

# 고강도 강재의 비탄성 거동을 모사하기 위한 복합경화모델 파라미터 결정

## Determination of Combined Hardening Model Parameters to Simulate the Inelastic Behavior of High-Strength Steels

조은선<sup>1)</sup> · 조진우<sup>1)</sup> · 한상환<sup>2)\*</sup>

Cho, EunSeon<sup>1)</sup> · Cho, Jin Woo<sup>1)</sup> · Han, Sang Whan<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축공학과 대학원생, <sup>2)</sup>한양대학교 건축공학과 교수

<sup>1)</sup>Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, <sup>2)</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

### / A B S T R A C T /

The demand for high-strength steel is rising due to its economic efficiency. Low-cycle fatigue (LCF) tests have been conducted to investigate the nonlinear behaviors of high-strength steel. Accurate material models must be used to obtain reliable results on seismic performance evaluation using numerical analyses. This study uses the combined hardening model to simulate the LCF behavior of high-strength steel. However, it is challenging and complex to determine material model parameters for specific high-strength steel because a highly nonlinear equation is used in the model, and several parameters need to be resolved. This study used the particle swarm algorithm (PSO) to determine the model parameters based on the LCF test data of HSA 650 steel. It is shown that the model with parameter values selected from the PSO accurately simulates the measured LCF curves.

**Key words:** High strength steel, Combined hardening model, Constitutive model parameters, Particle swarm optimization, Low cycle fatigue

## 1. 서론

대도시로의 인구집중으로 인한 토지이용 극대화과 랜드마크로서의 상징성 확보를 위해 국내외에서 초고층 건물 및 초대형 구조물에 대한 필요성이 대두되고 있다. 높이와 규모가 확장에 따라 지중이 증가하고 동시에 풍하중과 지진하중도 증가하게 되어 건물 하부에서 작용하는 하중이 커져 요구되는 부재의 크기가 비약적으로 증가하게 된다[1, 2]. 하지만, 생산할 수 있는 부재의 크기는 제한적이라는 한계가 있다. 이에 따라 건물의 경량화를 추구할 수 있고 경제성과 안전성을 확보할 수 있는 고강도 강재의 수요가 높아지고 있으며, 내구성 및 내진 취약성을 향상시키기 위한 고강도 강재의 개발 및 성능 평가 등의 연구가 요구되고 있다 [3, 4].

현행 내진기준인 AISC 341 [5]에서는 부재가 비선형 거동 시 높은 연성능력을 확보하기 위해 비선형 구조부재와 내진 횡력 저항 시스템의 부재에

사용하는 경우 최소항복강도를 각각 345 MPa과 450 MPa를 넘지 않도록 제한하고 있다. 이를 충족하지 못하는 강재나 그 이상의 강도를 갖는 강재에 대해서는 실험을 통해 안정성을 검증할 경우 일부 사용이 가능하도록 예외 사항을 두고 있다.

본 연구에서는 국내 건축 구조용 고강도 강재인 HSA650 (KS D 5994) [6]의 내진성능을 평가하고, 강재의 재료 특성이 기준에서 제시하고 있는 요구사항을 만족하는지 조사하기 위해 단순 인장 시험과 저주기 피로실험을 수행하였다. 단순 인장 시험을 통해 고강도 강재가 높은 항복강도를 가지며, 항복안정기없이 인장강도에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 저주기 피로 실험을 통해 반복연화 현상이 발견되는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 강재의 비선형 거동을 적절히 모사하는 재료모델 구성방정식의 파라미터를 결정하고자 한다.

## 2. 재료실험

국내 건축 구조용 고강도 강재인 HSA650의 비선형 거동을 평가하기 위해 ASTM E8/E8M [7]에 따른 단순 인장 시험 ASTM E606/E606M [8]

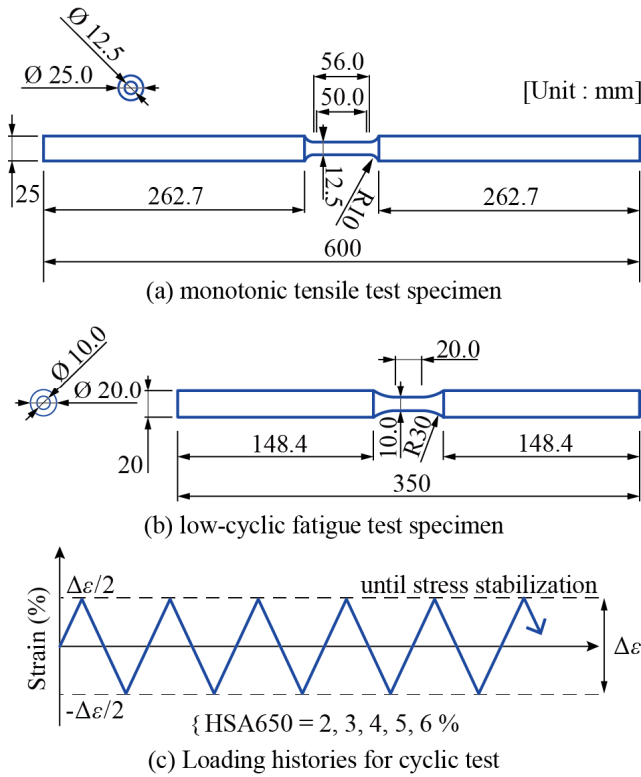
\*Corresponding author: Han, Sang Whan

E-mail: swhan@hanyang.ac.kr

(Received September 4, 2023; Revised October 3, 2023; Accepted October 4, 2023)

