

3차원 탄소성 유한변위해석을 이용한 고강도(POSTEN60, POSTEN80) 원형강교각의 내진성능에 관한 연구

A Study on Seismic Performance of High-Strength Steel(POSTEN60, POSTEN80) Pipe-Section Piers using 3-Dimensional Elastic-Plastic Finite Deformation Analysis

장 경 호* 장 갑 철** 강 재 훈***
Chang, Kyong-Ho Jang, Gab-Chul Kang, Jae-Hoon

국문요약

최근 강구조물의 장경간화 및 고층화로 인하여 고강도강재의 사용이 점차 증가하고 있다. 고강도강재(POSTEN60, POSTEN80)가 적용된 강구조물의 정확한 내진설계를 위해서는 반복하중 작용시 발생하는 대변형 및 비선형반복거동을 구현할 수 있는 해석기법이 필요하다. 본 연구에서는 고강도강재의 단조재하실험 및 반복하중실험을 기초하여 반복소성모델을 제안하였다. 제안된 소성모델과 유한변위이론을 적용한 3차원 탄소성 유한변위해석기법을 개발하였으며 이를 실험값과 비교하여 검증하였다. 검증된 3차원 탄소성 유한변위해석을 이용하여 고강도 원형강교각의 내진해석을 수행하였다. 또한, 고강도 원형강교각의 지름-두께비에 따른 내진성능을 명확히 하였다.

주요어 : 고강도강재, 원형강교각, 3차원 탄소성 유한변위해석, 반복소성모델

ABSTRACT

Recently, as steel structures become higher and more long-spanned, application of high-strength steels is increasing gradually. For seismic design of steel structures using high-strength steels(POSTEN60, POSTEN80), analytical method, can describe the large deformation and inelastic cyclic behavior generated by non-proportional cyclic loading, are required. In this paper, cyclic plasticity model was proposed by results of monotonic loading tests and cyclic loading tests. Three-dimensional finite element analysis is developed by using proposed model and finite deformation theory and verified as compare with experiment result. Using 3-dimensional elastic-plastic finite deformation analysis, seismic analysis of high-strength steel pipe-section piers are carried out. Also, seismic performance of high-strength steel pipe-section piers in parameter of diameter-thickness ratio was clarified.

Key words : high-strength steels, steel pipe-section pier, 3-dimensional finite deformation analysis, cyclic plasticity model

1. 서 론

최근 들어 국내·외 건설되고 있는 강구조물들의 고층화 및 장경간화로 인하여 고강도강재의 적용이 요구되고 있다. 고강도강재의 제작기술의 발달로 인하여 다양한 형상의 강구조물의 건설을 가능하게 하며 고강도강재를 사용한 구조물의 경량화 및 장대화로 인하여 경제적 절감효과를 기대할 수 있어 그 사용이 점차 확대되고 있다.

미국의 경우 1952년 미철강협회에서 80kgf/mm²(T-1)급 강재의 제조에 성공함으로써 고강도강의 시대를 열었다. 일본의 경우 1960년대 60kgf/mm²급 고강도강의 규정을 마련하여 실용화하였으며 1964년 花輪교에 80kgf/mm²급 고강도강재를 사용하기 시작하였다. 국내의 경우 1998년 영종대교, 방화대교, 광안대교에서 60kgf/mm²급(SM570)강재가 사용되었으며 최근 고강도강재(POSTEN60, POSTEN80)가 개발되어 적용기술 개발에 관한 연구가 진행 중이다.

최근 그 사용이 점차 증가되고 있는 고강도구조물들의

내진해석 및 내진성능을 명확히 할 필요성이 있다. 정밀한 고강도구조물의 내진해석을 위해서는 임의의 반복하중시 발생하는 대변형거동 및 비선형반복거동을 예측할 수 있는 해석기법이 요구된다. 국외의 경우 반복소성거동을 예측하기 위해 다축응력상태에서 2개의 곡면으로 정식화된 이면모델⁽¹⁾⁻⁽³⁾이 제안되었으며 최근 이를 이용한 수정이면모델⁽⁴⁾과 단조재하곡선을 기초로 비선형 응력이력을 제시한 BMC모델⁽⁵⁾로 발전되었다. 국내의 경우 독자적인 소성모델에 관한 연구^{(6),(7)}가 일부 진행 중에 있으나 반복하중을 받는 강구조물의 대변형 반복소성거동에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구에서는 먼저 고강도강재의 단조재하실험 및 반복하중실험을 통하여 반복소성모델을 정식화하였다. 그리고 대변형을 구현하기 위해 갱신라그란지안 정식화에 기초한 키르쵸프응력의 야만속도형(Jaumann Rate of Kirchoff Stress)구성식과 기하학적 비선형성을 고려한 그린변형률텐서(Green Strain Tensor)를 적용한 유한변위이론을 정식화하였다. 정식화된 반복소성모델과 유한변위이론을 적용한 3차원 탄소성 유한변위해석기법을 개발하였으며 개발된 기법을 저자가 개발한 3차원 8절점 입체요소 탄소성 유한요소 프로그램에 적용하였다. 개발된

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

** 학생회원 · 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 박사과정

*** 중앙대학교 공과대학 건축학과 교수

본 부분에 대한 토의록 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 8. 2 / 심사종료일 : 2004. 10. 27)

3차원 8절점 입체요소 탄소성 유한변위 해석프로그램을 이용한 원형강교각의 해석결과와 실험결과를 비교하여 본 연구에서 제안한 해석기법의 타당성을 검증하였으며 검증된 유한변위해석기법을 이용하여 고강도원형강교각의 지름-두께비에 따른 내진성능을 명확히 하였다.

재하하중은 0.1(mm/sec)속도의 변위제어방법을 이용하였다.

표 6 고강도강재의 단조재하실험 결과

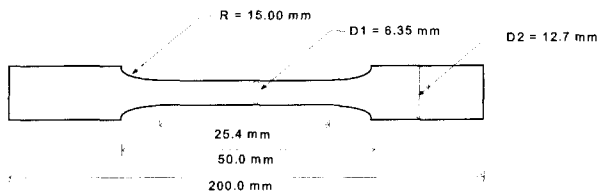
강종	세원					
	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	E_{st}^P (GPa)	ϵ_{st} (%)	elo(%)
SM400	286	476	201	58.1	1.230	41.0
POSTEN60	553	674	207	4.50	0.506	21.8
POSTEN80	756	875	213	2.30	0.261	17.2

2. 3차원 탄소성 유한변위해석의 정식화

2.1 강재실험

고강도강재(POSTEN60, POSTEN80)의 반복하중 작용시 응력-변형률관계를 정확히 파악하기위해 단조재하실험 및 반복하중실험을 수행하였다. 고강도강재의 실험결과를 비교하기위해 SM400강재의 실험도 동일하게 수행하였으며 강재시편은 그림 1에 보이는 바와 같이 ASTM 규정⁽⁸⁾을 참조하였다. 실험은 25tf용량의 MTS810 기기를 사용하였으며

그림 2는 고강도강재의 단조재하실험과 반복하중실험결과를 보이고 있다. 실험결과를 이용하여 제안 반복소성모델의 재료상수를 계산하였으며 단조재하실험 결과는 표 1과 같다. 여기서 E_{st}^P 는 변형률경화계수이며 ϵ_{st} 는 초기경화변형률로 항복고원(Yield Plateau)의 크기를 나타낸다.

