'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고온 원통 구조물의 열라체팅 시험 및 해석

Test and analysis of high temperature structure under thermal ratcheting

이형연, 김종범, 유 봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

500°C 이상의 고온에서 운전되는 액체금속 원자로의 운전기동, 정지 등에 의한 소듐 냉각재 자유액면의 반복적인 상하 이동으로 인해 원자로 구조물에는 진행성 비탄성 변형인 열라체팅 현상이 발생할 수 있다. 구조물에 심각한 손상을 야기시킬 수 있기 때문에 본 연구에서는 라체팅 거동의 특성을 평가하기 위해 열 라체팅 구조시험장치를 설계 및 제작하고 시험결과를 비탄성 해석결과와 비교했다. 본 구조시험에서는 축소용기모델을 이용한 라체팅 본 시험을 9 회에 걸쳐 실시하였고 시험에서 얻은 온도 데이터를 이용하여 비탄성 구성방정식인 Chaboche 모델을 이용하여 구조해석을 수행하였고 해석결과와 구조시험 결과를 비교 분석하였다. 해석적으로 구한 구조시험 모델의 라체팅 거동은 비선형성이 강한 라체팅의 특성을 고려하면 시험 결과와 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다.

Abstract

The objective of this study is to perform the thermal ratchet structure test to characterize the thermal ratchet behavior and to compare the results of structural test with those of the inelastic analysis. Thermal ratchet phenomenon, a progressive inelastic deformation can occur in the liquid metal reactor operating at high temperature above 500°C due to the moving temperature distribution along the axial direction as the hot free surface moves up and down due to the cyclic heat-up and cool-down of reactor operation. Thermal ratchet can cause a severe damage to the reactor structure. The structural thermal ratchet test was performed 9 times using a cylindrical shell and the test results were compared with those of the analysis using Chaboche constitutive model,.which showed reasonable agreement with those of the tests.

1. 서론

일반적으로 액체금속로는 1~10 기압 및 500~550°C 의 저압 고온상태에서 운전되며, 원자로 출입구 온도차가 약 150°C 정도로 경수로의 30°C 정도에 비하여 월등히 높기 때문에 경수로에 비해 매우 높은 이차응력을 받게 된다. 이와 같이 높은 이차응력이 스테인레스강 구조물에 반복적으로

작용하면 각 하중 사이클에서 점진적으로 영구 변형량이 계속 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation)이 발생할 수 있다[1,2].

본 연구에서는 액체금속 원자로 용기 내에서 발생하는 열 라체팅 현상을 효율적으로 모사할 수 있는 라체팅 구조시험 시설을 구축하고 이를 이용하여 라체팅 구조시험을 수행하였으며 시험결과를 해석결과와 비교함으로써 구축된 시험시설이 제대로 성능을 발휘하는지 평가하였다.

라체팅 구조시험장치는 크게 고주파 가열기 및 냉각시스템, 승강장비 및 베드, 냉각수조, 센서 및 데이터 수집시스템으로 구성된다. 라체팅 구조시험장치의 승강장비에 부착되는 구조시험원통을 냉각 수조 내에서 상하로 이동시키면서 유도코일로 가열하여 자유액면의 상하이동에 따른 축방향 온도분포의 이동을 모사한다. 본 구조시험에서는 시험원통의 축방향으로 28 채널의 열전대를 부착하여 가열기의 출력을 제어하고 레이저 변위센서와 LVDT(linear variable displacement trnasducer)를 이용하여 원통의 반경방향으로 누적되는 잔류변위량을 측정했다.

액체금속로와 같이 이차응력의 변동이 클 경우 기존의 고전 구성방정식 모델은 반복 하중이 작용하는 경우에 실제의 재료거동과는 큰 차이를 보이기 때문에 해외에서도 비탄성 해석을 위한 구성방정식(constitutive equation) 개발과 라체팅 평가 기술개발에 대한 연구가 수행된 바 있고[3-5] 또한 현재도 활발히 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 반복 이차응력을 받는 스테인리스강 구조물의 구성방정식으로서 Chaboche 모델[6,7]을 적용한 NONSTA 코드를 이용했다.

