2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고온 비탄성해석코드의 재료상수 결정 및 영향분석

On the characterization and effects of material constants of the inelastic structural analysis code

전계포, 김종범, 박창규, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로 고온구조물의 비탄성해석을 위해 개발한 NONSTA 코드는 특성상 여러가지 재료상수를 포함하고 있고 이는 다양한 온도와 변형률 범위를 적용한 재료의 시험데이터로부터 최적 방법에 의해 결정해야 한다. 비탄성 해석에 사용되는 재료상수를 결정하기 위해서는 우선적으로 여러 가지 온도에서 재료의 특성 곡선 데이터를 확보해야 하고 이들을 이용해서 상수를 결정해야 하는데 본 연구에서는 재료의 특성 데이터를 EXCEL로 확보하고 있을 경우 이를 EXCEL VBA를 이용하여 상수들을 결정할 수 있는 방법론을 연구하고 또한 다양한 하중형태에 따라 이들 비탄성 재료상수들이 해석결과에 미치는 영향을 분석하여 향후 해석결과의 신뢰성을 높일 수 있도록 하였다.

Abstract

LMR high temperature structures subjected to operating and transient loadings may exhibit very complex deformation behaviors due to the use of ductile material such as 316SS and the systematic analysis technology of high temperature structure for reliable safety assessment is essential. In this paper, identification of inelastic material constants for NONSTA-EP was performed using EXCEL VBA and comparative study with developed inelastic analysis program and the existing analysis codes was performed applying various types of loading condition. The performance of NONSTA was confirmed and the effect of inelastic constants on the analysis result was analyzed.

1. 서론

액체금속로[1]의 고온 구조물들은 운전상태에 따라 복잡한 하중이력을 경험하게 되며 고온 구조물에 사용되는 대부분의 금속 재료들은 고온 환경 하에서 복잡한 변형 양상을 보이게 되므로 신뢰성 있는 안전성 평가를 위해서는 체계적인 고온 구조 해석기술의 확립이 우선적으로 요구된다. 본 연구에서는 탄소성 해석 능력을 향상시키기 위하여 결합형 탄소성 모델[2]을 범용 유한요소해

석코드인 ABAQUS의 부프로그램인 NONSTA-EP로 개발하여[3] 진행성 소성변형인 라체팅 해석에 적용한 바 있다[4]. NONSTA-EP 프로그램은 구성식이 복잡하고 여러 가지 재료상수들을 포함하고 있다. 이들 재료상수값들은 여러 가지 온도에서 다양한 변형률 조건을 부여한 저주기 피로실험 및 크립실험 결과로부터 구해야 하는데 나라마다 같은 재료이더라도 재료실험 결과가 차이가 나고 또한 재료상수를 구하는 방법이 다르기 때문에 표준화된 상수값이 제공되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본연구에서는 EXCEL VBA를 이용하여 실험데이터로부터 재료상수를 구하는 방법을 개발하는 한편 재료상수 값의 변동이 비선형 해석 결과에 미치는 영향을 분석하여 향후 해석 결과의 신뢰성을 평가할 수 있도록 하였다.

2. 비탄성 해석코드의 구성

2.1 비탄성 구성식

본 연구에서는 Chaboche의 결합탄소성 구성식을 ABAQUS의 부프로그램으로 장착하여 NONSTA-EP 프로그램을 개발하였는데 이에 대한 개략적인 설명은 다음과 같다. 결합경화 탄소성 구성식의 주요 구성식들은 다음과 같다.

$$f = J_2(\sigma - X) - R - \kappa, \quad d\varepsilon^p = \frac{3}{2} d\lambda \frac{\sigma' - X'}{J_2(\sigma - X)}, \quad \dot{X} = \underline{\frac{2}{3} C d\varepsilon^p} - \gamma X \dot{p}, \quad \dot{R} = b(Q - R)\dot{p} \tag{1}$$

$$d\lambda = \frac{H(f)}{h} \left\langle \frac{3}{2} \frac{\sigma' - X'}{J_2(\sigma - X)} d\sigma \right\rangle, \quad h = C - \frac{3}{2}\gamma X \frac{\sigma' - X'}{J_2(\sigma - X)} + b(Q - R) \tag{2}$$

여기서 X : back stress, R : drag stress,

C, γ, b, Q : material parameters, p : accumulated plastic strain,

dp : plastic strain increment,

$d\varepsilon^p$: deviatoric stress tensor, X : deviatoric back stress tensor

f : loading function, h : hardening modulus,

dλ : plastic multiplier, H(f) : heavyside step function,

κ : yield stress (generally different from Y)

<x> : <x>=x if x > o, <x>=0 if x < 0 .

