

# 인장 시편 및 원자력 배관계의 반복 변형거동에 미치는 경화 모델의 영향

전다솜\*·강주연\*·허남수†·김종성\*\*·김윤재\*\*\*

## Effects of Hardening Models on Cyclic Deformation Behavior of Tensile Specimen and Nuclear Piping System

Da-Som Jeon\*, Ju-Yeon Kang\*, Nam-Su Huh†, Jong-Sung Kim\*\*, Yun-Jae Kim\*\*\*

(Received 13 December 2017, Revised 22 December 2017, Accepted 27 December 2017)

### ABSTRACT

Recently there have been many concerns on structural integrity of nuclear piping under seismic loadings. In terms of failure of nuclear piping due to seismic loadings, an important failure mechanism is low cycle fatigue with large cyclic displacements. To investigate the effects of seismic loading on low cycle fatigue behavior of nuclear piping, the cyclic behavior of materials and nuclear piping needs to be accurately estimated. In this paper, the non-linear finite element (FE) analyses have been carried out to evaluate the effects of three different cyclic hardening models on cyclic behavior of materials and nuclear piping, such as isotropic hardening, kinematic hardening and combined hardening.

**Key Words** : Cycling loading (반복하중), Hardening model (경화 모델), Hysteresis loop (히스테리시스 루프), Equivalent plastic strain (등가소성변형률), Strain range (변형률 범위)

### 기호설명

$C$  = hardening variable of Chaboche formula  
 $Q, b$  = material parameters of isotropic hardening  
 $f$  = yield function  
 $l_o$  = gage length  
 $\Delta e$  = strain range  
 $\Delta e_{equiv.}$  = equivalent strain range  
 $\alpha$  = back stress or shift stress  
 $\alpha'$  = deviatoric back stress tensor

$\varepsilon$  = strain  
 $\varepsilon^{pl}$  = plastic strain  
 $\varepsilon_a$  = strain amplitude  
 $\varepsilon_{peq}$  = equivalent plastic strain  
 $\gamma$  = recovery parameter of Chaboche formula  
 $\sigma'$  = deviatoric stress tensor  
 $\sigma_{yo}$  = initial yield strength  
 $\sigma_y$  = yield strength

### 1. 서론

최근 국내외에서 설계기준을 초과하는 지진의 발생으로 인해 원전기기의 건전성 유지에 대한 연구 필요성이 제기되고 있으며, 설계기준초과지진(beyond design basis earthquake)에 대한 건전성 평가법 개발의 중요성

† 책임저자, 회원, 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과  
nam-su.huh@seoultech.ac.kr

TEL: (02)970-6317 FAX: (02)974-8270

\* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

\*\* 세종대학교 원자력공학과

\*\*\* 고려대학교 기계공학과

이 대두되고 있다. 이에 따라 복잡한 원자력 플랜트 구조물의 동적 비탄성 해석 기술이 요구된다. 플랜트에 지진에 의한 하중이 작용하는 경우 큰 소성 변형이 반복적으로 발생할 수 있으며, 이로 인해 단순 하중이 작용할 때와는 다른 거동이 나타난다. 따라서 지진에 대한 동적 비탄성 해석을 수행하기 위해서는 반복하중에 따른 재료의 거동을 정확히 예측할 필요가 있다.

반복하중 하에서 재료는 반복 경화(cyclic hardening) 또는 반복 연화(cyclic softening) 현상 등이 발생한다.<sup>(1)</sup> 이러한 현상을 정확히 모사하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다.<sup>(2-6)</sup> 이를 설명할 수 있는 이론으로는 등방경화(isotropic hardening)와 이동경화(kinematic hardening), 복합경화(combined hardening)가 있다. 등방경화는 항복 곡면(yield surface)의 중심은 고정된 상태에서 항복 곡면이 모든 방향으로 동일한 크기로 증가하면서 경화가 발생함을 의미하고, 이동경화는 항복 곡면의 크기는 일정하게 유지한 상태로 항복 곡면의 중심이 이동하면서 경화가 발생하는 것을 나타낸다. 등방경화이론은 바우싱거 효과(Bauschinger effect)를 모사할 수 없고 이동경화이론은 반복적 소성 변형으로 인한 경화를 모사할 수 없다. 따라서 이를 보완하기 위해 등방경화이론과 이동경화이론이 결합된 복합경화이론이 제시되었으며 실제 재료를 가장 잘 모사할 수 있는 것으로 알려져 있다.