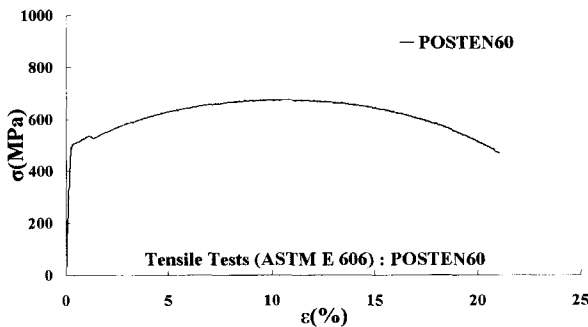


(a) 시편 형상 및 규격

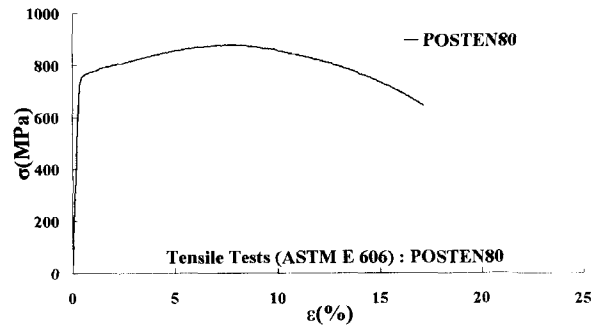


(b) 시편 이미지

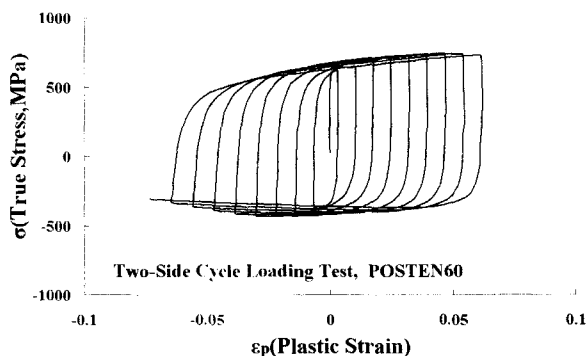
그림 1 고강도 강재 시편



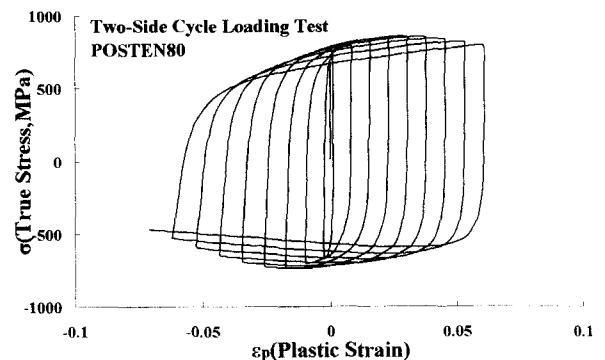
(a) 단조재하실험(POSTEN60)



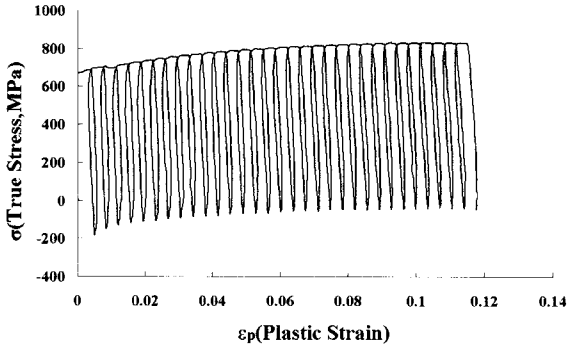
(b) 단조재하실험(POSTEN80)



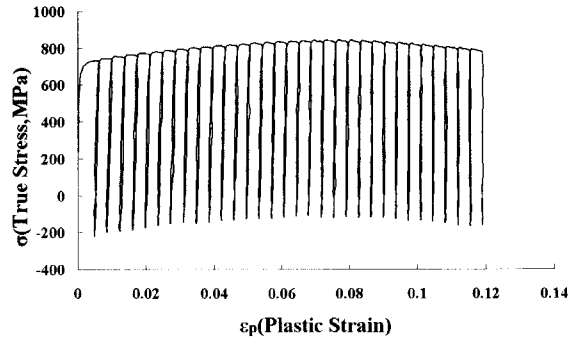
(c) 반복하중실험(POSTEN60)



(d) 반복하중실험(POSTEN80)

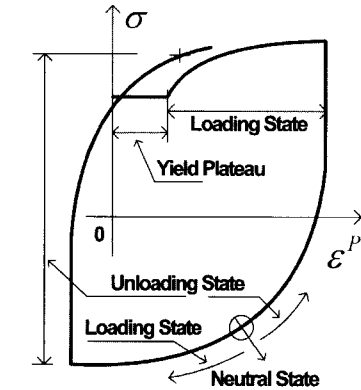


(e) 탄성영역 감소효과 실험(POSTEN60)

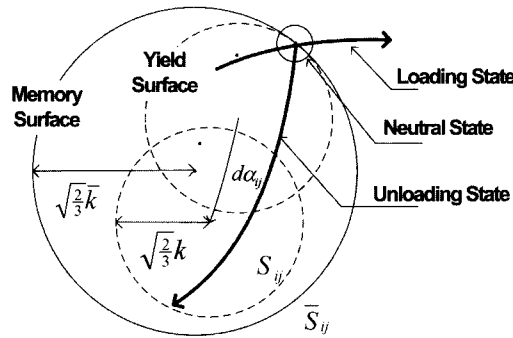


(f) 탄성영역 감소효과 실험(POSTEN80)

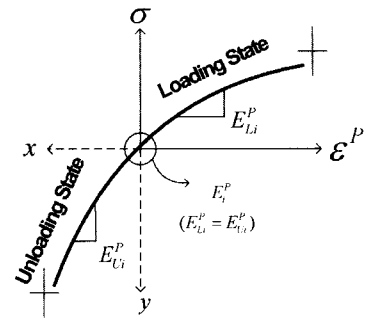
그림 2 고강도강재 실험결과



(a) 일축응력상태의 제안모델



(b) 다축응력상태로 확장



(c) 소성계수 천이과정

그림 3 제안 반복소성모델

2.2 반복소성모델의 제안

임의의 반복하중을 받는 강구조물의 복잡한 소성거동을 정확히 구현하기 위해 저자가 제안한 반복소성모델을 적용하였다.^{(6),(7)} 제안된 반복소성모델은 위의 단조재하실험과 반복하중실험결과에 기초하여 정식화하였다.