열 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기시킬 수 있으므로 미국[8], 프랑스[9], 일본[10] 등은 각국의 액체금속로 설계관련 코드에서 열적 라체팅에 의한 과변형이 일어나지 않도록 설계지침에서 변형률 제한치를 두고 있다. 그러나 이는 일차 및 이차응력이 동시에 작용하는 경우에 대한 지침이며 엄밀하게 말하면 이차응력인 열하중만이 작용하는 경우에 대한 지침은 아니다. 라체팅 변형률을 계산하는 과정에서 ASME Section III Subsection NH[8]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 이차응력이 반복됨에 따라 톱니처럼 매 사이클마다 일정한 양의 비탄성 영구변형이 누적되는 현상을 의미한다. 스테인레스강 구조물에 이차응력이 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클에서 마다 거의 비슷한 양의 변형량이 지속적으로 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation)이 발생할 수 있다[8,11,12]. 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. 여기서 이차응력에는 열 응력에 의한 이차응력과 기계적 이차응력이 있다. 본 연구는 자유액면의 상하이동에 따라 발생하는 원통용기의 열응력 기인 열 라체팅 현상을 모사하기 위한 구조시험에 관한 것이다. 그림 1 은 축방향으로 온도구배가 큰 열하중이 반복적으로 작용함에 따라 온도분포도 축방향으로 이동하는 모습을 보여주고 있다. 이에 따라 열

하중이 완전히 제거된 후에도 원통의 반경방향으로 영구변형이 남게 된다. 일반적으로 반복 되는 열 라체팅 하중이 안정화되면 매 하중 사이클마다 거의 일정한 양의 영구변형이 점진적으로 누적 된다.

