'2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

반복 크립하중을 받는 고온 구조물의 비탄성해석 비교분석

Comparison Study of Inelastic Analyses for High Temperature Structure subjected to Cyclic Creep Loading

김종범, 이형연, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로의 구조물은 고온 환경에서 소성 및 크립과 같은 비탄성 변형을 겪게 되어 이를 신뢰성 있는 수치해석 방법을 적용하여 모사할 필요성이 대두된다. 기존의 범용 유한요소해석코드 들은 여러가지 소성 모델들을 제공하고 있어 이들과 크립 구성식을 연계한 분리형 점소성 구조해석이 가능하다. 본 연구에서는 Chaboche 통합형 점소성 구성식을 ABAQUS의 부프로그램으로 개발하고(NONSTA-VP) 원형 구멍을 갖는 평판에 5 사이클의 크립하중을 적용한 점소성 해석을 수행하였다. 해석 결과를 ABAQUS에서 제공하는 등방경화모델, 선형이동경화모델, 결합경화모델과 Norton's Power Law 크립과 연계한 분리형 점소성 해석과 비교 분석한 결과, 통합형 점소성 해석이 고온 유지시간 동안 응력완화 현상과 크립변형 발생을 뚜렷하게 모사하고 또한 발생한 응력범위와 변형률범위의 값이 작아져서 구조물의 크립피로 손상 평가시 탄성해석법에 의한 방법보다 보수성을 크게 줄일 것으로 예측된다.

Abstract

It is necessary to develop a reliable numerical analysis method to simulate the plasticity and creep behavior of LMR high temperature structures. Since general purpose finite element analysis codes such as ABAQUS and ANSYS provide various models for plastic hardening and creep equation of Norton's power law, it is possible to perform the separate viscoplasticity analysis. In this study, the high temperature structural analysis program(NONSTA-VP) implementing Chaboche's unified viscoplasticity equation into ABAQUS has been developed and the viscoplastic response of the 316 SS plate having a circular hole subjected to a cyclic creep loading has been analyzed. The results among the separate viscoplasticity analyses and the unified viscoplasticity analysis using NONSTA-VP have been compared and the results from NONSTA-VP shows remarkable responses of stress relaxation and creep behavior during hold time compared to those from separate viscoplasticity analyses. Also, it is anticipated to reduce the conservatism arising from using elastic approach for creep-fatigue damage analysis since the stress range and the strain range from the unified viscoplasticity analysis has been greatly reduced compared to those from separate viscoplasticity analyses and elastic analysis.

1. 서　론

액체금속로의 고온 구조물들은 운전상태에 따라 복잡한 하중이력을 경험하게 되며 고온 구조물에 사용되는 대부분의 금속 재료들은 고온 환경 하에서 확산(Diffusion), 전위활주(Dislocation Glide) 등과 같은 온도 의존성 변형 기구가 작동되면서 복잡한 변형 양상을 보인다. 또한 입계 강도의 변화, 변형시효 및 석출물 등으로 인하여 금속학적으로 불안정해질 뿐만 아니라, 재료 내부에 발생된 캐비티(Cavity)가 반복 하중에 의한 피로 균열과 결합하면서 수명이 급격히 감소하게 된다[1]. 따라서 고온 구조물의 신뢰성 있는 안전성 평가를 위해서는 체계적인 고온 구조 해석기술의 확립이 우선적으로 요구된다.

고온에서의 재료 거동을 예측하기 위한 구성방정식 모델은 분리형 점소성모델(Separate Viscoplasticity Model)과 통합 점소성 모델(Unified Viscoplasticity Model)로 구분된다. 분리형 모델은 소성변형과 크립 변형을 분리해서 취급할 수 있다는 고전적인 가정에 바탕을 두고, 소성변형과 크립 변형에 대해서 각각의 구성방정식을 별도로 적용하는 모델로, 304 스테인레스강과 316 스테인레스강에 대한 ORNL(Oak Ridge National Laboratory) 모델[2]이 여기에 해당된다. 이와는 달리 통합 점소성 모델은 소성변형과 크립변형을 물리적으로 동일한 발생기구에 의해서 생겨나는 비탄성 변형으로 가정하고 하중상태와 상태변수(Internal State Variable)들의 동적 특성 및 내부이력에 의한 변화를 시간 적분법에 의하여 계산하는 모델이다. 이러한 통합 점소성 모델은 최근까지도 많은 연구자들에 의하여 개발되고 있는데, 현재까지 개발된 모델들은 대개 항복조건의 유무에 의하여 크게 두가지로 분류될 수 있다.

먼저 Perzyna[3], Phillips 와 Wu[4], Robinson[5], Chaboche[6~8] 등에 의해서 개발된 모델들은 항복조건을 갖는 통합 점소성 모델로서 일정한 응력상태 하에서만 비탄성 변형이 생겨나는 것으로 가정한 모델이다. 반면에, Bodner 와 Partom[9], Miller[10], Stouffer 와 Bodner[11] 등에 의해서 개발된 모델들은 항복조건을 갖지 않는 모델로서 낮은 응력상태 하에서도 비탄성 변형을 가질 수 있게 구성되어져 있다. 또한 이러한 모델 이외에도 다른 형태의 모델들이 많은 연구자들에 의하여 제안된 바 있으며, 기존의 모델을 부분적으로 수정 보완한 모델들도 발표되었다[12~13]. 이러한 통합 점소성 모델의 경우에는 하중이력에 따른 상태변수들의 동적 특성 및 내부이력을 계산해야 하므로 분리형 모델에 비하여 계산량이 많아 비효율적이며, 또한 유한요소해석에 적용하기에 어려움이 있지만, 재료의 실제 거동을 정확하게 모사할 수 있는 장점이 있다.

이와 같이 많은 통합 점소성 모델들이 개발됨으로 인하여 각각의 모델들에 대한 비교 연구와 수치해석적 방법에 의한 비탄성해석에의 적용에 관한 연구도 활발히 진행되었다. Chernocky[14]는 단순하중(Monotomic Loading)과 제하(Unloading) 조건에 대한 통합 점소성 모델들간의 비교연구를 수행한 바 있다. 또한 Abdel-Kader[15]는 Inconel 718 을 사용하여 Chaboche, Bodner-Partom 및 Walker 모델에 대해서 실험결과와 각 이론에 의한 예측결과를 비교하였고, Inoue 등[16]은 크롬-몰리강에 대해서 여러가지 모델들의 다축 거동을 실험 결과와 비교하였다.

한편, 이러한 통합점소성 모델들을 수치해석적 방법에 의해서 비탄성해석에 적용하기 위한 연구도 활발히 진행되었다. Krieg, Schreyer, Yoder, Oritz, Nagtegaal 등은 탄성예측 소성보정법(Elastic Predictor Plastic Corrector Algorithm)을 적용하여 통합 점소성 모델의 구성방정식을 구현하였으며, Tanaka 와 Miller[17]는 Miller 의 통합 점소성 모델에 대해서 시간적분법을 적

용하여 NONSS(non-linear system solver)를 개발한 바 있고, Honberger 등[18]은 GMR(generalized mid-point rule) 시간적분법과 투사법(projection method)을 사용하여 Robinson 통합 점소성 모델을 ABAQUS 의 UMAT 으로 구현한 바 있다.

