2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

평판-원통의 접합부를 갖는 불연속 구조물의 진행성 비탄성 변형 평가

Evaluation of progressive inelastic deformation for a discontinuous structure with plate-to-shell junction

이형연, 김종범, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구에서는 평판-원통(plate-to-shell) 접합부를 갖는 원통구조물에 축방향으로 온도분포 하중을 이동시키는 라체팅 구조시험을 수행하고 이 온도분포 하중의 이동에 따른 진행성 비탄성 변형에 대한 평가를 수행하였다. plate-to-shell 의 접합부 불연속 부위가 전체적인 진행성 비탄성 변형에 미치는 영향을 조사하기 위해 불연속 구조물이 부착되지 않은 단순 원통에 대한 구조시험 결과와 비교 분석하였다. 두께가 3mm 이고 직경이 600mm 인 316L 스테인리스 원통 구조물에 대해 열 라체팅 구조시험에서 수집한 온도데이터를 이용하여 원통의 축 방향으로 이동하는 열 하중에 따른 라체팅 거동을 분석하였다. 불연속 부위가 없는 매끈한 원통에서는 라체팅 변형이 팽창모드였지만 불연속 부위가 존재하는 원통구조물에서는 불연속 구조물의 존재로 인해 수축모드로 변형이 반전되었고 변형량도 약 45%가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 불연속 구조물에서 가열구간이 10cm 에서 15cm 로 증가됨에 따라 라체팅 변형량은 비교적 더 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Abstract

In this study, thermal ratchet deformation structural test with the cylindrical structure with plate-to-shell junction subjected to the moving temperature distribution in the axial direction was carried out and an evaluation on the inelastic progressive deformation was also carried out. In order to investigate the impact of the discontinuity of plate-to-shell junction on the global progressive inelastic deformation, the test results of this specimen were compared with those of the smooth cylindrical specimen. In addition the ratchet deformation behavior was analyzed for the 316L cylindrical specimen with the thickness of 3mm and diameter of 600mm. The ratchet deformation mode for the smooth cylinder was of expansion type while that of the cylinder with plate-to-shell junction was of contraction type. The amount of deformation for the cylinder with plate-to-shell junction was increased by 45% from that of the smooth cylinder. In addition, as the heating length along the axial direction increases from 10cm to 15cm, the ratchet deformation increased more steeply.

1. 서론

500°C 이상의 고온에서 운전되는 액체금속로의 냉각재인 소듐(sodium)은 대기압에서 비등점이 883°C 이고 비중은 0.9 이며 열전도도는 물의 128 배에 이르는 등 우수한 열전달 특성을 가지고 있어 가압을 하지 않고도 고효율 발전을 가능하게 한다. 저압 고온운전으로 특징지어지는 액체금속로는 고온에서 반복 열피로 하중을 받기 때문에 고온 원자로구조물의 취약 부위에서는 열 피로손상이 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 효율적으로 모사하기 위해 구축한 열 라체팅 구조시험 장치를 이용하여 평판-원통 접합부(plate-to-shelljunction)를 갖는 불연속 구조물의 열라체팅 변형 특성시험을 수행하고 불연속 접합부 위가 거시적으로 열라체팅 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 이미 구조시험을 수행한 바 있는[5] smooth 원통 시편의 시험결과와 비교하였다. 원통구조물 시편의 축방향 및 접합부 평판 구조물에 부착된 열전대로부터 온도데이터를 수집하고 이를 이용하여 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 비탄성 해석을 위한 구성방정식(constitutive equation)[6,7]을 이용하여 본 연구에서는 비교해석을 수행하였다.

2. 열라체팅 구조시험

2.1 열라체팅 현상

라체팅은 열응력이나 노즐부위 굽힘응력과 같은 이차응력이 반복적으로 작용함에 따라 톱니처럼 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[2,8-10]. 일차응력은 항복응력 이하로 제한되므로 구조물에서 불연속성으로 인한 소성변형이 부분적으로 생기더라도 계속 누적되는 형태의 진행성 변형을 일으키지는 않지만 이차응력이 반복될 경우 또는 일차응력에 부가적으로 이차 응력이 반복되는 경우 점진적으로 누적되는 라체팅 변형이 발생할 수 있다.