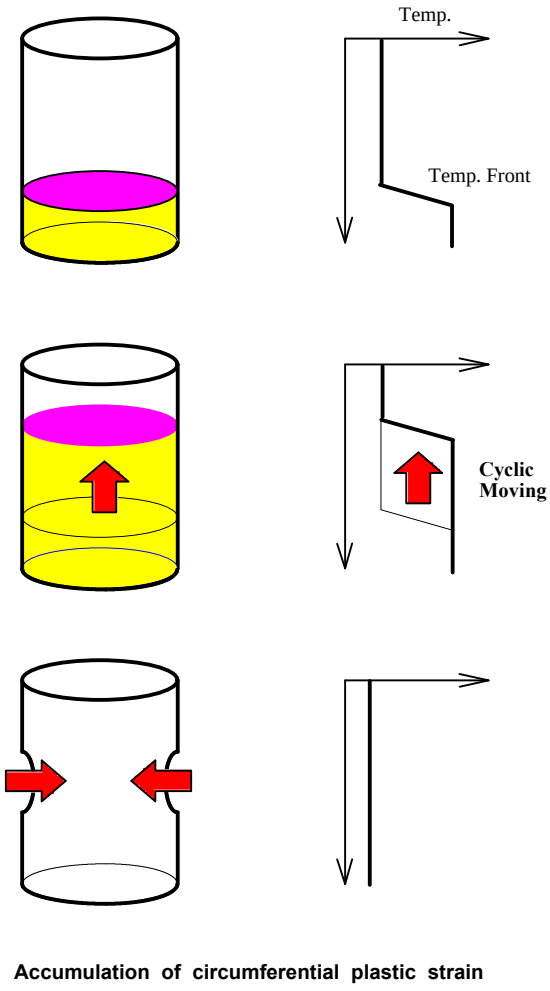


그림 1. 열라체팅 현상 개요

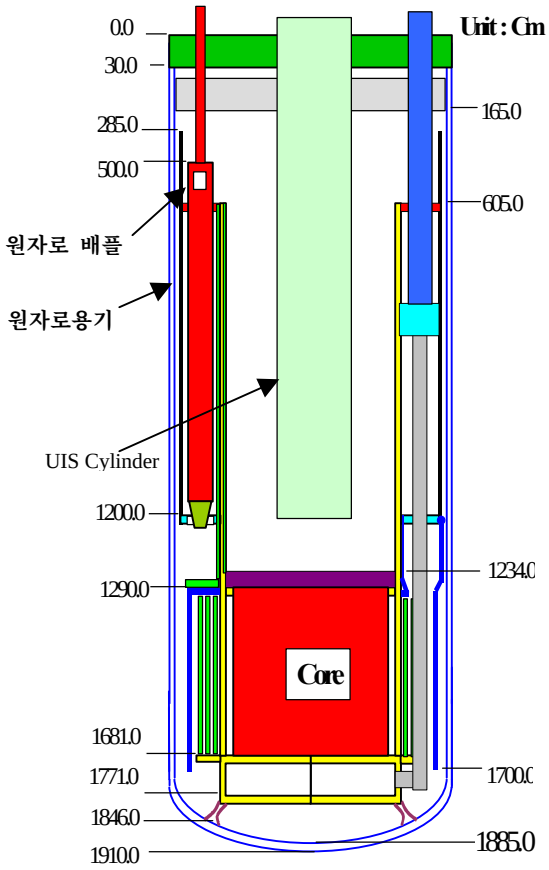


그림 2 칼리머에서 라체팅 발생 가능부위

2.2 칼리머에서의 열라체팅 현상

자유액면의 상하 이동으로 인해 액체금속로 칼리머[13]에서 열라체팅 현상이 발생할 수 있는 부위는 그림 2에서 원자로용기, 원자로 배플 및 상부내부구조물(UIS) 원통 등이 있다. 고온 설계지침인 ASME-NH[8]는 라체팅 변형률의 제한치로서 1%의 한계치를 제시하고 있다. 그러나 고온에서 구조물이 반복 이차응력을 받을 때 구조물의 국부 변형률을 정확하게 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 시험에서는 변형률 대신 반경방향으로 누적되는 잔류변위를 측정하고 이를 해석치와 비교했다.

3. 라체팅 구조시험장치 구축

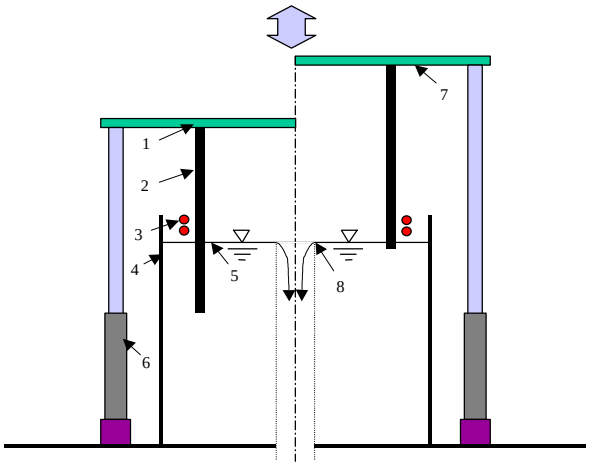
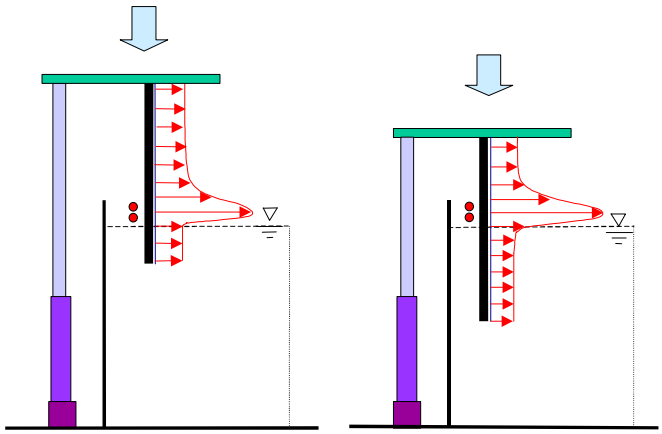


그림 3. 열 라체팅 구조시험 개념도



(a) 시험원통 하강위치(I) (b) 하강위치(II)

