한국전산구조공학회
2004년도 가을 학술발표회 논문집

SM490 TMC 강재의 반복소성모델의 정식화 및 유한요소해석

Formulation of Cyclic Plasticity Model and FE Analysis for SM490 TMC

장갑철* 장경호**
Jang, Gab Chul Chang, Kyong Ho

ABSTRACT

In this paper, cyclic plasticity model of SM490 TMC was formulated by basing on monotonic loading test and cyclic loading test. For exact description of cyclic performance and plastic deformation capacity of steel member using SM490 TMC, formulated cyclic plasticity model and finite deformation theory were applied to 3-dimensional elastic-plastic FE analysis. Cyclic plastic behavior of pipe-section steel column using SM490 TMC was clarified by carrying out numerical analysis. Also, in order to clarifying seismic performance of pipe-section steel column using SM490 TMC, analysis results were compared with analysis results of pipe-section steel column using SM490. A comparison of analysis results shows that SM490 TMC pipe-section steel column has a better cyclic performance for strength and energy dissipation than SM490 pipe-section steel column under cyclic loading

KEY WORDS : SM490 TMC, Cyclic plastic model, FEA, Pipe-section steel column,

1. 서론

최근 강구조물의 장경강화 및 고층화로 인하여 고강도 극후판 강재의 적용이 요구되고 있다. 열가공제어법(Thermo Mechanical Control Process)의해 제조되는 TMCP 강재는 고강도 및 저탄소량으로 용접성이 우수하며 40mm이상의 두께에서도 강도저감이 발생하지 않는 특성을 가지고 있다. 또한, 최근 내진설계에 대한 관심이 높아지면서 TMCP 강재의 적용이 증가하고 있다. TMCP 강재를 적용한 강구조물의 내진성능을 명확히 해석하기위해서는 반복하중 작용시 TMCP 강재의 응력-변형률 이력곡선을 정식화한 반복소성모델이 필요하다.

본 연구에서는 먼저, 단조재하실험 및 반복하중실험으로 통하여 SM490 TMC 강재의 반복소성모델[1]을 정식화하였다. 정식화된 모델은 반복하중 작용시 강재에서 발생하는 변형률경화현상, 항복고원, 탄성영역감소효과 및 바우싱어효과가 고려되어 있으며 응력-변형률 이력곡선의 비선형성을 구현하기위해 로그(ln)함수를 이용하였다.

* 중앙대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과

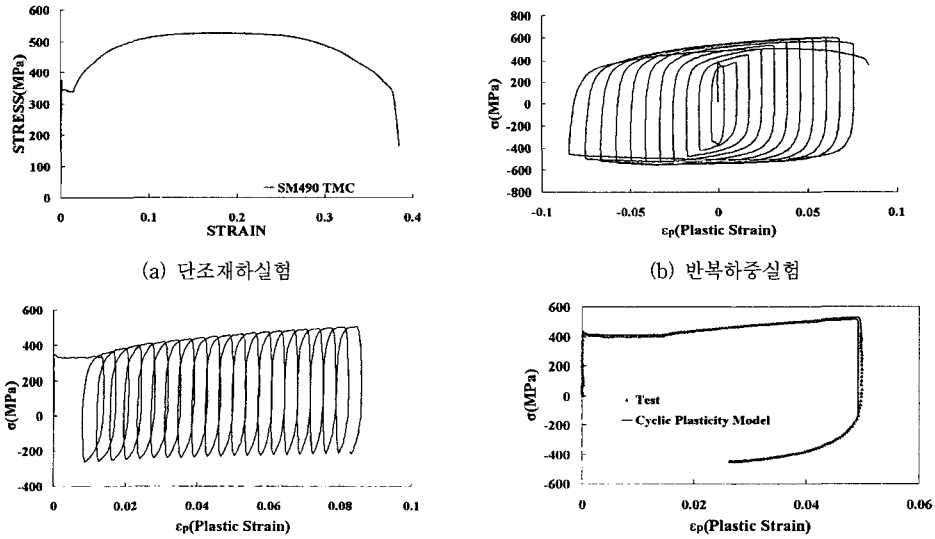
반복하중 작용시 강구조물에 발생하는 소성거동 및 대변형을 구현하기 위해 정식화된 반복소성모델과 유한변위이론[2,3]을 3차원 탄소성 유한요소해석에 적용하였다. 정식화된 모델과 유한변위이론을 적용한 수치해석으로 수행하여 SM490 TMC 강재를 적용한 원형 기둥부재의 반복소성거동을 명확히 하였다. 또한, SM490 TMC 강재를 적용한 원형 기둥부재의 내진성능을 명확히 하기위해 용접구조용 강재인 SM490 강재를 적용한 원형 기둥부재의 해석결과와 비교하였다.

