

## 강제 교각의 거동에 관한 연구

### A Study on the Structural Behavior of Welded Box Columns

김인한\*    손용석\*    엄진호\*    송준엽\*\*    권영봉\*\*\*  
Kim, In-Han    Son, Yong-Seok    Eum, Jin-Ho    Song, Jun-Yeup    Kwon, Young-Bong

---

#### ABSTRACT

The structural behavior of welded steel box columns subjected to axial compression and combined load of axial and horizontal load is described. The nonlinear stress-strain relation of the material and residual stress resulted from welds were included in the analysis. Inelastic buckling analysis of hollow rectangular sections of various width-thickness and slenderness ratios was carried out using the semi-analytical and spline finite strip method to investigate the local and global buckling stress and mode interaction. The buckling stress was compared with test results and design curves. Post-buckling behavior was traced by the finite element program(ADINA) and compared with experimental results. The comparison showed that the ultimate stress can be used for the design purpose.

---

#### 1. 서론

최근 대도시를 중심으로 경전철 및 도시고속도로의 건설의 시작과 더불어 지간의 증가와 함께 필연적으로 발생된 교각단면 감소의 필요성, 내진성능의 향상 및 시공성 등 여러 가지 이유에서 강제교각의 수요가 생겨나고 있다. 이웃 일본의 경우 1970년경부터 도시고속도로의 건설과 함께 강제교각의 건설은 급증하는 추세에 있다. 강제 교각은 철근콘크리트 교각에 비하여 단면이 월등히 작을 뿐 아니라, 연성 및 강성 등이 훨씬 좋다는 장점이 있지만, 제작 및 시공경험이 일천한 우리의 경우 건설에 앞서 상당한 연구가 수행되어야 한다고 생각된다.

우리나라도 최근 들어 지진발생에 대한 우려가 대두되고 있어 고층건물이나 교량의 경우 내진설계를 의무화하고 있다. 특히 교량하부구조의 연성의 확보는 교량의 내진구조에 있어 필수요소이며, 지진하중은 구조물의 질량과 강성의 분포에 따라 결정되는 관성력이므로, 강제교각의 사용은 내진설계시 상당히 효과적인 구조형식이라고 할 수 있다. 내진구조 설계의 배경은 구조적 손상없이 발생할 수 있는 비탄성 변형에 의한 지진의 에너지의 소산정도에 바탕을 두고 있다. 그러나 지진하중에 대한 구조물의 붕괴를 방지하기 위해서 이와 같은 비탄성 변형은 일정 한계내로 제한되어야 한다.

---

\* 영남대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 영남대학교 토목공학과 강사

\*\*\* 영남대학교 토목공학과 부교수

본 연구에서는 강제교각의 일반적인 형태인 T형 및 문형교각 구체의 거동을 연구하기 위하여, 중심축압축력하에서의 장주와 단주의 설계기준이 되는 좌굴내력을 구하기 위하여 좌굴해석프로그램(BFINST, BFPLATE)으로 강제단면의 비탄성좌굴해석을 수행하고, 압축 및 횡력이 가해질 경우의 캔틸레버 장주거동을 범용 유한요소해석프로그램(ADINA)을 이용하여 추적한 후, 실험결과와의 비교를 통해 실험 및 수치해석 결과에 상호 신뢰성을 부여하여 설계곡선제안식의 기초자료로 삼고자 한다.

## 2. 단주 거동

8개 시험단면의 중심축압축하중하에서의 좌굴 및 극한응력과 후좌굴거동 및 극한하중 이후의 파괴거동과 양상을 알아보고, 보강재로 보강한 강제기둥의 거동변화에 대해서도 관찰하였다.

### 2.1 단면의 형상

단면의 상세는 그림 1과 표 1에 나타나 있으며, 시편이름의 첫머리에 표기된 영문 U는 비보강(Unstiffened), S는 보강된(Stiffened) 단면을 나타낸다. 영문 뒤에 있는 숫자는 식 (1)과 같이 폭-두께비 계수 R값을 시편마다의 상대적인 비로 나타낸 값이다. 괄호안의 숫자는 보강재의 갯수로서 (2)는 양면보강, (4)는 사면보강을 의미한다. 보강재의 갯수에 따라 R값이 변하게 되지만, 본 연구에서는 비교상 편의를 위하여 비보강 단면시의 k값을 4.0n으로 사용하였다. 여기서 n은 수직보강재에 의하여 구분된 패널(panel)수를 나타낸다. 비대칭 단면의 경우 탄성좌굴 해석에 의하여 구한 좌굴응력 값을 사용하여 R값을 구하였다.