Fig. 1 은 원통구조물에서 고온의 자유액면이 상하이동을 되풀이하면 온도구배가 축방향으로 이

동하게 되며 열 하중이 완전히 제거된 후에도 원통의 두께방향으로 잔류변형이 남는 전형적인 열라체팅 현상을 보여주고 있다. Fig. 1 은 열 하중의 작용 방식 또는 용기의 두께에 따라 잔류변형이 원통 안으로 누적되는 수축모드 변형사례와 원통의 바깥으로 튀어나가는 팽창모드의 변형사례를 보여주고 있다.

고온구조물의 설계해석에서 열라체팅과 크리프-피로의 차이는 라체팅은 변형이 주요 변수인 반면 크리프-피로는 손상이 주요 변수라는 점이다. 열 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기시킬 수 있기 때문에 미국[2,10], 프랑스[8], 일본[9] 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.

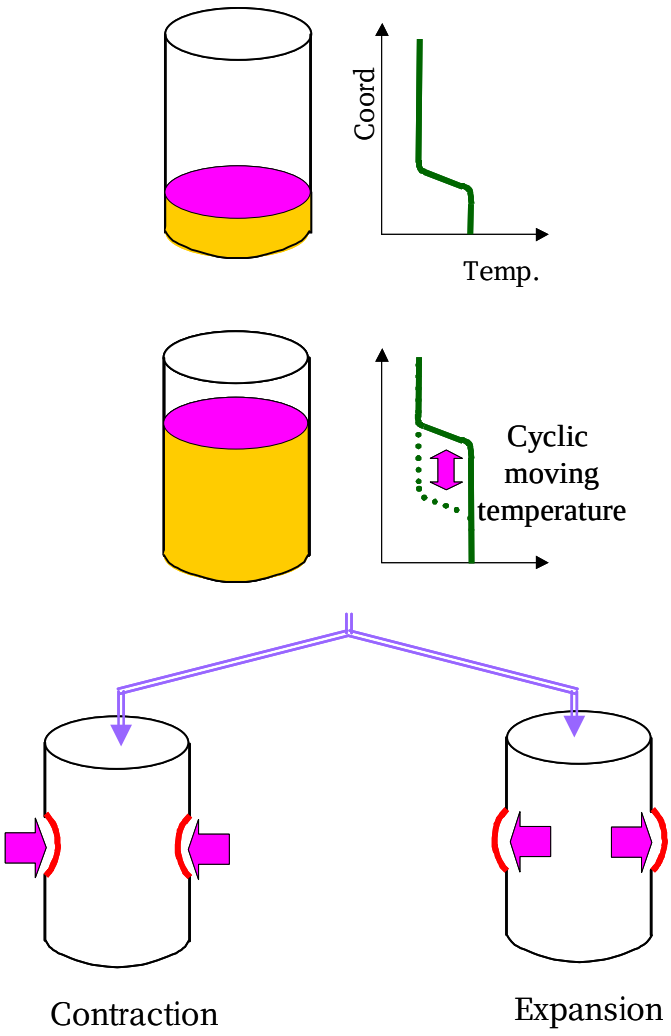


Fig..1 Concept of thermal ratchet phenomenon

2.2 칼리머의 열라체팅 변형거동

자유액면의 상하 이동으로 인해 액체금속로 칼리머에서 열라체팅 현상이 발생할 수 있는 부위

는 원자로용기와 용기 내의 원자로 배플 및 상부내부구조물(UIS) 원통 등이 있다[1]. 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 비교 분석했다.

