

# SM490강재의 동적반복소성모델의 정식화 및 3차원 탄소성 유한요소해석의 적용

Formulation of Dynamic Cyclic Plasticity Model for SM490 and Its  
Application to 3-Dimensional Elastic-Plastic Finite Element Analysis

장경호\* · 장갑철\*\*

Chang, Kyong Ho · Jang, Gab Chul

## Abstract

To describe hysteretic behavior of steel structures under dynamic loading such as earthquake, the dynamic cyclic plasticity model considering stress-strain relationship and characteristics of used steel materials under static-dynamic deforming is required. In this paper, mechanical characteristics and stress-strain relationship of SM490 was clarified by carrying out static-dynamic monotonic and cyclic loading test. A dynamic cyclic plasticity model of SM490 was proposed based on the test results and applied 3-dimensional finite element analysis using finite deformation theory. An analytical method developed by the authors was verified validity and accuracy by comparing both analysis and test results. The comparison result shows that the analytical method developed by the authors can predict static-dynamic hysteretic behavior of steel structures with accuracy.

**Keywords :** SM490, dynamic cyclic plasticity model, 3-dimensional elastic-plastic finite element analysis

## 요 지

지진과 같은 동적 반복하중을 받는 강구조물의 이력거동을 구현하기 위해서는 사용된 강재의 정·동적 상태에서의 응력-변형률 관계 및 특성을 고려한 동적반복소성모델이 필요하다. 본 연구에서는 SM490강재의 정·동적 단조 및 반복하중 실험을 수행하여 역학적 특성 및 응력-변형률 관계를 명확히 하였다. 그리고 실험결과에 기초하여 SM490강재의 동적반복소성모델을 제안하였으며 이를 유한변위이론에 기초한 3차원 탄소성 유한요소해석에 적용하였다. 실험시편을 모델링하여 정·동적 단조, 반복 및 변형률속도변화에 따른 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며 이를 실험결과와 비교하였다. 비교를 통하여 본 연구에서 개발한 해석기법이 강부재의 정·동적 변형상태를 정도있게 예측할 수 있음을 검증하였다.

**핵심용어 :** SM490, 동적반복소성모델, 3차원 탄소성 유한요소해석

## 1. 서 론

지진과 같은 반복하중을 받는 강구조물의 경우 국부좌굴 및 넥킹현상이 발생하여 대상구조물의 내진 및 변형능력이 저하된다. 일반적으로 지진과 같은 동적하중을 받을 경우 강부재는 부분적으로 동적변형상태가 되며 이는 정적변형상태와 다른 거동 및 역학적 특성을 보인다. 지진과 같은 동적하중을 받을 경우 강구조물은 고속변형으로 인하여 국부적으로 동적변형상태가 발생한다. 국부적으로 발생한 동적변형상태의 강재는 변형률 속도가 증가하며 동적변형으로 발생하는 열이 충분히 확산하지 못하여 온도가 증가한다. 이와 같이 발생한 변형률 속도와 온도 증가는 대상강재의 역학적 특성과 응력-변형률 관계를 정량적·정성적으로 변화시키며 이로 인하여 대상구조물의 거동 및 성능은 정적상태와 차이를 보인다(Krafft *et al.*, 1963; Rosenfield *et al.*, 1966).

그러므로 동적하중을 받는 강구조물의 거동을 정확한 구현하기 위해서는 먼저 정·동적 변형시 대상강재의 역학적 특성 및 응력-변형률 관계를 명확히 파악해야 한다. 그리고 이러한 특징을 구현할 수 있는 동적반복소성모델과 이를 적용한 3차원적 해석기법이 필요하다.

강재의 동적효과를 고려한 소성모델은 1985년 Johnson & Cook은 변형률속도와 온도효과를 고려한 동적모델을 제안된바 있다(John, 1985). 이후 Johnson-Cook 모델을 이용한 실험 및 해석적 연구가 진행중이다(Børvik, *et al.*, 2003; Stepanov, *et al.*, 2000a, 2000b, 2002a, 2002b). 국내의 경우 강재의 동적변형 구현을 위한 연구가 진행중이나 아직 동적 반복소성모델에 관한 연구는 미진하다. 이와 같이 기존의 동적모델은 Johnson-Cook모델 및 기존모델을 이용한 연구가 주류를 이루었으며 독자적이며 소성이력거동의 메커니즘을 포함한 동적모델에 관한 연구는 미진한 상태이다.

\*정희원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail: changkor@cau.ac.kr)

\*\*정희원 · 중앙대학교 토목공학과 공학박사(E-mail: celeste\_worm@hotmail.com)

이에 본 연구에서는 먼저 정·동적 단조 및 반복하중실험을 수행하여 SM90강재의 정·동적 역학적 특성과 응력-변형률 관계를 명확히 파악하였다. 그리고 변형률속도 변화에 따른 응력-변형률 곡선의 거동을 파악하기 위해 실험을 수행하였다. 실험결과에 기초하여 SM490강재의 응력-변형률 관계를 정식화한 동적반복소성모델을 제안하였다. 그리고 제안 모델을 3차원 탄소성 유한요소해석에 적용하여 강부재의 동적해석을 위한 해석기법을 개발하였다. 실험시편을 모델로한 수치해석을 수행하였으며 실험결과와 비교하여 개발된 해석 기법의 정도 및 타당성을 검증하였다.

