KAERI/TR-2451/2003

Enhanced Creep 기구분석 및 평가

On the Analysis and Evaluation of Enhanced Creep Behavior of LMFBR Structure

2003. 3.

한 국 원 자 력 연 구 소

제 출 문

한국원자력연구소소장 귀하

본 보고서를 “Enhanced Creep 기구분석 및 평가” 기술보고서로 제출합니다.

2003년 3월 14일

과 제 명 : 액체금속로 기계설계기술개발

주 저 자 : 김 종 범

공동저자 : 이 형 연

이 종 민

이 재 한

요 약 문

액체금속로의 고온구조물들은 530~550℃의 고온 소듐 운전 환경으로 인해 소성변형과 크립변형에 의한 비탄성병형을 하게 된다. 과도한 열 이차응력이 반복적으로 작용할 때 소성변형이 발생하여 하중 사이클마다 반복적으로 누적되는 현상을 열라체팅이라 하고, 또한 장시간의 고온유지시간 동안 크립변형이 발생하여 응력완화와 재분포 및 진행성변형과 연계되어 일차응력만 작용하는 경우보다 크립변형을 증가하게 되는 강화크립이 발생할 수 있다. 소성 라체팅과 강화크립이 동시에 발생하는 현상을 크립-라체팅이라 하고 고도의 비탄성 거동이기 때문에 고온구조 설계해석에서 적절한 평가를 위한 기술을 축적해야 한다.

본 연구에서는 Core Stress 개념을 적용한 강화크립 평가 방법을 분석하고 적용 기술을 정립하였고 인장하중을 받는 배관에 고온유지시간을 갖는 열과도하중이 작용하는 경우에 대하여 탄성해석을 이용한 단순평가방법으로 강화크립을 구하고 이를 등방경화, 이동경화, 결합경화모델과 통합점소성모델을 이용한 상세 비탄성해석을 수행한 결과와 비교분석하였다. 향후 보다 다양한 고온구조물과 운전환경에 대하여 상세 비탄성해석을 수행하여 타당성을 분석하고 또한 Core Stress 개념을 적용한 단순평가방법의 적용절차를 보다 체계화하고 평가의 보수성을 분석할 예정이다.

Summary

High temperature structures of LMR experience inelastic deformation shuch as plasticity and creep due to high temperature operating temperature of 530~550°C. The generated creep strains are connected with the stress relaxations, redistributions and/or progressive deformations. The superposition of primary and secondary stresses may lead to enhanced creep deformations. The term 'creep ratchetting' refer to the phenomenon where enhanced creep occurs with plasticity ratcheting. Ther interchange of elastoplastic and creep strains is important for its understanding. Since creep ratcheting is highly nonlinear structural behavior, it is required to secure the proper analysis technique to evaluate inelastic strain due to enhanced creep.

In this project, the simplified evaluation method for enhanced creep using Core Stress concept was investigated and the enhanced creep of pipe subjected to sustained axial tensile loading and transient thermal loading with hold time was evaluated using several analysis models; that is, isotropic hardening model, kinematic hardening model and combined hardening model with Norton's power law creep equation. In addition, the viscoplastic analysis using NONSTA-VP was performed for comparisons. The simplified evaluation method using Core Stress concept yields conservative result as expected. It is necessary to systematize the simplified evaluation procedure, to analyze the conservatism of the method, and to improve the inelastic analysis techniques including NONSTA-VP.

목 차

표 목 차

그 림 목 차

1. 서 론

액체금속로의 고온구조물들은 530~550℃의 고온 소듐 운전 환경으로 인해 소성변형과 크립변형에 의한 비탄성병형을 하게 된다. 소성변형은 열이차응력이 반복적으로 작용할 때 하중 사이클마다 반복적으로 누적되는 현상을 보일 수 있는데 이를 열라체팅이라 한다[1]. 또한 장시간의 고온유지시간 동안 발생하는 크립변형은 응력완화, 응력재분포, 및 진행성변형과 연관이 있는데 열 이차응력이 일차응력과 연계되어 일차응력만 있는 경우보다 크립변형을 더 유발시키는데 이 현상을 강화크립(Enhanced Creep)이라 하고[2, 3] 변형률이 하중사이클 마다 증가하는 현상을 일컬어 크립-라체팅이라 한다.

액체금속로의 고온 정상운전 조건에서 구조물에 발생하는 응력으로는 하중 제어 응력인 일차응력은 일반적으로 낮고 변형률 제어 응력인 열응력이 큰 특징이 있다. 이러한 열응력은 변형률제어 특성으로 완화하는 양상을 보이지만 하중 사이클 마다 다시 생성되어 구조물의 피로 손상에 큰 영향을 미치게 된다. 낮은 일차응력이라도 이차응력과의 조합으로 진행성 변형을 유발할 수 있고 특히 고온유지시간이 길어져서 크립이 발생하게 되면 이것이 하중 사이클마다 진행성 변형으로 나타날 수 있기 때문에 세심한 주의가 필요하다.

본 연구에서는 강화크립 현상을 분석하고 평가기술을 연구하여 액체금속로 고온구조물의 구조건전성을 확보하는데 활용할 수 있게 하였다.

2. 강화크립 발생 현상 분석 및 Core Stress 개념

강화크립의 발생을 설명하기 위해 간단한 예를 들어 설명하기로 한다. 그림 1에 보인 것과 같이 두 개의 막대가 축방향으로 인장하중을 받으며 오른쪽 막대에 저온열충격과 고온유지시간을 갖는 열과도하중이 작용하는 경우를 살펴보면 열과도하중으로 인해 발생한 이차응력이 축방향 인장하중에

의한 일차응력과 조합으로 인해 열과도하중을 받지 않는 경우보다 크립변형이 증가하여 결과적으로 막대가 더 늘어나는 것을 알 수 있다[4]. 이를 발생단계로 구분하여 설명하면 다음과 같다.

그림 1에 보인 것과 같이 A1과 A2로 구성된 구조물에 하중 P를 가하고 있으면 이로 인한 일차응력이 각각 발생한다. 이 때 저온 열충격을 가하였다가 다시 온도를 올리는 열하중을 고려하면 A1 막대가 저온 열충격을 받아 응력이 증가하여 표면부터 항복이 발생하기 시작하고 A2 막대는 아직 저온 열충격이 전달되지 않아 응력이 낮거나 압축응력 상태에 있다. A1 막대에 가한 저온 열충격 하중이 A2막대에 전달되면 A2막대는 응력이 증가하기 시작하여 인장응력에 의한 항복이 발생하고 A1막대는 응력이 줄어든다. 이 상태에서 온도를 서서히 처음의 온도 T로 증가시켜 방금 전의 응력상태가 그대로 변하지 않도록 한다. 이렇게 일차응력에 변동 이차응력이 더하여져서 구조물의 내외부에 항복이 번갈아 발생하게 되면 이로 인해 소성변형이 발생하고 다음 하중 사이클이 가해지면 소성변형이 반복하여 누적할수 있는데 이것은 소성 라체팅 현상으로 시간과는 무관하다.

앞에서 다시 온도가 T로 되어 고온 유지시간이 시작될 때 구조물에는 저온 열충격응로 인한 잔류응력이 형성되어 있고 이들의 평균응력은 하중 P에 의한 일차응력과 같다. A2 막대는 일차응력보다 큰 잔류응력 상태이므로 일차응력만 있을 경우보다 유지시간 동안 크립변형이 더 발생하게 되는데 이 현상을 강화크립이라 한다. A2 막대의 높은 인장응력은 크립이 발생하며 완화되고 구조물 전체적으로 응력의 재분포가 발생한다. 이와 같은 하중 사이클이 반복될 때마다 강화크립이 발생하여 그림 2에 도식적으로 나타낸 것과 같이 막대의 길이는 고온유지시간을 포함하는 열과도하중을 받지 않는 경우보다 늘어나게 된다.

강화크립 발생 현상을 실린더 구조의 단면 응력 상태로써 다음과 같이 도식적으로 분석해보았다. 그림 3은 내압과 반복열하중을 받는 실린더의 단면 응력상태를 나타낸 것인데 일차 막응력 σ_p가 항복응력 σ_y의 0.5배이고 이차 굽힘응력이 σ_y의 1.5배인 경우를 고려하고 탄성-강소성 거동을 고려하

였다. 막응력과 굽힘응력을 더하면 실린더 내면에서는 항복이 발생하지 않지만 외면에서는 항복이 발생하여 응력이 재분포하게 되는데 이때 응력의 재분포 과정에서 외면에서 소성변형의 증가가 발생하게 되어 (d)와 같이 된다. 여기서 고려한 1.5σ_y의 이차굽힘응력으로는 첫사이클에서만 소성변형이 발생하고 그 후 다시 발생하지 않기 때문에 ASME NH에서는 셰이크다운(Shakedown)되었다고 규정하고 그림 4의 등가크립응력 결정선도의 S1영역에 속하게 된다. 만일 일차응력이 0.5σ_y인 상태에서 이차굽힘응력이 2.0σ_y이상이 작용되면 이차응력을 제거한 뒤에도 항복응력보다 큰 잔류응력이 발생하고 다시 이차응력을 가했을 때 응력의 재분포로 인해 소성변형이 또 발생하게 되고 매 사이클 누적되는데 이를 라체팅이라 한다[5]. 그림 3의 경우에는 재분포한 탄소성 응력상태에서 이차굽힘응력을 제거하면 (f)와 같이 항복응력보다 작은 잔류응력이 분포가 발생하게 되는데 0.77σ_y의 평탄한 탄성응력 영역이 존재하게 된다. 이를 Core Stress, 또는 등가크립응력(σ_c)이라고 정의하고[2, 3] 그림 4의 선도에서 일차응력과 이차응력의 상태에 따라 등가크립응력계수 Z를 찾아서 다음과 같이 구한다.

$$\sigma_c = Z \cdot \sigma_{yL} \quad \text{where } \sigma_{yL} \text{ is yield stress at lower extreme}$$

라체팅 영역인 R1, R2를 제외한 경우에는 Core Stress σ_c가 구조물 단면에 평탄한 탄성응력으로 나타나지만, 라체팅 영역에서는 평탄한 영역이 없이 Core Stress가 항복응력보다 큰 값으로 계산되어 이 경우는 [σ_c]로 표시한다. ASME NH T-1332에서는 1.25σ_c를 Isochronous Curve에 적용하여 구조물이 수명동안 겪는 비탄성변형률을 계산하는 보수적인 방법을 제시하고 있다.

