2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원통 구조물의 열 라체팅 변형기구 해석

Analysis of thermal ratchet deformation mechanism for cylindrical structure

이형연, 김종범, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

고온구조물의 비탄성 누적변형에 따른 열 라체팅 거동과 변형기구를 분석하기 위해 본 논문에서는 두께가 다른 원통 구조물에 대해 라체팅 사례해석을 수행하였다. 두께가 3mm 이고 직경이 600mm 인 스테인리스 원통 구조물에 대해 열 라체팅 구조시험에서 수집한 온도데이터를 이용하여 원통의 두께가 다른 5 가지의 사례에 대해 원통의 축 방향으로 이동하는 열 하중에 따른 라체팅 거동을 해석하였다. 변형기구에 대한 평가결과 열 라체팅 하중 하에서 원통 변형의 팽창 또는 압축에 영향을 미치는 주요인자는 원통의 두께 방향 및 축 방향 온도 구배이며 여기에 열충격 하중이 가해질 때 잔류응력의 거동이 바뀌면서 라체팅 변형양상이 달라지는 것으로 분석되었다.

Abstract

In this paper, a case study on the ratcheting of the cylindrical structures with different thickness to analyze the behavior and mechanism of the thermal ratchet which means inelastic progressive deformation. The temperature data received from the structural ratchet test for the stainless steel cylindrical shell with outer diameter of 600mm and thickness of 3mm were used as the thermal input for the ratchet analysis. The ratchet deformation behavior for the five cases of different thickness was analyzed under the axially moving thermal loads. The analysis results show that the main parameters which affect the deformation feature of the expansion or contraction are the temperature gradients along the thickness direction as well as the axial direction. It was investigated that the ratchet deformation feature resulted from the behavior of the residual stresses along the thickness direction as well as the axial direction, which finally determines the expansion or contraction of the cylinder under the thermal ratchet load.

1. 서론

고온 저압 고온상태에서 운전되는 액체금속로에서는 특히 원자로 내부 구조물에서 자유액면의 상하유동으로 인해 각 하중 사이클마다 점진적으로 영구 변형량이 계속 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation)이 발생할 수 있다[1,2,3]. 액체금속로의 냉각재로 사용되는

소듐은 대기압에서 비등점이 883°C 로 매우 높고 비중은 0.9 이며 열전도도는 물의 128 배에 이르는 등 우수한 열전달 특성을 가지고 있어 가압을 하지 않고도 효율이 높은 발전이 가능하다. 그러나 이와 같이 우수한 열전달 특성이 출력증가에는 유리하지만 소듐을 담고 있는 용기에는 더 큰 열과도 응력을 유발하여 라체팅 변형 및 크립-피로 손상을 가중시킬 수 있기 때문에 이에 대한 상세 평가가 요구된다.

본 연구에서는 액체금속 원자로 용기 또는 원자로 배플 내에서 발생할 수 있는 열 라체팅 거동을 평가하고 라체팅 변형 기구(mechanism)를 분석하기 위해 라체팅 구조시험에서 얻은 온도 데이터를 이용하여 원통 해석모델의 두께를 바꿔가며 열 라체팅 현상의 변형기구애 대한 해석을 수행하였다. 이와 같은 연구를 수행하게 된 동기는 열 라체팅 구조시험을 수행하던 도중 특정 열라체팅 하중을 반복하는 경우 시험원통에 남는 잔류변위가 팽창형태이었던 발생한 시편에서도 열하중을 약간만 바꿔주어도 잔류변위가 수축형태로 반전되는 현상이 나타나는 것이 관찰됨에 따라 라체팅 변형기구에 대한 분석 필요성이 제기되었다. 즉 동일 구조시편에서도 하중을 주는 방식에 따라 비탄성 누적 변형이 얼마든지 팽창형태나 수축형태로 발생할 수 있으며 또한 동일 하중을 받는 환경에서도 구조물의 두께를 어떻게 설정하느냐에 따라 변형이 팽창형태 또는 수축형태로 발생할 수 있다는 것으로 라체팅이 발생할 수 있는 부위의 설계에서는 이에 대한 평가가 반드시 선행되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 외경 600mm, 높이 500mm 이고 두께가 3mm 인 시험원통에 대해 열라체팅 구조시험에서 이미 확보해놓은 원통의 축방향 온도 측정 데이터를 활용하여 이 시험원통과 나머지 제원은 동일하고 두께가 2cm, 3cm, 4cm, 5cm 로 다른 경우에 대해 두께 사례해석을 수행하였다. 사례해석에서는 시험원통의 잔류변위가 수축에서 팽창으로 또는 팽창에서 수축으로 반전되는 상황을 도출하고 라체팅 기구를 분석하였다. 두께를 이와 같이 크게 설정한 이유는 두께를 크게 하면 열응력 효과가 더욱 두드러지게 나타나기 때문이다.

