

재하속도에 따른 SM490강재 원형강기둥의 이력거동 특성

Characteristics of Hysteretic Behavior of Circular Steel Column using SM490 for Loading Rate

장갑철* · 장경호**

Jang, Gab Chul · Chang, Kyong Ho

Abstract

The hysteretic behavior of steel structure under cyclic and dynamic loading such as earthquake is different to that under static loading. Because structural steels on dynamic deformation is different to static deformation with respect with mechanical characteristics and stress-strain relationship. Therefore, to accurately predict the hysteretic behavior of steel structures such as circular steel columns under cyclic and dynamic loading, the difference of loading carrying capacity and deformation according to loading rate, assumed static and dynamic deformation state, must be investigated. In this study, numerical analyses of circular steel column using SM490 for change of loading rate and diameter-thickness ratio(D/t) were carried out by using three-dimensional elastic-plastic finite element analysis and dynamic cyclic plasticity model of SM490 developed by the authors. Characteristics of hysteretic behavior of circular steel column using SM490, load carrying capacity and energy dissipation ratio, were clarified by analysis results.

Keywords : *three-dimensional elastic-plastic finite element analysis, circular steel column, dynamic cyclic plasticity model, loading rate*

요 지

지진과 같은 동적반복하중을 받은 강구조물은 정적하중시와 다른 이력거동을 보인다. 이는 동적변형중인 구조용 강재는 정적상태와 다른 역학적 특성 및 응력-변형률 관계를 보이기 때문이다. 즉, 지진하중을 받는 원형 강기둥과 같은 강구조물의 이력거동을 정확히 예측하기 위해서는 정동적 변형 상태를 가정한 재하속도에 따른 대상구조물 내하력 및 변형의 차이점을 명확히 파악해야 한다. 이에 본 연구에서는 저자에 의해 제안된 SM490강재의 동적 반복소성모델과 이를 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석을 이용하여 재하속도와 지름-두께(D/t)비를 변수로한 SM490 원형강기둥의 동적해석을 수행하였다. 해석 결과를 통하여 정적에서 동적변형상태로 재하속도 변화에 따른 SM490 원형강기둥의 이력거동 특성 즉, 내하력 및 에너지소산효율의 변화를 명확히 파악하였다.

핵심용어 : 3차원 탄소성 유한요소해석, 원형강기둥, 동적반복소성모델, 재하속도

1. 서 론

최근 강기둥과 같은 강구조물의 건설이 점차 증가하고 있다. 강구조물의 경우 미관적 측면이 뛰어나며 상대적 단면 감축으로 인하여 토지이용률을 향상에 유리한 장점을 가지고 있어 최근 다양한 형상의 강구조물이 점차 증가하는 추세다. 이러한 강구조물에 사용되는 구조용 강재의 경우 일반적으로 동적변형시 정적상태와 다른 역학적 특성을 나타낸다. 이는 구조용 강재가 변형률속도(strain rate)에 의존하여 동적변형으로 인한 경화현상과 동적변형으로 발생한 열이 충분히 확산하지 못해 발생하는 온도의 영향으로 연화현상이 각각 발생하여 대상 강재의 역학적 특성 및 응력-변형률 관계에 영향을 미치기 때문이다(Krafft 등, 1963;

Rosenfield 등, 1966). 즉, 원형 강기둥과 같은 강구조물의 경우 정적 또는 동적변형시, 또는 재하속도에 따라 이력거동에 차이가 발생한다. 그러므로 강구조물의 정확한 내진 및 소성설계를 위해서는 이러한 재하속도에 따른 이력거동의 차이점을 명확히 파악해야 한다. 이러한 이력거동의 차이점 및 특성을 파악하기 위해서는 사용된 구조용 강재의 동적 특성을 구현할 수 있는 동적 반복소성모델과 이를 적용한 3차원 탄소성 유한요소 해석이 필요하다. 그러나 구조용 강재에 대한 동적모델 및 동적거동 특성에 관한 연구가 아직 미진한 상태이다.

본 연구에서는 실험에 기초하여 저자에 의해 제안된 SM490강재의 동적 반복소성모델을 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석을 이용하였다. 개발된 해석프로그램은 8절점 입

*정회원 · 중앙대학교 기술과학연구소 공학박사(E-mail : gabchul.jang@gmail.com)

**정회원 · 교신저자 · 중앙대학교 건설환경공학과, 교수(E-mail : changkor@cau.ac.kr)

체요소를 적용하였으며 실험과 비교하여 정도 및 타당성이 검증되었다. 검증된 3차원 탄소성 유한요소해석을 이용하여 정동적 하중을 산정한 재하속도와 형상비(지름-두께비)에 따른 SM490 원형강기둥의 수치해석을 수행하였다. 해석결과를 통하여 재하속도와 형상비에 따른 SM490 원형강기둥의 내하력 및 에너지소산효율의 차이를 비교하여 이력거동의 특성을 명확히 파악하였다.