위에서의 보수성을 줄이기 위한 방법으로 Core Stress 개념을 적용하여 강화크립 변형률을 평가한 뒤 총비탄성 변형률을 구할 수 있다. 그림 3의 잔류응력 상태에서 고온유지시간이 적용되면 Core Stress σ_c가 σ_l ($\sigma_l > \sigma_p$)로 완화되고 이때 크립변형의 증가(δ)가 발생하는데 이것이 강화크립으로 에너지 소멸 법칙에 따라 한 사이클에 대한 강화크립은 다음과 같이 계산한다.

$$\delta = \frac{1}{E}\frac{\sigma_c^2 - \sigma_l^2}{\sigma_l}$$

여기서 완화응력 σ_l은 완화응력을 유지시간동안 Isochronous Curve에 적용하여 구한 비탄성변형과 위에서 구한 강화크립을 더한 값이 실제 구조물이 겪는 비탄성변형을 포괄할 수 있도록 정한다. 예를 들어, 550°C에서 영률 153GPa, 항복응력 120MPa인 고온구조물에 일차막응력이 60MPa, 반복 이차굽힘응력이 180MPa 작용할 경우 등가크립응력계수 Z=0.5x1.5=0.75가 되고 σ_c=90MPa로 계산된다. σ_c를 30만 시간동안 작용한다고 가정하고 ASME-NH T-1332의 방법에 따라 Isochronous Curve에 적용하면 약 0.24%의 비탄성변형률이 발생하는데 이 경우는 고온유지시간 동안 Core Stress의 완화를 고려하지 않은 것이다. 앞에서 설명한 것과 같이 응력완화에 의한 강화크립을 고려하고 σ_l을 일차막응력보다 조금 큰 70MPa이라고 하면 위 식에 따라 강화크립은 0.03% 발생하고 70MPa에 의한 비탄성변형률은 0.09%로 되어 총비탄성변형률은 0.12%가 되고, σ_l 이 80MPa이면 강화크립은 0.01% 발생하고 80MPa에 의한 비탄성변형률은 0.15%로 되어 총비탄성변형률은 0.16%가 되어 고온 유지시간 동안 Core Stress의 완화를 고려하면 ASME-NH T-1332를 따른 것보다 보수성을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

앞에서 라체팅이 발생하지 않는 영역에서 강화크립을 평가하는 방법을 살펴보았는데, 라체팅이 발생하는 영역에서 일차응력이 $0.75\sigma_y$이고 열과도하중에 의한 이차응력이 $1.5\sigma_y$ 인 경우 이차응력의 부하 및 제하에 따른 잔류응력 발생 과정을 그림 5에 설명하였다. 여기서 잔류응력이 항복이 발생하여 소성변형이 발생하였고 이와 같은 하중사이클을 반복할 때마다 소성변형이 계속 발생하여 누적되게 된다. 이 경우는 잔류응력이 인장에서만 항복이 발생하여 라체팅 발생 영역 R1에 해당하게 되고 만일 인장과 압축 방향 모두에서 잔류응력이 항복이 발생하면 라체팅 영역R2에 해당하게 된다. 라체팅 영역에서는 구조물의 단면에 평탄한 Core Stress 영역이 존재하지 않고 (f)에 보인 것과 같이 항복값 보다 크게 계산되기 때문에 편의상 괄호를 적용하여 표시한다.

R1, R2영역에서는 큰 열응력이 발생하는 심한 과도하중이 몇 회 발생하지

않을 경우 구조물이 수명동안 겪는 비탄성변형률은 다음과 같이 구한다.

$$\Sigma\varepsilon = \Sigma\nu(\sigma_c) + \Sigma\delta([\sigma_{cL}] \rightarrow \sigma_c) + \Sigma\eta$$

$$When\ [\sigma_{cL}] \geq S_{yH}\ ,\ \delta_{(n)} = \frac{S_{yH}^2 - \sigma_c^2}{E_H \sigma_c}$$

$$When\ [\sigma_{cL}] < S_{yH}\ ,\ \delta_{(n)} = \frac{[\sigma_{cL}]^2 - \sigma_c^2}{E_H \sigma_c}$$

$$[\sigma_c] = Z \cdot S_{yL}\ ,$$

$$Z = X \cdot Y \quad in \quad R2,$$

$$Z = Y + 1 - \sqrt{(1-X)Y} \quad in \quad R1$$

여기서 ν는 Isochronous Curve에서 구한 비탄성변형률, η는 소성 라체팅변형률이고 δ는 강화크립변형률이다. [σ_c]는 몇 회의 심한 열과도하중으로 인한 값이고 σ_c는 심한 열과도하중을 제외한 경우에 구한 탄성응력 값이다. 강화크립 δ는 [σ_c]가 항복응력보다 큰 경우에는 항복응력 값이 σ_c로 완화되며 발생하는 크립변형률로 계산되고 [σ_c]가 항복응력보다 작은 경우에는 [σ_c]가 σ_c로 완화되며 발생하는 크립변형률의 크기로 계산한다.

위 식의 적용 예로써 그림 6에 보인 60MPa의 인장하중을 받는 316스테인레스 실린더 내부(내경 6.92m, 높이 2.5m, 두께 5cm)에 열과도하중이 작용하는 경우에 대한 탄성 열응력해석을 범용 유한요소해석코드인 ANSYS를 사용하여 수행하여 축방향의 강화크립을 평가하였다[6]. 550°C에서 영률(E_H)과 항복응력(S_H)은 153GPa, 120MPa이고 400°C에서 영률(E_L)과 항복응력(S_L)은 167GPa, 123MPa이다. 열과도하중으로 큰 응력이 발생하였을 때 막응력 61MPa에 의한 X값은 0.5이고 굽힘응력 278MPa에 의한 Y값은 2.26으로 Z_L=XY=1.13이 된다. 따라서 [σ_{cL}]=1.13x123=139MPa이 되고 고온유지시간이 시작할 때의 막응력 59.6MPa에 의한 X값은 0.5이고 굽힘응력 154MPa에 의한 Y값은 1.28로 Z=XY=0.64가 되고 Core Stress σ_c는 0.64x120=79MPa로 계산되었다. 이 값들을 위 식에 적용하면 강화크립변형률은 0.07%로 계산된다.

3. 고온구조설계시 강화크립의 고려

시간에 의존하지 않는 라체팅 변형과 시간에 의존하는 강화크립 변형은 하중 형태에 따라 동시 또는 별도로 발생할 수도 있고 주어진 구조물의 형상과 구속조건 및 하중형태에 따라 두 변형 기구가 서로 영향을 줄 수도 있고 주지 않을 수도 있다. 이와 같이 라체팅과 강화크립의 현상이 복잡하기 때문에 정교한 비탄성 해석이 필요하게 되고 ASME-NH는 라체팅 현상을 더 고려되야 하는 여부를 결정하기 위한 스크리닝 요건을 T-1320에 몇가지로 제시하였는데 그 중의 기본적인 것은 다음과 같다.

$$3\overline{S_m} = 1.5S_{mc} + S_{rH}$$

기존의 가압경수로 설계코드인 ASME B&PV Code Sec.III Subsection NB에서는 셰이크다운 조건으로 일차응력과 이차응력의 합이 $3S_m$을 만족시키면 되는데 고온 환경에서는 Subsection NH에 제시된 것과 같이 응력의 완화를 고려하여 $3S_m$을 수정한 $3\overline{S_m}$ 조건을 사용하며 여기서 S_{rH}는 고온에서의 완화응력을 나타낸다. 일차응력과 이차응력의 합이 $3\overline{S_m}$ 보다 작으면 라체팅이 발생하지 않게 되지만 주의해야 할 점은 앞에서 설명한 것과 같이 셰이크다운 영역에서도 고온 유지시간을 수반하는 하중을 받으면 크립이 발생하고 이로 인해 크립-라체팅이 발생할 수 있기 때문에 강화크립을 고려해야 한다는 점이다.

ASME NH에서는 앞에서 설명한 보수성이 큰 셰이크다운 조건 외에 T-1332에 설명한 것과 같이 등가크립계수 Z를 구하여 구한 Core Stress에 1.25배를 하여 $1.25\sigma_c$를 그림 7과 같은 등시응력-변형률 선도에 적용하여 수명동안의 총비탄성변형률을 구하여 모재에 대해서는 1%, 용접재에 대해서는 0.5%의 제한값을 만족하도록 하였다. T-1333에서는 보수성을 좀 더 줄이기 위해 축대칭 구조물이 수명동안 과도한 하중 사이클을 여러 번 받지 않는 경우에 적용하여 총비탄성 변형률을 구할 수 있는 방법을 제시했는데 이는 2장에서 설명한 바와 같다.

