

합성보의 거동에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Structural Behavior of Composite Beams

°황영서¹⁾ 양구록¹⁾ 송준엽²⁾ 권영봉³⁾
Hwang, Young Seo Yang, Gu Rok Song, Jun Yeup Kwon, Young Bong

ABSTRACT

An analytical study to trace the nonlinear structural behavior of composite beams is undertaken to include the nonlinear material properties of steel sheeting, reinforcing steel bar and concrete. To trace Moment-curvature relations, sectioning analysis method and two simple formulas are developed. A simple power model which has been originally used to expect the flexural capacity of the beam to column connections is proposed and the second formula is composed of two experimental functions to express the Moment-curvature relation in the elastic and plastic range separately. The load-deflection behavior of the beams has been simulated by the step-by-step numerical integration method and is compared with the test results available.

1. 서 론

냉간성형강재와 철근콘크리트의 합성구조는 철근콘크리트구조에 비해 강성, 연성 및 좌굴내력 등에 있어 우수한 구조적 거동을 보여 주며 박판냉간성형강재는 열간압연형강에 비하여 경량이며, 현장에서 바로 조립이 가능하고 비구조재인 거푸집의 설치 및 제거가 필요없어 시공시의 안정성, 인건비의 절감 및 공기단축 등의 여러가지 장점을 가진다. 뿐만 아니라 단점인 콘크리트와의 부착력을 개선하기 위해 강재의 단면에 리브(rib)와 엠보싱(embossing)을 비교적 손쉽게 만들어서 콘크리트 부착력을 증대시킴과 동시에 미끄러짐(slip)을 방지하는 효과를 얻을 수 있어 외국에서는 이미 그 사용성이 인정되고 있으며 우리나라의 경우에도 합성슬래브의 시공사례 등에서 이런 장점들이 충분히 증명되어 있어 이를 보나 기둥 등의 용도로 확장해 나갈 수 있다고 사료된다.

냉간성형강 합성구조물의 구조적인 거동은 콘크리트의 재료적인 비선형성과 열간압연형강과는 다른 냉간성형강의 비선형적인 관계로 인해 선형탄성거동과는 큰 차이점이 있다. 두 재료의 응력-변형률 관계에서 항복점 이후의 하중과 변위의 관계가 비선형적인 관계에 있으므로 부재의 변형 및 극한하중의 정확한 해석이 가능해야만 소성설계를 수행할 수 있다. 압축부 강재의 좌굴해석을 수행하여 Von Karman(1936)과 Winter(1947)에 의한 비합성단면의 좌굴강도와 비교할때 단면의 강도가 높게되는 것을 알 수 있는데, 이것은 합성단면의 좌굴응력값이 비합성단면의 좌굴응력값보다 증가하기 때문이다. 본 연구에서는 합성보의 안

-
- 1) 영남대학교 토목공학과 석사과정
 - 2) 영남대학교 토목공학과 박사수료
 - 3) 영남대학교 토목공학과 부교수

전성과 사용성에 대한 불확실성으로 인해 보다 정확한 이론적인 해석방법이 요구됨으로, 정확한 극한내력과 좌굴내력값을 구하고, 하중과 처짐과의 관계를 좀 더 명확히 규명하기 위한 해석모델을 제시하는데 목적을 두었다. 나아가 본 연구의 결과를 기초로 하여 냉간성형강합성 보의 설계 및 제작과정에서 필요로 하는 구체적인 자료를 제공하고 강재의 구조적, 기계적 특성을 규명하고자 한다.