일축응력상태에서 실험결과인 단조재하곡선에 근거하여 반복소성모델을 전개하였으며 소성이면이론⁽⁹⁾을 이용하여 다축응력상태로 확장하였다. 또한, 반복하중을 받는 강재에 발생하는 바우싱어효과, 항복고원, 탄성영역감소현상 및 변형률 경화현상을 고려하였으며 응력-변형률 이력곡선의 비선형성을 정확히 구현하기 위해 로그(ln)함수를 이용하였다.

그림 3(a)는 일축응력상태에서 제안 반복소성모델을 보이고 있다. 제안 반복소성모델은 그림 3(a)에서 보이는 것과 같이 재하상태(Loadng state), 제하상태(Unloading state)로 구분하며 식(1), (2)와 같이 제안하였다.

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

$$E_{Lr}^p = E_{Ll}^p + \beta_{Lr} \cdot \ln \left(1 + \frac{x}{\alpha_{Lr}} \right) : \text{제하상태} \quad (2)$$

여기서, x 는 항복고원을 제외한 소성변형률을 의미한다. 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_{Lr}^p 에 기초하여 정식화되었으며 α_{Lr} 와 β_{Lr} 는 반복하중실험에 의해 계산되어 지는 재료상수이다. 그림 3(c)는 다축응력상태 및 일축응력상태에서 재하 및 제하 상태 시 소성계수 E_{Li}^p 와 E_{Lr}^p 의 천이과정을 보여주고 있다.

일축응력상태에서 정식화된 반복소성모델을 그림 3(b)에 보인바와 같이 소성이면이론에 기초하여 다축응력상태로 확장하였다. 소성이면이론은 항복곡면(Yield Surface)과 과거 경험한 최대상당응력으로 표현되는 기억곡면(Memory surface)으로 구성되어있다. 두 곡면은 각각 이동경화법칙(Kinematic hardening rule)과 등방경화법칙(Isotropic hardening rule)에 의해 이동하며 식(3)과 식(4)와 같이 정의된다.

$$f(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}, k) = \frac{3}{2} (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) - k^2 = 0 : \text{항복곡면} \quad (3)$$

$$F(\alpha_i, \bar{k}) = \frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} - \bar{k}^2 = 0 \quad : \quad \text{기억곡면} \quad (4)$$

여기서, S_{ij} 는 주응력공간상의 편차응력성분을 나타내며 \bar{k} 는 과거 경험했던 최대상당응력으로 기억곡면의 크기를 나타낸다.

식 (3)에서 α_{ij} 는 k 는 항복곡면의 중심과 반지름을 나타내며 식 (5)와 식 (6)과 같이 정식화되었다.

$$\alpha_{ij} = S_{ij} \left(1 - \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{k}{|S_{ij}|} \right) \quad (5)$$

$$k = k_{\infty} - (k_0 - k_{\infty}) \cdot \tanh(\alpha_k \cdot x) \quad (6)$$

여기서, k_0 는 초기탄성영역의 크기이며 x 는 항복고원을 제외한 소성변형률 값을 나타내고 있다. k_{∞} 와 α_k 강재의 반복하중실험을 통해 계산되어지는 재료상수이다.

다축응력상태에서 항복곡면과 기억곡면의 움직임에 의해 재료의 응력상태가 결정되어지며 응력경로는 소성변형률 증분이론에 의해 전개된다. 여기서, 두 곡면의 접선계수인 소성계수(E^p)는 저자가 제안한 반복소성모델인 식 (1), (2)에 의해 계산된다.

2.3 유한변위이론의 정식화

유한변위이론 정식화시 응력증분 및 변형률증분과 같은 물리량의 기준위치가 시간에 따라 변화하는 갱신라그랑지안식(Updated Lagrangian Formulation)에 기초하여 정식화하였다. 또한, 라그랑지안좌표계상 강체회전에 대해 객관성을 갖는 키르쉴프응력의 야만속도형(Jaumann Rate of Kirchoff Stress) 구성식을 적용하였으며 그린 변형률텐서(Green Strain Tensor)를 적용하여 기하학적 비선형성을 고려하였다.

본 연구에서는 유한변형중인 강재의 변위-변형률 관계에 그린변형률텐서 E_{ij} 를 적용하였다. 그린변형률텐서는 외력을 받는 강체 변위구배의 2차항을 고려하여 기하학적 비선형성을 구현하였으며 식 (7)과 같이 정의된다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j}) \quad (7)$$

식 (7)의 E_{ij} 를 증분형 변위-변형률 행렬식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$d\epsilon_{ij} = B_{ijkl} \cdot du_{kl} \quad (8)$$

여기서, B_{ij} 은 유한변형을 고려한 변위-변형률 행렬이다. 회전과 대변형을 수반하여 비선형거동중인 강재의 응력-변형률 관계를 정확히 구현하기 위해서는 좌표계상 강체회전에 대해 객관성을 갖는 속도형구성식이 필요하다. 본 연구에서는 유한변형중인 강체를 시간에 따른 응력속도-변형률속도의 관계로 정의한 키르쉴프응력의 야만속도

형 구성식을 갱신 라그랑지안 정식화에 기초하여 식(9)와 같이 정식화하였다.

$$\tau'_{ij} = \tau^*_{ij} - w_{ik}\tau_{kj} + w_{jk}\tau_{ki} \quad (9)$$

여기서, τ'_{ij} 는 야만속도형으로 표시되는 키르쉴프 응력 성분이며 τ^*_{ij} 는 시간 t에서 계산되어진 응력성분이다. τ_{ij} 는 전 단계에서 계산된 응력성분이며 w_{ij} 는 순간적인 강체 회전을 나타내는 스핀텐서(Spin tensor)로 식 (10)과 같이 정의 된다.

$$w_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}) \quad (10)$$

식 (4)를 증분형 응력-변형률 행렬식으로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$d\tau'_{ij} = D'_{ijkl} \cdot d\epsilon_{kl} \quad (11)$$

여기서, D'_{ijkl} 는 유한변형이론에 기초한 탄소성재료행렬이다.