**Table 1.** Chemical compositions of HSA650 steel

Chemical composition [%]		
C ≤0.20	Si ≤0.55	Mn ≤3.00
P ≤0.015	S ≤0.006	CEQ ≤0.60



**Fig. 1.** Coupon test dimension of HSA 650 steel

에 따른 저주기 피로 시험이 수행되었다. 시편은 두께 16 mm 이상 49 mm 이하의 판재에서 채취하였으며, 화학적 성분구성은 Table 1과 같다.

**2.1 단순 인장 시험 (Monotonic tensile test)**

단순 인장 시험은 ASTM E8/E8M [7]에 따라 표준 봉형 인장 시험편으로 제작되었으며, 두께와 표점거리는 각각 12.5 mm와 25 mm이다. 이를 포함한 상세치수는 Fig. 1(a)에 제시되어있다. 시험속도는 항복강도와 인장강도 측정 시 각각 0.8 mm/min, 2.5 mm/min의 속도로 가력하였다.

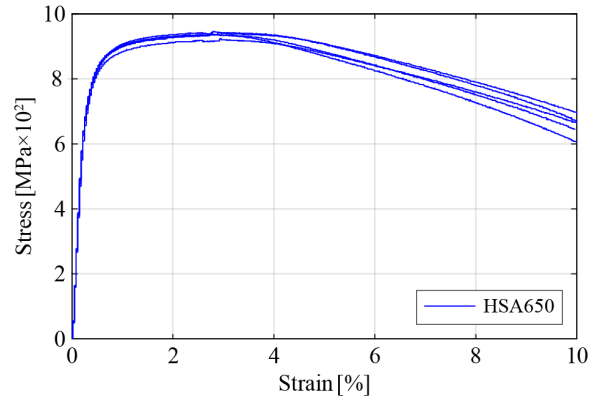
Table 2에 탄성계수 ( $E$ ), 항복강도 ( $F_y$ ), 인장강도 ( $F_u$ ), 항복-인장비 ( $F_y/F_u$ ), 균일연신율 ( $\epsilon_u$ ), 파단연신율 ( $\epsilon_f$ )의 평균값을 나타냈다. 강재의 응력-변형률 곡선은 Fig. 2에 나타났다.

Shi et al. [9]에서는 일반강재에 대한 응력-변형률 곡선에서 주로 관찰되는 항복안정기 현상이 공칭항복강도가 460 MPa보다 높은 고강도 강재에서 발현되지 않을 수 있음을 언급한 바 있다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 HSA650 강재는 항복강도 발현 후 항복안정기 구간없이 인장강도에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 항복강도는 일반적인 방법론인 0.2% 오프셋 방법을 사용하여 771 MPa로 산정하였다.

**Table 2.** Mean values of mechanical properties

Specimen	$E$ [MPa]	$F_y$ [MPa]	$F_u$ [MPa]	$\frac{F_y}{F_u}$ -	$\epsilon_u$ [%]	$\epsilon_f$ [%]
HSA650	210313	771	938	0.82	4.3	18.4



**Fig. 2.** Stress-strain curve for monotonic tensile test

**2.2 저주기 피로 실험 (Low-cycle fatigue test)**

본 연구에서 수행된 저주기 피로 실험 (LCF test)은 ASTM E606/E606M [8]에 따라 제작되었으며, 시편의 치수는 Fig. 1(b)와 같다. 또한, Fig. 1(c)에 보이는 바와 같이 2%, 3%, 4%, 5%, 6%의 변형률 범위에 대해 균등한 인장-압축 변형 진폭의 하중이력을 가하며 응력이 안정화 상태에 도달할 때 까지 실험을 수행하였다.

ASTM E606/E606M [8]에서는 사이클의 최대와 최소의 편차가 1% 이내이며, 해당 범위 내에서 안정적으로 유지되는 상태를 안정화 상태라 제시하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 실험 수행 중 응력이 안정화 상태에 도달하는 것이 육안으로 관찰될 때 실험을 종료하였다.

Table 3에 가력범위 ( $\Delta\epsilon$ )에 따른 실험결과를 항복강도 ( $F_y$ ), 첫 번째 사이클에서의 최대응력 ( $\sigma_{max}^{(1)}$ ), 안정화 된 사이클에서의 최대응력 ( $\sigma_{max}^{(s)}$ ), 응력 변화량 ( $\Delta\sigma_{max} = \sigma_{max}^{(s)} - \sigma_{max}^{(1)}$ )에 대해 정리하였다.