2. 재료적인 특성 및 탄성좌굴해석

2.1. 재료의 기계적 성질

냉간성형강의 응력-변형을 곡선은 아래 그림 2.1.(a)에서 볼 수 있듯이 점진적인 항복경향을 보여주는데 이는 냉간성형에 따른 섬유들의 불균일한 소성변형의 영향으로 항복강도 및 잔류응력의 분포가 서로 다르기 때문이다. 고강도강의 경우는 별다른 차이를 보이지 않으나 일반적으로 모서리 부위가 평평한 부위보다 더 점진적인 항복을 보여준다. 냉간성형강의 잔류응력은 1~2mm 내외의 박판의 경우, 좌굴해석시 고려해야할 막성분 잔류응력(membrane residual stress)은 5~10MPa 정도이므로(Kwon and Hancock) 좌굴내력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각되고 단면의 부위에 따른 불균일한 응력-변형을 관계에 의하여 부재가 부분적으로 먼저 항복하게 된다. 이러한 항복으로 인한 단면의 전체강성이 감소됨에 따라서, 하중을 증가시켜 나갈 때 전체부재가 탄성좌굴하중보다 낮은 하중하에서 좌굴하게 된다.

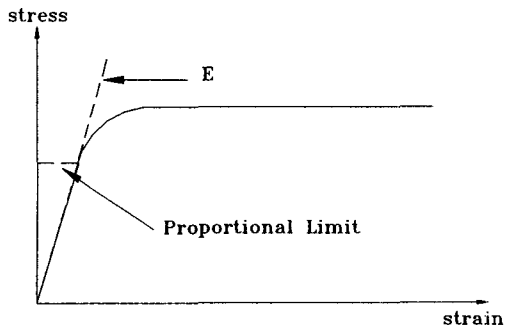


그림 2.1.(a) 냉간성형강의 응력-변형률 곡선

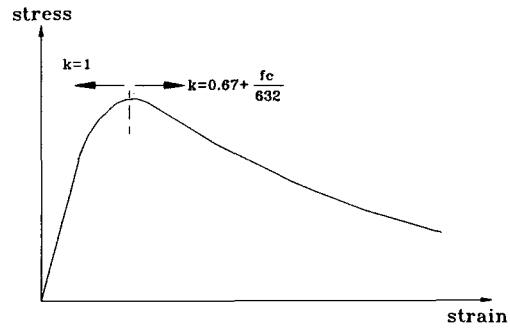


그림 2.1.(b) 콘크리트의 응력-변형률 곡선

일반적으로 보통강도의 곡선식은 200kg/cm^2 정도의 보통강도 콘크리트를 위한 공식이고, 콘크리트의 강도가 클 경우는 하강곡선부의 경사가 심하며 최종파괴시의 변형률이 작아지는 취성적인 특성을 보이므로 이러한 특성을 반영한 Collins의 공식을 이용한 응력-변형률 곡선을 그림 2.1.(b)에 나타내었다.

$$\sigma = k_3 \cdot \sigma_{ck} \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \cdot \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^{nk}}$$

여기서, σ_{ck} : 콘크리트의 압축강도

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_c} < 1 \quad k = 1, \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_c} > 1 \quad k = 0.67 + \frac{\sigma_{ck}}{62} > 1, \quad k_3 = 0.6 + \frac{10}{\sigma_{ck}} \leq 0.85, \quad n = 0.8 + \frac{\sigma_{ck}}{17}$$

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_{ck}}{E_c} \cdot \frac{n}{n-1}$$

$$E_c = 3320\sqrt{\sigma_{ck}} + 6900$$

2.2. 탄성좌굴해석

비합성인 보에 대해 Uy의 실험시편과 같은 기하학적 형상과 재료적 성질을 가지는 냉간성형강의 단부에 edge stiffener가 보강된 단면(◆)과 보강하지 않은 단면(▲) 2가지 경우를 순수휨을 받는다고 가정하여 탄성 좌굴해석을 수행한 결과를 그림 2.2에 나타내었다.(Lau and Hancock 1989, Kwon 1994)

