2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로에서의 진행성 열좌굴 현상에 대한 해석적 규명

Analytical Identification of the Progressive Thermal Buckling Behavior in LMR

구경회, 이재한

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문의 목적은 고온소듐 자유액면을 갖는 액체금속로 원자로구조물에 있어서 주기적으로 반복되는 고온 자유액면의 상하 이동성 고온 열천이하중에 대해 라체팅 거동과 함께 점진적으로 발생할 수 있는 진행성 열좌굴 거동에 대한 해석적 규명을 기술하기 위한 것이다. 이를 위하여 ANSYS에서 제공하는 비선형 재료모델인 Chaboche 모델을 사용한 상세 열좌굴 해석기술을 정립하고 자유끝단을 갖는 원통형 구조물에 대해 주기적 이동성 고온 열하중을 가정하고 진행성 열좌굴 발생기구를 해석적으로 규명하였다. 또한 진행성 열좌굴 거동에 영향을 줄 수 있는 각종 인자들에 대한 상세 민감도해석을 수행하고 그 결과들을 기술하였다.

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to describe the analytical identification of the progressive thermal buckling behavior based on the thermal ratcheting in the LMR structures subjecting the moving elevated temperature cycles occurring near the hot pool free surface. To do this, the constitutive equations of the Chaboche, which is provided by ANSYS, was used for a nonlinear material behavior model and the overall procedure for the progressive thermal buckling analysis was established. Using the established procedures, the progressive thermal buckling behavior was analytically identified for the cylindrical shell structure having the free edge and the assumed moving elevated temperature cycles. And the results of the detail sensitivity analyses for the effective factors affecting the progressive thermal buckling behavior were described in this paper.

1. 서 론

일반적으로 액체금속로(Liquid Metal Fast Breed Reactor)는 기존의 경수로와는 달리 500^{o}C 이상의 고온과 대기압 수준의 매우 낮은 운전압력을 갖도록 설계된다. 현재 국내에서 개발중인 KALIMER (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 액체금속 원자로는 소듐을 냉각재로 사용하는 150MWe급으로 정상상태 출력조건에서 노심출구에서의 일차소듐냉각재 온도가 530^{o}C로 설계되는 매우 높은 고온 운전조건을 가지고 있다[1].

원자로내의 일차소듐냉각재는 원자로 정지 및 기동운전 또는 노심온도가 상승하는

가상 운전시에 팽창 또는 수축을 하며 이로 인하여 고온풀의 냉각재 자유표면이 상하로 이동하게 되고 따라서 원자로용기를 보호하고 있는 배플구조물의 열적 경계조건들을 변화시키게 된다[2,3]. 특히 사고운전시에 작동되는 피동안전 잔열제거계통 PSDRS (Passive Safety Decay Heat Removal System)의 운전은 원자로 정지후 중간열전달계통의 기능상실로 인해 일차냉각재의 온도가 높아지면서 점차 팽창하여 원자로배플 끝단에서 넘치는 운전조건이 된다. 이러한 PSDRS 운전이 반복되면 고온풀의 자유액면이 이동한 부위에 라체팅 변형이 발생하게 되며 이러한 누적되는 라체팅 변형으로 인해 원통형 실린더인 원자로배플 상단 끝이 점차 소성응력 상태에 가까워지면 비대칭 형상결함과 유사한 비대칭 라체팅 변형이 발생하다가 이후 갑자기 변형이 급격히 증가하는 진행성 열좌굴이 발생할 수 있다[4].

본 연구에서는 ANSYS 7.1[5]에서 제공하는 통합소성거동모델인 Chaboche모델과 등방경화모델을 사용하여 주기적 이동성 고온 열하중을 받는 원통형 실린더에 대한 진행성 열좌굴 해석기술을 정립하고 이를 이용하여 열좌굴 발생기구를 규명하였다.

2. 재료 비선형 해석모델

진행성 열좌굴 해석을 위해서는 재료의 비선형 거동을 모사할 수 있는 재료비선형 모델의 선택이 매우 중요하다. 진행성 열좌굴 해석은 기본적으로 반복 이동성 열하중에 의한 비탄성 변형의 누적인 열라체팅(Thermal ratcheting) 해석에 달려있으므로 열라체팅 거동을 적절히 모사할 수 있는 비선형 재료 구성방정식을 사용해야 한다. 실제로 대부분의 금속재료들은 하중이 반복되면 어느 횟수까지는 경화(Hardening) 또는 완화(Softening)하다가 최종적으로 안정화 되든지 또는 항복면 크기가 변하지 않게 되지만 반복 이동성 열하중 하에서는 재료거동이 안정된 후에도 열라체팅 변형이 계속적으로 발생하여 누적된다. 따라서 진행성 열좌굴 해석을 위해서는 이러한 복잡한 소성거동 현상 모사에 적합한 새로운 이동경화모델과 등방경화모델 합친 통합모델을 사용해야 한다.

현재 널리 사용되는 등방경화모델(Isotropic hardening model)은 Von Mises 항복기준을 사용하며 항복면의 초기 중심선의 변화는 없으나 반복하중에 따라서 항복면의 크기가 팽창하는 법칙을 따른다. 따라서 이 모델은 대변형 해석에는 적합하지만 라체팅 거동과 같이 항복면의 중심선이 이동하는 진행성 변형률 해석에는 적합하지 못하다.