저주기 피로실험에 대한 결과를 응력-변형률 곡선으로 Fig. 3에 나타냈다.

Table 3에서 보이는 바와 같이 비교적 낮은 변형률 범위인  $\Delta\epsilon = 2\%$ 를 제외한 모든 가력범위에 대해  $\Delta\sigma_{max}$  값이 음수의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 반복가력이 지속됨에 따라 응력이 점차 감소하며 안정화상

**Table 3.** Summary from LCF test for HSA650

Specimen	$\Delta\epsilon$ [%]	$F_y$ [MPa]	$\sigma_{max}^{(1)}$ [MPa]	$\sigma_{max}^{(s)}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{max}$ [MPa]
HSA650-C-1	2	762	863	868	+5
HSA650-C-2	3	762	916	866	-50
HSA650-C-3	4	758	923	885	-38
HSA650-C-4	5	764	958	884	-74
HSA650-C-5	6	773	956	863	-93

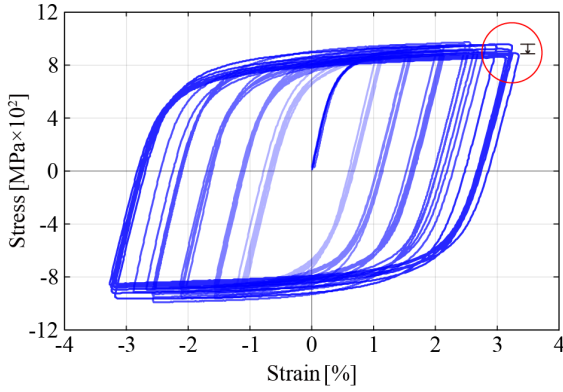


Fig. 3. Stress-strain curve for LCF test

태에 이르는 주기적 연화 현상이 발현되는 것으로부터 기인하며, Fig. 3의 빨간색 원으로 설명할 수 있다.

### 3. 재료모델

일반적으로 강재는 항복 이후에 변형률 경화 상태에 이르게 되며, 반복 가력 시 바우싱거효과 (Bauschinger effect)와 주기적 경화/연화 (Cyclic hardening/softening) 등의 비선형 거동을 경험한다 [10-12]. 강재의 비선형 거동을 적절히 구현하기 위해 필요한 주요 전제 중 하나는 재료의 응력-변형률 관계에 대한 개념을 정확히 이해하고 이를 구성방정식으로 표현할 수 있는 것이다. 등방성 및 이동성 경화 법칙은 재료의 소성영역을 설명하는 중요한 경화이론 중 하나이다. 하지만, 각각의 단일모델만으로는 주기적 경화/연화 현상 및 바우싱거효과와 같은 다양한 특성을 적절히 예측할 수 없다. 이러한 한계를 개선하기 위해 여러 선행연구에서는 주기적 및 시간 독립적 거동을 모사하기 위한 다양한 소성모델이 제안되었다 [13-19]. Bari and Hassan [20]에서는 여러 모델을 비교하는 연구를 수행한 바 있으며, 실험결과와 비교하여 Chaboche [17, 18] 모델이 바우싱거효과와 라체팅과 같은 현상을 정확하게 모사할 수 있음을 확인하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 Chaboche의 복합 경화 모델을 사용하여 HSA650 강재의 이력을 정확하게 예측하고자 한다. 본 연구에서는 Voce [13]가 제안한 등방경화모델과 Chaboche [18]이 제안한 이동경화모델을 중첩한 복합경화모델을 사용하여 강재의 주기적 거동을 예측하고자 한다.

#### 3.1 등방 경화 모델 (Isotropic hardening model)

Voce [13]가 제안한 등방경화모델은 항복면의 중심위치는 유지한 채 크기를 변화시켜 재료의 비선형 거동을 모사하는 모델이다 (Fig. 4-③). 이는 von-Mises 항복조건 하에 식 (1)과 같이 정의된다. 이때,  $J_2$ 는 von-Mises 응력을 의미하며,  $k$ 는 초기 탄성 한계 응력을 의미한다. 이는 항복면의 크기 변화를 나타내는 함수  $R$ 를 추가하여 식 (2)처럼 표현된다. 여기서,  $Q$ 와  $b$ 는 재료상수로 각각 항복면의 최대 증가량과 누적 소성변형률 ( $p$ )의 증분비를 의미한다.

