KAERI/TR-2700/2004

주기적 이동성 고온 열하중을 받는 액금로 원자로 구조물에 대한 진행성 열좌굴 해석평가 기술

Technology of Progressive Thermal Buckling Analysis and Evaluation for LMR Reactor Structures Subjected to Moving High Temperature Cycles

한 국 원 자 력 연 구 소

제 출 문

한국원자력연구소소장 귀하

본 보고서를 " 주기적 이동성 고온 열하중을 받는 액금로 원자로 구조물에 대한 진행성 열좌굴 해석평가 기술"에 대한 기술보고서로 제출합니다.

2004년 2월 27일

연 구 기 관 명 : 한국원자력연구소

과 제 명 : 액체금속로 기계설계 기술개발

주 저 자 : 구 경 회

공 동 저 자 : 이 재 한

요 약 문

본 보고서의 목적은 주기적으로 반복되는 고온 열하중을 당하는 액체금속로 원자로구조물에 대한 진행성 열좌굴 해석 및 평가 기술을 확립하기 위한 것이다. 이를 위하여 본 보고서에서는 ANSYS에서 제공하는 비선형 재료모델인 Chaboche 모델을 사용한 상세 열좌굴 해석기술을 정립하고 이를 이용하여 자유끝단을 갖는 원통형 구조물에 대해 진행성 열좌굴 기구를 규명하였다. 그리고 이러한 해석 및 평가기술을 KALIMER-150과 KALIMER-600에 직접 적용하여 진행성 열좌굴의 발생 가능성에 대한 평가결과를 기술하였다.

ABSTRACT

The main objective of this report is to establish the analysis and evaluation methodology of the progressive thermal buckling behavior for the LMR structures subjected to moving high temperature cycles. To do this, the ANSYS version 7.1 was used with the nonlinear material constitutive equation of Chaboche's model. Using this model, the progressive thermal buckling behavior was identified for the cylindrical structures having the free edge. As an example of the application, the progressive thermal buckling analysis for the KALIMER was carried out, and the results are described in this report.

목 차

표 목 차

그 림 목 차

1. 서 론

일반적으로 액체금속로(Liquid Metal Fast Breed Reactor)는 기존의 경수로와는 달리 500°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°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. 적용 예로서 KALIMER 액체금속로 원자로배플에 대한 진행성 열좌굴 해석평가를 수행하였다.

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 Chaboche 모델을 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. 예를 들어 3개의 조합성분을 사용하는 3-decomposed nonlinear kinematic hardening rule의 Chaboche 이동경화모델을 사용할 경우에는 그림에서와 같이 첫번째 조합성분인 α_1은 초기 고탄성을 지배하는 성분, α_2는 응력-변형률 선도에서 비선형 천이부위를 지배하는

성분, 그리고 α_3는 선형경화 거동을 나타내는 성분들로 조합하여 그림 1의 S α처럼 나타낼 수 있다.

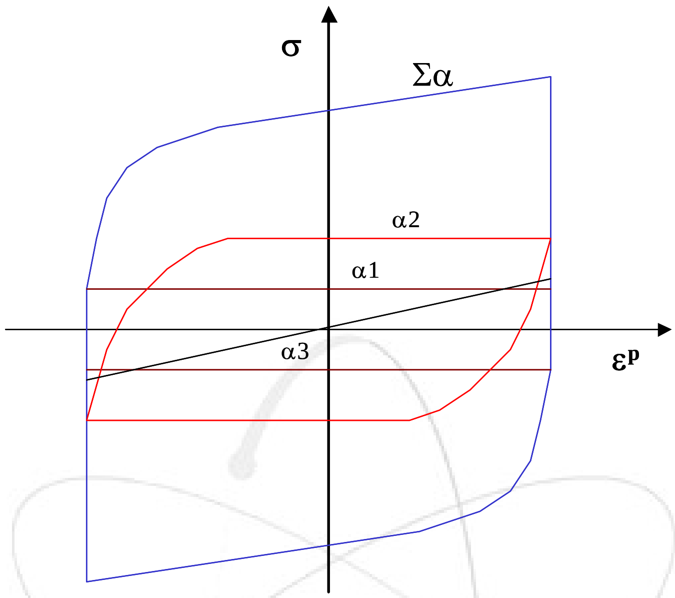

그림 1. Chaboche’s 모델 개념

본 연구에서는 사용한 Chaboche 이동경화모델은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\dot{\alpha} = \sum_i^n \dot{\alpha}_i = \sum_i^n \left[\frac{2}{3} C_i \dot{\varepsilon}^p - \gamma_i \alpha_i \dot{p}_i + \frac{1}{C_i} \frac{dC_i}{d\theta} \dot{\theta} \alpha_i \right] \qquad \textbf{(1)}$$

위 식에서 α는 Back stress tensor을 나타내며 본 연구의 식들에 사용된 모든 기호들은 뒤의 기호설명에 나타나 있고 변수상단에 표시된 점은 시간에 대한 일차미분을 의미한다.

사용된 소성모델은 Flow rule과 관련된 Rate-independent 재료거동을 가정한 다음과 같은 von Mises 항복기준을 사용하였다.

$$F = \left[\frac{3}{2} (\{S\} - \{\alpha\})^T [M] (\{S\} - \{\alpha\}) \right]^{1/2} - R = 0 \qquad \textbf{(2)}$$

위의 식에서 S와 α는 각각 편차응력(Deviatoric stress)과 Back응력을 나타내고 R은

등방경화 변수이며 행렬 $[M]$은 다음과 같다.

$$[M]=\begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & \phi & \\ & & 1 & & & \\ & & & 2 & & \\ & \phi & & & 2 & \\ & & & & & 2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

정규화 규칙에 의하여 Flow rule은 다음과 같이 표현된다.

$$\{\Delta\varepsilon^{p}\} = \lambda\left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\} \tag{4}$$

위의 식에서 λ는 소성계수이며 Q는 소성 Potential이다.

Back 응력 $\{\alpha\}$는 다음 식과 같이 여러가지 이동경화모델의 중첩으로 표현할 수 있다.

$$\{\alpha\} = \sum_{i}^{n}\{\alpha\}_i \tag{5}$$

위의 식에서 n은 중첩에 사용되는 이동경화모델 개수를 나타낸다.

각 성분들에 대한 Back 응력 증분은 다음과 같이 표현된다.

$$\{\Delta\alpha\}_i = \frac{2}{3}C_i\{\Delta\varepsilon^{p}\} - \gamma_i\{\alpha\}_i\,\lambda \tag{6}$$

위의 식에서 C_i와 γ_i, $i = 1,2,\ldots,n$은 이동경화법칙에 사용되는 재료상수들이다.

사용된 Flow rule은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left\{\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right\} = \left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\} = \frac{3}{2}\frac{\{S\} - \{\alpha\}}{\sigma_\theta} \tag{7}$$

소성변형률 증분인 식(4)는 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$\{\Delta\varepsilon^{p}\} = \frac{3}{2}\lambda\frac{\{S\}-\{\alpha\}}{\sigma_{\theta}} \qquad \textbf{(8)}$$

따라서 등가소성변형률 증분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\hat{\varepsilon}^{p} = \sqrt{\frac{2}{3}\{\Delta\varepsilon^{p}\}^{T}[M]\{\Delta\varepsilon^{p}\}} = \lambda \qquad \textbf{(10)}$$

누적 등가소성변형률은 다음과 같이 결정된다.

$$\hat{\varepsilon}^{p} = \sum\Delta\hat{\varepsilon}^{p} \qquad \textbf{(11)}$$

식(2)의 비선형 등방경화 변수 R은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = k + R_{o}\hat{\varepsilon}^{p} + R_{\infty}\left(1 - e^{-b\hat{\varepsilon}^{p}}\right) \qquad \textbf{(12)}$$

위의 식에서 k는 탄성한계치이며 R_o, R_∞, b는 등방경화법칙을 결정하는 재료상수들이다.

본 보고서에서는 Chaboche 모델의 재료상수로서 Fortunier[6]가 제공한 자료를 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 2에서와 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[7].

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.

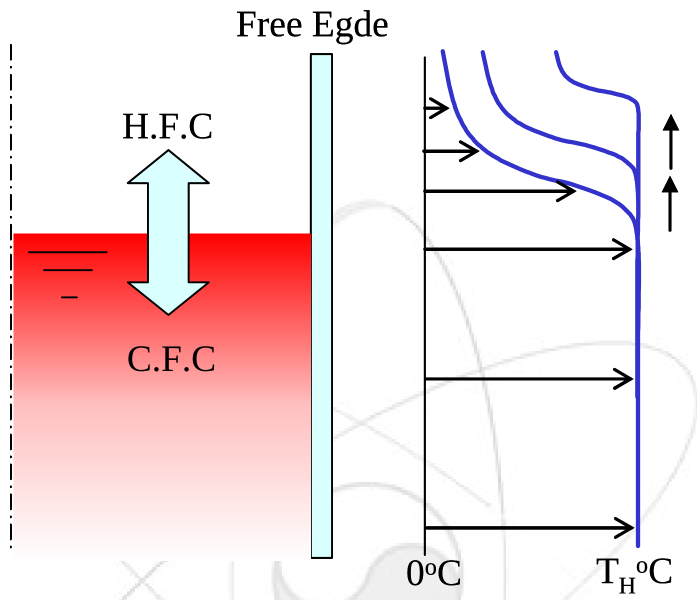

그림 2. 고온 열원의 이동방향 및 온도구배

3.1 해석모델 개요

그림 3은 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 4는 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.