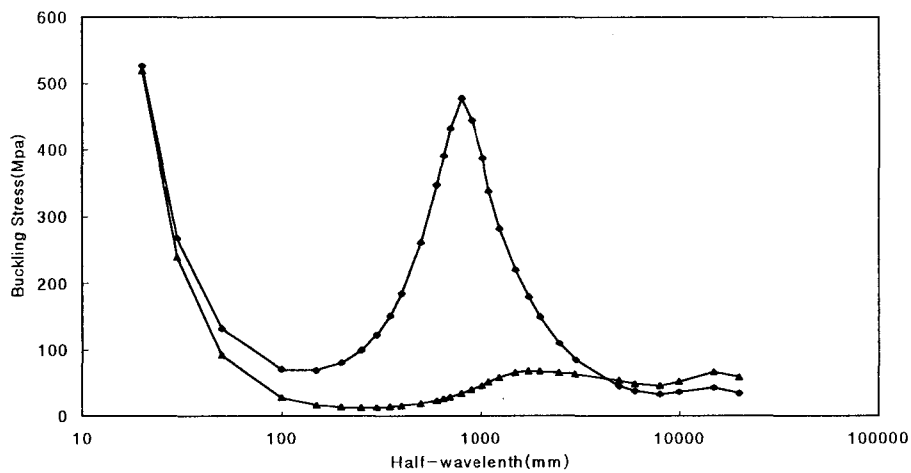


그림 2.2 Half-wavelength에 대한 좌굴응력

좌굴해석결과 보의 길이가 증가함에 따라 휨을 받는 보의 상부가 단순지지된 경우는 두 경우 모두 뒤틀림 좌굴을 일으키는 것으로 나타났으며 최소 좌굴응력은 보강된 경우는 68MPa, 보강하지 않은 경우는 12MPa로서 단부에 edge stiffener를 보강한 단면이 약 5배 정도 높게 나타났다.

일반적으로 합성보에서 요소별 강재의 좌굴계수를 다르게 적용시키는 2가지 이유는 첫째, 좌굴의 형태는 콘크리트가 내측으로의 변형을 구속시키고 둘째, 질곡부(folded line)는 강재단면의 경우에 흔히 적용하는 hinge로의 역할보다는 fixed조건처럼 작용하게 된다. 이러한 이유로 강합성 단면의 경우, 콘크리트와 강의 합성으로 인한 단면의 경계조건은 그림 2.3에서 보인 것처럼 비합성인 경우와 상당한 차이가 있으므로 경계조건을 3번 고정과 1번 자유단으로 가정하고 압축응력을 선형적으로 변화시켜 탄성좌굴해석을 수행하였으며 그 결과를 그림 2.3에 나타내었다.

그림 2.2에서 보여주듯이 합성보의 좌굴강도는 비합성단면의 좌굴강도 보다 높게 나타나고 좌굴모드는 대체로 국부좌굴의 형태로만 나타나며 그림 2.4는 비합성, 합성단면의 좌굴모습을 보여준다.