2. 동적 반복소성모델

본 연구에서는 저자에 의해 제안된 구조용 강재의 동적 반복소성모델을 적용하였다(장갑철 등, 2005; 장경호 등, 2006). 적용된 제안모델은 실험과의 비교를 통하여 그 타당성 및 정도를 검증하였으며 정식화과정은 다음과 같다.

2.1 동적 반복소성모델의 제안

일반적으로 동적 변형상태에서 현 응력을 판단하는 동적 반복소성모델은 식(1)과 같이 표현할 수 있다(John 등, 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 제안되었으며 강부재 실험결과와 비교하여 그 정도 및 타당성을 검증받았다(장경호 등, 2004a, 2004b, 2004c). 제안된 정적 단조재하곡선에 기초하여 정식화하였으며 일축응력상태에서 재하상태>Loading state)와 제하상태(Unloading state)로 식(2), (3)과 같이 구분하여 정식화하였다.

$$E_{Li}^P = E_{si}^P + \beta_{Li} \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{\alpha_{Li}}\right) : \text{Loading state} \quad (2)$$

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

식(2)에서 α_{Li} 와 β_{Li} 는 강재의 단조재하실험에 의해 계산되

어 지는 재료상수이며 E_{si}^P 는 초기변형률경화계수로 단조재하실험을 통해 계산된다. 식(3)에서 α_{Ui} 와 β_{Ui} 는 반복하중재하실험에 의해 계산되어 지는 재료상수이며 E_{Li}^P 는 하중반전시 재하상태의 소성계수를 나타낸다.

$g(\dot{\epsilon})$ 는 변형률속도 모델로 변형률 속도 증가에 따른 경화현상을 구현하기 위한 모델이다. 본 연구에서는 기 실험결과(장갑철 등, 2005)에 기초하여 다음식과 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, $\dot{\epsilon}_i$ =i-step에서의 변형률 속도를 나타내며 $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률속도로 본 연구에서는 $10^{-4}(S^{-1})$ 로 산정하였다. 그리고 c_1, c_2 는 재료상수로 동적하중 실험결과에서 계산된다.

$h(T)$ 는 동적 변형시 강재에 발생하는 온도로 인한 연화현상을 고려한 온도모델로 본 연구에서는 John-Cook모델을 이용하여 다음 식과 같이 정식화하였다(John 등, 1985).

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

여기서, T_{room} 은 실온으로 $20^\circ C$ 로 산정하였다. T_{ref} 는 기준온도로 $800^\circ C$ 이후 강성이 매우 낮아지는 기존실험결과(Kim 등, 1998a, 1998b, 1998c)에 기초하여 T_{ref} 를 $800^\circ C$ 로 산정하였다. T_i 는 동적변형상태에서 i-step의 온도로 소성일의 90%가 열로 변환되어 진다고 가정하여 다음과 같이 계산하였다(Toyosada 등, 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 ρ 와 c 는 강재의 물리적 성질인 밀도(mass density)와 비열(specific heat)을 나타낸다.

이상 제안된 정적 반복소성모델 및 변형률 속도모델, 온도모델을 식(1)에 대입하여 동적 반복소성모델을 정식화하였으며 제안모델과 유한변위이론을 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석기법을 개발하였다.

표 1. SM490강재의 기계적 성질 및 동적반복소성모델의 재료상수

강종	기계적 성질 및 재료상수						
	YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	(GPa)	E_{st}^P (GPa)	ϵ_{st} (%)	EL (%)
SM490	365	549	66.5	204	10.4	1.24	30.6
	정적반복소성모델				변형률속도 모델		온도모델
	α_L	β_L	α_U	β_U	c_1	c_2	m
	0.00018	-1514.80	0.00013	-1287.58	0.0008	5.675	1.45