$$R = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

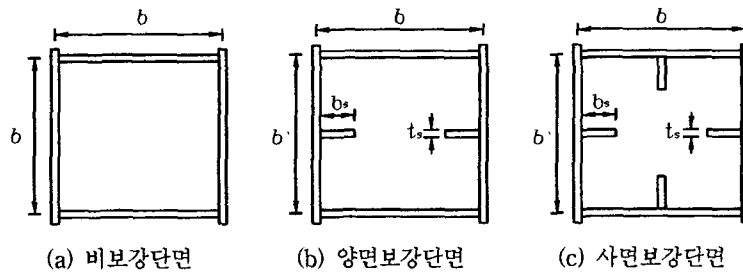


그림 1. 단면 형상

표 1. 단면 상세

구분	시험단면	b (cm)	b <sub>s</sub> (cm)	t (cm)	t <sub>s</sub> (cm)	L (cm)	R	k
비보강 (U)	U9	13	-	0.3	-	39	0.78	4.0
	U12	17.5	-	0.3	-	52.5	1.05	4.0
	U15	22	-	0.3	-	66	1.32	4.0
보강 (S)	S(2)15	22	4.5	0.3	0.3	66	1.13	5.45
	S(4)15	22	4.5	0.3	0.3	66	0.66	16
	S(4)18	27	4.5	0.3	0.3	81	0.81	16

## 2.2 단주의 수치해석

### 2.2.1 시험단면의 비탄성좌굴해석

단주와 장주 단면에 대한 좌굴응력을 알아내기 위한 좌굴해석 프로그램 수행시, 비탄성 구간에서 접선강성도의 변화와 변형경화는 무시하고 접선강성도의 변화는 항복응력까지 일정한 경사를 가지는 하나의 직선구간과 항복응력 이후 접선강성도가 0인 소성구간으로 나누어진다.

연구대상 상자형 단면의 좌굴응력을 구하기 위하여 그림 2와 같이 시험체의 인장잔류 응력을  $\sigma_y$ , 압축잔류 응력을  $0.2\sigma_y$ ,  $0.25\sigma_y$ ,  $0.3\sigma_y$ 로 가정<sup>(1)</sup>하여 좌굴해석 프로그램인 BFINST 및 BFPLATE를 수행하여 그 결과를 표 2, 3과 그림 3, 4에 나타내었다.

해석시 응력-변형률 관계는 탄성-완전소성으로,  $\sigma_y=2400\text{kg/cm}^2$ ,  $\epsilon_y=0.0012$ , 포와송비  $\nu=0.3$ 을 사용하였다. 표 2와 같이 비보강 시험단면의 실험치와 해석치를 비교해 본 결과, 그림 2의 가정에서와 같이 U9의 경우는 case 1, U12의 경우는 case 2, U15의 경우는 case 3과 비교적 일치하는데, U9의 경우 단면 폭이 좁아 용접시 열영향으로 복부판까지 상당한 잔류응력이 존재함을 의미하며, U15와 같이 단면의 폭이 넓을수록 용접의 영향은 시험단면의 용접부인 모서리에 집중되었기 때문으로 판단된다.

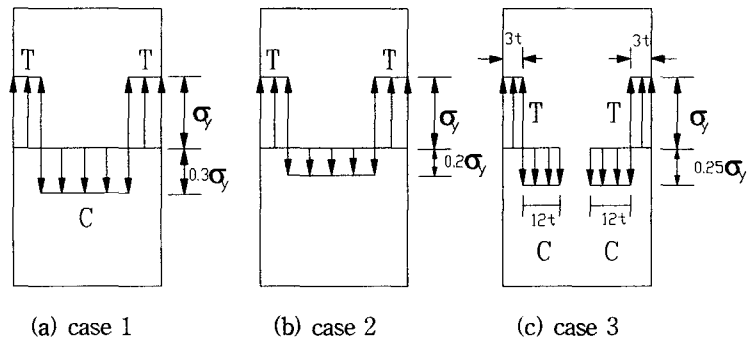


그림 2. 잔류응력의 가정

표 2. 실험치와 해석치의 비교(비보강단면)