2. 반복소성모델 및 3차원 유한요소해석의 정식화

임의의 반복하중을 받는 강구조물의 복잡한 소성거동 및 대변형을 구현하기위해 저자에 의해 단조재하실험 및 반복하중실험을 통하여 제안된 반복소성모델과 유한변위이론을 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며 그 정식화 과정은 다음과 같다.

2.1 SM490 TMC강재의 실험결과

반복하중작용시 SM490 TMC 강재의 응력-변형률관계를 정확히 파악하기위해 단조재하실험 및 반복하중실험을 수행하였다. 실험은 ASTM E 606-92 "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing"규정[4]을 참조하였으며 실험은 정적하중을 가정하여 0.1(㎜/sec)의 재하속도로 실험을 수행하였다.



(a) 단조재하실험 (b) 반복하중실험

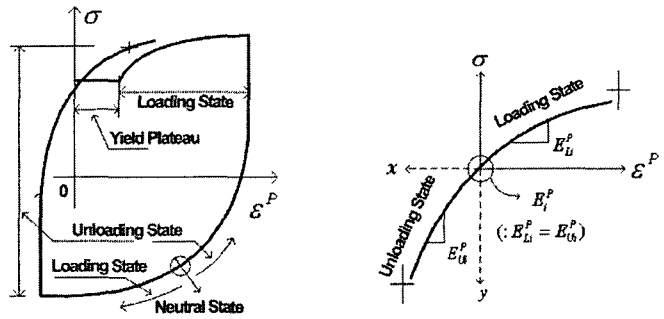
(c) 탄성영역 감소효과 실험 (d) 제안모델과 실험의 비교

그림 1 SM490 TMC강재의 실험 및 모델과의 비교

표 1 실험 결과

강종	제원					
	σ_y(MPa)	σ_u(MPa)	E (GPa)	E_{st} (GPa)	ε_{st} (%)	elo(%)
SM490	344.8	513.2	204	10.4	1.240	29.6
SM490 TMC	342.8	527.2	220	8.8	1.28	37.8

그림1은 SM490 TMC 강재의 실험결과를 보이며 표1은 SM490 TMC 강재 및 비교모델의 강재인 SM490강재의 실험결과를 보이고 있다. 그림1(d)는 임의의 반복하중시 SM490 TMC 강재의 실험결과와 본 연구에서 적용된 반복소성모델의 이력곡선을 비교하고 있다. 비교결과 거의 동일한 응력-변형률 경로를 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) 일축응력상태의 모델 (c) 소성계수의 천이과정

그림 2. 반복소성모델

2.2 반복소성모델의 정식화

위의 단조재하실험과 반복하중실험결과에 기초하여 반복소성모델을 전개하였으며 소성이면이론[9]을 이용하여 다축응력상태로 확장하였다. 또한, 반복하중을 받는 강재에 발생하는 바우싱어효과, 항복고원, 탄성영역 감소현상 및 변형률 경화현상을 고려하였으며 응력-변형률 이력곡선의 비선형성을 정확히 구현하기 위해 로그(ln)함수를 이용하였다.