또한 일반적으로 사용되는 기본적인 이동경화모델(Kinematic hardening model)은 항복응력의 절대크기가 인장압축이 반복됨에 따라서 초기 항복응력보다 작아지는 Bauschinger 효과를 묘사할 수 있고 항복면의 진행성 이동 등을 묘사할 수 있으나 항복면의 크기가 항상 일정하다는 법칙을 따른다. 따라서 초기 반복 하중에 의한 소변형 해석에는 적합하나 반복하중횟수가 많고 심한 라체팅 거동이 예상되는 대변형 문제에는 적합하지 못하다.

본 연구에 적합한 대변형 진행성 열좌굴 해석을 위해서는 초기 재료의 등방경화 모델과 계속되는 반복 하중에 따른 대변형 진행성 이동경화모델을 모두 고려할 수 있는 재료 비선형 모델이 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 주기적 변형률 증분을 갖는 대변형 라체팅 해석에 적합한 것으로 잘 알려진 ANSYS에서 제공하는 Chaboche 모델[6]을

사용하였다. Chaboche 모델은 1966년 Armstrong과 Frederick이 제안한 기본적인 이동경화모델(Armstrong and Frederick Hardening Rule)들을 그림 1과 같이 선형적으로 조합하여 대변형 이동경화모델을 가능하게 한 것이다. 보다 정확한 Chaboche 이동경화모델을 사용하기 위해서는 보다 많은 선형조합 성분들을 고려해야 하지만 이 경우 결정해야 할 재료상수들이 많아지게 되는 단점이 있다. 본 연구에서는 2개의 조합성분을 사용하는 2-decomposed nonlinear kinematic hardening rule의 Chaboche 이동경화모델에 대해 Fortunier 등이 제공한 재료상수들[7]을 사용하였으며 이중선형 등방경화모델을 사용하였다.

3. 고온 진행성 열좌굴 발생기구 규명

진행성 열좌굴은 일종의 비대칭 라체팅거동으로 인해 발생하며 자유끝단을 부위에서 고온의 자유액면 부위가 위아래로 이동하는 원통형 실린더 구조물에서 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 고온 냉각재를 담고 있는 자유액면 부위의 열하중 환경은 자유액면 부위에서 급격한 축방향 온도구배를 야기시키며 그림 1에서와 같이 축방향 온도구배의 이동방향에 따라서 Hot front condition 또는 Cold front condition으로 구분된다. 알려진 연구결과에 의하면 고온 진행성 열좌굴은 고온 자유액면이 자유끝단 쪽으로 상승하는 Hot front condition에서만 발생하는 것으로 알려져 있다[4].

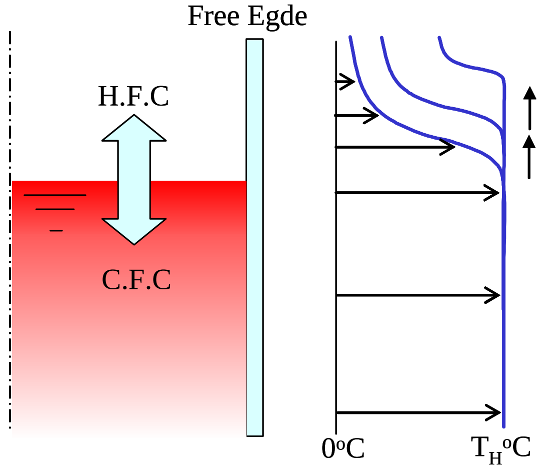


그림 1. 고온 열원의 이동방향 및 온도구배

기본적으로 진행성 열좌굴은 주기적 반복 열하중에 의하여 누적되는 열라체팅(Thermal ratcheting) 변형률에 기인한다. 이러한 열라체팅 변형률은 초기형상결함의 영향을 거의 받지 않기 때문에 본 연구에서 사용한 해석모델에는 초기형상결함이 없는 것으로 가정하였다.

3.1 해석모델 개요

그림 2는 실제로 자유액면을 갖는 액체금속원자로 내부구조물에서 발생할 수 있는 주기적 이동성 고온 열하중을 묘사하기 위한 모델(일반적으로 사용되는 열라체팅 구조시험장치)로서 그림에서와 같이 일정지점에서 고온열원을 발생시키고 열원의 하단부위는 가열부위를 급냉시키기 위한 냉각수가 있는 것으로 가정하였다. 원통구조물을 상단으로 끌어 올리면 가열된 원통부위는 냉각수와 접하게 되고 자유끝단 방향으로 고온 자유액면이 이동하는 Hot front condition이 된다.

그림 3은 해석에 사용된 원통구조물의 제원과 열원의 두께에 대한 정보를 나타낸 것이다. 그림에서 원통의 제원은 직경 60cm, 길이 40cm, 두께 0.8mm이며 재질은 316L이다. 해석에서 가정한 열원의 온도는 600°C이며 두께는 1cm이다. 열원의 이동거리는 고정경계에서 25cm 떨어진 위치에서부터 자유액면까지 최대 15cm로 하였다.