식 (1)에서 첫번째는 항복조건을 나타내고, 두번째는 소성변형 증분을 나타내고, 세번째는 이동경화 발전식을 나타내고, 네번째는 등방경화 발전식을 나타낸다. 식 (2)의 첫번째는 소성배율을 나타내고 두번째는 경화계수를 나타낸다. 이동경화 발전식은 기본적으로 역응력의 증분이 소성변형 증가 방향과 같다는 가정하에 제시된 Prager의 이동경화식에 비선형 조건을 부여하기 위해 recall term을 추가한 것이다. 최근 범용 유한요소해석코드인 ABAQUS[5]에 결합탄소성 모델이 추가되었는데 이동경화 발전식과 등방경화 발전식이 다음과 같다.

$$\dot{X} = \underline{C \frac{1}{\sigma^0}(\sigma - X)\dot{p}} - \gamma X \dot{p}, \quad \sigma^0 = \sigma\big|_0 + Q_\infty(1 - e^{-bp}) \tag{3}$$

식 (3)에서 밑줄친 부분은 항복곡면의 이동이 역응력을 중심으로 응력공간의 방향으로 이루어진다는 가정하에 제시된 Ziegler의 이동경화식을 나타내고 여기에 recall term을 추가하여 비선형성을 부가하였다. 본연구에서 개발한 NONSTA-EP 프로그램이 기본적으로 ABAQUS의 결합탄소성모델

과 차이가 있지만 특정한 하중 환경이 아닌 경우 두가지 모델은 같은 해석 결과를 나타내게 된다. ABAQUS 결합탄소성 모델은 적용의 편리성이 있지만 모델의 확장성은 갖고 있지 않은 반면에 NONSTA-EP 프로그램은 여러개의 이동경화 및 등방경화 항을 조합할 수 있는 확장성을 갖고 있는데 이 경우 재료상수의 개수가 증가하는 단점이 있다. 두 모델의 경우 기본식을 사용할 경우 영률, 포와송비를 제외한 비선형 재료상수는 C, γ, b, Q, κ 로써 같다.

2.2 비탄성 재료상수 결정

비탄성 재료상수를 결정하기 위해서는 다양한 물성 실험 데이터가 필요한데 기본적으로 stress-strain curve가 필요하다. 그림 1은 재료의 인장곡선과 NONSTA를 사용한 curve fitting 결과를 보여주고 있다.

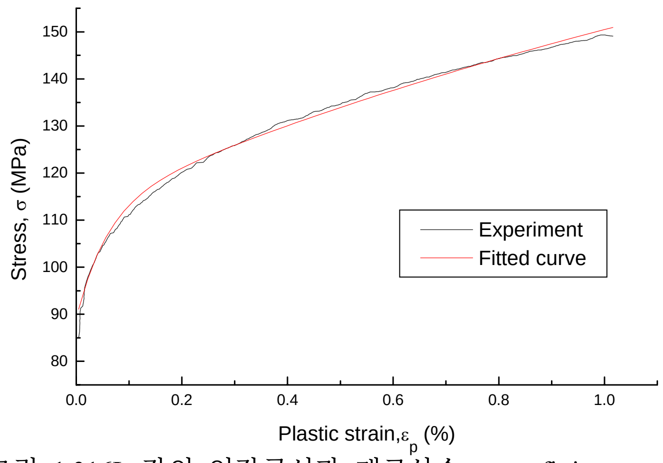

그림 1 316L 강의 인장곡선과 재료상수 curve fitting

고온구조물의 거동은 특성상 고주기피로보다는 저주기피로시험 데이타가 필요하다. Low cycle test를 displacement control로 수행할 경우 처음에는 strain과 displacement의 선형 관계가 성립하지만 점점 그 차이가 커지게 되기 때문에 displacement control보다는 strain control로 실험을 수행하는 것이 좋다. 그림 2는 저주기 피로시험 데이터와 NONSTA 해석으로 재료상수를 구하기 위한 curve fitting 수행 결과를 보여주고 있고 그림 3과 그림 4는 첫사이클과 안정화된 사이클에서 응력-변형률 선도를 나타내고 있다.