열 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기시킬 수 있으므로 미국[4], 프랑스[5], 일본[6] 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[4]에 적용하는 수정 Bree 선도인 O'Donnell Porowski 선도는 용기의 두께방향으로 일차 및 이차 응력을 고려하지만 피크응력 성분은 고려하지 않고 있다.

2. 열라체팅 구조시험

2.1 라체팅 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[4,7,8]. 일차응력은 항복응력 이하로 제한되므로 구조물의 불연속성으로 인한 소성변형이 부분적으로 생기더라도 계속 누적되는 형태의 진행성 변형을 일으키

지는 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 것으로 그림 1 은 축방향으로 온도구배가 큰 열하중이 반복적으로 작용함에 따라 온도분포도 축방향으로 이동하는 모습을 보여주고 있다. 이에 따라 열 하중이 완전히 제거된 후에도 반복 열하중을 받는 부위에서는 원통의 반경방향으로 수축되는 영구 변형이 남게 된다. 일반적으로 반복 되는 열 라체팅 하중이 안정화되면 매 하중 사이클마다 거의 일정한 양의 영구변형이 점진적으로 누적된다.

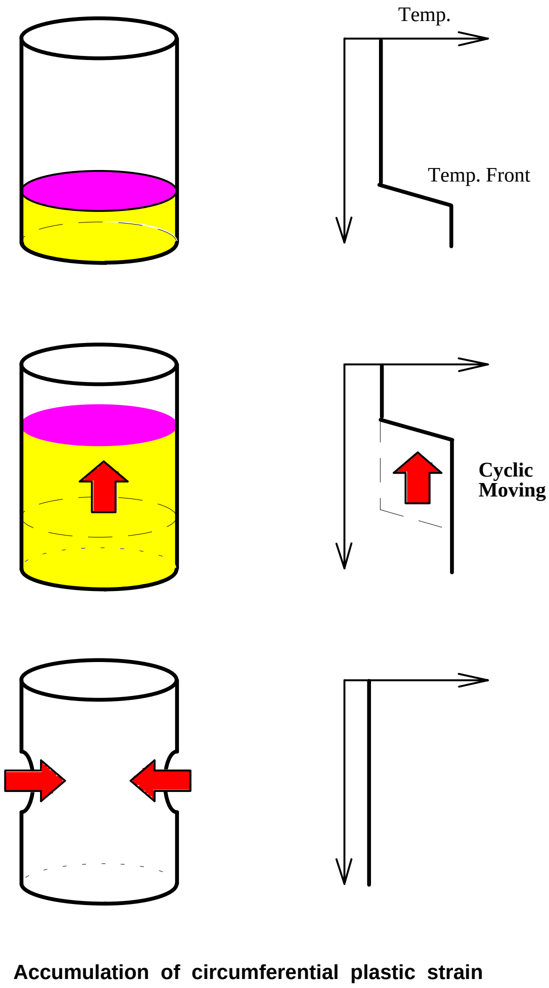


그림 1. 열라체팅 현상 개요

그림 1과 같이 자유액면의 상하 이동으로 인해 액체금속로 칼리머[9]에서 열라체팅 현상이 발생할 수 있는 부위는 원자로용기, 원자로 배플 및 상부내부구조물(UIS) 원통 등이 있다. 고온 설계지침인 ASME-NH[4]는 라체팅 변형률의 제한치로서 1%의 한계치를 제시하고 있다.