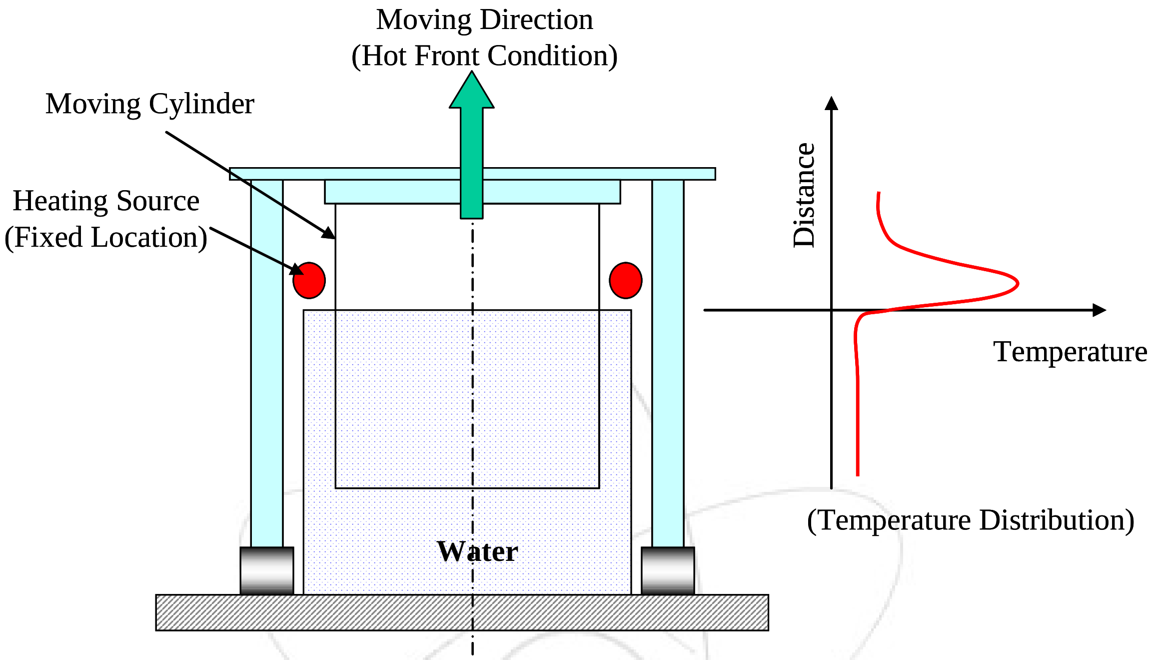

그림 3. 진행성 열좌굴 발생기구 규명을 위한 해석모델 개요

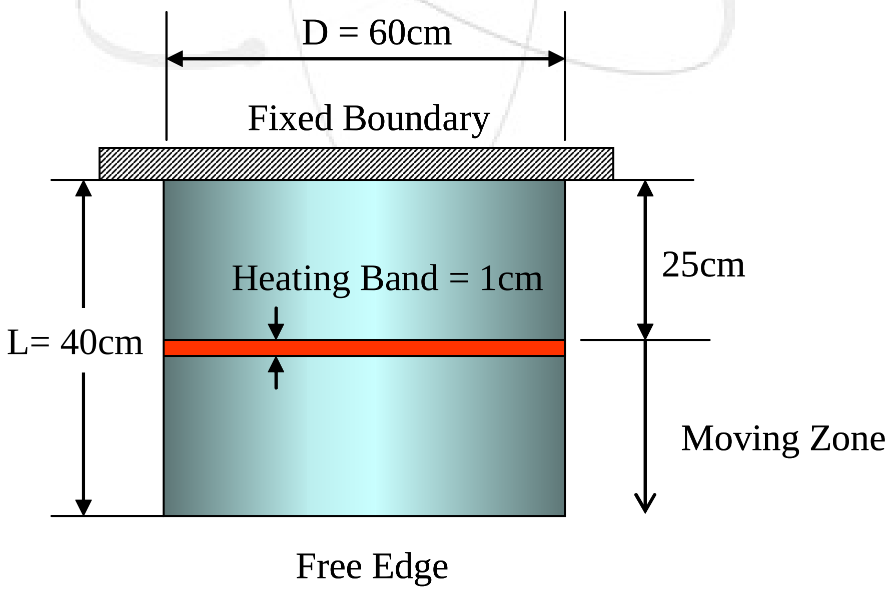

그림 4. 해석모델 제원

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 열좌굴 발생기구 해석평가

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 그림 5와 같이 열원의 최대 이동거리를 자유끝단으로 부터 3cm 아래인 12cm로 가정하고 해석을 수행하였다.

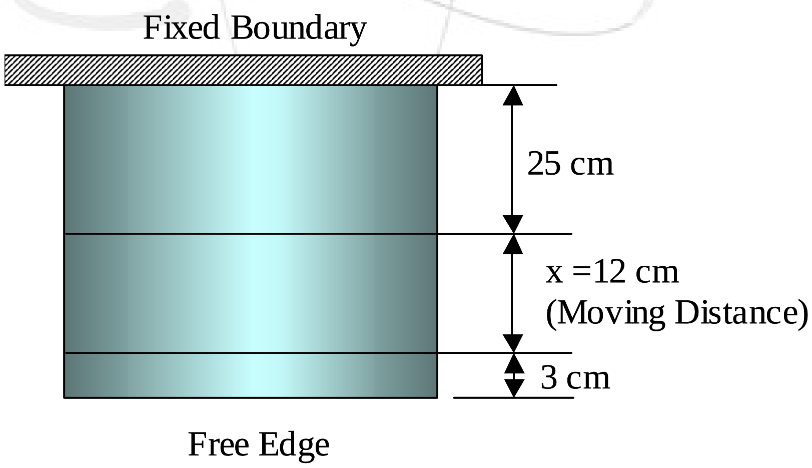

그림 5. No-overflow 조건의 경우에 대한 해석 제원

그림 6은 한 주기 동안의 이동성 열하중 발생과정에 대하여 천이 온도분포해석을 수행하고 각 시간대에서 구한 축방향 온도분포 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 초기 600 ℃ 열원의 정상상태 온도분포에서부터 점차 열원이 원통형 구조물 끝단으로 이동함에 따라서 이동 열원주위에 매우 큰 축방향 온도구배가 나타남을 알 수 있다.

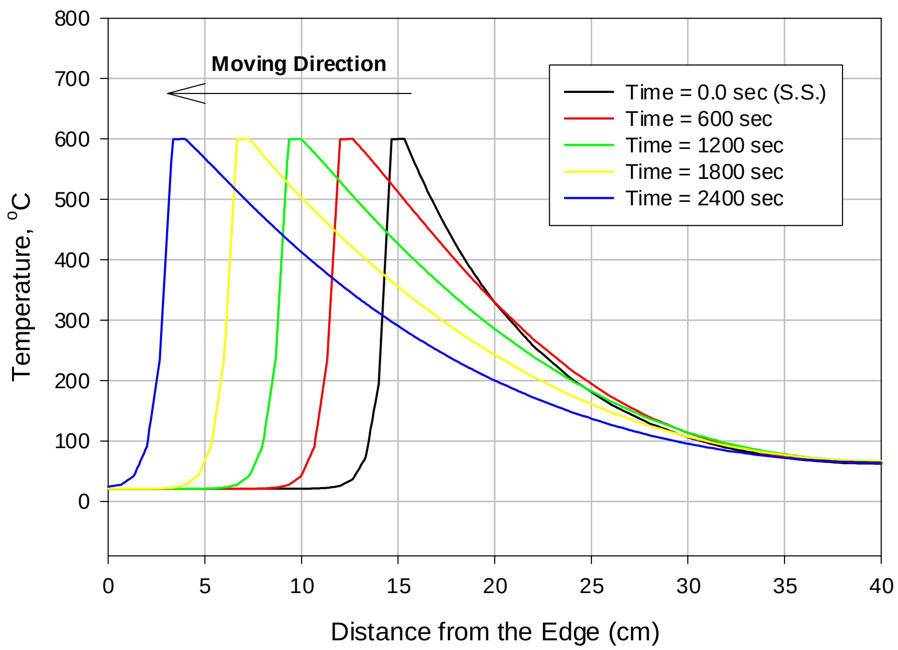

그림 6. 이동성 열원분포 해석결과 (No-Overflow 조건)

그림 7은 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 적용예가 될 수 있다.

그림 8은 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 9는 30회 반복 열하중 후의 잔류변형 형상을 나타낸 것이며 그림 10은 자유끝단 위치에서 5cm 및 10cm 떨어진 위치에서의 반복회수 대비 잔류변위 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 초기 반복하중에 의한 잔류변위 발생이 커다가 점차 경화효과에 의하여 조금씩 변형향이 줄어들며 30회 반복하중 후에는 최대 약 19mm의 누적변형이 발생하나 급격한 잔류변위의 증가는 나타나지 않는다.