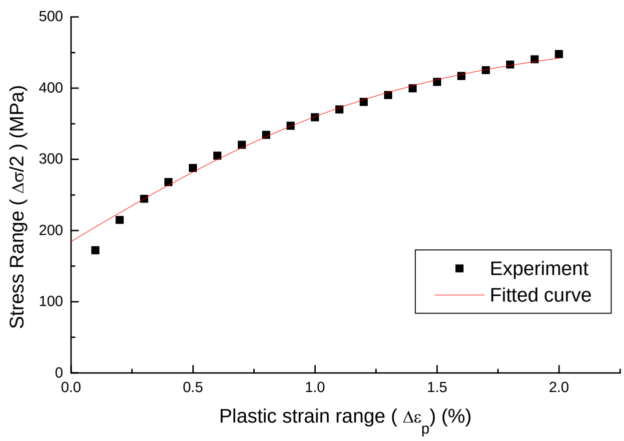

그림 2 저주기 피로시험 데이터와 NONSTA 결과의 curve fitting

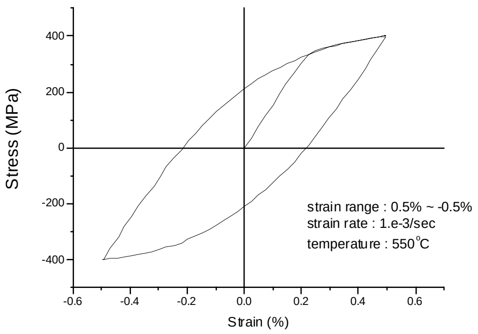

그림 3 Stress-strain curve (1st cycle)

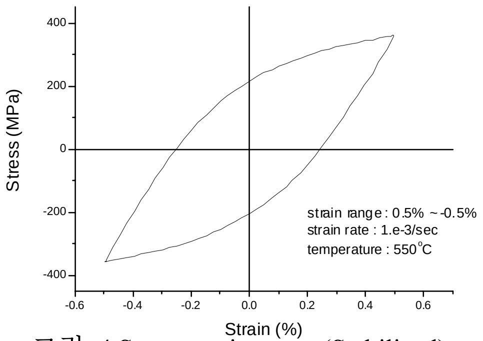

그림 4 Stress-strain curve (Stabilized)

위에서 NONSTA 코드의 사용을 위한 재료상수를 결정하기 위해 필요한 재료시험에 대해서 설명하였는데 일단 인장곡선과 저주기 피로시험 데이터가 있으면 기본적인 재료상수를 구할 수 있다. 고온 구조재료의 복잡한 거동 양상은 다양하기 때문에 특정 구성식이 모든 경우를 만족시키는 거동 모사를 하기 어렵고 또한 구성식을 결정하였다고 하더라도 한가지 재료상수 세트가 여러경우를 모두 만족시키도록 모사하기는 어렵다. 예를 들어 인장곡선을 잘 만족하도록 결정된 재료상수는 안정화된 cycle curve를 만족시킬 수 없고 역으로 안정화된 cycle curve를 우선적으로 만족시키도록 재료상수를 결정하면 인장곡선을 잘 만족시키지 못할 수 있다. 따라서 사용 목적에 잘 맞는 재료시험 데이터를 만족시킬 수 있도록 curve fitting을 수행하여 최적 재료상수값들을 결정할 필요성이 있다.

식 (1)에 나타낸 결합탄소성 구성식의 재료상수(C, γ, Q, b)를 최적 결정하기 위한 절차는 다음과 같다.

1) 이동경화상수(C, γ) 결정

재료의 이동경화상수(C, γ)를 구하기 위해서는 각기 다른 변형률에 대해 안정화된 이력곡선으로부터 구하여야 한다. 각기 다른 변형률 이력곡선에서 변형률 값이 일정한 구간에서의 평균응력값을 κ로 결정한다. 이렇게 구한 κ와 안정화된 이력곡선에서 구하여진 변형률과 응력값을 이용하여 $(\Delta\sigma/2)-k$ 와 $\Delta\varepsilon_p$ 를 도시한다. 이 그래프가 점근하는 값이 그림 5에서 보는 바와 같이 C/γ값이 된다. C/γ값이 결정되면 식(4)를 curve fitting하여 γ값을 도출하고 C/γ 값에 대입하여 C값을 결정할 수 있다.