영국은 고온구조 건전성평가지침서인 R5[7]에서 강화크립 영향을 고려한 크립변형과 크립손상을 평가하기 위해 앞에서 설명한 것과 유사한 Core Stress 개념을 사용하고 있다. 그리고 강화크립의 크기를 결정하는 방법으로는 크립구성식을 이용하여 고온유지시간이 시작할 때의 응력값을 참조응력법으로 정한 뒤 참조응력의 완화량과 이에 상응하는 변형의 증가량을 구하도록 하였다. 총비탄성변형은 그림 8에 보인 것과 같이 $\Delta\sigma_{max}$값에 크립으로 인한 응력완화 $\Delta\sigma_r$을 구하고 $\Delta\sigma_{max} + \Delta\sigma_r$ 값을 응력-변형률 사이클 곡선에서 노이버룰을 적용하여 구하도록 하였다. R5 지침의 특징은 수명동안의 변형률 제한값을 설정하지 않고 크립사용계수 W를 구하여 이 값이 1보다 작으면 건전성을 확보하는 것으로 제시하였다.

$$W = \sum_{r=1}^{k} \left[\frac{t}{t_f(\sigma_c, T_{ref})} \right]_r \le 1$$

일본은 미국의 ASME 고온구조설계지침을 기초로 자국의 설계지침인 BDS[8]를 개발하고 꾸준한 연구노력을 기울여 최근 개정판인 DDS 설계코드를 만들었는데 여기에 강화크립 평가가 추가되었다. 축대칭구조물에 대해 강화크립은 다음과 같이 구한다.

$$\varepsilon_{EC} = \sum_i \left\{ \varepsilon_c(\sigma_o) \right\}_i + \sum_j \frac{\sigma_{cj}^2 - \sigma_o^2}{E\sigma_o}$$

여기서 $\left\{ \varepsilon_c(\sigma_o) \right\}_i$ 는 평균온도 T_i에서 응력 σ_o 미치 온도 T_i의 누적시간 T_i에 대한 크립변형률이고 σ_o 는 강화크립이 적절한 수준이 되는 응력을 나타내고 σ_{cj} 는 하중 사이클에 대해 정해지는 Core Stress를 나타내고 위 식의 오른쪽 두번째 항은 양수가 될 경우에만 더하고 음수가 될 경우에는 오른 쪽 첫 번째 항만 적용한다. 고온 구조물이 운전수명 동안 겪는 총비탄성 변형률은 강화크립과 라체팅 및 탄성추종변형의 합으로 정하고 이를 수명동안 막변형률 1%, 굽힙변형률 2%로 제한하고 있다.

프랑스의 RCC-MR[9]에서는 변형률 범위를 구할 때 크립에 의한 변령률 증가를 계산하는데 기존에는 고온유지시간 동안 응력완화를 고려하지 않았는데 로 인한 크립변형의 증가를 고려할 수 있도록 하였는데 1993년 개정판

에서는 응력완화와 강화크립를 다음과 같이 고려할 수 있도록 하였다.

$$\dot{\sigma}_r = -E\dot{\varepsilon}_{cr} / C_r \quad (\dot{\varepsilon}_{cr}\ is\ creep\ strain\ rate)$$

$$\varepsilon^{cr}(t) = \frac{C_r}{E}\{K_s\overline{\Delta\sigma^*} - \sigma(t)\}$$

여기서 C_r은 탄성추종과 삼축응력을 고려한 계수로 3을 사용하고 $\dot{\varepsilon}_{cr}$은 크립 변형률속도를 나타낸다.

4. 강화크립 해석 예제

강화크립이 발생하는 고온구조물의 예로써 그림 9에 보인 것과 같이 80MPa의 균일 축방향 인장하중을 받는 316 스테인레스강 배관에 흐르는 소듐의 온도가 300°C에서 20시간동안 550°C로 증가하여 400시간 유지되고 다시 20시간동안 300°C 로 낮아져서 400시간 유지되는 열과도 하중이 5사이클 반복되는 경우에 대한 비탄성해석을 수행하였다. 배관의 크기는 내경이 1m, 두께는 5cm, 길이는 75cm이며 열과도하중이 적용되는 배관의 내부 열전달 계수는 5833J/m^2 °C sec 을 사용하였고 배관의 외부는 300°C 온도와 열전달 계수 1000J/m^2 °C sec 을 적용하였다.

해석은 범용유한요소해석코드인 ABAQUS[10]를 사용하였으며 해석모델은 50개의 8-절점 축대칭 열전달 요소 DCAX8, 205개의 절점으로 구성되었다. 열전달 해석결과 구한 온도분포에 대하여 열응력 해석을 수행할 때 8절점 구조요소인 CAX8요소를 사용하였고 강화크립 거동을 모사하는 정도를 비교분석하기 위하여 등방경화모델, 이동경화모델, 및 결합경화모델을 Norton’s Creep 구성식과 연계하여 해석을 수행하고 또한 본 연구에서 개발한 통합점소성해석 코드인 NONSTA-VP를 사용한 해석도 수행하였다.

등방경화와 이동경화모델에 사용된 물성치로 영률과 포와송비는 300°C와 550°C일 때 각각 175.4GPa, 0.288과 155.3GPa, 0.305이고 소성경화를 모사하는 응력, 변형률은 124MPa, 0.과 179MPa, 0.00885와 191MPa, 0.021이다. 열팽창계수는 300°C와 550°C일 때 각각 1.7308x10^{-5}, 1.8393x10^{-5}

이고 크립상수 A와 n은 각각 $6.37x10^{-75}Pa^{-n}/s$, 7.9[11]이다.

등방경화모델을 사용한 해석결과 배관의 내면에서 축방향의 응력-변형률 선도는 그림 10과 그림11에 나타난 것과 같이 외면에서 인장방향으로 항복이 발생하여 소성경화가 발생하고 하중 사이클이 반복할수록 사이클경화 거동이 나타나서 이동경화 모델의 특성을 잘 보여주고 있다. 첫번째 하중사이클의 고온유지시간 시작시 응력과 변형률은 156MPa, 0.00259이고 400시간의 유지시간이 끝난 뒤 크립 및 응력완화되어 145MPa, 0.00266이 되어 크립변형 증가는 0.014%로 나타났다. 하중 사이클이 반복될수록 소성변형량이 누적되고 있고 또한 고온유지시간에서 크립완화로 인한 강화크립이 발생하여 전형적인 크립-라체팅 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 그림 12와 그림 13에 이동경화모델을 이용한 배관의 내면과 외면의 응력-변형률 선도를 나타내었는데 등방경화모델의 경우와 마찬가지로 크립-라체팅 거동을 보이고 있지만 바우징어 효과가 확연히 나타나고 사이클경화는 발생하지 않음을 볼 수 있고 첫번째 사이클에서 크립변형 증가는 등방경화모델의 경우와 같이 0.014%로 계산되었다. 결합경화모델을 사용한 배관의 내면과 외면의 응력-변형률 선도를 그림 14와 그림 15에 나타내었는데 첫번째 사이클의 고온유지시간 시작시 외면에서 응력과 변형률이 166MPa, 0.00189였는데 400시간의 유지시간 후에 각각 151MPa, 0.00201로 크립과 응력완화 현상이 등방경화모델과 이동경화모델의 경우보다 뚜렷하게 나타났고 하중 사이클이 반복됨에 따라 크립-라체팅 거동을 잘 모사하고 있다. 첫사이클에 대한 강화크립은 0.022%로 등방경화나 이동경화모델의 경우보다 조금 크게 나타났다.

본 연구에서 Chaboch의 통합점소성 구성식[12]을 적용하여 개발한 해석코드인 NONSTA-VP[13]를 사용한 해석을 수행하였고 사용된 구성식의 재료상수는 표 1과 같이 Lemaitre[14]와 Schwertel[15]의 문헌에서 발췌한 데이터를 사용하였다.