본 연구에서는 Chaboche 통합 점소성 구성식을 범용유한요소 프로그램인 ABAQUS 의 부프로그램으로 구현하여 개발한 NONSTA-VP 코드를 사용하여 통합형 점소성해석을 수행하고 해석 결과를 분리형 점소성해석과 비교 분석하였다.

2. 본 론

고온에서 크립변형이 발생하는 액체금속로 구조물을 탄성해석방법에 의해 설계할 때 과도한 보수성을 갖게 되고 또한 때로는 ASME Subsection NH 와 같은 설계지침서의 요건을 만족시킬 수 없는 경우가 발생한다. 이때 실제 구조물이 요건을 만족시키지 못하는 것이 아니라 단지 과도한 보수성을 가진 해석방법이 문제라면 신뢰성 있는 비탄성해석을 통해 해결할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성 있는 고온구조물의 거동을 예측하기 위해 비탄성 점소성해석 프로그램(NONSTA-VP)을 개발하고[19] 이를 기존 범용 유한요소해석코드인 ABAQUS 를 이용한 분리형 점소성 해석과 비교 분석하였다.

2.1 분리형 점소성 모델

분리형 점소성 해석 모델에는 여러가지가 있는데 본 연구에서는 ABAQUS 에서 제공하는 등방경화모델, 선형 이동경화모델, 결합경화모델을 Norton's Power Law 크립과 연계하여 적용하였고 개략적인 설명은 다음과 같다.

<u>등방 경화 모델(Isotropic Hardening)</u>

항복곡면은 하나의 스칼라 경화 변수로 표현되며 그림 1 에 보인 것과 같이 그 값에 따라 모든 방향으로 같은 크기로 변한다. 등방경화의 경우에는 유동법칙을 무척 간단하게 정의할 수 있는데 물리적으로 소성변형의 중간 과정보다 금속 성형과 같이 총체적인 소성 흐름을 중시하는 경우 유용하게 사용할 수 있다.

<u>이동 경화 모델(Kinematic Hardening)</u>

일반적으로 금속은 인장하였다가 압축하면 처음 예상되었던 항복응력보다 작은 값에서 항복이 일어나는 Bauschinger 효과를 나타내는데 이는 이동경화를 사용하여 그림 2 와 같이 표현될 수 있다. 그림 2 에 나타낸 선형 이동경화는 항복곡면의 이동을 표현하고 있고 다음 식으로 표현된다.

$$f = f_Y(\boldsymbol{s} - X) - \boldsymbol{k} \qquad (1)$$

여기서 X 는 경화변수로 현재 항복곡면의 위치를 나타내는 역응력(Back Stress) 텐서이고 κ는 현재상태에서 순수한 탄성 응답 영역의 크기를 나타낸다. 선형 이동 경화 모델에서 역응력은 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{X} = C\frac{1}{\boldsymbol{k}}(\boldsymbol{s} - X)\dot{\bar{e}}^{pl} \qquad (2)$$

여기서 C 는 이동경화 변수이고 $\dot{\bar{e}}^{pl}$ 는 등가 소성변형률속도를 나타내고 κ는 탄성응답영역

의 크기를 나타내는데 선형 이동 경화 모델에서 이 값은 소성변형이 없는 초기 항복 응력값 σ_Y 와 같다.

<u>결합 경화 모델(Combined Hardening Model)</u>

응력공간에서 역응력을 이용한 항복곡면의 이동을 모사하는 비선형 이동경화모델과 탄성응답영역의 크기를 정의하는 등가응력의 변화량을 소성변형의 함수로 모사하는 등방경화모델을 결합한 모델이다. Ziegler 의 선형이동경화와 비선형을 도입하기 위해 완화를 나타내는 항을 추가한 역응력의 발전식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = C\frac{1}{k}(s - X)\dot{e}^{pl} - g\,X\dot{e}^{pl} \tag{3}$$

여기서 C와 γ는 재료상수로써 재료의 반복응답시험 결과를 적용하여 구해야 하며 C는 초기 이동경화 계수를 나타내고 γ는 소성변형이 증가함에 따라 이동경화 계수가 감소하는 속도를 나타낸다. 여기서 γ가 영이면 선형이동경화모델이 되고 C와 γ가 모두 영이면 등방경화모델이 됨을 알 수 있다. 탄성응답영역의 크기를 등가 소성변형률의 함수로 등방경화계수 κ는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$k = s_Y + Q_\infty\left(1 - e^{-b\bar{e}^{pl}}\right) \tag{4}$$

여기서 Q_∞와 b는 재료상수인데 Q_∞는 그림 3에 보인 것과 같이 탄성범위 크기의 최대 변화를 나타내고 b는 소성변형이 발전함에 따라 탄성범위의 크기가 변하는 속도를 나타낸다. 등방경화계수 κ가 초기 항복응력값인 σ_Y와 같다면 결합경화모델은 이동경화모델과 같아지게 된다. 그림 3에서 역응력은 소성변형이 큰 포화상태에서의 값인 X^s의 $\sqrt{2/3}$배를 반경으로 한 실린더 영역에 놓이게 되고 응력상태는 $\sqrt{2/3}s^{\max}$를 반경으로 하는 실린더 내에 위치하게 된다.

<u>Norton's Power Law 크립</u>

크립 거동은 실제 크립실험 결과를 정확히 표현하기 위해서는 매우 복잡한 여러가지 식들을 사용할 수 있는데 본 연구에서는 가장 간단한 표현인 Norton's Power Law 크립식을 사용하였다.

$$\dot{e}^{cr} = A\bar{q}^n t^m \tag{5}$$

여기서 $\dot{e}^{cr}$은 단축 등가 크립변형률 속도를 나타내고 $\bar{q}$는 단축 등가편차응력을 나타내고 t는 시간, A, n, m은 온도의 함수인 재료상수이다.

2.2 통합형 점소성 모델

2.2.1 점소성 구성식의 일반적 형태

상태변수는 크게 외연적 상태변수(Explicit State Variable)와 내연적 상태변수(Implicit State Variable)의 두 종류로 나뉜다. 외연적 상태변수는 결정립의 크기, 석출물 방향, 전위 특성 등의 미세 구조의 세부 사항을 정의하는 데 사용된다. 미세구조를 완전히 기술하기 위해서는 많은 수의 외연적 상태변수가 필요하다. 하지만 내연적 상태변수는 미세구조 변화의 거시적 평균량으로 정의되며, 외연적 상태변수에 비하여 압도적으로 작은 수로 미세구조의 변화를 근사할 수 있다. 대부분의 구성 방정식 모델링에서는 내연적 상태변수가 사용되며, 일반적으로 상태변수라 표현함은 내연적 상태변수를 의미한다.

