

용접박판형강의 비탄성 좌굴 거동에 대한 연구

A Study on the Inelastic Buckling Behavior of Welded Thin-Walled Sections

이상우*
Lee, Sang Woo

권영봉**
Kwon, Young Bong

ABSTRACT

Inelastic buckling stress of Welded Thin-Walled Steel Sections was investigated by using Spline Finite Strip Method. Several types of membrane residual stress and nonlinear stress-strain relationship were considered to produce reasonable fits to test results.

A simple formula for the inelastic local buckling stress of welded sections was also proposed and compared with Korean Standard Specifications for Highway Bridges.

1. 서론

용접박판형강을 기둥부재로 사용하였을 경우, 예상되는 좌굴거동은 용접에 따른 영향으로 열간 압연, 냉간성형형강과는 다소 다른 거동을 보일 것이라고 사료된다. 판재를 용접하여 만든 보강재가 부착된 부재와 부착되지 않은 부재의 박판형강단주의 압축실험을 통하여 얻은 실험결과와 수치 해석 결과를 비교 검토하여 세장비에 따라 비탄성거동을 보이는 부재의 좌굴응력을 예측하기 위한 합리적인 방법을 모색해 보고자 한다. 실험결과를 유추하기 위해서 B_s-Spline Finite Strip Method(Bfplate)를 사용하여 수치해석을 하였으며 해석시 예상될 수 있는 변수에는 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 잔류응력과 응력-변형도 곡선의 변화에 따른 결과치를 연구대상으로 삼았다. 잔류응력의 분포는 그림. 4와 같이 3가지 경우를 가정하였으며, 응력-변형도 곡선은 실험에 사용된 동일한 강재의 시편 인장실험 결과를 토대로 하였다.

수치해석에 사용된 응력-변형도 곡선은 다음 3가지로 가정하였다. 완전탄-소성⁽¹⁾을 가정한 Bi-Linear와 Ramberg-Osgood⁽²⁾가 제안한 식이며, 마지막으로 Plank⁽³⁾식을 사용하였다.

수치해석방법의 일환으로 범용프로그램인 ADINA에 의한 탄성좌굴 해석을 추가적으로 수행하여 Bfplate와 비교하여 보았다. 이상과 같이 실험과 Bfplate 그리고 ADINA에 의한 해석결과의 비교를 통해 적합한 잔류응력분포와 응력-변형도 곡선식을 추정해 보고자 하였다.

* 영남대학교 토목공학과 석사과정

** 영남대학교 토목공학과 조교수

2. 해석방법

본 논문에서 사용한 좌굴해석방법은 중형함수를 사용한 유한대판법(Spline Finite Strip Method)이며, 단면 머리(section knots)를 가진 일반적인 스트립과 국부좌표계는 그림. 1에 나타나 있다.

유한대판법에서 각주와 같은 형태의 횡방향(y축)은 n개의 띠(strip)로, 종방향(x축)은 m개의 단면 머리(section knots)로 분할될 수 있다. 스트립의 길이를 초과하는 spline함수를 규정하기 위해 각각의 spline에 대해 두 개의 추가적인 단면 머리가 필요하다. 각각의 단면 머리는 4개의 자유도를 가지는데 2개의 면외변위 $w, \theta (= \partial w / \partial y)$ 와 2개의 면내변위 u, v 로 구성되어 있다.

절선을 따르는 변위에 대한 Spline 함수는 같은 단면길이 m을 가지는 B_3 -spline이다. 종방향변위를 나타내고 있는 변위함수는 식 2.1에 의한 국부 B_3 -spline의 합으로 취해진다.

$$f(x) = \sum_{i=-1}^{m+1} \alpha_i \Phi_i(x) \quad (2.1)$$

여기서, $\Phi_i(x)$ 는 spline 함수이다.

그리고 α_i 는 해석에 의해서 정해지는 상수이다. B_3 -spline함수는 두번 미분할 수 있는 구분적 3차 다항식이며, 종방향 모서리의 경계조건을 만족하기 위해 국부 spline함수를 수정하는 여러 가지 방법이 있지만 특별한 경계조건에 의해서 수정되어진 splines의 개략적인 선형조합의 형태를 그림. 2에 나타나 있다.