재료의 거동을 보다 더 정확히 모사하기 위해 이동경화이론에서 항복 곡면의 이동을 정의하는 배응력(back stress,  $\alpha$ )을 표현하기 위한 식이 다양한 형태로 제시되어 왔다. Prager 등은 배응력을 1차 함수로 정의한 모델을 제시한 바 있다.<sup>(2)</sup> 그러나 Prager 모델은 소성 영역을 선형적으로 모사하기 때문에 재료의 초반 소성 특성을 반영하지 못한다. 이러한 선형 이동경화모델의 한계를 보완하기 위해 Armstrong과 Frederick은 하나의 지수 함수로 배응력을 제시하였다.<sup>(3)</sup> 그러나 이 모델은 초기 항복 및 큰 소성 변형 영역의 특성을 정확히 모사하지 못한다. 이러한 재료의 거동을 반영하고자 Chaboche 등은 배응력을 3개의 지수함수의 합으로 정의하였다.<sup>(4,5)</sup>

본 논문에서는 다양한 반복경화이론이 재료의 반복하중 거동에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 등방경화, 이동경화 그리고 복합경화이론을 반복 인장 시편에 적용하여 해석을 수행함으로써 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 이용하여 실제

반복 인장 실험 결과와 비교하였다. 또한 경화 이론 구성방정식을 이루는 재료 상수의 영향을 확인하고자 동일한 재료에 대해 제시된 서로 다른 재료 상수를 사용하여 해석 결과를 비교하였다. 추가적으로 본 논문에서는 시편 대비 실제 원자력 배관에서의 경화 이론에 따른 반복 거동을 검토하기 위해서 등가소성변형률(equivalent plastic strain,  $\epsilon_{peq}$ )과 변형률 범위(strain range,  $\Delta\epsilon$ )를 이용하여 그 영향을 검토하였다.

## 2. 유한요소 반복하중 해석

### 2.1 해석 대상 및 조건

본 논문에서는 경화 이론의 영향을 평가하기 위해 인장 시편에 대한 해석과 실제 원자력 배관 계통에 대한 지진 해석을 수행하였다. 인장 시편 해석을 위한 해석 대상으로는 국내에서 실시한 반복 인장/압축 실험에서 사용된 시편과 동일한 환봉 시편을 고려하였다.<sup>(7)</sup>

원자력 배관 계통에 대한 지진 해석을 수행하기 위해 정지냉각계통의 안전 1등급 배관을 고려하였고 자세한 형상은 Fig. 2와 같다. Fig. 2를 보면, 정지냉각계통은 4개의 지지대(S1, S2, S3, S4)와 2개의 밸브(V1, V2)로 구성되어 있다. 또한, 지지대에서 지진이 발생하는 것으로 가정하였으며 설계기준초과지진을

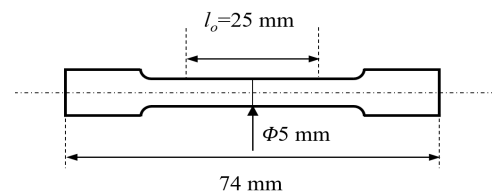


Fig. 1 Schematic of cyclic tensile specimen

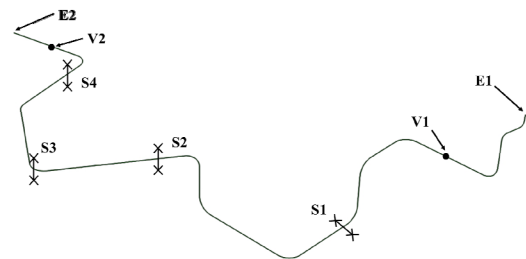


Fig. 2 Schematic of shutdown cooling piping system

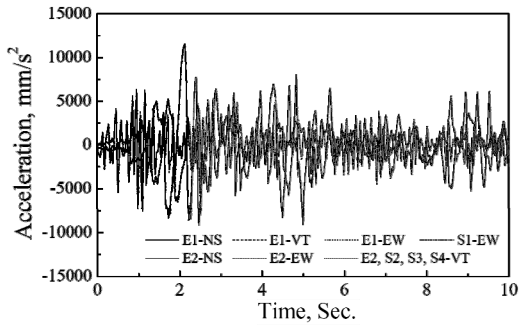


Fig. 3 Time history for seismic acceleration

고려하기 위해 가진 이력은 참고문헌 (8)을 참고하였다.<sup>(8)</sup> 자세한 가진 이력은 Fig. 3에 정리하여 나타내었다. 그래프에서 EW, NS와 VT는 각각 East-West, North-South, Vertical 방향을 의미한다.

