

## 반복하중을 받는 스테인리스강의 이력거동 해석모델 개발

## Finite Element Simulation of Hysteretic Behavior of Structural Stainless Steel under Cyclic Loading

전준태\*

Jun-Tai Jeon\*

Professor, Department of Civil &amp; Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Jun-Tai Jeon, jtjeon@inhac.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** This study intends to develop a nonlinear cyclic plasticity damage model in the framework of finite element formulation, which is capable of taking large deformation effects into account, in order to accurately predict the hysteretic behavior of stainless steel structures. **Method:** The new cyclic constitutive equations that utilize the combined isotropic-kinematic hardening rule for plastic deformation is incorporated into the damage mechanic model in conjunction with the large strain formulation. The damage growth law is based on the experimental observations that the evolution of microvoids yields nonlinear damage accumulation with plastic deformation. The damage model parameters and the procedure for their identification are presented. **Results and Conclusion:** The proposed nonlinear damage model has been verified by simulating uniaxial strain-controlled monotonic and cyclic loading tests, and successfully applied to a thin-walled stainless steel pipe subjected to constant and alternating strain-controlled cyclic loadings.

**Keywords:** Nonlinear Damage Model, Cyclic Plasticity Constitutive Model Three-Dimensional Finite Element Analysis, Hysteretic Behavior, Stainless Steel

## 요약

**연구목적:** 본 연구에서는 대변형 효과를 구현할 수 있는 유한요소 해석기법을 기반으로 반복하중에 의한 스테인리스강의 이력거동을 정확하게 평가할 수 있는 비선형 반복소성 손상모델을 개발하였다. **연구방법:** 개선된 운동경화 모델과 등방경화 법칙을 연계하여 반복하중 하에서의 재료의 거동을 모사하는데 필요한 반복소성 모델을 개발하였으며, 이를 비선형 손상모델과 결합하였다. **연구결과 및 결론:** 제안된 비선형 손상모델을 검증하기 위하여 변형률 제어 단조 및 반복하중 시험을 모사하였으며, 이를 통한 해석결과를 시험결과와 비교하였다. 비교 결과, 본 연구에서 제안한 비선형 손상모델은 스테인리스강의 반복하중 하에서의 이력거동을 정확하게 모사할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어:** 비선형 손상모델, 반복소성 구성모델, 3차원 유한요소 해석, 이력거동, 스테인리스강

## 서론

스테인리스강은 전통적으로 구조공학분야에 쓰이기에는 사치스러운 재료로 여겨져 왔다. 결과적으로 스테인리스강의 주재료로서의 건설분야에의 적용은 특수 구조물에 제한되

Received | 28 January, 2019

Revised | 28 January, 2019

Accepted | 22 March, 2019

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

어 왔다. 이는 스테인리스강에 대한 이해부족, 제한된 설계기준과 표준화의 부재, 그리고 높은 초기비용 등의 이유 때문이었다. 하지만, 지난 30여 년간 스테인리스강에 대한 많은 연구로 인해 새로운 설계기준(EN 1993-1-4, 2006)이 등장하고, 스테인리스강에 대한 이해의 폭이 커지고, 유지관리의 중요성이 대두 되면서 스테인리스강을 건설분야에 적용하려는 움직임이 커지고 있다(Gardner, 2005; Gedge, 2008; Lee et al., 2013; Lee et al., 2014). 스테인리스강은 일반 탄소강과 많은 유사점을 가지고 있지만, 구조물 설계시에 탄소강과는 다르게 다루어져야 할 물리적 성질을 가지고 있다. 영율과 항복응력 등과 같은 직접적인 차이점 이외에도 단조하중에 의한 응력-변형률 곡선 및 반복하중 하에서의 이력거동 등은 탄소강과 차이가 발생한다. 따라서, 스테인리스강을 강구조물에 적용하기 위해서는 이러한 역학적 특성에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다.