상태변수에 추가하여, 거시적으로 정의되거나 관찰되며, 제어 혹은 측정되는 외부변수들이 있다. 이러한 외부변수들은 변형하는 재료 상태변수와 연관되어 있다. 전형적인 외부변수로는 응력, 압력, 변형률, 변형률 속도, 비탄성 변형률 속도, 일, 변형률 에너지 밀도, 온도 등이 있다.

상태변수를 사용한 구성식 모델링의 목적은 외부변수와 상태변수와의 상관관계를 유도하는 데 있다. 이 상관 관계로부터 변형 이력중의 비탄성 변형률 속도(Inelastic Strain Rate)를 유도할 수 있게 된다. 현재 상태의 비탄성 변형률 속도는 기계적, 열적 하중과 현재 상태의 상태변수들에 의하여 결정된다. 모든 변형 이력은 미세 구조의 현재 상태에 의해 기술된다는 가정에 기인한다. 따라서 상태변수들은 반드시 미세구조의 변화를 고려하기 위하여 연속적으로 수정되어야 하며 현재의 미세 구조와 이전의 변형 이력의 관계는 상태변수의 발전을 통하여 모델에 포함된다.

수학적으로 상태변수를 이용한 모델링은 다음의 세가지 형태의 방정식으로 기술된다.

a. 변형률 분리(Kinematic Equation)
b. 유동 법칙(Kinetic Equation)
c. 상태변수의 발전 방정식(Evolution Equations)

전체 변형률 속도($d\boldsymbol{\varepsilon}$)는 작은 변형률(Small Strain) 가정하에서 탄성 변형률($d\boldsymbol{\varepsilon}^{e}$)과 비탄성 변형률($d\boldsymbol{\varepsilon}^{p}$), 그리고 열변형률($d\boldsymbol{\varepsilon}^{th}$)로 분리할 수 있다.

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}^{e} + d\boldsymbol{\varepsilon}^{p} + d\boldsymbol{\varepsilon}^{th} \tag{6}$$

이 식을 속도 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{e} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th} \tag{7}$$

분리된 변형률은 각각 다른 상태 변수들의 함수로 정의된다. 먼저 소성 변형률 속도는 유동법칙에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p}(\boldsymbol{\sigma}, \xi) \tag{8}$$

여기서 ξ 는 내부 상태 변수를 의미한다. 예를 들어 Power Law creep 의 경우 유동 법칙은 다음과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} = \frac{3}{2} A \left(\sigma_{eq}\right)^{n-1} \boldsymbol{\sigma}' \tag{9}$$

여기서 $\boldsymbol{\sigma}'$ 와 σ_{eq} 는 편차 응력과 Mises 등가 응력을 의미한다. 열변형률 속도는 일반적으로 현재의 온도와 온도 변화 속도에 비례한다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th} = \boldsymbol{\alpha}(T)\dot{T} \tag{10}$$

여기서 $\alpha(T)$는 온도에 의존하는 열팽창 계수를 의미한다. 비탄성 변형률과 열변형률이 정의되면 탄성 변형률은 그 차로써 정의된다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{e} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p}(\boldsymbol{\sigma}, \xi) - \boldsymbol{\alpha}(T)\dot{T} \tag{11}$$

위 식을 일반적인 함수 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{e} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{e}\left(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\xi}\ ; \boldsymbol{\varepsilon}, T, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \dot{T}\right) \tag{12}$$

탄성 변형률의 독립 변수를 ‘ ; ‘ 로 분리한 것은 ABAQUS 와 같은 변위 기반 유한요소 해석 코드에서는 변위 증분이나 온도 증분이 먼저 주어지고 이에 해당하는 응력 증분을 계산하므로 온도와 변형률은 이미 알고 있는 값이고 수치적분을 통하여 계산해야 할 변수는 응력과 내부 변수 뿐이기 때문이다.

Hookes Law 는 탄성 변형률과 응력의 관계를 규정하는데 위 식과 결합하면 비탄성 변형의 경우로 확대시킬 수 있다.

$$\dot{\sigma} = \mathrm{E}(T)\cdot \dot{\varepsilon}^{e}\left(\sigma, \xi\ ; \varepsilon, T, \dot{\varepsilon}, \dot{T}\right) \tag{13}$$

여기서 E 는 탄성 강성 행렬(Elastic Stiffness Matrix)이다. 앞의 식을 외부 변수와 상태 변수들의 함수 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\sigma} = \mathrm{f}\left(\sigma, \xi\ ; \varepsilon, T, \dot{\varepsilon}, \dot{T}\right) \tag{14}$$

내부 상태 변수의 발전식은 앞의 응력의 발전식과 유사한 형태로 정의된다.

$$V = \mathrm{g}(\sigma, x\, ; e, T, \dot{e}, \dot{T}) \tag{15}$$

2.2.2 점소성 구성식을 적용한 유한요소해석 프로그램

비선형 상미방 방정식의 형태로 정리되는 구성방정식을 적분하기 위한 방법으로는 Euler Method, Runge-Kutta Method, Gear Method, Stoer-Blush Method 등이 있다. 하지만 적분 방법이 유한 요소 해석과 결합하여 사용되기 위해서는 여러가지 제한 조건에 구속을 받게 된다. 본 연구에서는 중간점 법(Generalized Midpoint Rule)을 사용하여 구성식을 선형화 하였으며 비선형 방정식을 풀기 위해 Newton 방법의 빠른 Local Convergence 와 매 반복 계산마다 해로의 수렴을 보장하는 Globally Convergent Strategy 를 결합하는 알고리즘[20]을 사용하였다. 유한요소해석 프로그램을 구성하는 상세한 설명은 기술보고서[19]에 수록되어 있다. 통합형 점소성 구성식 중에 세계적으로 가장 널리 알려진 Chaboche 모델을 선택하여 개발한 NONSTA-VP 의 주요 구성식은 다음과 같다.

<u>Chaboche 점소성 모델</u>

먼저 소성 변형률은 유동 법칙에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\varepsilon}_{p} = \dot{p}\mathrm{n} \tag{16}$$

$$\dot{p} = \left\langle \frac{J(\mathrm{s}-X) - (k + \sigma_{y})}{K} \right\rangle^{n} \tag{17}$$

$$\mathrm{n} = \frac{3}{2}\frac{\mathrm{s}-X}{J(\mathrm{s}-X)} \tag{18}$$

여기서 s 는 편차 응력 성분을 나타내며, p 는 등가소성 변형률을 나타내고 n 은 소성변형률의 방향을 나타내고, $J(\mathrm{s}-X)$는 초과응력(ovestress) $\mathrm{s}-X$ 에 대한 Mises 유효 응력을 나타내고 있다.

$$J(\mathrm{s}-X) = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathrm{s}_{\mathrm{ij}} - X_{\mathrm{ij}})(\mathrm{s}_{\mathrm{ij}} - X_{\mathrm{ij}})} \tag{19}$$

응력의 발전식은 식(20)에 의하여 정의된다.

$$\dot{\sigma} = \mathrm{E}(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^{p}) = \mathrm{E}\left\{\dot{\varepsilon} - \frac{3}{2}\left\langle \frac{J(\sigma - X) - (\kappa + \sigma_y)}{K} \right\rangle^{n} \frac{\sigma - X}{J(\sigma - X)} \right\} \quad (20)$$

이동 경화 응력의 발전식은 식(21) 에 의하여 정의된다.

$$\dot{X} = \frac{2}{3} C \dot{\varepsilon}_{p} - \gamma X \dot{p} = \left(\frac{2}{3} C \mathrm{n} - \gamma X\right) \dot{p} \quad (21)$$

등방 경화 응력의 발전식은 식(22) 에 의하여 정의된다.

$$\dot{\kappa} = b(Q - \kappa)\dot{p} \quad (22)$$

응력, 이동 경화 응력, 등방 경화 응력의 발전식을 현재의 상태변수의 형태로 입력하면 된다. 해석에는 600°C 의 316 스테인레스 강의 재료상수를 사용하였으며 재료상수는 식(16) 에서 식(22)까지 표기된 문자의 형태로 표 1 에 정리하였다.