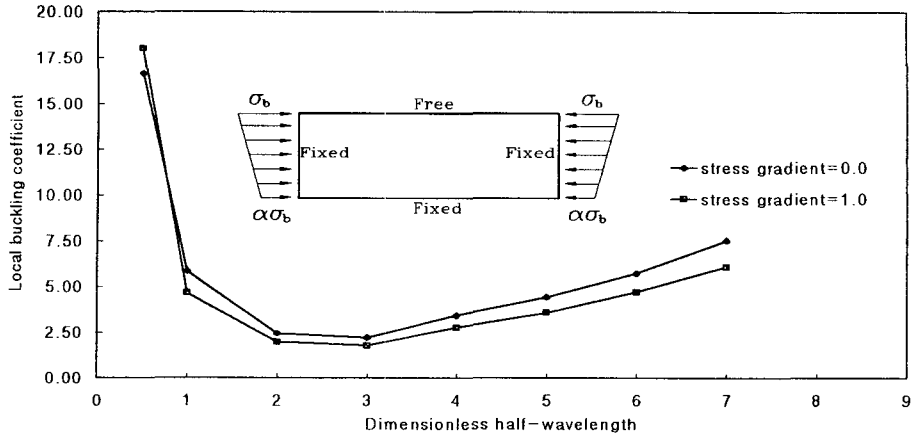


그림 2.3 3변 고정단과 1변이 자유단인 판의 좌굴계수

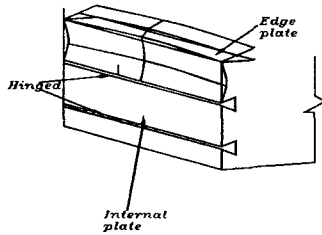


그림 2.4(a) 압축력하에서의 냉간성형강의 국부좌굴

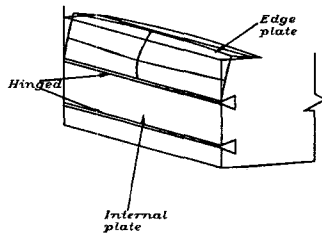


그림 2.4(b) 압축력하에서의 냉간성형강의 뒤틀림좌굴

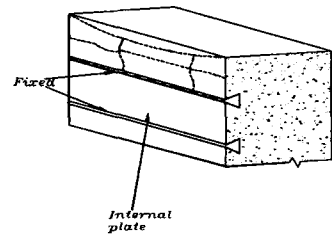


그림 2.4(c) 압축력하에서의 합성보의 좌굴형상

Uy(1995)의 실험에서 실제 측정된 국부좌굴 길이는 600~700mm 사이에 있으므로 본 좌굴해석 결과에 의해 국부좌굴계수는 2.22과 2.76 사이에 있게 된다. 그러므로 위의 해석결과로 식 (2.2a)와 같이 좌굴응력 값을 구할 수 있고, 국부좌굴하의 변형률은 좌굴응력을 탄성계수로 나눔으로서 식 (2.2b)에 따라 얻을 수 있다. 그 결과 좌굴응력은 23MPa로서 비합성의 12MPa와 비교할 때 2배 가까이 증가된 것을 볼 수 있다. 또한, 변형률은 116×10^{-6} 로서 Uy(1995)의 시험결과와 상당히 일치함을 알 수 있다.

$$\text{좌굴응력} : \sigma_b = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (2.2a)$$

$$\text{변형률} : \epsilon_b = \frac{\sigma_b}{E} \quad (2.2b)$$

3. 합성보의 모멘트-곡률 관계

본 연구에서는 합성보의 모멘트-곡률 관계에 대한 간단한 해석방법을 제안하고 여러 실험결과와 비교해

보았다. 실험에 사용된 강재의 응력-변형률 관계는 Ramberg-Osgood식, 콘크리트의 압축강도는 Collins, Mitchell, MacGregor(1993)의 공식을 사용하고 콘크리트의 인장강도는 콘크리트 압축강도의 함수로 나타낸 Gilbert(1988)의 공식을 사용한다. 철근의 경우는 탄성-완전소성으로 사용한다. 한편, 하중재하는 중앙부 위에서 순수휨이 생기도록 3등분점에 하중을 가하였으며 모멘트-곡률 관계는 스트레인 게이지로 얻은 변형률을 이용하여 계산하였다.

3.1 단면해석법

Uy와 Bradford(1995)가 제안한 해석방법과 비슷한 방법으로서 전체단면을 수평방향으로 분할하여 변형률 분포를 선형함수로 만들어 주고, 보의 폭은 유효폭을 계산하여 리브에 의한 콘크리트 단면적의 감소를 반영해서 냉간성형강의 리브면적을 리브의 도심에 위치하도록 한다.