스테인리스강을 포함한 강구조물의 대표적인 파괴형태로는 피로나 지진과 같은 반복하중에 의한 파괴이다. 최근 동일본 대지진 및 쓰촨성 대지진 등을 포함하여, 한반도 주변국가에 강진이 잇따라 발생하여 심각한 물적 인적 피해를 발생시키고 있다. 우리나라의 경우 대륙판의 경계부에서 조금 벗어나 있어 판의 경계부에 있는 지역들 보다는 지진에 대해서 상대적으로 안전한 것으로 인식되어 왔으나, 최근에 국내에서 지진이 관측된 이래 최대 규모의 지진이 경주와 포항을 강타함에 따라 더 이상 우리나라도 지진에 대한 안전지역이 아님을 알 수 있게 되었다. 그리고 국내의 지진발생 횟수도 점차적으로 증가하고 있으며 그 규모도 커지고 있으므로, 앞으로 우리나라에서 큰 규모의 지진이 발생하여 막대한 피해를 초래할 가능성이 있다. 이러한 지진에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 내진설계 등과 같은 적절한 지진예방대책을 마련할 필요가 있으며, 내진설계에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 하는 것 중에 하나가 대상 구조물에 대한 정확한 내진성능 평가이다. 따라서 강구조물의 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 지진에 대한 내진성능을 정확하게 평가할 수 있는 기법의 개발이 필수적이다. 이를 위해서는 기본적으로 강구조물에 적용되는 강재의 반복하중 하에서의 이력거동을 정확하게 모사할 수 있는 해석기법의 개발이 필연적이다. 본 연구에서는 유한요소 해석기법을 기반으로 다양한 하중 하에서 재료 및 구조물에 발생하는 손상을 고려한 파괴현상을 예측할 수 있는 연속체 손상역학과 반복하중에 의한 강재의 응력-변형률 거동을 재현할 수 있는 반복소성 구성모델을 이용하여 스테인리스강의 반복하중에 의한 이력거동을 모사할 수 있는 유한요소 기반 비선형 연속체 손상모델을 개발하였다.

## 비선형 연속체 손상모델 개발

본 연구에서는 유한요소 해석기법을 기반으로 연속체 손상역학과 반복소성 구성모델을 이용하여 비선형 연속체 손상모델을 개발하였다. 개발된 비선형 손상모델과 모델변수를 결정하기 위한 절차들은 다음과 같다.

### 비선형 손상모델

Kachanov(1986)와 Lemaitre(1985)에 의해 개발된 등방성 손상에 대한 손상변수  $D$ 는 아래와 같다.

$$D = 1 - \frac{A_D}{A_T} \quad (1)$$

여기서,  $A_D$ 는 미세균열과 미세응력 집중, 그리고 미세균열 사이의 상호작용을 고려한 손상영역의 면적을 말하며,  $A_T$ 는

비손상영역의 총면적을 의미한다. 이때 유효저항면적에 대해 계산되는 응력을 유효응력이라 한다. 등방성 손상에 대하여 미세균열의 구조적 거동은 미세균열의 방향성과는 무관하며 오로지 스칼라 변수인 변수  $D$ 에 의존하게 된다. 따라서 모든 응력 성분에 대한 유효응력  $\bar{\sigma}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \tag{2}$$

여기서, 응력을 나누는 계수  $(1-D)$ 는 재료의 손상량과 관련된 감소계수이다. 손상변수  $D=0$ 은 비손상상태를 말하며,  $D \in [0, 1]$ 은 부분손상상태를 나타낸다. 그리고  $D=D_c$ 는 완전한 국지적 파단상태를 의미하며,  $D_c$ 는 파단상태에서의 손상량이다.

재료의 구성방정식은 상태변수라 명명되는 몇 가지 변수들을 통하여 비가역적 열역학의 틀에서 정식화 될 수 있다. 실험에 의하면 탄성손상은 소성손상 및 다른 내부상태변수로부터 분리할 수 있다. 따라서 손상변형에너지 해방률은 선형 열탄성의 틀에서 유도할 수 있으며, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \frac{-W_e}{(1-D)} = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \tag{3}$$

여기서,  $\sigma_{eq} = \left(\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}\right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ ,  $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{kk}$ ,  $f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) = \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu)\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)^2\right]$ 이다. 그리고  $W_e (= \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^e)$ 는 총 탄성변형에너지,  $\sigma_{eq}$ 는 상당 von Mises 응력,  $s_{ij}$ 와  $\sigma_{kk}$ 는 각각 응력 텐서의 편차와 트레이스를 나타낸다. 또한,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta,  $\sigma_m$ 은 등방응력 그리고  $\nu$ 는 포아송 비이다. 소산포텐셜은 Legendre-Fenchel 변환(Bataille et al., 1979)을 이용하여 관련변수의 함수로 정식화 된다.

$$F = \underbrace{F_p(\bar{\sigma}, X, R, D)}_{plastic} + \underbrace{F_D(Y, D, p)}_{damage} \tag{4}$$

여기서,  $p$ 는 유효축적 소성변형률이며 다음과 같다.

$$\dot{p} = \left(\frac{2}{3}\dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

Mises의 항복이론에 근거한 상관소성이론에 따르면 소성 소산포텐셜은 다음과 같이 구해진다.

$$F_p(\bar{\sigma}, X, R, D) = (\bar{\sigma}^D - X^D)_{eq} - R - \sigma_y + \frac{3}{4X_\infty} X_{ij}^D X_{ij}^D \tag{6}$$