제안 반복소성모델은 그림2(a)에서 보이는 것과 같이 재하상태(Loading state), 제하상태(Unloading state)로 구분하며 식(1), (2)와 같이 제안하였다.

$$E_{Li}^{P} = E_{st}^{P} + \beta_{Li} \cdot \ln\left(1 + \frac{x}{\alpha_{Li}}\right) \quad : \quad \text{재하상태} \qquad (1)$$

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

여기서, 재하상태의 소성계수 E_{Li}^{P} 는 단조재하곡선에 기초하여 초기변형률경화계수 E_{st}^{P}와 단조재하실험을 통해 얻어지는 재료상수 α_{Li}, β_{Li}를 적용하여 식(1)과 같이 정식화하였다. 제하상태의 반복소성모델 식(2)는 재하상태의 소성계수 E_{Li}^{P}에 기초하여 정식화되었으며 α_{Ui}와 β_{Ui}는 반복하중실험에 의해 계산되어 지는 재료상수이다. 그림2(b)는 다축응력상태 및 일축응력상태에서 재하 및 제하 상태시 소성계수 E_{Li}^{P}와 E_{Ui}^{P}의 천이과정을 보여주고 있다.

일축응력상태에서 정식화된 반복소성모델을 반복하중을 받는 강재에 발생하는 바우싱어효과, 항복고원, 탄성영역감소현상 및 변형률 경화현상을 고려하였으며 응력-변형률 이력곡선의 비선형성을 정확히 구현하기 위해 로그(ln)함수를 이용하였다. 소성이면이론[5]에 기초하여 다축응력상태로 확장하였다. 다축응력 확장시 이동경화법칙(Kinematic hardening rule)과 등방경화법칙(Isotropic hardening rule)을 고려하였다.

또한, 반복하중을 받는 강재에 발생하는 바우싱어효과, 항복고원, 탄성영역감소현상 및 변형률 경화현상을 고려하였다.

2.3 유한변위이론의 정식화

본 연구에서는 소성거동 중 발생하는 대변형을 구현하기위해 유한변위이론을 적용하였다. 유한변형중인 강재의 변위-변형률 관계에 그린변형률텐서 E_{ij}를 적용하였으며 식(3)과 같이 정의된다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j}) \tag{3}$$

회전과 대변형을 수반하여 비선형거동중인 강재의 응력-변형률 관계를 정확히 구현하기 위해서는 좌표계상 강체회전에 대해 객관성을 갖는 키르쵸프응력의 야만속도형 구성식을 갱신 라그란지안 정식화에 기초하여 식(4)와 같이 정식화하였다.

$$\tau_{ij}^{J} = \tau_{ij}^{*} - w_{ik}\tau_{kj} + w_{jk}\tau_{ki} \tag{4}$$

여기서, τ_{ij}^{J}는 야만속도형으로 표시되는 키르쵸프 응력성분이며 τ_{ij}^{*}는 시간 t에서 계산되어진 응력성분이다. τ_{ij}는 전 단계에서 계산된 응력성분이며 w_{ij}는 순간적인 강체 회전을 나타내는 스핀텐서(Spin tensor)를 나태낸다.

2.4 3차원 탄소성 유한요소해석의 정식화

위에서 언급된 반복소성모델과 유한변위이론을 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석을 다음과 같이 정식화하였다. 갱신 라그란지안 정식화에 기초한 요소강성행렬 $[K]$는 식(5)와 같이 정의된다.

$$[K] = \int_V ([B]^T[D^{ep*}][B] + [G]^T[M][G])\,dV \tag{5}$$

여기서, $[D^{ep*}]$ 와 $[B]$은 유한변위이론에 의해 정식화된 탄소성 재료행렬과 변위-변형률 행렬이며 $[M]$은 초기응력행렬(Initial stress matrix)을 나타낸다.