본 연구에서 제안된 단면해석법에 대한 비선형 해석 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 연단변형률 ϵ_t 를 가정한다.
- 2) 중립축 d_n 을 가정하고, 각 slice에서의 변형률 분포를 계산한다. 곡률은 연단변형률과 중립축을 이용하여 식 (3.1.1)에 따라 계산한다.

$$\phi = \frac{\epsilon_t}{d_n} \quad \text{식 (3.1.1)}$$

- 3) 냉간성형강과 콘크리트 사이의 slip을 고려하기 위해 slip strain을 식(3.1.2)와 같이 계산한다.

$$\epsilon_s = \delta \phi d_s \quad \text{식 (3.1.2)}$$

여기서, δ : slip strain parameter, d_s : 냉간성형강 단면의 중립축

- 4) 냉간성형강, 철근, 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 이용하여 각각의 slice에서의 응력을 계산한다.
- 5) 모든 slice에서의 내력을 합한다.
- 6) 모든 slice에서의 모멘트를 합한다.
- 7) 내력의 합이 0에 수렴하도록 이분법(bisection method)를 이용하여 중립축을 구한다.
- 8) 단면의 연단변형률을 증가하여 2)~7)과정을 반복한다.

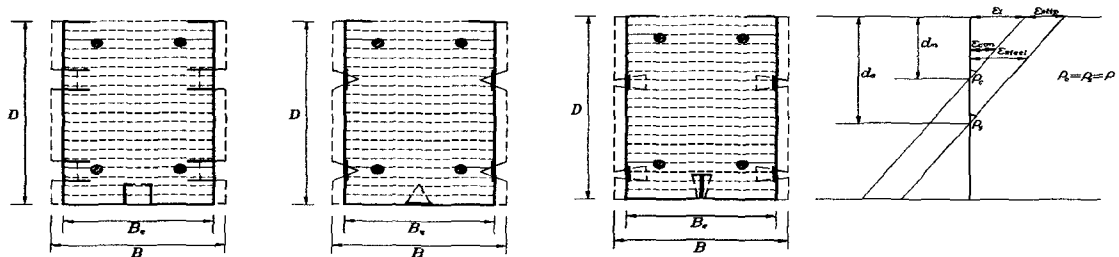


그림 3.1 해석 단면

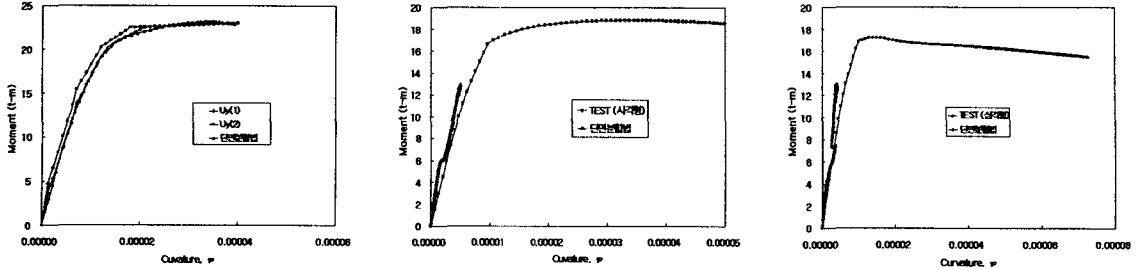


그림 3.2 실험단면과 단면해석법의 비교

3.2 Modified Usami's formula

Ge와 Usami(1994)가 제안한 공식은 콘크리트 충전강관기둥을 위한 것이었으나 공식을 수정하여 합성보에 적용할 수 있다. Usami의 공식은 재료의 탄성과 소성의 두 구간에 대해 서로 다른 공식을 사용하여 모멘트-곡률 관계를 나타낸다. 여기서, 모멘트, 곡률, 축력은 무차원화한 것이다.

$$\langle \text{탄성} \rangle \quad \phi = \frac{m}{a_{00}} \quad \langle \text{소성} \rangle \quad \phi = -\frac{\ln \frac{m - m_{pc}}{c_{00}}}{b_{00}}$$

$$\text{여기서, } a_{00} = \frac{m_y}{\phi_y}, \quad b_{00} = \frac{m_y}{\phi_y (m_{pc} - m_y)}, \quad c_{00} = -\frac{m_{pc} - m_y}{\exp \frac{-m_y}{m_{pc} - m_y}}$$