표 1. 316 스테인레스강 Chaboche 모델의 재료 상수(600°C)

기호	재료 상수	비고	기호	재료 상수	비고
E	149.6Gpa	Young's modulus	σ_y	6	식 (17)
ν	0.309	Poisson's ratio	C	24800	식 (21)
α	1.97e-5	Thermal expansion	γ	300	식 (21)
K	150 Mpa	식 (17)	B	10	식 (22)
n	12	식 (17)	Q	80	식 (22)

구성식들을 선형화하고 유한요소해석에서 전체 시스템의 평형방정식을 풀기 위해 접선강성행렬을 구성하게 되는데 이것은 각 요소의 강성행렬을 결합한 형태이다. 비탄성해석의 경우 현재 상태에 따라 접선 강성행렬이 달라지게 되어 계산량이 많아지게 된다.

비선형 연립방정식의 해법은 다양하게 제시되어 있으나 본 연구의 목적상 임의의 비탄성 구성식의 적분을 수행할 수 있는 범용성을 갖는 뉴톤 방법을 사용하였으며 초기값이 해와 차이가 클 경우에 발산하는 뉴톤 방법의 단점을 보완하기 위하여 선 추적(Line search) 기법을 결합시켜 초기값에 무관하게 해에 접근하는 방법을 사용하였다. 이에 대한 자세한 설명은 참고문헌[19]에 잘 정리되어 있다.

2.2.3 ABAQUS 와의 연결

UMAT 모듈에 의하여 비탄성 구성식의 계산이 이루어지고 범용 유한요소 해석코드 ABAQUS[21]에서 평형 방정식을 계산하게 된다. 작성된 프로그램은 변형률 증분, 온도 증분, 변형 경사텐서(Deformation Gradient Tensor) 등을 ABAQUS 에서 넘겨 받은 후 이에 해당하는 응력 및 상태변수의 변화와 접선 강성 행렬을 계산하여 ABAQUS 에 다시 넘겨주는 역할을 수행한다. 계산 과정은 대변형을 고려하기 위하여 Jaumann Rate 를 이용하여 상태 변수들의

강체 회전(Rigid Body Rotation)을 고려한다. 그리고 외연적 방법으로 예측을 수행하여 이 값으로부터 최종점($t+\Delta t$)에서 구성식이 만족되는지 점검하고 만약 만족하지 않으면 내연적 방법을 통한 보정 계산을 수행하여 구성식을 만족시키는 상태 변수를 결정한다[22].

2.3 원형 구멍이 있는 평판의 점소성해석 비교

2.3.1 해석모델

본 연구에서는 그림 4와 같이 원형 구멍이 있는 316 스테인레스 강으로 만든 평판에 대하여 그림 5에 보인 것과 같이 상단부에 400000초의 유지시간을 갖는 변위하중을 5회 적용하여 분리형 점소성해석과 통합형 점소성 해석을 수행한 결과를 비교하였다. 범용 유한요소해석코드인 ABAQUS를 사용한 해석 모델은 가로 세로 6cm의 평판에 반경 2cm의 원형 구멍이 있는 형상으로 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 4분의 1만을 유한 요소 모델로 구성하였다. 해석에는 8절점 평면 변형률 요소를 사용하였으며 왼쪽 변은 y축에 대하여 대칭 조건을, 아래 변은 x축에 대칭인 조건을 부가하였다. 적용한 변위하중은 처음 1000초 동안 일정한 속도로 0.0035mm의 인장을 가하고 난 뒤 400,000초 동안 일정하게 유지하였다가 다음 2000초 동안 일정한 속도로 –0.0035mm의 압축으로 바뀌었다가 그 다음 1000초 동안 영으로 돌아오는 것을 한 주기로 하였고 해석에는 총 5 주기의 변위하중을 적용하였으며 550°C의 고온 상태가 유지되는 것으로 가정하였다.

등방경화모델과 이동경화모델에 적용한 재료상수는 다음과 같다. 550°C일때 316 스테인레스강의 영률은 155.3Gpa, 포와송비는 0.305, 소성변형이 없는 초기 항복응력은 124.0MPa, 제하시 0.885%의 소성변형률이 남는 응력은 179MPa, 그리고 2.1%의 소성변형률이 남는 응력은 191MPa이다. Norton's Power Law 크립 상수 A와 n은 각각 $1.6\text{x}10^{-27}\text{MPa}^{-n}\text{s-}^{1}$, 7.9 이다.

결합경화모델에 적용한 재료상수 C, γ, Q, b는 각각 40600., 139.4, 95.6, 50.4이고 Norton 의 크립식은 앞의 경우와 같고, Chaboche의 통합 점소성 구성식에 사용한 재료상수는 표 1에 나타내었다.

2.3.2 해석 결과 비교

범용 유한요소해석코드 ABAQUS의 등방경화모델을 사용한 해석결과를 그림 6 ~ 그림 9에 나타내었다. 그림 6은 5 사이클의 변위하중을 받는 평판의 원형구멍의 가장자리인 절점 1에서 y-축 응력(σ2)의 시간이력을 보여주고 있는데 변위하중 사이클이 증가함에 따라 응력이 조금씩 증가하고 하중 유지시간 동안 응력완화 경향이 뚜렷해지는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 y-축 변형률(ε2)의 시간이력을 보여주고 있는데 사이클이 증가함에 따라 변형률의 크기가 작아지며 유지시간 동안의 크립변형은 증가하는 것을 볼 수 있다. 응력과 변형률 선도를 그림 8에 나타냈는데 전형적인 주기 경화(Cyclic Hardening) 현상을 보이고 있다. 그리고 하중 사이클이 증가함에 따라 응력수준이 높아져서 고온 유지시간 동안 응력완화와 크립 발생이 현저해짐을 알 수 있다. 그림 9는 x-축 선상에서 σ2의 분포를 몇 가지 시간에서 나타내었는데 첫 사이클과 두번째 사이클 하중이 고점에 이를 때와 고온 유지시간이 끝날 때의 응력분포이다. 유지시간 동안 응력의 완화가 조금 발생함을 알 수 있고 두번째 사이클에서는 첫 사이클보다 원형 구멍 가장자리 부근에서의 응력분포가 커짐을 알 수 있다.