### 2.2 반복 경화 구성방정식

전술한 바와 같이 본 논문에서는 3가지 경화 이론이 유한요소 반복하중 해석에 미치는 영향을 검토하기 위해 등방경화이론, 이동경화이론, 복합경화이론을 적용한 지진하중 해석을 수행하였다.

등방경화이론은 재료의 경화를 항복 곡면 크기의 증가로 설명하며 증가된 항복 강도는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + r(\epsilon^{pl}) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{y0}$ 와  $\sigma_y$ 는 각각 초기 항복 강도, 후속 항복 강도를 의미한다.  $r(\epsilon^{pl})$ 는 소성변형률의 함수로 표현되는 등방경화 함수이며 다음과 같이 표현된다.

$$r(\epsilon^{pl}) = Q (1 - e^{-b\epsilon^{pl}}) \quad (2)$$

여기서  $Q$ 는 등방경화가 최대 발생했을 때의  $r(\epsilon^{pl})$  값이며  $b$ 는  $r(\epsilon^{pl})$  함수의 증가율을 결정하는 상수이다.

이동경화이론은 재료의 경화를 항복 곡면 중심의 이동으로 설명하며 이에 의한 항복 곡면은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f = \sigma_e - \sigma_y = \left(\frac{3}{2}(\sigma' - \alpha') : (\sigma' - \alpha')\right)^{1/2} - \sigma_y \quad (3)$$

여기서  $f$ 는 항복 함수이며,  $\sigma_e$ ,  $\sigma_y$ 는 각각 유효 응력과 항복 강도이다.  $\sigma'$ 와  $\alpha'$ 는 각각 편차 응력 텐서, 편차 배응력 텐서이다. 항복 곡면의 이동을 표현하는 매개변수인 배응력( $\alpha$ )을 정의하는 다양한 식들이 제시된 바 있으며 본 논문에서는 이동경화이론을 적용하기 위해 Chaboche 모델<sup>(4,5)</sup>을 고려하였다.

Chaboche 모델은 배응력을 3가지 구간으로 나누어 정의함으로써 이동경화를 모사한다. 각 구간에 대응되는 배응력은 식 (4)와 같이 표현된다. 첫 번째 구간( $\alpha_1$ )은 소성 변형의 초기구간으로 히스테리시스 루프의 급격한 기울기가 나타나는 구간이며, 두 번째 구간( $\alpha_2$ )은 비선형적으로 기울기가 감소하는 구간이다. 마지막 세 번째 구간( $\alpha_3$ )은 소성 변형이 큰 영역으로 재료가 선형적으로 거동하는 구간이다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \sum_{i=1}^3 \alpha_i \\ \alpha_1 &= \frac{C_1}{\gamma_1} (1 - e^{-\gamma_1 \epsilon^{pl}}) \\ \alpha_2 &= \frac{C_2}{\gamma_2} (1 - e^{-\gamma_2 \epsilon^{pl}}) \\ \alpha_3 &= C_3 \epsilon^{pl} (\gamma_3 = 0) \end{aligned} \quad (4)$$

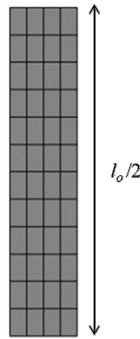
여기서  $C$ 는 재료 상수이며,  $\gamma$ 는 배응력의 기울기를 결정하는 상수이다.

복합경화이론은 재료의 경화를 등방경화와 이동경화의 복합적인 현상으로 정의하며, 식 (2)와 식 (3)이 결합된 식 (5)의 형태로 표현된다.