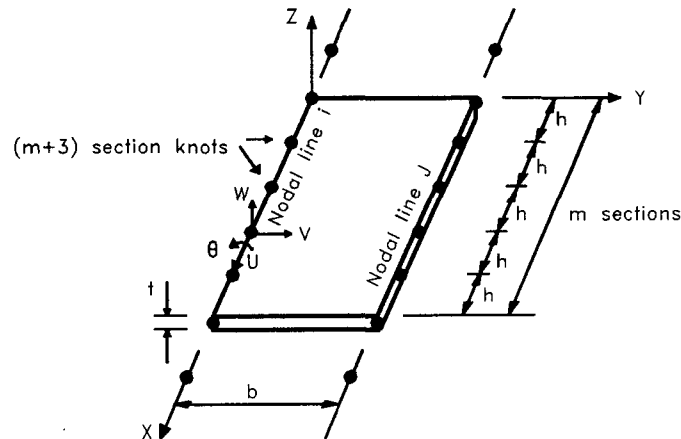


그림. 1 A B_3 -Spline Strip

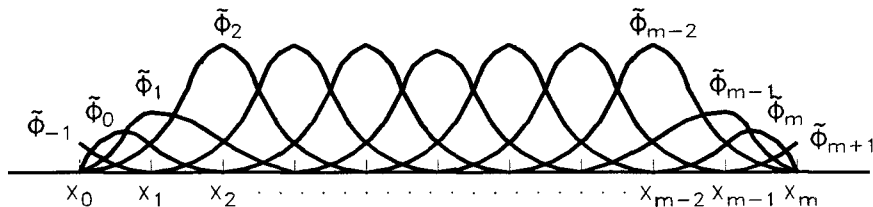


그림. 2 A Linear Combination of B_3 - Splines with Amended Boundary Local Splines

3. 응력-변형도 곡선

응력-변형도 곡선상에서 접선계수(Tangent Modulus) 및 활선계수(Secant Modulus)를 구하기 위하여 여러 학자들에 의하여 비선형재료의 응력-변형도 곡선이 수식형태로 표시되었다. 재료의 인장시험결과 탄성계수는 그림. 3에 나타나 있는 것처럼 $E = 2.03 \times 10^5 \text{MPa}$ 이며, 항복강도는 $\sigma_y = 290 \text{MPa}$ 이다.

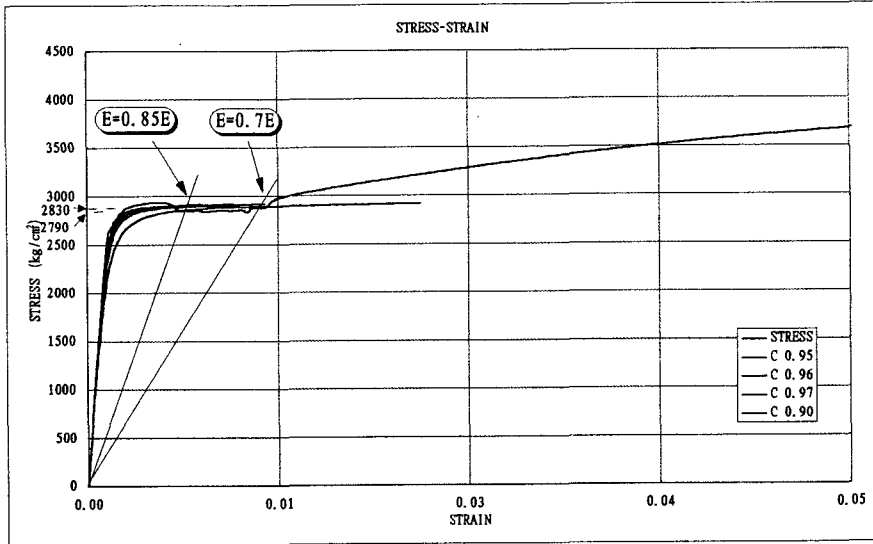


그림. 3 인장시험에 의한 응력-변형도 곡선

3.1 Elastic-Perfectly Plastic

전형적인 열간압연형강의 응력변형도 곡선으로 가정되는 완전탄-소성식은 재료의 비탄성 구간의 접선 강도의 변화는 무시하고 변화는 항복응력까지 일정한 경사를 가지는 하나의 직선 탄성구간과 항복응력 이후 접선강도가 0인 소성구간으로 나누어 진다.