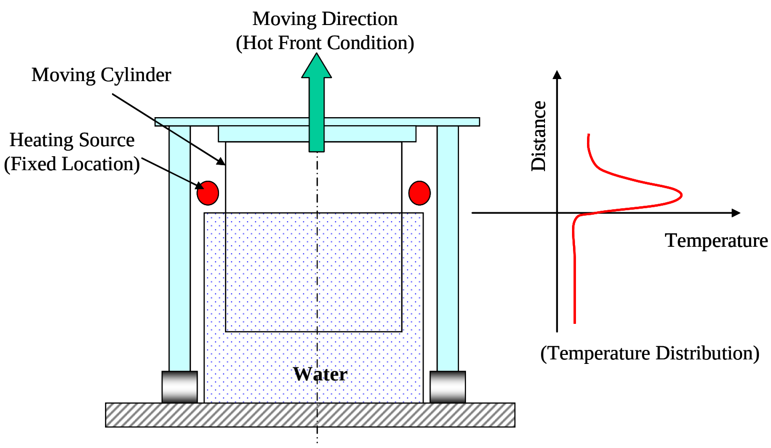


그림 2. 진행성 열좌굴 발생기구 규명을 위한 해석모델 개요

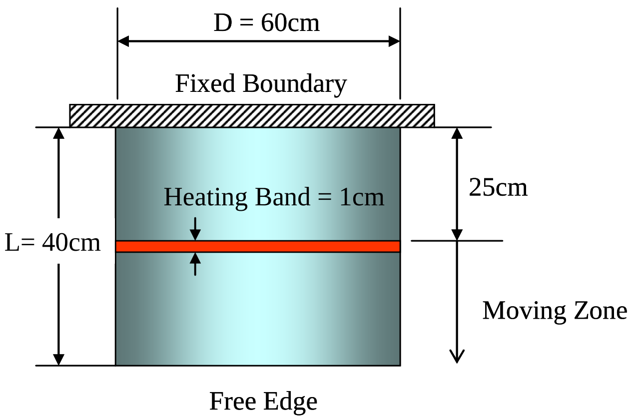


그림 3. 해석모델 제원

3.2 주기적 이동성 열하중 정의

해석에 정의된 주기하중은 먼저 실온(21°C)에서 초기 열원의 위치에서 600°C로 열원부위가 정상상태 온도분포에 도달할 때까지 가열되었다가 열원이 최종 이동거리만큼 원통구조물 끝단 쪽으로 이동한 후 다시 열원이 제거되고 원통구조물이 다시 실온으로 되돌아가는 과정을 하나의 주기하중으로 정의하였다. 이때 열원의 주기당 이동시간은 총 2400sec로 하였으며 따라서 끝단 까지를 이동거리로 할 경우에 이동속도는 6.25E-3 cm/s가 된다.

3.3 진행성 열좌굴 수치해석 및 결과

3.3.1 No-Overflow 조건의 경우

자유액면이 원통형 실린더 끝단까지 도달하지 않는 No-overflow 조건의 경우에 대한 해석을 수행하여 진행성 열좌굴 발생가능성을 평가하였다. 이를 위하여 열원의 최대 이동거리를 자유끝단으로 부터 3cm 아래인 12cm로 가정하고 해석을 수행하였다.

그림 4는 한 주기 동안의 이동성 열하중 발생과정에 대하여 천이 온도분포해석을 수행하고 각 시간대에서 구한 축방향 온도분포 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 초기 600 °C 열원의 정상상태 온도분포에서부터 점차 열원이 원통형 구조물 끝단으로 이동함에 따라서 이동 열원주위에 매우 큰 축방향 온도구배가 나타남을 알 수 있다.

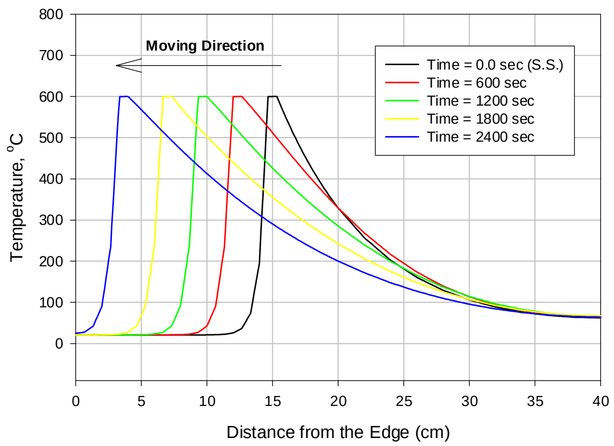


그림 4. 이동성 열원분포 해석결과 (No-Overflow 조건)

그림 5는 임의 시간대에서 열원주위에 나타나는 응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열원의 앞 부위에서는 인장응력이 발생하고 이어서 뒤쪽으로 압축응력이 발생하는 전형적인 열라체팅 발생조건을 나타낸다. 따라서 본 연구에서 정의한 열적 이동성 온도경계조건들은 열라체팅을 발생시킬 수 있는 조건으로서 열라체팅 발생과 함께 진행성 열좌굴의 발생기구를 해석적으로 규명할 수 있는 좋은 적용 예가 될 수 있다.