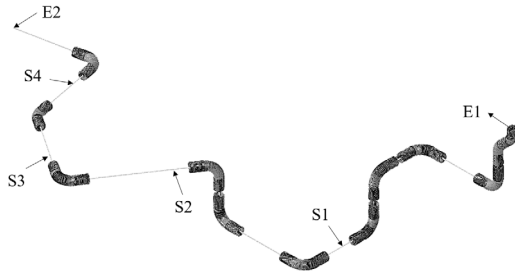
$$f = \left(\frac{3}{2}(\sigma' - \alpha') : (\sigma' - \alpha')\right)^{1/2} - \sigma_{y0} - r(\epsilon^{pl}) \quad (5)$$

### 2.3 유한요소모델

해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS가 사용되었다.<sup>(9)</sup> Fig. 4와 Fig. 5는 본 논문에서 고려된 인장 시편과 정지냉각계통 배관에 대한 해석 모델을 나타낸 것이다. Fig. 4의 인장 시편 모델은 대상의 대칭성을 고려하여 1/2 축대칭 2차원 모델로 작성하였다. 또한, 해석의 편의성을 위해 표점 거리(gage length,  $l_0$ ) 부분만 고려하였다. 축대칭 1차 요소인 CAX4가 사용되었으며, 총 65개 절점과 48개 요소로 이루어져 있다. 7가지 변형률 진폭(=0.29, 0.40, 0.54,



**Fig. 4** The finite element model of cyclic tensile test specimen employed in the present study



**Fig. 5** The finite element model of shutdown cooling piping system employed in the present study

0.80, 0.87, 1.01, 1.20 %)에 대응되는 변위는 ABAQUS의 quation option을 사용하여 제어되었다. Fig. 5의 정지냉각계통 배관 모델은 해석 시간의 단축을 위해 빔 요소(ELBOW32)와 솔리드 요소 (C3D8D)를 조합한 하이브리드 모델을 사용하였으며, 총 250,069개 절점과 205,525개 요소로 이루어져 있다. 일반적으로 3차원 솔리드 요소를 이용할 경우 비교적 정확한 결과를 제시하는 것으로 알려져 있으나 해석에 많은 시간이 소요된다는 문제가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 큰 소성 변형이 발생할 것으로 예상되는 곡관 부위에 대해서만 솔리드 요소를 적용하였다. 최근 일본의 연구에서도 배관계 해석 시 탄성적으로 거동할 것으로 예상되는 부위는 빔 요소를 적용하

고, 큰 형상 변형 혹은 소성 변형이 발생할 것으로 예상되는 부위는 이를 모사할 수 있는 요소를 사용할 경우 타당한 결과를 제공하는 것을 확인한 바 있다.<sup>(10)</sup> ABAQUS의 amplitude option을 사용하여 정지냉각계통의 지지대 지점(S1, S2, S3, S4)에 가진 이력을 적용하였으며 지진 정착부 운동(seismic anchor motion)의 영향을 고려하기 위해 배관의 양 끝단 지점(E1, E2)에도 가진 이력을 적용하였다.

재료는 원자력 배관 계통에 널리 사용되는 SA312 TP316L 스테인리스강을 고려하였으며 탄성계수는 190 GPa, 푸아송 비는 0.3을 고려하였다. 또한 세 가지 경화 이론을 전산 모사하기 위해 ABAQUS에서 제공되는 기능을 사용하였다. 등방경화이론은 단축인장시험의 진응력-진소성변형을 선도를 입력함으로써 모사가 가능하며, 이동경화는 재료 상수  $C, \gamma$  를 입력하여 모사할 수 있다. 또한 복합경화의 경우  $C, \gamma$  상수와 함께 등방경화를 정의하는 재료 상수인  $Q, b$ 를 추가적으로 입력하여 모사 가능하다. 재료 상수  $C, \gamma, Q, b$ 는 SA312 TP316L에 대해 국내에서 수행한 반복하중 실험 결과<sup>(7)</sup>와 동일한 재료에 대해 Chaboche 등이 작성한 논문<sup>(4)</sup>에 제시된 값<sup>(4)</sup>을 사용하였다. 본 논문에서 고려된 재료 상수는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 시편에 대한 해석 결과

Fig. 6은 국내에서 실시된 반복하중 실험으로 구한 재료 상수를 사용하여 수행한 유한요소해석 결과와 반복 인장 실험 결과를 비교한 그래프이다. Fig. 6에서 (a), (b), (c)는 각각 등방경화, 이동경화, 복합경화에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸다. Fig 6에서 점선은 반복 인장 실험의 히스테리시스 루프이며 실선은 유한요소 해석으로 구한 히스테리시스 루프를 나타낸다. 또한, 반복하중 실험의 히스테리시스 루프는 0.29%, 1.20%일 때의 안정화된 루프를 나타내며, 유한요소해석 결과에 대한 히스테리시스 루프는 변형률 진폭( $\epsilon_a$ )이 0.29%,