여기서,  $\bar{\sigma}^D$ 와  $X^D$ 는 각각 유효응력의 편차항과 반복하중에 대한 비선형 운동경화의 back-stress 이다.  $X_{\infty}$ ,  $\sigma_y$  그리고  $R$ 은 수렴 back-stress, 초기 항복응력 그리고 등방경화 응력함수를 나타낸다. 상당 von Mises 응력은 아래와 같다.

$$\sigma_{eq} = (\bar{\sigma}^D - X^D)_{eq} = \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{\sigma_{ij}^D}{1-D} - X_{ij}^D \right) \left( \frac{\sigma_{ij}^D}{1-D} - X_{ij}^D \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

일반화된 정상규칙과 변형률 속도의 분리를 상정하면 손상재료에 대한 상태 및 소산 포텐셜로부터 구성방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^t = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (8)$$

(a) 탄성변형률 속도

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{1-D} - \frac{\nu}{E} \frac{\dot{\sigma}_{kk}}{1-D} \delta_{ij} \quad (9)$$

여기서,  $\dot{\sigma}_{ij}$ 는 응력텐서의 속도를 나타낸다.

(b) 소성변형률 속도

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F_p}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{1-D} \frac{\bar{\sigma}_{ij}^D - X_{ij}^D}{(\bar{\sigma}^D - X^D)_{eq}} \quad (10)$$

여기서,  $\lambda$ 는 소성승수이다.

(c) 운동경화 법칙: 개선된 운동경화 모델은 Burlet and Cailletaud 법칙(Burlet et al., 1986)의 방사상 소실 부분과 멱함수를 통합함으로써 개발되었다.

$$\dot{X}_{ij}^D = \sum_{k=1}^N (\dot{X}_{ij}^D)_k = \sum_{k=1}^N \gamma_k \left\{ \frac{2}{3} C_k \dot{\varepsilon}_{ij}^p - \left( \frac{\bar{X}_k^D}{C_k} \right)^\eta \left[ \phi (X_{ij}^D)_k + (1-\phi) ((X_{rs}^D)_k : n_{rs}) n_{ij} \right] \dot{p} \right\} \quad (11)$$

여기서,  $N$ 은 back-stress 수이고,  $\eta$ ,  $\phi$ ,  $C_k$  그리고  $\gamma_k$ 는 모든 back-stress 진전을 위한 재료상수이고,  $\bar{X}_k^D = (3/2 X_k^D : X_k^D)^{1/2}$ 는  $k$ 번째 back-stress의 점근적 값이다. 본 연구에서는  $N$ 을 3으로 정하였다.

(d) 등방경화 법칙

$$\dot{r} = Q (b \cdot e^{-bp}) \dot{p} \quad (12)$$

여기서,  $Q$ 와  $b$ 는 등방경화와 연관된 재료상수이다. 운동경화법칙과 등방경화 법칙은 반복소성 구성모델을 구성하는 핵심법칙이다.

(e) 손상진전률

$$\dot{D} = -\lambda \frac{\partial F_D}{\partial Y} = -\frac{\partial \Phi^*}{\partial Y} \tag{13}$$

여기서,  $\Phi^*$ 는 손상 소산포텐셜이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다(Do, 2013).

$$\Phi^*(D, \dot{p}, p, Y) = \frac{1}{2} \frac{S(-Y/S)^2 (k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta p^{2n}} \tag{14}$$

여기서,  $S$ 는 손상 변형에너지이고,  $n$ 은 재료의 경화지수,  $k_1$ 과  $m$ 은 손상진전과 관련된 재료상수,  $\beta$ 는 형상계수이며, 이들은 손상법칙의 비선형성을 부여하게 되고 단축인장시험을 통하여 얻을 수 있다. 식(14)를 손상에너지 해방률  $Y$ 에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{D} = -\frac{\partial \Phi^*}{\partial Y} = \frac{\bar{\sigma}_{eq}^{-2}}{2ES} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \frac{(k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta p^{2n}} \tag{15}$$

유효 상관응력  $\bar{\sigma}_{eq}$ 은 강재와 같은 연성재료에 대하여 지수 경화법칙을 이용한 축적소성변형의 함수로 아래와 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{1-D} = K \dot{p}^n \tag{16}$$

여기서,  $K$ 는 재료상수이다. 식(16)을 식(15)에 대입하고 식(13)의 손상발전률을 고려하면 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\dot{D} = \frac{K^2}{2ES} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \frac{(k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta} \tag{17}$$

위식을 영역  $[D_0, D]$ 와 영역  $[p_0, p]$ 에 대하여 적분하면 아래와 같다.

$$\frac{D^{\beta+1}}{\beta+1} \Big|_{D_0}^D = \frac{K^2}{2ES} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) (k_1 p^m + p) \Big|_{p_0}^p \tag{18}$$

