

316L 스테인리스강 원통 구조물의 열라체팅 변형 시험 및 해석

이형연[†] · 김종범* · 이재한**
(2001년 6월 22일 접수, 2001년 12월 15일 심사완료)

Test and Analysis of Thermal Ratcheting Deformation for 316L Stainless Steel Cylindrical Structure

Hyeong-Yeon Lee, Jong-Bum Kim and Jae-Han Lee

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

Abstract

In this study, the progressive inelastic deformation, so called, thermal ratchet phenomenon which can occur in high temperature structures of liquid metal reactor was simulated with thermal ratchet structural test facility and 316L stainless steel test cylinder. The thermal ratchet deformation at the reactor baffle cylinder of the liquid metal reactor can occur due to the moving temperature distribution along the axial direction as the sodium free surface moves up and down under the cyclic heat-up and cool-down transients. The ratchet deformation was measured with the laser displacement sensor and LVDTs after cooling the structural specimen which is heated up to 550°C with steep temperature gradients along the axial direction. The temperature distribution of the test cylinder along the axial direction was measured with 28 channels of thermocouples and was used for the ratchet analysis. The thermal ratchet deformation was analyzed with the constitutive equation of nonlinear combined hardening model which was implemented as ABAQUS user subroutine and the analysis results were compared with those of the test. Thermal ratchet load was applied 9 times and the residual displacement after 9 cycles of thermal load was measured to be 1.79mm. The ratcheting deformation shapes obtained by the analysis with the combined hardening model were in reasonable agreement with those of the structural tests.

1. 서 론

액체금속로의 냉각재로 사용되는 소듐(sodium)은 대기압에서 비등점이 883°C 이고 비중은 0.9이며 열전도도는 물의 128 배에 이르는 등 우수한 열전달 특성을 가지고 있어 가압을 하지 않고도 효율이 높은 발전을 가능하게 한다. 저압 고온 운전으로 특징지어지는 액체금속로는 500°C 이상에서 운전되며 고온에서 반복 열피로 하중을 받기

때문에 고온 원자로구조물의 취약 부위에서는 열피로손상이 발생할 수 있다. 한국원자력연구소가 현재 개발 중인 액체금속원자로 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)⁽¹⁾의 원자로 운전조건은 대기압, 530°C 로 설정되어 있다. 스테인레스강 구조물에서 자중과 같은 일차응력 위에 높은 이차응력이 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클에서 점진적으로 영구 변형량이 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation), 즉 라체팅 현상이 발생할 수 있으며⁽²⁾ 구조물에 고온 유지하중과 반복하중이 조합하여 작용하면 크리프-피로 손상이 발생할 수 있다.^(3,4)

본 연구에서는 액체금속로에서 소듐 자유액면의 상하 이동으로 발생할 수 있는 열 라체팅 현상을

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구소
E-mail : hylee@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2956 FAX : (042)868-8363

* 한국원자력연구소

** 회원, 한국원자력연구소

효율적으로 모사하기 위해 열 라체팅 구조시험 장치를 구축하고⁽⁵⁾ 이를 이용하여 라체팅 변형시험을 수행하였다. 그리고 원통구조물 시편의 축방향으로 설치된 열전대로부터 온도데이터를 수집하고 이를 적용한 열응력 해석을 수행한 후 시험 및 해석결과를 상호 비교 분석하였다.

이차응력의 변동이 큰 액체금속로 고온구조물에서 기존의 고전 구성방정식 모델은 반복 하중이 작용하는 경우 실제의 재료거동과는 큰 차이를 보이기 때문에 해외에서도 비탄성 해석을 위한 구성방정식(constitutive equation)의 개발과 라체팅 평가 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행되어오고 있으며⁽⁶⁻⁹⁾ 국내에서는 해석 중심의 연구가 수행된 바 있다.^(10,11) 본 연구에서는 반복 이차응력을 받는 스테인리스강 구조물의 구성방정식으로서 비선형 결합경화모델(nonlinear combined hardening model)⁽¹²⁻¹⁴⁾을 ABAQUS의 부프로그램으로 구현하여 열라체팅 누적 변형량을 계산하였다.