$$\frac{\Delta\sigma}{2}-k=\frac{C}{\gamma}\tanh(\gamma\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}) \tag{4}$$

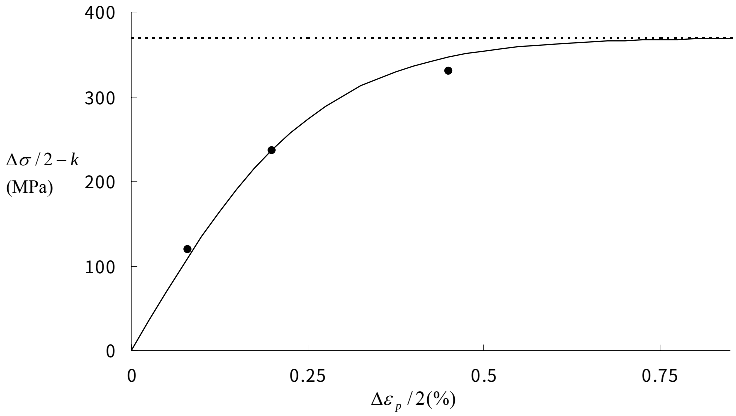

그림 5. Identification of the coefficients C and γ

Curve fitting을 이용한 재료상수값 결정과정은 다음과 같다. 식(4)에서 좌변의 $\frac{\Delta\sigma}{2}-k$ 와 우변의 $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ 는 실험을 통해 얻어질 수 있는 값이다. 이 값들을 이용하여 그래프를 도시한다. 도시한 그래프의 추이를 살펴서 C/γ의 값을 예상한다. 예상한 C/γ을 본 식에 대입한 후 얻어진 값들을 이용하여 γ 값을 구한다. 구하여진 γ 값으로 C/γ값에 대입하여 다시 C값을 구한다. 구하여진 각각의 값들을 이용하여 그래프를 도시한다.

원래의 실험데이터 그래프와 NONSTA를 적용하여 위의 과정을 통해 얻어진 그래프를 비교하여 그 오차가 최소가 될 때까지 반복계산을 수행한다. 그림 6은 위의 과정을 도시한 그래프를 나타낸 것이다. 굵은 실선으로 표시된 값이 에러가 최소화된 최종값이다. 현 연구단계에서는 반복계산을 간단히 할 수 있는 module 개발단계에 있다. 본 연구에서 Miscrosoft사의 Excel에 포함되어 있는 VBA(Visual Basic Application)을 이용하여 앞에서 설명한 반복 계산 및 최적화를 수행할 수 있는 방법을 개발하고 있다.

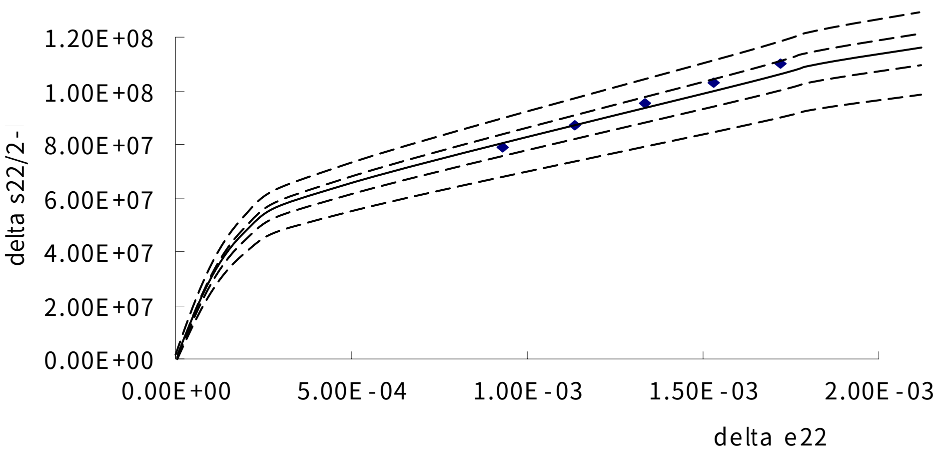

그림 6 Curve-fitting을 통한 C and γ 최적화 과정

2) 등방경화상수(b,Q) 결정

재료의 등방경화상수(b,Q)을 구하기 위해서는 Cyclic hardening curve를 사용한다. Chaboche 점소성 구성식에서 등방경화를 유도하면 다음과 같다.