탄소성 재료행렬 D_{ijkl}^{ep*} 는 탄성재료행렬 D_{ijkl}^{e} , 소성재료행렬 D_{ijkl}^{p} 및 스핀텐서항을 고려한 재료행렬 D_{ijkl}^{p}로 식(6)과 같이 정의된다.

$$D_{ijkl}^{ep*} = D_{ijkl}^{e} - (D_{ijkl}^{p} + D_{ijkl}^{*}) \tag{6}$$

3. 내진해석 및 비교결과

3.1 해석모델 및 조건

해석모델의 그림3에 보인바와 같은 높이 3404mm, 외경 900mm인 원형 강기둥 부재이며 표2에 보인것과 같이 지름-두께비(D/t)를 40, 60, 80, 100으로 변화하여 해석을 수행하였다. 해석시 경계조건은 기둥의 하부는

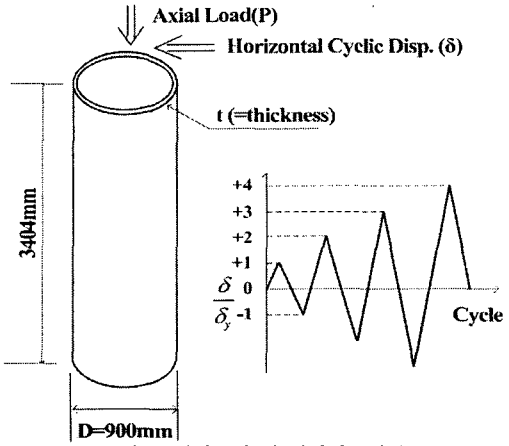


그림 3. 해석모델 및 반복하중패턴

표 2 해석모델의 분류

모델	재원		
	강재	D/t비	두께(㎜)
SM490-D/t 40	SM490	40	22.50
SM490-D/t 60	SM490	60	15.00
SM490-D/t 80	SM490	80	11.25
SM490 TMC-D/t 100	SM490	100	9.00
SM490 TMC-D/t 40	SM490 TMC	40	22.50
SM490 TMC-D/t 60	SM490 TMC	60	15.00
SM490 TMC-D/t 80	SM490 TMC	80	11.25
SM490 TMC-D/t 80	'SM490 TMC	100	9.00

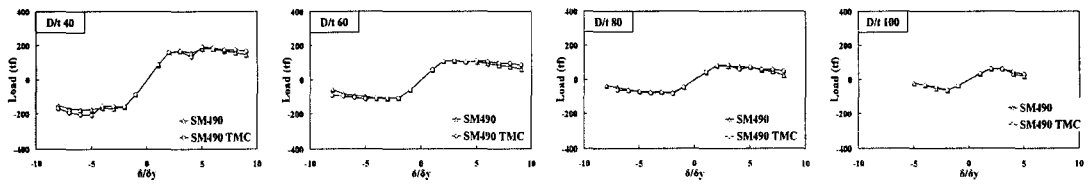
직경(D) : 900 mm, 높이(h) : 3404 mm

지반에 완전히 고정된 것으로 가정하여 모든 자유도를 구속하였다. 기둥상부는 항복압축하중(P_y)에 비례하여 0.124 P_y값을 일정하게 축방향으로 재하하였으며 반복수평변위는 그림3에 보인것과 같이 실제지진을 이상화하여 항복수평변위(δ_y)값에 비례하여 점차 증가하는 패턴으로 재하하였다.

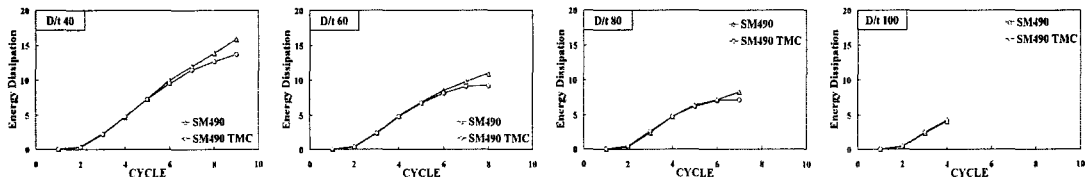
3.2 해석결과 및 비교

그림4(a)는 SM490 TMC 및 SM490 강재를 적용한 원형 강기둥 부재의 해석결과인 하중-변위 포락곡선을 비교하고있다.