시험체	실험치 ( $\sigma_{\max}/\sigma_y$ )	해석치( $\sigma_{cr}/\sigma_y$ )			실험치/ 해석치
		case 1	case 2	case 3	
U9	0.93	0.91	0.99	1.0	1.02
U12	0.68	0.63	0.71	0.79	0.96
U15	0.56	0.30	0.38	0.55	1.02

표 3에서 보강 시험단면의 실험치<sup>(2)</sup>와 해석치를 비교해 보았다. 그 결과 그림 2의 가정에서와 같이 S(2)15의 경우 case 3과 유사한 결과를 나타내었고, S(4)15의 경우는 단면의 비탄성좌굴 응력값이 항복응력이 되어 모두 1.0으로 비교치가 불분명하였다. S(4)18의 경우 case 1과 비슷한 결과를 보였는데, 이는 앞서 밝혔듯이 시험단면의 폭이 넓은 경우 용접의 영향으로 시험단면의 모서리에 잔류응력이 집중되고 시험단면의 폭이 좁은 경우 용접시 열영향에 의하여 잔류응력이 복부판까지 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 표 2, 3의 실험에 의한 좌굴응력 값은 결정하기가 어려우므로 실험에서 얻은 값 중 최대치를 사용하여 비교하였다.

표 3. 실험치와 해석치의 비교(보강단면)

시험체	실험치 ( $\sigma_{max}/\sigma_y$ )	해석치 ( $\sigma_{cr}/\sigma_y$ )			실험치/ 해석치
		case 1	case 2	case 3	
S(4)18	0.85	0.90	0.98	0.98	0.94
S(4)15	0.93	1.0	1.0	1.0	0.93
S(2)15	0.74	0.51	0.60	0.75	0.99

각 단면의 좌굴장(buckle half-wavelength)에 따른 잔류응력을 고려한 비탄성 좌굴응력을 그림 3, 4에 나타내었다. 좌굴장이 길지 않은 경우 좌굴의 형상은 국부좌굴이며, 보강단면의 경우에도 보강재의 크기가 충분히 설계되어 중간주정도의 좌굴장에서도 뒤틀림좌굴의 형태는 나타나지 않았다.

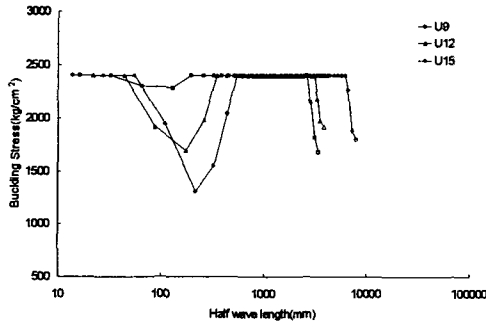


그림 3. 비보강단면의 좌굴응력

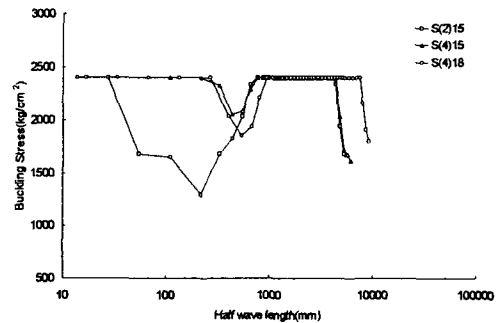


그림 4. 보강단면의 좌굴응력

### 2.2.2 비선형 해석

범용유한요소 해석프로그램인 ADINA를 이용하여 수치해석을 수행하고, 실험결과와 비교·검토해 보았다. 단주 시험체는 모두가 3축의 각 방향에 대하여 대칭의 형상을 이루고 있어, 시험체 전체를 모델링한 경우와 1/8 모델과의 수치해석값에 거의 차이가 없었으므로, 시험체의 1/8만을 모델링하여 해석하였다. 각 시험체는 4절점, 5자유도를 갖는 shell 요소를 사용하였고, element는 비보강, 양면보강, 사면보강 각각에 대하여 48, 60, 70개로 세분하였다. 하중-변위 관계에 따른 기하학적인 비선형성을 고려하기 위해 “Automatic Incremental Iteration Scheme”을 사용하였으며, 재료적인 비선형성을 고려하기 위해서 Von Mises 항복조건을 가지는 bi-linear 탄·소성 재료모델인 plastic material model로 수치해석을 수행하였다. 비선형 해석시 초기변형은 ADINA를 이용한 탄성좌굴 해석을 수행하여 구한 1차좌굴모드 형상으로 가정하였다. 좌굴모드에서 최대 변위점을 찾아내어 좌굴방향으로 최대변형량을 시편두께의 1/100인 0.003cm로 주어 비선형 해석을 수행하였다. 좌굴해석결과 1차좌굴모드를 그림 5에 나타내었으며, 비선형 해석결과를 그림 6, 7에서 실험결과와 함께 비교하여 보았다.