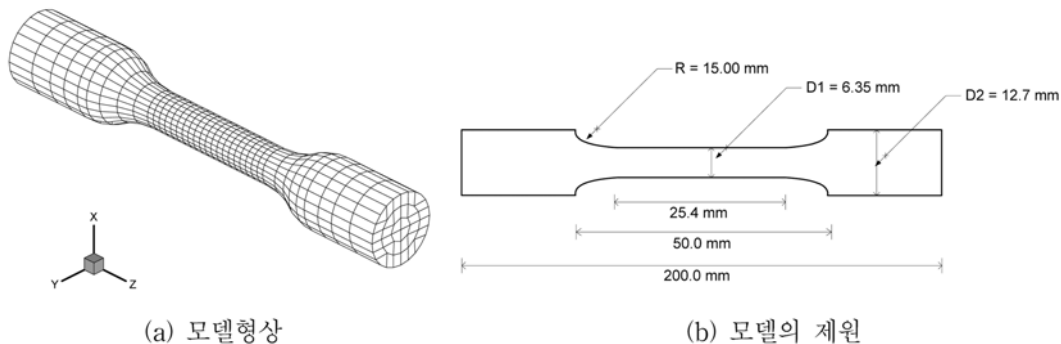


그림 1. 해석 및 실험모델의 형상 및 제원

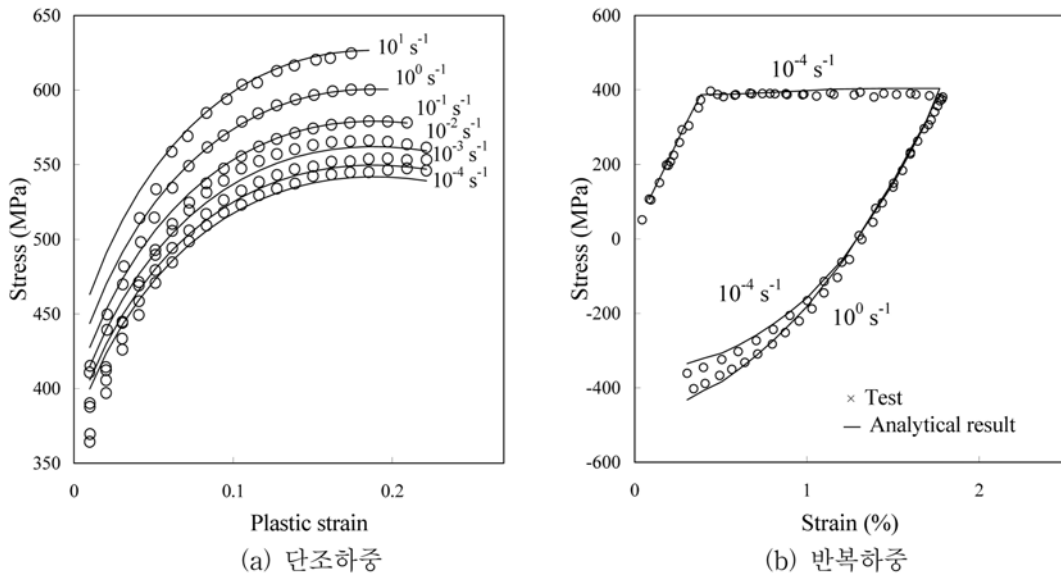


그림 2. 실험 및 해석결과의 비교

표 1은 SM490강재의 실험을 통하여 제안 동적반복소성모델의 기계적 성질 및 재료상수를 산출한 결과를 보이고 있다. 여기서, 표 1에서 E_{st}^P 는 변형률경화영역에서의 초기소성계수를 나타내며 ϵ_{st} 는 변형률경화영역 초기소성변형률로 항복고원(yield plateau)의 크기를 나타낸다.

2.2 동적반복소성모델의 타당성 검증

개발된 3차원 탄소성 유한요소해석 기법이 실제 강재의 동적변형상태를 정도 있게 구현할 수 있는지에 대한 타당성을 실험결과와 비교하여 검증하였다. 그림 1(a), (b)는 실험 및 해석모델의 형상 및 제원을 보인다. 모델은 ASTM규정 (ASTM E 8 96a, ASTM E 606-92)을 참조하여 환봉인장 시편을 모델링하였다. 실험 및 해석시 강재의 정동적 변형상태를 구현하기 위해 변형률속도 $10^{-4} \sim 10^1 (s^{-1})$ 범위에서 수행하였다. 재하하중은 정동적 변형상태를 가정하여 변형률 속도에 따른 단조 및 반복하중 실험 및 해석을 수행하였다.

그림 2(a)는 단조하중 작용시 변형률속도에 따른 해석결과

를 실험결과와 비교하고 있다. 그림에 보인바와 같이 응력-변형률 곡선을 비교한 결과 초기변형률에서는 변형률속도가 증가할수록 실험결과에 비해 미소한 차이가 발생하지만 변형률이 증가할수록 실험결과와 해석결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

동적 반복하중 작용시 개발한 해석기법이 강재의 변형상태를 구현할 수 있는지 검증하기 위해 하중 반전 후 변형률속도를 변화($10^{-4} \sim 10^{-4}$, $10^{-4} \sim 10^0$)하여 실험과 해석결과를 비교하였다. 그림 2(b)는 해석과 실험결과를 비교하고 있다. 비교 결과 하중 반전 후에도 해석결과인 응력-변형률 이력곡선이 실험의 이력곡선과 미소한 차이는 보이나 거의 동일한 이력거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

위와 같은 실험 및 해석의 비교결과 본 연구에서 개발한 해석기법이 동적 단조 및 반복하중을 받는 강부재의 정·동적 변형상태를 정확히 구현할 수 있으며 이는 지진과 같은 동적하중 작용시 강구조물의 거동을 정확히 예측할 수 있음을 보이고 있다.