3.2 Ramberg-Osgood

Ramberg-Osgood의 일반식은

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + k \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (3.2a)$$

여기서 k, n 은 상수이다. Ramberg와 Osgood은 k, n 을 구하는 식을 도출하였으며, 식 3.3a는 다시 식 (3.3b)으로 표시 될 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{3\sigma}{7E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.7}} \right)^{n-1} \quad (3.2b)$$

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{E}{1 + \frac{3n}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.7}} \right)^{n-1}} \quad (3.2c)$$

$$\text{여기서, } n = 1 + \frac{\log(17/7)}{\log(\sigma_{0.7}/\sigma_{0.85})} \quad (3.2d)$$

Ramberg-Osgood에 의해 제안된 식은 그림. 3에서 보는 것과 같이 인장시험의 실험결과에서 $E=0.7E$ 와 $E=0.85E$ 값에 해당하는 각각의 응력을 식 3.2에 적용하여 수치해석을 수행하였다.

3.3 Plank

Plank에 의하여 제시된 응력-변형도 곡선은 아래와 같다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \frac{1-c\mu}{1-\mu} \quad (3.3a)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{E(1-\mu)^2}{1-2c\mu+c\mu^2} \quad (3.3b)$$

여기서, $\mu = \sigma/\sigma_y$ 이며 c 는 상수이다.

Plank식은 상수 c 값의 변화에 따라 곡선식이 변하게 된다. 그림. 3의 시편 인장시험곡선에 Plank곡선식을 맞추기 위해 응력값의 변화에 따른 변형의 변화를 반복적으로 수행한 결과, Plank식의 상수 c 값을 0.97을 사용하는 것이 시편에 의한 인장시험곡선과 가장 잘 일치하는 것으로 판명되었다.

4. 잔류응력

수치해석의 결과에 가장 큰 영향을 미치는 잔류응력분포의 정확한 가정에는 많은 어려움이 뒤따른다고 할 수 있다. 일반적으로 잔류응력은 휨성분 잔류응력과 막응력성분으로 분류할 수 있으며 후판재일 경우 두께를 따라서 불균일한 응력이 존재하므로 중요소로 분할하지 않고는 정확한 분포를 수치해석에 도입하기는 어렵다. 본 연구에서는 막응력성분만을 고려하여 예상되는 잔류응력분포를 그림. 4에서와 같이 3가지 경우로 가정하여 실험과의 적합성 여부를 판단해 보고자 한다.

먼저 Case 1⁽⁴⁾의 경우 압축잔류응력은 σ_y 의 0.3배가 분포하고 인장잔류응력은 σ_y 크기 만큼 작용하여 인장과 압축잔류응력의 크기가 일치하도록 가정하였으며, Case 2⁽⁵⁾에서는 Case 1의 경우 압축잔류응력이 $0.3\sigma_y$ 였으나 실험에⁽⁷⁾ 근거하여 그 크기를 달리하여 $0.2\sigma_y$ 가 작용하여 인장과 압축잔류응력의 평형상태를 가정하였다.

마지막으로 Case 3^{(6),(7)}은 인장잔류응력이 판 두께의 3배폭에 걸쳐 σ_y 크기의 응력으로 분포하고 있는 것으로 보고, 같은 크기의 압축잔류응력이 폭 $12t$ 에 걸쳐 분포하여 용접선 주위에서의 면내잔류응력이 평형상태를 이루는 것으로 가정하였다.