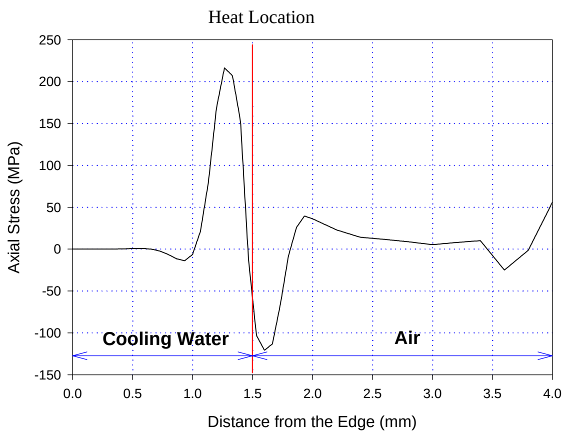


그림 5. 축방향 응력분포도

그림 6은 30회 반복 열하중 때까지 적용한 누적 잔류변위 분포 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 매 반복 주기마다 일정량의 라체팅 변형이 열원의 이동영역 내에서 점차적으로 누적되어 나타남을 알 수 있다. 그러나 열원이동 영역이 아닌 구조물의 끝단 부위는 계속되는

반복하중에도 불구하고 소성변형에 저항하는 거동을 나타내며 이러한 끝단부위의 소성변형 저항력은 주기적 이동성 열하중이 지속되더라도 원통형 구조물에서 갑작스러운 대변형 열좌굴이 발생하는 것을 억제하는 역할을 하게 된다.

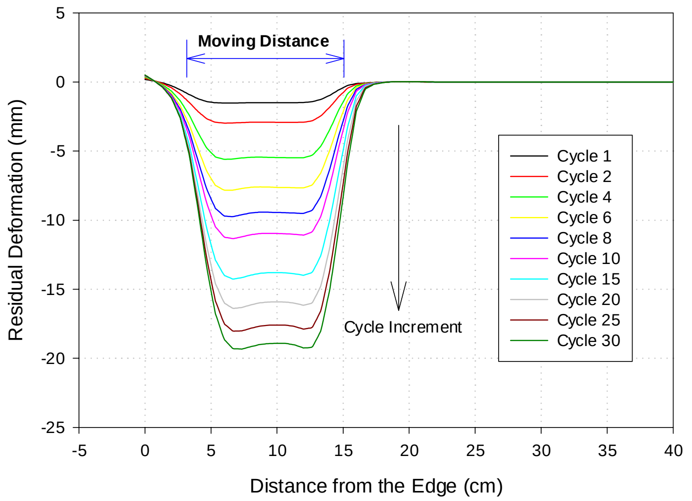


그림 6. 축방향 누적잔류변형 분포 해석결과 (No-Overflow 조건)

그림 7은 90번째 하중주기 후의 잔류변위 형상을 나타낸 것으로 그림에서와 같이 누적변형 부위에 비대칭 라체팅 변형이 나타남을 알 수 있다. 그림 8은 반복회수 대비 축방향 잔류변위 분포 해석결과를 나타낸 것으로 약 70회부터 누적 변형량의 증가가 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있으며 이때부터 초기형상결함과도 같은 비대칭 라체팅 변형이 발생함을 알 수 있다. 그러나 이러한 비대칭 라체팅 변형의 발생은 반복 열하중의 회수가 증가할수록 그림 9와 같이 원주둘레를 따라서 조금씩 커지지만 100회가 지나도 대변형 열좌굴로 이어지지는 않는다. 이러한 이유는 앞서 기술한 바와 같이 구조물의 자유끝단이 탄성거동을 함으로서 소성변형에 저항하여 구조물 전체가 대변형으로 이어지는 것을 억제하기 때문이다. 그림 10은 1번째 하중주기 후, 10번째 하중주기 후, 그리고 30번째 하중주기 후에 대한 잔류응력 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열원의 이동구간에서는 반복 열하중의 회수가 증가할수록 항복응력인 200MPa을 훨씬 초과하는 소성응력이 발생하지만 구조물의 끝단 부위는 항복응력 이하로서 탄성거동을 함을 알 수 있다.

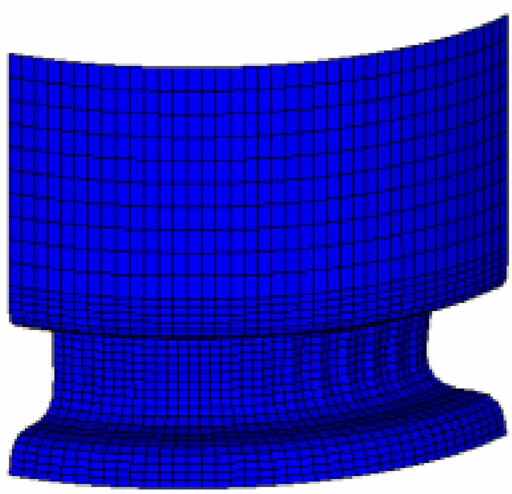


그림 7. 90번째 하중주기 후의 잔류변형 형상

결론적으로 원통형 구조물의 끝단 부위가 소성거동을 하지 않을 경우에는 주기적 이동성 고온 열하중의 회수가 증가하더라도 미소량의 비대칭 라체팅 변형과 함께 누적 잔류변형은 발생할 수 있으나 진행성 열좌굴과 같은 갑작스러운 대변형은 발생하기 어려운 것으로 나타났다.