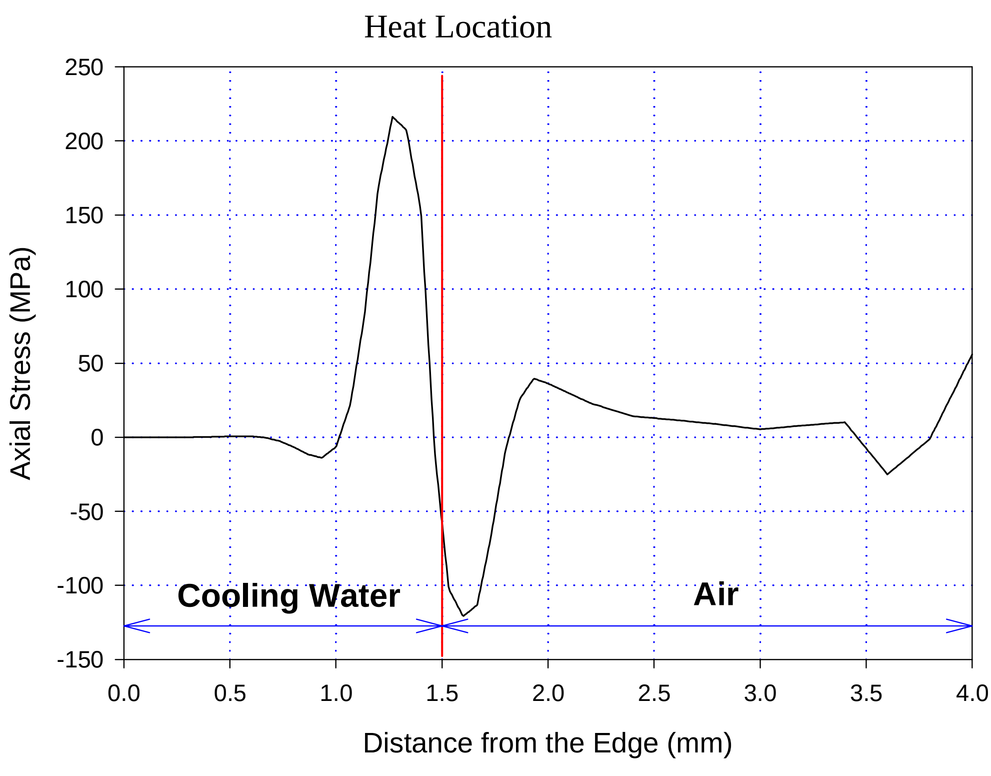

그림 7. 축방향 응력분포도

그림 11은 90번째 하중주기 후의 잔류변위 형상을 나타낸 것으로 그림에서와 같이 누적변형 부위에 비대칭 라체팅 변형이 나타남을 알 수 있다. 그림 12는 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 13과 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 14는 첫번째 하중주기 후, 10번째 하중주기 후, 그리고 30번째 하중주기 후에 대한 잔류응력 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열원의 이동구간에서는 반복 열하중의 회수가 증가할수록 항복응력인 200MPa을 휠씬 초과하는 소성응력이 발생하지만 구조물의 끝단 부위는 항복응력 이하로서 탄성거동을 함을 알 수 있다.

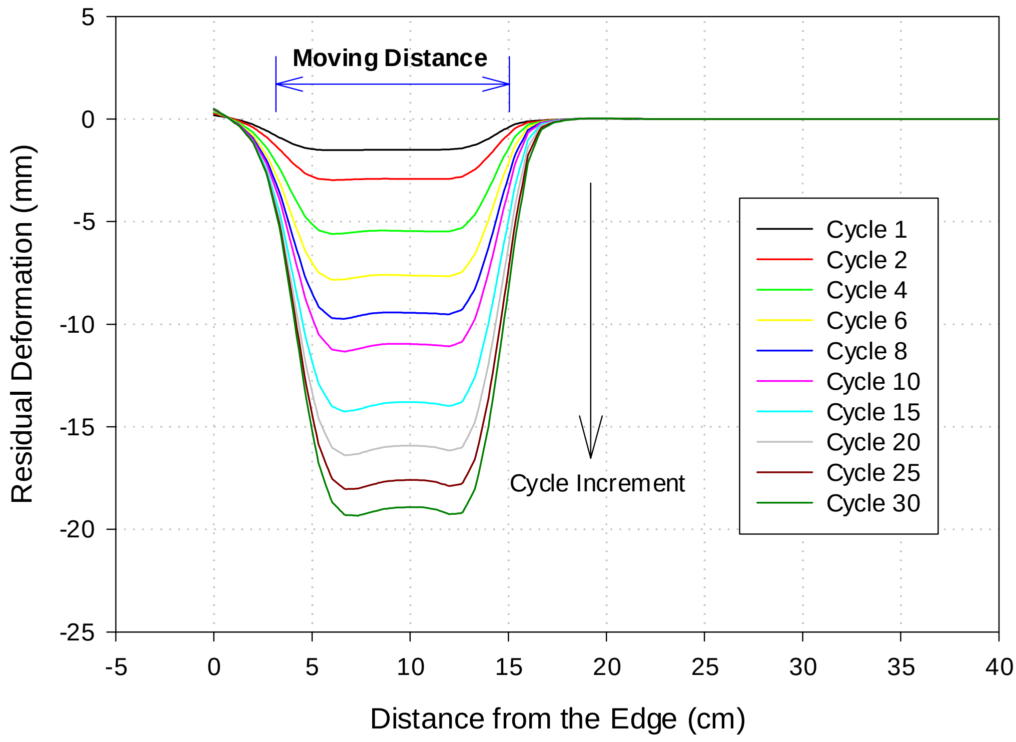

그림 8. 축방향 누적잔류변형 분포 해석결과 (No-Overflow 조건)

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.