## 2. 정·동적 실험방법 및 조건

본 연구에서는 정·동적 변형상태에서 SM490강재의 역학적 특성 및 응력-변형률 관계를 명확히 파악하기 위해 단조, 반복 및 변형률속도 변화 실험을 수행하였다. 변형률속도( $s^{-1}$ )에 따른 강재의 정·동적 상태의 구분은 표 1과 같다.

본 실험에서는 강재의 정·동적 변형상태를 구현하기 위해 변형률속도  $10^{-4} \sim 10^1 (s^{-1})$  범위에서 실험을 수행하였다. 이때, 변형속도는 Cross-head의 속도로 계산하였으며 MTS810 (25tf) 실험기기가 사용하였다. 실험시편은 그림 1(a), (b)에 보이는 바와 같이 ASTM규정을 참조하여 단조하중 및 반복하중 시편을 각각 제작하여 실험을 수행하였다.

실험시 재하하중은 그림 2에 보인바와 같이 실제 지진을

표 1. 변형률 속도에 따른 동정적 실험의 분류

Type of test	Range of strain rate( $s^{-1}$ )
Quasi static tension or compression tests	$10^{-5}$ to $10^{-1}$
Dynamic tension or compression tests	$10^{-1}$ to $10^2$

이상화하여 단조하중(ML)과 반복하중(CL1, CL2)으로 분류하여 각각 재하하였다. 그리고 변형 중 변형률속도 변화에 따른 SM490 강재의 거동을 파악하기 위해 변형률속도 변화 실험을 수행하였다. 변형률속도 및 하중패턴에 따른 실험모델의 분류는 표 2에 보인바와 같다.

## 3. 실험결과 및 고찰

그림 3(a)는 정·동적 단조하중 실험결과인 응력-변형률 곡선을 보이고 있으며 그림 3(b)와 표 3은 변형률속도에 따른 기계적 성질의 변화를 비교하고 있다. 비교 결과 변형률속도가 증가할수록 즉, 동적변형상태로 변할수록 항복응력은 최대 15% 인장응력은 최대 14%가 증가하였다. 반면, 연신률은 변형률속도가 증가할수록 점차 감소하여 최대 11%감소하였다. 탄성계수는 변형률속도에 따라 거의 유사한 값 ( $204 \sim 205 GPa$ )을 보이고 있다.