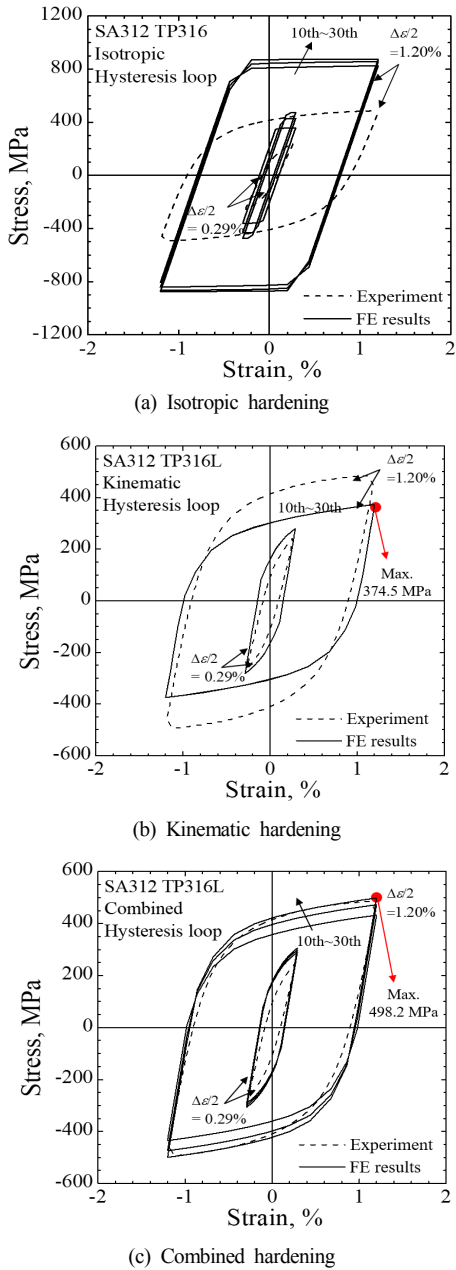
**Table 1** Material parameters for hardening models

|            | $\sigma_{yo}$ | $Q$ | $b$ | $C_1$ | $\gamma_1$ | $C_2$ | $\gamma_2$ | $C_3$ |
|------------|---------------|-----|-----|-------|------------|-------|------------|-------|
| Experiment | 180           | 180 | 1   | 70000 | 700        | 8000  | 120        | 3000  |
| Ref. (4)   | 150           | 115 | 8   | 6000  | 1200       | 19600 | 140        | 1800  |

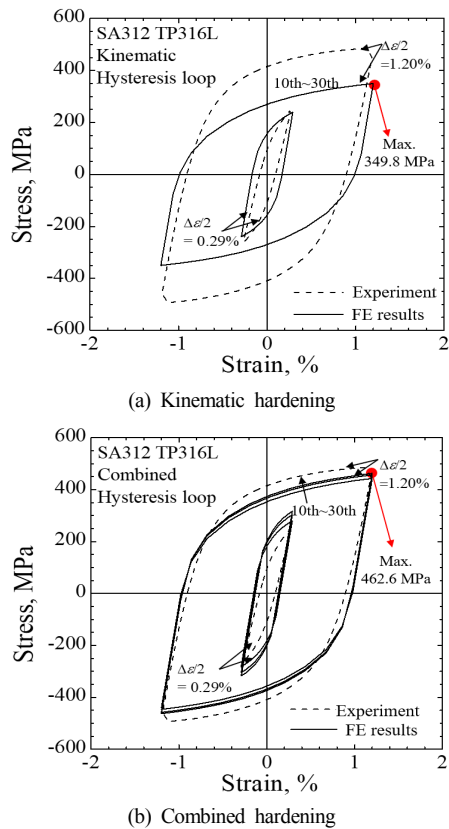
$\sigma_{yo}, Q, C$  [MPa]

1.20%일 때, 10, 20, 30번째 사이클의 결과이다.