$$m_y = 0.128R + 0.281, \quad \phi_y = 0.56, \quad m_{pc} = 0.94$$

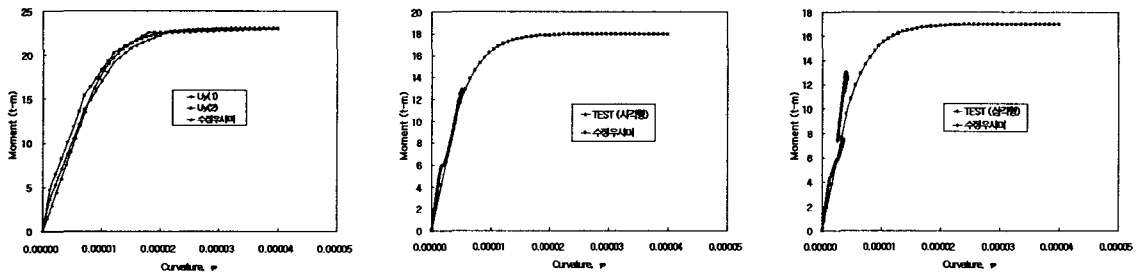


그림 3.3 실험단면과 Modified Usami's formula의 비교

3.3 Power Model

실험결과로부터 합성보의 모멘트-곡률 관계를 구하기 위해서는 많은 양의 실험결과가 필요한 Cubic B-Spline Model보다는 적은 양의 실험결과로 비교적 정확한 곡선을 얻을 수 있는 Power Model을 이용할 수 있다. 원래 Power Model은 보와 기둥 연결부의 모멘트-회전각과의 관계를 구하기 위해서 여러 연구자들이 제안한 것으로서 본 논문에서는 3개의 변수(initial connection stiffness, ultimate moment capacity, shape parameter)를 이용한 Kishi와 Chen(1990)의 Power Model을 이용한다.

Power Model에서 초기강도는 모멘트-곡률 곡선의 기울기로 대체할 수 있으며, 극한모멘트는 소성모멘트로 대체할 수 있다. ϕ_y , $M_{pc,0}$ 와 a_{00} 는 원래 Usami의 모멘트-곡률 관계에서 나온 것으로서 축력이 0이고

사용한 강의 재료적 특성이 다르므로 a_{00} 는 합성보에 맞게 수정하였다.

$$R_{ki} = \frac{M_{pc,0} \cdot a_{00}}{\Phi_y}, \quad a_{00} = \frac{0.128R + 0.281}{0.35}$$

$$M_{pc,0} = \frac{1}{2}(b-t)\eta_0^2\sigma_{ck} + [(b+t)d + \eta_0^2 + (d-t-\eta_0)^2]t\sigma_y$$

Power Model을 이용한 합성보의 모멘트-곡률 관계는 아래의 식과 같다.

$$M = \frac{R_{ki} \cdot \phi}{\left\{1 + \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^n\right\}^{\frac{1}{n}}}$$

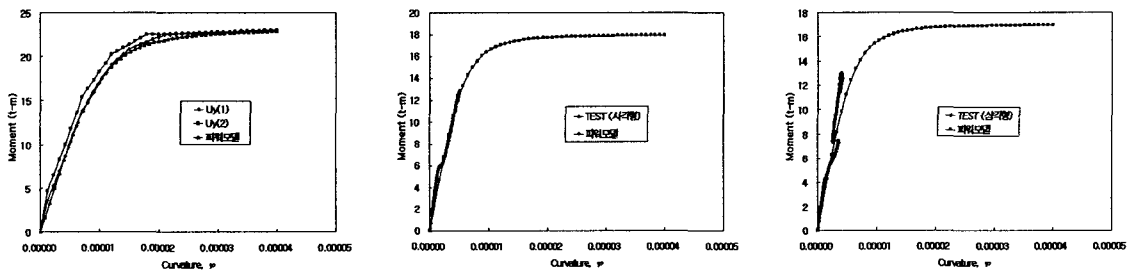


그림 3.4 실험단면과 Power Model의 비교

4. 합성보의 하중-처짐관계

비선형 하중-처짐 관계는 이미 알고 있는 모멘트-곡률 관계를 이용하여 step-by-step 수치적분법을 적용하면 쉽게 구할 수 있다. step-by-step 수치적분에서 부재는 길이방향으로 나누어주고 각 나누어진 점을 station이라 한다. 첫번째 station의 처짐을 정하고 계속해서 다음 station으로 처짐을 구한다. 첫번째 station에서 임의로 정한 처짐은 반복계산동안 일정하게 두고 이때의 처짐값을 하중에 대응하는 값으로 한다.