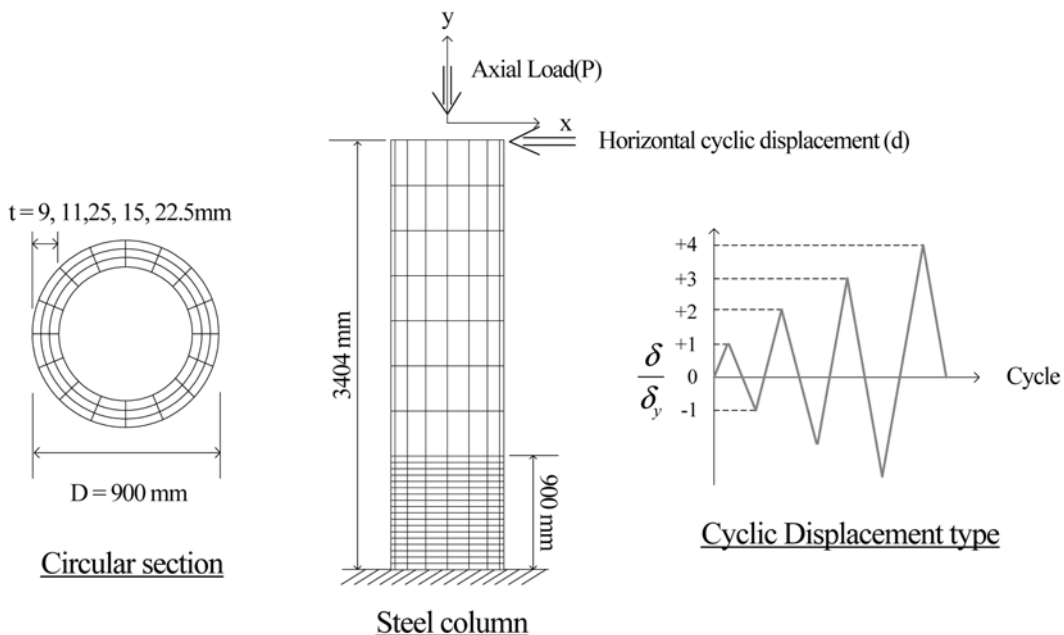


그림 3. 원형강기둥의 제원 및 반복하중패턴

표 2. 해석모델의 분류

모델		D/t비 (두께, mm)	재하속도 (mm/sec)	모델		D/t비 (두께, mm)	재하속도 (mm/sec)
D/t-100	D/t-100-0.1	100 (9.0)	0.1	D/t-60	D/t-60-0.1	60 (15.0)	0.1
	D/t-100-1.0		1.0		D/t-60-1.0		1.0
	D/t-100-10		10		D/t-60-10		10
	D/t-100-100		100		D/t-60-100		100
D/t-80	D/t-80-0.1	80 (11.25)	0.1	D/t-40	D/t-40-0.1	50 (22.5)	0.1
	D/t-80-1.0		1.0		D/t-40-1.0		1.0
	D/t-80-10		10		D/t-40-10		10
	D/t-80-100		100		D/t-40-100		100