Fig. 6의 (a)에 나타낸 바와 같이 등방경화이론을 적용할 경우, 반복하중에 의한 경화 현상을 모사할 수 있다. 그러나 비탄성 영역에서 실제 반복 인장 실험



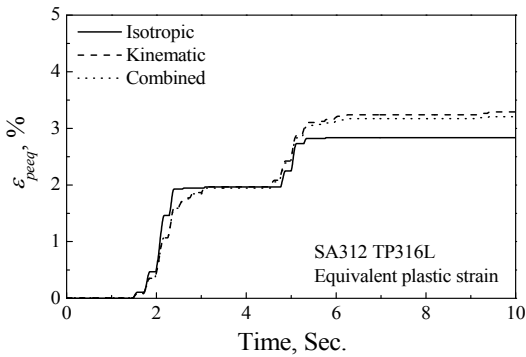
**Fig. 6** Comparisons of finite element results using hardening models with experimental material constants with experimental results



**Fig. 7** Comparisons of finite element results from hardening models using material constants given in Ref. (4) with experimental results

결과에 비해 경화 거동이 과하게 예측되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 6의 (b)를 보면, 이동경화이론은 인장/압축 반복에 의한 재료의 경화 거동을 반영하지 못하였다. Fig. 6의 (c)는 등방경화와 이동경화를 조합한 복합경화이론을 적용한 결과로, 등방경화와 이동경화를 고려한 경우보다 비교적 실험 결과와 유사하였다. 이는 비선형 복합경화이론이 재료의 비선형 반복하중 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있는 것을 의미한다.

추가적으로 본 논문에서는 구성방정식의 재료 상수가 반복 거동 평가에 미치는 영향을 검토하기 위해서 동일 재료(SA312 TP316L) 및 동일 경화 모델에 대해 참고문헌 (4)에서 제시된 재료 상수를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과에 따른 히스테리시스 루프는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 (a)와 (b)는 각각 이동경화와 복합경화에 대한 결과를 나타낸다. Fig. 6과 마찬가지로 반복하중



**Fig. 8** Variations of maximum equivalent plastic strains of shutdown cooling piping according to cyclic hardening models

실험에 따른 히스테리시스 루프는 0.29%, 1.20%일 때의 안정화된 루프이며, 유한요소해석 결과로 구한 히스테리시스 루프는 변형률 진폭이 0.29%, 1.20%일 때 10, 20, 30번째 사이클의 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 7을 보면, Fig. 6의 결과와 동일하게 복합경화를 고려한 경우가 실험 결과와 가장 유사한 것으로 나타났다. 그러나 동일한 경화 모델을 사용했음에도 불구하고 두 재료 상수에 대한 결과는 차이를 보였다.

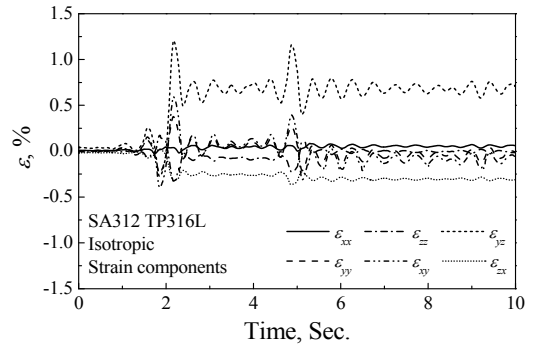
### 3.2 정지냉각계통에 대한 해석 결과

본 연구에서는 앞서 수행한 인장 시편에 대한 평가를 실제 정지냉각계통 배관에도 적용함으로써 실제 구조물의 거동에 미치는 경화 모델의 영향을 확인하였다.

