

## 316L 시험원통의 열라체팅 구조시험에 관한 연구

이형연\*, 김종범\*, 구경희\*

### A Study on Thermal Ratcheting Structure Test of 316L Test Cylinder

H.Y Lee, J.B.Kim, G.H.Koo

**Key Words :** Thermal Ratchet(열 라체팅), 316L Stainless Steel(316 스테인리스강), High Temperature Structure(고온구조물), Liquid Metal Reactor(액체금속로), Combined Hardening Model(통합경화모델)

#### Abstract

In this study, the progressive inelastic deformation, so called, thermal ratchet phenomenon which can occur in high temperature liquid metal reactor was simulated with thermal ratchet structural test facility and 316L stainless steel test cylinder. The inelastic deformation of the reactor baffle cylinder can occur due to the moving temperature distribution along the axial direction as the hot free surface moves up and down under the cyclic heat-up and cool-down of reactor operations. The ratchet deformations were measured with the laser displacement sensor and LVDTs after cooling the structural specimen which experiences thermal load up to 550° and the temperature differences of about 500°C. During structural thermal ratchet test, the temperature distribution of the test cylinder along the axial direction was measured from 28 channels of thermocouples and the temperatures were used for the ratchet analysis. The thermal ratchet deformation analysis was performed with the NONSTA code whose constitutive model is nonlinear combined kinematic and isotropic hardening model and the test results were compared with those of the analysis. Thermal ratchet test was carried out with respect to 9 cycles of thermal loading and the maximum residual displacements were measured to be 1.8mm. It was shown that thermal ratchet load can cause a progressive deformation to the reactor structure. The analysis results with the combined hardening model were in reasonable agreement with those of the tests.

#### 1. 서론

액체금속원자로는 일반적으로 500°C 이상의 고온에서 반복 열피로 하중을 받기 때문에 고온 원자로구조물의 취약 부위에서는 열 피로손상이 발생할 수 있다. 한국원자력연구소가 현재 개발 중인 액체금속원자로인 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor)<sup>(1)</sup>는 530°C 의 크리프 영역에서 운전되기 때문에 원자로 구조물은 크리프-피로 상호작용을 고려하여 설계가 이루어지고 있다<sup>(2)</sup>.

이와 같이 높은 이차응력이 스테인레스강 구조

물에 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클에서 점진적으로 영구 변형량이 계속 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation), 즉 라체팅 현상이 발생할 수 있다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서는 액체금속로 내에서 발생할 수 있는 열 라체팅 현상을 효율적으로 모사하기 위해 열 라체팅 구조시험 시설을 구축하고 이를 이용하여 라체팅 변형시험을 수행하였다. 그리고 이 구조시험 시편인 원통구조물의 축방향으로 설치된 열전대로부터 온도데이터를 수집하고 이를 이용한 열응력 해석을 수행한 후 시험 및 해석결과를 상호 비교 분석하였다.

라체팅 구조시험장치는 크게 고주파 가열기, 냉각시스템, 승강장비, 베드, 냉각수조, 센서 및 데이터 수집시스템으로 구성된다. 라체팅 구조시험장치의 승강장비에 부착되는 원통구조물은 원통의

\* 회원, 한국원자력연구소,  
E-mail : hylee@kaeri.re.kr  
TEL : (042) 868-2956

바깥에 설치된 유도코일과 바로 밑의 냉각수조 사이에서 심한 축방향 온도구배를 받게 된다. 이는 액체금속로<sup>(1)</sup> 원자로 배플의 자유액면 상하이동에 따른 축방향 온도분포의 이동으로 발생할 수 있는 라체팅 거동의 모사를 위한 것이다<sup>(3,4)</sup>. 본 구조시험에서는 시험원통의 축방향으로 28 채널의 열전대를 부착하여 가열기의 출력을 제어하고 레이저 변위센서와 LVDT(linear variable displacement transducer)를 이용하여 원통의 반경방향으로 누적되는 잔류변위량을 측정했다.