SM490 TMC 원형 강기둥의 경우 SM490 원형 강기둥에 비해 싸이클이 점차 증가할수록 모든 해석모델에서 강도가 상대적으로 높은 값을 보이고 있다. 또한, D/t 80의 경우 최대 100.1%의 강도차이를 보이고 있다. 이는 반복하중을 받을 경우 SM490 TMC 원형 강기둥이 SM490 원형 강기둥에 비해 상대적으로 강도저하현상이 완화됨을 알 수 있다.



(a) 하중-변위 포락곡선의 비교



(b) 에너지 소산효율의 비교

그림 4 SM490 TMC 및 SM490 원형 강기둥 부재의 해석결과의 비교

그림4(b)는 SM490 TMC 및 SM490 강재를 적용한 원형 강기둥 부재의 에너지 소산효율을 비교하고 있다. 에너지 소산효율은 싸이클에서의 흡수된 누적에너지(ΔE)와 탄성에너지(ΔE_e)와의 비로 계산된다.

SM490 TMC 및 SM490 원형 강기둥의 에너지 소산효율을 비교한 결과 모든 해석모델에서 초기 싸이클에서는 거의 동일한 거동을 보이나 싸이클이 증가할수록 SM490 TMC 원형 강기둥의 에너지 소산효율이 SM490 강기둥에 비해 상대적으로 높은 값을 보이고 있으며 최대 16.1%의 차이를 보이고 있다. 이는 반복하중을 받을 경우 SM490 TMC 원형 강기둥이 SM490 원형 강기둥에 비해 상대적으로 향상된 에너지 소산효율을 보이고 있음을 알 수 있다.

하중-변위 포락곡선 및 에너지 소산효율곡선을 통하여 SM490 TMC 및 SM490 원형 강기둥의 내진성능을 비교한 결과 SM490 TMC 원형 강기둥이 상대적으로 향상된 내진성능을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 먼저, 단조재하실험 및 반복하중실험으로 통하여 SM490 TMC 강재의 반복소성모델을 정식화하였으며 이를 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 또한, SM490 TMC 강재를 적용한 원형 기둥부재의 내진성능을 명확히 하기위해 SM490 강재를 적용한 원형 기둥부재의 해석결과와 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 단조재하실험 및 반복하중실험으로 통하여 SM490 TMC 강재의 반복소성모델을 정식화하였으며 실험결과와 정식화된 모델의 응력-변형률 경로를 비교한 결과 거의 동일한 경로를 보이고 있다.

2. 내진해석 결과인 하중-변위 포락곡선 및 에너지 소산효율곡선을 비교한 결과 SM490 TMC 원형 강기둥이 SM490 TMC 원형 강기둥에 비해 상대적으로 향상된 내진성능을 보이고 있다.

참고문헌

1. Gab Chul Jang, Kyong Ho Chang, Eun Seok Kim, Eun Taik Lee. "A Study on Application of Constitutive Equation of Steel Material to 3D-FEM", *The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 2003, CPM.80-86

2. Mamaghani IHP, Usami T, Mizuno E. "Inelastic Large Deflection Analysis of Structural Steel Members under Cyclic Loading", *Engng Struct* ,18(9), 1996, pp.659-668.

3. Banno S, Mamaghani IHP, Usami T, Mizuno E. "Cyclic Elastoplastic Large Deflection Analysis of Thin Steel Plates", *J Engng Mech*, ASCE ,1998, pp.124-128.

4. Annual Book fo ASTM Standards "Metal-Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography." Vol. 03.01, 1997, pp.523-537

5. Dafalias, Y. F., Popov, E. P "A Model for Nonlinearly Hardening Materials for Complex Loading," *Acta Mech.*, Vol. 21, No. 3, 1975, pp.173-192