2. 열라체팅 변형거동

2.1 열라체팅 현상

라체팅은 열응력이나 노즐부위 굽힘응력과 같은 이차응력이 반복적으로 작용함에 따라 틱니처럼 매 사이클마다 비탄성 영구변형이 누적되는 현상을 의미하는데 특히 이차 응력이 열하중에 기인할 때 이를 열라체팅 현상이라고 정의한다.⁽²⁾ 스테인레스강 구조물에 이차응력이 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클마다 변형량이 지속적으로 누적되는 진행성 비탄성 변형이 발생할 수 있다.^(2,15-17) 이차응력은 항복응력 이하로 제한되므로 구조물에서 불연속성으로 인한 소성변형이 부분적으로 생기더라도 계속 누적되는 형태의 진행성 변형을 일으키는 않지만 이차응력이 반복될 경우 또는 일차응력에 부가적으로 이차 응력이 반복되는 경우 점진적으로 누적되는 라체팅 변형이 발생할 수 있다.

Fig. 1은 원통구조물에서 고온의 자유액면이 상하이동을 되풀이하면 온도구배가 축방향으로 이동하게 되며 열 하중이 완전히 제거된 후에도 원통의 두께방향으로 잔류변형이 남는 전형적인 열라체팅 현상을 보여주고 있다. Fig. 1은 잔류변형이 원통 안으로 누적되는 수축모드 변형사례를 보여주고 있지만 열하중의 작용 방식 또는 용기의 두께에 따라 팽창모드의 변형이 발생할 수도 있다.

고온구조물의 설계해석에서 열라체팅과 크리프-피로의 차이는 라체팅은 변형이 주요 변수인 반면 크리프-피로는 손상이 주요 변수라는 점이다.

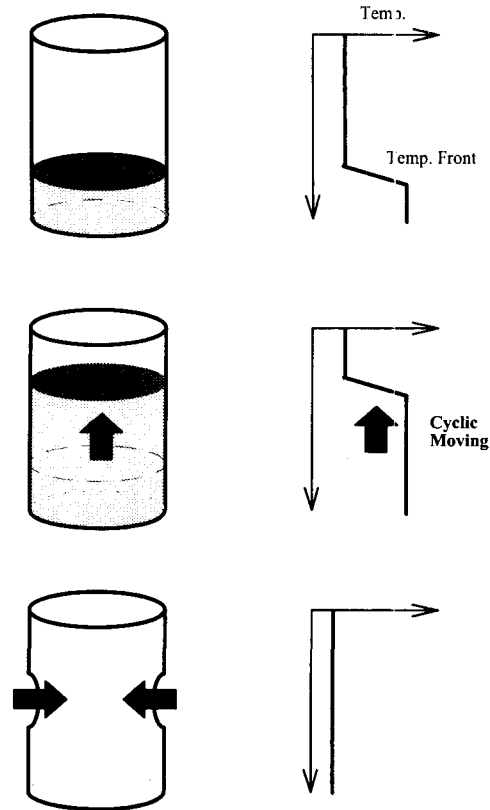


Fig. 1 Concept of thermal ratchet phenomenon

열 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기시킬 수 있기 때문에 미국,⁽²⁾ 프랑스,⁽¹⁵⁾ 일본⁽¹⁶⁾ 등은 각국의 액체금속로 설계관련 코드에서 열 라체팅에 의한 변형률 제한치를 제시하고 있다. 미국의 고온 설계지침인 ASME-NH⁽²⁾는 라체팅 변형률의 제한치로서 수명기간 동안 변형률의 합이 모재에서는 1%, 용접재에서는 0.5%가 넘지 않을 것을 요구하고 있다.

2.2 칼리머의 열라체팅 변형거동

자유액면의 상하 이동으로 인해 액체금속로 칼리머에서 열라체팅 현상이 발생할 수 있는 부위는 원자로용기와 용기 내의 원자로 배플 및 상부내부 구조물(UIS) 원통 등이 있다.⁽¹¹⁾ 고온에서 구조물이 반복 이차응력을 받을 때 구조물의 변형률을 정확하게 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 시험에서는 변형률 대신 반경방향으로 누적되는 잔류변위를 측정하고 이를 해석 결과와 비교분석했다.