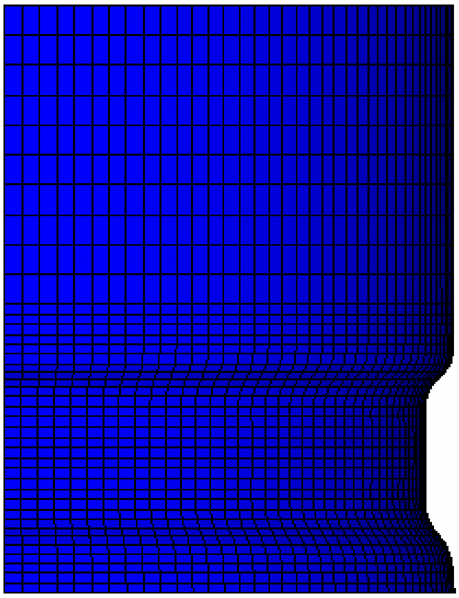

그림 9. 30번째 하중주기 후의 잔류변형 형상

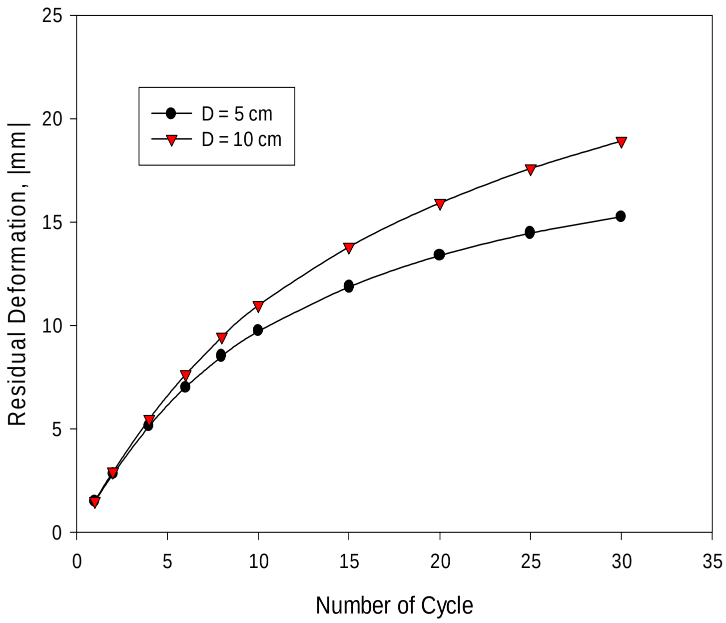

그림 10. 하중주기 횟수 대비 누적 잔류변형 해석결과

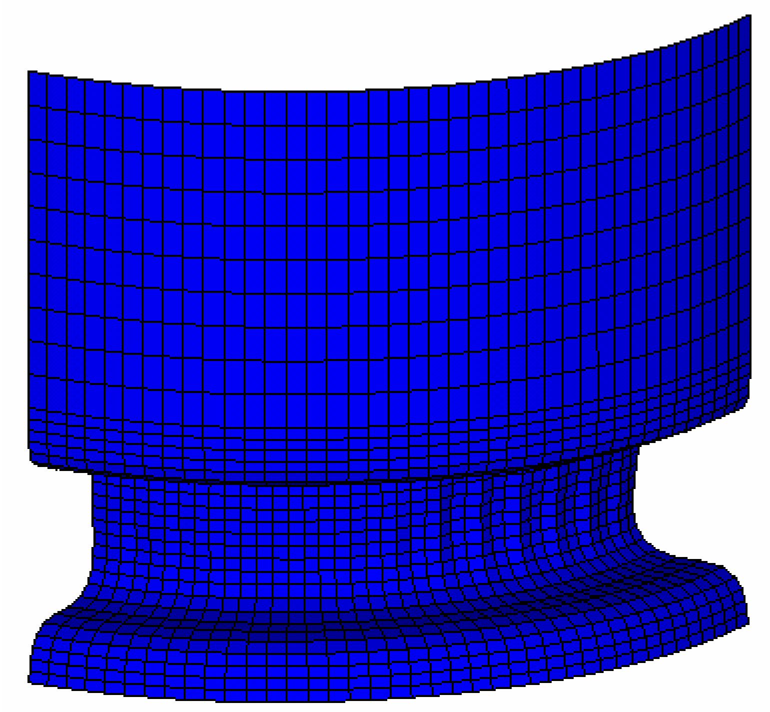

그림 11. 90번째 하중주기 후의 잔류변형 형상

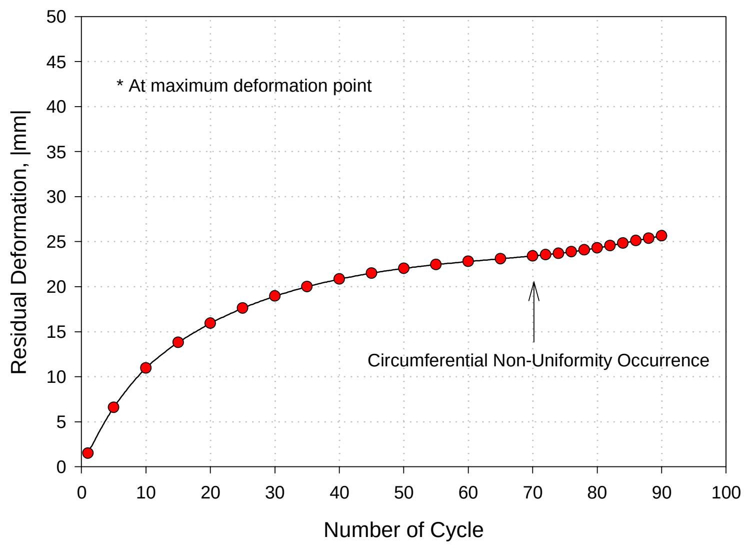

그림 12. 축방향 잔류변형 분포 해석결과

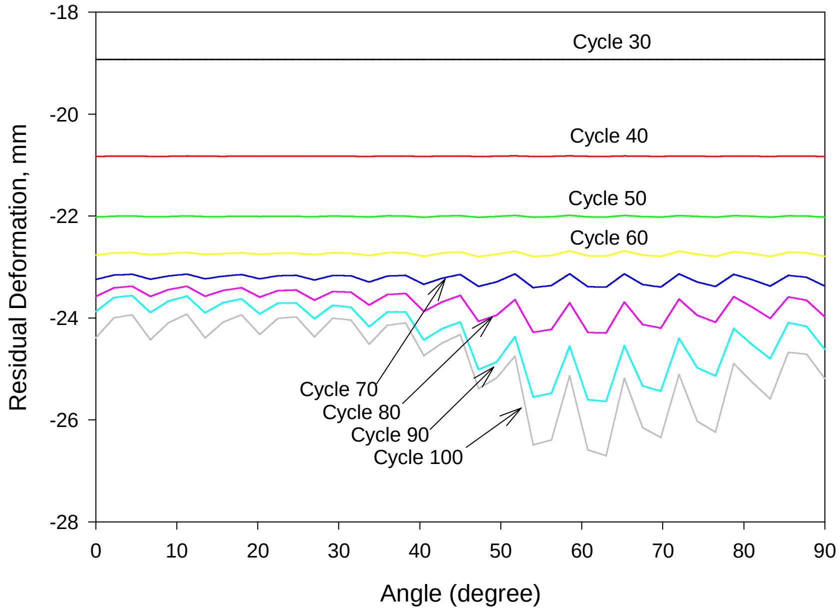

그림 13. 원주방향 잔류변위 해석결과

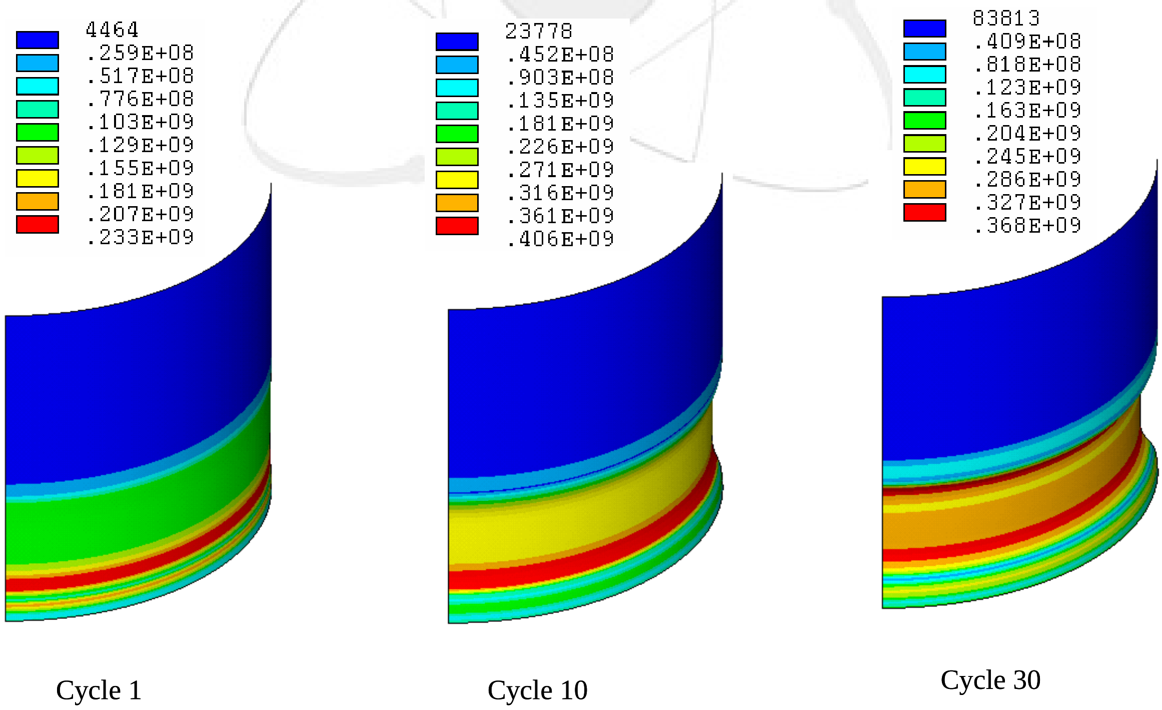

그림 14. 잔류응력 분포 (No-Overflow 조건)

3.3.2 Overflow 조건의 경우

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

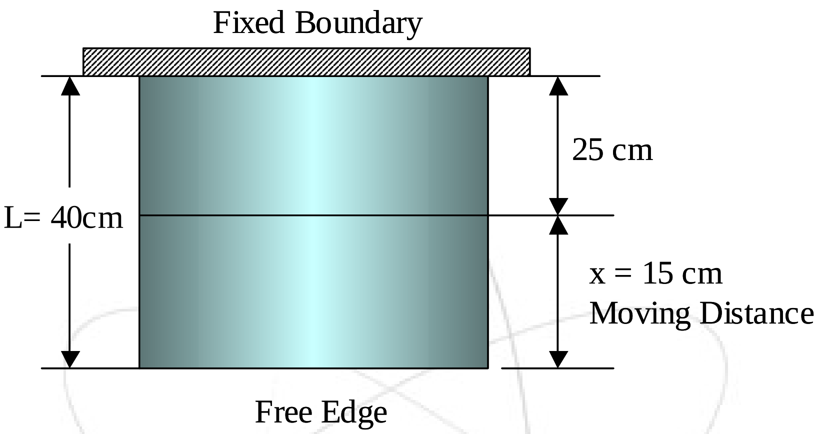

그림 15. Overflow 조건의 경우에 대한 해석 제원

열응력 해석에 사용된 한 주기 동안의 각 시간대별 온도분포 해석결과는 그림 16과 같다. 그림에서와 같이 열원이 이동구간이 구조물 끝단까지 이어져 있음을 알 수 있다.

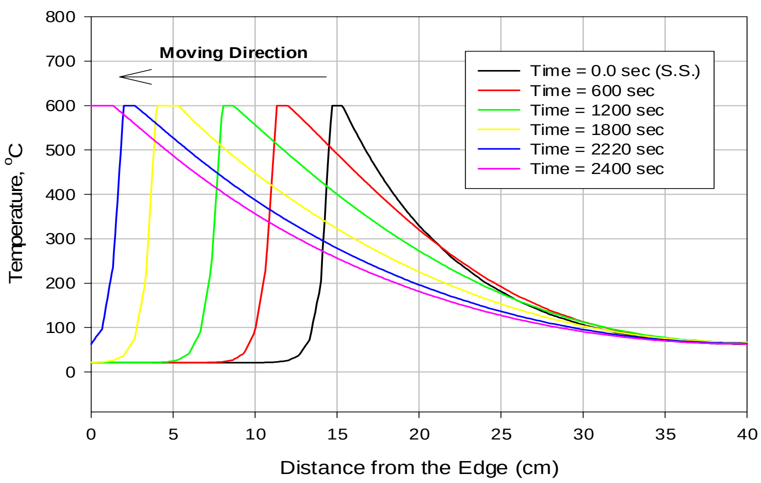

그림 16. 이동성 열원분포 해석결과 (Overflow 조건)

그림 17은 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.

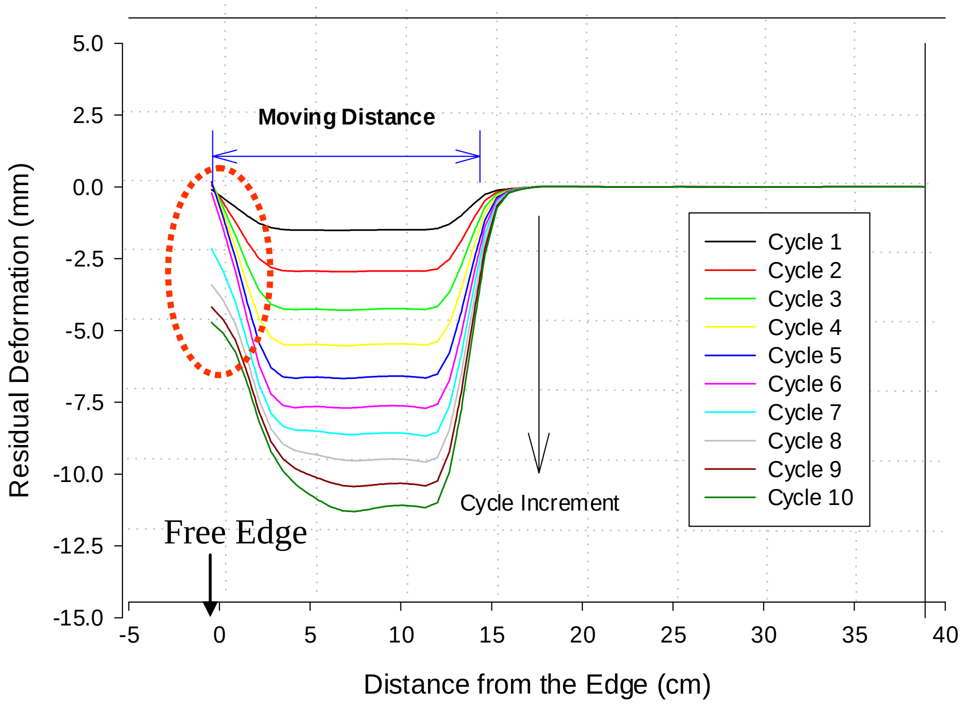

그림 18은 끝단에서부터 각 위치에서의 반복회수 대비 등가누적변형률을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 초기 7번째 하중주기 후부터 열원의 이동구간에서 급격한 변형이 발생함을 알 수 있다.