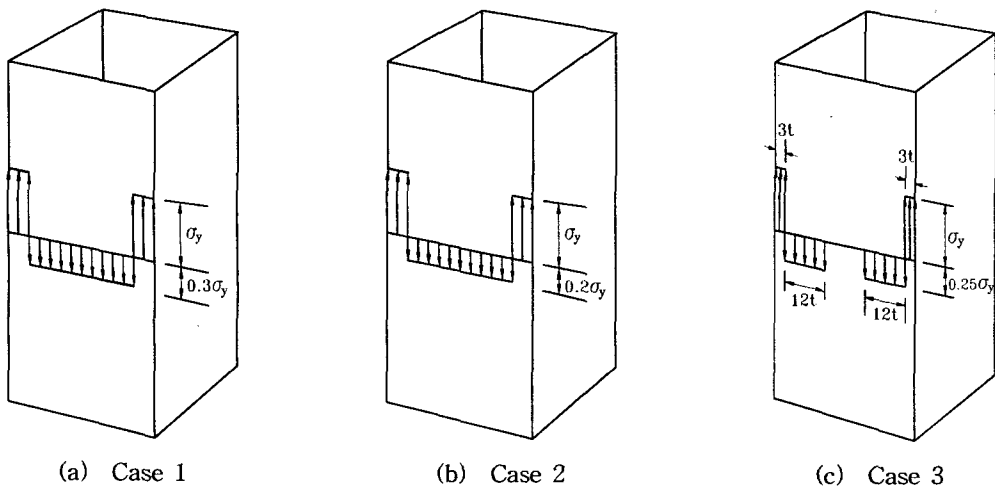


그림. 4 잔류응력분포의 가정

5. 시험과 해석에 사용된 시편의 제원

시험에 사용된 시편의 제원은 각각 다음의 표. 2와 그림. 5와 같다.

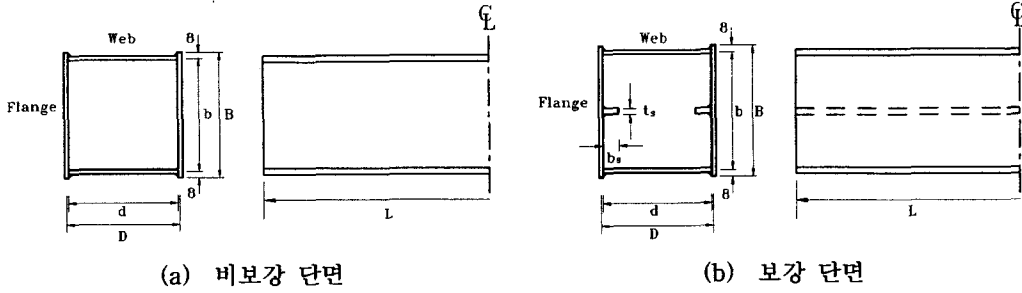


그림. 5 시험시편의 제원

표. 2 시험시편의 명칭 및 치수

| (a) 비보강 단면 | | | | (b) 보강 단면 | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|------------|--------|------------|--------|--------|------------|
| 시 편 | b (cm) | t (cm) | L (cm) | 시 편 | b (cm) | b_s (cm) | L (cm) | t (cm) | t_s (cm) |
| US 9 | 13 | 0.32 | 39 | S 15 (2.5) | 22 | 2.5 | 66 | 0.3 | 0.3 |
| US 12 | 17.5 | 0.32 | 52.5 | S 15 (3.5) | 22 | 3.5 | 66 | 0.3 | 0.3 |
| US 15 | 22 | 0.3 | 66 | S 15 (4.5) | 22 | 4.5 | 66 | 0.3 | 0.3 |

여기서, b = 플랜지 폭 ; L = 시편의 총길이 ; t = 강재의 두께 ;
 b_s = 보강재의 폭 ; t_s = 보강재의 두께

실험에 사용된 시편은 형상비(a/b)가 1:3인 단주이며, 실험에서 양단의 경계조건을 가급적 단순 지지가 되도록 하여 실험을 수행하였다. 비보강 단면의 경우 형상비를 1:3으로 일정하게 유지하여 플랜지와 복부의 폭을 증가시켰으며, 보강된 단면은 US 15와 동일한 단면에 보강재를 부착하여 보강재의 크기를 변화시킨 것이다.