표 1. NONSTA-VP 모델에 사용한 재료상수 (316SS, 550°C)

사용	문헌	E	ν	α	K	n	κ	C	γ	b	Q
데이터1	Lemaitre	149.6 GPa	0.309	1.87e-5	150 MPa	12	6 MPa	24.8 MPa	300	10	80 MPa
데이터2	Schwertel	152 MPa	0.3	1.87e-5	989 MPa	1.9	59.4 MPa	92 MPa	1390	14.6	51.1 MPa

Lemaitre의 데이터를 사용한 해석결과를 그림 16과 그림 17에 나타내었는데 앞에서 등방경화, 이동경화 또는 결합경화모델을 사용한 것과 마찬가지로 크립-라체팅 거동을 보여주고 있는데 크립 특성이 너무 강한 것으로 나타났다. 하중 사이클 다섯번만에 누적 변형률이 1%에 달해 앞의 결과들보다 약 4배 정도 높게 해석되었고 첫번째 사이클의 고온유지시간이 시작될 때의 응력과 변형률이 121MPa, 0.0042에서 400시간 후에 각각 106MPa, 0.00527로 응력완화와 크립이 발생하여 강화크립은 0.117%로 계산되었다. Schwertel은 316 스테인레스강에 대한 재료상수들을 다르게 제시하였는데 위 결과와 비교를 위해 해석을 수행한 결과를 그림 18과 그림 19에 보였다. 외면에서의 응력 범위는 등방경화, 이동경화 및 결합경화모델을 사용한 결과보다 조금 작고 변형률 범위는 조금 크게 나타났지만 NONSTA-VP데이터 1을 사용한 결과와 차이가 크다. 그리고 고온유지시간에서 응력완화와 크립이 거의 관찰되지 않고 소성 라체팅 현상만 보였다. 표 1의 데이터 1과 데이터 2를 비교해 보면 같은 재료의 재료상수를 구한 것이지만 차이가 많음을 알 수 있다. 이로 인해 해석 결과가 크게 다르게 나타났는데 C, γ, b, Q, κ는 소성거동에 지배적인 영향을 주고 K, n은 크립거동에 지배적인 영향을 주기 때문이다. Lemaitre와 Schwertel이 각기 다른 재료상수를 생산한 것은 그들이 사용한 재료실험 데이터가 달랐을 수 있고 또한 재료실험 결과는 scatter가 비교적 클 수도 있고 재료상수를 구하는 방법이 달랐을 수 있다. 따라서 통합점소성 구성식을 사용할 때 재료상수를 적절히 구하는 것이 중요한 문제가 되고 이를 위해서는 엄선된 재료실험 결과가 필수적으로 요구

되며 또한 적절한 재료상수를 구하는 방법을 사용해야 한다. 그리고 구성식의 재료상수들이 해석결과에 미치는 영향을 분석할 필요가 대두되었다.

지금까지 여러가지 비탄성 해석모델을 사용한 해석을 수행하였는데 3장에서 설명하였던 절차를 따라 강화크립을 평가해 보았다. 이를 위해 탄성해석을 수행하여 강화크립을 평가하였다. 일차응력 지수 X는 0.65이고 이차응력 지수 Y는 2.44가 되어 R1 라체팅 영역에 해당하였고 유효크립 지수 $Z=Y+1-2\sqrt{(Y(1-x))}$ = 1.59가 되어 $\{\sigma_c\}$=195.6MPa이 된다. $1.25\sigma_c$ 는 244.5MPa이 되므로 Isochronous Curve의 영역을 넘으므로 T-1332를 따른 평가는 할 수 없고 T-1333을 따라 강화크립을 평가하면 0.07%가 된다.

앞에서 등방경화, 이동경화 및 결합경화모델을 사용한 비탄성 해석결과 구한 사이클 당 강화크립은 각각 0.014%, 0.014%, 0.022%이므로 탄성해석법으로 구한 0.07%는 무척 보수적으로 평가되었음을 알 수 있다. 다만 NONSTA-VP로 구한 강화크립은 사용한 재료상수에 따라 0.117%와 0%가 나왔는데 사용한 재료상수값들이 크립을 과대평가하거나 과소평가하는 경향이 나타났기 때문이었다. 따라서 현 단계에서 NONSTA-VP를 사용하여 강화크립을 평가한 결과는 구하여진 값 자체에는 의미를 부여하기가 어렵고 상수에 따른 거동 양상을 확인할 수 있었던 것이었고 향후 보다 적절한 재료상수들을 구하여 재해석을 수행할 필요가 있다. 그림 20은 여러가지 해석모델을 사용하여 구한 배관의 외면에서 응력-변형률 선도를 비교한 결과를 보여주고 있다. NONSTA-VP 결과는 데이터 2를 사용한 결과만 포함하였고 앞에서 논한 것과 같이 각 해석모델의 장단점을 잘 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Core Stress 개념을 적용한 강화크립 평가 방법을 분석하고 적용 기술을 정립하였고 미국, 영국, 프랑스, 일본에서 강화크립을 다루고 있는 방법을 간략히 소개하였다. 인장하중을 받는 배관에 고온유지시간을 갖는 열과도하중이 작용하는 경우에 대하여 탄성해석을 이용한 단순평가방법

으로 강화크립을 구하고 이를 등방경화, 이동경화, 결합경화모델과 통합점소성모델을 이용한 상세 비탄성해석을 수행한 결과와 비교하였다. Core Stress 개념을 적용한 단순평가방법으로 구한 강화크립 변형률이 보수적인 결과인 점을 확인하였지만 단순평가방법을 좀더 체계화할 필요성이 있고 통합점소성모델을 사용한 경우는 구성식의 재료상수 영향이 큰 것으로 나타나서 신뢰성이 높은 재료상수를 구하여 재해석을 수행해야 할 필요성이 대두되었다.

강화크립은 소성 라체팅과 동시에 발생하기 쉽기 때문에 향후 보다 다양한 고온구조물과 운전환경에 대하여 상세 비탄성해석을 수행하여 타당성을 분석하고 또한 Core Stress 개념을 적용한 단순평가방법의 적용절차를 보다 체계화하고 평가의 보수성을 분석할 예정이다. 영국, 프랑스 및 일본과 같은 이 분야 기술 선진국들은 현재에도 고온 구조물에 있어서 강화크립 평가의 중요성을 인식하여 기술 개선에 많은 노력을 기울이고 있는데 우리도 선진국들의 연구 동향을 적용하여 국내의 기술기준을 향상시키기 위한 연구노력을 기울일 예정이다.

6. 참고 문헌

[1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Div. 1, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, ASME, (2001).

[2] J.S.Porowski, M.L.Badlani, and W.J.O'Donnell, "Bounds on Creep Ratchetting in ASME Code", pp19-30, PVP Vol.163, ASME, 1989

[3] J.S.Porowski, W.J.O'Donnell, "Creep Ratchetting Bounds Based on Elastic Core Concept", L10/3, Transactions of the SMiRT Conference, Berlin, 1979

[4] G. Breitbach, et.al, "Experimental and Theoretical Work for the Analysis of Creep Ratchetting and Creep Buckling of HTR Components", pp183-190, Proceedings of a Specialists Meeting held in Cracow, IWG on

GCR, IAEA, 1988
[5] 이재한 외, 액체금속로 설계기술개발 - 기계설계기술개발, KAERI/RR-2215/2001, 한국원자력연구소, 2001
[6] ANSYS Users Manual for Revision 6.2, 2002
[7] R.A..Ainsworth, et.al., An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures (R5), Nuclear Electric Ltd, UK, 1998
[8] Structural Design Guide for Class 1 Components of Prototype Fast Breeder Reactor for Elevated Temperature Service, PNC N241 84-08 TR, PNC, 1984
[9] RCC-MR : Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, section 1 – Subsection B: Class 1 Components, AFCEN, 1993
[10] ABAQUS Users Manual for Revision 6.2, 2002
[11] H. Riedel, Fracture at High Temperatures, Springer-Verlag, 1987
[12] J. L. Chaboche, "Cyclic Viscoplastic Constitutive Equations, Part I : A Thermodynamically Consistent Formulation," J. Appl. Mech., Vol. 60, p. 813, 1993.
[13] 액체금속로 고온구조 설계해석을 위한 NONSTA 코드개발, KAERI/TR-1256/99, 1999
[14] J.Lemaitre and J.L.Chaboche, Mechanics of Solid Materials, Cambridge Univ Press, 1985
[15] Schwertel, J. and Schinke, B., "Automated Evaluation of Material Parameters of Viscoplastic Constitutive Equations," Journal of Engineering Material and Technology, v.118,(1996).