그림 4. 온도분포 이동양상

3.1 구조시험장치 구축

본 연구에서는 열 라체팅 하중을 효율적으로 주기 위해 유도코일과 냉각수의 간격을 작게 하여 라체팅 구조시험장치를 제작하였다. 그림 4 는 시험원통 승강장비에 의해 하강 위치 I 에 있을 때와 하강위치 II 에 있을 때 시험원통의 축방향으로 발생하는 온도분포를 보여주고 있다. 실제 제작된 시험장치는 그림 5 에서와 같다. 승강장치는 스텝 모터의 구동에 의해 시험원통을 상하로 이동시킨다. 시험원통은 고주파 유도가열기에 의해 가열되며 냉각후 발생하는 시험원통의 잔류변위는 레이저 변위센서와 LVDT 를 이용하여 측정한다.

그림 5. 라체팅 구조시험장치

본 연구에서는 구조시험모델에 고온의 열하중을 가하기 위한 가열기로서 순간 가열능력이 탁월한 50KW 용량, 50KHz 의고주파 유도 가열기를 사용했으며 시험원통을 상하로 이동시키기 위해 스텝모터와 워엄기어, 엔코더, 구조시험 모델 고정판 및 지지기둥 등으로 구성된 승강장비를 제작하였다. 여기서 주의를 요하는 것은 구조시험 모델과 유도 코일간의 간격이 원주방향으로 최대한 균일하고 시편이 상하로 이동할 때 그 간격이 일정하게 유지되도록 시험모델을 장착해야 한다는 점

이다. 또한 시험모델과 유도코일 제작 시에도 코일과 시험원통의 간격이 고르지 못하면 간격이 좁은 부분에서 집중 가열현상이 발생하여 한 방향으로 과변형이 일어날 수 있기 때문에 특별한 주의가 요구된다.

시험원통의 온도 및 잔류변위를 측정하기 위해 그림 6 에서와 같이 시험원통의 축방향으로 28 채널의 열전대를 설치하였으며 이의 부착사진은 그림 8 과 같다. 잔류변위 측정을 위해서 레이저 변위센서와 LVDT 를 그림 8 에서와 같이 약 120 도 간격으로 설치되었다. 레이저변위센서 및 LVDT 의 부착도는 가각 그림 9 및 10 에서와 같다.

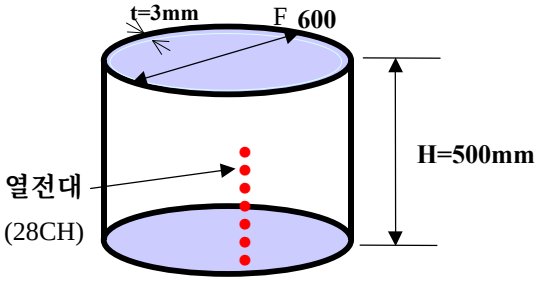


그림 6 구조시험 원통

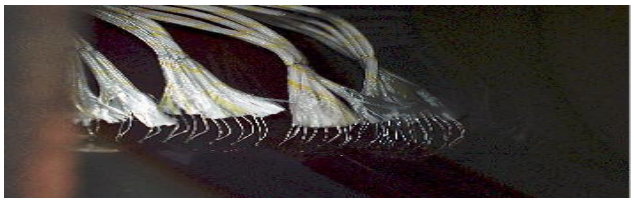


그림 7 열전대 부착도(90° 회전)