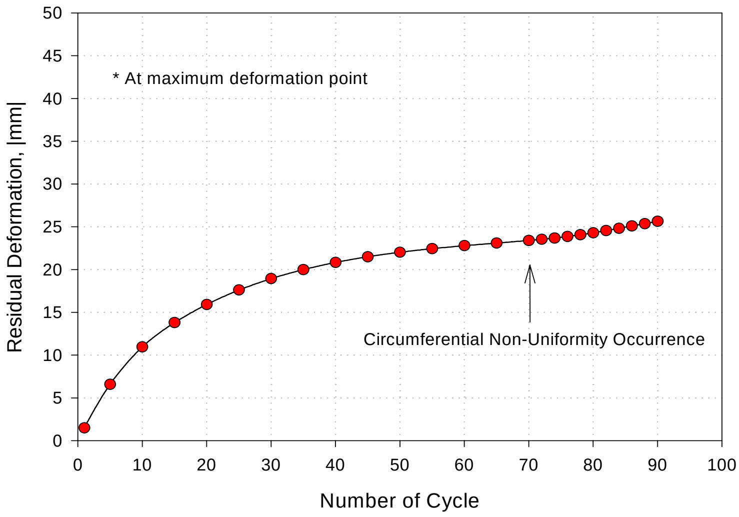


그림 8. 축방향 잔류변형 분포 해석결과

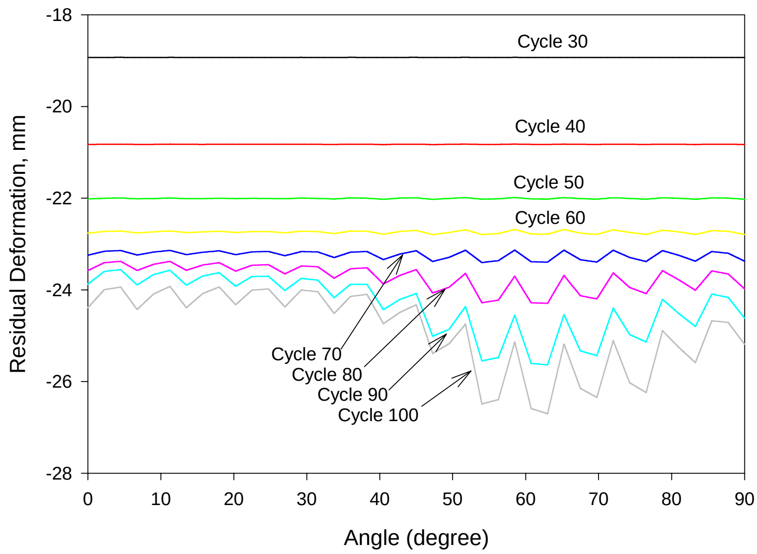
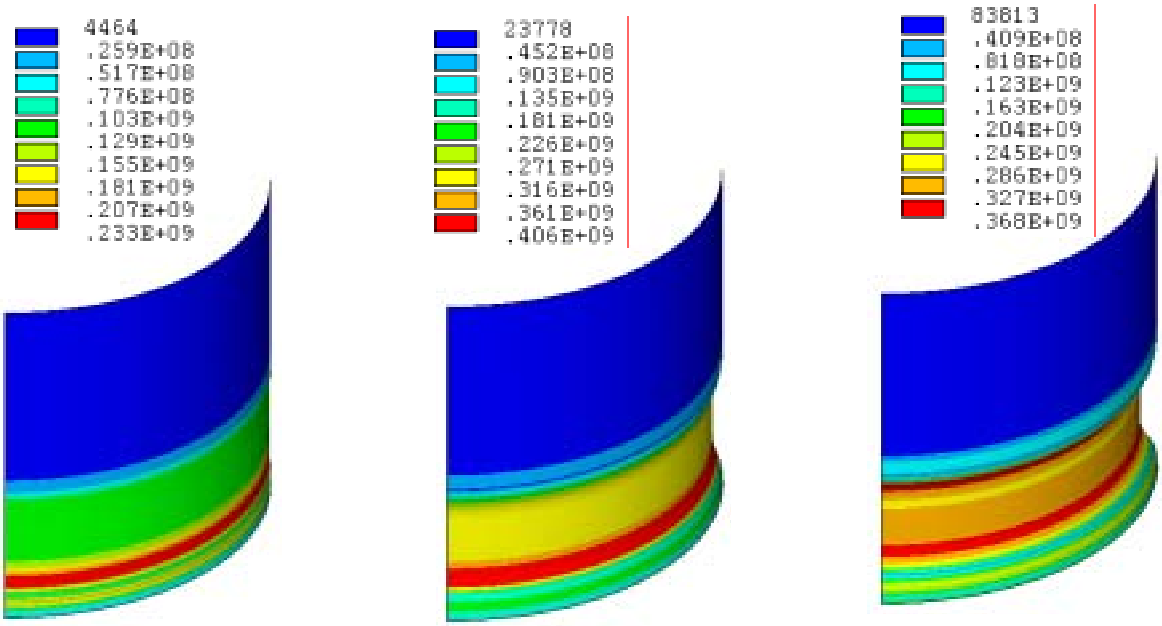


그림 9. 원주방향 잔류변위 해석결과



Cycle 1 Cycle 10 Cycle 30

그림 10. 잔류응력 분포 (No-Overflow 조건)

3.3.2 Overflow 조건의 경우

자유액면이 원통형 실린더 끝단까지 도달하는 Overflow 조건의 경우에 대한 해석을 수행하여 진행성 열좌굴 발생가능성을 평가하였다. 이를 위하여 열원의 최대 이동거리를 자유끝단까지인 15cm로 가정하고 기타 모든 조건들은 앞의 No-overflow 조건 동일한 가정하에서 해석평가를 수행하였다.