그림 19는 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.

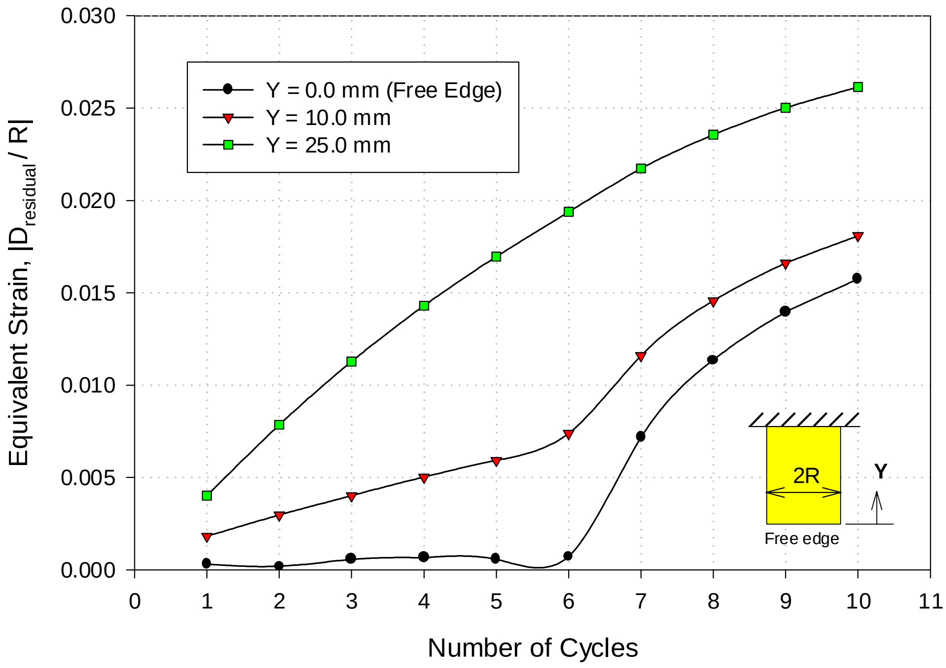

그림 18. 위치별 하중주기 대비 등가변형률

그림 20은 구조물 끝단에서 각 하중주기에 대해 원주방향을 따라서 발생되는 응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 5번째 하중주기 까지는 끝단에서의 응력상태가 탄성거동을 하다가 비대칭 라체팅 변형이 발생되는 6번째 하중주기 후에는 거의 항복응력에 접근해 있으며 진행성 열좌굴이 발생되는 7번째 하중주기 후에는 끝단 부위가 항복응력을 넘어서서 소성거동을 함을 알 수 있다. 그림 21는 이에 상응하는 변형률 분포를 나타낸 것이다. 그림 22은 각 하중주기 후에 나타나는 잔류응력분포를 나타낸 것이며 그림 23은 잔류변형 형상을 나타낸 것이다.

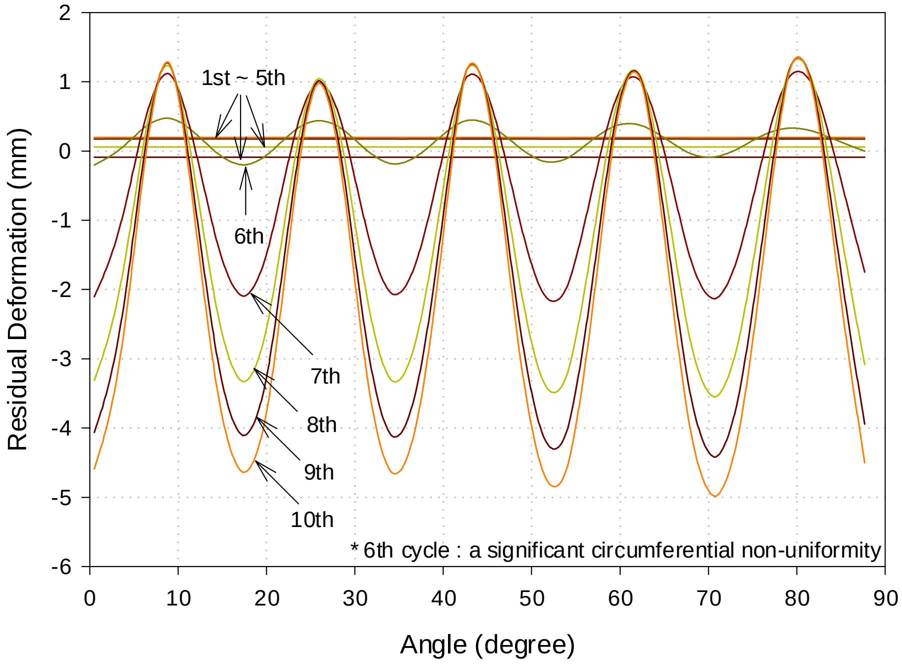

그림 19. 원주방향 잔류변형 분포

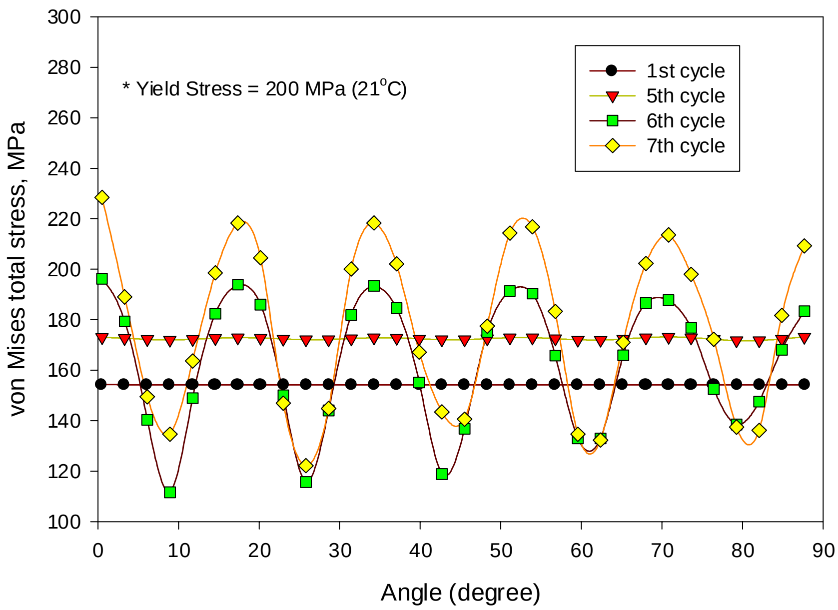

그림 20. 원주방향 응력분포

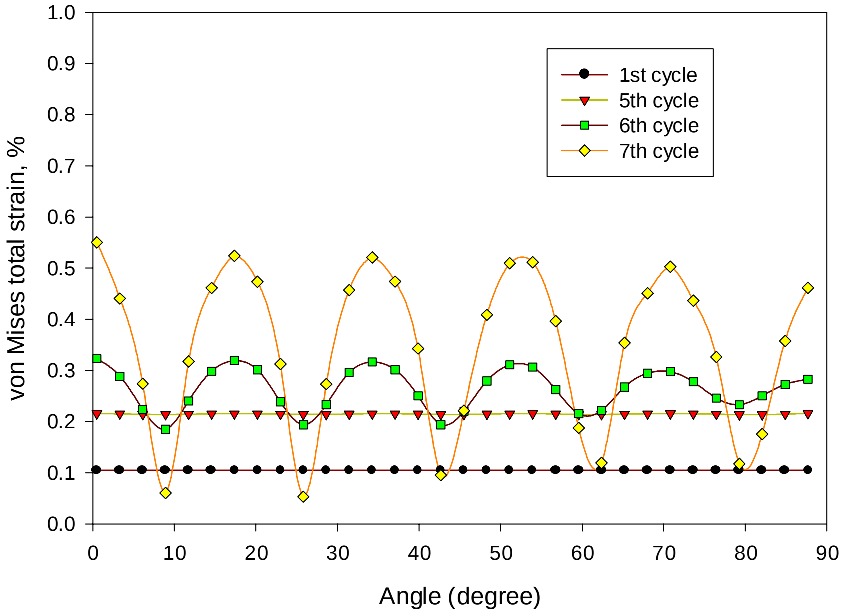

그림 21. 원주방향 변형률 분포

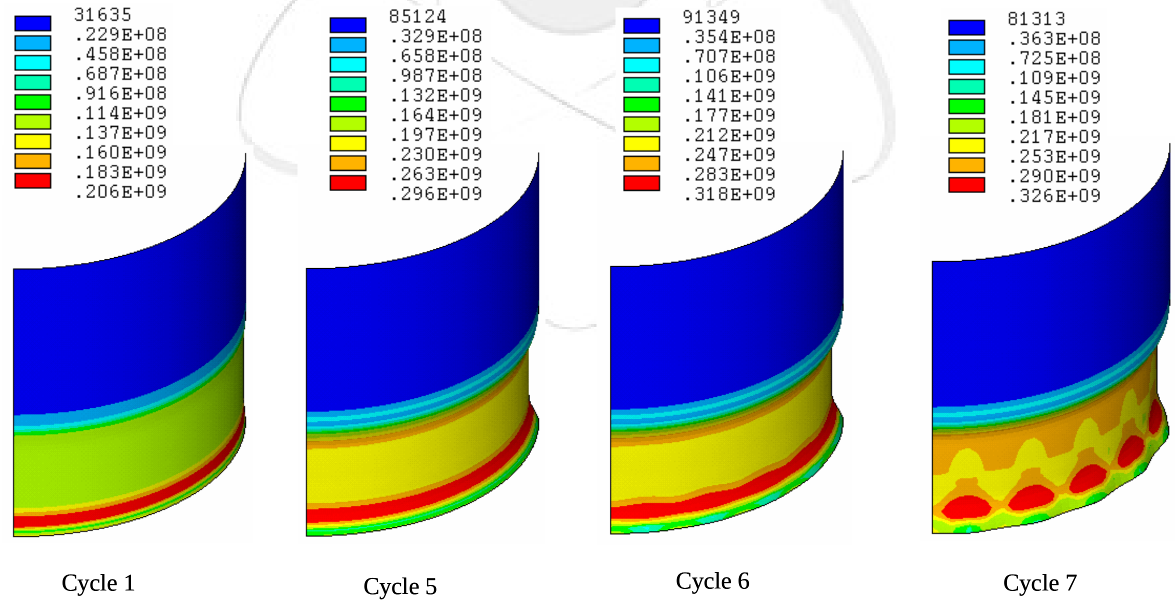

그림 22. 잔류응력 분포 (Overflow 조건)