6. 실험과 해석의 비교분석

그림. 5에 나타나 있는 단면을 실험한 결과와 해석의 결과가 표. 3, 표. 4와 그림. 6에 나타나 있다. 표. 3, 표. 4와 같이 탄성좌굴응력을 비교해 보면 Bfplate와 ADINA해석치간에 1.5% 내외의 상대오차가 있다는 것을 알 수 있으므로 Bfplate프로그램의 정확도를 신뢰할 수 있다는 것을 알 수 있다. 좌굴거동에 대해 Bfplate와 ADINA에 의한 수치해석결과와 실험에 의한 결과가 그림. 6에 나타나 있다. 그 결과 순수압축을 받으며, 형상비가 1:3일 경우 기존 문헌⁽¹⁾에서 제시하고 있는 좌굴모드와 실험을 통한 결과는 서로 일치하는 전형적인 3Half-Wave을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 해석에 의한 결과도 같은 형상을 보이며 실험과 해석의 일치성을 보여주고 있다.

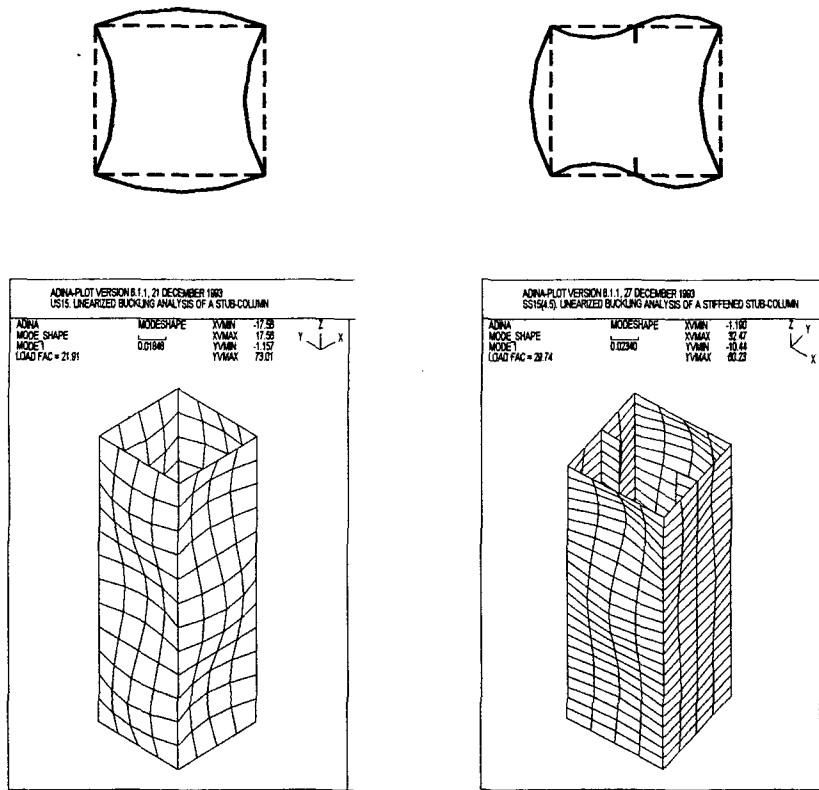


그림. 6 시편의 좌굴모드

실험과 비탄성해석의 결과에 대해 살펴보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

6.1 응력-변형도에 따른 비교 검토

(1) 좌굴응력이 항복응력에 근접할 때는 응력-변형도 곡선의 변화에 따라 좌굴응력이 25%정도의 큰 상대오차를 보이고 있으나, 좌굴응력이 항복응력과 큰 차이를 보일 경우에는 응력-변형도 곡선의 변화에 따라 좌굴응력이 3~5%정도의 작은 차이를 보여주고 있다.

(2) 완전탄-소성과 Plank의 식의 결과를 보면 좌굴응력의 크기가 항복응력과 차이를 보일 경우는 유사한 결과를 보여주고 있으나, Ramberg-Osgood식에 의해 계산된 값은 다른 두식에 비해 10%정도의 차이를 보여주고 있다. 탄성응력과 비탄성응력을 비교하면 σ_{cr} 이 $0.5\sigma_y$ 이하인 세장한 경우 탄성좌굴해석을 해도 무방하다고 생각된다. 또한 σ_{cr} 이 $0.8\sigma_y$ 정도에 접근할 경우 완전탄-소성으로 가정한 경우가 실험치와 비교하여 1.5%내외의 차이를 보이고 있다.