2.2 라체팅 구조시험

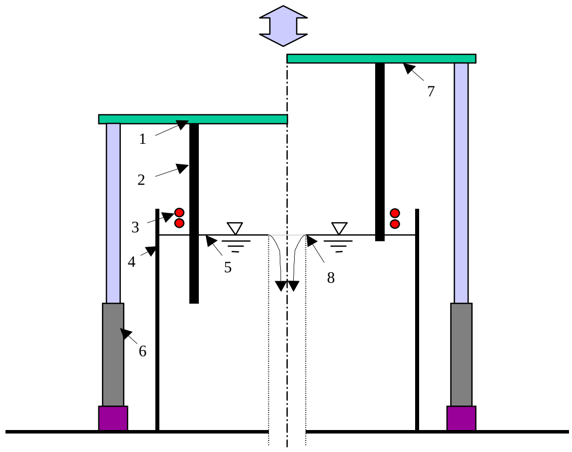
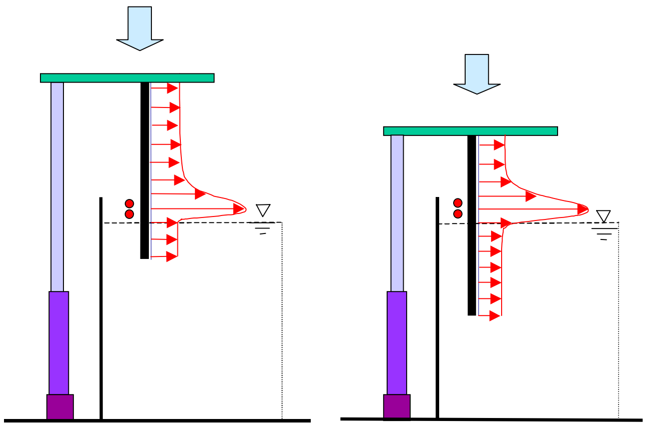


그림 2. 열 라체팅 구조시험 개념도



(a)시험원통 하강위치(I)　　(b) 하강위치(II)

그림 3. 온도분포 이동양상

본 연구에서는 열 라체팅 하중을 효율적으로 가하기 위해 그림 3 의 유도코일(3)과 냉각수(5)의 위치는 고정시키고 시편(2)을 상하로 이동시킴으로써 실제 액체금속로에서 발생하는 자유액면 상하 유동에 따른 반복 열하중을 모사하도록 열라체팅 구조시험장치를 구축하였다. 특히 코일과 냉각수의 간격을 작게 하여 시험원통의 축방향으로 약 3cm 구간 내에서 급격한 열구배가 존재하도록 시험장치를 구성하였다. 그림 3 은 시험원통 승강장비에 의해 하강 위치 I 에 있을 때와 하강위치 II 에 있을 때 시험원통의 축방향으로 발생하는 온도분포가 이동하고 있는 개념을 보여주고 있다.

여기서는 그림 4 에서와 같이 원통의 축방향으로 28 채널의 열전대를 설치하여 축방향 온도분포 및 자유액면 상하 이동을 모사하는 천이온도 데이터를 수집하였다. 시험원통의 축 방향으로 설치되는 28 채널의 열전대는 1 cm 간격으로 원통의 높이 9cm 부터 36cm 까지 28cm 구간에 걸쳐서 부착하였다. 그림 5 는 라체팅 구조시험에서 수집한 28 채널 온도 데이터이다. 그림 5 에서 x 좌표계 0 은 실제 높이 50cm 인 시험원통에서 바닥면으로부터 9cm 떨어진 위치를 나타내며 열전대는 그림 5 의 x 축에서 0~27cm 까지 1cm 간격으로 28 개가 부착되었다. 그림 5 는 열전대가 부착된 시험원통의 28cm 구간에서 각 열전대에서 수집한 온도를 15 초 간격으로 그린 것으로 각 열전대의

데이터를 받아 왼쪽에서부터 순차적으로 디스플레이해준다.. 원통이 위로 이동하면 그림 5의 온도곡선은 우측으로 이동하게 되는데 이와 같은 방법으로 15초마다 수집한 온도곡선을 중첩 디스플레이 하면 그림 5와 같이 나타난다.

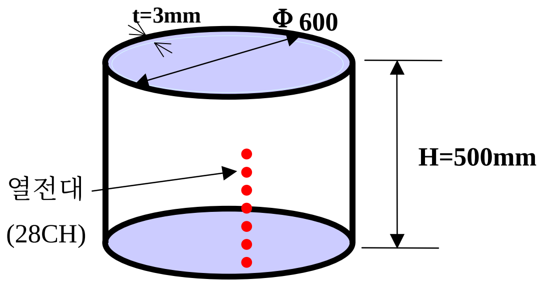


그림 4 구조시험 원통

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 5에서 각 온도틀의 좌측부분이 축 방향으로 가파르게 냉각되는 것을 알 수 있다.