그림 4는 정·동적 상태에서 SM490강재의 반복하중 실험 결과를 보이고 있다. 그림 4(a), (b), (c)는 그림 2의 CL1

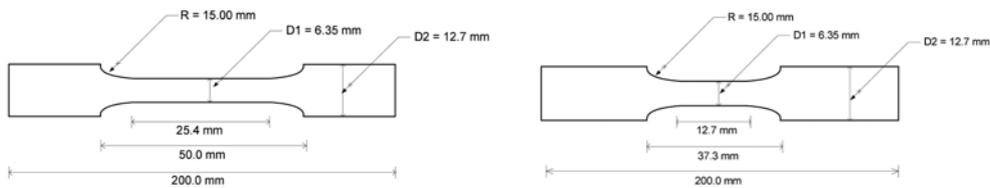


그림 1. 실험시편의 형상 및 치수

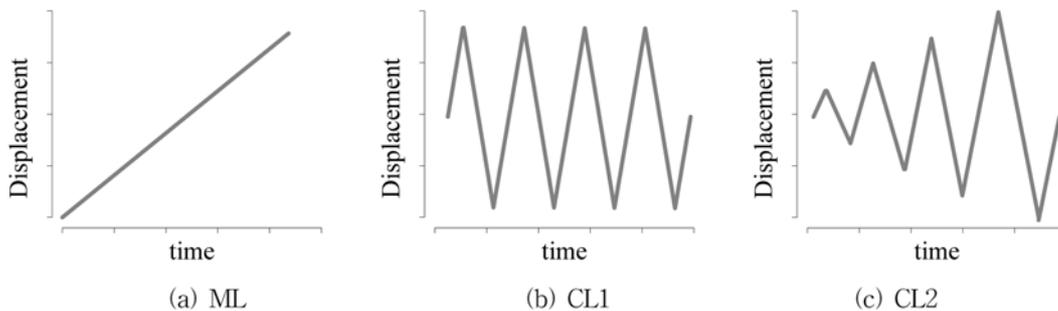


그림 2. 단조 및 반복하중 패턴

표 2. 실험 모델의 분류

단조하중실험			반복하중실험			변형률속도 변화 실험		
모델	하중 패턴	변형률 속도 ( $s^{-1}$ )	모델	하중 패턴	변형률속도 ( $s^{-1}$ )	모델	하중 패턴	변형률 속도 변화 ( $s^{-1}$ )
ML-1	ML	$10^{-4}$	CL1-1	CL1	$10^{-4}$	ML-1-5	ML	$10^{-4} \sim 10^0$
ML-2		$10^{-3}$	CL1-2		$10^{-2}$	ML-5-1		$10^0 \sim 10^{-4}$
ML-3		$10^{-2}$	CL1-3		$10^0$	ML-1-5-1		$10^{-4} \sim 10^0 \sim 10^{-4}$
ML-4		$10^{-1}$	CL2-1	CL2	$10^{-4}$	ML-5-1-5	$10^0 \sim 10^{-4} \sim 10^0$	
ML-5		$10^0$	CL2-2		$10^{-2}$	CL1-1-5	$10^{-4} \sim 10^0$	
ML-6		$10^1$	CL2-3		$10^0$	CL1-5-1	$10^0 \sim 10^{-4}$	

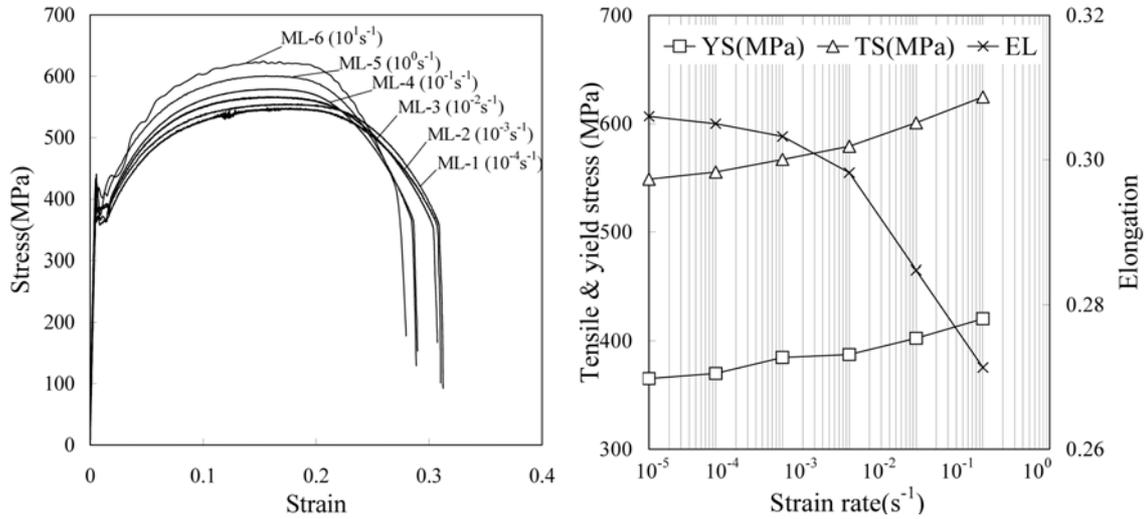


그림 3. 정·동적 단조하중실험 결과

표 3. 변형률속도에 따른 기계적 성질의 변화

Models	Strain rate	E(GPa)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
ML-1	10 <sup>-4</sup>	204	365.2	548.8	30.6
ML-2	10 <sup>-3</sup>	204	369.9	555.4	30.5
ML-3	10 <sup>-2</sup>	204	384.8	567.0	30.3
ML-4	10 <sup>-1</sup>	205	387.4	579.1	29.8
ML-5	10 <sup>0</sup>	205	402.4	600.8	28.4
ML-6	10 <sup>1</sup>	205	420.5	624.6	27.1

\*E=탄성계수, YS=항복응력, TS=인장응력, EL=연신률

반복하중을 재하시 실험결과인 응력-변형률 이력곡선이며 그림 4(d)는 각 사이클에서의 최고점을 표현한 응력-변형률 포락곡선이다. 그림 4(d)에 보이는 바와 같이 단조재하와 유사하게 변형률속도가 증가할수록 거의 일정한 비율로 응력이 증가하고 있다. 그림 4(e), (f), (g)는 CL2 반복하중시 실험결과를 보이고 있으며 그림 4(h)는 이때의 포락곡선을 보이고 있다. CL1 반복하중과 유사하게 변형률속도가 증가함에 따라 사이클이 증가할수록 일정한 비율로 응력이 증가하고 있다.

그림 5는 변형률속도 변화에 따른 SM490강재의 단조 및 반복하중 실험결과를 보이고 있다. 그림 5(a), (b), (c), (d)는 단조하중 작용시 변형률속도가 변할 경우 응력-변형률 곡선을 보이고 있다. 실험결과 변형률속도에 의존하여 응력경로가 변하고 있으며 변화된 경로는 단조하중 작용시 변형률속도에 따른 응력경로(그림 3)와 동일함을 알 수 있다. 그림 5(e), (f)는 반복하중 재하시 변형률속도가 변할 경우 응력-변형률 이력곡선을 보이고 있다. 실험결과 단조하중결과와 동일하게 변형률속도에 의존하여 응력경로가 변하는 실험결과를 보이고 있다.