2.4 3차원 탄소성 유한변위해석의 정식화

본 연구에서는 앞장에서 언급된 유한변위이론과 제안 반복소성모델을 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석을 정식화하였다. 먼저 전체강성방정식을 가상일의 원리를 이용하여 식 (12)와 같이 정의하였다.

$$[K] \{du\} = \{dF_S\} + \{dF_V\} \quad (12)$$

여기서, $\{dF_S\}, \{dF_V\}$ 는 표면력과 물체력을 나타내며 $[K]$ 는 요소강성행렬로 유한변위이론과 반복소성모델을 갱신라그랑지안 정식화에 기초하여 식 (13)과 같이 전개하였다.

$$[K] = \int_V ([B]^T [D^{p*}] [B] + [G]^T [M] [G]) dV \quad (13)$$

여기서, $[D^{p*}]$ 와 $[B]$ 은 유한변위이론에 의해 정식화된 탄소성 재료행렬과 변위-변형률 행렬로 식 (11)과 식 (8)에서 정의하고 있다. 행렬 $[M]$ 은 초기응력행렬(Initial stress matrix)로 식 (14)와 같이 정의된다.

$$[M] = \begin{Bmatrix} [\sigma_0] & 0 & 0 \\ 0 & [\sigma_0] & 0 \\ 0 & 0 & [\sigma_0] \end{Bmatrix}, \quad [\sigma_0] = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (14)$$

식 (13)에서 행렬 $[G]$ 은 식 (15)에 의해 계산된다.

$$\{dL\} = [G] \cdot \{du\} \quad (15)$$

여기서, $\{dL\}$ 은 $\left\{ \frac{\partial du}{\partial x}, \frac{\partial dv}{\partial x}, \frac{\partial dw}{\partial x}, \frac{\partial du}{\partial y}, \frac{\partial dv}{\partial y}, \frac{\partial dw}{\partial y}, \frac{\partial du}{\partial z}, \frac{\partial dv}{\partial z}, \frac{\partial dw}{\partial z} \right\}$ 을 나타낸다. 식 (11)의 탄소성 재료행렬 $D_{ijkl}^{e,p*}$ 는 탄성재료행렬 D_{ijkl}^e , 소성재료행렬 D_{ijkl}^p 및 스프린터항을 고려한 재료행렬 $D_{ijkl}^{e,p*}$ 로 이루어지며 식 (16)과 같이 정의된다.

$$D_{ijkl}^{e,p*} = D_{ijkl}^e - (D_{ijkl}^p + D_{ijkl}^s) \quad (16)$$

여기서, 탄성재료행렬 D_{ijkl}^e 은 Hooke의 법칙에 근거하여 식 (17a)와 같이 정의되며 소성재료행렬 D_{ijkl}^p 는 재하 및 제하상태로 구분되어 식 (17b)와 식 (17c)로 정의된다.

$$D_{ijkl}^e = 2G\delta_{ik}\delta_{jl} + 2G\frac{\nu}{(1-2\nu)}\delta_{ik}\delta_{jl} : \text{탄성상태} \quad (17a)$$

$$D_{ijkl}^p = \frac{1}{k^2} \frac{9G^2}{((E_{Li}^p)^2 + 3G)} S_{ij} \cdot S_{ij} : \text{재하상태} \quad (17b)$$

$$D_{ijkl}^p = \frac{1}{k^2} \frac{9G^2}{((E_{Li}^p)^2 + 3G)} (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) : \text{제하상태} \quad (17c)$$

여기서, G 와 ν 는 전단탄성계수와 포아송비를 나타낸다. \bar{k} 와 k 는 식 (3)과 식 (4)에서 정의된 것과 같이 기억곡면과 항복곡면의 크기를 나타내며 α_{ij} 는 식 (5)에서 정의되었다. E_{Li}^p 와 E_{Lj}^p 는 재하상태와 제하상태에서의 소성계수로 식 (1)과 식 (2)에서 정의된 것과 같이 제안 반복소성 모델에 의해 계산된다.

3. 고강도원형강교각의 내진해석

원형강교각의 내진실험결과와 비교하여 본 연구에서 제안한 3차원 탄소성 유한변위해석의 타당성을 검증하였다. 검증된 해석기법을 이용하여 원형강교각의 강재종류와 지름-두께비에 따라 단조하중 및 반복하중을 재하하여 내진해석을 수행하였다.

3.1 해석모델 및 조건

해석모델의 크기와 치수를 그림 4에 보인바와 같으며 해석모델의 분류는 표 2에 나타내었다. 해석 파라미터는 강재종류와 지름-두께비이며 강재는 고강도강재인 POSTEN60과 POSTEN80이며 이와 비교하기 위해 일반강재인 SM400강재를 적용하여 해석을 수행하였다. 지름-두께비는 40, 60, 80, 100으로 변화하며 해석을 수행하였다.

해석시 경계조건은 교각 하부는 지반에 완전히 고정된 것으로 가정하여 모든 자유도를 구속하였다. 교각상부에는 일정한 상재하중(P)과 단조 및 반복수평변위(δ)를 재하하였다. 상재하중은 항복압축하중(P_y)에 비례하여 0.124

표 2 해석모델의 분류

모델	제원		
	강재	D/t비	두께(mm)
SM400-D/t 40	SM400	40	22.50
SM400-D/t 60	SM400	60	15.00
SM400-D/t 80	SM400	80	11.25
SM400-D/t 100	SM400	100	9.00
POSTEN60-D/t 40	POSTEN60	40	22.50
POSTEN60-D/t 60	POSTEN60	60	15.00
POSTEN60-D/t 80	POSTEN60	80	11.25
POSTEN60-D/t 100	POSTEN60	100	9.00
POSTEN80-D/t 40	POSTEN80	40	22.50
POSTEN80-D/t 60	POSTEN80	60	15.00
POSTEN80-D/t 80	POSTEN80	80	11.25
POSTEN80-D/t 100	POSTEN80	100	9.00

