

온도분포가 이동하는 액체금속로 원통용기의 열적 라체팅 해석

이형연, 김종범, 이재한, 구경희, 유봉
한국원자력연구소

곽대영, 임용택
한국과학기술원

요 약

본 연구에서는 고온의 천이 열하중을 받는 304 SS 재질의 액체금속로 원통용기에 대하여 진행성 변형기구인 열적 라체팅(thermal ratcheting) 변형거동을 해석하였다. 재료의 반복 소성을 나타내는 구성식으로서 Chaboche 모델을 이용하였으며 이 모델의 적용을 위하여 ABAQUS의 사용자 프로그램을 개발하였다. 열천이 과정이 반복되는 동안에 축방향의 온도분포 이동에 따른 탄소성 해석을 수행한 결과 소성변형이 각 사이클마다 누적되어 점진적 변형이 일어났으며 이 해석결과를 시험치와 비교함으로써 해석의 타당성을 검토하였다. 반복 소성거동에 대한 Chaboche 모델을 이용하면 천이 열하중을 받는 304 SS 재질의 고온구조물에 대하여 라체팅 거동을 정량적으로 평가할 수 있는 것으로 나타났다.

1. 서 론

일반적으로 액체금속로의 운전압력은 1~10 기압, 운전온도는 500~550°C로 저압 고온상태에서 운전되며, 원자로 출입구 온도차가 약 150°C 정도로 경수로의 30°C 정도에 비하여 월등히 높으므로 경수로에 비해 매우 높은 이차응력을 받게 된다. 스테인레스강이 반복 이차응력을 받으면 각 하중 사이클에서 마다 거의 비슷한 양의 변형량이 지속적으로 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation)이 발생할 수 있다[1,2]. 일차응력은 항복응력 이하로 제한되므로 구조물의 불연속성으로 인한 소성변형이 부분적으로 생기더라도 계속 누적되는 형태의 진행성 변형을 일으키지는 않지만 열응력과 같은 이차응력이 반복될 경우 점진적으로 변형이 누적될 수 있다

액체금속로와 같이 이차응력의 변동이 클 경우 기존의 고전 모델은 반복 하중이 작용하는 경우에 실제의 재료거동과는 큰 차이를 보이기 때문에 해외에서는 비탄성해석을 위한 구성방정식(constitutive equation) 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 고온환경에서 일반적으로 사용될 수 있는 비탄성 구성방정식의 개발은 사실상 불가능하며 특정용도에 활용하기 위한 새로운 구성방정식의 개발 및 이의 적용을 위한 프로그램의 개발에도 많은 시간과 노력이 요구된다.

열적 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기시킬 수 있으므로 미국[2], 프랑스[3], 일본[4] 등은 각국의 액체금속로 설계관련 코드에서 열적 라체팅에 대한 설계지침을 제시하고 있다. 그러나 이는 일차 및 이차응력이 동시에 작용하는 경우에 대한 지침이며 열하중만이 작용하는 경우에 대한 지침은 아직 연구 개발 중에 있다.

2. Chaboche 구성방정식

비탄성 변형에 대한 Chaboche 모델[5]은 항복 조건식을 갖는 대표적인 통합 점소성 모델로서 동적 특성을 갖는 내부 변수들을 도입하여 재료의 시간에 따른 내부이력을 표현한다. 통합 점소성 구성식의 일반적인 지배방정식[5]에 기초한 Chaboche 통합 점소성 구성방정식은 다음과 같다.

$$\text{유동응력식} \quad : \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^p = f(J_2(\Sigma_{ij}), \kappa, T) \Sigma_{ij}^{\prime}$$

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

$$\Sigma_{ij}^{\prime} = \sigma_{ij}^{\prime} - \alpha_{ij}^{\prime}, \quad J_2(\Sigma_{ij}) = \frac{1}{2} \Sigma_{ij}^{\prime} \Sigma_{ij}^{\prime}$$

$$\text{내부변수 지배방정식} \quad : \quad \dot{\alpha}_{ij}^{\prime} = h(\sigma_{kl}^{\prime}, \alpha_{kl}^{\prime}, \kappa, \varepsilon_{kl}, p, T) \varepsilon_{ij}^p - r(\sigma_{kl}^{\prime}, \alpha_{kl}^{\prime}, \kappa, \varepsilon_{kl}, p, T) \alpha_{ij}^{\prime},$$

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

$$\kappa = \Gamma(p, T) p + \Theta(p, T) T, \quad \Gamma = b(Q - \kappa).$$

여기서 $\sigma_{ij}^{\prime}, \kappa$ 및 α_{ij}^{\prime} 는 각각 편차응력 텐서, 등방경화응력(drag stress) 및 편차 이동경화응력 텐서(deviatoric back stress tensor)를 나타내며, K, n, C, γ, b, Q, k 등은 온도에 따른 재료의 상수들이다.