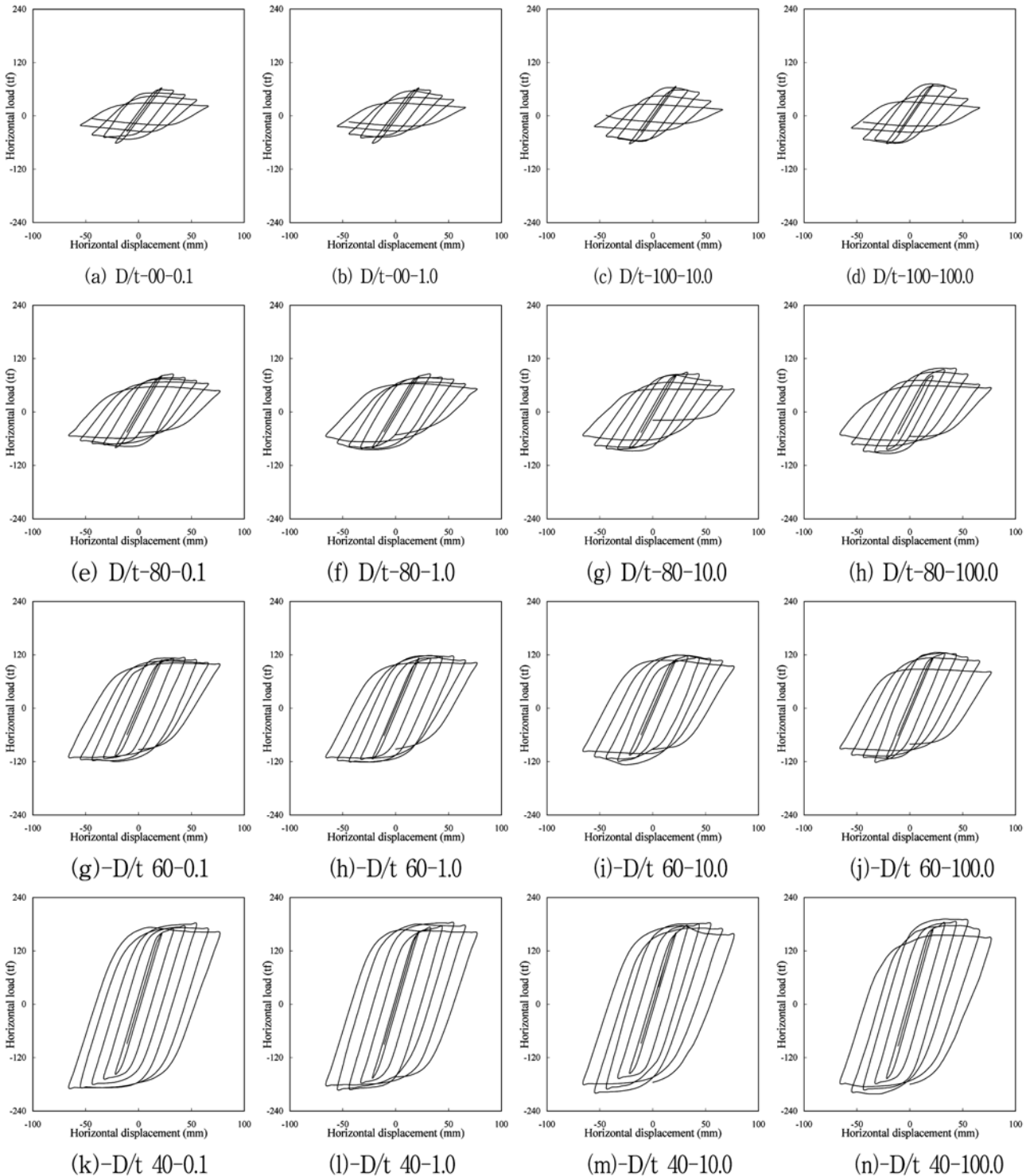


그림 4. 하중-변위 이력곡선

3. 재하속도에 따른 원형강교각의 이력거동

개발된 해석기법을 이용하여 원형강교각각의 동적 단조 및 반복하중 해석을 수행하였다. 정동적 하중을 가정한 재하속도와 형상비(지름·두께 비)에 따른 원형강기둥의 이력거동 및 변형성능을 명확히 하였다.

3.1 해석모델 및 조건

해석모델은 그림 3에 보이는 것과 같은 직경 900(mm), 높이 3404(mm) 원형강기둥이다. 경계조건은 기둥하부의 모든 자유도를 구속하였으며 상부에는 일정한 상재하중(P)과 반복수평변위(δ)를 재하하였다. 상재하중은 항복상재하중(P_y)에 비례하여 $0.124P_y$ 값이 일정하게 되도록 재하하였다(Gao, et al., 1998). 반복수평변위는 실제지진하중을 이상화하여 그림 3과 같이 항복수평변위(δ_y)값에 비례하여 점차 증가하는 반복하중패턴으로 재하하였다. 이때, 항복수평변위 및 수평항복하중(H_y)은 식(7)에 의해 계산된다.

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_y}\right), \delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \quad (7)$$

해석파라미터는 형상비(지름·두께비, D/t)와 재하속도이다. 정·동적하중을 가정하여 수평변위의 속도를 0.1, 1.0,

10, 100 mm/sec로 산정하였다(Fukumoto 등, 1991; Usami 등, 1998). D/t 비 및 재하속도에 따른 해석모델은 표 2와 같이 분류하였다.

3.2 해석결과 및 고찰

그림 4는 반복하중 작용시 D/t비와 재하속도에 따른 SM490 원형강교각의 하중-변위 이력곡선을 보이고 있다. 그림 5는 재하속도에 따른 하중-변위 포락곡선을 비교하고 있다. 재하속도 0.1 mm/sec를 기준으로 비교하였으며 D/t비에 따른 비교결과는 다음과 같다.

-D/t-100(D=900 mm, t=9 mm)

D/t 100-0.1 모델을 기준으로 비교한 결과 재하속도 1.0 mm/sec인 경우 0.1 mm/sec와 거의 유사한 거동을 보이고 있다. 내하력은 미소하게 증가하였으나 싸이클증가에 따른 변형 및 내하력은 거의 유사한 거동을 보이고 있다.

재하속도 10과 100 mm/sec인 경우 $+3\delta_y$ 에서 내하력이 최대 6%, 15% 증가하였다. 그러나 $\pm 4\delta_y$ 이후 0.1 mm/sec 모델에 비해 급격히 강도가 저하되어 0.1 mm/sec 모델과 거의 유사한 내하력값을 보이고 있다.

-D/t 80(D=900 mm, t=11.25 mm)