직경(D) : 900 mm, 높이(h) : 3404 mm

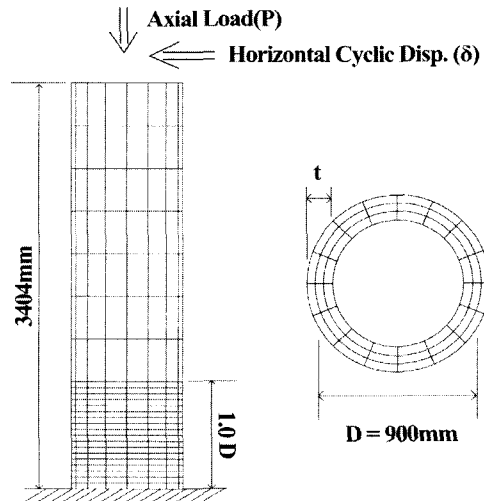


그림 4 해석모델

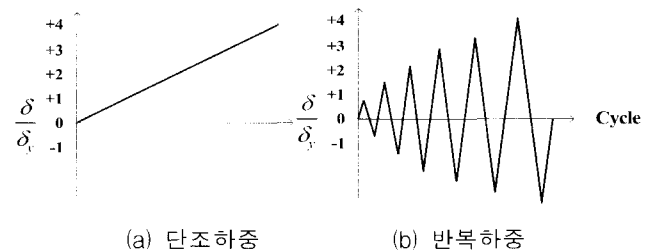


그림 5 재하하중 패턴

P_y 값을 일정하게 재하하였다. 수평변위는 그림 5(a),(b)에 보인것과 같이 단조 및 반복의 형태로 재하하였으며 이때, 반복수평변위는 실제지진을 이상화하여 항복수평변위(δ_y)값에 비례하여 점차 증가하는 패턴으로 재하하였다. 이때, 항복수평변위 및 수평항복하중(H_y)은 식 (18a)과 식 (18b)에 의해 계산된다.⁽¹⁰⁾

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \quad (18a)$$

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \quad (18b)$$

여기서, M_y , h 는 원형강교각 단면의 항복모멘트와 높이를 나타낸다.

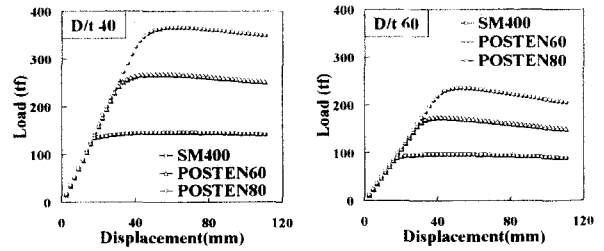
3.2 3차원 탄소성 유한변위해석기법의 타당성 검증

본 연구에서 제안한 3차원 탄소성 유한변위해석기법을 저자가 개발한 3차원 8절점 입체요소 유한요소 프로그램에 적용하여 수치해석을 수행하였다. 개발프로그램의 타당성을 검증하기 위해 기존문헌의 실험결과⁽¹¹⁾와 비교하였다. 실험모델은 그림 4에 보인바와 같이 원형강교각이며 표 2의 두께가 9mm인 SM400-D/t 100 모델이다. 하중은 그림 5(b)와 같은 반복하중을 재하하였다.

그림 6(a),(b)는 실험과 해석결과를 비교하고 있다. 하중-변위이력곡선의 제하부분에서 실험오차범위에서 약간의 차이를 보이나 전체적인 거동과 포락곡선으로 비교한 결과 실험 및 해석의 결과가 거의 동일한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 개발한 3차원 탄소성 유한변위해석이 임의의 반복하중을 받는 원형강교각의 대변형 및 반복소성거동을 정확히 해석하고 있음을 알 수 있다.

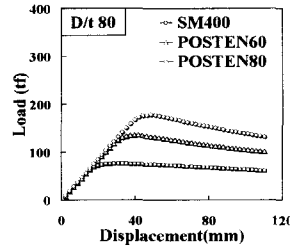
3.3 고강도원형강교각의 내진해석

고강도 원형강교각의 내진성능을 정확히 파악하기 위해 본 연구에서 개발한 3차원 탄소성 유한요소해석을 이용하여 지름-두께비를 파라미터로한 내진해석을 수행하였다. 그림 7은 단조하중재하시 SM400과 POSTEN60, POSTEN80강재의 지름-두께비에 따른 해석결과를 보이고 있으며 그림 8은 반복하중재하시 하중-변위 이력곡선을 보이고 있다. 반복하중 재하시 내진성능을 정확히 파악하기 위해 하중-변위 포락곡선, 에너지 소산효율을 이용하여 비교하였다.

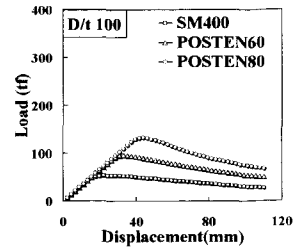


(a) D/t 40

(b) D/t 60



(c) D/t 80



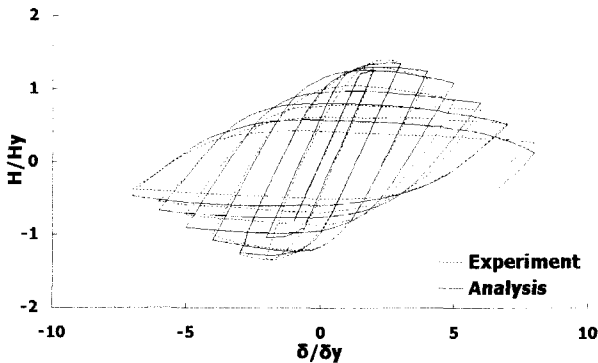
(d) D/t 100

그림 7 단조하중 해석결과 및 비교

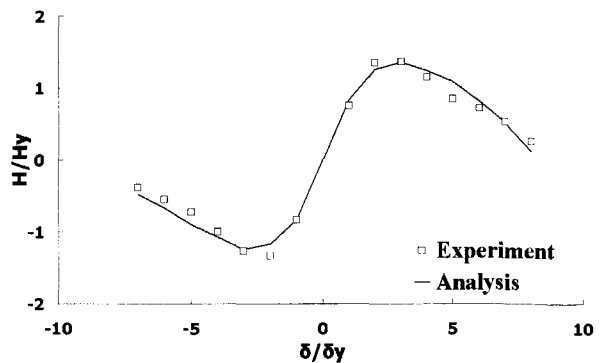
3.3.1 단조하중

그림 7은 단조하중 재하시 지름-두께비에 따른 고강도 강(POSTEN60, POSTEN80)과 SM400 원형강교각의 해석결과를 비교하고 있다. 지름-두께비에 따른 최대내하력을 SM400 원형강교각 기준으로 내진성능을 파악하였다.

지름-두께비에 따른 고강도 원형강교각의 최대내하력을 비교한 결과 POSTEN60 원형강교각은 지름-두께비가 증가(40→60→80→100)함에 따라 SM400 원형강교각보다 최대내하력이 85%→82%→81%→80%와 같이 변화하였다. POSTEN80 원형강교각의 경우 지름-두께비가 증가(40→60→80→100)함에 따라 SM400 원형강교각보다 최대내하력이 150%→146%→145%→148%와 같이 변화하였다. 즉, 지름-두께비가 증가함에 따라 SM400 원형강교각에 비해 POSTEN60 원형강교각은 최대 85%의 최대내하력이 증가하였으며 POSTEN80 원형강교각의 경우 최대 150% 증가하였다. 그리고 지름-두께비 변화에 따른 최대내하력 증가효과의 차이는 미소함을 알 수 있다.