500°C 이상의 고온에서 운전되는 액체금속로와 같은 구조물에서 이차응력의 변동이 클 경우 기존의 고전 구성방정식 모델은 반복 하중이 작용하는 경우 실제의 재료거동과는 큰 차이를 보이기 때문에 비탄성 해석을 위한 구성방정식(constitutive equation) 개발과 라체팅 평가 기술개발에 대한 연구가 수행된 바 있고<sup>(4-7)</sup> 또한 현재도 활발히 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 반복 이차응력을 받는 스테인리스강 구조물의 구성방정식으로서 비선형 통합경화모델(nonlinear combined hardening model)<sup>(8,9)</sup>을 적용한 NONSTA 코드를 이용했다.

열 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기시킬 수 있으므로 미국<sup>(10)</sup>, 프랑스<sup>(11)</sup>, 일본<sup>(12)</sup> 등은 각국의 액체금속로 설계관련 코드에서 열 라체팅에 의한 과변형이 일어나지 않도록 변형률 제한치를 두고 있다. 라체팅 변형률을 계산하는 과정에서 ASME Section III Subsection NH<sup>(10)</sup>에 적용하는 수정 Bree 선도인 O'Donnell Porowski 선도는 용기의 두께방향으로 일차 및 이차응력을 고려하지만 피크응력 성분은 고려하지 않는다.

## 2. 열라체팅 현상

### 2.1 개요

라체팅은 열응력과 같은 이차응력이 반복됨에 따라 톱니처럼 매 사이클마다 일정한 양의 비탄성 영구변형이 누적되는 현상을 의미한다. 스테인리스강 구조물에 이차응력이 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클마다 거의 비슷한 양의 변형량이 지속적으로 누적되는 진행성 비탄성 변형이 발생할 수 있다<sup>(10,13,14)</sup>. 일차응력은 항복응력 이하로 제한되므로 구조물의 불연속성으로 인한 소성변형이 부분적으로 생기더라도 계속 누적되는 형태의 진행성 변형을 일으키지는 않지만 이차응력이 반복될 경우 또는 일차응력에 부가적으로 이차 응력이 반복되는 경우 점진적으로 변형이 누적될 수 있다.

Fig. 1은 축방향으로 고온의 자유액면을 가진 큰 열하중이 반복적으로 작용함에 따라 온도분포가 축방향으로 이동하고 열 하중이 완전히 제거된

후에 원통의 반경방향으로 영구변형이 남은 라체팅 현상을 보여주고 있다. 그림 1은 잔류변형이 원통 안으로 누적되는 사례를 보여주고 있지만 열 하중을 주는 방식에 따라 변형이 밖으로 누적될 수도 있다.