그림 10 ~ 그림 13은 ABAQUS의 선형 이동경화모델을 사용한 해석 결과를 보여주고 있는데 여기서 사용한 변위 제어 하중의 성격으로 인해 등방경화모델을 사용한 경우와 거의

유사한 결과를 나타내고 있다.

ABAQUS에서 제공하는 등방경화와 이동경화를 결합한 모델을 사용한 해석결과가 그림 14 ~ 그림 17에 나타나 있는데 하중 사이클이 증가함에 따라 응력범위는 336MPa에서 395MPa로 증가하고 변형률범위는 0.39%에서 0.35%로 감소하고 있고, 매 사이클마다 고온 유지시간 동안의 응력완화와 크립 발생의 범위가 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그림 17에 보인 x-축 상의 응력분포를 보여주는데 사이클이 증가함에 따라 일정한 양상으로 응력분포가 증가하고 유지시간 동안 약간의 응력완화 분포가 발생함을 볼 수 있다.

본 연구에서 Chaboche 통합 점소성 구성식을 장착하여 개발한 NONSTA-VP를 ABAQUS와 연계하여 해석한 결과를 그림 18 ~ 그림 21에 보였는데 앞에서 설명한 등방경화모델, 이동경화모델, 및 결합경화모델을 사용한 해석결과와 많은 차이가 있다. 그림 18과 그림 19에서 보인 응력이력과 변형률이력을 살펴보면 사이클이 증가함에 따라 고온 유지시간 동안 응력완화와 크립 발생이 유사한 양상을 보이고 있고 그림 20에 보인 응력-변형률 선도를 살펴보면 사이클이 증가함에 따라 응력범위는 170MPa에서 185MPa로 증가하고 있고 변형률 범위는 0.25%에서 0.23%로 감소함을 알 수 있다. 이는 등방경화모델이나 선형이동경화모델의 해석결과와 비교하면 거의 절반 정도의 수준이고 결합경화 모델과 비교하면 응력범위는 53% 작고 변형률 범위는 34% 정도 감소한 결과이다. 특히 고온 유지시간 동안의 응력완화와 크립변형 발생 양상이 뚜렷해지는데 응력은 약 30% 정도 완화되고 크립발생으로 인한 변형률은 15% 정도 증가함을 알 수 있다. 이는 평판에 일정한 속도로 변위하중을 증가시킨 후 고정시키면 평형 방정식에서 작용 힘이 상수가 되므로 이때 발생하는 변형은 강성행렬의 변화에 의존하여 구조물의 시간의존적 거동을 잘 모사할 수 있기 때문이다. 그림 21에 보인 x-축에서의 응력분포를 살펴보면 첫 사이클과 두번째 사이클에서 전체적인 응력분포가 차이가 나서 앞에서의 해석 결과들과 크게 다름을 알 수 있다. x-축에서의 응력분포가 사이클이 증가함에 따라 전체적으로 높아지고 원형 구멍 끝단에서만 고온 유지시간동안 응력의 완화가 발생함을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 액체금속로 구조물이 고온 환경에서 소성과 크립변형을 겪는 것을 보다 신뢰성 있게 모사할 수 있도록 Chaboche 통합 점소성 구성식 ABAQUS의 부프로그램으로 개발하고(NONSTA-VP) 원형 구멍을 갖는 평판에 5 사이클의 크립하중을 적용한 점소성 해석을 수행하였다. 이를 ABAQUS에서 제공하는 등방경화모델, 선형 이동경화모델, 결합경화모델과 Norton’s Power Law 크립과 연계한 분리형 점소성 해석 수행 결과와 비교 분석하였다.

분리형 점소성 해석결과와 통합형 점소성 해석결과를 비교분석한 결과, 통합형 점소성 해석이 고온 유지시간 동안 응력완화 현상과 크립변형 발생을 뚜렷하게 모사하고 또한 발생한 응력범위와 변형률범위의 값이 작아져서 구조물의 크립피로 손상이 작을 것으로 예측된다. 즉, 탄성해석결과나 분리형 점소성 해석 결과를 적용한 크립피로 손상의 경우보다 보수성이 크게 줄어들 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 NONSTA-VP 코드를 활용한 해석결과 점소성 구성식의 특징적 변형 거동을 잘 모사하고 있음을 확인하였는데 이는 앞으로 실험결과와 더 많은 비교 해석을 수행한 검증 노력이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 전한다.

참고 문헌

1. A.K.Miller, *Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity*, Elsevier Applied Science, 1987
2. Nuclear Standard NE F9-5T, “Guidelines and Procedures for Design of Class 1 Elevated Temperature Nuclear System Components,” USDOE TIC, Oak Ridge, Tenn., 1981
3. P. Perzyna, "The Constitutive Equations for Rate Sensitive Plastic Materials," Quarterly Appl. Math., Vol. 20, p. 321, 1963
4. A. Phillips and H. C. Wu, "A Theory of Viscoplasticity," Int. J. Solids and Struc., Vol. 9, p. 15, 1973.
5. D. N. Robinson, "A Unified Creep-Plasticity Model for Structural Metals at High Tempertures," ORNL/TM 5969, 1978.
6. J. L. Chaboche and G. Rousselier, "On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations - Part 1 : Rules developed with internal variable concept," J. of Press. Vess. Tech., Vol. 15, p. 153, 1983.
7. J. L. Chaboche, Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, 1990.
8. J. L. Chaboche, "Cyclic Viscoplastic Constitutive Equations, Part I : A Thermodynamically Consistent Formulation," J. Appl. Mech., Vol. 60, p. 813, 1993.
9. S. R. Bodner and Y. Partom, "Constitutive Equations for Elasto-Viscoplastic Strain Hardening Materials." J. Appl. Mech., Vol. 42, p. 235, 1975.
10. A. K. Miller, "An Inelastic Constitutive Model for Monotonic, Cyclic and Creep Deformation: Part 1, Equations, Developement and Analytical Procedures and Part 2, Application to type 304 stainless steel," J. Engng. Mat. and Tech., Vol. 98, p. 97, 1976.
11. D. C. Stouffer and S. R. Bodner, "A Constitutive Model for the Deformation Induced Anisotropic Plastic Flow of Metals," Int. J. Engng. Sci., Vol. 17, p. 727, 1979.
12. N. Ohno, "A Constitutive Model of Cyclic Plasticity with a Nonhardening Strain Region," J. Appl. Mech., Vol. 49, p. 721, 1982.
13. J. D. Wang and N. Ohno, "Two Equivalent Forms of Nonlinear Kinematic Hardening : Application to Nonisothermal Plasticity," Int. J. of Plasticity, Vol. 7, p. 637, 1991.
14. E. P. Chernocky, "An Examination of Four Viscoplastic Constitutive Theories in Uniaxial Monotonic Loading," Int. J. Solids and Struc., Vol. 18, p. 989, 1982.
15. M. S. Abdel-Kader, N. N. El-Hefnawy, and A. M. Eleiche, "A Theoretical comparison of three unified viscoplasticity theories, and application to the uniaxial behavior of Inconel 718 at 1100 oF," Nuclear Engng. and Design, Vol. 128, pp. 369-381, 1991.
16. T. Inoue, F. Yoshida, N. Ohno, M. Kawai, and Y. Niitsu, "Evaluation of inelastic constitutive models under plasticity-creep interaction in multiaxial stress state," Nuclear Engng. and Design, Vol. 126, pp. 1-11, 1990.
17. A. K. Miller and T. G. Tanaka, "NONSS:A new method for integrating unified constitutive equations under complex histories," J. Engng. Mater. Technol., Vol. 110, pp. 205-211, 1988.
18. K. Honberger and H.Stamm, "An Implicit Integration Algorithm with A Projection Method for Viscoplastic Constitutive Equations," J. for Num. Meth. Engng., Vol. 28, p. 2397, 1989.