(a) 하중-변위 이력곡선



(b) 하중-변위 포락곡선

그림 6 실험 및 해석결과의 비교

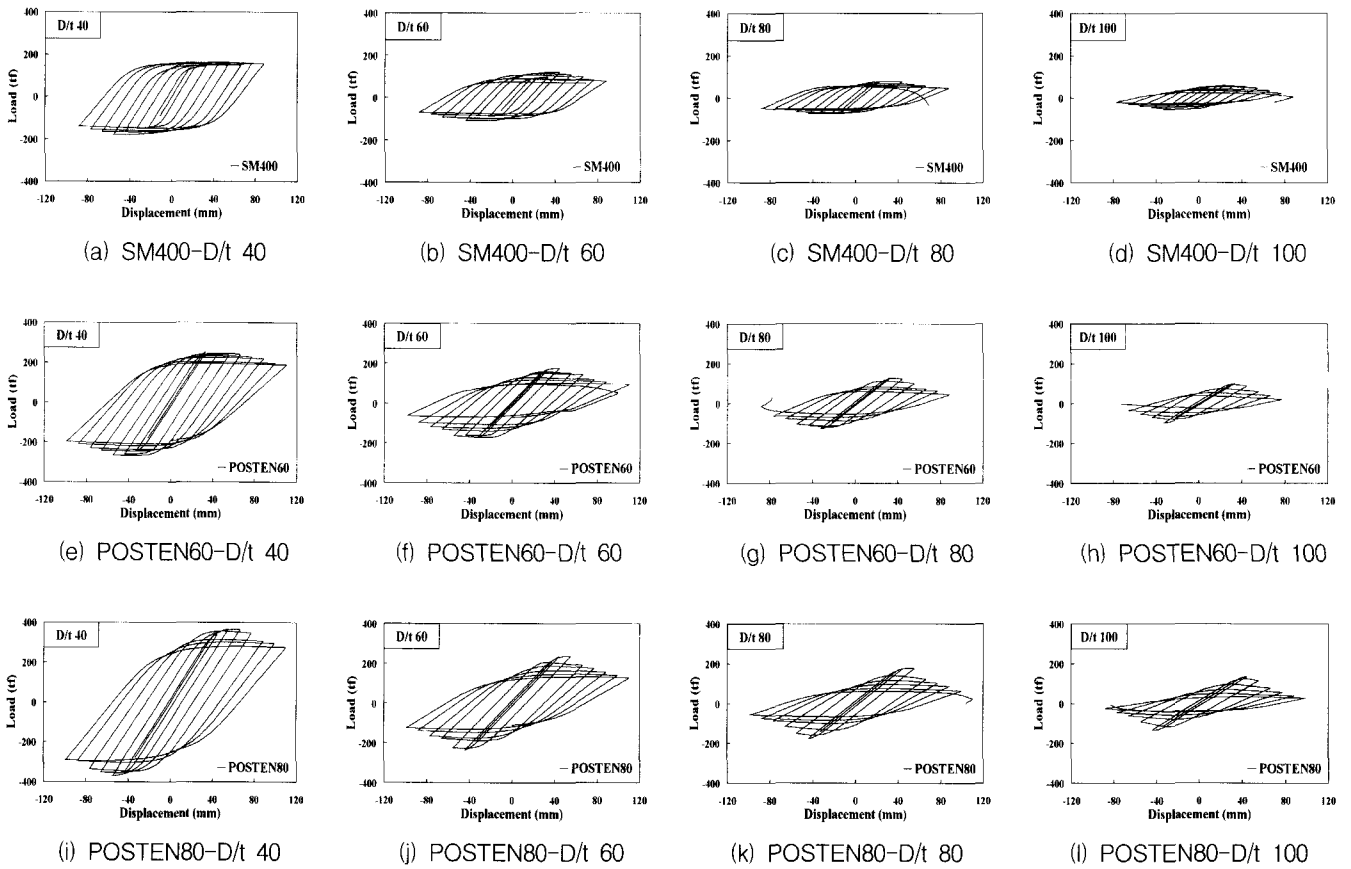


그림 8 지름-두께비에 따른 하중-변위 이력곡선

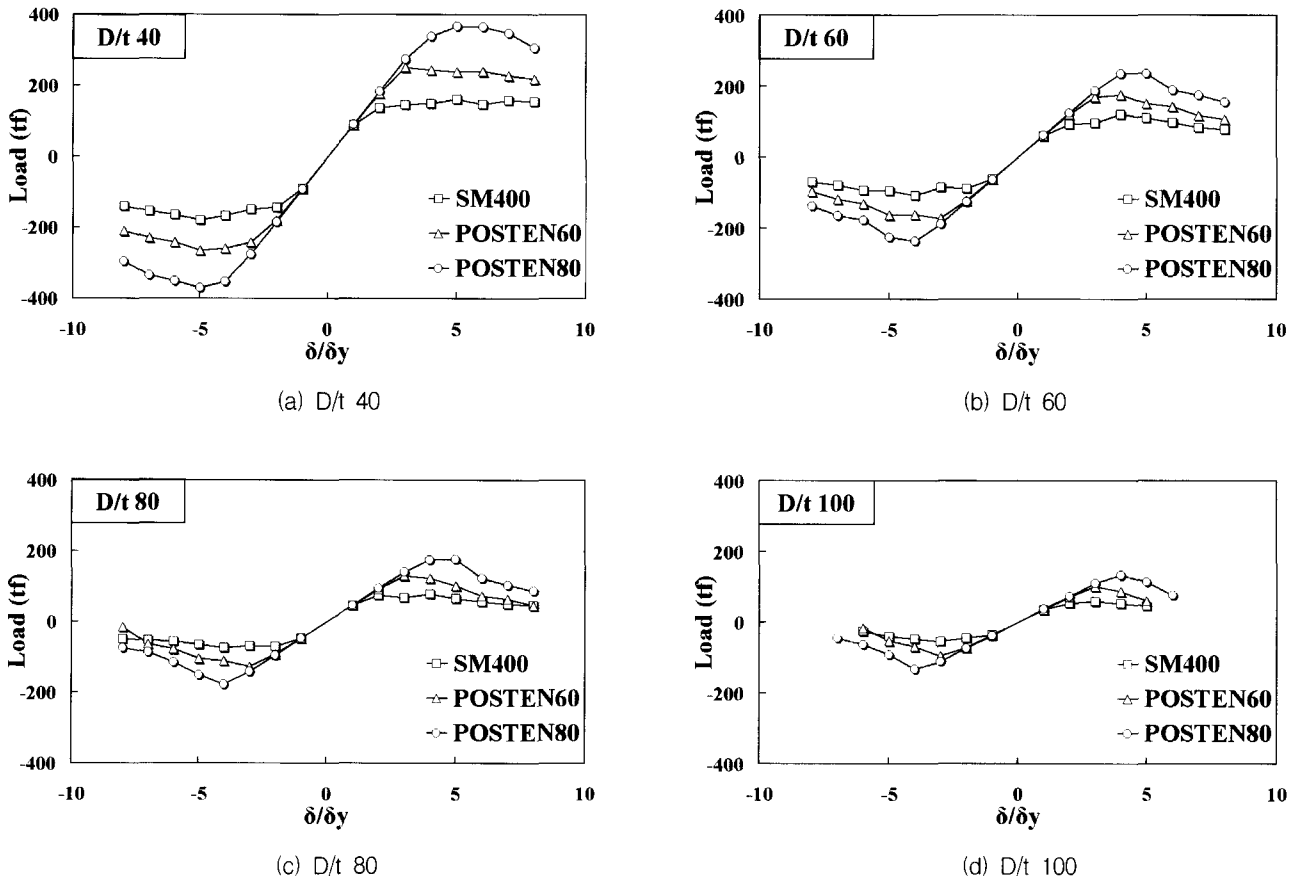


그림 9 단면 형상비에 따른 하중-변위 포락곡선

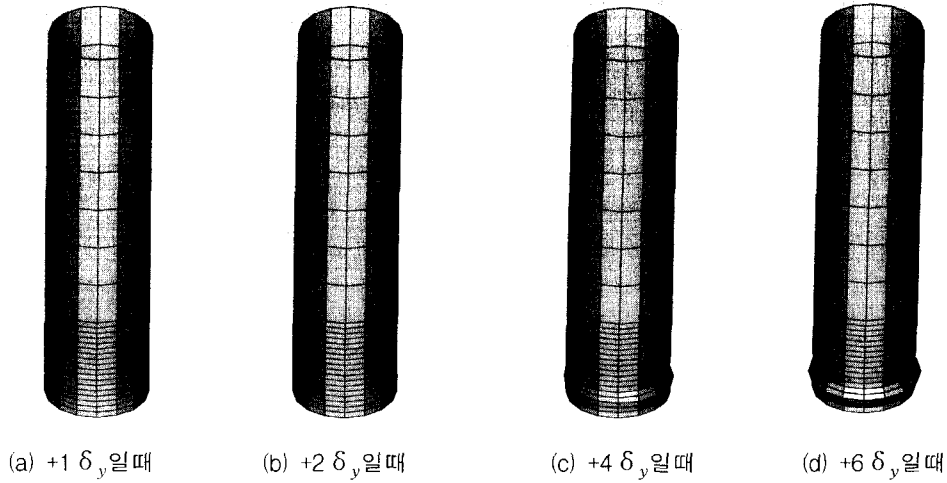


그림 11 반복하중 작용시 POSTEN80-D/t 100모델의 변형형상

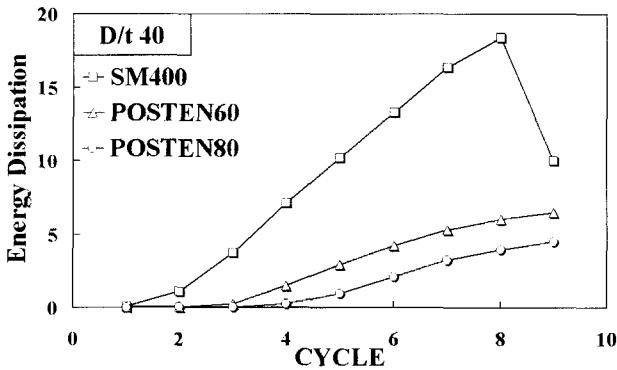
3.3.2 하중-변위 포락곡선