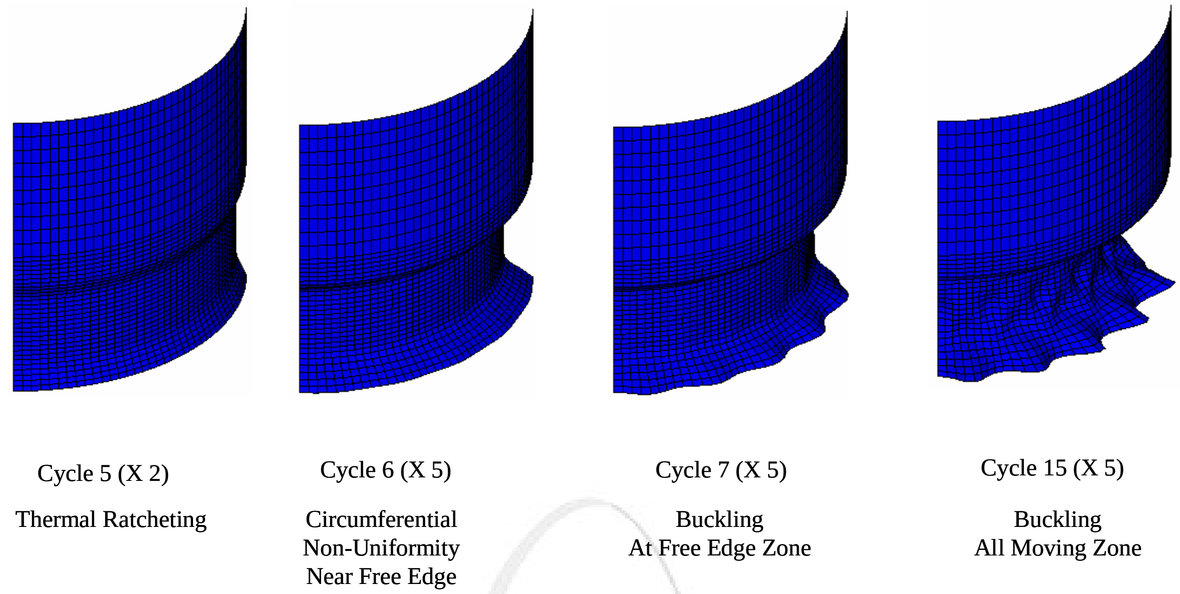

그림 23. 잔류변형 형상 (Overflow 조건)

그림 24는 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.

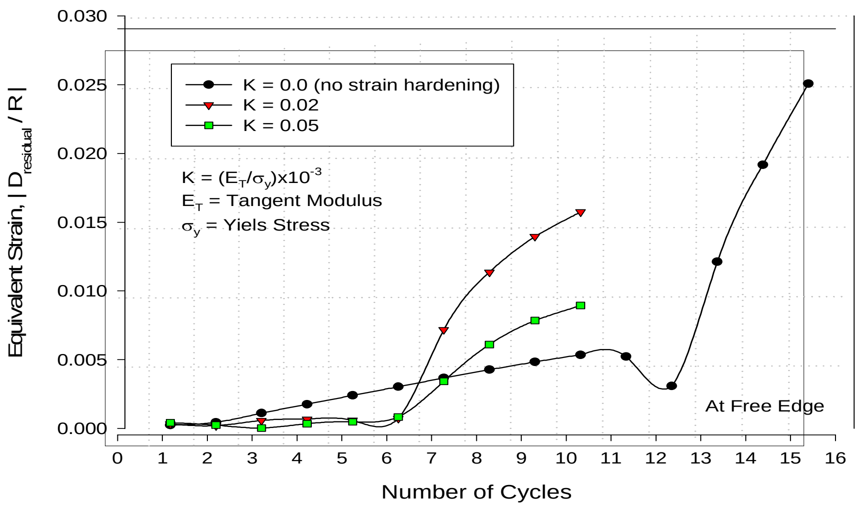

그림 24. Tangent Modulus에 대한 민감도 해석결과

열원의 이동이 자유끝단에 접근하는 정도에 따라서 진행성 열좌굴 발생에 미치는 영향을 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 그림 25는 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 26은 끝단으로부터 100mm 떨어진 위치에서의 해석결과를 나타낸 것이다.

결론적으로 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.

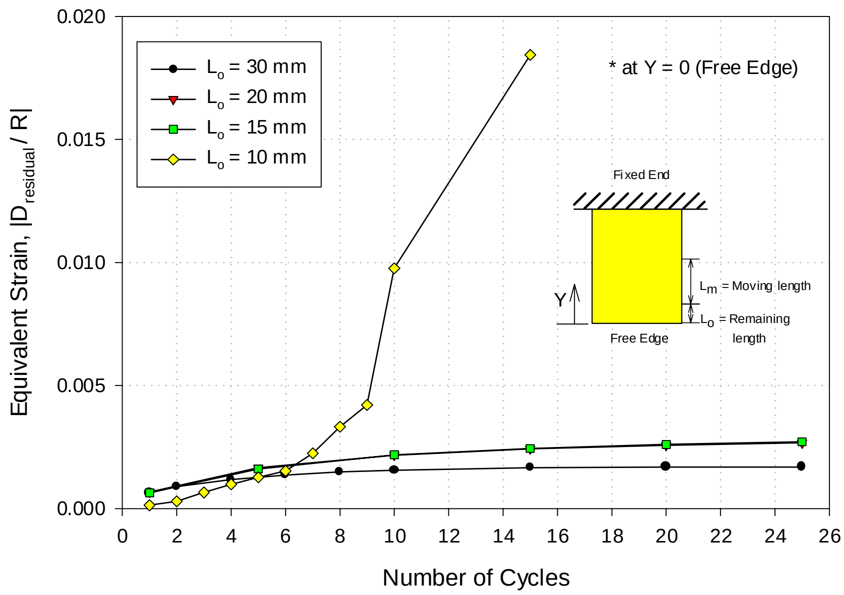

그림 25. 열원의 이동거리에 따른 영향 (at Y=0)

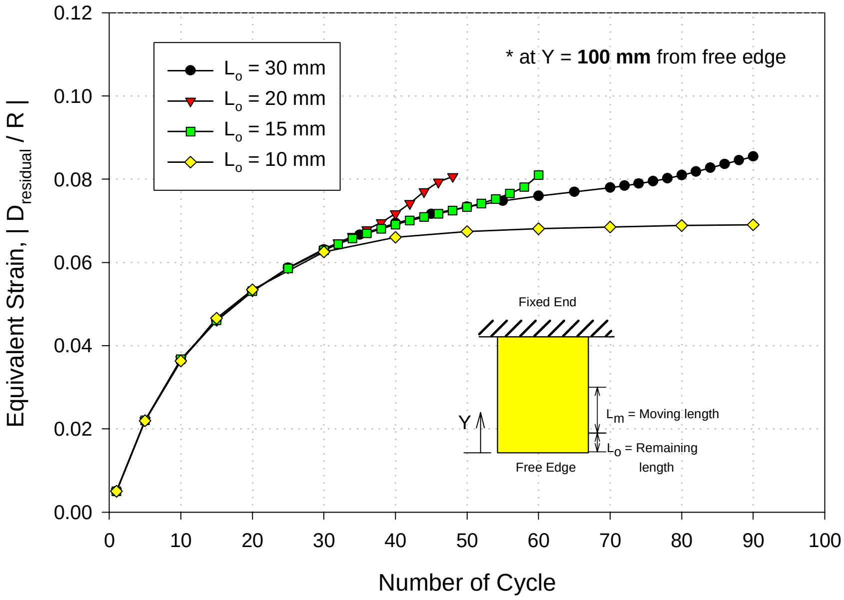

그림 26. 열원의 이동거리에 따른 영향 (at Y=100mm)

4. 액금로 원자로구조물 고온 열좌굴 해석

4.1 주기적 이동성 열하중에 대한 과도 열전달해석

사용된 가상 열하중은 모든 중간열교환기의 기능상실 사고가 발생한 경우 발생할 수 있는 보수적인 운전조건들을 가정하여 결정하였다. 먼저 정상운전상태에서 상단 끝단이 열려있는 원통형 구조물인 원자로배플 부근에서의 열적경계 온도조건은 그림 27과 같다. 그림에서와 같이 냉각재 온도는 530°C이며 내부가스온도는 400°C로 가정하였다. 이러한 정상운전조건에서 중간열교환기의 기능상실사고가 발생하면 일차 냉각펌프가 정지하고 그림 27(a)에서와 같이 저온 냉각재 수위가 급상승해서 고온냉각재 수위와 같아지며 노심붕괴열로 인해 냉각재 온도가 600°C까지 상승하면서 냉각재가 팽창하며 그림 27(b)와 같이 냉각재 자유표면이 상승한다. 약 1000초 후에 냉각재 표면은 원자로배플 상단에 도달하여 그림 28(c)에서와 같이 Overflow가 발생하는 것으로 가정하였다.