단축하중의 경우  $p = p_0$  일 때  $D = D_0$ 가 되고,  $W_c = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E}$  일 때  $f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) = 1$ 이 된다. 따라서 식 (18)은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$D^M - D_0^M = \frac{K^2}{2ES} M [k_1(p^m - p_0^m) + (p - p_0)] \quad (19)$$

여기서,  $M = \beta + 1$ 이다. 파단이 발생하는 최대 손상에 대한 조건 즉,  $p = p_r$  일 때  $D = D_c$ 를 이용하면 식 (19)는 다음과 같이 변환된다.

$$D_c^M - D_0^M = \frac{K^2}{2ES} M [k_1(p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)] \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)을 이용하면 다음의 식이 성립된다.

$$\frac{D^M - D_0^M}{D_c^M - D_0^M} = \frac{k_1(p^m - p_0^m) + (p - p_0)}{k_1(p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)} \quad (21)$$

그리고

$$\frac{K^2}{2ES} = \frac{D_c^M - D_0^M}{M [k_1(p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)]} \quad (22)$$

식 (22)를 식 (17)에 대입하면 비례하중에 대하여 일반적인 다축응력상태에서의 비선형 손상진전률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{D} = -\frac{\partial \Phi^*}{\partial Y} = \frac{D_c^M - D_0^M}{M [k_1(p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)]} \times f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \frac{(k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta} \quad (23)$$

여기서,  $D_c$ 는 파단상태에서의 손상량이고  $D_0$ 는 초기균열이 발생하는 한계점이다.  $p_r$ 과  $p_0$ 는 각각 파단상태에서의 소성변형률과 초기균열이 발생할 때의 소성변형률이다.

지진과 같은 비선형 반복하중에 의한 국부적인 좌굴을 정확하게 평가하기 위해서는 재료학적 비선형뿐만 아니라 좌굴 혹은 대변형과 연관된 기하학적 비선형을 반드시 고려해야 한다. 본 연구에서 재료학적 비선형은 제안된 반복소성 손상모델에 의해 구현될 수 있고, 기하학적 비선형을 고려하기 위해서 대변형 유한요소 해석기법(Bathe et al., 1975)을 적용하였다. 개발된 수치모델의 실행을 위하여 8절점 Isoparametric 입체유한요소를 도입한 Fortran 기반의 In-house 프로그램(Lee et al., 2013; Lee et al., 2014)을 사용하였다.

## 모델 파라메타 결정

본 연구에서 제안한 대변형 효과를 고려한 반복소성모델을 연계하는 비선형 연속체 손상모델은 총 17개의 재료 변수가 적용된다. 즉, 반복 소성모델의 등방경화와 운동경화를 계산하는데 필요한 10개의 변수  $C_1, C_2, C_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \eta, \phi, Q, b$ 와 손상진전을 계산하기 위한 7개의 변수  $D_c, D_0, k_1, m, \beta, p_0, p_r$ 가 필요하다. 이러한 모델 파라메타는 다음과 같은 절차에 의해 구할 수 있다.

- 1) 재료의 완전 양진형 변형률제어 반복하중시험으로부터 얻을 수 있는 반복 피크응력과 축적소성변형률 사이의 관계식으로부터 변형률경화곡선을 구할 수 있고, 이로부터  $Q$ 와  $b$ 를 결정할 수 있다.
- 2)  $C_1, C_2, C_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \eta, \phi$ 는 초기탄성영역의 크기, 재료상수  $Q$ 와  $b$  그리고 식 (11)로부터 구할 수 있다.
- 3) 과거이력을 알 수 없는 초기손상의 크기  $D_0$ 와 한계 소성변형률  $p_0$ 는 재료로부터 측정하기가 매우 어려우므로 이 두 변수는 손상계산을 시작하는 단계에서 '0'으로 취해진다.
- 4)  $p_r$ 과  $D_c$ 는 각각 재료에 파단이 발생했을 때의 변형률과 손상변수를 의미한다.  $p_r$ 은 유효저항단면적의 내하력을 저하시키는 손상의 양과 관계된다. 이론적으로 한계손상변수  $D_c$ 는 파단이 발생했을 때 '1'과 같아야 하지만 실험적으로 관찰한 결과 파단은  $D=1$  이전에 발생한다.
- 5) 나머지 재료변수인  $k_1, m, \beta$ 는 손상변수와 축적소성변형률 사이의 관계곡선으로부터 구할 수 있다. 변수  $\beta$ 는 식 (23)에서 보여지는 것과 같이 손상진전의 비선형성의 정도를 나타내며, 소성변형률 함수인 손상진전에 미치는 가공성장 3단계의 영향을 고려하게 된다.