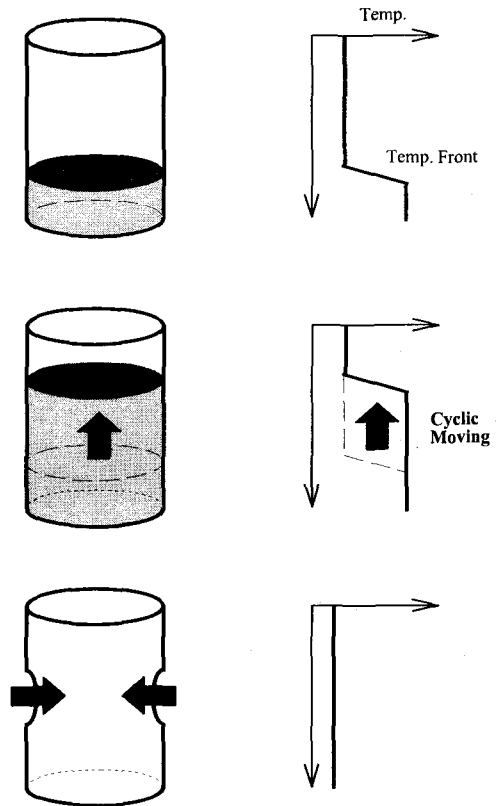


Fig. 1 Concept of thermal ratchet phenomenon

### 2.2 칼리머에서의 열라체팅 현상

자유액면의 상하이동으로 인해 액체금속로 칼리머에서 열라체팅 현상이 발생할 수 있는 부위는 원자로용기와 용기 내의 원자로 배플 및 상부내부 구조물(UIS) 원통 등이 있다<sup>(3)</sup>. 고온 설계지침인 ASME-NH<sup>(10)</sup>는 라체팅 변형률의 제한치로서 수명기간 동안 변형률의 합이 1%가 넘지 않을 것을 요구하고 있다. 그러나 고온에서 구조물이 반복 이차응력을 받을 때 구조물의 국부 변형률을 정확하게 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 시험에서는 변형률 대신 반경방향으로 누적되는 잔류 변위를 측정하고 이를 해석 결과와 비교했다.

## 3. 라체팅 구조시험장치 구축

### 3.1 구조시험장치 구축

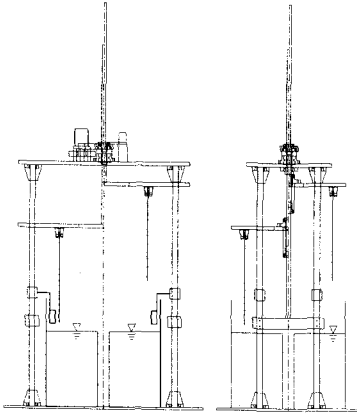


Fig. 2 Concept of thermal ratchet test facility

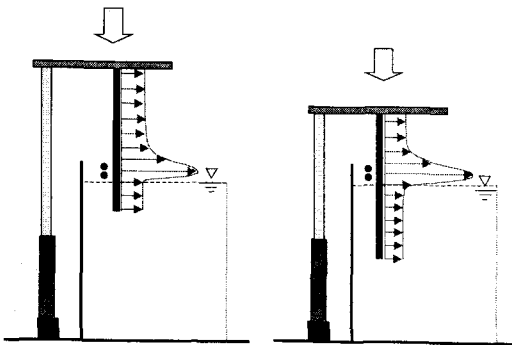


Fig. 3 Moving temperature distribution along the axial direction of the test cylinder

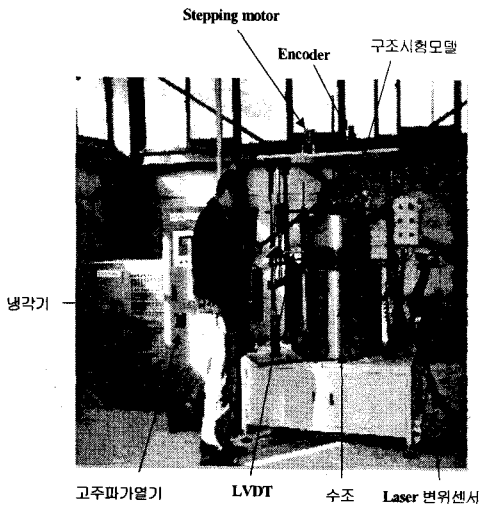


Fig. 4 Thermal ratchet test facility

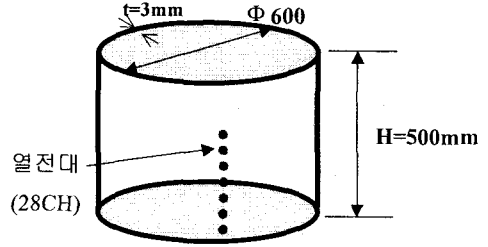


Fig. 5 Shape of test cylinder with thermocouples(28 CH)

본 연구에서는 구조시험모델에 고온의 열하중을 가하기 위해 Fig. 2 에서와 같은 승강장비 장착 구조시험장치를 이용하여 Fig. 3 에서와 같이 가열코일과 냉각수 사이를 시험원통이 이동하면서 축방향 온도분포가 이동하도록 열하중을 가했다.