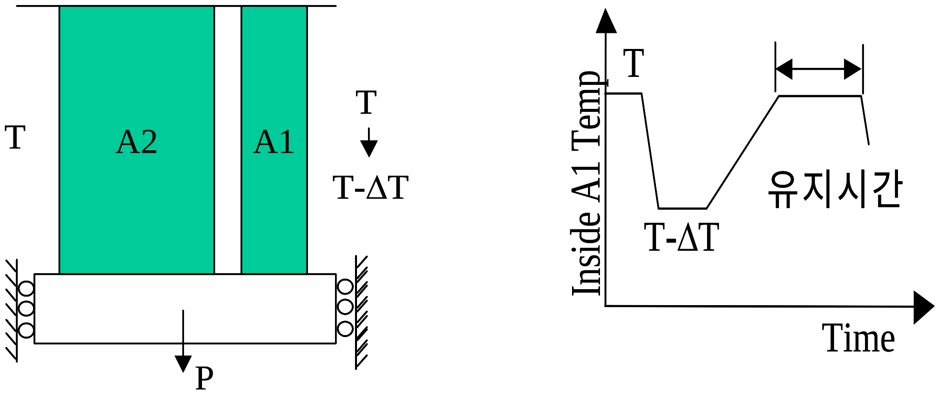

그림 1. 강화크립 발생 모델 및 하중 상태

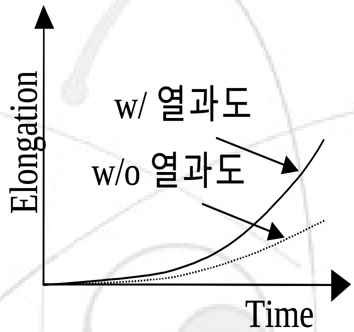

그림 2. 강화크립으로 인한 변형 증가 비교

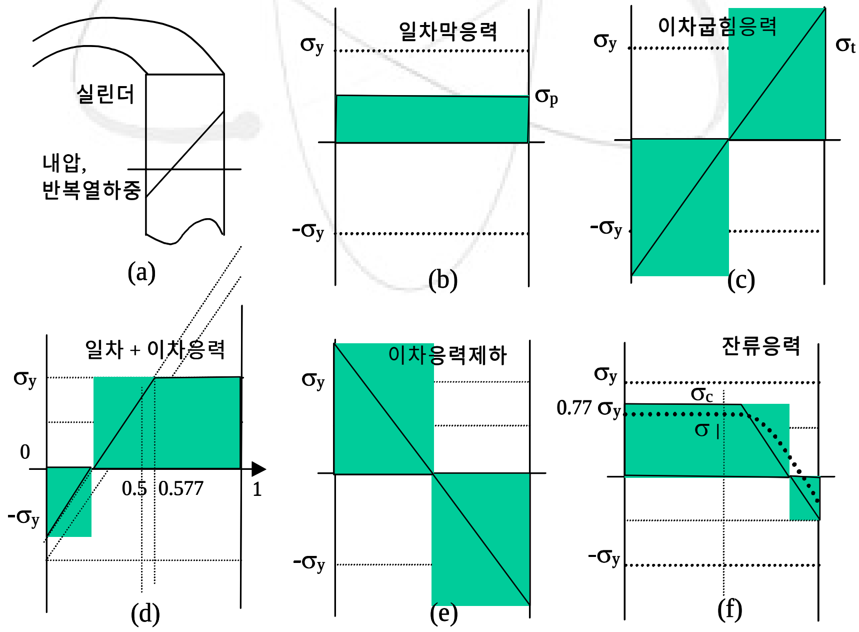

그림 3 S1영역에서 Core Stress 및 완화

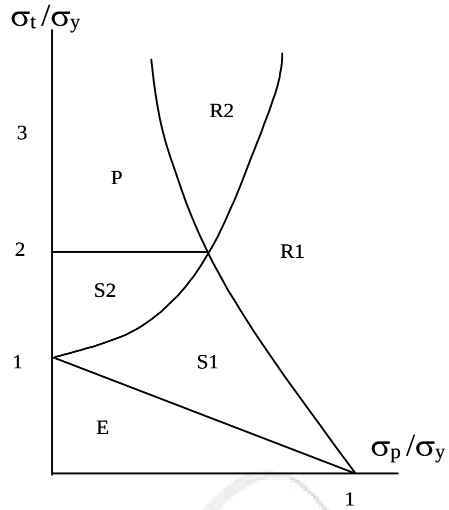

그림 4. 등가크립계수결정선도

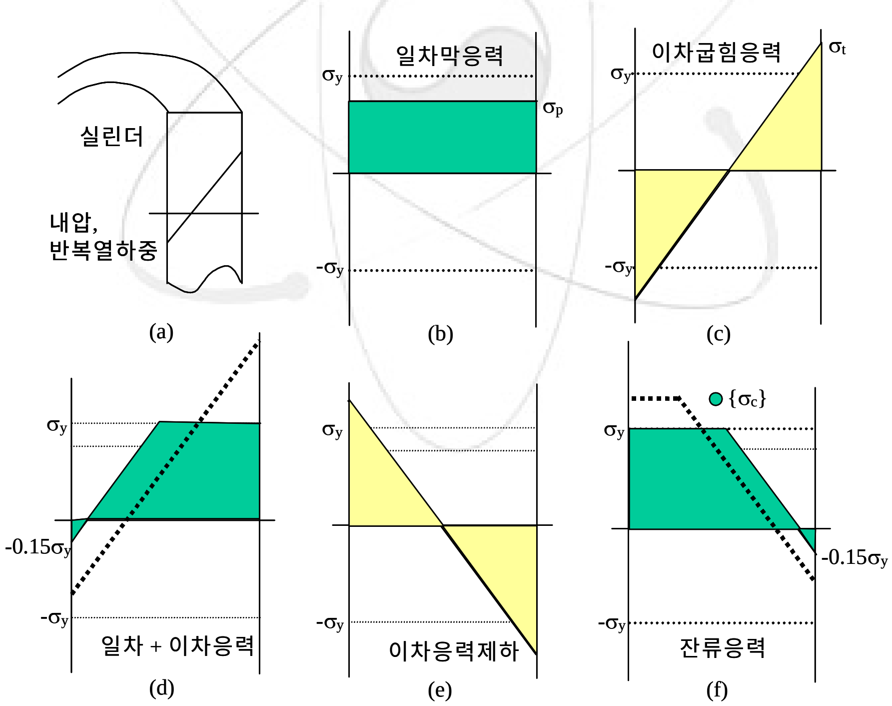

그림 5 R1영역에서 Core Stress 및 완화

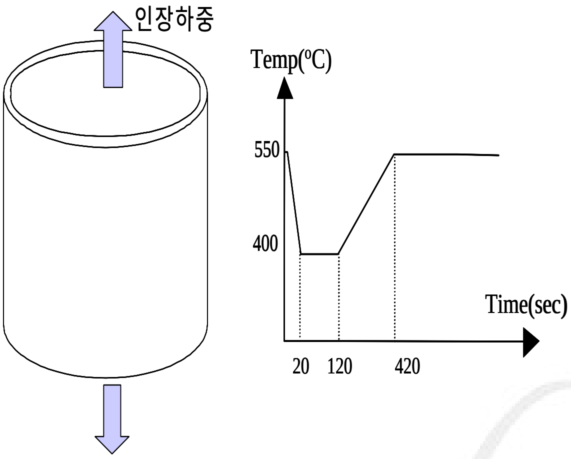

그림 6. 강화크립 해석 모델

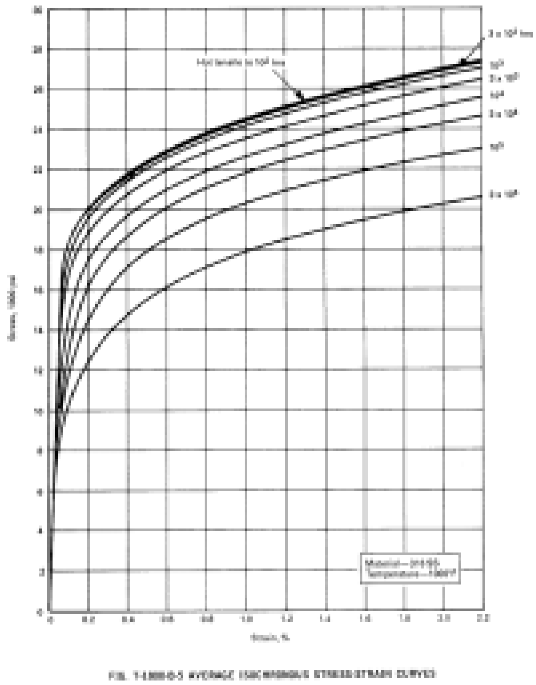

그림 7. 등시 응력-변형률곡선 (316SS, 530°C)

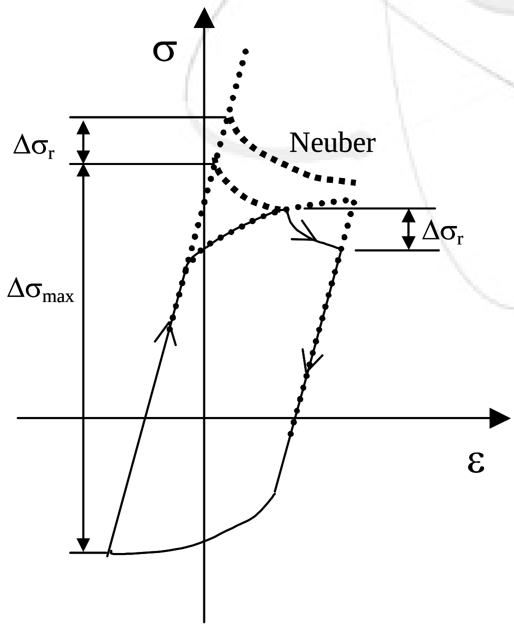

그림 8. 크립을 고려한 비탄성변형률 결정

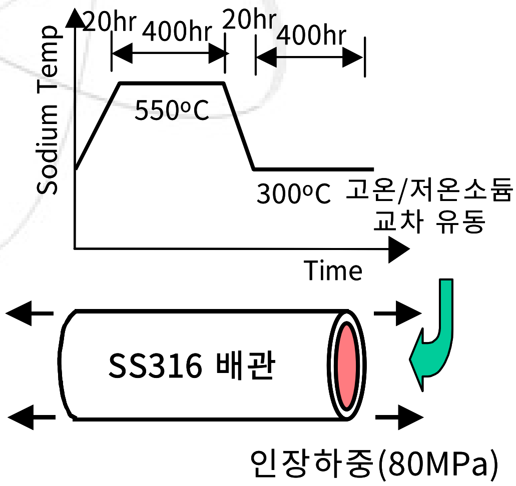

그림 9. 강화크립 해석모델

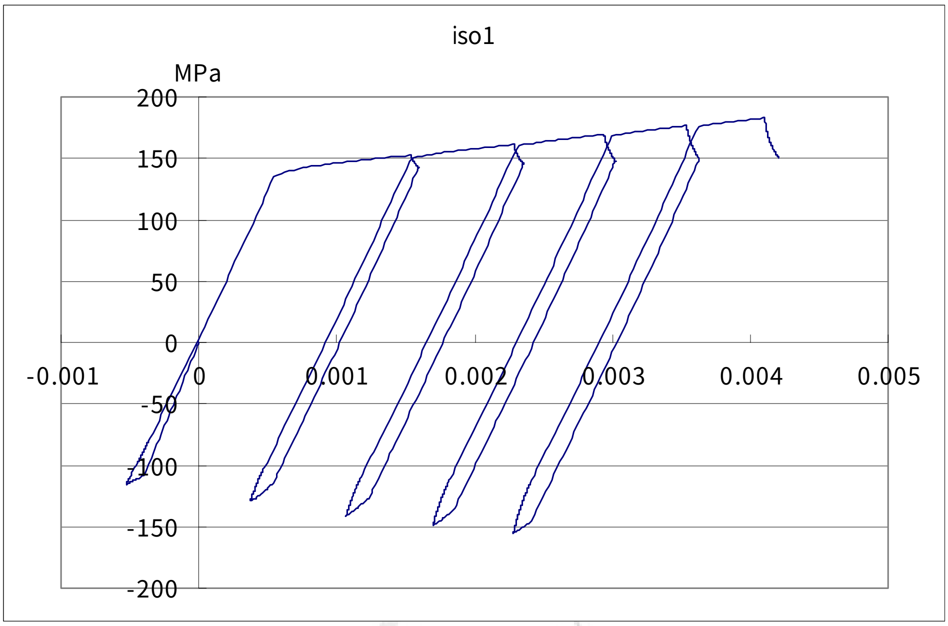

그림 10. 배관 내면의 축방향 응력-변형률 (등방경화모델)