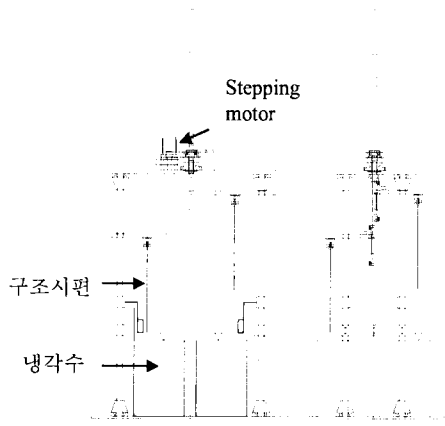


Fig. 2 Concept of thermal ratchet test facility

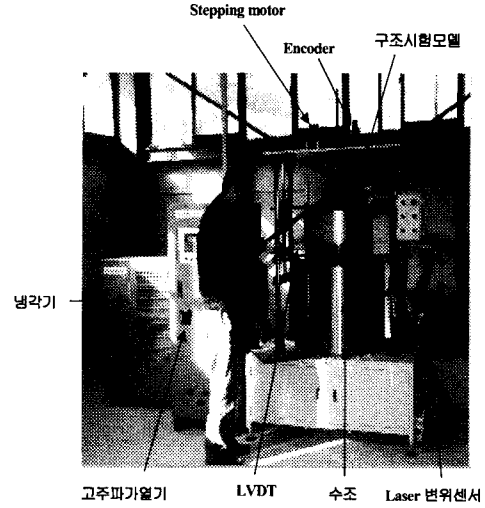


Fig. 4 Thermal ratchet test facility

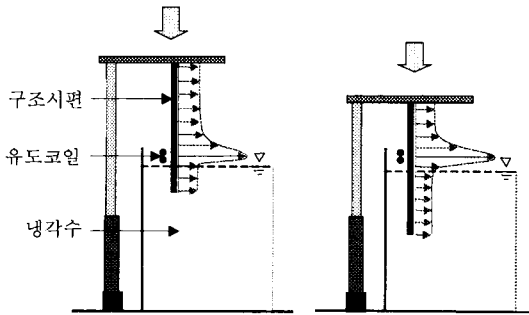


Fig. 3 Moving temperature distribution along the axial direction of the test cylinder

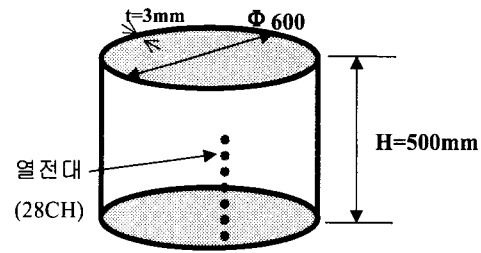


Fig. 5 Dimensions of test cylinder with thermocouples (28 Channels) attached along the axial direction

3. 라체팅 구조시험 및 결과

3.1 구조시험장치 구축

본 연구에서는 구조시험모델에 고온의 열 하중을 가하기 위해 Fig. 2 에서와 같이 승강장비가 장착된 구조시험장치를 구축하였다. Fig. 3 에서와 같이 가열코일과 냉각수 사이에 구조시험 원통을 이동시킴으로써 축방향으로 급격한 열구배를 주면서 온도구배가 이동되도록 시험장치를 구성하였으며 시편은 하강시에만 가열하였다.

구축된 구조시험장치 사진은 Fig. 4 와 같다. 여기서 라체팅 구조시험장치는 크게 고주파 가열기, 냉각시스템, 승강장비, 베드, 냉각수조, 센서 및 데이터 수집시스템으로 구성되며 고주파 유도 가열기의 사양은 50 KW 용량에 50KHz 이다.

라체팅 구조시험장치의 승강장비에 부착되는 시험원통은 원통의 바깥에 설치된 유도코일과

바로 밑의 냉각수조 사이에서 심한 축방향 열구배 하중을 받는다. 이는 액체금속 원자로 배플⁽¹⁾의 자유액면 상하이동에 따른 축방향 온도분포의 이동으로 발생하는 라체팅 거동을 모사하기 위한 장치이다.^(1,5) 여기서 구조시험 모델과 유도 코일간의 간격이 원주방향으로 고르지 못하면 간격이 좁은 부분에서 집중 가열이 발생하여 국부 과변형이 일어나기 때문에 시험원통의 상하 이동 시에 간격이 최대한 균일하게 유지되도록 구조시편을 장착하는데 각별한 주의가 요구된다. 구조시편의 제원은 Fig. 5 와 같이 외경 600mm, 높이 500mm, 두께 3mm 이며 재질은 316L 스테인리스강이다.

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.