$$R = Q(1-e^{-bp}) \tag{5}$$

인장이 처음 작용할 때의 R을 0, 소성 변형율 속도가 매 주기 같다고 보면 n번째 주기에서의 등방성 경화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_n = \frac{1}{2}(\Delta\sigma_n - \Delta\sigma_0) - \frac{C}{\gamma}[\tanh\frac{\gamma}{2}(\Delta\varepsilon_p)_n - \tanh\frac{\gamma}{2}(\Delta\varepsilon_p)_0] \tag{6}$$

실험결과로부터 n 번째 주기의 응력 진폭 $\Delta\sigma_n$ 와 소성 변형률 진폭 $(\Delta\varepsilon_p)_n$ 은 표 1에서 보는 바와 같이 계산될 수 있다. 그리고 단축하중이 작용하는 경우 누적 소성변형률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_n = \frac{3}{2}(\Delta\varepsilon_p)_1 + 2\sum_{i=2}^{n}(\Delta\varepsilon_p)_i \tag{7}$$

따라서 n번째 주기의 등방경화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_n = Q(1 - e^{-bp}) \tag{8}$$

위 식에서 보는 바와 같이 P_n값이 0일 때의 R_n값으로 Q값을 결정할 수 있고 데이타값을 curve fitting하면 b값을 도출할 수 있다.

표 1. Identification of $\Delta\sigma_n$ and $\Delta\varepsilon_{p_n}$

Cycle	$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$	$\varepsilon_{p_{\max}} - \varepsilon_{p_{\min}}$
1_{st}	$\Delta\sigma_1$	$(\Delta\varepsilon_p)_1$
2_{nd}	$\Delta\sigma_2$	$(\Delta\varepsilon_p)_2$
:	:	:
:	:	:
n_{th}	$\Delta\sigma_n$	$(\Delta\varepsilon_p)_n$

Curve fitting을 통한 b값의 도출은 앞에서 설명한 이동경화상수를 구하는 방법과 유사한 방법으로 구할 수 있다. 즉 반복계산을 통해 에러가 최소화 될 수 있는 그래프를 도시하고 그 그래프를 통해서 각각의 상수값을 결정할 수 있다. 이러한 과정 또한 Excel VBA를 이용하여 그 과정을 간단하게 만들 수 있다. 지금까지 설명한 절차에 따라 550°C일때 316L 스테인레스강에 대하여 구한 비탄성 재료상수 κ, C, γ, Q, b는 각각 89MPa, 40600MPa, 139.4, 95.6MPa, 50.4이다.

3. 비탄성 재료상수의 영향분석

오스테나이트 스테인레스강은 부식성질과 우수한 연성 등의 여러가지 장점과 특히 고온 강도가 좋은 재료로써 액체금속로 고온구조강으로 널리 사용되고 있는데 지금까지의 연구결과들을 살펴보면 스테인레스강은 액체금속로 운전온도 범위에서 여러가지 복잡한 거동 양상을 나타내고 상온에서는 경화가 작게 발생하는데 비하여 온도가 높아지면 등온 상태에서 매우 큰 주기적 경화가 발생하는 것으로 나타났다. 앞 절에서 구한 비탄성 재료상수값이 다양한 하중형태에 따라 구조물의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 반복 변위하중 및 반복 힘하중

그림 7에 보인 것과 같이 316 SS 평판에 반복 변위하중과 힘하중을 가하는 경우 ABAQUS 결합경화모델 및 NONSTA-EP에 대한 이동경화 상수 C, γ와 등방경화 상수 b, Q의 변화가 cyclic hardening에 미치는 영향을 분석하였다. 적용온도는 550℃이고 E=155.3GPa, υ=0.305, κ=89MPa이고 C, γ, Q, b의 기준값은 각각 40600MPa, 139.4, 95.6MPa, 50.4이다. 이 기준값들을 각각 20%씩 증가하거나 감소시킨 경우와 모두 20%씩 증가하거나 감소시키는 경우의 총 11가지 경우에 대해 비교분석하였다. 또한 하중의 크기를 20%와 40%씩 증가 또는 감소시켜 cyclic hardening 결과를 비교분석하였다.