$$f(\sigma, R) = J_2(\sigma) - k - R \quad (1)$$

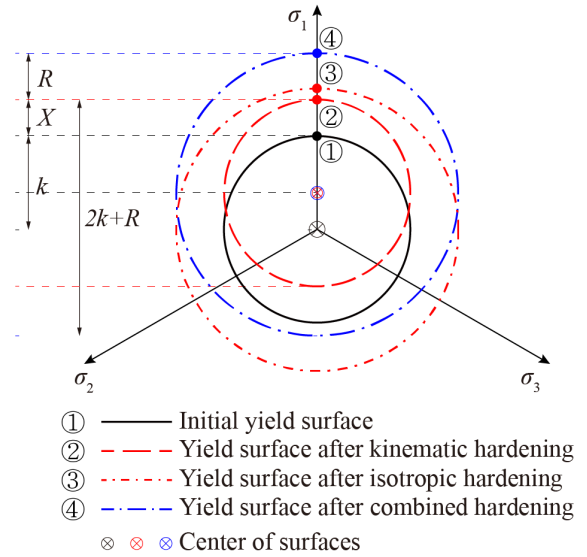


Fig. 4. Schematic of combined hardening model

$$R(p) = Q(1 - \exp^{-bp}) \quad (2)$$

소성변형의 누적에 따른 항복면의 증가는 반복하중에 따른 주기적 경화 및 연화 현상을 고려할 수 있으나 증가된 항복면은 회복되지 않고, 그 중심 위치는 변하지 않기 때문에 바우싱거 효과는 모사하지 못하는 한계가 있다.

#### 3.2 이동 경화 모델 (Kinematic hardening model)

항복면의 크기는 유지한 채 중심위치의 이동으로 비선형 거동을 모사하는 표현하는 이동 경화 모델 (Fig. 4-②)은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f(\sigma, X) = J_2(\sigma - X) - k \quad (3)$$

$$X_i(\epsilon_p) = C_i \epsilon_p \quad (4)$$

$$X_i(\epsilon_p) = \nu \frac{C_i}{\gamma_i} + (X_0 - \nu \frac{C_i}{\gamma_i}) e^{-\nu \gamma_i (\epsilon_p - \epsilon_{p0})} \quad (5)$$

여기서,  $X$ 는 소성변형률 ( $\epsilon_p$ )에 관한 함수인 배응력을 의미한다. 이는 크게 선형과 비선형 모델로 나타낼 수 있으며, 각각 식 (4)와 (5)로 표현된다. 여기서,  $C_i$ ,  $\gamma_i$ 는 재료상수이며,  $X_0$ 와  $\epsilon_{p0}$ 는 각각 소성경화가 시작되는 시점에서의 배응력과 소성변형률을 의미한다.  $\nu$ 는 응력의 방향을 나타내는 계수로 정, 부 방향에 따라 각각 1 또는 -1의 값을 가진다.

Prager [14]에 의해 처음 제안된 선형 이동 경화 모델은 이선형(bilinear) 거동과 유사하게 응답을 모사하는 매우 단순한 모델이지만, 실제의 이력을 적절히 예측하기에는 어려움이 있다. 이를 개선하기 위해 제안된 선형 경화 모델을 다중 중첩한 Mroz [15]의 모델은 중첩함에 따라 정확도가 높아지지만 그에 비례하게 재료상수의 수도 증가한다는 한계가 있다.

비선형 이동 경화모델로는 Armstrong and Frederick [16]이 있으며, 이는 시간에 독립적인 경화를 연구하여 비선형성을 적절히 모사하지만, 주

기적 거동에 대한 현상을 예측에는 한계가 있다. Chaboche [17, 18]는 재료의 주기적 및 시간에 독립적인 경화를 통합한 복합경화모형을 제안하여 주기적 경화/연화 현상, 바우싱거 효과와 라체팅 등을 정확하게 모사한다. 또한, 탄성영역, 피로 파괴 영역, 안정화 영역의 세 단계로 나누어 비선형성을 보다 정확하게 표현한다.

이동 경화 모델의 경우 항복면의 위치가 이동하며 소성거동을 표현하기에 바우싱거 효과를 표현할 수 있으나 소성 변형의 누적에 관한 항이 없기에 주기적 경화/연화 현상을 나타낼 수 없는 한계가 있다.

### 3.3 복합경화 모델 (Combined hardening model)

복합경화모형은 등방경화모형과 이동경화모형을 중첩한 모델 (Fig. 4-④)로 식 (6)과 같이 표현되며, 임의의 소성변형 상태에서 응력의 경우 식 (7)로 정의된다.

$$f(\sigma, X, R) = J_2(\sigma - X) - k - R \tag{6}$$

$$\sigma(k, \epsilon_p, p) = \nu k + \nu R(p) + X(\epsilon_p) \tag{7}$$

본 연구에서 사용하고자 하는 복합경화모형을 구성방정식으로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$\sigma(k, \epsilon_p, p) = \nu k + \nu Q(1 - \exp^{-b\epsilon_p}) + \nu \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{\gamma_i} + (X_0 - \nu \frac{C_i}{\gamma_i}) e^{-\nu \gamma_i (\epsilon_p - \epsilon_{p0})} \tag{8}$$