손상모델과 관련된 손상변수를 결정하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 인장시험 시 인장시험편을 만능시험기에 물린 후 재료의 항복응력의 1/4에 해당하는 하중을 시험편에 가한다. 이후 변위제어로 반복하중시험을 실시한다.
- 2) 반복하중시험 동안 시험편의 강성변화를 알아보기 위해서 시험편의 게이지 부분에 신장계를 설치한다. 신장계 대신에 변형률 게이지를 부착할 수도 있는데, 이 경우에는 시험편 중앙의 최대비틀림 때문에 변형률 게이지로부터 구한 값이 신장계로부터 얻어지는 값보다 약간 크지만 그 차이는 무시할 수 있다.
- 3) 반복하중시험은 미리 결정한 하중이력에 따라 시험편의 변형이 최대가 되어 넥킹(necking)현상이 발생할 때 까지 계속적으로 진행한다. 반복하중시험 동안 각 사이클에 대하여 영율과 대응하는 소성변형률을 측정한다. 이때 영율의 측정은 재하(reloading)때 보다는 제하(unloading) 시에 수행하여야 한다. 손상변수는 아래의 식에 의해 유도된다.

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (24)$$

여기서,  $E_0$ 는 재료의 초기 탄성계수이고  $E$ 는 재하시의 실제 탄성계수이다. 본 연구에서는 모든 손상모델변수를 전술한 변형률 제어 반복하중 시험들을 통하여 구하였으며 본 연구에서 선정한 스테인리스강인 SUS304에 대한 값들을 Table 1과

Table 2에 나타내었다.

**Table 1.** Damage model parameters for the isotropic and kinematic hardening rules

Material	$\eta$	$\phi$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\gamma_1$
SUS304	0.5	1.0	30.11	82.71	70.8	3.466
	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$Q$	$b$		
	350.0	53.19	50.0	12.5		

**Table 2.** Damage model parameters for the damage evolution

Material	$D_c$	$D_0$	$k_1$	$m$	$\beta$	$p_0$	$p_r$
SUS304	0.8	0.0	0.013	1	2.896	0.0	1.25

### 비선형 연속체 손상모델 검증

본 연구에서 제안된 비선형 연속체 손상모델의 유효성을 검증하기 위하여 Aboutalebi et al.(2011)이 수행한 실험 및 수치 해석 결과를 이용하였다. Aboutalebi 등은 St14 강재의 인장시험편에 대하여 단축인장시험을 수행하여 하중-변위 관계를 구하였고 이를 유한요소모델을 이용하여 손상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 해석하여 실험값과 비교하였다. 실험 및 해석에 관한 상세한 사항은 참고문헌(Aboutalebi et al., 2011)에 잘 나와 있다. Aboutalebi 등이 수행한 실험 및 해석 결과를 본 연구에서 개발된 비선형 손상모델을 이용한 유한요소 해석결과와 직접 비교하였다. Fig. 1에 실험에서 구한 축방향 하중-변위 응답곡선과 손상을 고려하지 않고 유한요소해석을 수행한 경우의 결과(FEM)와 선형 손상진전에 입각한 선형 손상모델을 이용한 유한요소 해석결과(FEM+CDM)를 나타내었으며, 본 연구에서 개발된 비선형 손상모델에 의한 유한요소 해석 결과와 비교하였다. 결과를 보면 손상을 고려하지 않고 수치해석을 수행한 결과보다 손상을 고려하여 수치해석을 수행한 해석결과가 시험결과와 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 개발된 비선형 손상모델에 의해서 얻어진 수치해석 결과가 선형 손상모델에 의한 손상을 고려한 유한요소 해석결과보다 훨씬 더 실험값에 가까운 것을 알 수 있는데, 이것은 본 손상모델에서 고려한 비선형 손상진전과 기하학적 비선형 때문인 것으로 파악된다. 그리고, 비교결과를 통하여 손상에 의한 재료의 연화를 수치적으로 정확하게 모사하기 위해서는 비선형 손상모델이 구성방정식에 반드시 포함되어야 함을 알 수 있다.