#### 4. SM490강재 동적반복소성모델의 정식화

위 실험결과에 기초하여 SM490강재의 동적반복소성모델을 정식화하였으며 그 과정은 다음과 같다. 먼저 동적 변형 상태에서 현 응력을 판단하는 동적 반복소성모델은 식(1)과 같이 표현할 수 있다(John, et al., 1985).

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, T) = f(\bar{\epsilon}) \cdot g(\dot{\epsilon}) \cdot h(T) \quad (1)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 상당응력,  $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도,  $T$ 는 온도를 나타낸다.

$f(\bar{\epsilon})$ 는 정적변형상태에서의 반복소성모델로 임의의 반복하중을 받는 강구조물의 복잡한 이력거동을 예측하기 위해 저자에 의해 제안되었다(장경호 등, 2004a, 2004b, 2004c). 제안된 반복소성모델은 강재의 단조 및 반복하중 실험결과에 기초하여 제안되었으며 일축응력상태에서 재하상태>Loading state)와 재하상태(Unloading state)로 구분하여 식(2), (3)과 같이 정식화하였다.

$$E_{Li}^p = E_{st}^p + \beta_L \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{\alpha_L}\right) : \text{Loading state} \quad (2)$$

$$E_{Ui}^p = E_{Li}^p + \beta_U \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{\alpha_U}\right) : \text{Unloading state} \quad (3)$$

식(2)에서  $\alpha_L$ 와  $\beta_L$ 는 강재의 단조재하실험에 의해 계산되어 지는 재료상수이며  $E_{st}^p$ 는 초기변형률경화계수로 단조재하실험을 통해 계산된다. 식(3)에서  $\alpha_U$ 와  $\beta_U$ 는 반복하중재하실험에 의해 계산되어 지는 재료상수이며  $E_{Li}^p$ 는 하중 반전 전 재하상태의 소성계수이다.

$g(\dot{\epsilon})$ 는 변형률속도 모델로 강재의 정·동적 단조 및 반복하중실험 결과에 기초하여 다음과 같이 제안하였다.

$$g(\dot{\epsilon}) = c_1 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_0}\right) \cdot \left\{ c_2 + \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right\} + 1 \quad (4)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_i$ 는 i-step에서의 변형률 속도를 나타내며  $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률속도로 본 연구에서는 10<sup>-4</sup>(s<sup>-1</sup>)로 산정하였다. 그리고  $c_1$ ,  $c_2$ 은 재료상수로 동적하중 실험결과에서 계산된다.

$h(T)$ 는 동적 변형시 강재에 발생하는 열을 고려한 온도모델로 본 연구에서는 John-Cook모델을 인용하여 다음 식과 같이 정식화하였다(John, et al., 1985).

$$h(T) = \left\{ 1 - \left( \frac{T_i - T_{room}}{T_{ref} - T_{room}} \right)^m \right\} \quad (5)$$

