 유지하는지 검증하기 위한 것이다. 실시간으로 크립시험이 가능한지를 확인하기 위하여 하중부과 장치와 변위 측정을 위한 LVDT의 작동을 확인한다. 하나로 노내에 장전된 상태에서 하중부과 장치를 작동시켜 시편에 원하는 응력을 가할 수 있는지를 조사하고, 시험 중에 누설여부를 조사한다. 변위측정을 위한 LVDT의 건정성을 확인하기 위해서는 시편에 하중을 가하여 변위를 조사하고 변위가 일어나지 않는 경우에는 하중을 높여 강제로 변위가 일어나게 하므로써 LVDT의 작동 상태를 확인한다. 캡슐본체 내부의 진공작동을 확인하기 위해서 외부에서 진공을 변화시켜 시편의 온도가 변화하는 상황을 측정한다.

본 캡슐에 대한 조사시험은 2002년 5월경에 하나로 노내에 위치한 외부 조사공인 IP-11공에서 10일 동안 수행할 계획이며, 평균 중성자조사량은 5x10¹⁷n/cm², 조사 목표 온도 400℃에서 STS304 시편(직경 2mm, 표준 길이 12.5mm)을 장착하여 시험한다.

6. 결론

하나로를 이용하여 조사크립시험을 수행하기 위한 표준형 크립캡슐을 설계·제작하기에 앞서 설계 및 운전에 필요한 자료를 확보하기 위해 노내시험용 크립캡슐을 제작하였다. 시험목적은 노심에서 실시간으로 크립시험이 가능한지를 확인하기 위하여 하나로 노내에 장전된 상태에서 시험을 수행하여 하중부과 장치와 변위측정을 위한 LVDT의 건정성을 확인하고 온도, 압력 및 열전달계수와 같이 설계 단계에서 산정된 파라미터들을 확인하기 위한 것이다. 설계에서는 하중부과장치를 설계하여 실험에 요구되는 응력 조건을 만족하는 장치를 제작하였으며, 실험이 요구되는 STS304 시편에 대해 충분한 응력조건을 만족한다는 것을 노외실험을 통해 확인하였다. 조사시험 경험이 없는 IP공에 대한 감마열량, 중성자속과 같은 핵적특성을 구하고 열계산을 위해 이 조사공에서의 표면열전달계수를 산정하였으며, 이를 토대로 온도분포를 계산하였다. 본 캡슐에 대한 조사시험은 2002년 5월경에 하나로 노내에 위치한 외부 조사공인 IP-11공에서 10일 동안 수행할 계획이며, 평균 중성자조사량은 5x10¹⁷n/cm², 조사 목표 온도 400℃에서 STS304 시편을 장착하여 시험한다. 조사시험을 통해 측정되는 온도와 계산치를 비교하여 설계에 사용된 열전달계수의 타당성을 검토하고 시편의 목표온도 도달여부를 확인하며 노내에서의 캡슐의 건정성을 입증할 계획이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 최용 외, “지르코늄 합금의 조사크립 시험장치 개념설계”, ‘99 한국원자력학회 추계학술

- 대회 논문집, 1999.
2. 조만순 외, “조사크립 캡슐의 예비설계”, ‘01 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 2001.
 3. K. N. Choo, et als, “Design and Fabrication of HANARO Instrumented Capsule for Irradiation Test of Reactor Vessel, Core, Pressure Tube Materials,” ‘01 한국원자력학회 추계학술대회 논문집. 2001.
 4. 강영환 외, “ANSYS 코드를 이용한 다공캡슐의 온도분포 해석,” ‘99 원자력학회 추계학술대회 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. 강영환 외, “하나로 캡슐의 설계개선,” ‘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. 조만순 외, “조사크립 캡슐의 설계요건 및 하중부과 장치 실험”, ‘01 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, 2001.
 10. 최용 외, “지르코늄 합금의 조사크립 시험방법 연구”, KAERI 기술보고서, KAERI/CM-404/99, 1999.
 11. 서철교, “크립캡슐의(01S-01K)의 조사량 및 발열량 예비평가”, KAERI 내부통신문, HAN-RR-CR-920-01-079, 8. 11. 2001.
 12. J. P. Holman, Heat Transfer Fourth Edition, pp. 300~307, McGraw Hill

표 1 시편 재질(SUS304)의 항복강도

온도(°C)	93	148	204	260	315	371	427
항복강도 (MPa)	172	144	143	134	125	121	116

표 2 Bellows 특성

항목	사양
재질	하스텔로이
최대 운전 압력(ΔP)	50kg/cm ²
Free length	34.75
최대 압축 길이	25.75
Cycle 수명	59,195
외/내경	23.0124/12.70mm
Leaflet 두께	0.1422mm
Convolutions	32
No of plies	2