6.2 잔류응력에 따른 비교 검토

잔류응력의 분포는 비탄성해석시 가장 큰 영향을 미친다고 생각되며 수치해석시 잔류응력의 가정은 충분한 연구가 필요하다고 사료된다.

폭-두께비가 작을수록 그림. 4의 Case 1과 같은 분포에 가깝고 세장비가 커짐에 따라서 부재의 평탄부 중앙의 잔류응력을 무시할 수 있는 것으로 잔류응력이 Case 3에 가깝게 분포되어 용접의 영향은 용접부위에 근접한 부위에 국한된다고 판단된다. 잔류응력의 3가지 분포에 따라 수치해석 값이 10~13% 정도의 차이점을 보이고 있다.

표. 3 비보강 단면의 해석과 실험에 대한 좌굴응력

| 시 편 | 실험 | 탄 성 | | 비 탄 성 | | | | | | | | |
|-------|-----|---------|-------|---------------------------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | Elastic-Perfectly Plastic | | | Ramberg-Osgood | | | Plank | | |
| | | Bfplate | ADINA | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
| US 9 | 257 | 444 | 451 | 260 | 283 | 290 | 195 | 213 | 223 | 290 | 290 | 290 |
| US 12 | 229 | 245 | 249 | 182 | 203 | 227 | 174 | 199 | 206 | 230 | 195 | 224 |
| US 15 | 129 | 136 | 138 | 72 | 94 | 131 | 72 | 94 | 131 | 68 | 90 | 127 |

표. 4 보강 단면의 해석과 실험에 대한 좌굴응력

| 시 편 | 실험 | 탄 성 | | 비 탄 성 | | | | | | | | |
|--------|-----|---------|-------|---------------------------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | Elastic-Perfectly Plastic | | | Ramberg-Osgood | | | Plank | | |
| | | Bfplate | ADINA | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
| S15-25 | | 185.8 | 191.3 | 127.9 | 152 | 161.5 | 127.9 | 152 | 157.8 | 115.8 | 140.3 | 144.8 |
| S15-35 | 164 | 185.9 | 192.3 | 128 | 152.2 | 163 | 128 | 152.2 | 163 | 115.9 | 140.4 | 145 |
| S15-45 | 170 | 186.0 | 192.7 | 128.1 | 152.3 | 163.2 | 128.1 | 152.3 | 163.2 | 116 | 140.5 | 145.1 |

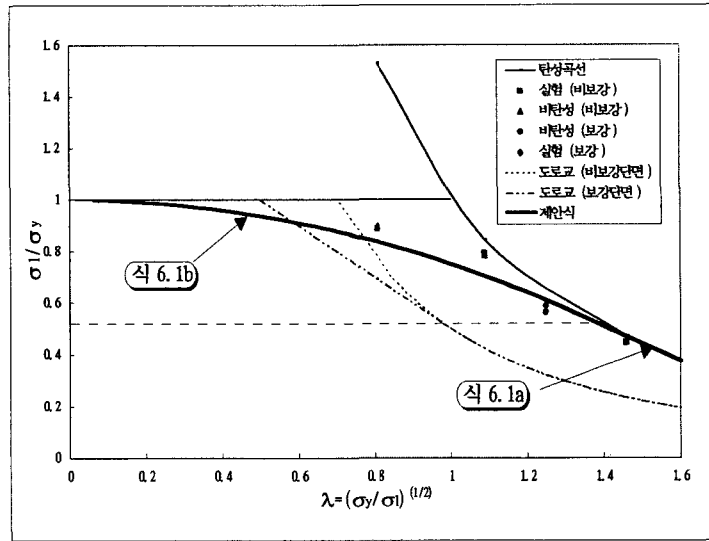


그림. 7 좌굴응력과 세장비 관계 곡선

위의 실험 및 비탄성 해석결과를 고려하여 Chajes, et al.⁽⁸⁾, Lau, S. C. W.⁽⁹⁾에 의해 제안된 비탄성 횡좌굴식 또는 뒤틀림좌굴식과 유사한 방법으로 탄성국부좌굴응력을 사용하여 용접박판단면의 비탄성 국부좌굴응력을 도출할 수 있는 설계 곡선식을 식 6.1과 같이 제안하고자 한다. 그림. 7에서 실험과 비탄성 좌굴해석결과를 도로교표준시방서의 기준내하력곡선과 비교해 보았다.