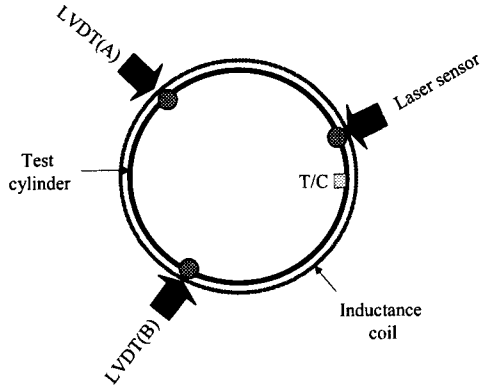


Fig. 6 Arrangements of displacement sensors

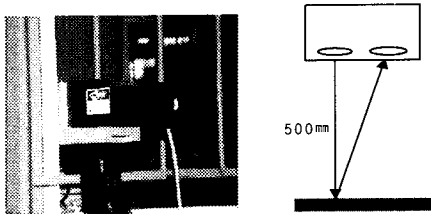


Fig. 7 Laser displacement sensor

반경방향의 잔류변위 측정을 위한 변위센서는 Fig. 6 에서와 같이 하나의 레이저 변위센서와 두 개의 LVDT 를 120°간격으로 설치하여 사용하였다. 여기서 레이저변위센서는 Fig. 7 에서와 같이 삼각측량법 원리를 적용하여 변위를 측정하며 본 시험에서 사용한 센서의 측정범위는 500±20mm 이고 정밀도(resolution)는 20 μm 이다.

3.2 온도수집 데이터

본 라체팅 구조시험에서는 열 하중 사이클을 9 회에 걸쳐 가했다. 원통구조물의 축 방향으로 설치된 열전대는 Fig. 5 의 시편 하단에서 높이 90mm 부터 360mm 까지 10mm 간격으로 28 채널을 부착하였다. 수집된 온도데이터는 Fig. 8 에서와 같이 시편이 아래로 이동함에 따라 온도분포가 일정한 틀을 유지하면서 우측으로 이동함을 알 수 있다. Fig. 8 에서 수평축 0 은 실제 높이 500mm 의 구조시편에서 하단으로부터 90mm 떨어진 지점을 나타낸다. Fig. 8 은 부착된 28 개 채널에서 측정한 온도를 편의상 30 초 간격으로 그린 것이며 실제 해석에서는 15 초 간격으로 수집한 온도데이터를 사용하였다. Fig. 8 의 각 온도선도에서 좌측부분이 축방향으로 온도구배가 심한 것으로 나타났는데 이는 구조시편이 가열된

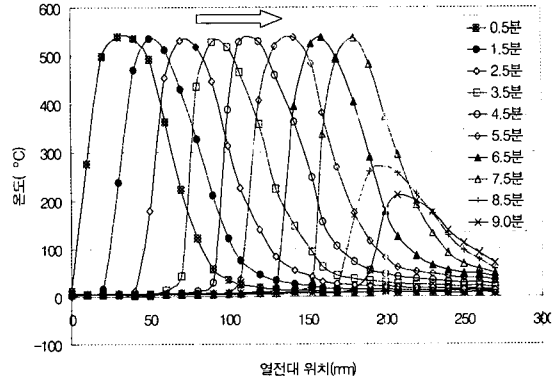


Fig. 8 Temperature profiles measured by 28 channel thermocouples

후 유도코일로부터 약 30mm 아래에 위치하고 있는 냉각수 안으로 시편이 잠기면서 급냉이 일어나기 때문이다. 이 온도선도는 열전대를 10mm 간격으로 부착했을 때의 그림이다. 이상의 온도데이터는 제어프로그램에 의해 엑셀 파일로 변환하여 잔류변위 평가를 위한 열해석 입력데이터로 활용하였다.

고주파 유도가열기를 이용한 가열은 시편에 유기되는 와전류 결손에 의해 가열하는 방식으로 구조시편에 심각한 소음이 발생하며 본 구조시험연구에서도 소음을 제거하는데 많은 어려움을 겪었다. 온도측정을 위해 구조시편에 용접된 열전대에서 나오는 전압은 mV 차수인 반면 유도가열로 인해 구조시편에는 V 차수의 전압이 발생하기 때문이다. 본 시험에서는 다채널 온도신호가 각 채널마다 별도로 증폭 및 저주파수 대역 필터링을 선행한 후에 멀티플렉서에 합류하도록 온도보드를 구성함으로써 소음을 제거할 수 있었다.

3.3 잔류변위 수집 데이터

본 구조시험에서는 잔류변위 측정을 위해 각 하중 사이클 후에 충분히 시편을 냉각시킨 후 레이저 변위센서로 시편의 두께방향 잔류변위를 측정하였고 LVDT를 이용한 측정도 병행하였다.

구조시험 시편의 이동 가열구간이 하단으로부터 12cm~27cm로 15cm 구간일 때 라체팅 하중에 따른 잔류변위를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서 수평축은 시험원통의 축방향 좌표이고 수직축은 레이저변위센서로 측정된 잔류변위로서 '+'는 수축을, '-'는 팽창을 의미한다.