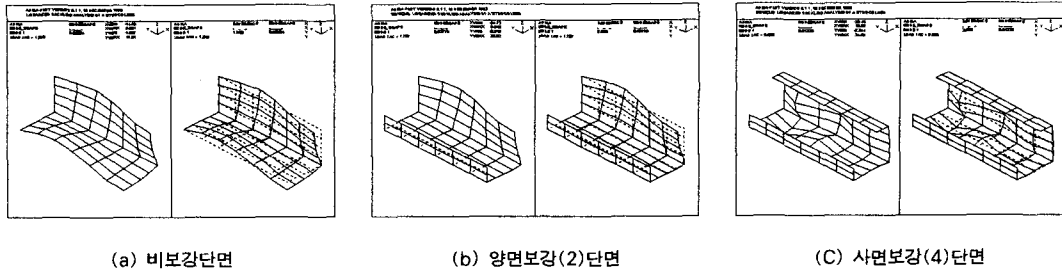


그림 5. 단면의 1/8 모델링과 좌굴형상

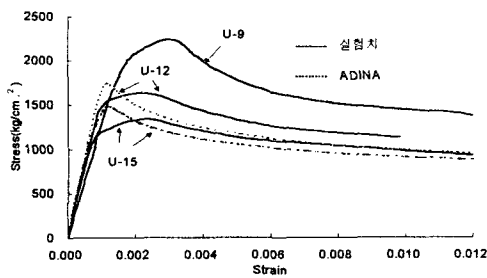


그림 6. 비보강단면의 실험치와 해석치

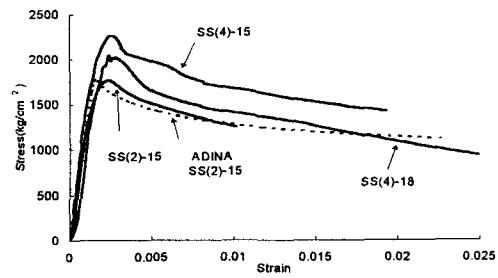


그림 7. 보강단면의 실험치와 해석치

각각의 시험체는 설계시 종횡비를 1:3으로 설계를 하였으므로, 비보강단면의 half-wave의 수가 실험결과와 해석결과가 동일한 3개를 나타내며, 보강단면의 경우 보강재가 절선역할을 하므로 비보강단면에 비해서 더 많은 half-wave가 나타남을 해석결과인 그림 5를 통해서 알 수 있다. 비보강 시험체와 보강 시험체에 대한 수치해석 결과는 실험치와 함께 표 4에 나타내었다. 표 4에서 실험치와 해석치가 비슷하거나 조금 낮게 나오 고, 그림 6, 7에서는 탄성구간에서의 실험치와 해석치의 거동 차이가 발생하는데, 이는 실험시의 편심과 슬립의 영향이라 판단된다. 단주단면의 최대하중이후의 거동은 실험치와 해석치가 비슷한 경향을 나타낸다. 비보강단면이 보강단면에 비하여 상대적으로 더 큰 후좌굴강도 및 최대하중이후 급작스런 강성의 변화없이 안정적인 연성거동을 보여 주고 있다.

표 4. 실험치와 해석치의 비교

시험체	극한하중 (ton)	
	실험치	수치해석결과
U9	36.1	36.0
U12	35.1	37.5
U15	36.0	39.7
S(2)15	52.5	52.6
S(4)15	72.5	73.9
S(4)18	78.1	77.6

### 3. 압축하중하의 장주 거동

#### 3.1 수치해석

세장비의 증가에 따른 장주의 구조적인 거동을 조사하기 위하여 중심축압축 하중하에서의 단주와 동일한 조건으로 비탄성좌굴해석을 수행하여 그림 8에서 도로교표준시방서<sup>(3)</sup>의 기둥곡선과 비교하여 나타내었다. 그림 8에서의 시험체의 명칭은 단주시험체와 동일하게 사용하였고, 강판의 두께는 0.4cm, 단면의 길이를 달리 하며 세장비에 따른 무차원화한 좌굴응력값을 나타내었다.