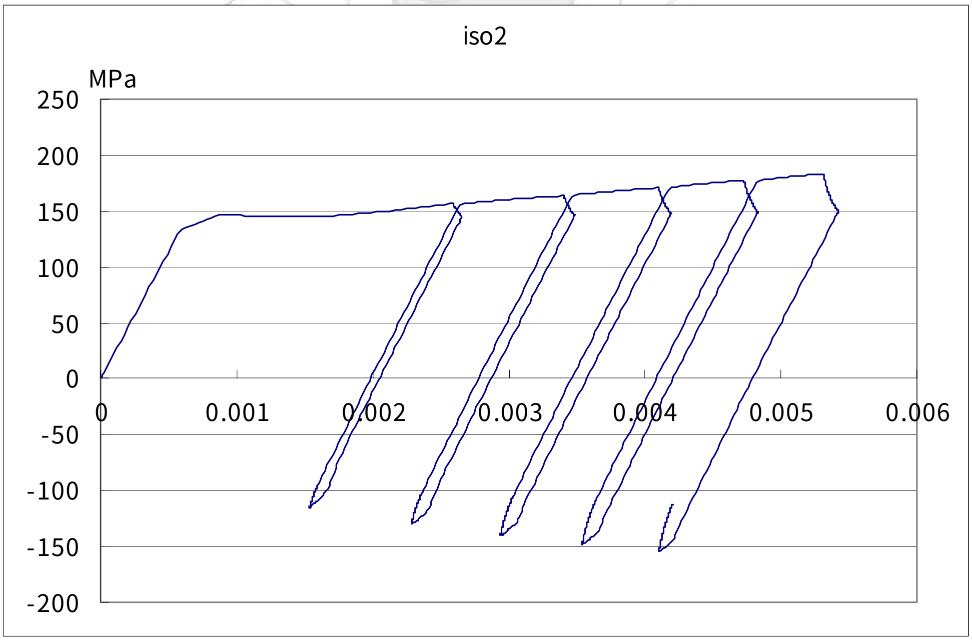

그림 11. 배관 외면의 축방향 응력-변형률 (등방경화모델)

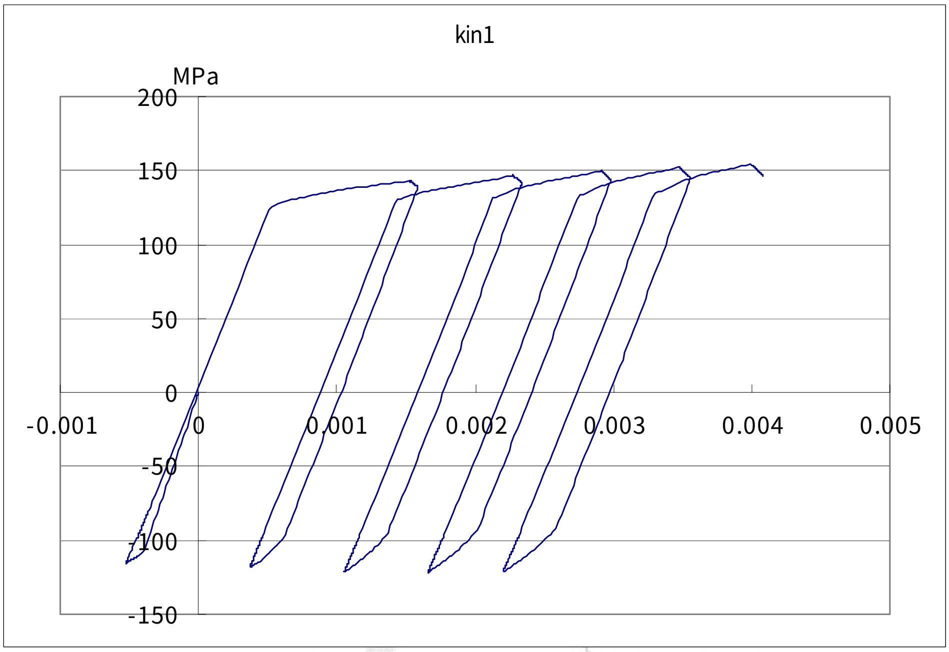

그림 12. 배관 내면의 축방향 응력-변형률 (이동경화모델)

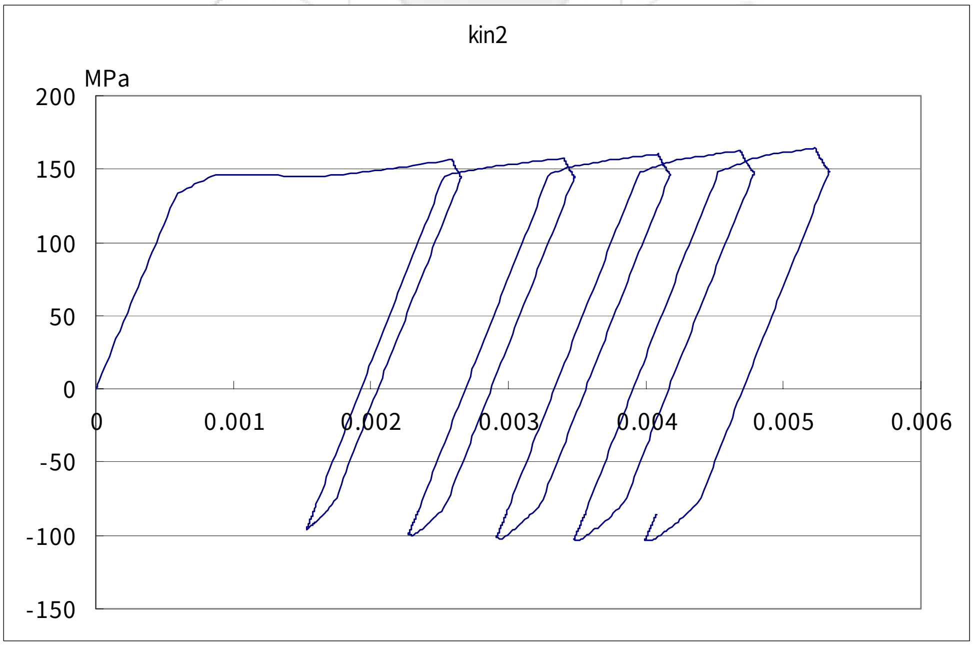

그림 13. 배관 외면의 축방향 응력-변형률 (이동경화모델)

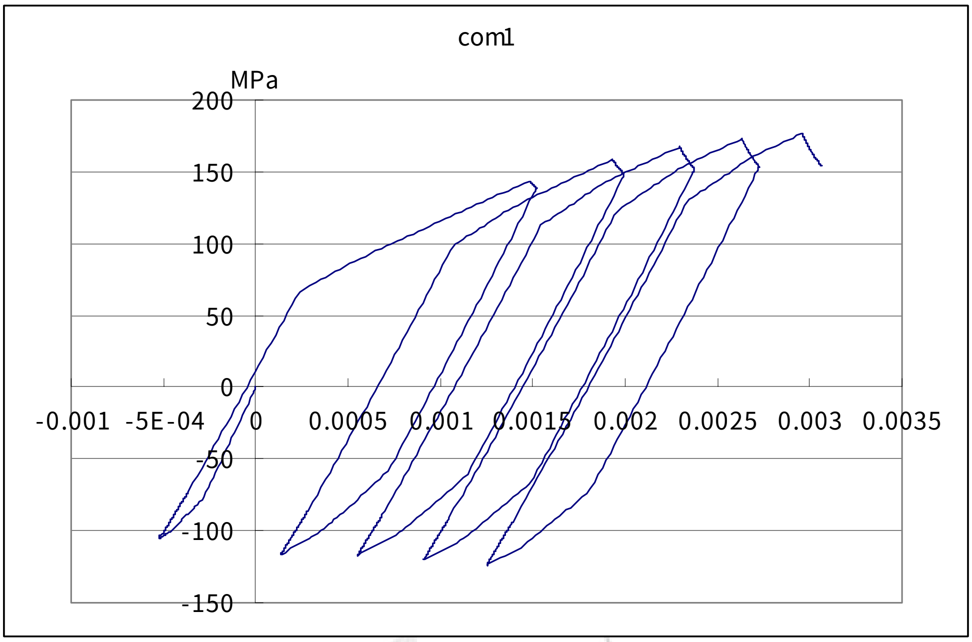

그림 14. 배관 내면의 축방향 응력-변형률 (결합경화모델)