그림 9는 그림 8의 하중-변위 이력곡선에서 각 싸이클의 최고점을 연결한 하중-변위 포락곡선이다. 본 연구에서는 지름-두께비에 따른 하중-변위 포락곡선의 최대 내하력을 SM400 원형강교각과 비교하여 고강도 원형강교각의 내진성능을 명확히 하였다.

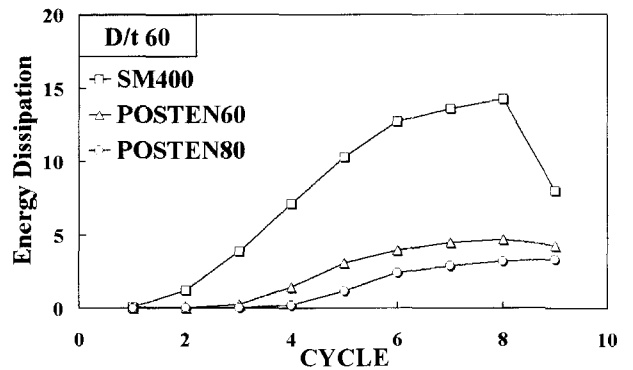
반복하중 재하시 POSTEN60 원형강교각의 경우 SM400 원형강교각의 최대내하력을 기준으로 하여 비교

할 때 지름-두께비가 증가(40→60→80→100)함에 따라 상대적 최대내하력도 증가(46%→55%→68%→74%)하고 있다. POSTEN80 원형강교각의 경우 SM400 원형강교각의 최대내하력을 기준으로 하여 비교할 때 지름-두께비가 증가(40→60→80→100)함에 따라 상대적 최대내하력이 증가(125%→194%→227%→232%)하고 있음을 알 수 있다.