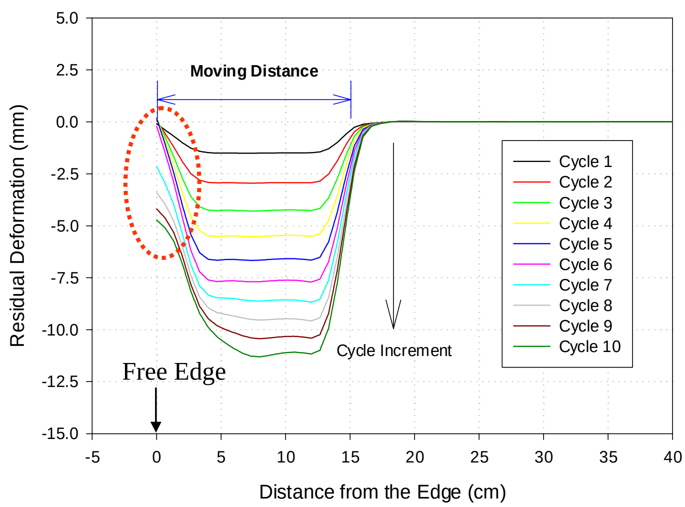


그림 11. 축방향 누적잔류변형 분포 해석결과 (Overflow 조건)

그림 11은 열하중의 각 주기 후에 발생하는 축방향 잔류변위 분포 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 초기 6번째 하중주기 때 까지는 각 반복하중 후에 일정량의 잔류변형이 누적되어 오다가 7번째 하중주기 후부터는 구조물 끝단 부위에서 갑자기 심각한 진행성 열좌굴인 대변형이 발생하여 횟수가 반복될수록 구조물 전체가 크게 변형됨을 알 수 있다.

그림 12는 원주방향을 따라서 각 반복하중 후의 잔류변형 분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 5번째 하중주기 이하까지는 순수 라체팅 변형과 함께 Microscopic한 원주방향 비균일 변형이 발생하며 6번째 하중주기 후에는 이러한 Microscopic한 비균일 변형이 성장하여 원주방향으로의 비대칭 라체팅 변형을 의미하는 확연한 크기의 조화 파동형상의 누적변형이 발생함을 알 수 있고 7번째 하중주기 후부터는 원주방향으로 조화파동 형상의 비대칭 대변형 진행성 열좌굴이 발생함을 알 수 있다.

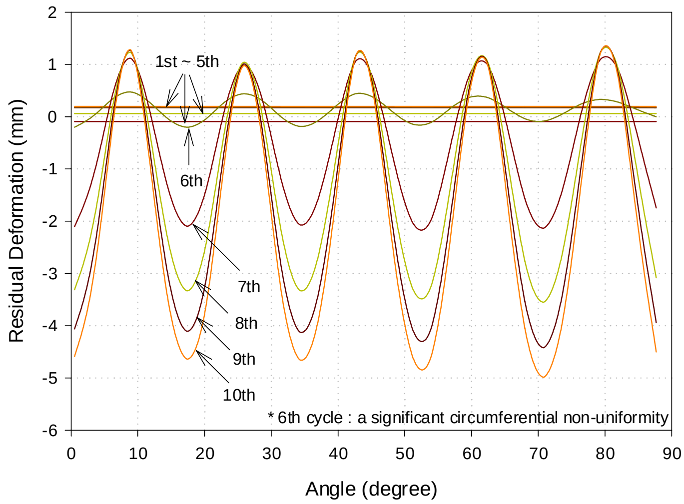
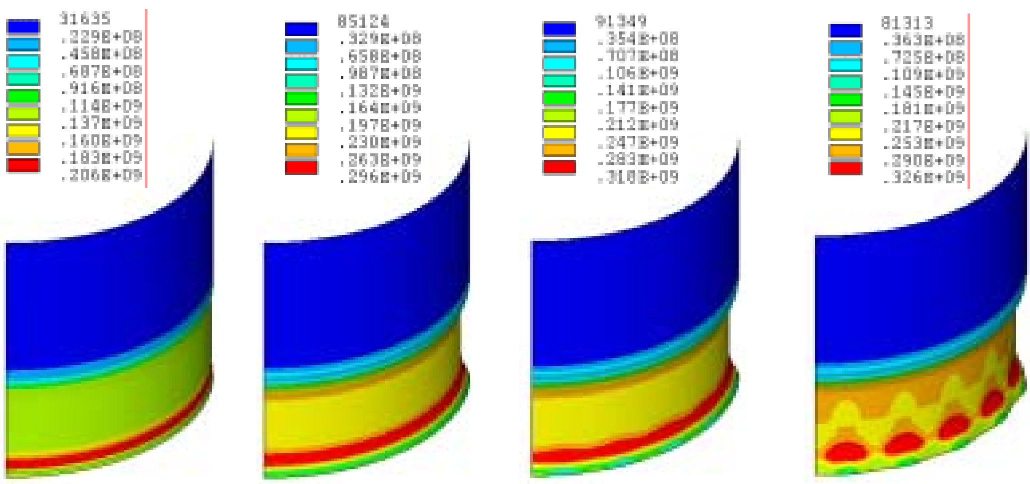


그림 12. 원주방향 잔류변형 분포 (Overflow 조건)

그림 13은 각 하중주기 후에 나타나는 잔류응력분포를 나타낸 것이며 그림 14는 잔류변형 형상을 나타낸 것이다.