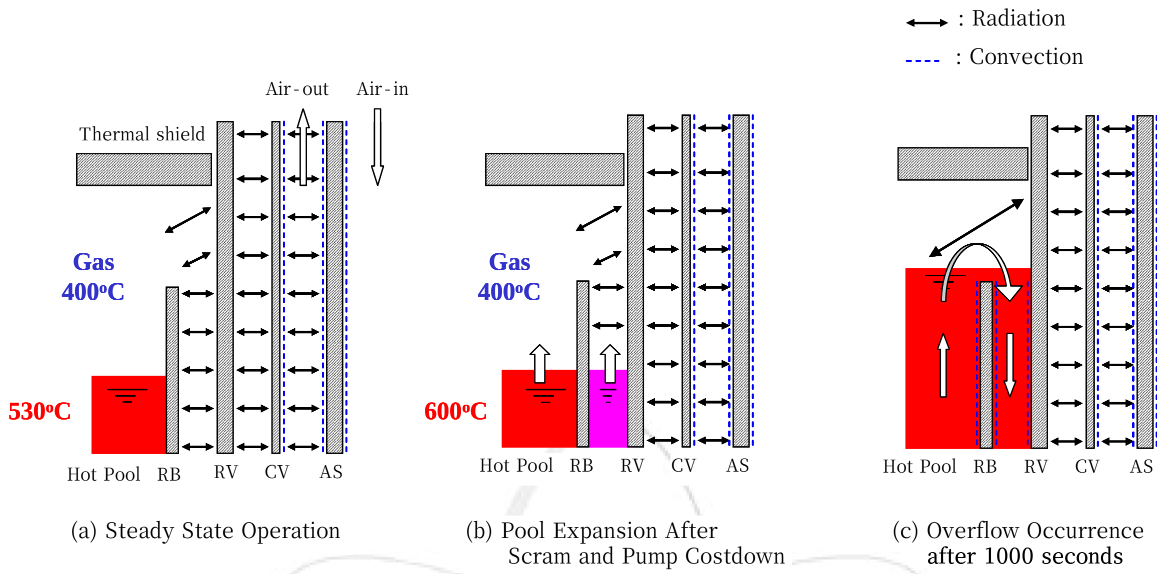

그림 27. 해석에 사용된 이동성 열적하중 발생 개념도

위에서 가정한 이동성 고온 열하중은 원자로 전수명 동안에 10번 반복하여 발생하는 것으로 가정하였다.

그림 28은 해석에 사용된 원통형 원자로배플의 해석치수를 나타낸 것이다.

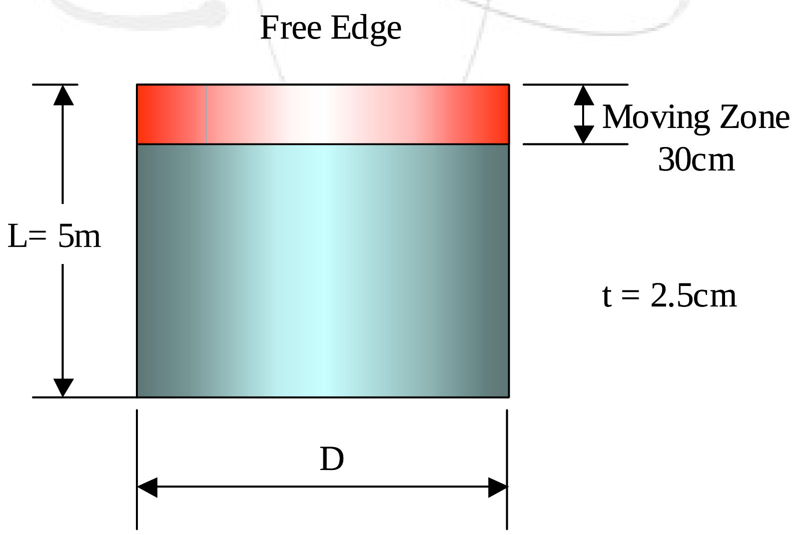

그림 28. 해석에 사용된 원자로배플 제원

4.2 과도 열전달 해석결과

그림 29는 PSDRS 운전 열하중 주기에 대한 과도 열전달 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 초기 정상상태 운전조건에서 발생하는 고온 냉각재 자유표면에서의 축방향 온도구배는 냉각재가 상승함에 점차 상단으로 이동하게 된다. 최대 600°C의 고온 냉각재가 원자로배플 상단에 이러면 냉각재의 자연순환에 의해 열제거가 활발히 발생하면서 시간이 지남에 따라서 점차 핵연료 재장전 온도인 200°C까지 하강하게 된다.

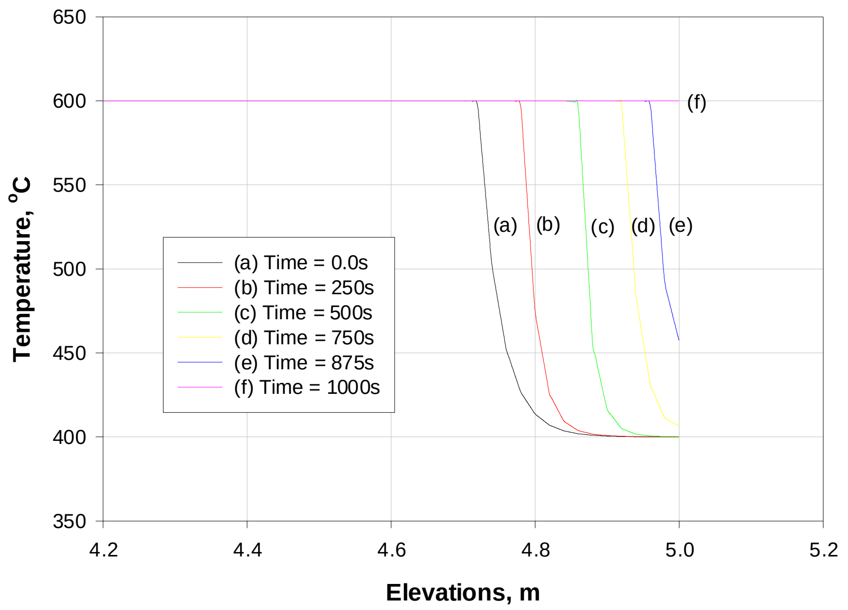

그림 29. PSDRS 운전조건에 대한 이동성 열하중 분포 해석결과

4.3 진행성 열좌굴 해석결과

해석에 사용된 액체금속로 원자로배플의 두께대비 반경비는 각각 KALIMER-150:R/t=137.4와 KALIMER-600:R/t=440.0을 사용하였다.두께대비 반경비가 작은 KALIMER-150의 경우 반복 이동성 고온 열좌굴이 진행됨에 따라서 그림 30에서와 같이 열하중 이동영역인 고온 냉각재 상단부위에 점진적으로 누적되는 반경방향 열라체팅 변형이 발생하지만 급격한 열좌굴 변형은 발생하지 않음을 알 수 있다.

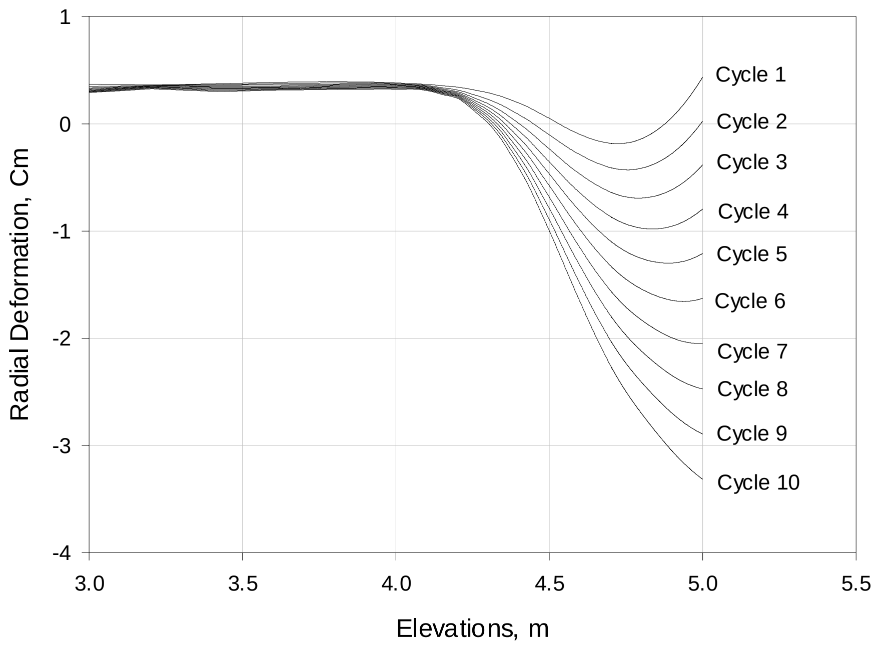

그림 30. KALIMER-150에 대한 축방향 잔류변형 해석결과

두께대비 반경비가 비교적 큰 KALIMER-600의 경우에는 그림 31과 같이 초기 반복 하중에서는 순수 누적 열라체팅이 발생하다가 5번째 하중주기가 지난 후에는 매우 작은 비대칭 라체팅 변형이 발생하면서 6번째 하중주기 후에는 매우 심각한 진행성 열좌굴 변형이 발생한다. 8번째 하중주기 후의 최대 변형량은 KALIMER-150의 경우는 2.5Cm이지만 KALIMER-600의 경우에는 20.0Cm로 매우 크게 나타났다. 따라서 두께대비 반경비가 클수록 열좌굴 발생이 용이한 것으로 나타난다.

그림 32는 KALIMER-150의 경우 10번째 하중주기 후에 나타나는 잔류변형 형상을 나타낸 것이며 그림 33은 7번째 하중주기 후 열좌굴이 발생한 변형형상을 나타낸 것이다.

5. 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

진행성 고온 열좌굴 해석기술을 적용하여 KALIMER 원자로배플에 대한 진행성 열좌굴 해석을 수행한 결과 두께 대비 반경비가 작은 KALIMER-150의 경우에는 설계하중에 대해 순수 열라체팅 변형만 나타났으나 KALIMER-600의 경우에는 설계하중에 대해 진행성 고온 열좌굴이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 고온 원자로 설계시 열응력 완화를 위하여 용기두께를 줄이거나 용기직경이 커질 경우 반드시 진행성 열좌굴 건전성을 검토해야 한다.