구조시험장치에서는 Fig. 4 에서와 같이 50KW 용량, 50KHz 의 고주파 유도 가열기를 사용했고 구조시험모델을 상하 이동시키기 위한 스텝모터와 워엄기어, 엔코더, 구조시험 모델 고정판 및 지지기둥 등으로 구성된 승강장비를 제작하였다. 여기서 구조시험 모델과 유도코일간의 간격이 원주방향으로 고르지 못하면 간격이 좁은 부분에서 집중 가열이 발생하여 과변형이 일어나기 때문에 간격이 최대한 균일하게 유지되도록 구조시험모델을 장착하는데 각별한 주의가 요구된다.

원통 구조물의 재원은 Fig. 5 와 같이 직경 600mm, 높이 500mm, 두께 3mm 이다.

반경방향의 잔류변위 측정을 위한 변위센서는 Fig. 6 에서와 같이 레이저변위센서 하나와 LVDT 두개를 사용하였으며 배치간격은 약 120° 간격이다.

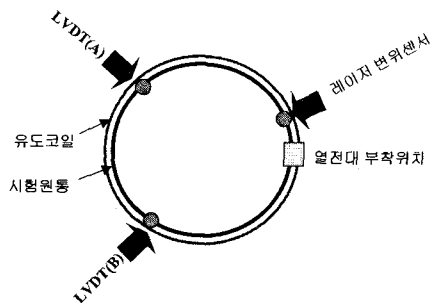


Fig. 6 Arrangements of displacement sensors

레이저변위센서는 Fig. 7 에서와 같이 삼각측량법 원리를 적용하는데 측정범위는 500± 20mm, 정밀도는 20 μmm 이다.

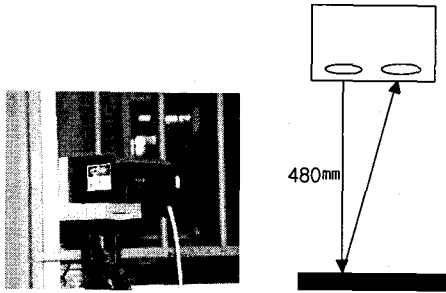


Fig. 7 Laser displacement sensor

### 3.2 온도수집 데이터

본 라체팅 구조시험에서는 열 하중 사이클을 9 회에 걸쳐 가했다. 원통구조물의 축 방향으로 설치된 28 채널의 열전대는 Fig. 5 에서와 같이 원통의 높이 9cm 부터 36cm 까지 1 cm 간격으로 28 개가 부착되는데 Fig. 8 에서 수평축 0 은 실제 높이 50cm 의 원통구조물에서 바닥면으로부터 9cm 떨어진 지점을 나타낸다. Fig. 8 은 열전대가 부착된 원통구조물의 28cm 구간에서 시간이 경과함에 따라 온도분포가 우측으로 이동하는 즉 원통구조물이 위로 이동하면서 15 초 간격을 두고 그린 것이며 원통구조물 내면의 최고 온도는 약 550°C 로 측정되었으며 온도형태가 비교적 일정한 틀을 유지하면서 이동하는 것을 보여주고 있다. 원통구조물이 가열되면서 가열기로부터 약 3cm 아래에 위치하고 있는 냉각수조 액면 속으로 원통구조물이 잠기면 Fig. 8 의 각 온도선도에서 좌측부분이 축 방향으로 가파르게 냉각되는 것을 알 수 있다.

위의 그림은 열전대를 1cm 간격으로 부착했을 때의 그림이며 열전대를 이보다 더 촘촘하게 예를 들어 0.5cm 간격으로 부착한다면 온도형태는 더욱 매끄러운 형태로 나타날 것이다. 이상의 온도데이터는 제어프로그램에 의해 엑셀 파일로 변환된다. 이렇게 수집된 온도 데이터는 잔류변위 해석을 위한 입력데이터로 활용된다.