재하속도 1.0 mm/sec의 경우 $-3\delta_y$ 에서 0.1 mm/sec에 비해

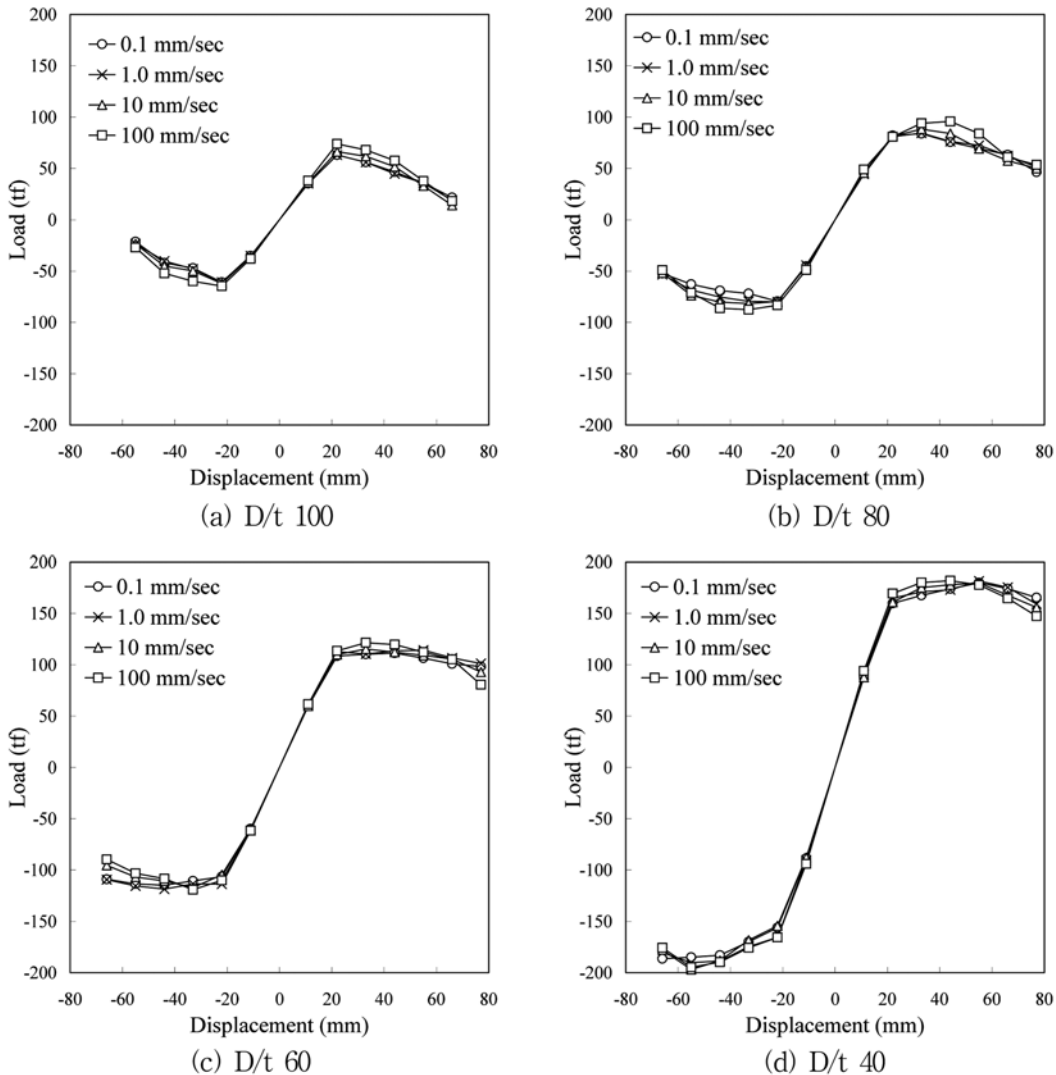


그림 5. 재하속도에 따른 하중-변위 포락곡선의 비교

약 10%정도 내하력이 증가하였으며 전체적인 이력거동은 0.1 mm/sec 모델과 유사하다.

재하속도 10 mm/sec의 경우 재하속도 0.1 mm/sec 모델에 비해 $-4\delta_y$ 에서 약 17% 내하력이 증가하며 이후 상대적으로 내하력이 저하되어 $\pm 5\delta_y$ 이후에서는 거의 유사한 이력거동을 보이고 있다.

재하속도 100 mm/sec 모델의 경우 10 mm/sec 모델과 동일하게 $+4\delta_y$ 에서 최대 26%까지 내하력이 증가하였으나 이후 강도가 급격히 감소하여 $\pm 5\delta_y$ 이후에는 0.1 mm/sec 모델과 거의 유사한 이력거동을 보이고 있다

-D/t 60(D=900 mm, t=15 mm)

재하속도 1.0 mm/sec의 경우 0.1 mm/sec모델에 비해 미소한 내하력 차이를 보이나 전체적인 이력거동은 0.1 mm/sec 모델과 거의 유사하다.

재하속도 10 mm/sec모델의 경우 $+3\delta_y$ 에서 약 5% 내하력이 증가하였으며 이후 급격히 강도가 저하되어 $-6\delta_y$ 에서는 오히려 0.1 mm/sec모델에 비해 10%정도 내하력이 감소하였다.

재하속도 100 mm/sec모델의 경우 10 mm/sec모델과 유사하게 $+3\delta_y$ 에서 최대 10%까지 내하력이 증가하였으며 이후 강도가 급격히 감소하여 $-7\delta_y$ 이후에는 0.1 mm/sec모델에 비해 약 18% 내하력이 감소하였다.