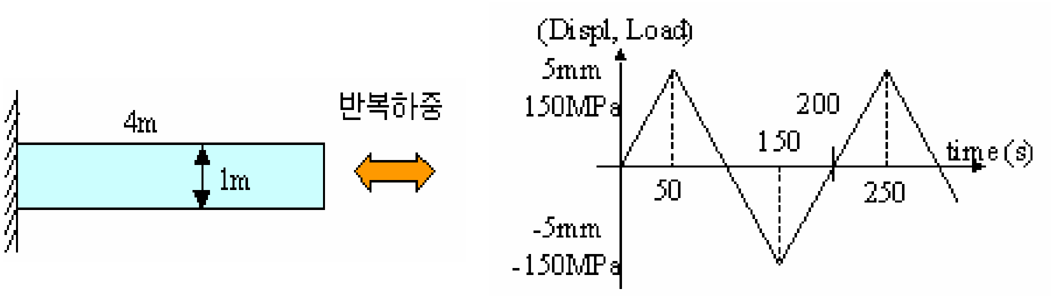

그림 7 결합탄소성 구성식의 재료상수 영향 분석을 위한 반복하중 해석모델

그림 8에 응력과 소성변형률의 이력을 나타내었는데 기준상수값을 사용하였을 때 소성기울기가 58.6GPa이었는데 상수값이 20% 증가하면 소성기울기가 20.3% 증가하고, 상수값이 20% 감소하면 소성기울기가 19.6% 감소하였다. 여기서 이동경화 상수 C, γ의 값이 커지면 소성기울기가 증가하고 등방경화 상수 Q, b의 값이 커지면 주기경화가 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 그림 9에 다섯가지 변형률범위 하중에 대하여 안정화된 사이클에서의 응력범위와 소성변형률범위를 표시하였는데 전형적인 주기경화 거동을 볼 수 있고 또한 재료상수값이 증가할수록 탄성영역이 증가하는 주기경화 양상이 뚜렷함을 알 수 있다. 재료상수의 값이 ±20% 변함에 따라 소성변형률 범위는 ±6.3% 정도 반비례로 변화하고 응력범위값은 ±6% 정도 비례하여 증감하였다. 반복 변위하중 대신 반복 힘하중을 가하였을 경우는 재료상수 값의 변화에 따른 소성변형범위의 증감이 두배이상 커짐을 알 수 있었다.

ABAQUS의 결합경화모델과 NONSTA-EP모델은 기본적으로 같은 결과를 나타내었고 재료상수값의 크기에 따라 해석결과의 차이가 발생하기 때문에 적절한 재료상수값의 결정이 필수적이라는 것을 알 수 있다.

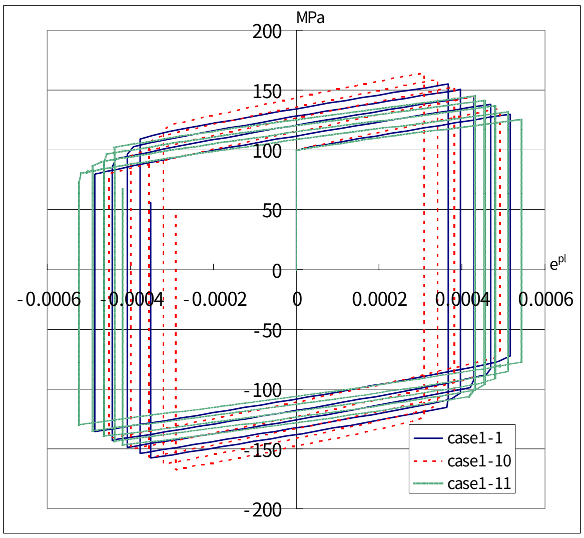

그림 8 응력-변형률 이력 비교

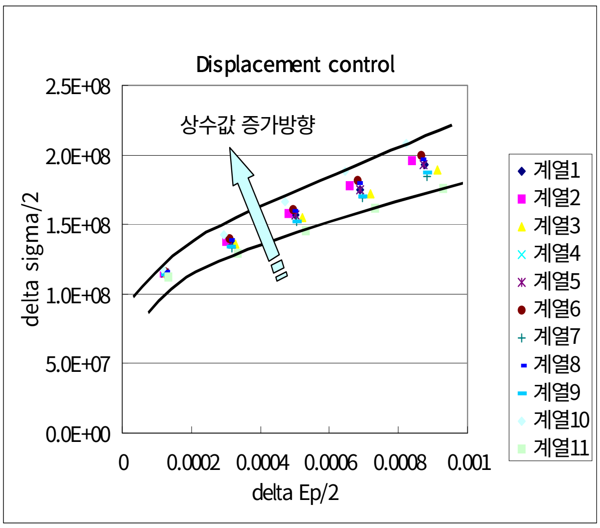

그림 9 응력범위와 소성변형률범위 비교

3.2 크기가 다른 하중의 작용(Load Sequence Effect)