Fig. 9로부터 이동 열하중 하에서는 팽창모드의 잔류변위가 발생하고 사이클이 반복됨에 따라

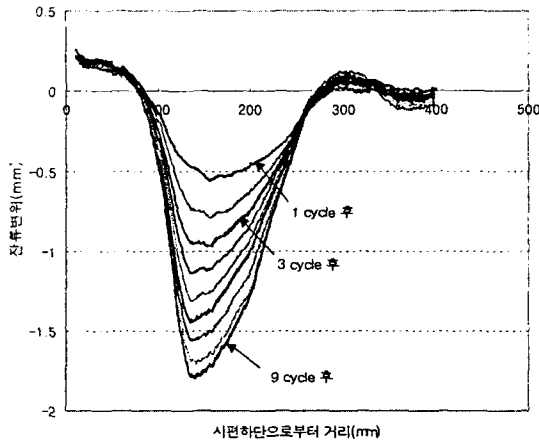


Fig. 9 Distribution of residual displacements along the radial direction measured by laser displacement sensor

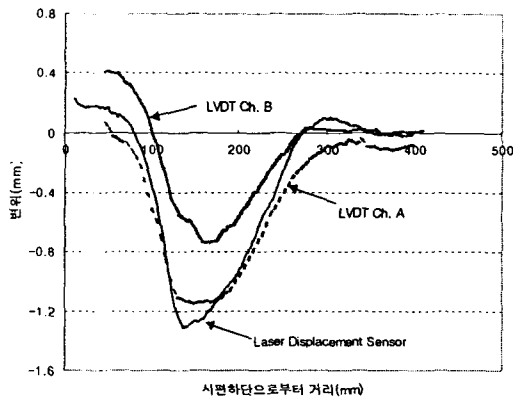


Fig. 10 Displacements by LVDTs and laser displacement sensor after 5th ratchet cycle

변위는 점진적으로 증가하며 특히 하단으로부터 약 13 cm 위치에서 최대 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 잔류변위 누적량은 5 사이클 후에 1.3mm, 9 사이클 후에는 1.79mm 인 것으로 측정되었다.

한편 시험원통에 120° 간격으로 배치된 2 개의 LVDT 를 이용하여 5 번째 사이클 후에 측정된 잔류변위는 Fig. 10 에서와 같이 LVDT A 는 레이저 센서의 측정치와 비슷한 크기로 나타났으며 LVDT B 는 비교적 작게 나타났다. 이와 같이 차이가 발생하는 이유는 시험원통과 가열코일이 완벽한 진원이 아니고 또한 시험원통의 상하이동시 시편이 가열코일과 일정한 간극을

유지하도록 완벽하게 중심선을 정렬하는 것이 어려워 LVDT 와 레이저 변위 센서가 위치하는 곳에서 코일과 시편의 간극 차이가 발생했기 때문이다. 측정결과 간극은 레이저센서 위치에서는 13mm, LVDT A 위치에서는 15mm, LVDT B 위치에서는 16mm 인 것으로 나타나 간극이 가장 작은 레이저 변위센서 측정부분에서 가장 큰 변위가 발생한 것으로 보인다.

4. 열라체팅 해석

4.1 해석 모델링

구조시험원통의 열라체팅 거동을 모사하기 위해 본 해석에서는 축대칭 모델을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 모델은 8 절점 축대칭 요소 300 개와 987 절점으로 구성되며 경계조건으로서 시편 상단의 축 방향 변위를 구속시켰다.

4.2 하중조건

구조시편에 작용하는 하중은 열과도 하중과 자중이지만 시편의 자중으로 인해 발생하는 응력은 0.02 MPa 수준이다.

본 해석에서는 구조시편의 축방향 열전대에서 수집된 천이 온도데이터를 유한요소 해석모델의 각 열전대 위치에서의 입력 열하중으로 사용하였다. 즉 Fig.8 과 같이 일정한 시간간격으로 수집한 28 채널의 온도데이터를 이용하였으며 각 라체팅 사이클에서도 온도구배 이동이 동일한 방식으로 반복되는 것으로 간주하고 동일한 천이온도 열 하중을 각 사이클에서 반복적으로 적용하였다.

4.3 비탄성 결합 경화 모델

액체금속과 같은 고온구조물에 큰 이차응력이 반복적으로 작용할 경우 316L 스테인리스강에 대한 고전 소성경화 모델들은 실제의 구조물 거동을 정확히 모사하지 못하기 때문에 본 연구에서는 재료의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 비탄성 해석모델인 비선형 결합 경화모델⁽¹²⁾을 ABAQUS⁽¹⁸⁾의 사용자 부프로그램인 UMAT 으로 구현하여^(13,14) 해석을 수행하였다.

이 결합 경화 모델은 항복 조건을 갖는 모델로서 동적 특성을 갖는 내부 변수들을 도입하여 재료의 시간에 따른 내부이력을 표현한다. 이 구성식의 주요 수식은 다음과 같이 전개된다.