## 4. 재료상수 결정

복합경화모형에 사용되는 재료상수는 초기 항복조건을 의미하는  $k$ , 등방 경화모형을 표현하는  $Q, b$ , 이동경화모형을 나타내는  $C_1, \gamma_1, C_2, \gamma_2, C_3, \gamma_3$  으로 총 9개이다. 이는 비교적 단순무식한 방법인 시행착오 (trial-and-error) 로 도출할 수 있으나 변수가 많아 정확한 최적해를 산정할 수 없으며, 많은 시도가 필요하기에 소요되는 시간 또한 막대하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 한계를 개선하기 위해 복잡한 문제에서 전역 최적을 탐색하는데 효과적으로 활용되는 최적화 기법 중 하나인 입자 군집 최적화 (Particle Swarm Optimization, PSO) 알고리즘을 사용하여 실험결과를 정확하게 예측하는 최적의 복합경화모형 재료상수를 도출하고자 한다.

### 4.1 입자 군집 최적화 (Particle Swarm Optimization, PSO)

Eberhardt and Kennedy [21]에 의해 처음 제안된 PSO는 확률론적 모집단 기반 최적화 기법 (Stochastic population-based optimization) 중 하나로 새나 물고기 떼 등의 동물 군집이 자신 또는 무리의 경험을 바탕으로 동지를 틀거나 먹이를 찾는 것과 같은 목표를 달성하기 위해 함께 움직이는 사회적 행동을 모방한 반복적 최적화 알고리즘이다.

다차원의 공간 속에서 개별입자 (particle)이라 불리는 후보군의 위치 (position) 및 속도 (velocity) 등의 정보 공유를 통해 매 반복 (iteration)마

다 최적해를 찾는 알고리즘으로 쉽게 설명할 수 있으며, Fig. 5에 흐름도에 따라 수행된다.

먼저, PSO 알고리즘을 시작하면서 학습계수와 같은 요소들을 초기화한다. 이후 각 입자들의 초기 속도와 위치를 공간 내에서 무작위로 결정한 후 목적함수의 값을 계산하여 초기 집단의 해를 평가한다. 초기 셋팅이 끝나면 본격적인 최적화 과정에 돌입하게 되는데 각 입자의 속도는 현재속도, 자신의 개인 최적 위치, 전체 군집에서의 최적 위치를 업데이트 하며 위치를 변화시킨다. 이후 업데이트 된 위치를 기준으로 목적함수를 다시 계산한다. 이를 바탕으로 각 입자는 지금까지 탐색한 자신의 가장 좋은 해(개인 최적해)를 결정하게 되며, 이 중에서 전체적으로 가장 최적의 해(전역 최적해)를 군집 전체에서 찾게 된다. 알고리즘은 최대 반복 횟수나 일정 수준의 수렴성을 갖는 조건을 만족할 때 까지 반복되며, 종료조건에 만족할 시 지금까지 찾아낸 전역 최적해를 최종해로 반환하며 종료한다.

Fig. 6은 PSO 알고리즘에서 개별 입자의 위치와 속도 업데이트 과정을 수식과 함께 도식화하여 나타낸 것이다. 각 개별 입자의 위치( $x$ )와 속도( $v$ )

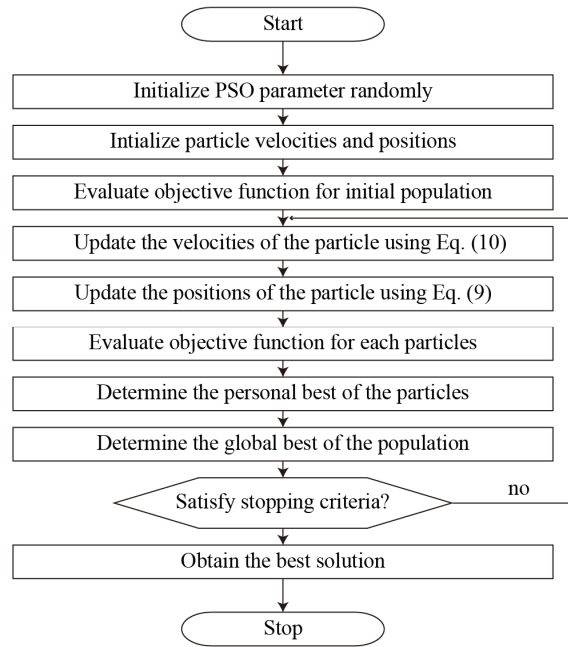


Fig. 5. Flowchart of PSO algorithm

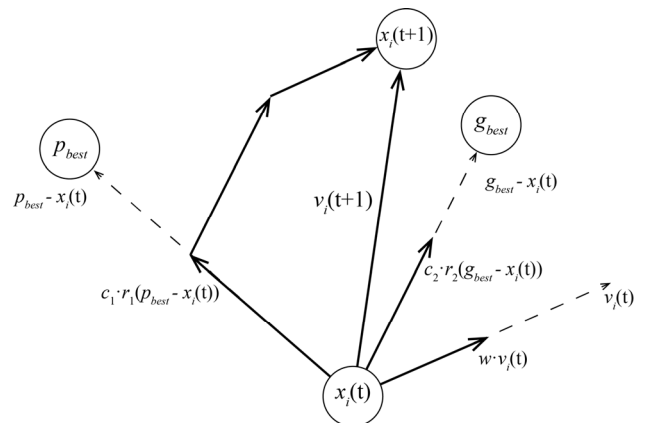


Fig. 6. Process of PSO

는 각각 식 (9)와 (10)으로 표현할 수 있다.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (9)$$