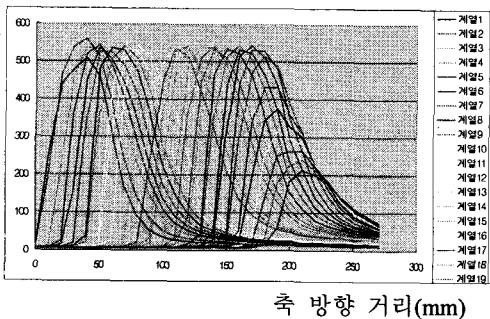


Fig. 8 Temperature profiles measured by 28 channel thermocouples

### 3.3 잔류변위 수집 데이터

잔류변위 측정을 위해 라체팅 열하중을 가한 각 사이클 후에 충분히 원통구조물을 냉각시킨 다음 주로 레이저 변위센서로 원통구조물의 반경방향으로 잔류변위를 측정하고 비교를 위해 LVDT 를 이용한 측정도 병행하였다.

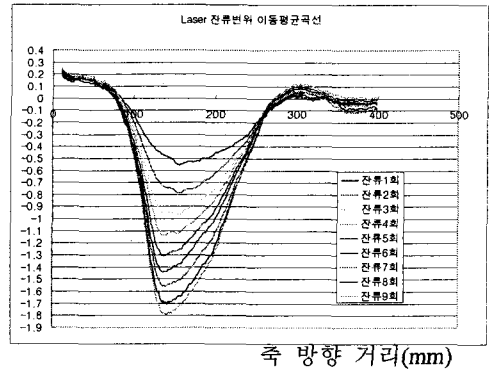


Fig. 9 Accumulation of residual displacements along the radial direction measured by laser displacement sensor

레이저 변위센서를 이용하여 잔류 변위분포를 측정된 결과 Fig. 9 에서와 같이 원통의 바닥면으로부터 10cm 위치까지는 반경방향으로 약간 축소되지만 100mm 이상에서는 가열 전후의 변위차가 ‘+’로 나타나 바깥으로 팽창했다는 것을 알 수 있다. Fig. 9 에서 수직축은 원통의 축방향 좌표이고 수직축은 50cm 떨어진 원통의 바깥 지점으로부터 가열 후 변위에서 가열전 변위치를 뺀 변위증감량이다. Fig. 9 에서 특히 바닥으로부터 약 14 cm 위치에서는 점진적으로 잔류변위가 누적되는 현상을 보였으며 5 사이클 후에는 약 1.3mm, 9 사이클 후에는 약 1.8 mm 의 잔류변위가 누적된 것으로 나타났다.