2.3 라체팅 구조시험 장치

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

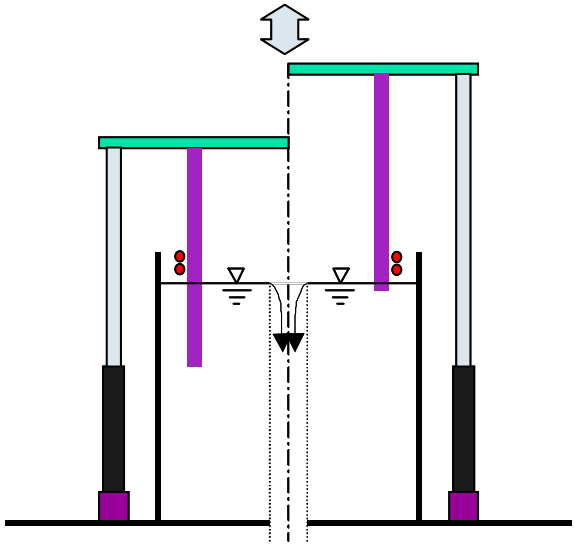
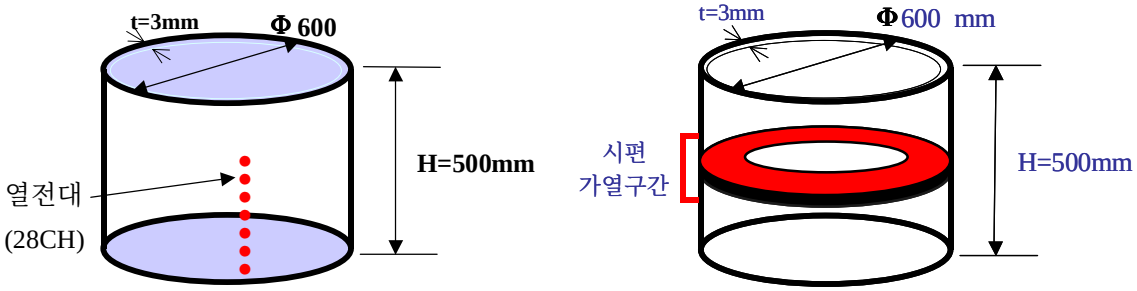


Fig..2 Concept of thermal ratchet test for cylindrical specimen

열 라체팅 하중을 효율적으로 가하기 위해 Fig. 2 의 유도코일과 냉각수의 위치는 고정시키고 시편을 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.

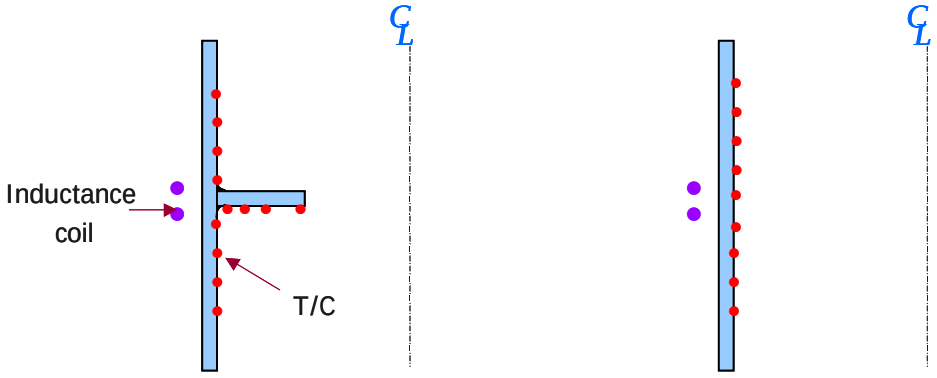


(a) smooth cylinder (b) cylinder with plate-to-shell junction

Fig. 3 Dimensions of smooth test cylinder and cylinder with plate-to-shell junction

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. 3 과 같이 smooth 원통은 외경 600mm, 높이 500mm, 두께 3mm 이고, 평판-원통 접합부를 갖는 원통구조물은 두께 3mm 의 평판이 원통의 가운데 용접된다. 이 시편들의 재질은 모두 316L 스테인리스강이다.

본 구조시험에서는 시험원통의 축방향으로 28 채널의 열전대를 부착하여 가열기의 출력을 제어하고 레이저 변위센서를 이용하여 원통의 반경방향으로 누적되는 잔류변위량을 측정했다.