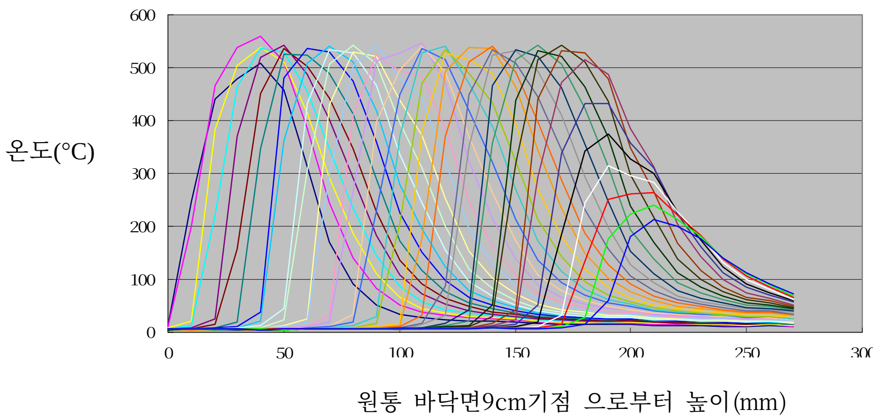


그림 5 구조시험에서 수집된 온도데이터

3. 열라체팅 해석

3.1 해석 모델링

시험원통의 열라체팅 거동을 평가하기 위해 본 해석에서는 ABAQUS[10] 축대칭 유한요소 모델을 이용했다. 모델링에는 8절점 2차원 요소를 사용하였으며 모델은 300요소, 987절점으로 구성되어 있다. 재료는 316L 스테인리스강이며 재료의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 ABAQUS의 등방경화-이동경화가 결합된 Combined model을 이용하였다. 이 구성식 모델을 이용하면 비탄성 거동평가에서 많은 물성치를 온도의 함수로 입력할 수 있다.

유한요소 해석모델에서 외경은 600mm로 같지만 두께가 0.3cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm인 5가지 두께의 원통을 모델링하였으며 두께 변화에 따라 해석모델의 두께는 커지지만 요소의 수는 모두 동일하다.

3.2 하중조건

두께가 0.3cm인 원통뿐만 아니라 2cm 이상인 모든 원통 모델에 대해서도 실제 구조시험에서 수집한 온도데이터를 열하중 입력데이터로 활용했다. 열전대가 부착된 시험원통의 28cm 구간에 대해서는 그림 5에서와 같은 온도분포를 입력했고, 열전대가 부착되지 않은 나머지 부분은 열 구배가 비교적 완만한 곳으로 상하의 온도분포를 참고하여 온도분포가 매끈하게 이어지도록 입력하였으며 두께가 다른 네 가지 경우에도 모두 같은 열전달 조건을 적용하였다. 고주파 가열기의 유도코일에 의한 가열은 와전류 손실에 의해 시편에서 직접 발열하는 방식이지만 본 해석에서는 실측 벽면온도를 주변 용적온도로 주고 열전달 계수는 무한대에 가까운 값을 사용하였다. 본 해석에서는 작용하중을 열하중만으로 국한했다.

3.3 비선형 등방-이동경화 구성 방정식

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 해석에서 사용한 ABAQUS 의 비선형 등방-이동 경화 모델인 combined 모델은 다음식과 같이 표현된다.

유동응력식 : $$\dot{\varepsilon}^{p}_{ij} = f(J_2(\textstyle\sum_{kl}), \kappa, T)\textstyle\sum_{ij}$$

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

$$\textstyle\sum'_{ij} = \sigma'_{ij} - \alpha'_{ij}, \qquad J_2(\textstyle\sum_{ij}) = \frac{1}{2}\Sigma'_{ij}\Sigma'_{ij}$$

내부변수 지배방정식 $$\dot{\alpha}'_{ij} = h(\sigma'_{kl}, \alpha'_{kl}, \kappa, \varepsilon_{kl}, \dot{p}, T)\dot{\varepsilon}^{p}_{ij} - r(\sigma'_{kl}, \alpha'_{kl}, \kappa, \varepsilon_{kl}, \dot{p}, T)\,\alpha'_{ij},$$

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

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

여기서 σ'_{ij}, κ 및 α'_{ij} 는 각각 편차응력 텐서, 등방경화응력(drag stress) 및 편차 이동경화 응력텐서(deviatoric back stress tensor)를 나타내며, K, n, C, γ, b, Q, k 등은 온도에 따른 재료의 상수들이다.