여기서,  $t$ 와  $t+1$ 은 알고리즘의 반복을 나타내는 것으로  $x_i(t)$ 와  $v_i(t+1)$ 은 각각  $t$ 번째 반복에서의  $i$ 번째 입자의 위치와  $(t+1)$ 의 단계로 가는  $i$ 번째 입자의 속도를 의미한다.

속도를 나타내는 함수는 식 (10)으로 정의할 수 있다.

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(p_{best} - x_i(t)) + c_2r_2(g_{best} - x_i(t)) \quad (10)$$

여기서,  $wv_i(t)$ 는 새로운 위치를 검색하고 잠재적으로 최상의 솔루션이 있는 지역을 찾도록 하는 관성을 의미한다.  $c_1r_1(p_{best} - x_i(t))$ 과  $c_2r_2(g_{best} - x_i(t))$ 는 각각 개인의 영향과 사회의 영향을 고려하는 값으로 이전 솔루션을 탐색하고 주어진 지역의 최적 솔루션을 찾는 과정을 의미한다. 이때,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 각각 인지인자 ( $p_{best} - x_i(t)$ )와 사회인자 ( $g_{best} - x_i(t)$ )에 대한 가속상수로 일반적으로  $0 \leq c_1, c_2 \leq 4$  범위에서 입자가 수행하는 단계의 크기를 조절한다.  $r_1$ 과  $r_2$ 는  $[0,1]$ 의 균등분포에서 생성된 난수로 속도 업데이트의 확률적 영향에 기인하는 요소이다.  $p_{best}$ 는 특정 반복에서의 개인 최적해를 의미하며,  $g_{best}$ 는 반복 내에서 군집이 얻은 전반적인 최적해 값을 의미한다.

### 4.2 재료상수 결정

PSO는 목적함수를 최소화하는 최적해를 찾는 알고리즘이다. 본 연구의 목적은 HSA650 강종의 모든 실험값을 적절히 예측하는 재료상수를 도출함에 있기에 목적함수는 수행된 전체 실험결과와 예측결과의 오차율로 정의된다. 목적함수는 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$\Omega = Mn \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(\sigma_i^E - \sigma_i^A)^2} \right) \right\} \quad (11)$$

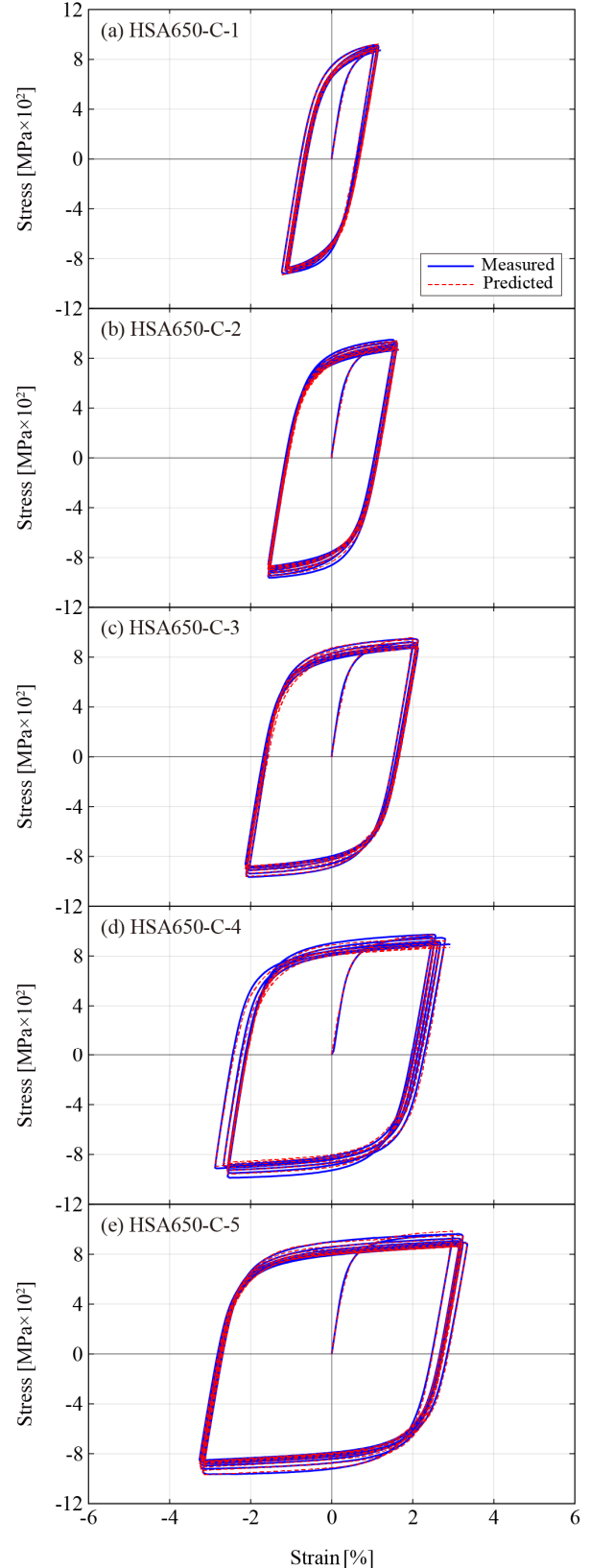
여기서  $M$ 은 강종별 실험의 개수이며,  $N$ 은 실험별 측정된 데이터의 수이다.  $\sigma_i^E$ 와  $\sigma_i^A$ 는 각각 실험과 해석에서의  $i$ 번째 데이터이다.