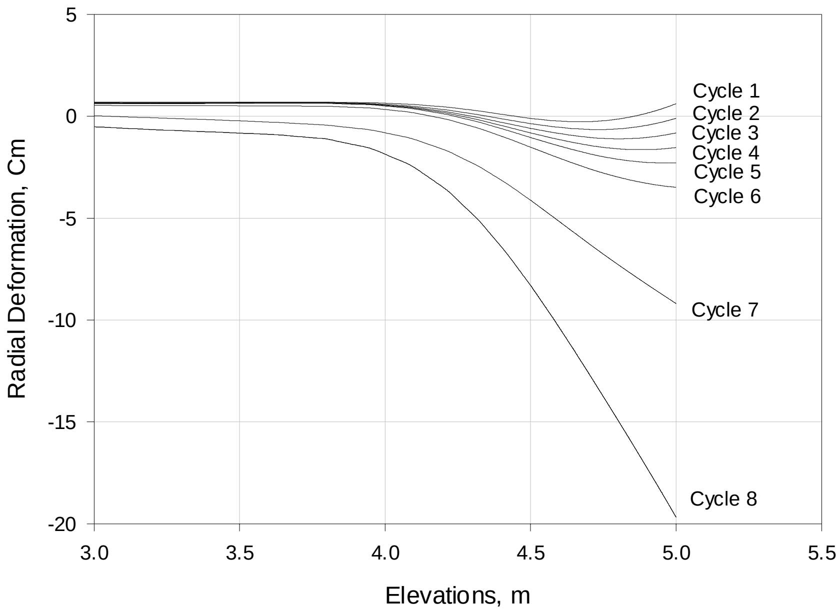

그림 31. KALIMER-150에 대한 축방향 잔류변형 해석결과

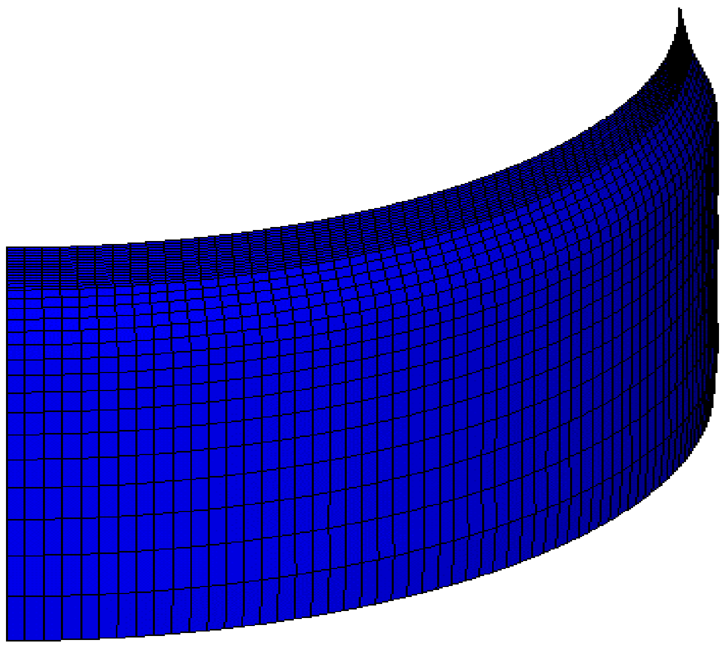

그림 32. KALIMER-150 변형형상 x 5 (10번째 하중주기 후)

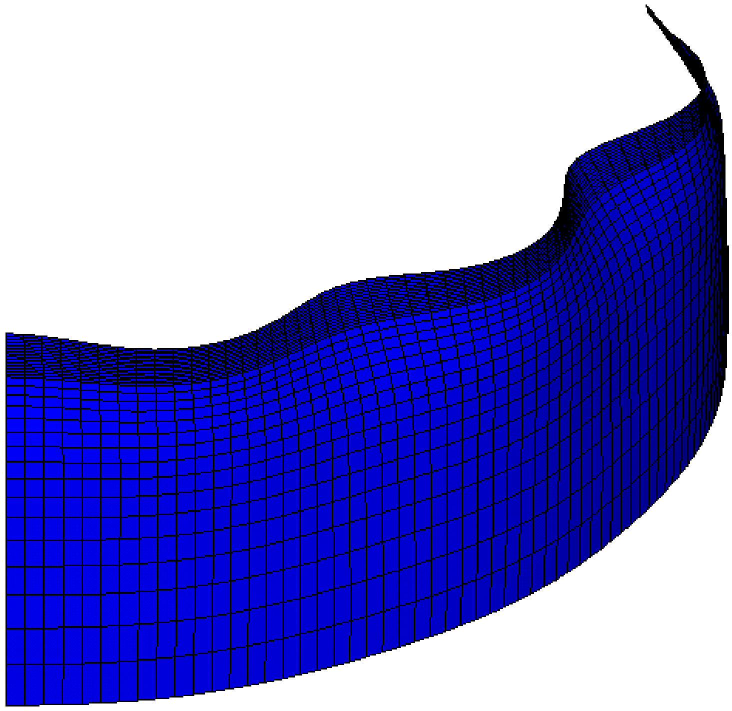

그림 33. KALIMER-600 변형형상 x 5 (7번째 하중주기 후)

기 호 설 명

α = back stress tensor

ε^p = plastic strain tensor

P = accumulated equivalent plastic strain

θ = temperature

C_i and γ_i = material constants

n = number of nonlinear kinematic models

$\bar{\sigma}$ = effective equivalent stress

S = deviatoric stress

R = isotropic hardening parameter

λ = plastic multiplier

Q = plastic potential

k = elastic limit

R_o, R_∞, b = material constant

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

(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) G.H. Koo and J.H. Lee, “Progressive Buckling Analysis for a Cylindrical Shell Structure withthe Free Edge Subjected to Moving Thermal Cycles,” Int. Journal of PVP, submitted, 2003.

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

(6) 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.

(7) 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.

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code	
KAERI/TR-2700/2004					
Title / Subtitle					
Technology of Progressive Thermal Buckling Analysis and Evaluation for LMR Reactor Structures Subjected to Moving High Temperature Cycles					
Project Manager and Dept. (Main Author)	Gyeong-Hoi Koo / Development of LMR Design Technology				
Researcher and Dept.	J.H. Lee / Development of LMR Design Technology				
Pub. Place	Taejon, Korea	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	February, 2004
Page	29P	Fig. and Tab.	Yes(o), No( )	Size	26 cm
Note					
Classified	Open(o), Outside( ), __Class		Report Type		
Sponsoring Org.			Contract No.		

Abstract (About 300 Words)

The main objective of this report is to establish the analysis and evaluation methodology of the progressive thermal buckling behavior for the LMR structures subjected to moving high temperature cycles. To do this, the ANSYS version 7.1 was used with the nonlinear material constitutive equation of Chaboche’s model. Using this model, the progressive thermal buckling behavior was identified for the cylindrical structures having the free edge. As an example of the application, the progressive thermal buckling analysis for the KALIMER was carried out, and the results are described in this report

Subject Keywords (About 10 Words)

Progressive Thermal Buckling, Liquid Metal Reactor, Ratcheting, Chaboche Model, KALIMER, High Temperature Cycles

<table>
<tr><td colspan="8"></td></tr>
<tr><td colspan="8">서 지 정 보 양 식</td></tr>
<tr><td>수행기관
보고서번호</td><td colspan="2">위탁기관
보고서번호</td><td colspan="3">표준보고서번호</td><td colspan="2">INIS주제코드</td></tr>
<tr><td>KAERI/TR-2700/2004</td><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="8">제목 /부제

주기적 이동성 고온 열하중을 받는 액금로 원자로 구조물에 대한 진행성 열좌굴 해석평가 기술</td></tr>
<tr><td>연구책임자 및 부서명
(TR일 경우 주저자)</td><td colspan="7">구 경 회 / 액체금속로 설계기술개발</td></tr>
<tr><td colspan="8">연구자 및 부서명

이재한/ 액체금속로 설계기술개발</td></tr>
<tr><td>발 행 지</td><td>한국, 대전</td><td>발행기관</td><td colspan="2">한국원자력(연)</td><td>발행일</td><td colspan="2">2004. 2</td></tr>
<tr><td>페 이 지</td><td>29 P</td><td>도 표</td><td colspan="2">유(o), 무( )</td><td>크 기</td><td colspan="2">26 cm</td></tr>
<tr><td>참고사항</td><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td>비밀여부</td><td colspan="2">공개 (o), 대외비( ), __급 비밀</td><td colspan="4">보 고 서 종 류</td><td></td></tr>
<tr><td>연구위탁기관</td><td colspan="2"></td><td colspan="4">계 약 번 호</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">초록 (300단어 내외)

본 보고서의 목적은 주기적으로 반복되는 고온 열하중을 당하는 액체금속로 원자로구조물에 대한 진행성 열좌굴 해석 및 평가 기술을 확립하기 위한 것이다. 이를 위하여 본 보고서에서는 ANSYS에서 제공하는 비선형 재료모델인 Chaboche 모델을 사용한 상세 열좌굴 해석기술을 정립하고 이를 이용하여 자유끝단을 갖는 원통형 구조물에 대해 진행성 열좌굴 기구를 규명하였다. 그리고 이러한 해석 및 평가 기술을 KALIMER-150과 KALIMER-600에 직접 적용하여 진행성 열좌굴의 발생 가능성에 대한 평가결과를 기술하였다.</td></tr>
<tr><td colspan="8">주제명 키워드 (10단어 내외)

진행성 열좌굴, 액체금속로, 라체팅, Chaboche 모델, KALIMER, 고온하중주기</td></tr>
</table>