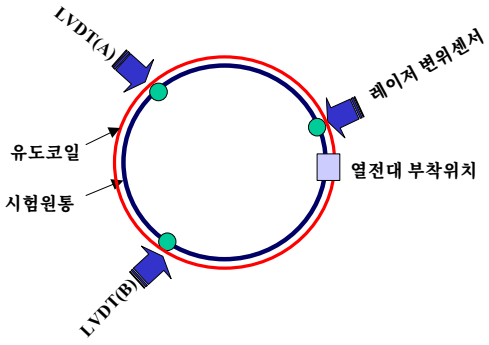


그림 8. 변위센서 배치도

그림 9. 레이저변위센서

그림 10. LVDT 부착도

3.2 온도수집 데이터

본 시험에서는 라체팅 열 하중을 9회에 걸쳐 가했다. 시험원통의 축 방향으로 설치된 28 채널의 열전대가 1 cm 간격으로 원통의 높이 9cm부터 36cm 까지 28cm 구간에 걸쳐서 부착되는데 그림 11에서 x 좌표계 0은 실제 높이 50cm인 시험원통에서 바닥면으로부터 9cm 떨어진 위치를 나타낸다. 그림 11은 열전대가 부착된 시험원통의 28cm 구간에서 시간이 경과함에 따라 온도분포가 우측으로 즉 시험원통의 위로 이동하면서 그린 것이다. 그림 11에서 각 온도선도는 15초 간격을 두고 그려진 것이다. 시험원통 내면의 최고 온도는 약 550°C로 측정되었으며 온도형태가 비교적 일정한 틀을 유지하면서 이동하는 것을 보여주고 있다. 시험원통이 가열되면서 약 3cm 아래에 위치하고 있는 냉각수에 시험원통이 잠기면 그림 11에서 각 온도틀의 좌측부분이 축방향으로 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 형

태를 보여줄 것이다. 이상의 온도데이터는 제어프로그램에 의해 엑셀 파일로 변환된다. 열 라체팅에서 최종적으로 관심이 있는 변수인 잔류변위 계산을 위해 사용될 열 하중은 각 열전대 위치에서 수집한 온도이력을 이용해서 계산한다.

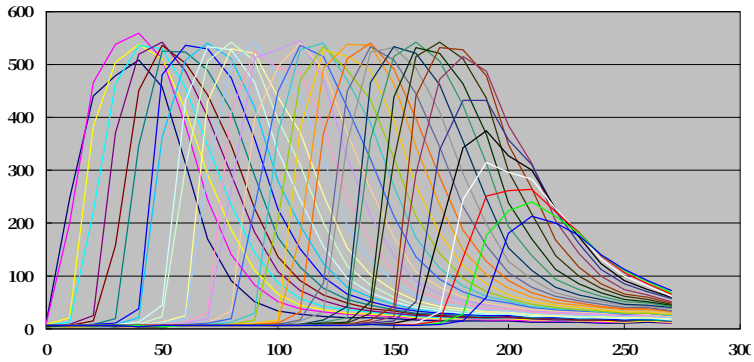


그림 11 온도데이터

3.3 잔류변위 수집 데이터

잔류변위는 레이저 변위센서(1EA)와 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer :2EA)를 약 120도 간격으로 설치하여 세 군데에서 변위를 측정하였다.

잔류변위 측정을 위해 라체팅 열하중을 가한 각 사이클 후에 충분히 시험원통을 냉각시킨다. 레이저 변위센서를 이용하여 잔류 변위분포를 측정한 결과는 그림 12에서와 같이 원통 10cm 아래에서는 반경방향으로 축소하지만 100mm 이상에서는 '-'로 나타나 밖으로 팽창한다는 사실을 알 수 있다. 특히 약 14 cm 위치에서는 점진적으로 잔류변위가 누적되는 현상을 보였으며 5 사이클 후에는 약 1.3mm, 9 사이클 후에는 시험결과 약 1.8 mm의 잔류변위가 누적된 것으로 나타났다.