여기서,  $T_i$ 는 동적변형상태에서 i-step의 온도로 소성일의 90%가 열로 변환되어 진다고 가정하여 다음과 같이 계산하

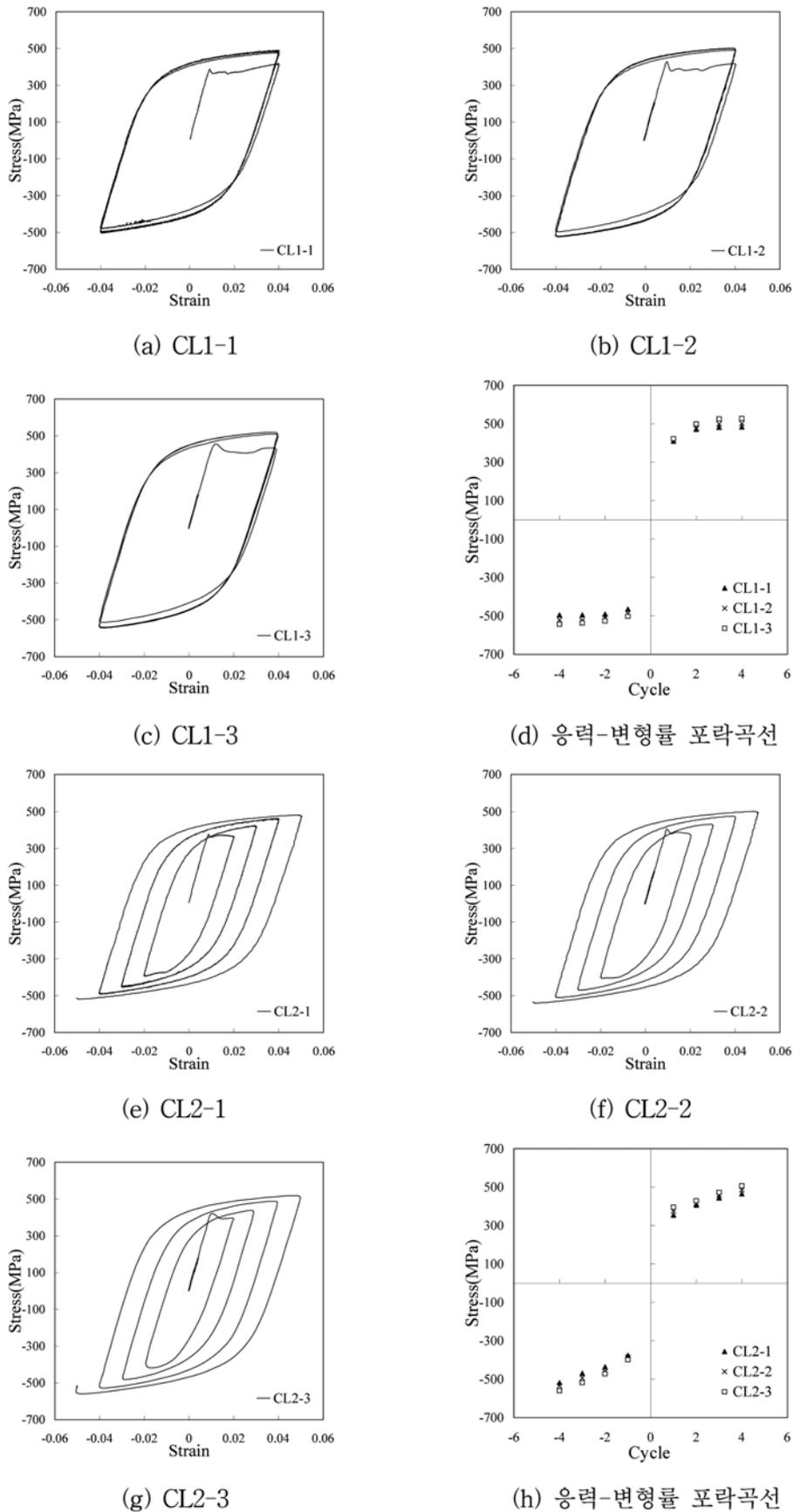


그림 4. 반복하중실험 결과(CL1, CL2)

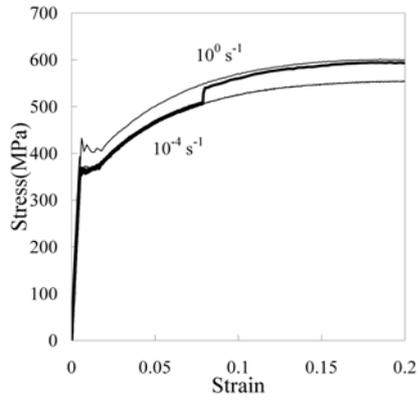
였다(Toyosada, *et al.*, 1991).

$$T_i = T_{i-1} + \Delta T = T_{i-1} + 0.9 \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \frac{\bar{\sigma}}{\rho c} d\bar{\epsilon}_p \quad (6)$$

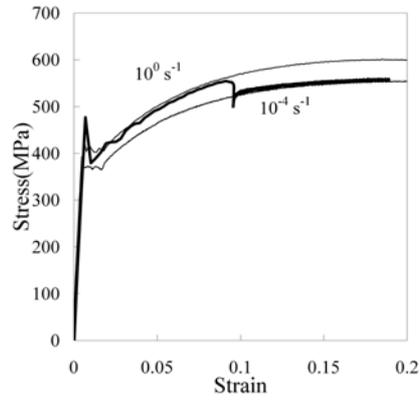
식(6)에서  $\rho$ 와  $c$ 는 강재의 물리적 성질인 밀도(mass density)와 비열(specific heat)이다. 식(5)에서  $T_{room}$ 은 실온으

로 본 연구에서는 20°C로 산정하였다.  $T_{ref}$ 는 기준온도로 본 연구에서는 800°C로 산정하였다.

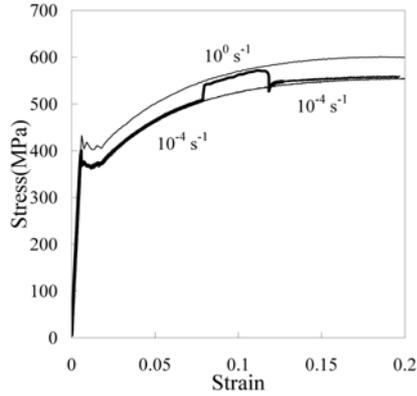
그림 6은 본 연구에서 적용한 SM490강재의 온도모델과 항복응력을 비교한 결과이다. 비교결과 온도증가에 따른 SM490 강재의 연화현상을 정확히 구현하고 있음을 알 수 있다.