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

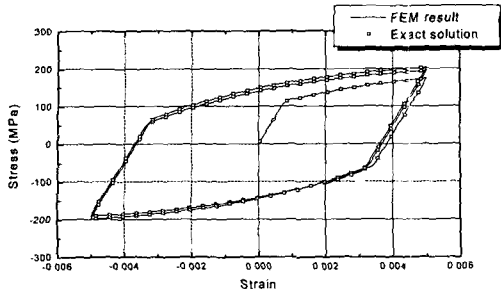


Fig. 11 Validation of NONSTA code for uniaxial cyclic load

$$(\dot{\epsilon}_p)_{ij} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{s_{ij} - X_{ij}}{J(s - X)} \quad (1)$$

여기서 s_{ij} 는 편차응력, X_{ij} 는 이동성 경화 응력, \dot{p} 는 누적 소성변형률 속도, $J(s)$ 는 편차응력의 second invariant 를 의미한다.

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

항복 조건은 $F = J(s - X) - R - \sigma_Y$ 이며 σ_Y 는 초기 항복응력이다.

이동 경화(kinematic hardening) 응력의 발전식은

$$\dot{X}_{ij} = \frac{2}{3} C (\dot{\epsilon}_p)_{ij} - \gamma \dot{p} X_{ij} \quad (3)$$

이때 C, γ 는 이동경화 관련 재료상수이다.

등방 경화(isotropic hardening) 응력의 발전식은

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{p} \quad (4)$$

이때 b 와 Q 는 등방경화 관련 재료 상수이다. 이 모델의 비탄성 재료 상수는 C, γ, b, Q 및 σ_Y 등 5 개이고, 재료상수의 결정과정 및 상수 값들은 참고문헌^(14,19)에 제시되어 있다.

열 라체팅 하중의 작용에 따라 소성경화 거동을 보이는 스테인리스강 구조물의 비선형 결합 경화모델을 프로그래밍한 ABAQUS UMAT 의 검증을 위해 단축시편이 반복경화(uniaxial cyclic hardening) 하중을 받을 때 시편거동에 대해 수치적으로 구한 엄밀해와 UMAT 을 이용한 유한요소 해석해를 비교하였다. 여기서 엄밀해는 IMSL 에서 삼미분 방정식의 풀이를 위한 DREBS 서브루틴⁽²⁰⁾을 사용하여 결정한 것이다. Fig. 11 에서와 같이 엄밀해와 UMAT 을 이용한 유한요소해석 결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4.4 라체팅 시험결과와 해석결과 비교

열 라체팅 사이클이 반복됨에 따라 반경방향 잔류변위는 점진적으로 누적되는 양상을 보인다. 라체팅 사이클을 3 회 실시한 후 상온에서 측정하

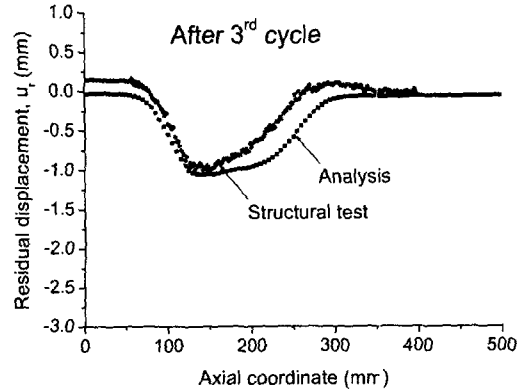


Fig. 12 Comparison of the residual displacements by test and analysis after 3 thermal ratchet cycles

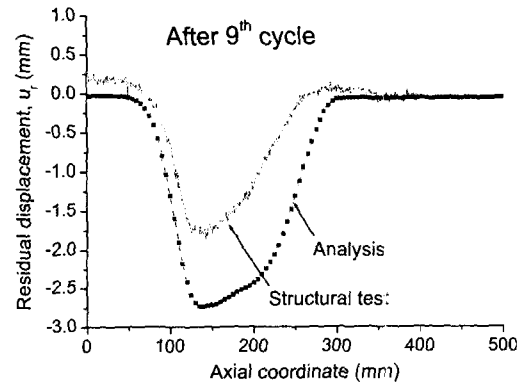


Fig. 13 Comparison of the residual displacements by test and analysis after 9 thermal ratchet cycles

반경방향 누적변위는 Fig. 12 에 나타난 바와 같이 시편의 바깥으로 팽창하였고 계산결과와 해석결과 는 비슷한 변형모드를 보여주고 있다.