표 3 LVDT 특성

항목	사양
설계온도(사용온도)	600°C
운전 압력	50kg/cm ²
사용 분위기	헬륨가스
변위 측정범위	±15mm
사용환경	중성자속 5 x 10 ¹⁴ n/cm ² 에서 3,000시간 조사
최소검출 감도	0.01mm
외관 크기	15mm \varnothing x 222mmL

표 4 Neutron fluence at 24MW power for 10 days operation(nvt)

Height (cm)	E > 0.1 Mev			E > 0.1 Mev			
	C-SUS304 (inner)	C-SUS304 (middle)		C-SUS304 (inner)		C-SUS304 (middle)	
lower	upper		fsd	fsd		fsd	
-24.2	-13.2	1.77E+17	0.2944	1.86E+17	0.1192	1.32E+17	0.1787
-13.2	-2.2	2.58E+17	0.1993	2.59E+17	0.0958	1.23E+17	0.1615
-2.2	8.8	2.76E+17	0.2140	2.94E+17	0.0897	1.82E+17	0.1405

표 5 Heating rate of neutron and gamma (W/g)

	Height (cm)		Mass(g)	Total (W/g)	fsd	발열량(W)
	lower	upper				
A-SUS304	-54.2	-44.2	462.63	0.27	0.0215	124.91
	-44.2	-34.2	462.63	0.45	0.0174	208.18
A-AI1050	-54.2	-44.2	407.15	0.17	0.0164	69.21
	-44.2	-34.2	407.15	0.27	0.0134	109.93
B-AI1050	-34.2	-24.2	446.12	0.29	0.0125	129.37
C-SUS304	-24.2	-13.2	16.95	0.77	0.0271	13.05
(inner)	-13.2	-2.2	16.95	0.86	0.0257	17.81
	-2.2	8.8	16.95	0.81	0.0267	13.73
C-SUS304	-24.2	-13.2	372.30	0.71	0.0143	264.33
(middle)	-13.2	-2.2	372.30	0.79	0.0136	294.12
	-2.2	8.8	372.30	0.77	0.0137	286.67
C-AI1050	-24.2	-13.2	489.29	0.41	0.0107	200.61
	-13.2	-2.2	489.29	0.45	0.0102	217.03
	-2.2	8.8	614.65	0.44	0.0102	212.21
D-AI1050	8.8	19.975	614.65	0.33	0.0111	202.83
	19.975	31.15	614.65	0.26	0.0125	159.81
	31.15	42.325	669.65	0.18	0.0143	120.54
	42.325	53.5	559.65	0.12	0.0184	67.16
Tube(외통)	-54.2	-44.2	271.43	0.21	0.0178	57.00
	-44.2	-34.2	271.43	0.33	0.0145	89.57
	-34.2	-24.2	271.43	0.42	0.0138	114.00
	-24.2	-13.2	298.58	0.52	0.0118	155.00
	-13.2	-2.2	298.58	0.56	0.0110	167.20
	-2.2	8.8	298.58	0.55	0.0112	164.22
	8.8	19.975	303.33	0.48	0.0124	145.60
	19.975	31.15	303.33	0.38	0.0137	115.26
	31.15	42.325	330.47	0.26	0.0162	85.92
	42.325	53.5	276.18	0.18	0.0201	99.71

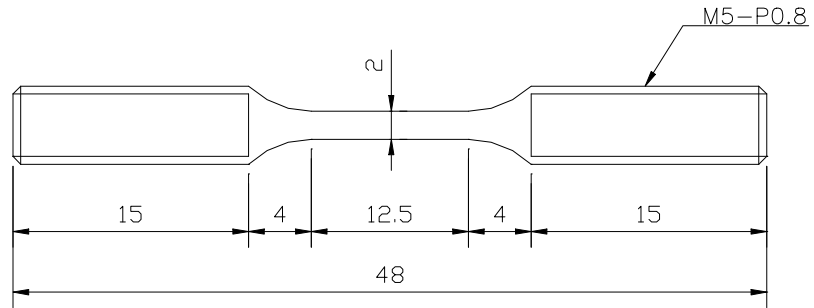


그림 1 크립캡슐 시편



그림 2 크립캡슐 시편부 부품

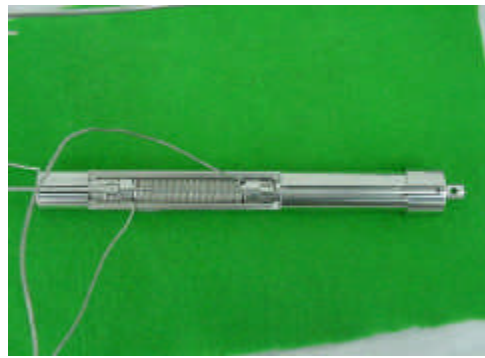


그림 3 시편부와 히터(조립 후)