(a) cylinder with plate-to-shell junction (b) smooth cylinder

Fig. 4 Configuration of thermocouple attachment

Fig. 3 에서와 같이 원통의 축방향으로 28 채널의 열전대를 부착하여 시험원통 축방향의 온도분포 및 천이온도 데이터를 수집하였다. Fig. 3(a)의 smooth 시험원통에 대해서는 28 채널의 열전대를 축방향으로 원통의 바닥면에서 9cm 지점으로부터 36cm 지점까지 1 cm 간격으로 부착하였고, Fig. 3(b)의 불연속 접합부가 있는 시편에서는 Fig. 4 에서와 같이 24 채널의 열전대는 원통의 축방향으로 바닥면에서 13cm 지점부터 33cm 지점까지 1cm 간격으로 부착하고, 4 채널은 평판 부분의 온도분포 측정을 위해 Fig. 4 에서와 같이 평판의 아래면에 부착하였다.

시험원통에 누적되는 잔류 변위 측정을 위한 레이저 변위센서의 형상은 Fig. 5 에서와 같으며 고온환경에서 사용할 수 있도록 측정거리는 50cm±2cm 인 것을 사용하였으며 삼각측량법을 이용하는 이 센서의 정밀도(resolution)는 20μm 이다.

Fig. 5 Laser displacement sensor for measuring the residual displacement

평판-원통 접합부를 갖는 불연속 구조 시험원통은 Fig. 6 에서와 같이 폭 120mm, 두께 3mm 의 도너스형 평판이 원통의 중앙에 용접되어 있는데 가열구간은 시험원통의 중앙으로부터 상하 15cm 인 경우와 상하로 10cm 인 두 경우에 대해 구조시험을 수행하였다.

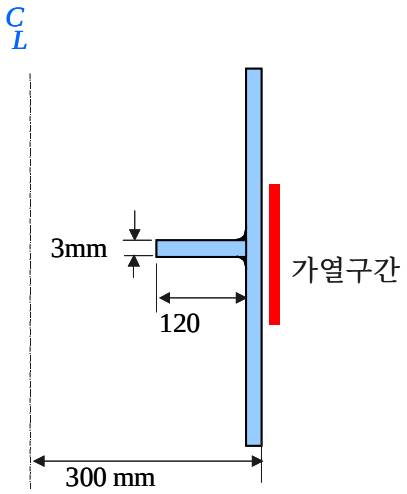


Fig. 6 Heating zone of the cylinder with plate-to-shell junction

3. 열라체팅 해석

3.1 해석 모델링

시험원통의 열라체팅 거동을 평가하기 위해 본 해석에서는 ABAQUS[11] 축대칭 유한요소 모델을 이용했다. smooth 원통에 대해 8 절점 2 차원 요소를 사용하여 모델링 하였으며 모델은 300 요소, 987 절점으로 구성되어 있다. 재료는 316L 스테인리스강이며 재료의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 ABAQUS 의 등방경화-이동경화가 결합된 combined model 을 이용하였다. 이 구성식 모델을 이용하면 비탄성 거동평가에서 많은 물성치를 온도의 함수로 입력할 수 있다. 평판-원통 접합부가 있는 불연속 구조물에 대한 해석은 현재 수행 중에 있다.

