

냉간성형강재를 이용한 합성보의 구조적인 거동

The Structural Behavior of Cold-Formed Steel Composite Beams

양구록*
Yang, Gu-Rok

송준엽**
Song, Jun-Yeup

권영봉***
Kwon, Young-Bong

ABSTRACT

The behavior of composite beams, which are composed of cold-formed steel sheeting and normal strength concrete, have been studied. An analytical method has been developed to trace the nonlinear behavior of composite beams. The nonlinear material properties of steel sheeting, reinforcing steel bar and concrete have been included in the analysis. The nonlinear moment-curvature relation of the composite beam has been described using a cross section analysis method and a simple power model, separately. The load-deflection behavior of the beams has been simulated by step-by-step numerical integration method and is compared with test results.

1. 서론

최근들어 슬래브 시공시 데크 플레이트를 이용하는 사례가 증가하고 있다. 냉간성형강재로 제작하는 데크 플레이트를 합성 슬래브에 이용할 경우 현장에서의 작업이 용이하므로 시공기간을 줄일 수 있고, 안전한 작업을 할 수 있다. 그리고, 냉간성형강재로 인해 슬래브에 추가적인 보강이 필요 없으므로 재료비를 줄일 수 있으며, 일반 콘크리트 슬래브에 비해 높이를 줄일 수 있으므로, 건물의 전체 높이가 줄어 들고 기초에 가해지는 하중의 부담도 줄일 수 있다.

합성 슬래브가 가지는 이점은 보에서도 얻을 수 있으므로 여러 학자들(Uy and Bradford⁽¹⁾, Oehlers et al.⁽²⁾)에 의해 실험과 해석이 수행되고 있다. 옆면과 아랫면에 리브를 가지는 합성보는 합성슬래브에서 처럼 강도와 강성의 증가가 있으며, 전단 지간비를 줄일 수 있는 이점이 있다.

본 논문에서는 재료의 비선형적 특징을 포함하는 모멘트-곡률 관계 해석방법과, 단계별 수치적분법으로 하중-처짐을 구할 수 있는 해석기법을 개발하여 실험결과와 비교해 보았다.

* 영남대학교 부설 공업기술연구소 연구원

** 영남대학교 토목공학과 강사

*** 영남대학교 토목공학과 부교수

2. 단면형상과 재료적인 특성

2.1 단면형상

합성보의 단면형상은 그림 1과 같으며, 리브 옆면과 아랫면에 있는 리브의 모양과 강재의 두께가 주요 변수이다. 표 1에 나와 있는 시편명에서 첫 번째 글자인 R과 T는 사각형과 삼각형 리브형상을 의미하며, 뒤의 숫자 12와 16은 강재의 두께인 1.2mm와 1.6mm를 의미한다.

표 1. 합성보의 명칭, 재원 및 재료적 특성

시편	폭 (cm)	높이 (cm)	두께 (cm)	길이 (cm)	리브형상	콘크리트 압축강도 (kg/cm ²)	강재 항복응력 (kg/cm ²)	인장철근 항복응력 (kg/cm ²)
R12	18	25	0.12	220	사각형	245	2600	3500
R16	18	25	0.16	220	사각형	245	2500	3500
T12	18	25	0.12	220	삼각형	245	2600	3500
T16	18	25	0.16	220	삼각형	245	2500	3500

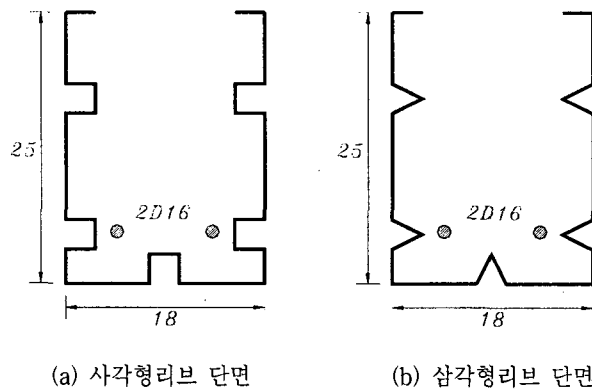


그림 1. 시험단면의 형상

2.2 냉간성형강재와 철근의 응력-변형률 모델

냉간성형강재의 응력-변형률 곡선은 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 직선비례 구간까지는 탄성이었다가 소성 구간이 진전됨에 따라 비선형이 되는데 이것은 냉간성형에 따른 소성변형의 영향으로 항복강도 및 잔류응력의 분포가 서로 다르기 때문이다. 이러한 비선형적 거동을 보이는 냉간성형강재의 응력-변형률 모델은 Ramberg-Osgood⁽³⁾이 개발한 식을 기본으로 하며 식 (1)과 같다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_p \left(\frac{\sigma}{\sigma_p} \right)^n \quad (1)$$

여기서, E 는 탄성계수, ϵ_p 는 0.2%의 변형률, σ_p 는 proof stress이며 n 은 응력-변형률 곡선상에서 결정되어야 하는 변수로 본실험에 사용한 냉간성형강재의 경우 25로 결정하였다.

철근의 응력-변형률 모델은 흔히 사용되는 탄성-완전 소성모델을 사용하였으며, 인장축과 압축축에 같은 항복응력과 탄성계수를 적용한다.