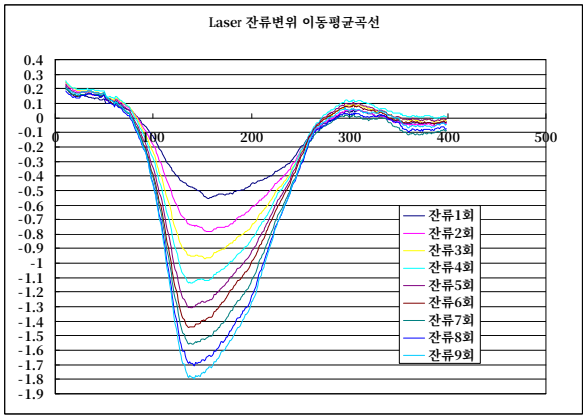
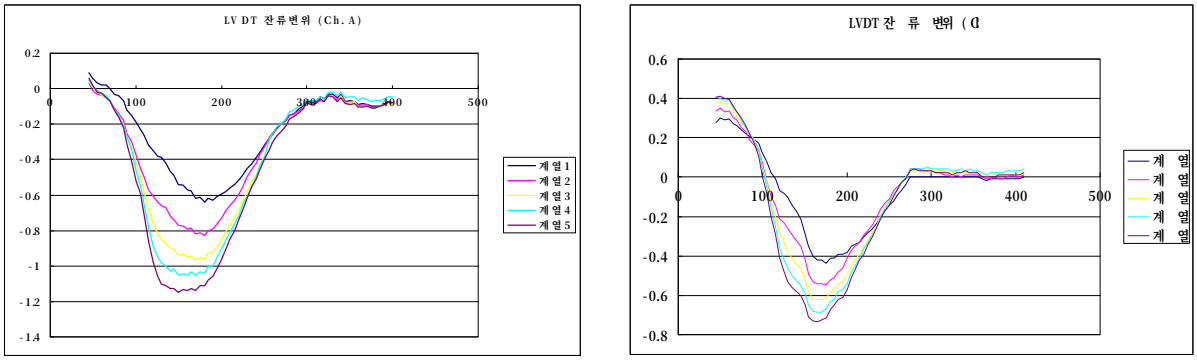


그림 12 레이저 변위센서로 측정한 시험원통의 반경방향 잔류변위 변화

3.4. LVDT

2 개의 LVDT 를 이용하여 라체팅 사이클이 종료된 후 잔류변위를 5 번째 사이클까지 측정하였다. 이번 시험에서는 LVDT 의 변위치를 보여주는 Readout/controller 인 MP2000 (Schaevitz 제품)의

RS232 프로토콜 분석상에 어려움이 있어 MP2000 의 변위수집을 수작업으로 처리했다. 수집과정에서 약간의 오차가 개입되었을 가능성은 있지만 LVDT 의 잔류변위 측정결과는 그림 20 과 같이 나타났다.



(a) 채널 A (b) 채널 B

그림 13. LVDT 의 변위측정결과

3.5 레이저 변위센서와 LVDT 변위의 비교

그림 13 에서 보는 바와 같이 시험원통의 원주방향으로 약 120 도 간격으로 측정한 잔류변위는 5 사이클 종료 후 레이저 센서에서 측정한 변위가 가장 크게 나왔고 LVDT (A)와 비슷한 크기로 나타났으며 LVDT (B)는 비교적 작게 나타났다. 이와 같이 차이가 발생하는 이유는 첫째 LVDT 와 레이저변위센서가 위치하는 곳에서의 코일과 시험원통의 간극의 차가 존재하고 (측정결과 : 레이저-13mm, LVDTA-15mm, LVDT B-16mm), 세 개 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

시험원통의 열라체팅 거동을 모사하기 위해 본 해석에서는 축대칭 유한요소 모델을 이용했다. 모델링에는 8 절점 2 차원 요소를 사용하였으며 모델은 300 요소, 987 절점으로 구성되어 있다. 재료는 316L 스테인리스강이며 재료의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 비탄성 해석모델인 Chaboche 구성방정식(constitutive model)이 프로그래밍된 NONSTA[7] 코드를 이용했다.