또한 라체팅 사이클을 9 회 가한 후에 발생한 잔류변위의 해석 및 시험 결과는 Fig. 13 에 나타난 바와 같이 라체팅 사이클이 반복됨에 따라 잔류변위는 역시 팽창모드로 누적되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12 와 Fig. 13 을 비교해보면 라체팅 사이클 이 누적되면서 해석결과와 시험결과 차가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 각 사이클 이후 해석 및 측정결과치는 3 사이클까지는 비교적 잘 일치하다 그 후 차이가 조금씩 증가하는 것으로 나타났다으며 해석결과는 실제 거동을 다소 과대평가 하는 것으로 나타났다.

이차 열응력에 의해 발생하는 라체팅 거동 평가

에 대한 해외의 연구사례도 Fig. 13 에서 보인 것과 비슷한 크기의 정도를 보여주고 있다.^(21,22) 이와 같은 차이가 발생한 주된 원인은 반복 소성경화 구성식 모델의 모사능력이 아직까지는 구조물의 실제 거동을 모사하는 데는 한계가 있기 때문이다.

라체팅 거동평가의 정확성을 개선하기 위해서는 구성식의 개량이 필요하지만 이는 매우 어려운 작업이다. 현재의 구성식에서도 재료상수 결정시 실제 구조시편의 재료와 같은 열처리 및 가공 이력을 겪은 재료로 재료시편을 만들고 많은 재료실험을 수행하여 정확하게 상수를 결정하면 해석결과가 개선될 것으로 판단된다. 또한 원통의 상하 승강 중 가열코일과 원통사이의 간격이 일정하게 유지되도록 코일과 승강장비의 정밀 제작 및 정교한 시편의 정렬이 필요하다.

4.5 라체팅 변형모드

열라체팅 하중에 의한 시험원통의 변형모드에는 Fig. 1 에서와 같이 안으로 들어가는 수축모드와 본 시험결과에서와 같이 밖으로 튀어나오는 팽창모드가 있다. 수축 또는 팽창 형태로 변형을 일으키는데 영향을 주는 인자로는 첫째 구조시편의 두께와 같은 '기하학적 형상의 차이'와 시편의 승강속도 변화에 따른 '가열속도의 차이'가 있는 것으로 분석되었다.⁽²³⁾

즉 동일한 열하중 환경에서 시편의 두께가 두꺼워질수록 시편의 열용량이 커져 시편의 승강에 따라 축방향 온도 구배는 별로 달라지지 않지만 두께방향의 온도분포가 크게 달라지며 이와 같이 다른 온도분포는 시편의 두께방향으로 다른 형태의 잔류응력분포를 야기하는데 이것이 수축에서 팽창으로 또는 팽창에서 수축으로 변형모드를 반전시키는 원인이 되는 것으로 나타났다. 가해지는 열량에 비해 두께가 충분히 얇아 두께방향으로 온도 구배가 거의 없다면 변형모드는 두께를 더 얇게 해도 반전되지 않는 포화상태에 이르지만 두께가 어느 이상 두꺼워지면 원통의 열전도 형태가 바뀌어 변형모드가 수축에서 팽창으로 또는 팽창에서 수축으로 반전되는 것으로 나타났다.

또한 시편의 승강속도를 바꾸어 가열속도가 변해도 두께가 바뀌는 것과 같은 효과가 있으며 가열속도 변화로 인해서도 변형모드가 반전되는 것으로 나타났다. 즉 충분히 느린 속도로 가열되면 시편의 두께방향 온도구배가 거의 사라지게 되지만 특정속도 이상으로 가열되면 시편의 두께방향으로 온도구배가 존재하여 두께방향 잔류 응력분포가 바뀌게 되고 이에 따라 라체팅 변형모드가

반전되는 현상이 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 고온 구조물의 열라체팅 특성시험을 위해 316L 재료의 원통용기 구조시편을 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. 급격한 온도 구배가 축방향으로 이동함에 따른 온도 분포 측정을 위해 구조시험 원통의 축방향으로 28 개의 열전대를 부착하고 여기서 얻은 데이터는 열라체팅 변형해석의 입력데이터로 활용하였고, 하나의 레이저변위센서와 두 개의 LVDT 를 120°간격으로 배치하여 잔류변위를 측정하였다.

구조시편의 바깥에 설치된 유도코일을 이용하여 라체팅 열하중을 9 회에 걸쳐 반복적으로 가한 결과 원통에서는 라체팅 사이클마다 점진적으로 잔류변위가 누적되는 것으로 나타났으며, 원통의 하단으로부터 13cm 떨어진 부분에서 변형량이 최대 1.79mm 만큼 바깥으로 팽창하는 것으로 나타났다.