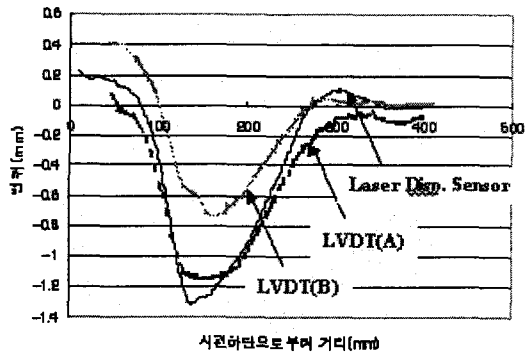


Fig. 10 Displacement by LVDT

한편 2 개의 LVDT 를 이용해서는 5 번째 열라체팅 사이까지만 잔류변위를 측정하였다. LVDT 의 변위 측정치를 보여주는 Readout/controller 인 MP2000 (Schaevitz 제품)을 이용하여 변위치를 얻었으며 레이저 변위센서의 측정치와 비교하면 Fig. 10 에서와 같이 레이저 센서에서 측정한 변위가 가장 크게 나왔고, LVDT (A)는 이와 비슷한 크기로 나타났으며 LVDT (B)는 비교적 작게 나타났다. 이와 같이 차이가 발생하는 이유는 첫째 LVDT 와 레이저변위센서가 위치하는 곳에서의 코일과 원통구조물의 간극의 차가 존재하고 (측정결과 : 레이저-13mm, LVDT A-15mm, LVDT B-16mm), 세 위치에서 기준변위 측정시 오차가 비교적 크게 영향을 주었을 것으로 생각된다. 추후 실험에서는 기준변위를 여러 차례에 걸쳐 측정한 수 평균값을 취하고 코일과 원통의 간극을 일정하게 설치하면 오차가 줄어들 것으로 생각된다.

#### 4. 열라체팅 해석

##### 4.1 해석 모델링

원통구조물의 열라체팅 거동을 모사하기 위해 본 해석에서는 축대칭 유한요소 모델을 이용했다. 8 절점 2 차원 요소 모델은 300 요소와 987 절점으로 구성되어 있다.

##### 4.2 하중조건

열전대가 부착된 원통구조물의 28cm 구간에 대해서는 Fig. 8 과 같은 온도분포를 입력했고, 열전대가 부착되지 않은 나머지 부분은 열 구배가 비교적 완만한 곳으로 상하의 온도분포를 참고하여 온도분포가 매끈하게 이어지도록 입력하였으며 작용하중은 열하중만으로 국한했다.

##### 4.3 비탄성 통합 경화 모델

액체금속과 같이 큰 이차응력이 반복적으로 작용할 경우 기존의 고전 모델들은 실제의 재료거동과는 큰 차이를 보이기 때문에 본 해석에서는 비선형 통합 경화 모델<sup>(6)</sup>을 NONSTA 코드로 구현하여 스테인리스강 구조물의 반복 비탄성 거동을 모사하였다.

재료는 316L 스테인리스강이며 재료의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 비탄성 해석모델인 비선형 통합경화모델을 ABAQUS 의 사용자 부프로그램으로 구현한 NONSTA(NONlinear STructural Analysis code) 코드를 이용했다<sup>(9)</sup>.

이 통합경화 모델은 항복 조건을 갖는 모델로서 동적 특성을 갖는 내부 변수들을 도입하여 재

료의 시간에 따른 내부이력을 표현한다. 이 구성식의 주요 수식은 다음과 같이 전개된다.

- 소성 변형률 :

소성 변형률 속도의 방향은 Overstress 의 방향과 일치하며 크기는 등가 소성변형률 속도 (equivalent plastic strain rate)와 같다.

$$(\dot{\epsilon}_p)_{ij} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{s_{ij} - X_{ij}}{J(s - X)}$$

여기서  $s_{ij}$  는 편차응력,  $X_{ij}$  는 이동성 경화 응력,  $J(s)$  는 편차응력의 second invariant 를 의미한다.

$$J(s - X) = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij} - X_{ij}) : (s_{ij} - X_{ij})}$$

- 항복 조건 :

$$F = J(s - X) - R - \sigma_y$$

$\sigma_y$  는 초기 항복응력이다.

- 이동성 경화응력의 발전식 :

$$\dot{X}_{ij} = C(\dot{\epsilon}_p)_{ij} - \gamma \dot{p} X_{ij}$$

$C, \gamma$  는 재료상수이다.

- 등방성 경화응력의 발전식 :

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{p}$$

$b$  와  $Q$  는 재료 상수이다.

이 모델의 비탄성 재료 상수는 5 개이다.