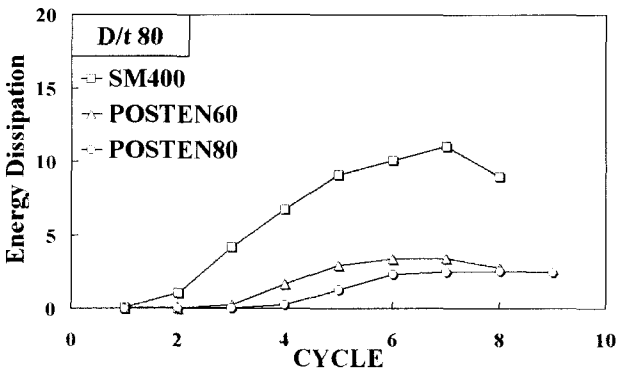
반복하중 재하시 고강도 원형강교각은 지름-두께비가 증가할수록 즉, 두께가 감소할수록 최대내하력 증가효과



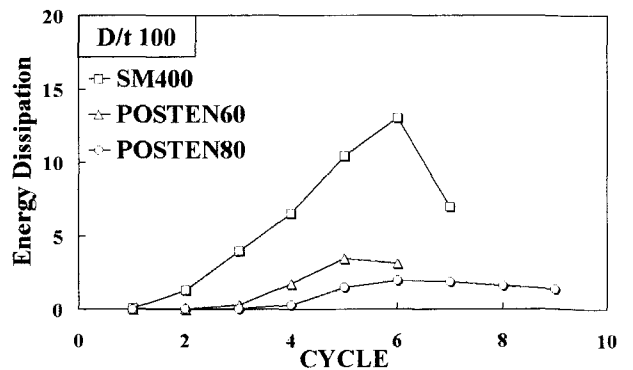
(a) D/t 40



(b) D/t 60



(c) D/t 80



(d) D/t 100

그림 10 지름-두께비에 따른 에너지 흡수율

가 상대적으로 향상되고 있으며 POSTEN60 원형강교각은 SM400원형강교각에 비해 최대 74%, POSTEN80 원형강교각은 최대 232% 최대내하력이 증가하였다.

3.3.3 에너지 소산효율

반복하중에 의해 축적된 에너지가 소성거동에 의하여 에너지가 소산되며 이는 대상구조물의 손상을 의미한다고 할 수 있다. 에너지 소산효율은 싸이클에서의 흡수된 누적에너지(ΔE)와 탄성에너지(ΔE_e)와의 비로 식 (19)에 의해 계산된다.

$$\text{Energy Dissipation} = \frac{\Delta E}{\Delta E_e} \quad (19)$$

여기서, $\Delta E = H_y \delta_y / 2$ 이며 원형강교각의 지름-두께비에 따른 에너지 소산효율은 그림 10과 같다. 그림 8의 D/t 비에 따른 에너지 소산효율은 모든 해석모델에 따라 동일한 경향을 보이고 있다. 두께가 증가할수록 강재종류별 에너지 소산효율은 증가하지만 SM400 원형강교각이 상대적으로 향상된 에너지 소산효율을 보이고 있으며 POSTEN80 원형강교각이 상대적으로 낮은 에너지 소산효율을 보이고 있다. 이는 고강도 강재가 내하력면에서는 내진성능 증가효과를 기대할 수 있으나 에너지 소산효율은 상대적으로 감소됨을 알 수 있다.

그림 11은 POSTEN80-D/t 100모델의 그림 5(b) 반복하중의 최고점(+1 δ_y , +2 δ_y , +4 δ_y , +6 δ_y)에서의 변형형상을 보이고 있다. 싸이클이 증가함에 따라 교각하부에서 국부 좌굴이 점차 발생하고 있음을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한변위이론과 제안 반복소성모델을 적용한 3차원 8절점 입체요소 탄소성 유한변위해석프로그램을 개발하였다. 실험결과와 비교하여 개발한 3차원 탄소성 유한변위해석기법의 타당성을 검증하였으며 이를 이용하여 지름-두께비에 따른 고강도 원형강교각의 내진해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 유한변위이론과 실험에 의해 제안된 반복소성모델을 적용한 3차원 탄소성 유한요소해석기법을 개발하였으며 이를 이용하여 원형강교각의 해석 및 실험결과를 비교한 결과, 본 연구에서 개발한 해석기법이 반복하중을 받는 강구조물의 대변형 및 반복소성거동을 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다.
- 2) 단조하중 재하시 POSTEN60 원형강교각은 SM400 원형강교각에 비해 지름-두께비가 증가함에 따라 최대 85%의 최대내하력이 증가하였으며 POSTEN80

원형강교각의 경우 최대 150% 증가하였다. 그리고 지름-두께비 변화에 따른 최대내하력 증가효과의 차이는 미소함을 알 수 있다.

- 3) 반복하중 재하시 고강도 원형강교각은 지름-두께비가 증가할수록 즉, 두께가 감소할수록 최대내하력 증가효과가 상대적으로 향상되고 있으며 POSTEN60 원형강교각은 SM400원형강교각에 비해 최대 74%, POSTEN80 원형강교각은 최대 232% 최대내하력이 증가하였다.
- 4) SM400 원형강교각이 향상된 에너지 소산효율을 보이고 있으며 고강도 원형강교각은 상대적으로 낮은 에너지 소산효율을 보이고 있다. 이는 고강도 원형강교각이 내하력면에서는 내진성능 증가효과를 기대할 수 있으나 에너지 소산효율은 상대적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Tseng, N. T. and Lee, G. C., "Simple Plasticity Model of Two-Surface Type," *J. Engng. Mech.*, ASCE, 109(3), 1983, pp. 795-810.
2. Kerig, R. D., "A Practical Two Surface Plasticity Theory," *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 42(3), 1975, pp. 641-646.
3. McDowell, D. L., "A Two Surface Model for Transient Nonproportional Cyclic Plasticity : Part 1. Development of Appropriate Equation," *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 52(2), 1985, pp. 298-302.
4. Nishimura, N., Ono, K. and Ikeuchi, T., "A Constitutive Equation for Structural Steels Based on a Monotonic Loading Curve under Cyclic Loading," *Proc. JSCE*, 513, 1992, pp. 27-38.
5. Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T., "A Generalized Two-Surface Model for Structural Steels under Cyclic Loading," *J. Struct. Mech.* 471, 1992, pp. 23-33.
6. Gab Chul Jang, Kyong Ho Chang, Eun Seok Kim, and 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. pp. 80-86.
7. 장경호, 장갑철, 이은택, "SM570강재의 반복소성모델의 정식화 및 3차원 탄소성 유한요소적용에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제1호, 2004, pp. 59-65.
8. AASHTO(1997), Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, pp. 523-537.

9. Dafalias, Y. F. and Popov, E. P., "A Model for Nonlinearly Hardening Materials for Complex Loading," *Acta Mech.*, Vol.21, No.3, 1975, pp. 173-192.
10. Ge, H. B. and Usami, T., "Ductility of Steel Short Cylinders in Compression and Bending," *J. Engng. Mech.*, ASCE, Vol.124(2), 1987, pp. 176-183.
11. Gao S., Usami T., and Ge H., "Ductility Evaluation of Steel Bridge Piers with Pipe Sections," *J. Engng Mech*, ASCE, 1998, pp. 260~267.