-D/t 40(D=900 mm, t=22.5 mm)

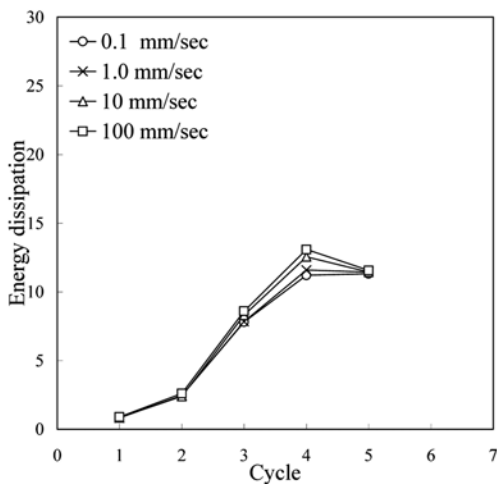
재하속도 1.0 mm/sec와 10 mm/sec의 경우 0.1 mm/sec모델과 유사한 거동을 보이고 있으나 $+5\delta_y$ 이후 오히려 미소하게 낮은 내하력값을 보이고 있다. 1.0 mm/sec모델의 경우 최대 4%, 10 mm/sec모델의 경우 최대 6% 정도 내하력이 감소하였다.

재하속도 100 mm/sec모델의 경우 $+3\delta_y$ 에서 최대 6%까지 내하력이 증가하였으나 $+5\delta_y$ 이후 급격히 강도저하현상으로 인하여 0.1 mm/sec 모델에 비해 최대 11% 낮은 내하력을 보이고 있다.

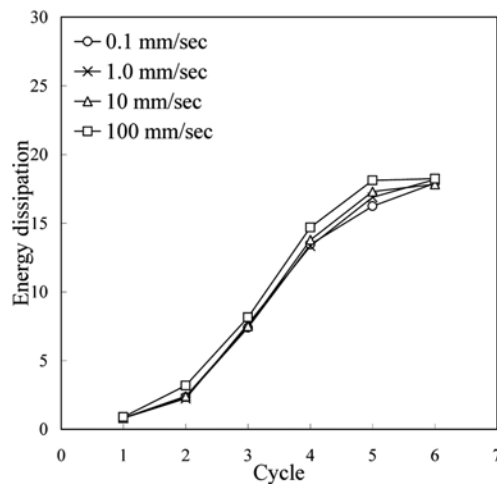
재하속도 0.1 mm/sec를 기준으로 D/t비와 재하속도에 따른 SM490 원형강기둥의 이력거동을 비교결과는 초기 싸이클에서는 상대적으로 재하속도가 증가(0.1→100 mm/sec)할수록 내하력이 증가하며 D/t비가 감소할수록 즉, 원형강기둥의 두께가 증가할수록 내하력 증가율은 감소됨을 알 수 있다. 반면 싸이클이 점차 진행됨에 따라 재하속도가 증가할수록 0.1 mm/sec모델에 비해 상대적으로 내하력이 감소하며 D/t-60 및 D/t-40 모델은 오히려 정적상태(0.1 mm/sec모델)보다 낮은 내하력값을 보이고 있다.

-에너지 소산효율

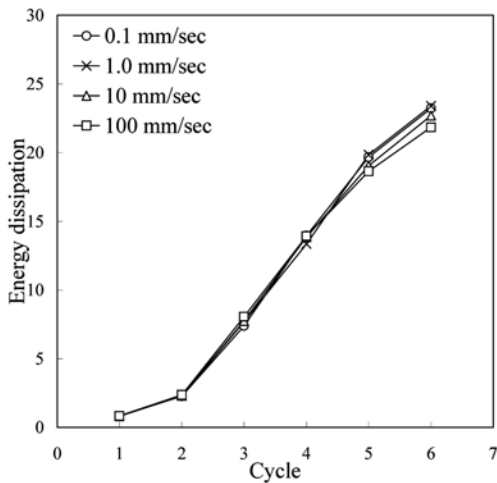
에너지 소산효율은 반복하중에 의해 흡수된 누적에너지



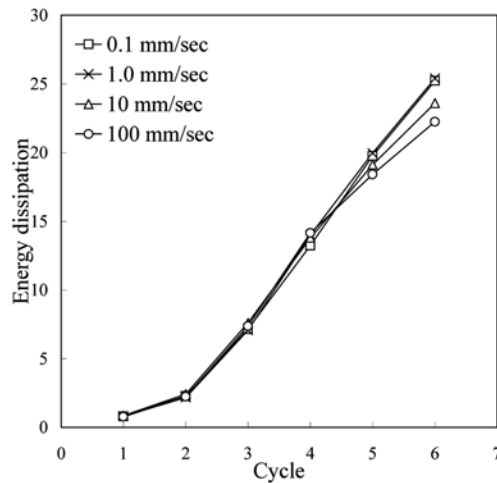
(a) D/t 100



(b) D/t 80



(c) D/t 60



(d) D/t 40

그림 6. 재하속도에 따른 에너지 소산효율의 비교

(ΔE)와 탄성에너지(ΔE_e)와의 비로 식(8)에 의해 계산된다 (Fukumoto, 2002).