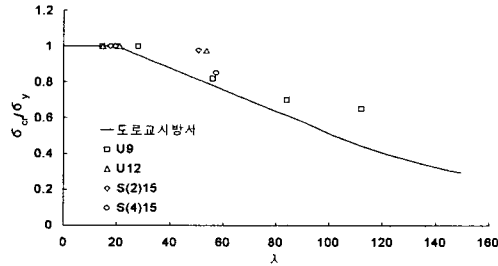


그림 8. 세장비에 따른 좌굴응력

그림 8에 나타난 것처럼 시험단면의 세장비에 따른 좌굴응력값은 도로교표준시방서의 기둥설계 기준곡선식과 비슷한 경향으로 나타나고, 기둥의 비탄성좌굴은  $\lambda$ 값이 약 50이상 되는 지점에서 발생하기 시작하며, 세장비가 상당히 큰 경우 해석치가 설계기준곡선식보다 상당히 큰 것을 알 수 있다. 추후 장주압축실험을 통하여 증명이 되어야 하겠지만, 위의 비탄성좌굴응력의 해석결과를 통하여 용접박스단면 기둥의 좌굴내력은 강제교각으로 사용하기에 적당하다고 판단된다.

### 4. 압축 및 휨하중에서의 장주 거동

#### 4.1 단면 형상

단면상세는 표 5, 그림 9와 같이 종방향 보강재를 플랜지에 2개, 복부에 1개씩 총 6개를 배치한 보강단면과 비보강단면으로 나누어진다. 단면설계시 폭-두께비와 보강재 유·무를 변수로 고려하였는데 JRA 80<sup>(4)</sup>에 의하면 비보강단면인 경우 압축플랜지의 좌굴이 일어나지 않기 위한 폭-두께비는 0.7이하이므로 0.7, 0.9를, 보강단면의 경우는 0.5이하이므로 0.4, 0.6을 변수로 정하였다. 시험체명은 단주와 동일한 방식으로 정하였다.

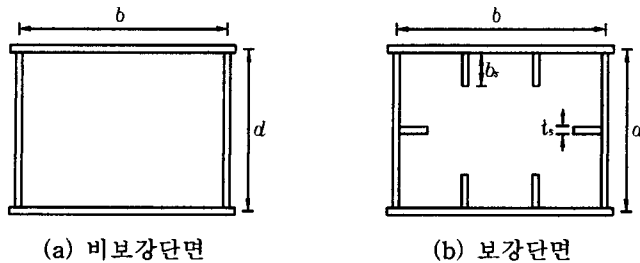


그림 9. 단면 형상

표 5. 시험단면 상세

구 분	시험단면	b (cm)	b <sub>s</sub> (cm)	t (cm)	d(cm)	h(cm)	L(cm)	R	λ
비보강 (U)	U70	13	-	0.4	12.5	100	120	0.71	0.42
	U90	17.5	-	0.4	16	130	150	0.91	0.43
보강 (S)	S40	22	4.5	0.4	18	90	110	0.41	0.27
	S60	22	4.5	0.4	26.4	130	150	0.60	0.27

4.2 수치 해석

축하중과 횡하중을 동시에 받는 강제교각을 범용유한요소 해석프로그램인 ADINA를 이용하여 수치해석을 수행하고, 이미 수행된 실험결과치와 비교, 검토해 보았다. 시험체는 shell1 요소를 사용하여 기둥전체를 모델링하였고, 비보강 및 보강단면의 총요소수는 각각 408, 468개이다. 횡방향 하중 가력점의 국부적인 변형을 방지하기 위하여 단면의 상부에 가상의 강판 다이어그램을 부착하여 하중을 가하였다. 그림 10, 11의 실험치는 항복하중의 20%의 일정한 압축하중하에서 3회 반복 변위제어방식으로 횡방향 하중을 가하여 각 cycle당의 최고점을 찾아 각점을 연결하여 무차원화한 그림이다. 하지만, ADINA 수치해석시에는 실험과 같은 조건으로 변위제어가 되지 않아, 횡방향으로 하중을 가하면서, 그때의 하중-변위 관계를 구한 후, 무차원화하여 그림 10과 11에 나타내었다.