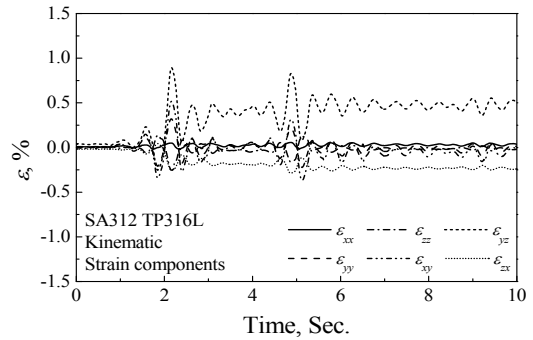
Figs. 8~10은 등가소성변형률이 최대인 지점에서의 유한요소해석 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 8은 시간 이력에 따른 등가소성변형률( $\epsilon_{p,eq}$ )을 나타낸 것이다. Fig. 9는 시간 이력에 따른 6개의 변형률 성분( $\epsilon_{x,x}$ ,  $\epsilon_{y,y}$ ,  $\epsilon_{z,z}$ ,  $\epsilon_{x,y}$ ,  $\epsilon_{y,z}$ ,  $\epsilon_{z,x}$ )을 나타낸 그래프로 (a), (b), (c)는 각각 등방경화, 이동경화, 복합경화에 대한 결과를 나타낸다. 또한, Fig. 10은 시간 이력에 따른 등가변형률범위( $\Delta\epsilon_{equiv}$ )를 나타낸 그래프이다. ASME B&PV Code, Section III, NB-3200에 명시된 절차에 따라 본 연구에서는 6개 변형률 성분(Fig. 9)에서 각각의 최댓값을 기준으로 각 성분에 대한 변형률 범위( $\Delta\epsilon_{x,x}$ ,  $\Delta\epsilon_{y,y}$ ,  $\Delta\epsilon_{z,z}$ ,  $\Delta\epsilon_{x,y}$ ,  $\Delta\epsilon_{y,z}$ ,  $\Delta\epsilon_{z,x}$ )를 구하고 이를 아래의 식 (6)에 대입하여 등가변형률범위를 계산하였다.<sup>(11,12)</sup>

$$\Delta\epsilon_{equiv} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\Delta\epsilon_{xx} - \Delta\epsilon_{yy})^2 + (\Delta\epsilon_{yy} - \Delta\epsilon_{zz})^2 + (\Delta\epsilon_{zz} - \Delta\epsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2} (\Delta\epsilon_{xy}^2 + \Delta\epsilon_{yz}^2 + \Delta\epsilon_{zx}^2)]^{1/2} \quad (6)$$

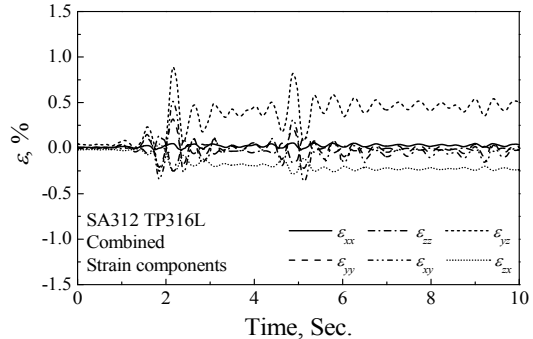
Fig. 8을 보면 등방경화의 경우 동일한 가진 이력에 대해 비교적 작은 등가소성변형률을 보였다. 이는 인장 시편 결과와 동일하게 이동경화나 복합경화에 비해 경화가 크게 예측된 것을 의미한다. 그러나 인장 시편 결과와 달리 실제 정지냉각계통의 경우,



(a) Isotropic hardening



(b) Kinematic hardening



(c) Combined hardening

**Fig. 9** Variations of strain components of shutdown cooling piping according to cyclic hardening models

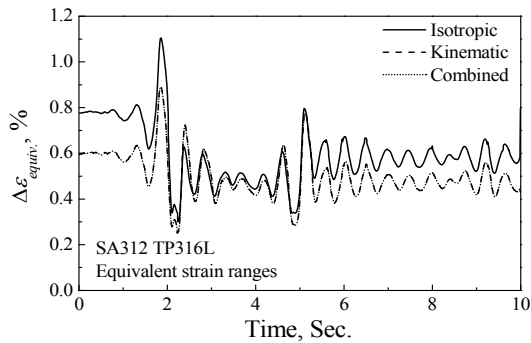


Fig. 10 Variations of equivalent strain ranges of shutdown cooling piping according to cyclic hardening models