4. 해석결과

4.1 라체팅 변형 모드

라체팅 변형해석을 모사하는 사례해석을 수행한 결과 그림 6 에서와 같이 두께가 0.3cm 및 2cm 인 경우에는 변형모드가 밖으로 팽창하고, 두께가 3cm 인 경우에는 팽창 및 수축이 공존하며

두께가 4cm 및 5cm 인 경우에는 수축되는 것으로 나타났다. 즉 그림에서와 같이 두께가 3cm 보다 클 때는 수축하고 3cm 보다 작을 때는 팽창하는 형태로 반전되는 현상이 흥미로운 현상이 발생했다. 시험원통은 바닥면으로부터 15cm 지점으로부터 20cm 구간에 걸쳐 원통 하강시에만 가열한다. 그림 6 은 이와 같은 가열을 3 회 실시할 경우 3 사이클 이후 해석에서 구한 각 원통의 변형도이다.

여기서는 가시적으로 요소의 구별이 가능한 두께 2cm 이상의 경우에서 팽창하는 경우인 두께 2cm 인 경우와 수축하는 경우인 두께 5cm 경우에 대해 집중적으로 비교함으로써 열 라체팅 기구의 분석을 도모하였다.

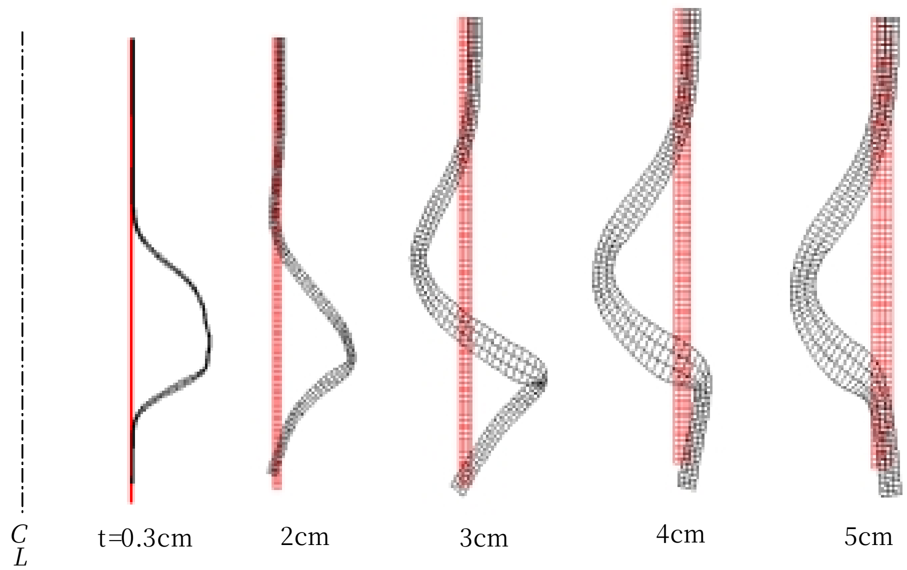


그림 6. 원통의 두께사례에 대한 라체팅 변형모드

4.2 온도해석결과

1) 두께가 5cm 인 경우

시험 원통은 그림 5 에서와 같이 시간 t=0 에서 원통의 가열이 시작된다. 가열이 시작된 후 30 초 후에는 그림 7 에서와 같이 중하부가 502°C 까지 가열되며 300 초, 500 초에서 시험원통이 승강장비에 의해 하부로 내려가면서 가열을 받는 원통의 고온 부위가 상부로 점차 올라가는 것을 확인할 수 있다. 그림 6 에서와 같이 승강장비에 의해 원통이 하부로 내려가면서 고온부위가 상부로 올라가고 700 초에서는 최고온도가 68°C 까지 떨어진다. 열라체팅 구조시험에서 1 사이클의 주기는 1,000 초이다. 그림 6 에서 온도분포의 이동을 보면 전도 열전달이 축방향은 물론 두께(반경) 방향으로도 일어나고 있음을 알 수 있다.