**Table 4.** Combined hardening model parameter values for HSA650

State	parameter	unit	values
yield criteria	$k$	[MPa]	423.21
	$Q$	[MPa]	-153.13
isotropic hardening	$b$	[-]	2.14
	$C_1$	[MPa]	1509592
kinematic hardening	$\gamma_1$	[-]	4915
	$C_2$	[MPa]	64995
	$\gamma_2$	[-]	359
	$C_3$	[MPa]	2530
	$\gamma_3$	[-]	32

PSO 알고리즘을 사용하여 도출된 복합경화모델의 재료상수를 Table 4에 정리하였다.

앞선 저주기 피로 실험 결과에서 언급한 바와 같이 HSA650 강재는 주



**Fig. 7.** Measured and simulated LCF curves for HSA650



**Table 5.** Error values for toughness of HSA650

specimen	$u_{t,mea}$ [MPa]	$u_{t,pre}$ [MPa]	Error [%]
HSA650-C-1	119.99	119.99	0.00
HSA650-C-2	243.98	239.83	1.70
HSA650-C-3	313.19	312.73	0.15
HSA650-C-4	427.40	419.56	1.83
HSA650-C-5	698.57	703.71	0.74

기적 연화 현상을 발현하며 안정화 상태에 진입한다. 이는 복합경화모델 구성방정식에서  $Q$ 값으로 확인할 수 있는데 도출된 재료상수에서  $Q < 0$ 의 값을 갖기에 연화현상이 적절히 모사되고 있음을 확인할 수 있다 [22].

Fig. 7은 HSA650 강재의 재료상수로 예측한 응력-변형률 곡선을 실험과 비교하여 나타낸 그래프로 무항복점 거동 및 주기적 연화 현상이 적절히 모사되고 있음을 확인할 수 있다. 정확도를 보다 정량적으로 평가하기 위해 재료의 소성 변형 시 에너지를 흡수하는 능력의 척도인 인성(toughness,  $u_t$ )에 대한 오차율을 식 (12)를 통해 도출하였다.

$$Error [\%] = \left( \frac{u_{t,mea} - u_{t,pre}}{u_{t,mea}} \right) \times 100 \quad (12)$$

여기서,  $u_{t,mea}$ 와  $u_{t,pre}$ 는 각각 실제 실험결과와 예측 결과로부터 도출한 인성 값을 의미한다. 이에 대한 오차율을 Table 5에 실험체별로 정리하였다.

평균 오차율이 0.88%로 매우 낮은 것을 확인할 수 있으며, 이는 본 연구에서 제시한 HSA650 강재의 재료상수가 바우싱거효과, 주기적 연화 현상 등의 실제 실험에서 발생할 수 있는 현상학적 거동을 정확하게 예측할 수 있는 것으로 평가된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 구조용 고강도 강재인 HSA650의 재료성능을 조사하기 위해 단조가력 실험 및 저주기 피로실험을 수행하였으며, 소성경화모델 재료모델을 활용하여 이를 정확하게 예측하고자 한다.

단일 모델을 사용할 경우 등방경화모델은 바우싱거 효과를 모사하지 못한다는 한계가 있으며, 이등경화모델은 주기적 거동을 반복하며 안정화 상태에 이르는 현상을 모사할 수 없다는 한계가 있다. 본 연구에서는 두 현상을 모두 고려하는 등방경화모델과 3개의 이등경화모델을 중첩한 복합경화모델을 사용하였다.

복합경화모델의 구성방정식은 초기 탄성한계를 나타내는 재료상수, 등방 및 이등경화모델을 표현하는 상수가 각각 1개, 2개, 6개가 있다. 이를 도출하기 위해 본 연구에서는 최적화 기법 중 하나인 입자 군집 최적화를 사용하여 목적함수가 최소가 되도록 하는 최적의 재료상수를 도출하였다.