19. **액체금속로 고온구조 설계해석을 위한** NONSTA **코드 개발**, KAERI/TR-1256/99, 1999
20. *Numerical recipes in Fortran*, 1992, Cambridge Press.
21. ABAQUS, *User's manual*, Version 5.4, 1995, HKS, USA.
22. Samson Youn, Soon-Bok Lee, Jong Bum Kim, Hyeong-Yeon Lee, Bong Yoo, "Implementation of visco-plastic constitutive equations into the finite element code ABAQUS," Proceedings of the Korean Nuclear Society, '98 Autumn, 1998.

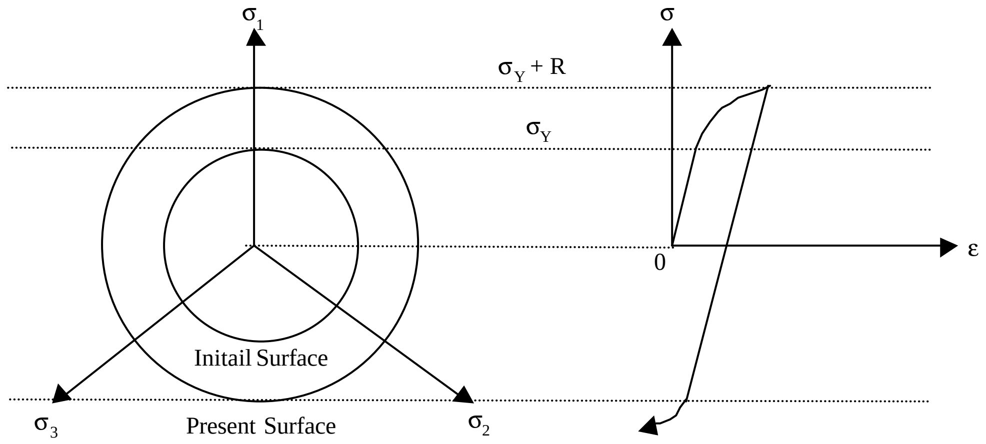


그림 1. 등방경화 모델 – 응력공간 및 인장압축

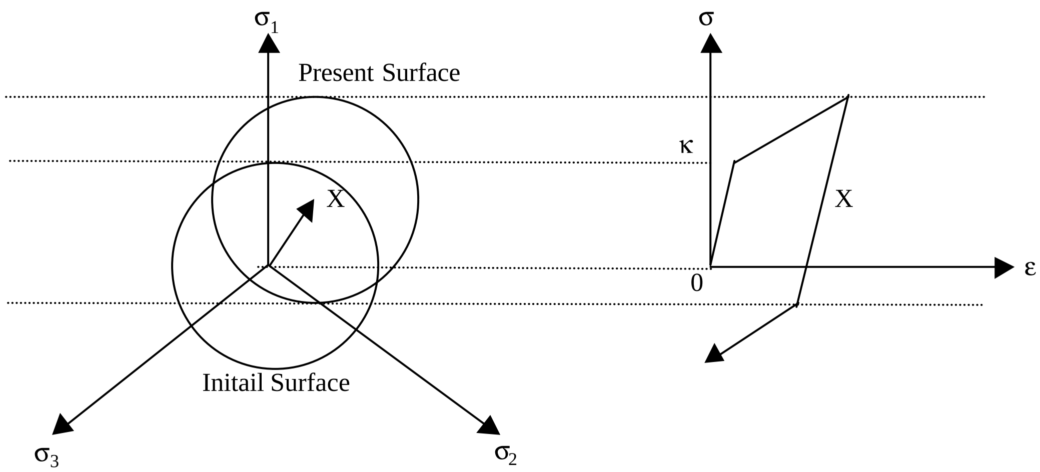


그림 2. 선형이동경화 모델 – 응력공간 및 인장압축

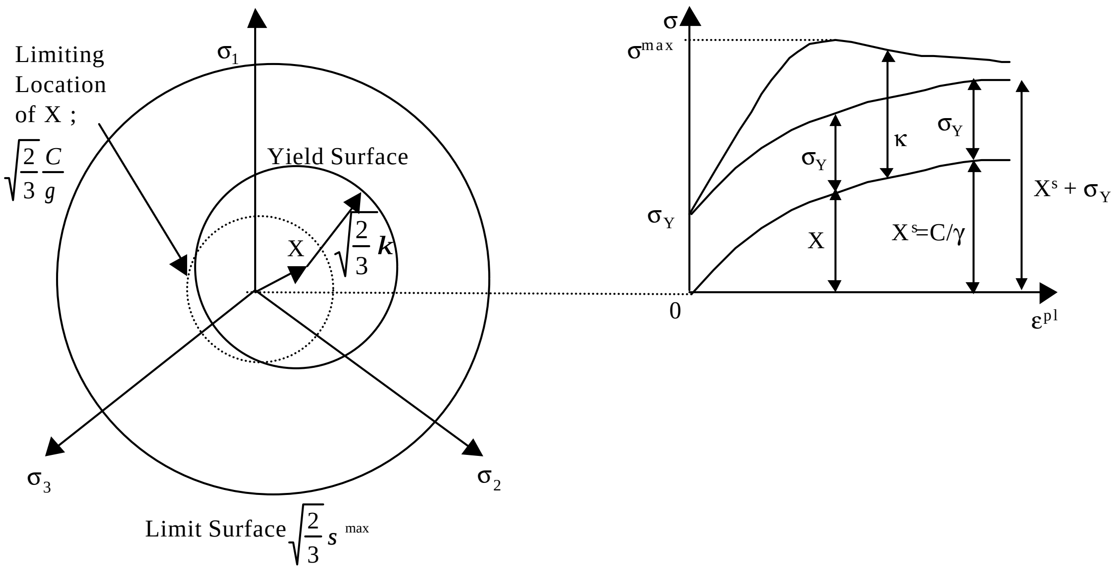


그림 3. 결합경화 모델 – 3 차원 응력공간 및 1 차원 설명