2) 두께가 2cm 인 경우

가열 시작후 30 초부터 500 초, 700 초 및 900 초에서의 온도분포는 그림 8 에서와 같이 점진적으로 온도분포가 올라갔다가 다시 내려가는 것을 볼 수 있다. 두께 2cm 인 경우에는 원통의 열용량이 5cm 경우보다 작으므로 그림 7 과 8 을 비교해보면 더 빠른 속도로 가열 및 냉각이 진행됨을 알 수 있다. 여기서 위의 경우와 중요한 차이는 두께가 2cm 인 경우에는 5cm 인 경우와는 달리 두께 방향으로 온도 구배가 거의 존재하지 않는다는 점이다. 즉 원통의 두께가 충분히

얇아 열전도가 축방향으로 slug 유동형태로 일어나며 온도구배는 축방향으로만 존재한다는 것이다. 따라서 두께가 비교적 얇은 원통에서는 온도구배가 축방향으로만 존재하고 주요 열전달은 축방향으로만 발생함을 알 수 있다.

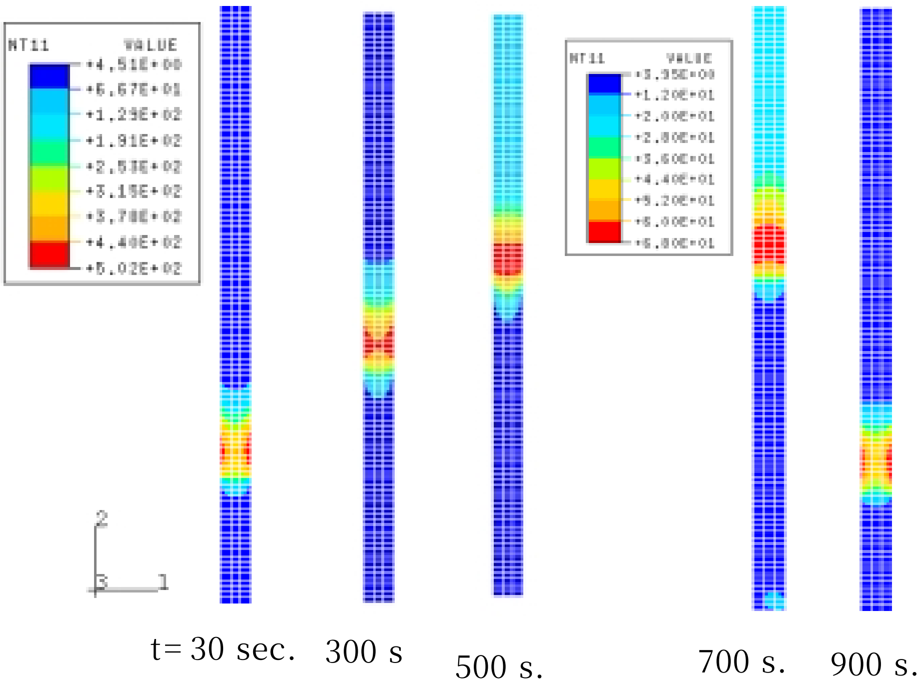


그림 7. 가열부위 이동에 따른 온도분포의 이동(두께 5cm 원통)