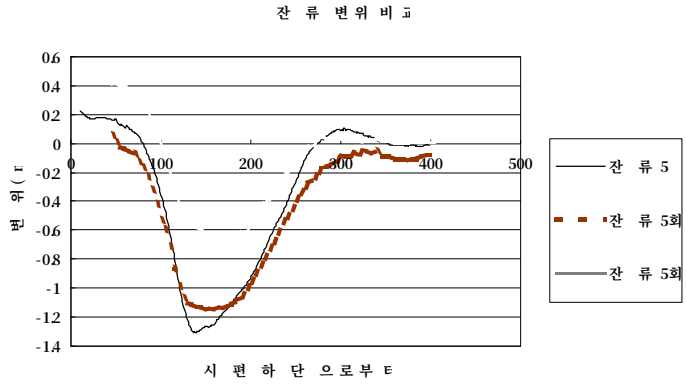


그림 14. 5 번째 사이클 종료 후 잔류변위 비교

4.2 **하중조건**

열전대가 부착된 시험원통의 28cm **구간에 대해서는 그림** 11**에서와 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 Chaboche **구성방정식**

액체금속로와 같이 큰 이차응력이 반복적으로 작용할 경우 기존의 고전 모델들은 실제의 재료거동과는 큰 차이를 보이기 때문에 비탄성 해석을 위한 구성방정식을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 고온환경에서 일반적으로 사용될 수 있는 비탄성 구성방정식의 개발은 사실상 불가능하며 특정용도에 활용하기 위한 새로운 구성방정식 및 관련 프로그램의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 해석에 적용한 Chaboche **모델**[6]**을 간략히 설명하면 다음과 같다.**

비탄성 변형에 대한 Chaboche **모델은 항복 조건식을 갖는 대표적인 통합 점소성 모델로서 동적 특성을 갖는 내부 변수들을 도입하여 재료의 시간에 따른 내부이력을 표현한다. 통합 점소성 구성식의 일반적인 지배방정식**[6]**에 기초한** Chaboche **통합 점소성 구성방정식은 다음과 같다.**

유동응력식 :

$$f = \frac{3}{2}\frac{\dot{p}}{J_2(\sum_{ij})}, \quad \dot{p} = \left\langle \frac{J_2(\sum_{ij}) - k - k}{K} \right\rangle^n$$

$$\sum'_{ij} = s'_{ij} - a'_{ij}, \qquad J_2(\sum_{ij}) = \frac{1}{2}\Sigma_{ij}'\Sigma_{ij}'$$

내부변수 지배방정식

$$\dot{a}'_{ij} = h(s'_{kl}, a'_{kl}, k, e_{kl}, \dot{p}, T)\dot{e}^{p}_{ij} - r(s'_{kl}, a'_{kl}, k, e_{kl}, \dot{p}, T)\, a'_{ij},$$

$$h = \frac{2}{3}C, \qquad r = g\,\dot{p}$$

$$\dot{k} = \Gamma(p,T)\,\dot{p} + \Theta(p,T)\,\dot{T},$$

여기서 s'_{ij}, k **및** a'_{ij} **는 각각 편차응력 텐서, 등방경화응력**(drag stress) **및 편차 이동경화 응력텐서**

(deviatoric back stress tensor)를 나타내며, K,n,C,g,b,Q,k 등은 온도에 따른 재료의 상수들이다.

4.4 시험 및 해석결과의 비교

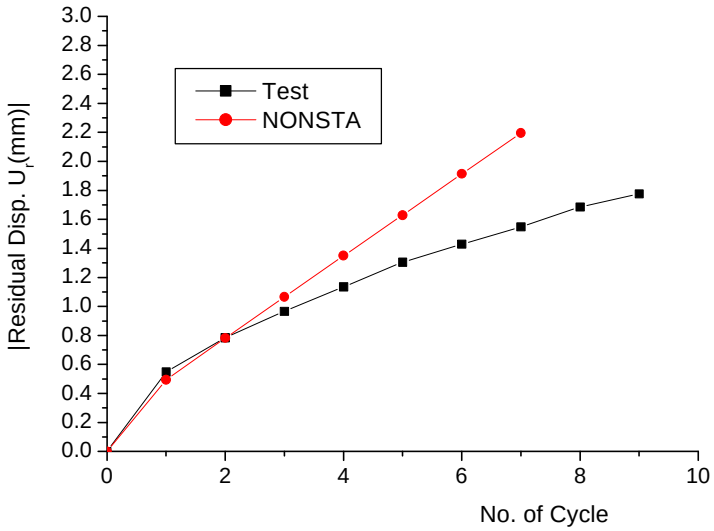


그림 15. 시험결과와 해석결과의 비교

그림 15 에서 보는 바와 같이 반경방향 잔류변위에 대해 NONSTA 코드를 이용하여 계산한 변위값은 실제 구조시험에서 측정된 변위보다 크게 나타났으며 횟수가 반복되면서 그 오차가 점점 증가하는 것으로 나타났다.