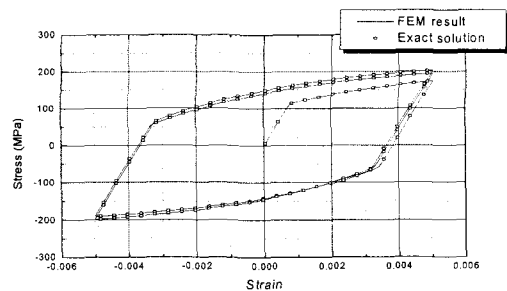


Fig. 11 Validation of NONSTA code for cyclic load

열하중의 반복 작용에 의해 소성경화 거동을 보이는 스테인리스강 구조물의 등방경화 및 이동경화 거동을 모사하기 위해 개발된 NONSTA 코드의 검증에 위해 단축 재료 시편에 대한 이론해와 NONSTA 코드를 이용한 해석해를 비교해보았다. 하중이 반복적으로 작용하는 경우에 Fig. 11 에서와 같이 NONSTA 코드를 이용한 해석결과는 이론

해와 잘 맞는 것으로 나타났다.

#### 4.4 라체팅 시험결과와 해석결과와의 비교

Fig. 12 에서 보는 바와 같이 반경방향 잔류변위에 대해 NONSTA 코드를 이용하여 계산한 변위값은 실제 구조시험에서 측정된 변위를 초기에는 잘 일치하다가 라체팅 열하중 횟수가 증가함에 따라 시험과 해석결과와의 차이가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 차이가 발생하는 원인은 고온 구조물이 반복 열하중이 작용함에 따른 진행성 비탄성 거동을 모사하는 데에는 구성식 모델에서 재료상수의 정확한 결정 및 물성치의 온도 의존성을 고려해야 하지만 아직은 수치 접근법에서 일정온도에서의 물성치를 사용하고 있다는 한계가 있고, 또한 구조시험에서도 시편 설치시 시편의 정렬문제, 가열코일과 시편사이 간극의 분균일성 등의 문제로 차이가 발생한 것으로 판단된다.

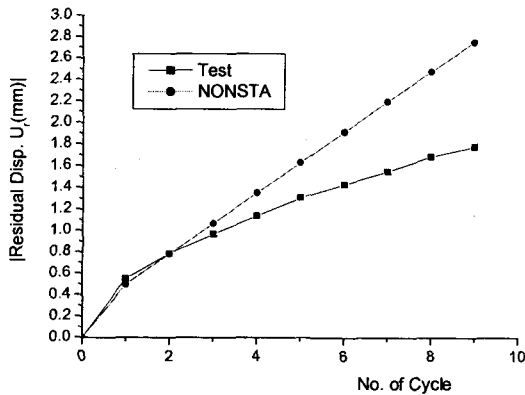


Fig. 12 Comparison of the results by test and analysis

그러나 이차 열응력에 의해 발생하는 라체팅 거동 평가에 대한 해외의 연구사례에서도 Fig. 12에서와 비슷한 크기의 차이를 보여주고 있다<sup>(15)</sup>.

## 5. 결론

본 연구에서는 고온 구조물의 열라체팅 특성시험을 위해 316L 재료의 원통용기 구조시험 모델을 이용하여 500°C 이상의 급격한 열하중을 가하며 자유액면의 상하 이동으로 인해 발생할 수 있는 열라체팅 변형 거동의 모사시험을 실시하고 구조시험에서 측정된 누적 잔류변위값과 비탄성 해석을 통해 얻은 결과를 비교 분석하였다. 구조 시험원통은 액체금속로 원자로 용기 내부의 원자로 배플을 모사한 것이며 급격한 온도구배가 축방향으로 이동함에 따른 온도 분포 측정을 위해 원통

구조물의 축방향으로 28 개의 열전대를 부착하고 여기서 얻은 데이터를 이용하여 열라체팅 변형해석의 입력데이터로 활용하였다.

반복하중이 가해짐에 따른 변형량을 측정하기 위해 하나의 레이저변위센서와 두개의 LVDT 를 약 120°간격으로 배치하여 원통구조물 반경방향의 잔류변위 누적량을 측정하였다.