3.2 하중조건

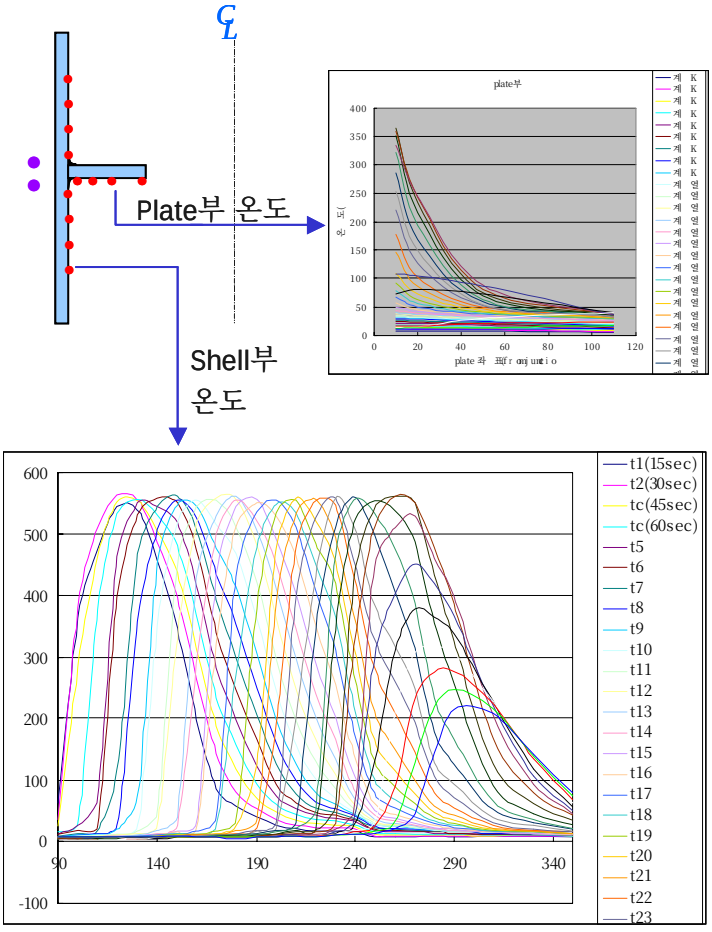
라체팅 해석에 사용된 입력하중은 Fig. 4의 28 열전대에서 측정된 온도 데이터를 사용하였다. 본 해석에서는 자중과 열하중을 고려하였는데 자중에 의한 응력은 열하중에 비해 거의 무시할 수 있는 크기이고 정지하중이므로 반복응력에 미치는 영향은 무시할 수 있는 수준이었다. 28개의 열전대를 이용하여 시험원통 전체의 온도분포를 적절히 얻어낸다는 것은 어렵다. 본 시험에서는 온도가 비교적 급격하게 변동하는 부분에는 열전대를 설치하여 온도데이터를 받았고 온도 변화가 완만한 곳에서는 적절히 가정하여 열하중을 입력시켰다.

4. 열라체팅 구조시험결과

4.1 온도분포

Fig. 7 은 불연속 구조물의 축방향 28 채널 열전대에서 측정한 온도 곡선을 보여주고 있다. 시험

원통이 승강장비에 의해 수조로 내려감에 따라 원통은 Fig. 7 에서 아래 쪽으로 이동하고 이에 따라 15 초 간격으로 그린 각 열전대의 온도분포는 Fig. 7 에서와 같이 거의 일정 온도 패턴을 가지고 우측으로 이동하는 것으로 나타났다. 평판부분에 부착된 온도분포는 Fig. 7 우측그림에서와 같이 가열코일로부터 가까이 있는 두개의 열전대에서 온도가 높게 나타나고 코일로부터 멀어져감에 따라 온도가 급격히 감소함을 알 수 있다. 원통에 부착되는 평판부분은 실제로 전체 원통구조물에서 일반적으로 내압과 같은 일차하중을 받을 때 stiffener 역할을 하지만 열하중을 받을 때는 열하중이 가해짐에 따라 이차 교번응력의 크기가 증가하여 오히려 라체팅 변형량을 증가시키는 결과를 가져온 것으로 판단된다.



원통 바닥면9cm기점 으로부터 높이(mm)

Fig. 7 Temperature profile for cylinder with plate-to-shell junction
(24CH attached on the shell and 4CH attached on plate)

Fig. 8 은 smooth 시험원통이 가열되면서 수조로 이동할 때 30 초 간격으로 그린 온도이동선도를 보여주고 있다. 시험원통이 가열되면서 약 3cm 아래에 위치하고 있는 냉각수에 시험원통이 잠기면 Fig.7 에서와 같이 각 온도 패턴에서 좌측부분이 축 방향으로 가파르게 냉각되는 것을 알 수 있다.