고온 구조물의 피로손상을 평가할 때 비선형 거동에 따른 변형률 또는 응력범위를 계산하여야 하는데 일정한 크기의 하중이 작용하지 않고 크기가 변하는 하중이 작용하면 하중의 크기가 작용하는 순서에 따라 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 ±3mm와 ±5mm의 두가지 다른 크기의 변형제어하중이 작용하는 순서가 바뀌었을때와 이들 하중이 평균응력을 갖도록 이동하였을 경우에 대하여 재료상수들의 값을 변화시키면서 응답 특성을 분석하였다. 그림 10은 작은 크기의 하중이 먼저 가해진 후 큰 하중이 가해지는 경우와 순서가 바뀐 경우를 나타내고 있다.

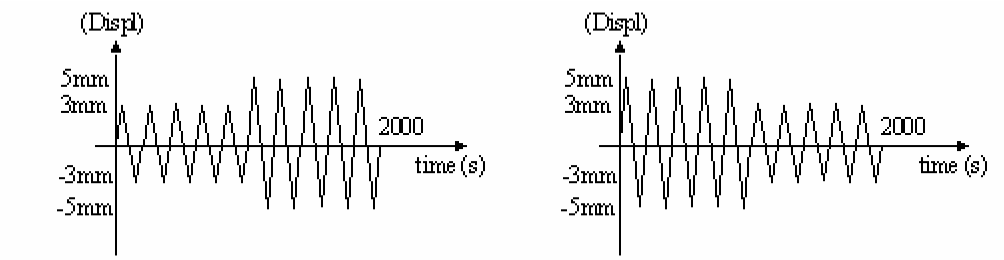

그림 10 Variable Amplitude Load Sequence #1 및 #2

결합탄소성 재료상수 C, γ, Q, b의 값은 앞절에서와 같이 20%씩 증가한 경우와 감소한 경우를 적용하여 영향을 분석하였다. 그림 11은 작은 반복하중후 큰 반복하중을 받을 경우 응력과 소성변형률을 보여 주는데 지속적으로 경화가 발생하고 재료상수 값이 커질수록 소성기울기와 경화의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 그림 12는 큰 반복하중 후 작은 반복하중이 작용할 때 시간에 대한 소성변형률의 이력을 나타내는데 큰 하중이 작용할 때 초기에 소성변형이 크게 발생하여 조금씩 줄다가 작은 하중이 작용할 때 소성변형이 일정하게 되어 거의 탄성거동을 하게 됨을 알 수 있다. 즉, 초기에 큰 경화가 발생한 영향으로 작은 반복하중에 대해서는 셰이크다운 거동이 발생하였다. 그리고 재료상수 값이 커지면 작은 반복하중 구간에서 추가 소성 변형이 발생하고 마찬가지로 셰이크다운 거동을 하고 있다. 그림 10의 하중을 0.2mm 만큼 평균 인장하중을 작용하도록 이동시켜 적용한 경우는 각각 초기에 평균응력 영향으로 Shift가 발생한 후 나머지 거동은 유사한 결과를 얻었다. 본 연구에서 하중 크기의 작용 순서가 비선형 해석 결과에 미치는 영향을 분석한 결과 결합탄소성 모델은 이들 거동을 잘 모사하고 있고 재료상수 값은 소성기울기 및 경화 크기에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

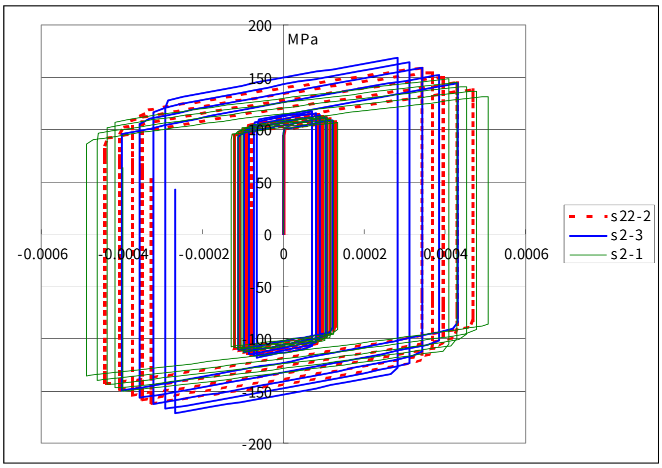

그림 11. 하중순서와 재료상수에 따른 탄소성거동(LS #1)