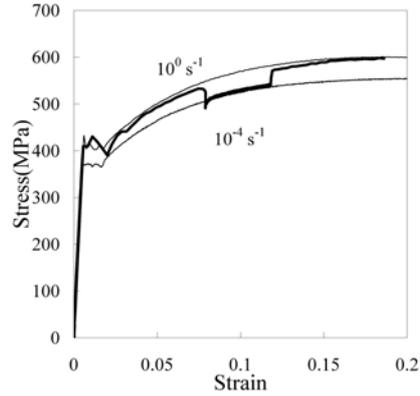
(a) ML-1-5



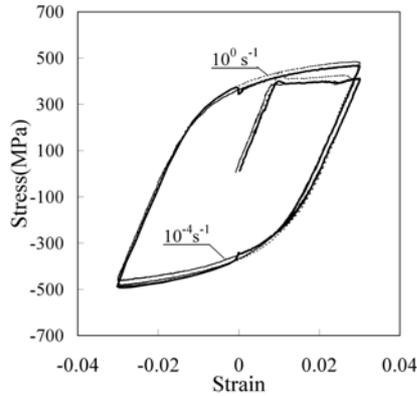
(b) ML-5-1



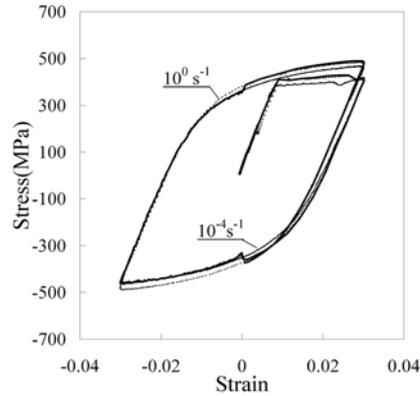
(c) ML-1-5-1



(d) ML-5-1-5



(e) CL1-1-5



(f) CL1-5-1

그림 5. 변형률속도 변화에 따른 단조 및 반복하중 실험결과

## 5. 동적반복소성모델의 정도 및 타당성 검증

강재의 동적이력거동을 구현할 수 있는지 검증하기 위해 동적하중과 재하속도 변화에 따른 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

### 5.1 해석모델 및 조건

해석모델은 그림 1(a)의 인장시편을 모델링하였다. 해석모델의 분류는 표 4와 같고 같다. 여기서 ML-1~ML-6 모델은 단조하중 작용시 재하속도( $10^{-4} \sim 10^1 (s^{-1})$ )에 따른 해석모델을 나타낸다. CL-1.5와 CL-5-1 모델은 단조하중 작용시 재하속도 변화에 따른 해석모델을 나타낸다. RL-1-1, RL-1-3 및 RL-1-5는 하중반전 즉, 반복하중을 받을 경우에 대한 해석모

델을 나타낸다.

### 5.2 실험 및 해석결과의 비교 및 고찰

그림 8(a)는 단조하중 작용시 변형률속도에 따른 해석결과를 실험결과와 비교하고 있다. 그림에 보인바와 같이 응력-변형률 곡선을 비교한 결과 초기변형률에서는 변형률속도가 증가할수록 실험결과에 비해 미소한 차이가 발생하지만 변형률이 증가할수록 실험결과와 해석결과가 유사하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 8(b)는 동적 반복하중 작용시 개발한 해석기법이 강재의 변형상태를 구현할 수 있는지 검증하기 위해 하중 반전 후 변형률속도를 변화( $10^0 \sim 10^0, 10^0 \sim 10^{-4} s^{-1}$ )하여 실험과 해석결과를 비교하였다. 비교결과 하중 반전 후에도 해석