약 120 도의 위상차를 갖고 측정된 LVDT 의 잔류변위 측정치는 레이저센서보다 잔류변위를 과소평가하는 경향이 있으므로 해석결과와는 조금 더 큰 편차가 있을 것이라는 것을 알 수 있다.

해석결과와 시험결과의 편차를 최소화시키기 위해서는 먼저 해석에서 구성방정식을 적절히 선정하고 실제 구조시험에 사용된 물성치를 최대한 실제에 근사하게 입력해야 한다. 또한 시험에서도 온도 및 잔류 변위측정이 정확이 이루어지도록 측정오차를 최소화시켜야 하며 가열코일과 시험원통의 간극이 일정하여 원통의 가열부위가 고르게 가열되도록 시험 원통을 장착해야 한다.

6. 결 론

열라체팅 구조시험 및 해석연구에서는 고온 액체금속 원자로의 자유액면 상하 이동으로 인해 발생할 수 있는 열라체팅 현상의 시험적 연구 수행을 위해 일차로 열라체팅 구조시험 장치를 구축했다. 고주파 유도코일을 사용하여 가열을 하는 본 라체팅 구조시험 장치는 온도 데이터 수집 과정에서 발생하는 소음을 제거하는데 많은 시간과 노력이 소요되었다. 이는 원통의 축방향으로 28 채널을 설치하여 온도를 측정하는 시험원통 자체에 와전류 손실에 의해 유기되는 전압이 볼트(V) 차수인 반면 열전대 전압은 mV 차수이기 때문에 소음제거에 어려움이 많았다. 본 시험연구는 라체팅 거동의 특성을 평가하고 비탄성 구조해석을 위해 개발 중에 있는 전산코드인 NONSTA 코드를 검증하기 위한 것이다.

본 연구에서는 축소용기모델을 이용한 라체팅 본 시험을 9 회에 걸쳐 실시하고 시험에서 얻은 온도 데이터를 이용하여 비탄성 구성방정식인 Chaboche 모델을 이용한 구조해석을 수행하고 잔류변위에 대해 비교검토를 수행했다. 비교결과 해석적으로 구한 구조시험모델의 라체팅 거동은 시험결과를 비교적 잘 따라가는 것으로 나타났다.

앞으로 열 라체팅 구조시험장치를 이용하여 여러 가지 구조시험 모델에 대해 가열하중, 가열속도변화 및 용접영향 조사 등 다양한 형태의 열라체팅 구조시험을 수행하고, 비탄성 구조해석 코드인 NONSTA 를 검증할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] 고온구조 라체팅 시험장치 구축, KAERI/TR-1707/2000, 2000.

[2] H.Y.Lee, J.B.Kim, J.H.Lee, B.Yoo, Prediction of ratcheting behabior 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] N. Tanaka et al, ”Simulation of Thermal Ratcheting of 304 SS Cylindrical Shell,” SMIRT 11, L04/4, pp.97-101.,1991.

[6] J.Lemaitre and J-L. Chaboche, Mechanics of solid materials, Cambridge university press, 1990.

[7] 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.

[8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NH, 1998.

[9] RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000, AFCEN, 1985 edition & 1993 addenda.

[10] Wada H, Otani T, Fujioka T, “The ratcheting evaluation methods in Japanese demonstration FBR design,” SMIRT 14, F04/2,pp85-92, 1997.

[11] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III NB, 1992 editio.n

[12] 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.

[13] KALMER 예비개념설계보고서, KAERI/TR-1636, KAERI, 2000.