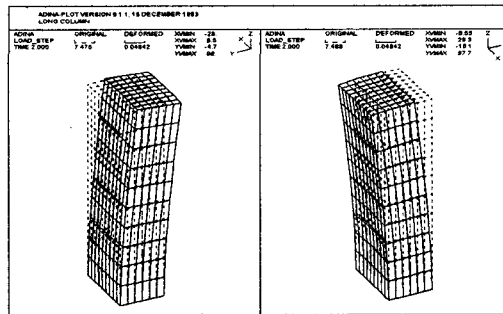


그림 9. 장주시험체의 모델링과 변형형상

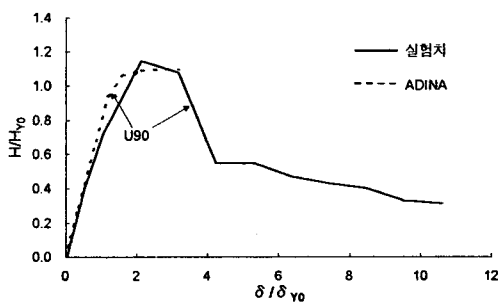


그림 10. 비보강 장주

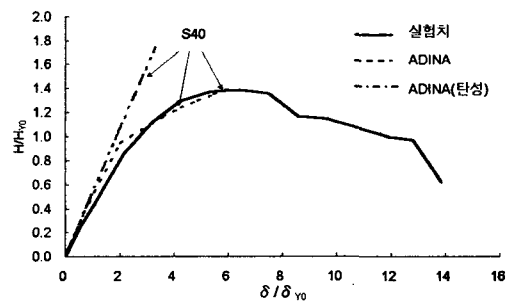


그림 11. 보강 장주

표 6. 실험치와 해석치의 비교

시험체	횡방향 극한하중 (ton)	
	실험치	수치해석결과
U70	2.40	2.01
U90	3.53	3.18
S40	9.89	9.93
S60	15.70	14.00

그림 9에서 변형 형상에는 큰 손상이 나타나 보이지 않지만, 수치해석시 최대하중 이후에 하중의 감소에 따른 변위가 크게 증가하여 수치적인 불안정이 발생하여 그때의 거동을 추적할 수 없었다. 수렴조건을 완화하여 강제수렴시킨 결과는 만족할만하지가 않았으므로, 그림 10과 11에서 ADINA를 이용한 수치해석 결과를 최대하중점 까지만 나타내었다. 표 6에서와 같이 횡방향 극한하중의 결과는 실험치와 해석치가 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다. 탄성해석결과를 비교의 목적으로 함께 도시하였다. 비보강단면의 경우 극한하중이후 국부적인 손상에 의하여 급격히 단면의 강성이 감소하는 경향을 보이는 반면, 보강단면의 경우 안정적인 연성 거동을 보이고 있다. 따라서 적절한 두께의 강판을 사용하여 제작된 보강단면의 형태가 내진설계의 목적에 부합되는 단면의 형태라고 판단된다.

## 5. 결론

용접박스형단면 강재교각의 구조적인 거동을 수치해석 및 실험을 통하여 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 비보강 단면이 횡하중과 압축하중하에서 급격히 강성이 감소되는 반면, 종방향보강재로 보강된 단면은 다양한 하중상태하에서 안정적인 연성거동을 보이므로 내진설계시 효과적인 구조형태라고 판단된다.
- (2) 범용유한요소해석프로그램인 ADINA의 4절점, 5자유도 shell 요소를 사용하고, 수렴조건은 energy 조건을 기준으로 수렴허용한도를  $1.0 \times 10^{-4}$ 으로 사용하여 강제단면의 비선형해석을 수행한 결과, 극한하중까지는 실험치와 비슷한 결과를 얻었으나, 그 이후의 거동은 추적이 불가능하였다.
- (3) 잔류응력을 고려한 비탄성좌굴해석의 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 잔류응력의 분포형태가 좌굴내력의 크기에 상당한 영향을 미치므로 단면의 폭-두께비에 따른 잔류응력분포모델 설정에 관한 신뢰할 만한 지침이 마련되어야 하겠다.

## 참고문헌

1. 김옥선, 권영봉. "H-형강 및 각형강관의 잔류응력에 관한 연구" 한국강구조학회 학술발표회, 1994
2. 엄진호, 윤석구, 송준엽, 권영봉. "보강재를 가지는 콘크리트충전 합성기둥에 대한 실험적 연구" 한국강구조학회 학술발표회, 1999
3. 건설교통부, 도로교표준시방서 대한토목학회, 1996
4. JRA 80, Specification for Highway Bridges, Japan Road Association