라체팅 열하중을 9 회에 걸쳐 용기의 바깥에 설치된 유도코일을 이용하여 반복적으로 가한 결과 원통의 아래 부분에서는 약간 수축이 일어났지만 가운데 부분에서 변형량이 약 1.8mm 만큼 바깥으로 볼록하게 튀어나오는 것으로 나타났다.

라체팅 시험결과를 해석결과와 비교하고 스테인리스 강의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 등방성 경화와 이동경화를 통합시킨 비선형 통합 경화모델을 ABAQUS 사용자 부프로그램으로 구현한 NONSTA 코드를 이용하여 비탄성 해석을 수행하였다. 원통구조물의 28 채널에서 수집된 전이온도 데이터를 이용하여 라체팅 변형해석을 수행한 결과는 시험결과와 비슷한 거동을 보여주는 것으로 나타났다.

향후 연구계획으로 열 라체팅 구조시험장치를 이용하여 여러 가지 구조시험 모델에 대해 가열하중, 가열속도변화 및 용접영향 조사 등에 대한 열라체팅 구조시험을 수행하고, 비탄성 구조해석 코드인 NONSTA 를 검증할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

## 참고문헌

- (1) KALMER 예비개념설계보고서, KAERI/TR-1636, KAERI, 2000.
- (2) 이형연, 김중범, 유봉, "액체금속로 고온배관의 미국 및 프랑스 설계지침을 따른 크리프-피로 손상평가," 2001 년도 제 1 차 재료 및 파괴부문 학술대회, pp.178~184, 2001.
- (3) 고온구조 라체팅 시험장치 구축, KAERI/TR-1707/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- (4) H.Y.Lee, J.B.Kim, J.H.Lee, B.Yoo, Prediction of ratcheting behavior of 304SS cylindrical shell using Chaboche model, IAEA Technical Committee Meeting on Creep-Fatigue Damage Rules Used in Fast Reactor Design, IAEA-TECDOC-933, pp.243-252, 1997.
- (5) I. Ohshima et al, Structural Integrity of DFBR

- internal structure under severe thermal loading  
(2) : Thermal ratchet deformation, ASME PVP.  
Vol. 163, pp.47-55, 1989. N. Tanaka et al,  
Simulation of Thermal Ratcheting of 304 SS  
Cylindrical Shell, SMIRT 11, L04/4, pp.97-  
101.,1991.
- (6) I. Ohshima et al, "Structural Integrity of DFBR  
internal structure under severe thermal loading  
(2) : Thermal ratchet deformation," ASME PVP.  
Vol. 163, pp.47-55, 1989.
- (7) N. Tanaka et al, "Simulation of Thermal  
Ratcheting of 304 SS Cylindrical Shell," SMIRT  
11, L04/4, pp.97- 101.,1991.
- (8) J.Lemaitre and J-L. Chaboche, Mechanics of  
solid materials, Cambridge university press,  
1990.
- (9) Samson Youn, Soon-Bok Lee, Jong Bum Kim,  
Hyeong-Yeon Lee, Bong Yoo, "Implementation  
of visco-plastic constitutive equations into the  
finite element code ABAQUS," Proceedings of  
the Korean Nuclear Society, '98 Autumn, 1998.
- (10) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section  
III Subsection NH, 1998.
- (11) RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000,  
AFCEN, 1985 edition & 1993 addenda.
- (12) Wada H, Otani T, Fujioka T, "The ratcheting  
evaluation methods in Japanese demonstration  
FBR design," SMIRT 14, F04/2,pp85-92, 1997.
- (13) ASME Boiler and Pressure Vessel Code,  
Section III NB, 1992 edition.
- (14) H.Ozaki et al, "Evaluation of inelastic strain in  
elevated temperature components," ASME  
PVP vol.262, (High Temperature Service and  
Time-Dependent Failure), pp.19-25,1993.
- (15) 열라체팅 변형의 해석정도 향상을 위한  
비탄성 구성식의 개발, 일본전력중앙연구  
소, T93022, (일본어),1993.