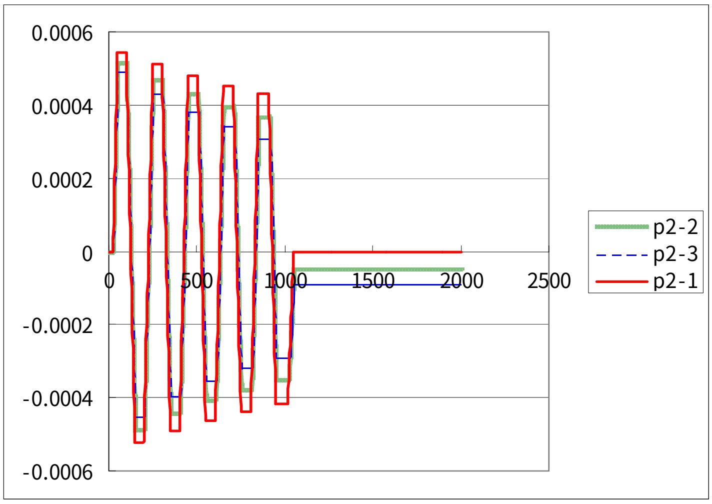

그림 12. 하중순서와 재료상수에 따른 탄소성거동(LS #2)

4. 결론

액체금속로 고온 구조물들은 운전상태에 따라 복잡한 하중이력을 받고 주요 사용재료인 스테인레스강이 복잡한 변형 양상을 보이게 되므로 고온 구조물의 신뢰성 있는 안전성 평가를 위해서는 체계적인 고온 구조 해석기술의 확립이 우선적으로 요구된다. 본 연구에서는 고온 탄소성거동을 모사할 수 있도록 NONSTA-EP 프로그램을 개발하였는데 사용된 여러가지 비탄성 재료상수들은 다양한 시험조건을 부여한 실험결과로부터 구해야 하며 실험값과 상수결정 방법에 따른 분산영향을 고려해야 할 필요성이 있다. 본 연구에서는 실험데이터로부터 재료상수를 구하는 방법을 개발하는 한편 재료상수 값의 변동이 비선형 해석 결과에 미치는 영향을 분석하여 향후 해석 결과의 신뢰성을 평가할 수 있도록 하였다.

반복 변위하중과 힘하중이 작용하는 경우 재료상수값의 변화에 따른 소성기울기와 소성변형률 범위의 변화를 분석하였고 또한 크기가 다른 반복하중의 작용순서가 바뀌었을 경우 재료상수의 변화에 따라 소성기울기 및 경화 크기에 미치는 영향을 파악하였다. 본 연구의 결과 신뢰성 있는 재료상수 값의 결정이 해석의 신뢰성을 높이기 위하여 필수적이라는 것을 확인하였으며 또한 상수값에 따른 해석결과의 변화를 파악하여 신뢰성 분석의 기초를 마련하였다.

향후 신뢰성 있는 비탄성 해석모델의 재료상수값들을 구하고 이를 이용하여 좀 더 다양한 다축 및 반복하중에 대한 정량적인 비교평가를 수행하여 개발한 코드의 능력을 분석하고 검증하여 신뢰성을 높일 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] 한도희 외, KALIMER 개념설계보고서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2204/2002, 2002

[2] J.L. Chaboche, Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, UK, 1990

[3] 김종범, ABAQUS용 라체팅 평가코드 NONSTA-EP 사용자 지침서, LMR/MS486-CM-02, 한국원자력연구소, 2001

[4] 이형연, 김종범, 이재한, "평판-원통의 접합부를 갖는 불연속 구조물의 진행성 비탄성 변형 평가," 2002춘계학술발표대회 논문집, 한국원자력학회, 2002

[5] ABAQUS Users manual, Version 6.2, H.K.S, USA (2002).