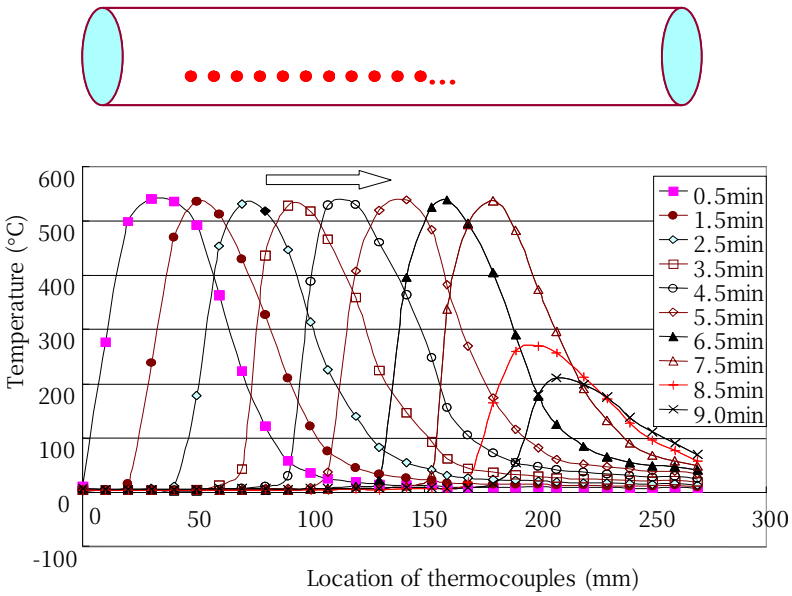


Fig. 8 Temperature profile for smooth cylinder (28CH attached on the shell)

4.2 잔류변위 분포

축방향으로 심한 온도구배를 갖는 열하중을 반복적으로 가할 때 먼저 smooth 원통에서는 Fig. 9 에서와 같이 점진적으로 시험원통의 영구변형이 바깥으로 향하는 팽창모드의 라체팅 변형을 보여주었다. 9 사이클이 반복된 후에 남은 비탄성 영구변형량은 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 팽창모드로 1.79mm 가 바깥으로 튀어나오는 것으로 나타났다.

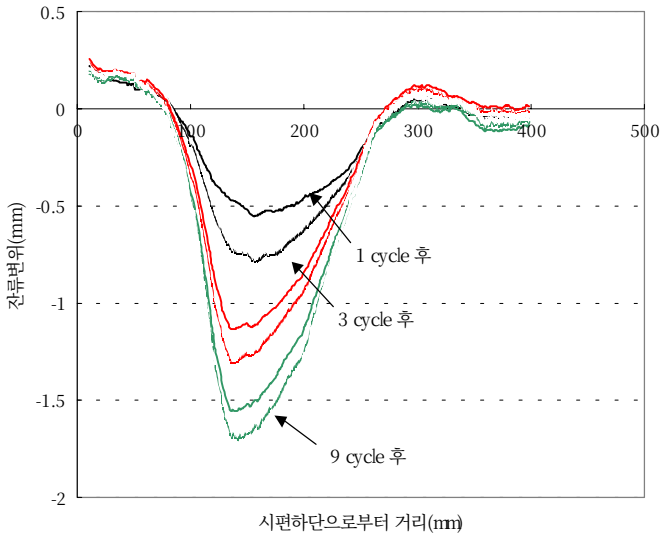
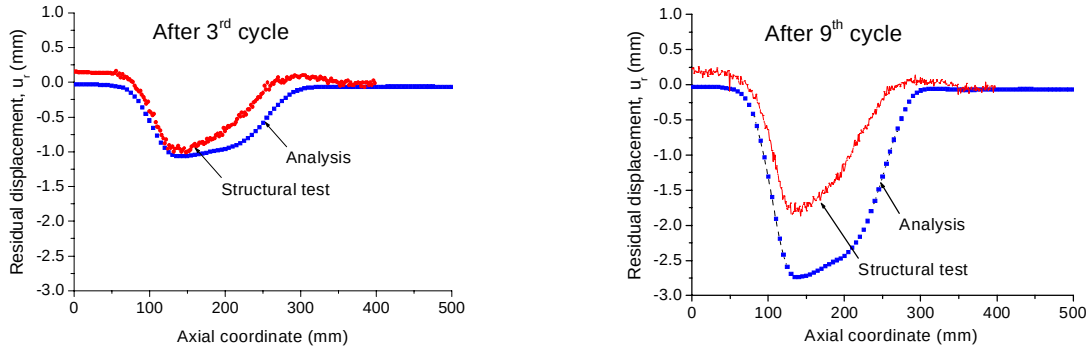


Fig. 9 Distribution of residual displacements along the radial direction

라체팅 변형에 대해 ABAQUS 의 비탄성 combined model 을 이용하여 비탄성 해석을 수행한 결과 Fig. 10 에서와 같이 해석결과가 시험결과의 변형패턴이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.