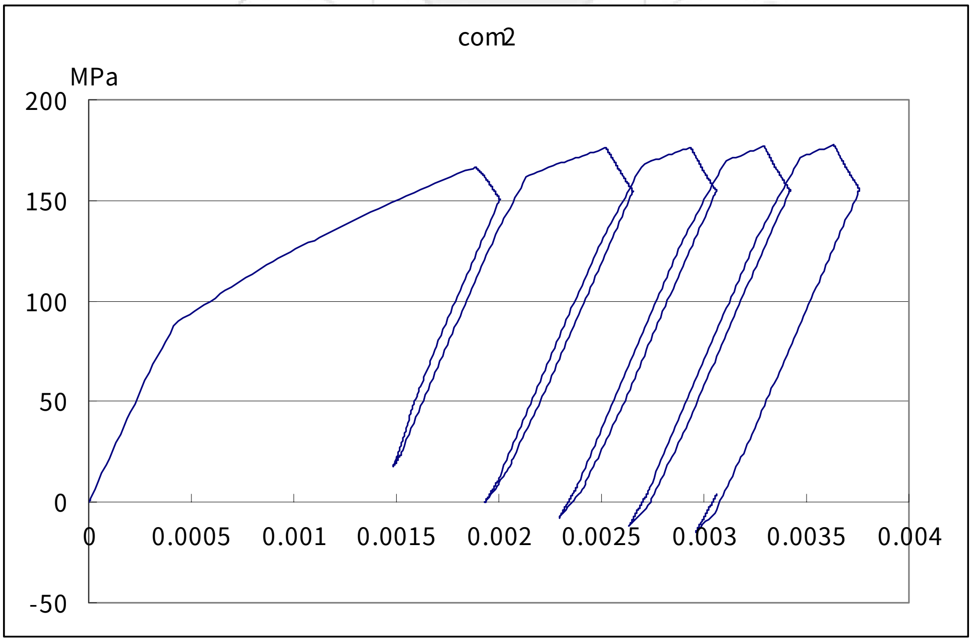

그림 15. 배관 외면의 축방향 응력-변형률 (결합경화모델)

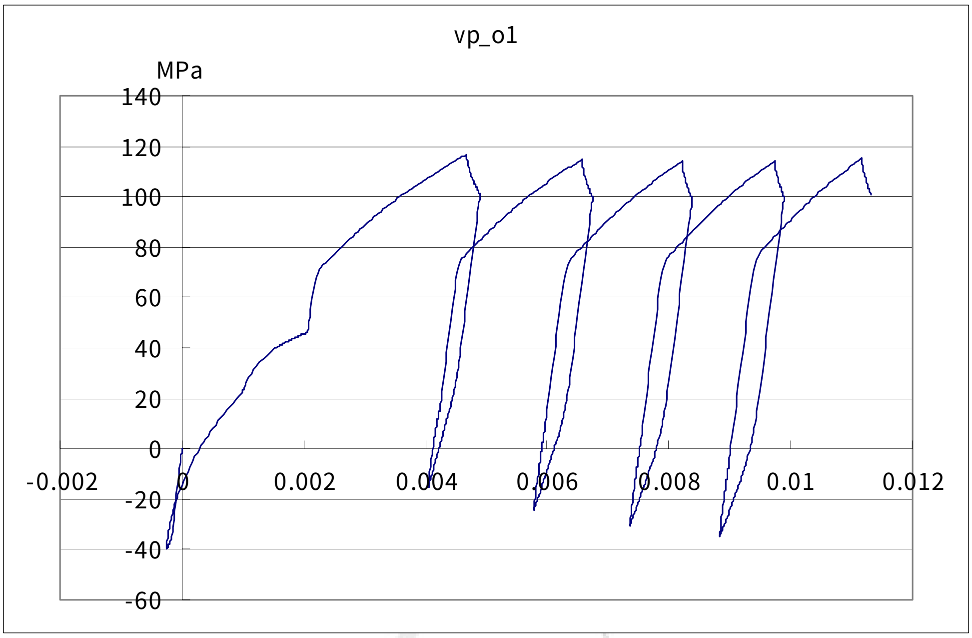

그림 16. 배관 내면의 축방향 응력-변형률 (VP모델, 데이터1)

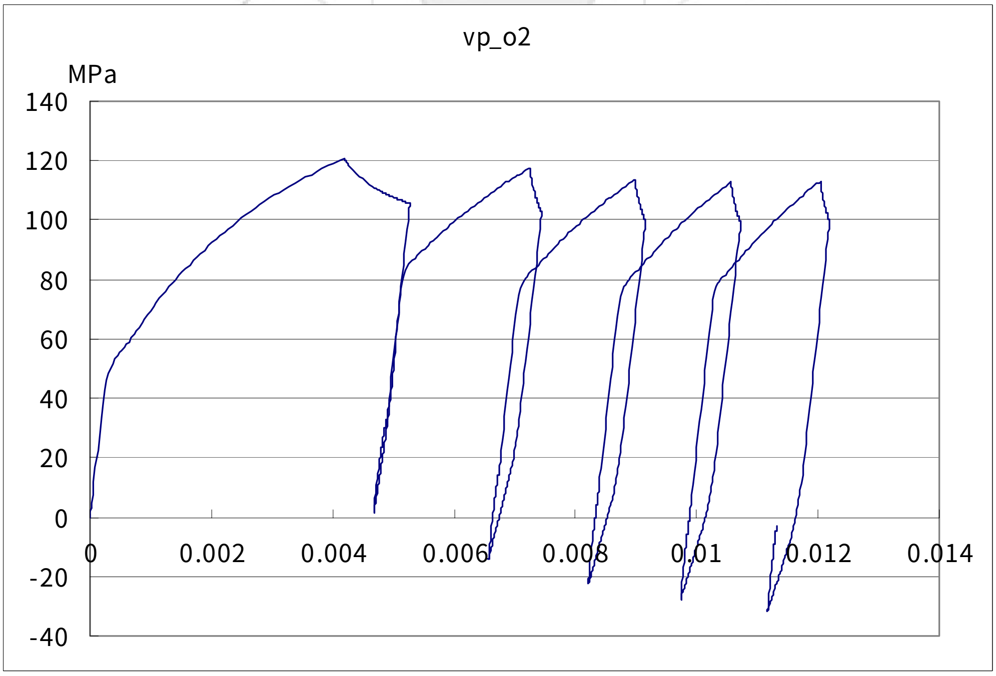

그림 17. 배관 외면의 축방향 응력-변형률 (VP모델, 데이터1)

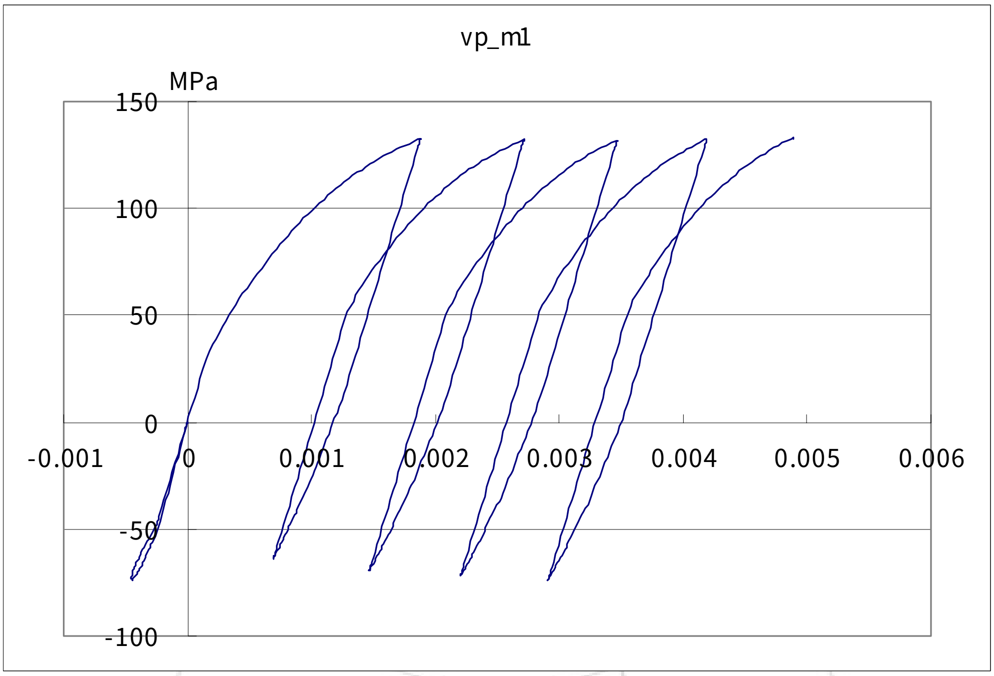

그림 18. 배관 내면의 축방향 응력-변형률 (VP모델, 데이터2)