라체팅 시험결과를 해석결과와 비교하고 스테인리스 강 of 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 등방경화와 이동경화를 결합시킨 비선형 결합 경화 모델을 ABAQUS 의 UMAT 으로 구현하여 비탄성 해석을 수행하였다. 구조시험에서 수집된 천이온도 데이터를 이용하여 라체팅 변형해석을 수행한 결과 시험결과와 초기에는 비슷한 거동을 보였지만 시편과 유도코일의 간격 및 시편정렬 등의 어려움과 비탄성 구성식 재료상수의 실제 거동과의 오차 등으로 인해 라체팅 사이클이 반복되면서 두 결과의 차이가 증가하는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- (1) KALIMER 예비 개념설계 보고서, 2000, KAERI/TR-1636, KAERI.
- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1998, Section III Subsection NH.
- (3) 이형연, 김종범, 유봉, 1998, "크리프-피로 하중

- 하에서 손상을 받은 304 및 316LN 스테인리스강 구조물의 손상평가,” 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 12 호, pp. 2269~2277.
- (4) 이형연, 김종범, 유봉, 2001, “액체금속로 고온 배관의 미국 및 프랑스 설계지침을 따른 크리프-피로 손상평가,” 2001 년도 제 1 차 재료 및 파괴 부문 학술대회, 대한기계학회, pp. 178~184.
- (5) 고온구조 라체팅 시험장치 구축, 2000, KAERI/TR-1707/2000, 한국원자력연구소.
- (6) Bari., S, Hassan, T., 2001, “Kinematic Hardening Rules in Uncoupled Modeling for Multiaxial Ratcheting Simulation,” *International Journal of Plasticity*, Vol.17, No.7, pp.885~905.
- (7) Igari, T., Wada, H., Ueta, M., 2000, “Mechanism-based Evaluation of Thermal Ratcheting due to Traveling Temperature Distribution,” *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, No. 2, p. 130.
- (8) Wolters, J., Breitbach, G., Rodig, H., Nickel, H., 1997, “Investigation of Ratcheting Phenomenon for Dominating Bending Loads,” *Nuclear Engineering Design*, Vol. 174, No. 3, pp. 353~363.
- (9) Ohshima, I., Tanaka, N., Hirayama, H., 1989, “Structural Integrity of DFBR Internal Structure Under Severe Thermal Loading (2) : Thermal Ratchet Deformation,” *ASME PVP*. Vol. 163, pp. 47~55.
- (10) Lee H.Y., Kim J.B, Lee J.H and Yoo B, 1997, “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.
- (11) 이형연, 김종범, 구경희, 2001, “316L 시험원통의 열라체팅 구조시험에 관한 연구,” 대한기계학회, 2001 춘계학술대회, pp. 178~184.
- (12) Lemaitre, J., Chaboche, J-L., 1990, *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge university press.
- (13) Youn Samson, Lee Soon-Bok, Kim Jong Bum, Lee Hyeong-Yeon, Yoo Bong, 1998, “Implementation of Visco-Plastic Constitutive Equations into the Finite Element Code ABAQUS,” *Proceedings of the Korean Nuclear Society*, 1998 추계학술대회, pp. 1~10.
- (14) 윤삼손, 이순복, 김종범, 이형연, 유봉, 2000, “상태변수를 갖는 비탄성 구성식 적분법의 일반화,” 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권 제 5 호, pp. 1075~1083.
- (15) RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000, 1993, AFCEN, 1985 edition & 1993 addenda.
- (16) Wada, H., Otani, T., Fujioka, T., 1997, “The Ratcheting Evaluation Methods in Japanese Demonstration FBR Design,” *SMIRT 14, F04/2*, p. 85~92.
- (17) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1998, Section III NB, 1998 edition.
- (18) ABAQUS Users manual, Version 5.8, 2000, H.K.S.
- (19) Schwertel, I., and Schinke, B., 1996, “Automated Evaluation of Material Parameters of Viscoplastic Constitutive Equations,” *J.Eng Mat. Tech.*, Vol. 118, p. 273.
- (20) IMSL Mathematics & Statistics Library, Vol. 2.
- (21) 열라체팅 변형의 해석정도 향상을 위한 비탄성 구성식의 개발, 일본전력중앙연구소, 1993, T93022, (일본어).
- (22) O’Gara, D.M., 1996, “Benchmark for Assessing Thermal Ratcheting,” *Final Report, RAI-CT92-0209*, AEAT, UK.
- (23) 이형연, 김종범, 이재한, 2001, “원통구조물의 열라체팅 변형기구 해석,” 한국원자력학회 2001 추계학술대회, pp. 1~11.