$$\sigma_1 = \sigma_{le} \quad \sigma_{le} \leq 0.5\sigma_y \quad (6.1a)$$

$$\sigma_1 = \sigma_y \left(1 - \frac{\sigma_y}{4\sigma_{le}}\right) \quad \sigma_{le} > 0.5\sigma_y \quad (6.1b)$$

여기서 σ_1 : 비탄성좌굴응력, σ_{le} : 탄성좌굴응력

그림. 7에서 보는 것처럼 도로교표준시방서의 기준설계곡선은 세장비가 0.9에서 1.6사이에서 실험 및 수치해석 결과와 비교하여 너무 안전치인 것으로 판단된다. 또한 세장비가 0.8이하인 구간에서 불안정한 값을 도출할 가능성도 배제할 수 없다고 판단된다.

7. 결론

용접박판형강의 실험과 수치해석을 수행한 결과 실험에는 많은 여러 가지 변수들이 존재할 수 있으며 수치해석에 의한 결과와 일치하기란 사실 많은 어려움이 있다.

본 연구에서 해석의 방법을 여러 가지로 달리하여 실험에 잘 부합하는 결과를 산출하여 용접박판형강에 적합한 잔류응력의 분포와 응력-변형도 곡선식을 다음과 같이 제안하고자 한다.

(1) 잔류응력의 분포는 좌굴응력이 $0.8\sigma_y$ 에 근접할 경우에는 Case 1의 경우가 합당하며 응력-변형도 곡선식은 완전탄-소성이 합당하다고 사료된다.

(2) 좌굴응력이 항복응력의 50%에 근접할 경우에는 잔류응력의 분포가 Case 3에 가까우며 응력-변형도 곡선식은 완전탄-소성과 Ramberg-Osgood 의 식 중 어느 것을 사용해도 무방하다고 판단된다.

(3) 탄성해석의 좌굴응력이 $0.5\sigma_y$ 이하인 경우는 비탄성 해석결과와 큰 차이가 없으므로 탄성해석을 하여도 무방하며 탄성해석의 좌굴응력이 $0.5\sigma_y$ 이상인 경우는 식. 6.1b를 사용하여 비탄성좌굴응력을 유출할 수 있다고 판단된다.

8. 참고문헌

- (1) Charles G. Salmon and John E. Johnson. "Steel Structures". (1990)
- (2) Ramerg, W. & Osgood, W. R. : "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters", Technical Note, NACA No. 902, (1943)
- (3) Plank, R. J. : "A Study of the Elastic-Plastic Instability of Stiffened Panels Using the Finite Strip Method", Instability and Plastic Collapse of Steel Structures, Proceeding of M. R. Home
- (4) Hanbin, G. E. & Tsutomu USAMI : "Development of Earthquake-Resistant Ultimate Strength Design Method for Concrete-Filled Steel Structures", Department of Civil Engineering, Nagoya University. (1994)
- (5) 권영봉 외 5명 : "콘크리트 충전강재교각의 구조적 거동에 관한 연구", 영남대학교. (1995)
- (6) Kitipornchai S. and Lee, L. H. : "Inelastic Buckling of Single Angle, Tee and Double Angle Struts", Journal of Constructional Steel Research, 6(1), pp3-20. (1986)
- (7) 김옥선, 권영봉. "H-형강 및 각형강관의 잔류응력에 관한 연구", 한국강구조학회 학술발표대회, pp17-24. (1994)
- (8) Chajes, A., Fang, P. J. & Winter, G. : "Torsional-Flexural Buckling, Elastic or Inelastic of Cold-Formed Thin-Walled Columns", Research Bulletin, No. 66-1, School of Civil Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, (1966)
- (9) Lau, S. C. W. and Hancock, G. J., : "Distortional Buckling Tests of Cold-Formed Channel Sections", Ninth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St Louis, Missouri, 1988, 45-73.