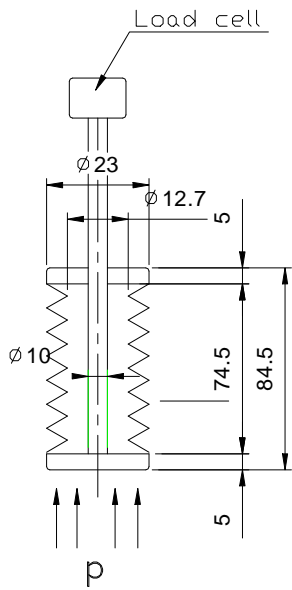


그림 4-1 노외 하중부과장치 개념도



그림 4-2 노외 하중부과장치 모습

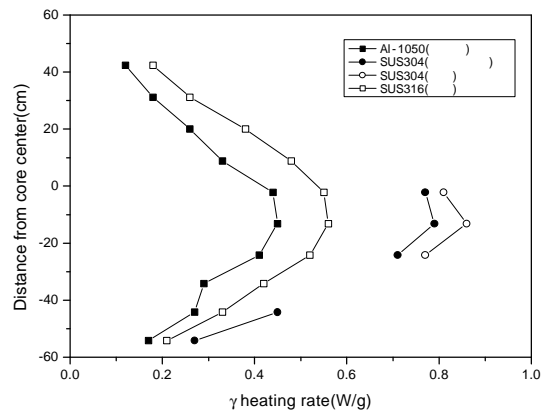


그림 5 크립캡슐의 감마발열량 (IP-11공 24MW)

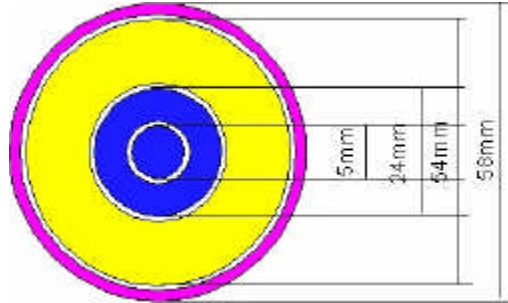


그림 6 크립캡슐 시편부 단면
(시편 STS304/히터 STS304/
열매체 Al-1050/외통 STS316)

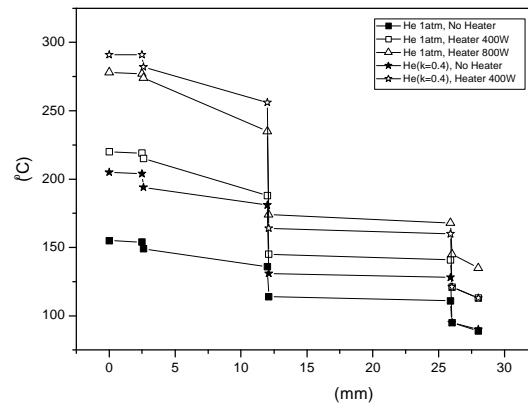


그림 7 크립캡슐 온도분포

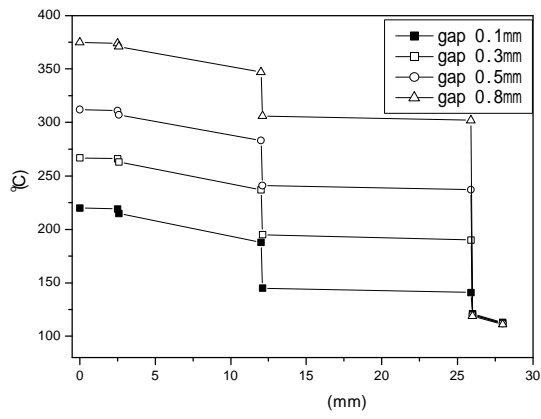


그림 8 크립캡슐 온도분포(히터 400W)



그림 9 벨로우즈

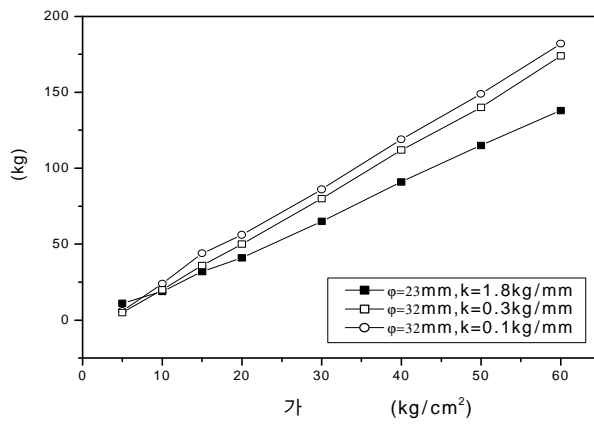


그림 10 가스압력과 발생력