개발된 비선형 손상모델을 이용하여 몇 가지 구조용강에 대한 손상진전해석을 수행하였으며, 그 해석결과를 실험결과와 비교하였다. Fig. 2에 작용하는 소성변형률에 대한 계산된 손상변수  $D$ 를 도시하여 Le Roy et al.(1981)이 수행한 실험결과와 비교하였다. Le Roy 등은 강재의 인장시험편을 이용하여 인장 시에 발생하는 기공의 생성과 성장을 SEM (scanning electron microscopy)을 통하여 관찰하였으며, 여러 종류의 구조용강들에 대해서 작용변형률과 기공의 면적분량에 대한 관계식을 확립하였다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌(Le Roy et al., 1981)에 잘 나타나 있다. 결과를 자세히 살펴보면, 손상진전에 있어서 상당한 비선형성을 관찰할 수 있으며, 개발된 손상모델에 의해 계산된 값과 인장시험을 통하여 구한 값이 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



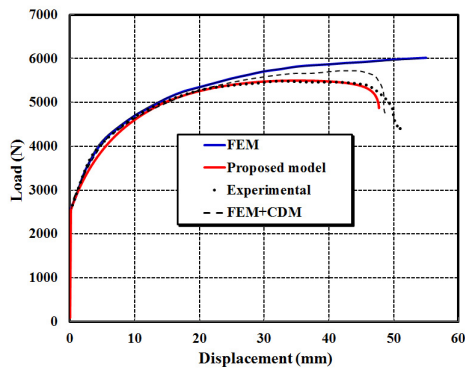


Fig. 1. Comparison of the finite element result with the experimental and numerical data

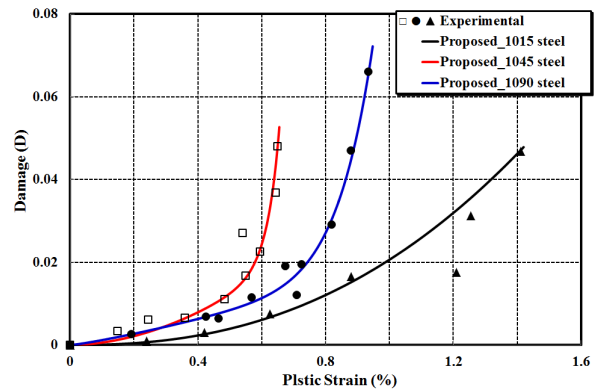


Fig. 2. Comparisons of the damage evolution predicted by the proposed nonlinear damage model with the experimental measurements

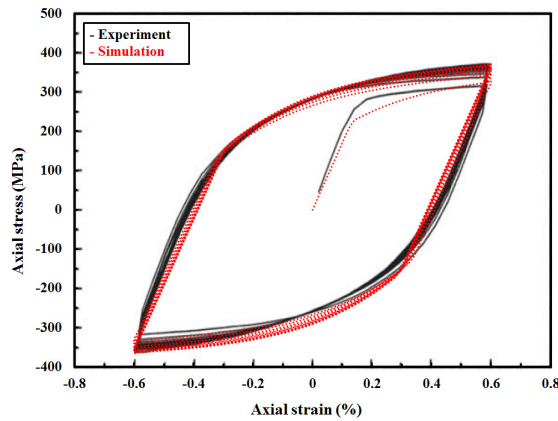


Fig. 3. Comparison of the predicted and the experimental hysteresis loops for the symmetric strain cycling

본 연구에서 개발된 비선형 손상모델의 정확성을 검증하기 위하여 마지막으로 Kang et al.(2002)이 수행한 SUS304 스테인리스강의 반복하중시험편에 대한 변형률제어 단축반복하중시험을 제안된 손상모델을 이용한 유한요소해석을 실시하여 그 해석결과를 시험결과와 비교하였다. 반복하중시험에 대한 상세한 설명은 참고문헌(Kang et al., 2002)에 잘 나와 있다. Fig. 3에 변형률 진폭 0.6%에 대한 응력-변형률 이력곡선을 나타내었다. 실선은 실험결과를 나타낸 것이고 점선은 수치해석 결과를 표시한 것이다. 비교 결과 비선형 손상모델에 의해 예측된 응력-변형률 응답곡선은 시험에 의해 계측된 결과와 상당히 유사하다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터, 본 연구에서 개발된 연속체 손상역학에 기반한 비선형 손상모델은 구조물을 구성하는 재료의 반복하중 하에서의 비선형 거동을 아주 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 비선형 손상모델을 이용한 반복하중 하에서의 이력거동 해석

반복하중 하에서의 스테인리스강의 이력거동을 모사하기 위하여 타당성 및 유효성이 검증된 비선형 연속체 손상모델을 이용한 유한요소해석을 실시하였다. 본 해석에서는 180mm (외경) × 360mm (길이) × 6mm (두께)의 강관에 대하여 축방향

반복하중을 재하하는 것으로 상정하였다. 유한요소모델은 Fig. 4에 보이는 것과 같이 절점당 3개의 이동 자유도를 가지는 3차원 8절점 등매개 입체요소를 적용하였다. 강관 중앙에서의 대칭성을 이용하여 반모델로 해석하였으며, 하중은 강관의 축방향과 평행하게 강관의 끝면에 변형률 제어 반복하중으로 재하하였다. 본 해석에서는 Fig. 5에 보이는 것과 같이 변형률 진폭이 0.1%에서 0.6%까지 점진적으로 증가하는 형태의 완전 양진형 반복하중과 변형률 진폭이 0.6%로 일정한 완전 양진형 반복하중형태의 두가지 타입의 반복하중을 상정하였다. 반복하중이 재하되는 강관의 끝면에 있는 절점들은 오직 하중 작용 방향으로만 움직이도록 경계조건을 설정하였다.