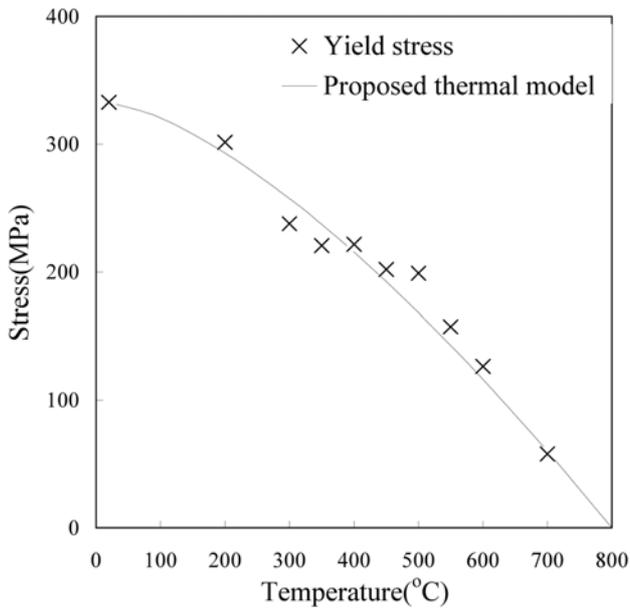


그림 6. 제안 온도모델과 온도변화에 따른 항복응력의 비교

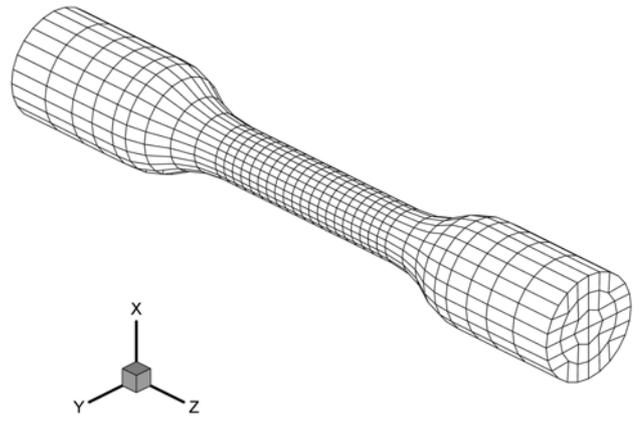


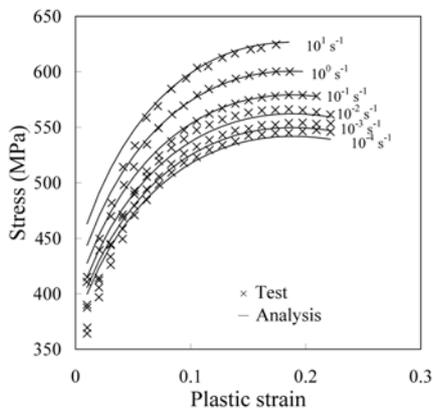
그림 7. 해석모델

결과인 응력-변형률 이력곡선이 실험의 이력곡선과 미소한 차이는 보이나 거의 유사한 이력거동을 보이고 있다.

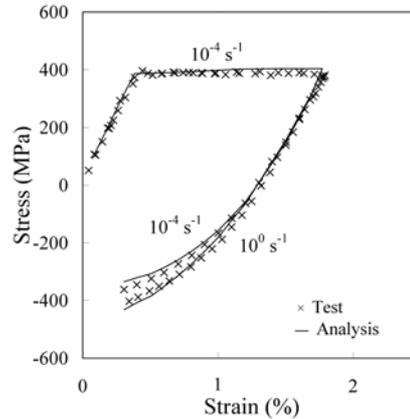
그림 8(c), (d)는 단조하중 작용시 변형률속도 변화 즉, 강재가 정적변형상태에서 동적변형상태로 변할 경우( $10^0 \sim 10^{-4}$ ,

표 4. 해석모델의 분류

모델	변형률속도 ( $s^{-1}$ )	하중패턴	모델	변형률속도 ( $s^{-1}$ )	해중패턴
ML-1	$10^{-4}$	단조하중	CL-1-5	$10^{-4} \sim 10^0$	단조하중 (변형률속도 변화)
ML-2	$10^{-3}$		CL-5-1	$10^0 \sim 10^{-4}$	
ML-3	$10^{-2}$		RL-1-1	$10^0 \sim 10^0$	반복하중 (변형률속도 변화)
ML-4	$10^{-1}$		RL-1-5	$10^0 \sim 10^{-4}$	
ML-5	$10^0$				
ML-6	$10^1$				



(a) ML-1 ~ ML-6



(b) RL-1-1, RL-1-5

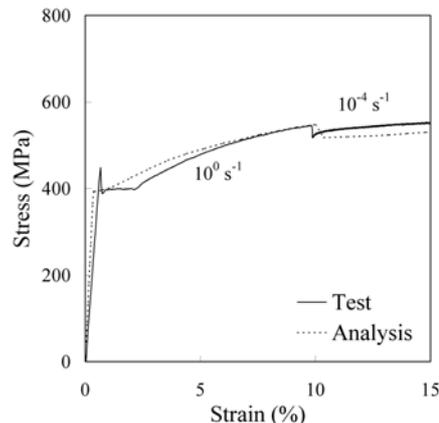
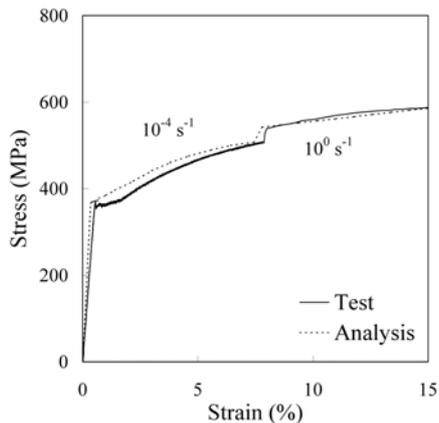