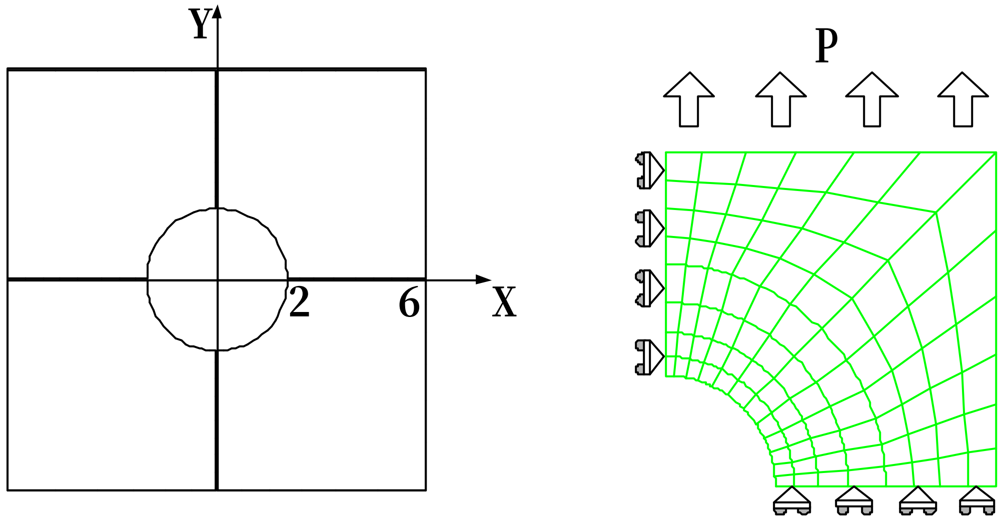


그림 4. **원공이 있는 평판 해석 모델 개략도**

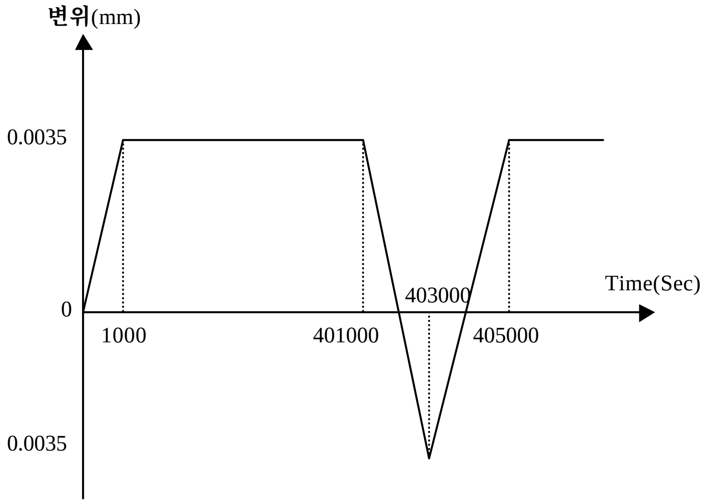


그림 5. **유지시간을 적용한 사이클 하중**

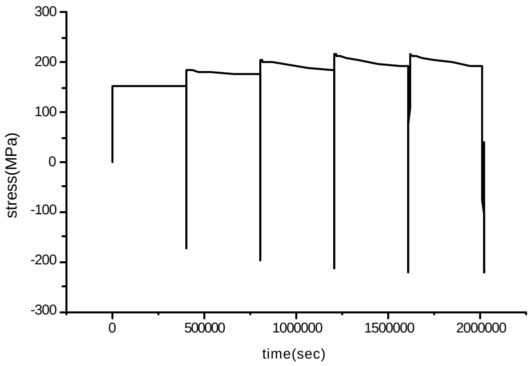


그림 6. **등방경화모델 응력**(σ2) **이력**

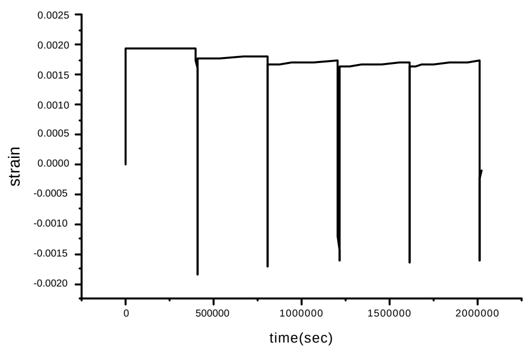


그림 7. **등방경화모델 변형률**(ε2) **이력**

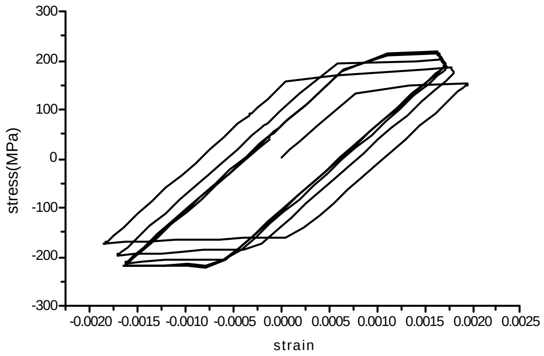


그림 8. 등방경화모델 응력-변형률(σ2-ε2) 곡선

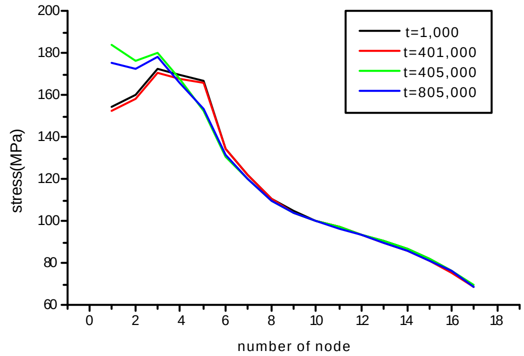


그림 9. 등방경화모델 x-축 응력(σ2) 분포

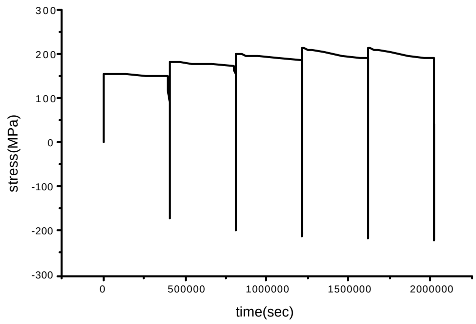


그림 10. 이동경화모델 응력(σ2) 이력

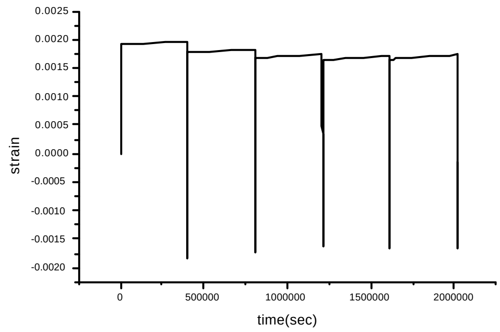


그림 11. 이동경화모델 변형률(ε2) 이력

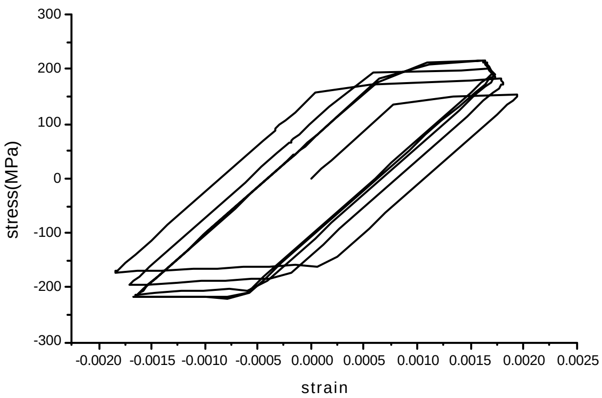


그림 12. 이동경화모델 응력-변형률(σ2-ε2) 곡선