본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) HSA650 강재의 단순 인장 실험을 통해 항복강도에 도달 후 항복안정기 없이 인장강도에 이르는 것을 확인하였다. 또한, 저주기 피로 실험으로

부터 지진과 같은 반복하중 하에서 주기적 연화 현상 및 바우싱거 현상을 발현하여 2~6%의 변형률 범위에 대해 연성적으로 비선형 거동을 하는 것을 확인하였다.

- 2) 결정된 재료상수를 기반으로 작성한 LCF 곡선과 실제 실험 결과를 비교했을 때, 육안으로 보기에다 굉장히 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 이를 그래프 면적의 오차로 정량화하여 비교한 결과 변형률 범위별 오차율이 각각 0%, 1.70%, 0.15%, 0.83%와 0.74%로 나타났다. 본 연구의 목적은 HSA650 강종의 반복하중에 따른 주기적 거동 예측을 위한 재료상수 도출에 있기에 모든 변형률 범위를 일관되게 예측하는 재료상수를 도출하였다. 이에 따라 오차율에 일부 차이가 있는 것으로 보이나 평균 오차율이 0.88%로 굉장히 낮은 것으로 보아 변형률에 대한 고려없이 재료상수를 도출해도 높은 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 제시한 HSA650 강재의 재료상수를 유한요소해석 등에 활용할 경우 높은 정확도로 실험 결과를 예측할 수 있으며, 신뢰도 높은 결과를 보유할 것으로 기대된다.

## / 감사의 글 /

본 논문은 한국연구재단 과제(2020R1A2C2010548) 연구의 일환으로 수행되었음.

## / REFERENCES /

1. Kim T, Han SW. Effect of wind loads on collapse performance and seismic loss for steel ordinary moment frames. Appl. Sci. 2022 Feb; 12(4).
2. Kim T, Han SW. Effect of analysis procedures on seismic collapse risk of steel special moment frames. EESK J. Earthquake Eng. Nov;24(6):243-251.
3. Ban HY, Shi G, Shi YJ, Wang YB. Research progress on the mechanical property of high strength structural steels. Adv. Mat. Res. 2011 May;250~253:640-648.
4. Yongjiu S, Meng W, Yuanqing W. Experimental and constitutive model study of structural steel under cyclic lading. J. Constr. Steel Res. 2011 Aug;67(8):1185-1197.
5. AISC 341, Seismic provisions for structural steel building, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction; c2016.
6. KS D 5994. High-performance steel for building structures, Korea: Korean Agency for Technology and Standards; c2018.
7. ASTM E8/E8M. Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, OA, USA; c2016.
8. ASTM E606/E606M. Standard test method for strain-controlled fatigue testing. West Conshohocken, OA, USA; c2012.
9. Shi G, Wang M, Bai Y, Wang F, Shi Y, Wang Y. Experimental and modeling study of high-strength structural steel under cyclic loading. Eng. Struct. 2012 Apr;37:1-13.
10. Segui WY. Steel design, Cengage learning; c2012.
11. Kaufmann EJ, Metrovich B, Pense AW. Characterization of cyclic

- inelastic strain behavior on properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr. 50 rolled sections, ATLSS Report No. 01-13, Lehigh University; c2001.
12. Hilditch TB, Timokhina IB, Robertson LT, Pereloma EV, Hodgson PD. Cyclic deformation of advanced high strength steels: mechanical behavior and microstructural analysis, *Metall. Mater. Trans.*, 2009 Jan;40:342-353.
  13. Voce E, The relationship between stress and strain for homogenous deformation, *J. Inst. Met.*, 1948;74:537-562
  14. Prager W. Recent developments in the mathematical theory of plasticity, *J. Appl. Phys.*, 1949;20(3):235-241.
  15. Armstrong PJ, Frederick CO, A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect, Berkeley Nuclear Laboratories; c1996.
  16. Mroz Z, On the description of anisotropic workhardening, *J. Mech. Phys. Solids*, 1997 May;15(3):163-175.
  17. Chaboche JL, Van KD, Cordier G. Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel, in SMIRT-5, Berlin, Germany; c1979.
  18. Chaboche JL, Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity, *Int. J. Plast.*, 1986;2(2):149-188.
  19. Ohno N, Wang JD, Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, *Int. J. Plast.*, 1994;9(3):375-390.
  20. Bari S, Hassan T, Anatomy of coupled constitutive models for ratcheting simulation, *Int. J. Plast.*, 2000;16(3):381-409.
  21. Eberhart R, Kennedy J, A new optimizer using particle swarm theory, Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, 1995;39-43.
  22. Hancock GJ, Mackenzie MR, On the mechanisms of ductile fracture in high strength-steels subject to multi axial stress state, *Mech. Phys. Solids*, 1978 Jun;24(2-3):147-160.