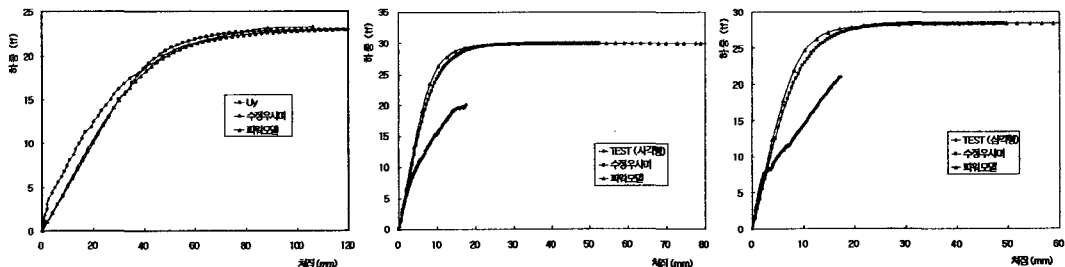


그림 4 실험과 수치적분법의 하중-처짐관계 비교

6. 결 론

본 논문에서 개발한 합성보의 비선형거동을 예측하기 위한 해석방법은 박판냉간성형강, 콘크리트, 철근의 재료비선형 특성을 포함할 수 있다. 합성보의 모멘트-곡률관계는 단면해석법이나 보다 간편한 Power Model 또는 Modified Usami's formula의 방법을 사용하여 쉽게 추측이 가능하며 이 관계를 이용하여 step-by-step 수치적분법을 이용하여 합성보의 하중과 처짐관계를 정확히 예측할 수 있었다. 다만 비교된 시험결과가 충분하지 않고, 또 사용된 박판형강이 기성제품이 아니므로 연결부위의 파단문제로 인하여 소성구간의 정확성은 확인이 불가능 하였다. 따라서 더 많은 실험결과와 비교하여 제안한 방법을 보완하여야 할 것이다.

7. 참고문헌

1. B. Uy, and M. A. Bradford(1995), "Ductility of Profiled Composite Beams. Part I: Experimental Study", Journal of Structural Engineering. Vol. 121, No. 5, pp876-882.
2. Gilbert, R. I. (1988). "Time Effects in Concrete Structures", Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
3. H. Ge, and T. Usami(1994), "Development of Earthquake Resistant Ultimate Strength Design Method for Concrete-Filled Steel Structures", NUCE Research Report, Nagoya University, Japan.
4. M. P. Collins, D. Mitchell and J. G. MacGregor(1993), "Structural Design Consideration for High Strength Concrete", Concrete International, ACI, Vol. 15(5), pp.27-34.
5. N. Kish and W. F. Chen(1990), "Moment-rotation Relations of Semi-Rigid Connections with Angles", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116(7), pp1813-1834.
6. S. C. W. Lau and G. J. Hancock(1989), "Inelastic Buckling Analyses of Beams, Columns and Plates Using the Spline Finite Strip Method", Thin-Walled Structures, Vol. 7, pp213-238.
7. W. F. Chen, and E. M. Lui(1996), "Structural Stability", Elsevier Pty. Ltd.
8. W. Ramberg and W. R. Osgood(1943). "Description of Stress-strain Curves by Three-parameters", Technical Note, NACA, No. 902.
9. Y. B. Kwon(1994), "Inelastic Buckling Analyses of Thin-Walled Sections Using Semi-analytical Finite Strip Method", Journal of Korean Society of Steel Construction, pp181-191.