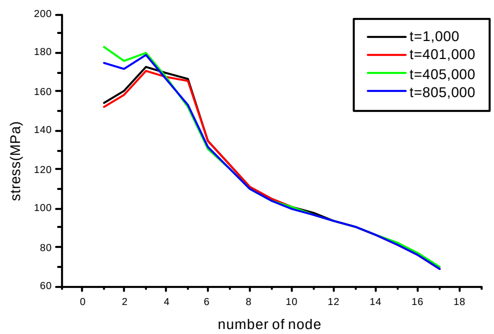


그림 13. 이동경화모델 x-축 응력(σ2)분포

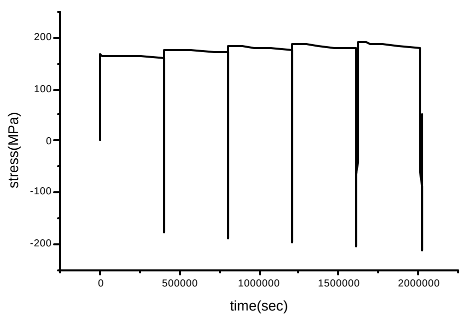


그림 14. 결합경화모델 응력(σ2) 이력

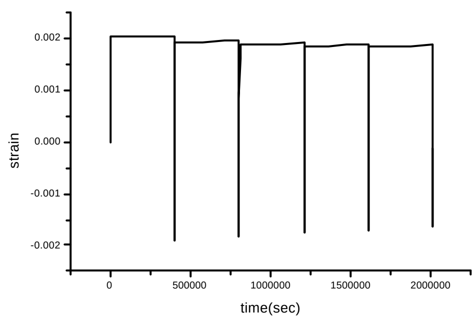
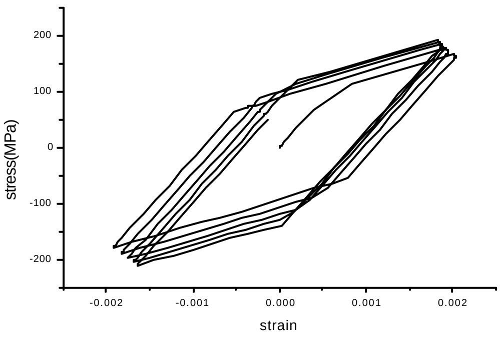


그림 15. 결합경화모델 변형률(ε2) 이력



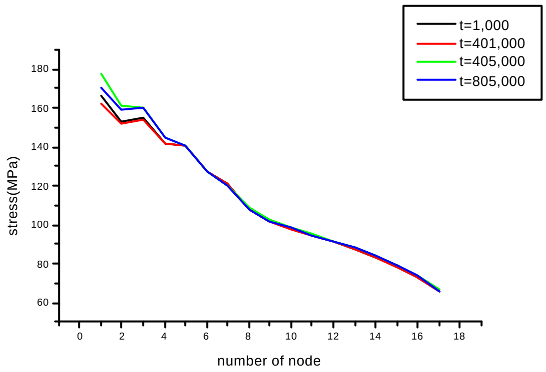
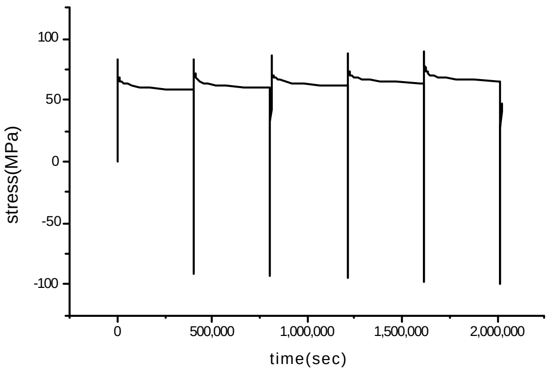


그림 16. 결합경화모델 응력-변형률(σ2-ε2) 곡선

그림 17. 결합경화모델 x-축 응력(σ2)분포



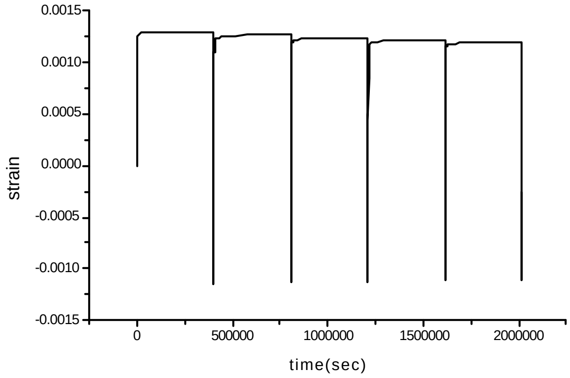
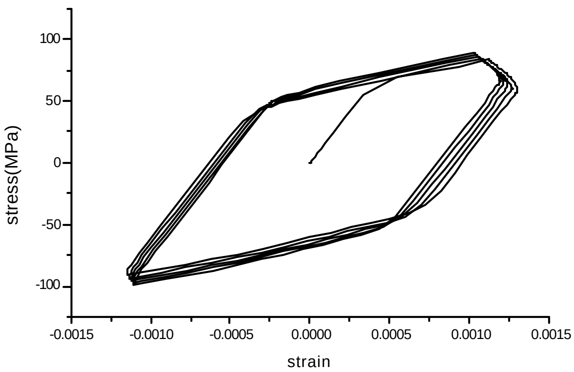


그림 18. VP모델 응력-변형률(σ2-ε2) 곡선

그림 19. VP모델 x-축 응력(σ2)분포



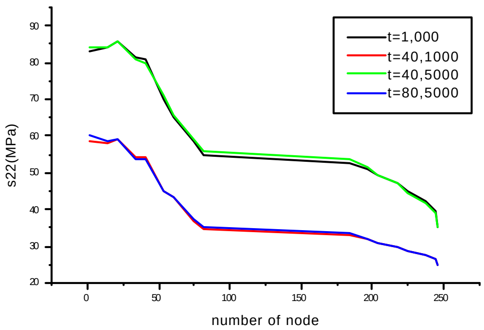


그림 20. VP모델 응력-변형률(σ2-ε2) 곡선

그림 21. VP모델 x-축 응력(σ2)분포