3. 라체팅 해석

3.1 하중조건

그림 1 과 같은 형상의 원통이 초기에 550°C 를 유지한다. 시간 $t=0$ 에서 원통의 바닥이 350°C 인 소디움 풀에 닿으며, 계속적으로 40 mm/min 의 속도로 풀에 잠긴다. 원통이 높이 0.25m 인 A 점까지 잠기면 이제는 반대로 원통을 80 mm/min 의 속도로 들어 올린다. 원통이 전부 빠져 나오면 550°C 의 대기중에서 1 분간 가열한다. 본 연구에서는 이와 같은 방식의 냉각-가열의 반복 열하중을 10 번에 걸쳐 가한다.

3.2 해석 모델링

노심지지 원통은 그림 1 에서와 같이 외경 0.77m, 두께 2 cm, 높이 0.38m 이다[6,7]. 해석모델은

노심지지 원통은 그림 1에서와 같이 외경 0.77m, 두께 2 cm, 높이 0.38m 이다[6,7]. 해석모델은 축대칭 8 절점의 272 개 요소와 961 개 절점으로 구성되어 있다. 온도해석과 응력해석에 대하여 각각 ABAQUS 의 DCAX8 요소와 CAX8R 요소를 사용하였다. 소듐이 잠기는 원통의 A 점 이하 부분에서는 심한 반복 열응력을 받게 되며 그림 1의 A 점 높이와 B 점 높이에서 비교적 큰 열하중을 받게 된다. 여기서 고온 열하중의 작용시간이 비교적 짧으므로 크립영향은 무시하고 비탄성 변형은 재료의 소성변형에 기인한 것으로 가정하였다.

3.3 열응력 해석

그림 1의 A 점 이하에 있는 요소들은 지속적으로 주위의 용적온도 및 열전달 계수가 시간에 따라 바뀌는 과정을 겪게 된다. 본 해석에서는 원통의 내,외면 용적온도와 열전달 계수의 시간에 따른 변화를 고려하였다. 여기서는 열관성을 무시한 비연계 해석(uncoupled analysis)법을 따라 천이 열전달 해석을 먼저 수행한 다음 탄소성 응력해석을 수행하였다.

4. 해석결과

4.1 온도분포

그림 2는 원통 바닥에서 냉각 - 가열이 10 회 반복되는 동안의 시간에 따른 온도이력을 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 바닥면은 368.2°C ~ 550°C 사이에서 같은 형태의 열하중이 반복적으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

4.2 열적 라체팅에 의한 변형거동

그림 3은 첫번째 냉각이 완료되는 t=375 초에서 원통의 반경방향 수축된 변형도를 보여주고 있다. 이 변형도는 80 배 과장된 것으로서 실제의 최대 반경방향 수축변위는 원통의 외부표면 하부에서 0.86mm 로 나타났다. 10 번째 되풀이가 완료되는 t=6225 초에서 원통의 변형도는 냉각후 아르곤 가스 대기중에서 충분히 가열되므로 원통이 반경방향으로 그림 4에서와 같이 팽창되었고, 이 때의 Mises 응력은 그림 5에서와 같이 원통의 내,외부 표면에서 비교적 크게 나타났다.

또한 그림 6은 9 번 요소인 바닥면으로부터 위로 세번째 표면요소에서 원주방향의 응력-변형률 이력을 나타내는 그림으로서 이력곡선의 중심이 열하중의 반복에 따라 왼쪽으로 점진적 이동을 하는 것을 알 수 있다. 여기서 변형률은 기계적 변형률이다. 이 그림은 다축응력의 경우로서 열적 라체팅 현상을 특징적으로 잘 보여주고 있다. 또한 열하중이 반복됨에 따라 원통바닥면의 반경방향 변위는 그림 7과 같이 일정한 형태를 반복하며 점차 변형이 누적되어 감을 알 수 있다. 그림 8은 이상의 해석결과와 시험결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Chaboche 모델