그림 8. 실험과 해석결과의 비교

$10^{-4} \sim 10^0 \text{ s}^{-1}$ ) 응력-변형률 곡선을 비교하고 있다. 비교결과 해석결과가 전체적인 응력-변형률 곡선상 실험결과에 비해 실험적 오차범위 내에서 미소하게 높은 값을 나타내고 있으나 변형률속도 변화에 따른 응력-변형률 곡선의 변화를 정도 있게 구현하고 있음을 보이고 있다

위와 같은 실험 및 해석의 비교결과 본 연구에서 개발한 해석기법이 동적하중을 받는 강부재의 정·동적 변형상태를 정도있게 구현할 수 있을 뿐 아니라 재하속도의 변화에 따른 강부재의 거동을 정도있게 예측할 수 있음을 보이고 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 먼저 정·동적 단조 및 반복하중실험을 수행하여 SM90강재의 정·동적 역학적 특성을 명확히 파악하였다. 또한 실험에 기초하여 SM490강재의 응력-변형률 관계를 정식화한 동적반복소성모델을 제안하였다. 그리고 제안모델을 3차원 탄소성 유한요소해석에 적용하였으며 실험시편을 모델로한 수치해석을 수행하였으며 실험결과와 비교하여 그 정도 및 타당성을 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 단조하중 작용시 변형률 속도가 점차 동적상태로 증가할수록 항복응력과 인장응력은 증가하며 연신율은 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.
2. 반복하중 작용시 변형률 속도가 증가함에 따라 일정한 비율로 응력이 증가하였으며 사이클이 증가하더라도 이러한 경향이 계속 지속되고 있음을 알 수 있다.
3. 단조 및 반복하중 작용시 변형률속도가 변할 경우 변형률 속도에 의존하여 응력경로가 변화하고 있으며 변화된 응력경로는 단조 및 반복 하중시 변형률 속도에 따른 응력 경로와 동일함을 알 수 있다.
4. 실험 및 해석의 비교결과 본 연구에서 제안한 동적반복소성모델이 동적하중을 받는 강부재의 정·동적 변형상태를 정도있게 구현할 수 있을 뿐 아니라 변형률속도의 변화에 따른 강부재의 거동을 정도있게 예측할 수 있음을 보이고 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

## 참고문헌

- 장경호, 장갑철(2004a) 강재의 소성이력 구성식의 정식화와 반복하중을 받는 원형강교각의 변형성능 평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권 제6-A호, pp. 1309-1316.
- 장경호, 장갑철, 강재훈(2004b) 3차원 탄소성 유한변위해석을 이용한 고강도(POSTEN60, POSTEN80)원형강교각의 내진성능에 관한 연구, **한국지진공학회논문집**, 한국지진공학회, 제8권 5호, pp. 1-10.
- 장경호, 장갑철, 이은택(2004c) SM570강재의 반복소성모델의 정식화 및 3차원 탄소성 유한요소적용에 관한 연구, **한국지진공학회논문집**, 한국지진공학회, 제8권 제1호, pp. 59-65.
- ASTM E 606 92 (2005) Standard practice for strain-controlled fatigue testing : Annual book of ASTM standard.
- ASTM E 8 96a (2005) Standard test methods for tension testing of metallic materials : Annual book of ASTM standard.
- Bjørvik, T., Hopperstad, O.S., and Berstad, T. (2003) On the influence of stress triaxiality and strain rate on the behavior of a structural steel. Part II, Numerical Study, *European Journal of Mechanics A/Solid*, Vol. 22, pp. 15-32.
- John, G.R. and Cook, W.H. (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 21, pp. 31-48.
- Krafft, J.M. and Sullivan, A.M. (1963) Effects of speed and temperature on crack toughness and yield strength in mild steel, *Trans. ASM*, Vol. 56, pp. 160-175.
- Rosenfield, A.R. and Hahn, G.T. (1966) Numerical description of the ambient low-temperature and high-strain rate flow and fracture behavior of plain carbon steel, *Trans. ASM*, Vol. 59, pp. 962-980.
- Stepanov, G.V. (2002a) Strength of metals at high strain rates, *Probl. Prochn.*, No. 3, pp. 7-14.
- Stepanov, G.V. and Zubov, V. (2000b) Dynamic compression of high-strength steel and a titanium alloy at high rates, *nauk. Visti*, No. 6, pp. 75-80.
- Stepanov, G.V. and Zubov, V. (2000b) Dynamic hardness of high-strength steel and a titanium alloy, *J. Phys. IV. France*, 10, pp. 647-651.
- Stepanov, G.V. and Zubov, V. (2002a) Dynamic compression of high-strength steel and a titanium alloy, *Probl. Prochn.*, No. 3, pp. 30-36.
- Toyosada, M., Gotoh, K., and Sagara, K. (1991) Temperature rise distribution near a crack tip due to plastic work under high loading rate, *Journal of The Society of Navel Architects of Japan*, Vol. 170, pp. 651-663.

(접수일:2005.11.3/심사일:2005.12.15/심사완료일:2005.12.15)