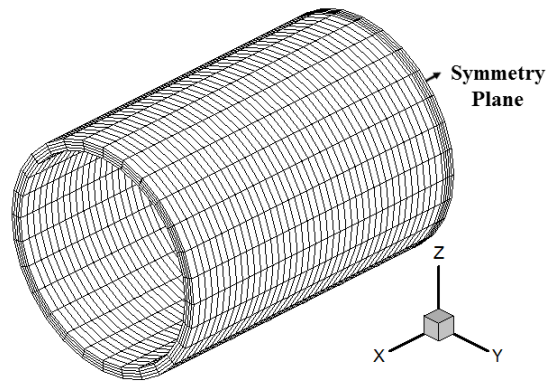


Fig. 4. 3-dimensional finite element model

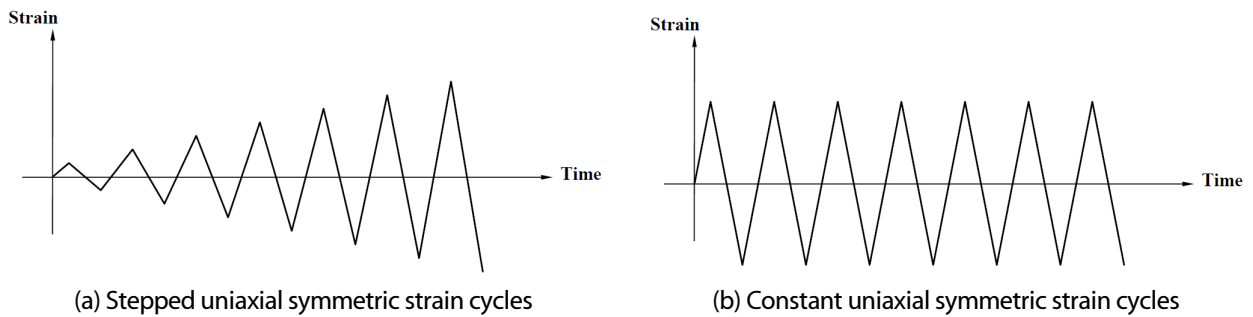


Fig. 5. Loading histories

Fig. 6과 Fig. 7에 각각 Fig. 5(a) 및 Fig. 5(b)의 반복하중에 대한 이력거동 결과를 나타내었다. 결과를 보면, 반복하중에 의한 반복경화현상으로 인하여 변형률 진폭이 일정한 경우가 진폭이 점진적으로 증가하는 경우보다 변형률 진폭 0.6%에 대하여 에너지 소산량이 다소 큼을 알 수 있다. 그리고 본 연구에서 제안한 비선형 연속체 손상모델은 서로 다른 형태의 반복하중에 대한 스테인리스강의 이력거동을 잘 묘사하는 것을 알 수 있으며, 스테인리스강의 반복하중에 의한 반복경화현상과 반복하중에 의한 항복응력의 감소현상을 정확하게 수치적으로 재현하는 것을 확인할 수 있다.

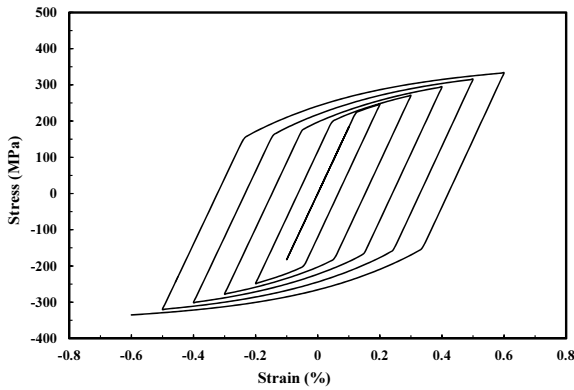


Fig. 6. Cyclic strain-stress curves for the stepped strain cycling with changing strain amplitude