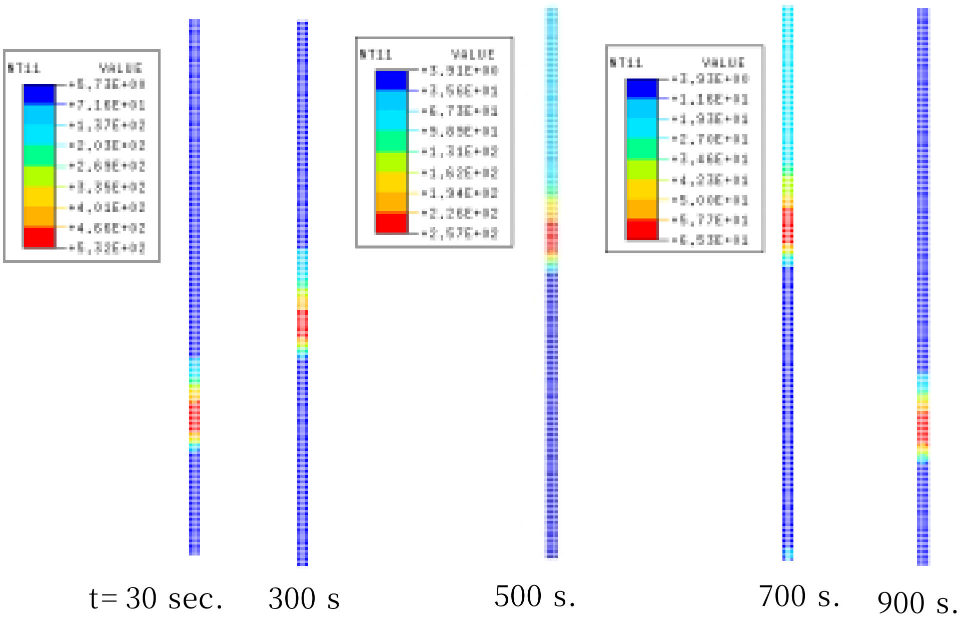


그림 8. 가열부위 이동에 따른 온도분포의 이동(두께 2cm 원통)

4.3 라체팅 응력분포도

원통의 잔류 hoop 응력($\sigma_{\theta\theta}$)분포는 그림 9 및 10 에서와 같이 두께 방향으로 인장 및 압축이 교대로 발생함을 알 수 있다. 반면 팽창(2cm 경우) 및 수축(5cm 경우)이 발생한 부위에서의 원주방향 잔류응력 분포는 내면에서는 두 가지 경우 모두 압축 잔류응력이 발생하였지만 외면에서는 5cm 인 경우 압축 잔류응력이 발생하였지만 2cm 인 경우에는 인장 잔류응력이 발생하였다.

이는 원통의 두께 변화에 따라 반경방향 온도구배가 있는 경우(5cm)에서는 내외부에 모두 압축 잔류응력이 발생하고 원통은 수축되지만 반경방향 온도구배가 거의 없는 경우(2cm)의 원통 외면에서는 인장잔류응력이 존재하고 원통은 팽창하는 것으로 나타났다. 따라서 자유액면 상하 유동에 따른 열 하중이 주어지는 경우 원자로 내부 구조물 설계에서 라체팅의 발생이 최대한 억제되도록 설계가 이루어져야 하겠지만 라체팅이 발생하더라도 변형의 진행방향을 팽창 또는 수축 중 원하는 방향으로 진행되도록 구조물의 두께에 대한 사례해석이 선행되어야 할 것이다.

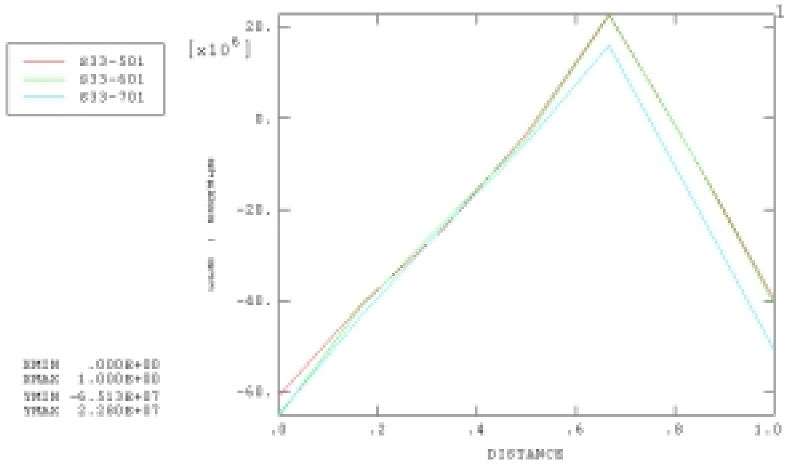


그림 9. 팽창부에서 두께방향의 잔류 hoop 응력(두께 2cm 원통)

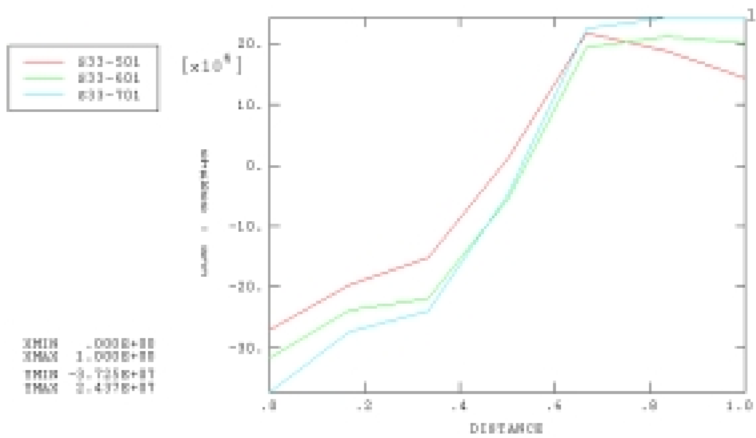


그림 10. 수축부에서 두께방향의 잔류 hoop 응력(두께 5cm 원통)

한편 원통의 두께 별로 계산된 최대 Mises 응력은 표 1 에 나타난 바와 같이 두께가 증가할수록 Mises 응력이 증가함을 알 수 있다.