Cycle 1 Cycle 5 Cycle 6 Cycle 7

그림 13. 잔류응력 분포 (Overflow 조건)

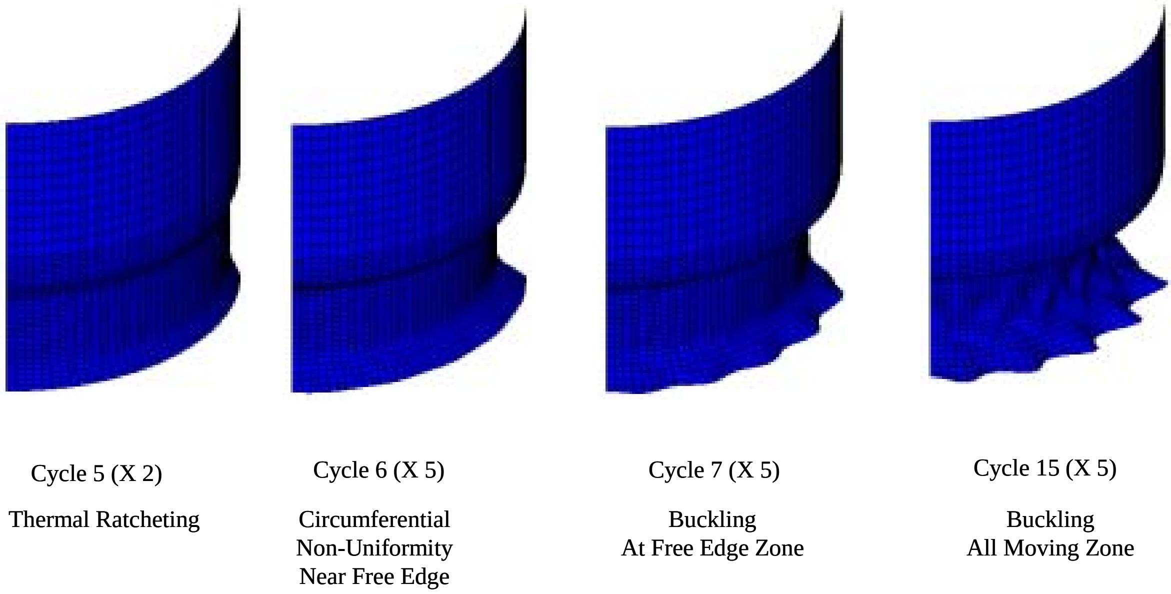


그림 14. 잔류변형 형상 (Overflow 조건)

그림 15는 등방경화모델에 사용되는 Tangent modulus, E_T 값이 진행성 열좌굴 거동에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 그림에서와 같이 K=0인 경우(Elastic-perfect plastic), 즉 변형률 경화가 없는 경우에는 각 하중주기마다 누적되는 변형률의 크기가 거의 일정하며 가공경화가 존재하는 경우에 비하여 누적되는 변형률의 크기가 큼에도 불구하고 진행성 열좌굴의 발생 하중주기 횟수는 늘어나는 것으로 나타났다.

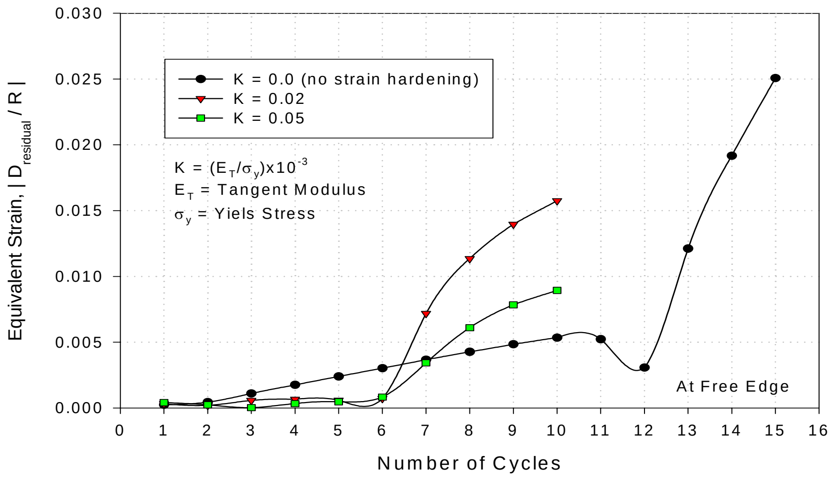


그림 15. Tangent Modulus에 대한 민감도 해석결과

열원의 이동이 자유끝단에 접근하는 정도에 따라서 진행성 열좌굴 발생에 미치는 영향을 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 그림 16은 자유끝단 부위(Y=0)에서의 해석결과를 나타낸 것으로 끝단에서 15mm 이상의 잔류부위가 있는 경우에는 진행성

열좌굴이 발생하기 어려우며 이보다 작은 경우에는 10번째 하중주기 후에 끝단 부위에 심각한 열좌굴이 발생하는 것으로 나타났다. 그림 17은 끝단으로부터 100mm 떨어진 위치에서의 해석결과를 나타낸 것이다.