(a) (b)

Fig. 10 Comparison of the results by analysis and test for the distribution of residual displacements along the axial direction

그런데 여기서 중요한 것은 반복 열구배 하중이 축방향으로 가해질 때 smooth 원통에서는 팽창 모드로 라체팅 변형이 발생하는 반면 평판-원통 불연속 부위를 갖는 시험원통에서는 Fig. 11 에서와 같이 열하중 사이클이 반복됨에 따라 수축모드로 라체팅 변형이 반전된다는 점이다. 또한 흥미로운 것은 불연속 구조 시험모델의 가운데 평판 부분이 변형을 억제하는 stiffener 역할을 함에도 불구하고 반복 열하중 하에서 변형량이 오히려 증가했다는 사실이다. 이의 원인은 현재 불연속 구조물에 대한 비탄성 라체팅 변형해석을 수행하고 있어 이와 같은 현상의 발생원인이 규명되겠지만 불연속 부위 존재에 따른 이차 응력의 증가가 교번응력의 크기를 증가시키고 증가된 교번응력이 라체팅 변형량을 증가시킨 것으로 판단된다.

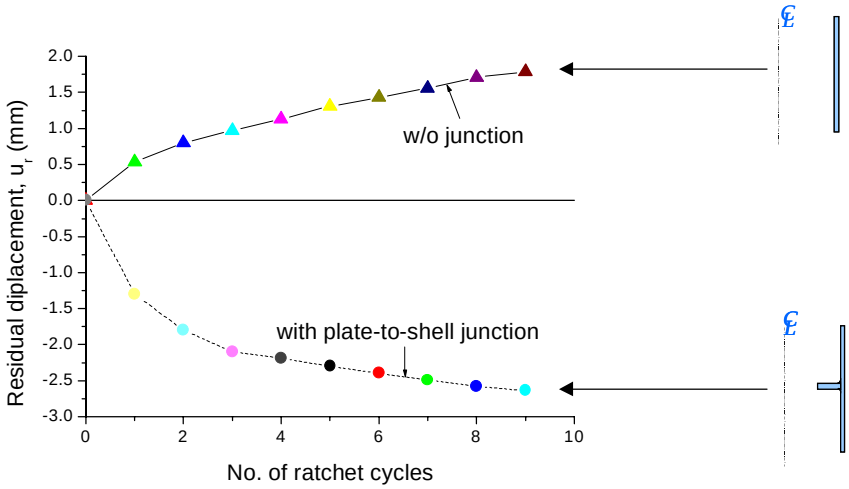


Fig. 11 Comparison of ratchet deformation for the smooth specimen and specimen with plate-to-shell junction

한편 불연속 원통 구조물의 가열구간을 15cm 로 한 경우와 10cm 로 줄인 경우에 대해 시험을 수한 결과는 Fig. 12 에서와 같이 가열구간이 15cm 인 경우가 변형량이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 그렇지만 변형모드는 모두 수축모두로 동일했다.