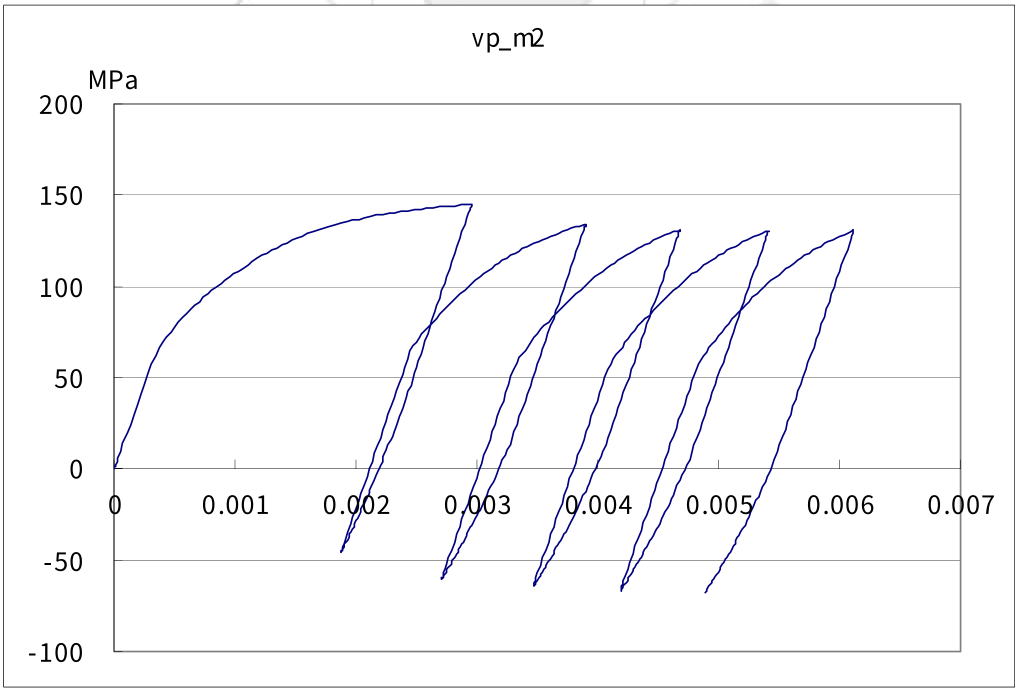

그림 19. 배관 외면의 축방향 응력-변형률 (VP모델, 데이터2)

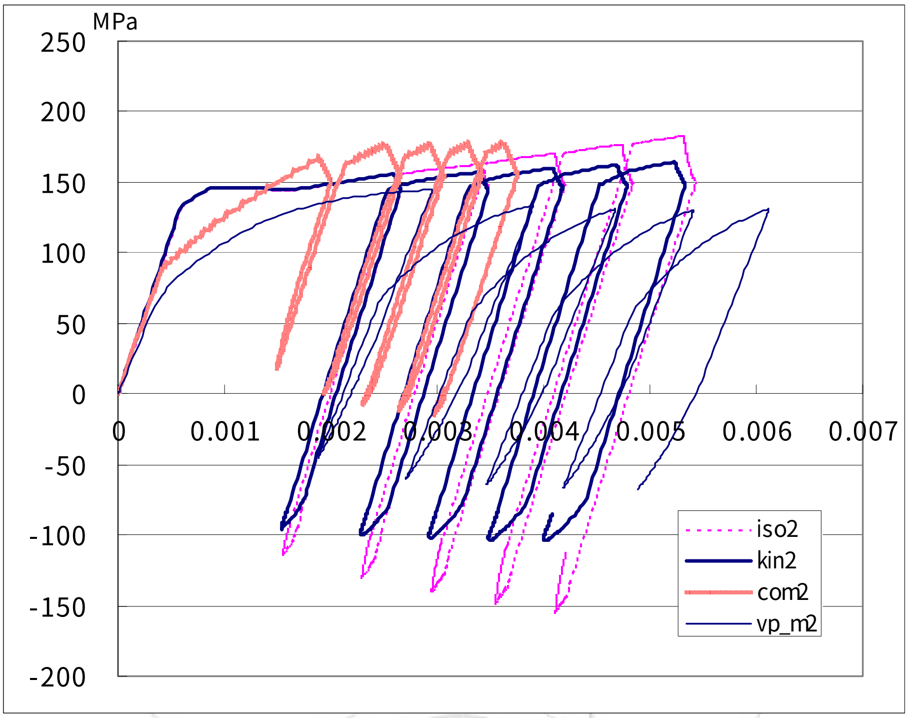

그림 20. 배관 외면의 축방향 응력-변형률 비교

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2451/2003			

제목/부제	Enhanced Creep 기구분석 및 평가
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	김종범 / 액체금속로 기계설계기술개발
연 구 자 및 부 서 명	이형연, 이종민, 이재한/액체금속로 기계설계기술개발

출판지	한국, 대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2003.3.
페이지	30 p.	도 표	있음(V), 없음( )	크 기	26cm
참고사항					

비밀여부	공개(V), 대외비( ), __ 급비밀	보고서종류	기술보고서
연구위탁기관		계약 번호	

초록 (15-20줄내외)

액체금속로의 고온구조물들은 530~550°C의 고온 소듐 운전 환경으로 인해 소성변형과 크립변형에 의한 비탄성병형을 하게 된다. 과도한 열 이차응력이 반복적으로 작용할 때 소성변형이 발생하여 하중 사이클마다 반복적으로 누적되는 현상을 열라체팅이라 하고, 또한 장시간의 고온유지시간 동안 크립변형이 발생하여 응력완화와 재분포 및 진행성변형과 연계되어 일차응력만 작용하는 경우보다 크립변형을 증가하게 되는 강화크립이 발생할 수 있다. 소성 라체팅과 강화크립이 동시에 발생하는 현상을 크립-라체팅이라 하고 고도의 비탄성 거동이기 때문에 고온구조 설계해석에서 적절한 평가를 위한 기술을 축적해야 한다.

본 연구에서는 Core Stress 개념을 적용한 강화크립 평가 방법을 분석하고 적용 기술을 정립하였고 인장하중을 받는 배관에 고온유지시간을 갖는 열과도하중이 작용하는 경우에 대하여 탄성해석을 이용한 단순평가방법으로 강화크립을 구하고 이를 등방경화, 이동경화, 결합경화모델과 통합점소성모델을 이용한 상세 비탄성해석을 수행한 결과와 비교분석하였다. 향후 보다 다양한 고온구조물과 운전환경에 대하여 상세 비탄성해석을 수행하여 타당성을 분석하고 또한 Core Stress 개념을 적용한 단순평가방법의 적용절차를 보다 체계화하고 평가의 보수성을 분석할 예정이다.

주제명키워드 (10단어내외)	액체금속로, 강화크립, 라체팅, 중심응력

<table>
<tr><th colspan="8">BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET</th></tr>
<tr><td colspan="2">Performing Org.
Report No.</td><td colspan="2">Sponsoring Org.
Report No.</td><td colspan="2">Standard
Report No.</td><td colspan="2">INIS Subject
Code</td></tr>
<tr><td colspan="2">KAERI/TR-2451/2003</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Title/
Subtitle</td><td colspan="7">On the Analysis and Evaluation of Enhanced Creep Behavior of LMFBR Structure</td></tr>
<tr><td colspan="2">Project Manager and Department (Main Author)</td><td colspan="6">Jong-Bum Kim/LMR Mechanical Structure Design Development</td></tr>
<tr><td colspan="2">Researcher and Department</td><td colspan="6">H.Y.Lee, J.M.Lee, J.H.Lee/LMR Mechanical Structure Design Development</td></tr>
<tr><td>Pub.Place</td><td>Taejon, Korea</td><td>Publisher</td><td colspan="2">KAERI</td><td>Pub.Date</td><td colspan="2">2003.3.</td></tr>
<tr><td>Page</td><td>30 p.</td><td>Fig. & Tab.</td><td colspan="2">Yes(V), No ( )</td><td>Size</td><td colspan="2">26cm</td></tr>
<tr><td>Note</td><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td>Classified</td><td colspan="3">Open(V), Restricted( ),
___ Class Document</td><td>Report Type</td><td colspan="3">Technical Report</td></tr>
<tr><td colspan="2">Sponsoring Org.</td><td colspan="2"></td><td>Contract No.</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="8">Abstract (15-20 Lines)</td></tr>
<tr><td colspan="8">High temperature structures of LMR experience inelastic deformation shuch as plasticity and creep due to high temperature operating temperature of 530~550°C. The generated creep strains are connected with the stress relaxations, redistributions and/or progressive deformations. The superposition of primary and secondary stresses may lead to enhanced creep deformations. The term ‘creep ratchetting’ refer to the phenomenon where enhanced creep occurs with plasticity ratcheting. Ther interchange of elastoplastic and creep strains is important for its understanding. Since creep ratcheting is highly nonlinear structural behavior, it is required to secure the proper analysis technique to evaluate inelastic strain due to enhanced creep.

In this project, the simplified evaluation method for enhanced creep using Core Stress concept was investigated and the enhanced creep of pipe subjected to sustained axial tensile loading and transient thermal loading with hold time was evaluated using several analysis models; that is, isotropic hardening model, kinematic hardening model and combined hardening model with Norton’s power law creep equation. In addition, the viscoplastic analysis using NONSTA-VP was performed for comparisons. The simplified evaluation method using Core Stress concept yields conservative result as expected. It is necessary to systematize the simplified evaluation procedure, to analyze the conservatism of the method, and to improve the inelastic analysis techniques including NONSTA-VP.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Subject Keywords
(About 10 words)</td><td colspan="6" rowspan="2">LMR(Liquid Metal Reactor), Enhanced Creep, Ratchetting, Core Stress</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
</table>