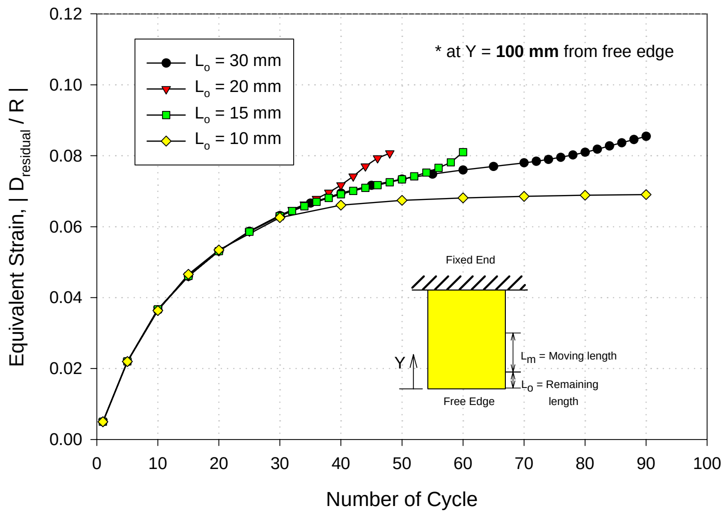


그림 25. 열원의 이동거리에 따른 영향 (at Y=0)

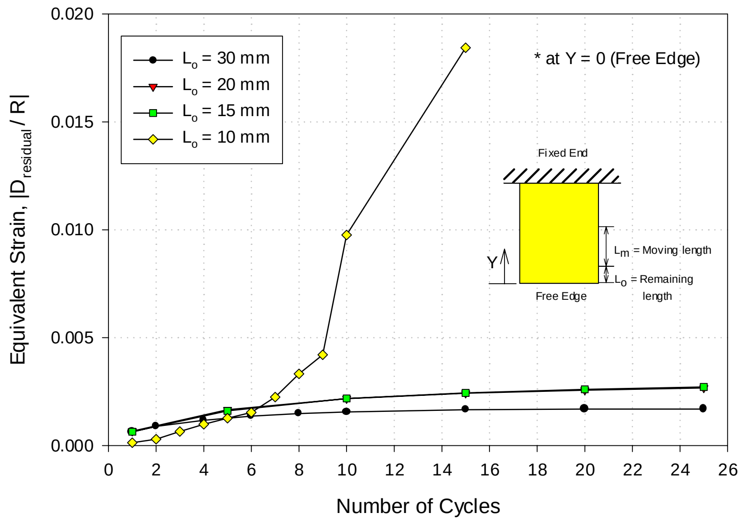


그림 26. 열원의 이동거리에 따른 영향 (at Y=100mm)

해석결과들로 부터 열원이 자유끝단에 접근하는 Overflow 조건의 경우에는 자유끝단 부위에서의 진행성 열좌굴이 발생할 가능성이 매우 크지만 열원의 이동구간이 끝단으로 부터 어느 정도 떨어져 있는 No-Overflow 조건이 되면 주기적 이동성 고온 열하중에 의한 심각한 진행성 열좌굴의 발생을 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 실제로 열하중에

의한 좌굴의 발생은 변위제어 좌굴특성을 나타내기 때문에 하중제어 좌굴과는 달리 진행성 열좌굴의 발생으로 인해 급격한 구조물 불안정성이 나타나지는 않는다.

4.0 결 론

비선형 수치해석을 이용한 진행성 열좌굴 발생기구 규명에 대한 연구결과로부터 주기적 이동성 고온 열하중을 받는 원자로구조물에서 진행성 열좌굴이 발생하는 과정을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1단계 : 이동성 고온 열하중의 반복작용으로 인해 순수 열라체팅 발생
2단계 : 주기하중이 반복될 수록 원주를 따라서 미세한 비균일 변형발생
3단계 : 비대칭의 라체팅 변형 증가
4단계 : 누적잔류변형이 증가함에 따라서 끝단부위 항복거동
5단계 : 진행성 열좌굴 발생

본 연구를 통하여 주기적 이동성 고온 열하중을 받는 구조물에서 진행성 열좌굴이 발생할 수 있는 조건들을 기술하면 다음과 같다.

- 자유끝단을 갖는 원통형 구조물
- 고온 자유액면으로 인해 축방향 온도구배가 매우 큰 구조물
- 두께 대비 직경비가 매우 큰 박막 구조물
- 열원의 이동방향이 Hot front condition인 경우
- 열원이 자유끝단까지 도달하는 Overflow 운전조건

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) 한도희, 김영진, 구경회 등, “KALIMER 예비 개념설계 보고서,” KAERI/TR-1636/2000, 한국원자력연구소, 2000.

(2) G.H. Koo and J.H. Lee, “Design of Reactor Structures of LMR in the Vicinity of Hot Pool Free Surface Regions Subjecting Elevated Moving Temperature Cycles,” International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.79. No. 3, pp.167-179, 2002.

(3) G.H. Koo and J.H. Lee, “Structural Design of Liquid Metal Reactor for Elevated Temperature Cycles,” GENES4/ANP2003, 2003.

(4) M.Jimbo, H.Hirayama and S.Matsuura, “Buckling Analysis of Cylinder with Free Edge under Thermal Load,” Transactions of the 15th International Conference on SMiRT-15,Vol. IV, Div. F, pp.265-268, 1999.

(5) ANSYS User’s Manual for Version 7.1, Volume I,II,III, Swanson Analysis Systems, Inc.

(6) G.H. Koo and J.H. Lee, "Progressive Buckling Analysis for a Cylindrical Shell Structure with the Free Edge Subjected to Moving Thermal Cycles," Int. Journal of PVP, in press, 2004.

(7) Rakotovelo M, Taleb L, and Cousin M. On the validation of the methods related to cyclic behavior of metallic structures. International Journal of Plasticity 1999;15:457-478.