표 1. 원통의 두께 사례별 Von Mises 응력 계산결과

두께(cm)	0.3	2	3	4	5
Mises 응력 (MPa)	93.5	101	103	107	118

5. 결 론

본 연구에서는 고온구조물 용기 내에서 발생할 수 있는 자유 액면의 상하 유동에 따른 점진적 누적변형 현상인 열라체팅 거동을 해석적으로 모사하고 라체팅 변형 기구를 규명하기 위해 원통의 두께를 바꿔가며 사례해석을 수행하였다. 해석동기는 이미 316 스테인리스강 원통에 대해 라체팅 구조시험을 수행한 바 있는데 시험 중에 라체팅 변형이 하중 조건에 따라 팽창 또는 수축형태로 반전되는 현상이 발생하여 라체팅 기구에 대한 분석을 수행하게 되었다.

본 해석에서는 순수 열하중에 의한 라체팅 변형을 고려하였으며 열하중은 0.3cm 구조시험 원통에서 측정한 온도데이터를 두께가 다른 모든 해석모델의 해석에서도 활용하였다. 두께 사례해석에서는 동일재료, 두께를 제외하고 제원이 동일한 원통에 대해 두께가 0.3cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm 인 경우에 대해 변형거동을 해석 및 비교 분석하였다.

라체팅 변형 해석결과 두께가 2cm 이하로 비교적 얇은 원통에서는 라체팅 하중 하에서 변형모드가 밖으로 팽창하는 형태로 나타났지만 두께가 4cm 이상의 두꺼운 경우에는 하중이 반복됨에 따라 점진적으로 수축되는 형태로 변형이 반전되는 양상을 보였다. 이와 같이 변형이 반전되는 원인은 두께가 얇은 원통에서는 두께방향으로 온도구배가 존재하지 않고 주요 열전달 모드가 축방향 전도인 반면 두께가 두꺼운 원통에서는 열하중이 축방향으로 이동하는 과정에서 두께방향으로 균일한 온도에 도달하지 못해 열전달 모드가 축방향은 물론 두께방향으로 이루어지게 되고 여기에 냉각 열충격 하중이 가해지면 두께 방향으로 잔류응력 분포가 다르게 나타나기 때문인 것으로 분석된다. 즉 원주방향의 잔류응력이 내면에서는 공통적으로 압축응력이었지만 5cm 두께의 경우가 2cm 두께의 경우에 비해 약 40%정도 크게 나타났으며 외면에서는 2cm 경우에는 약 50Mpa 로 압축 잔류응력이 발생한 반면 5cm 경우에는 약 20 Mpa 로 인장잔류응력이 발생한 것으로 나타났다. 즉 라체팅 하중 하에서 밖으로 팽창하는 변형과 안으로 수축하는 변형에는 근본적으로 원통의 축방향 온도구배뿐만 아니라 반경방향의 온도구배가 영향을 미치며 여기에 열충격 하중이 가해지면 잔류응력의 형태가 특히 두께방향으로 변하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] 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.
[2] 이형연,김종범,유봉,"고온 원통구조물의 열라체팅 시험 및 해석,"한국원자력학회,2001 춘계학술대회, 2001.
[3] 고온구조 라체팅 시험장치 구축, KAERI/TR-1707/2000, 2000.
[4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NH, 1998.
[5] RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000, AFCEN, 1985 edition & 1993 addenda.
[6] Wada H, Otani T, Fujioka T, "The ratcheting evaluation methods in Japanese demonstration FBR design," SMIRT 14, F04/2,pp85-92, 1997.
[7] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III NB, 1992 edition.
[8] 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.
[9] KALMER 예비개념설계보고서, KAERI/TR-1636, KAERI, 2000.
[10] ABAQUS V.5.8, Multi-purpose structural analysis code, H.K.S, 2000.