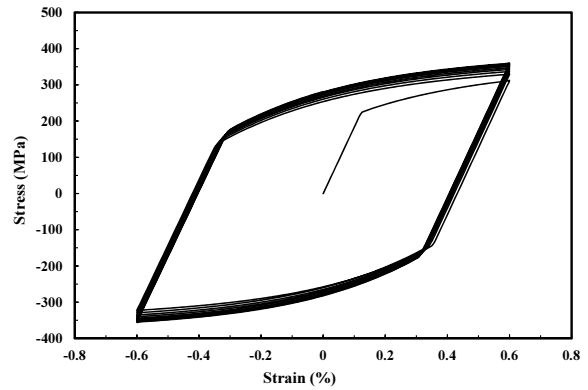


Fig. 7. Hysteresis loops for the symmetric strain cycling with constant strain amplitude

## 결론

스테인리스강은 탄소강에 비해 유지관리 측면에서 유리할 뿐만 아니라, 높은 항복비와 큰 연신율로 인하여 지진과 같은 반복하중에 대한 저항능력이 우수하다. 본 연구에서는 스테인리스강의 반복하중에 의한 이력거동을 정확하게 모사할 수 있는 수치모델을 개발하고자 하였으며, 개발된 수치모델에 관한 자세한 사항은 다음과 같다.

- 1) 지진과 같은 비선형 반복하중에 의한 국부적인 좌굴거동 등을 정확하게 평가하기 위하여, 대변형 효과를 구현할 수 있는 유한요소 해석기법을 기반으로 하여 연속체 손상역학과 반복소성 구성모델을 이용한 비선형 연속체 손상모델을 개발하였다.
- 2) 개선된 운동경화 모델과 등방경화 법칙을 연계하여 반복하중 하에서의 재료의 거동을 정확하게 모사할 수 있는 반복소성 모델을 개발하였으며, 이를 비선형 손상모델과 결합하였다. 그리고 제안된 손상모델의 수치적인 실행에 필요한 모델변수를 결정하기 위한 절차들을 제시하였다.
- 3) 제안된 비선형 손상모델을 검증하기 위하여 변형률 제어를 통한 단조 및 반복하중 시험을 수치적으로 재현하였으며, 이를 통한 해석결과를 시험결과와 비교하였다. 비교 결과, 본 연구에서 제안한 비선형 손상모델은 스테인리스강의 반복하중 하에서의 이력거동을 정확하게 모사할 수 있음을 확인할 수 있었고, 이를 통하여 강구조물의 내진성능을 정확하게 평가할 수 있는 기법의 개발이 가능하리라 판단된다.

## Acknowledgement

이 논문은 2018학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] Aboutalebi, F.H., Farzin, M., Poursina, M. (2011). "Numerical simulation and experimental validation of a ductile damage model for DIN 1623 St14 steel." International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 53, pp. 157-165.

- [2] Bataille, J., Kestin, J. (1979). "Irreversible process and physical interpretation of rational thermodynamics." *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 4, pp. 229-258.
- [3] Bathe, K.J., Ramm, E., Wilson, E.L. (1975). "Finite element formulations for large formation dynamic analysis." *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 9, pp. 353-386.
- [4] Burlet, H., Cailletaud, G. (1986). "Numerical techniques for cyclic plasticity at variable temperature." *Engineering Computations*, Vol. 3, pp. 143-153.
- [5] Do, N.V.V (2013). Finite element modeling of fatigue damage and its evolution in steel structures. Ph.D. Thesis, Chung-Ang University, Korea.
- [6] EN 1993-1-4 (2006). Eurocode 3: design of steel structures-Part 1.4: General rules-supplementary rules for stainless steel, CEN.
- [7] Gardner, L. (2005). "The use of stainless steel in structures." *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 7, pp. 45-55.
- [8] Gedge, G. (2008). "Structural uses of stainless steel. buildings and civil engineering." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, pp. 1194-1198.
- [9] Kachanov, L.M (1986). *Introduction to continuum Damage Mechanics*. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- [10] Kang, G.Z., Gao, Q., Yang, X. (2002). "A visco-plastic constitutive model incorporated with cyclic hardening for uniaxial/multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel at room temperature." *Mechanics of Materials*, Vol. 34, pp. 521-531.
- [11] Le Roy, G., Embury, J.D., Edward, G., Ashby, M.F. (1981). "A model for ductile fracture based on nucleation and growth of voids." *Acta Metallurgica*, Vol. 29, pp. 1509-1522.
- [12] Lee, C.H., Chang, K.H., Park, K.T., Shin, H.S., Kim, T. (2013). "Bending resistance of girth-welded stainless steel circular hollow sections." *Thin-Walled Structures*, Vol. 73, pp. 174-184.
- [13] Lee, C.H., Chang, K.H., Park, K.T., Shin, H.S., Lee, M. (2014). "Compressive strength of girth-welded stainless steel circular hollow section members: Stub columns." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 92, pp. 15-24.
- [14] Lemaitre, J. (1985). "A Continuous damage mechanics model for ductile fracture." *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 83-89.