이동경화와 복합경화에 대한 등가소성변형률은 비슷한 결과를 보였다. Fig. 9를 보면 등방경화의 변형률 성분배에 대한 결과는 이동경화와 복합경화보다 큰 것으로 나타났고, 이동경화와 복합경화는 비슷한 결과를 보였다. 이에 따라 Fig. 9를 이용하여 구한 Fig. 10의 등가변형률범위도 Fig. 9와 동일한 결과를 보였다. 따라서 만약 실제 배관계통에 대해 저주기 피로를 평가할 경우에는 복합경화모델을 사용하지 않고 이동경화 모델을 적용하여도 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 다만 Fig. 6 혹은 Fig. 7의 시편 해석 결과에 나타난 바와 같이 변형률 범위가 작은 경우에는 이동경화와 복합경화가 유사한 값을 제시하였으나 변형률 범위가 큰 경우에는 그 차이가 클 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 배관 계통에 대한 해석 결과 역시 지진하중 수준에 따라 이동경화로 예측된 값과 복합경화로 예측된 값의 차이 정도가 달라질 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 반복하중 하에서 재료의 거동을 모사할 수 있는 경화 이론을 적용하여 인장 시편 해석을 수행하였다. 또한, 경화 이론 구성방정식의 재료 상수의 영향을 검토하기 위해 다른 방법으로 제시된 2가지의 재료 상수를 사용하여 이에 따른 영향을 검토하였다. 추가적으로 본 논문에서는 3가지 경화 이론에 따른 영향 평가를 원자력 배관계에 적용하여 실제 구조물 거동도 평가하였다.

인장 시편에 대한 해석 결과, 반복하중에서 복합

경화이론이 실제 재료의 거동을 비교적 정확히 예측하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 모델을 사용했음에도 불구하고 재료 상수 정의에 따라 결과의 차이를 보였다. 따라서 경화 모델의 재료 상수 결정법에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

원자력 배관계에 대한 해석 결과, 시편 해석 결과와 다르게 실제 구조물에 대한 등가소성변형률과 등가변형률범위 결과 모두 이동경화와 복합경화에서 유사한 결과를 보였다. 따라서, 반복하중 하에서 실제 배관 계통의 거동은 이동경화이론이나 복합경화이론으로 모사가 가능할 것으로 판단되나, 차이의 정도는 지진하중의 수준에 영향을 받을 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 에너지기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(20171520101650).

#### 참고문헌

- (1) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1989, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall.
- (2) Prager, W., 1956, "A New Methods of Analyzing Stresses and Strains in Work Hardening Plastic Solids," *J. Appl. Mech.*, Vol. 23, pp. 493-496.
- (3) Frederick, C. O. and Armstrong, P. J., 2007, "A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect," *Mater. at High Temp.*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-26.
- (4) Chaboche, J. L., Dang Van, K. and Cordier, G., 1979, "Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Hardening of 316 Stainless Steel," *5th Structural Mechanics in Reactor Technology Conference*, Berlin Germany.
- (5) Chaboche, J. L., 1986, "Time-Independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity," *Int. J. of Plast.*, No. 2, pp. 149-188.
- (6) Ohno, N. and Wang, J. D., 1993, "Kinematic Hardening Rules with Critical State of Dynamic Recovery, Part I: Formulation and Basic Features for Ratchetting Behavior," *Int. J. of Plast.*, Vol. 9, pp. 375-390.
- (7) Kim, J. W., Kim, J. S. and Kweon, H. D., 2017, "Evaluation of Deformation Behavior of Nuclear

- Structural Materials under Cyclic Loading Conditions via Cyclic Stress-Strain Test,” *Trans. of KPVP*, Vol. 13, No. 1, pp. 75-83.
- (8) Lee, S. H., Kim, J. S. and Kweon, H. D., 2016, “Optimization of Finite Element Dynamic Analysis on a Piping System under Beyond Design Based Earthquake,” *Proc. of KSME Conference*, pp. 2366-2369.
- (9) Dassault Systemes Corp., 2014, “ABAQUS/Standard User’s Manuals,” Ver. 6.14.
- (10) Otani, A., Shibutani, T., Morishita, M., Nakamura, I., Watakabe, T. and Shiratori, M., 2017, “Seismic Qualification of Piping System by Detailed Inelastic Response Analysis, Part 2: A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Analysis,” *Proc. of ASME PVP2017 Conference*, PVP2017-65190.
- (11) ASME, 2008, “Rules for construction of nuclear facility components,” *ASME B&PV Sec. III, Div. 1*.
- (12) Adams, T. M., 2015, “Basis of the Upcoming Changes to Piping Seismic Design Rules in the ASME BPVC Section III, Division 1, Article NB-3200,” *Proc. of ASME PVP2015 Conference*, PVP2015- 45697.