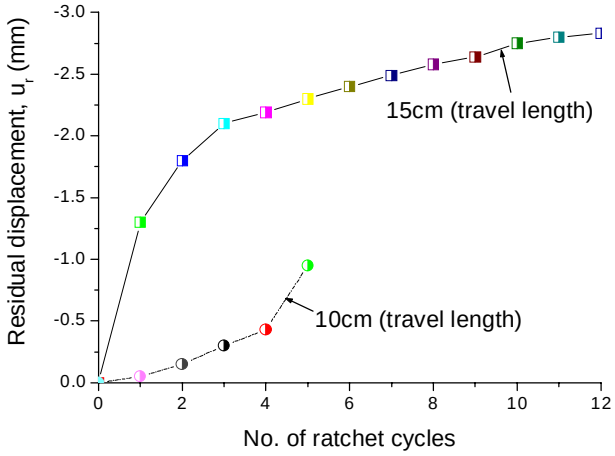


Fig. 12 Variation of the residual deformation for the cases of travel lengths of 10cm and 15cm

5. 결 론

본 연구에서는 평판-원통 접합 부위를 갖는 불연속 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 수행하고 이를 불연속 부위가 없는 smooth 원통 구조물의 시험결과와 비교 분석하였다.

급격한 온도구배가 축방향으로 이동함에 따른 온도 분포 측정을 위해 28 개의 열전대를 smooth 시험원통의 축방향으로 부착했고, 불연속 구조시험원통에 대해서는 24 개의 열전대를 축방향으로 나머지 4 개의 열전대는 평판 부위에 부착하여 천이온도데이터를 수집하고, 이 온도데이터는 구조해석에 활용하였다. 구조시편의 바깥에 설치된 유도코일을 이용하여 라체팅 열하중을 9 회에 걸쳐 반복적으로 가한 결과 smooth 원통시편에서는 사이클마다 점진적으로 잔류변위가 누적되어 원통의 하단으로부터 13cm 떨어진 부분에서 변형량이 최대 1.79mm 만큼 팽창모드로 잔류변위가 발생하는 것으로 나타났다. 반면 불연속 구조시험 원통에서는 불연속 접합부의 존재로 인해 라체팅 변형이 수축모드로 반전하여 누적되는 것으로 나타났으며 변형량도 9 사이클 기준으로 smooth 원통시편에 비해 약 45%가 증가하였다. 불연속 원통구조물에 부착되는 평판은 일차응력에서는 일종의 stiffener 역할을 하지만 열하중 환경에서는 불연속 부위로 인해 오히려 이차 응력을 증가시키고 이로 인해 교번응력도 증가시키는 것으로 분석되었다. 또한 불연속 구조시험 원통에서 가열구간이 용접되는 평판의 상하로 15cm 를 가열할 경우에는 10cm 를 가열할 경우에 비해 라체팅 변형이 약 2.3 배나 증가하여 가열구간이 증가하면 진행성 비탄성 변형량은 더욱 크게 증가하는 것으로 나타났다. Smooth 시험원통에 대한 비탄성 해석은 완료한 상태이며 현재 불연속 구조물에 대해 ABAQUS 를 이용한 비탄성 해석을 수행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] KALIMER 예비 개념설계 보고서, KAERI/ TR-1636, KAERI., 2000.

[2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NH, 2001.

[3] 이형연, 김종범, 유봉, “크리프-피로 하중 하에서 손상을 받은 304 및 316LN 스테인리스강 구조물의 손상평가,” 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 12 호, pp.2269~2277, 1998.

[4] 이형연, 김종범, 유봉, “액체금속로 고온배관의 미국 및 프랑스 설계지침을 따른 크리프-피로 손상평가,” 2001 년도 제 1 차 재료 및 파괴부문 학술대회, 대한기계학회, pp.178~184, 2001.

[5] 이형연, 김종범, 이재한, “316L 스테인리스강 원통 구조물의 열라체팅 변형시험 및 해석,” 대한기계학회, Vol. 26, No. 3, pp. 479-486, 2002

[6] Lee H.Y., Kim J.B, Lee J.H and Yoo B, “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.

[7] 윤삼손, 이순복, 김종범, 이형연, 유봉, “상태변수를 갖는 비탄성 구성식 적분법의 일반화,” 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권 제 5 호, pp.1075-1083, 2000.

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

[9] Wada,H., Otani,T., Fujioka,T., “The Ratcheting Evaluation Methods in Japanese Demonstration FBR Design,” *SMIRT 14, F04/2*, p.85-92, 1997.

[10] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III NB, 1998 edition, 2001.

[11] ABAQUS *Users manual*, Version 5.8, H.K.S, 2000.