$$\text{Energy Dissipation ratio} = \frac{\Delta E}{\Delta E_e} \quad (8)$$

여기서, $\Delta E = H_y d_y / 2$ 이며 원형강교각의 지름-두께비에 따른 에너지 소산효율은 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a), (b)에 보인바와 같이 D/t 100과 D/t 80 모델의 경우 사이클이 증가함에 따라 재하속도가 증가할수록 에너지 소산효율도 증가하지만 마지막 사이클에서는 감소하여 거의 동일한 에너지 소산효율 값을 보이고 있다. 이와 같은 감소경향은 하중-변위 포락곡선의 경향과 유사하게 초기사이클에서는 재하속도에 따른 내하력 차이가 발생하나 사이클이 증가함에 따라 내하력이 급격히 감소하는 경향과 동일한 경향이라 사료된다. D/t 60과 D/t 40 모델의 경우 그림 6(c), (d)에 보이는 바와 같이 초기 사이클에서는 유사한 에너지 소산효율거동을 보이고 있으나 사이클이 증가하며 재하속도가 증가할수록 에너지 소산효율이 감소됨을 알 수 있다.

4. 결 론

SM490강재의 동적반복소성모델 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석기법을 개발하였다. 실험 및 해석결과의 비교를 통하여 개발한 해석기법의 정도 및 타당성을 검증하였다. 개발된 해석기법을 이용하여 동적하중을 가정한 변형속도와 형상비(지름-두께비)에 따른 SM490 원형강기둥의 이력거동 및 변형특성을 명확히 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. SM490 동적반복소성모델을 제안하였으며 이를 적용한 3차원 탄소성유한요소해석기법을 개발하였다. 개발한 해석기법은 실험과 해석의 비교를 통하여 그 정도 및 타당성을 검증하였다.
2. 정동적 반복하중 작용시 재하속도 0.1 mm/sec를 기준으로 D/t비와 재하속도에 따른 SM490 원형강기둥의 이력거동을 비교결과는 초기 사이클에서는 상대적으로 재하속도가 증가(0.1→100 mm/sec)할수록 내하력이 증가하며 D/t비가 감소할수록 즉, 원형강기둥의 두께가 증가할수록 내하력 증가율은 감소됨을 알 수 있다. 반면 사이클이 점차 진행됨에 따라 재하속도가 증가할수록 0.1 mm/sec모델에 비해 상대적으로 내하력이 감소하며 D/t-60 및 D/t-40 모델은 오히려 정적상태(0.1 mm/sec모델)보다 낮은 내하력값을 보이고 있다.
3. 에너지 소산효율 비교한 결과 D/t 100과 D/t 80 모델의 경우 사이클이 증가함에 따라 재하속도가 증가할수록 에너지 소산효율도 증가하지만 마지막 사이클에서는 급격히 감소하였다. D/t 60과 D/t 40 모델의 경우 초기 사이클에서는 정적상태와 유사한 에너지 소산효율을 보이나 사이클이 증가하고 재하속도가 증가함에 따라 오히려 에너지 소산효율이 감소하였다.

참고문헌

- 장갑철, 장경호(2005) 동정적 하중시 SM490강재의 역학적 특성에 관한 실험적 연구. 2005년 대한토목학회 정기학술대회 논문집(전문학회 세션, 대한토목학회, pp. 2837-2840.
- 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. 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제8권 제5호, 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 8 96a. (2005) Standard test methods for tension testing of metallic materials, Annual book of ASTM standard.
- ASTM E 606-92. (2005) Standard practice for strain-controlled fatigue testing, Annual book of ASTM standard.
- Fukumoto, Y. and Lee, G.C. (1991) Stability and ductility of steel structures under cyclic loading. CRC press.
- Fukumoto, Y., Uenoya, M., Nakamura, M., and Saya, H. (2002) Cyclic performance of stiffened square box columns with thickness tapered plates. *Second International Symposium on Steel Structures, KSSC*, pp. 281-290.
- Gao, S., Usami, T., and Ge, H. (1998) Ductility evaluation of steel bridge piers with pipe sections. *J. Engrg. Mech., ASCE*, Vol. 124, No. 3, pp. 260-267.
- John, G.R. and Cook, W.H. (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, Strain Rates, Temperatures, and Pressures. *Int. J. Engrg. Fract. Mech.*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48.
- Kim, Y.C., Chang, K.H., and Horikawa, K. (1998a) Characteristics of out-of-plane deformation and residual stress generated by fillet welding. *Transaction of JWRI*, Vol. 27, No.1, pp. 69-74.
- Kim, Y.C., Chang, K.H., and Horikawa, K. (1998b) Production mechanism of out-of-plane deformation in fillet welding. *Transaction of JWRI*, Vol. 27, No. 2, pp. 107-113.
- Kim, Y.C., Chang, K.H., and Horikawa, K. (1998c) Effects of welding conditions on out-of-plane deformation and residual stress in fillet welding. WTIA 46th International Conference, pp. 1-7.
- 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.
- Toyosada, M., Gotoh, K., and Sagara, K., (1991) Temperature rise distribution near a crack tip due to plastic work under high loading rate. *J. The Society of Navel Architects of Japan*, Vol. 170, pp. 651-663.
- Usami, T. and Itoh, Y. (1998) Stability and ductility of steel structure. Elsevier

(접수일: 2005.12.20/심사일: 2006.3.27/심사완료일: 2006.10.4)