을 이용한 탄소성 해석결과가 시험치와 비교적 잘 맞고 있는 것을 알 수 있다. 재료의 비탄성 변형에 대하여 Chaboche 모델 대신 고전적 이동경화(kinematic hardening)모델을 이용하여 열적 라체팅 해석을 수행하면 바닥면에서 열하중의 반복에 따른 반경방향 변형이 누적되지 않고 일정한 범위 내에서 진동하는 것으로 나타났다. 즉 고전 모델은 시험적 측정결과와 완전히 다른 양상을 보인다. 따라서 반복 이차응력을 받는 304 SS 재질의 열응력 해석에 대해서는 본 연구에서 적용한 Chaboche 모델 및 ABAQUS 사용자 프로그램의 거동이 실제에 가깝게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 반복열하중에 따른 304 SS 원통용기의 점진적 영구변형 거동인 라체트 거동을 해석하기 위하여 탄소성 거동을 잘 묘사하는 것으로 알려진 Chaboche 구성식 모델을 적용하였다. 또한 일반 고온구조물에 이 모델을 적용하기 위하여 ABAQUS의 사용자 프로그램을 개발하였다. 이를 이용하면 열적 라체트 거동 및 크립-피로거동을 기존의 모델에 비하여 더욱 실제에 가깝게 묘사할 수가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 또한 해석치와 시험치를 비교하여 해석의 타당성을 검토하였다.

추방향으로 온도분포가 움직이는 원통에 대하여 해석을 수행한 결과 비교적 큰 열하중을 받는 원통의 하부에서 매 사이클마다 잔류 열변형이 지속적으로 누적되므로 치수 불안정성에 의한 기능상실을 초래할 수 있다. 이와 같이 열하중이 크게 걸리는 고온구조물의 설계에서는 변형이 주요 인자인 것으로 나타났다. 그러므로 304 SS와 같이 가공경화를 겪는 재료가 고온 조건하에 있는 경우에는 운전 수명기간 동안 반복 열하중에 따른 누적 변형량이 허용치 이내가 되도록 설계가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III NB, 1992 edition
2. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-47-29, 1992 edition
3. RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000, AFCEN, 1985.
4. 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
5. J.Lemaitre and J-L. Chaboche, Mechanics of solid materials, Cambridge university press, 1990.
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.

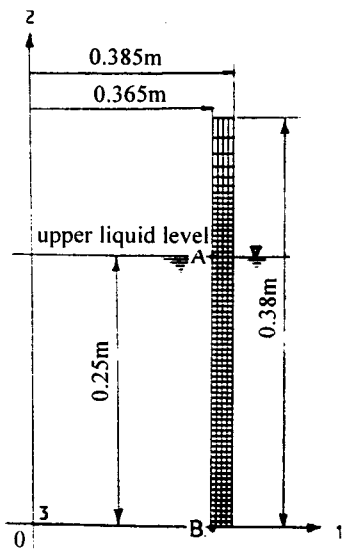


Fig. 1 Finite element model

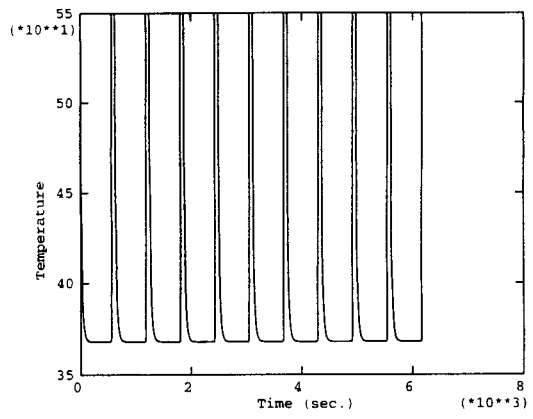


Fig. 2. Temperature history at bottom of the cylinder

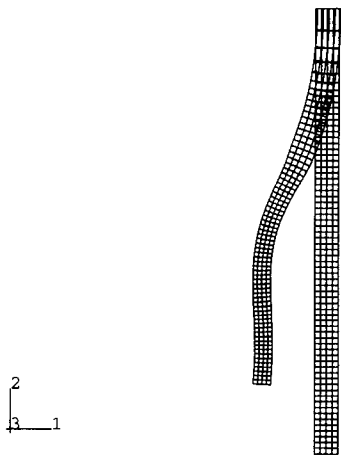


Fig. 3. Deformed profile after 1st cooling

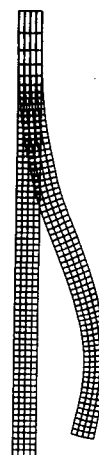


Fig. 4. Deformed profile after 10 cycles