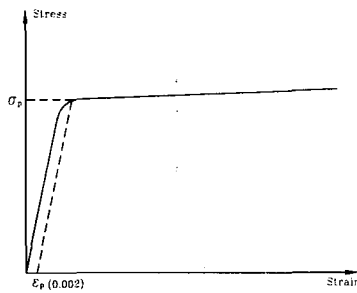
2.3 콘크리트의 응력-변형률 모델

콘크리트의 응력-변형률 모델에는 여러 가지가 있으나, 보통 강도의 콘크리트에서 비교적 잘 맞는 Hognestad식⁽⁴⁾을 이용하였으며, 식 (2)와 같다. 그림 2(b)에서처럼 극한강도의 0.85배까지는 포물선 구간이며 그 후부터 변형률이 0.0038에 도달할 때까지는 직선구간이다.

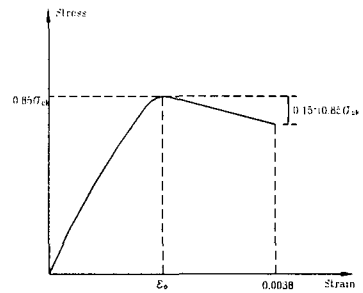
$$\sigma = 0.85\sigma_{ck} \left[\frac{2\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \epsilon_0 = \frac{2 \times 0.85\sigma_{ck}}{E_c}$$

$$\epsilon_u = 0.0038$$



(a)강재의 응력-변형률 곡선



(b)콘크리트의 응력-변형률 곡선

그림 2. 응력-변형률 곡선

콘크리트의 인장응력은 Lodygowski와 Szumigala⁽⁵⁾가 제안한 식 (3a), (3b), (3c)를 사용하였다.

$$\sigma = \frac{\epsilon \sigma_t}{\epsilon_r} \quad 0 < \epsilon \leq \epsilon_r \quad \epsilon_r = 0.1\% \quad (3a)$$

$$\sigma = \frac{(\epsilon + \epsilon_a) \sigma_t}{\epsilon_r - \epsilon_a} \quad \epsilon_r < \epsilon \leq \epsilon_a \quad \epsilon_a = 0.5\% \quad (3b)$$

$$\sigma = 0 \quad \epsilon > \epsilon_a \quad (3c)$$

여기서, σ_t 는 인장응력, ϵ_r 은 최대 인장응력일때의 변형률 그리고, ϵ_a 는 인장응력이 0일 때의 변형률을 나타낸다.

3. 합성보의 거동

3.1 합성보의 모멘트-곡률 관계

합성보의 모멘트-곡률 관계를 구하기 위해 단면분할법과 Power Model을 사용하였으며, 각각의 해석 결과는 실험 결과와 비교 검증하여 보았다.

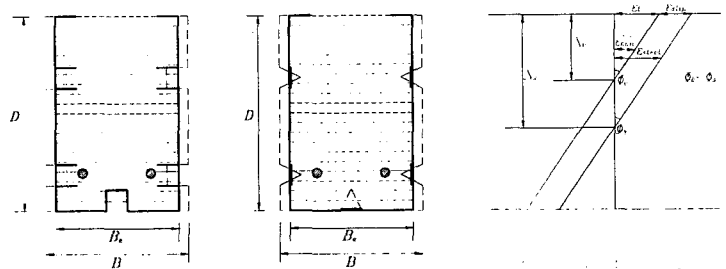
(1) 단면분할법

합성보 옆면과 아랫면에는 사각형·삼각형 리브가 있는데, 이것은 강재와 콘크리트의 슬립을 방지하기 위한 것이나 해석시에는 단면 형상이 복잡해지므로 유효폭과 유효두께로 단면을 이상화시켜 주었으며 식 (4), (5)와 같다. 그림 3(c)와 같이 변형률을 선형으로 가정하였으며, 강재와 콘크리트 사이에서 슬립이 일어나면 두 재료의 중립축이 일치하지 않으므로, 슬립변형계수를 이용하여 슬립의 영향을 고려하여 주었다.

$$B_e = B \left(1 - \frac{A_{voids}}{BD} \right) \quad (4)$$

$$t_e = \frac{st}{2D + B_e} \quad (5)$$

여기서, s : 단면 둘레



(a) 사각형리브 단면 (b) 삼각형리브 단면 (c) 변형률 분포

그림 3. 등가사각형단면으로 이상화한 형상

단면분할법에 의한 해석과정은 아래와 같다.

- ① 연단에서의 변형률 ϵ_1 를 가정한다.
- ② 중립축 N_c 를 가정하고 각 층에서 변형률 분포를 계산한다. 곡률은 연단변형률과 중립축을 이용하여 식 (6)과 같이 계산한다.

$$\phi = \frac{\epsilon_1}{N_c} \quad (6)$$

- ③ 냉간성형강재와 콘크리트 사이의 슬립을 고려하기 위해 슬립변형(slip strain)을 식 (7)과 같이 계산한다.

$$\epsilon_{slip} = \delta \phi N_s \quad (7)$$

- 여기서, δ 는 슬립변형계수(slip strain parameter)이며, N_s 는 강제단면만의 증립축이다.
- ④ 냉간성형강재, 철근, 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 이용하여 각 층에서의 응력을 계산한다. 냉간성형강재의 응력-변형률 곡선은 Ramberg-Osgood식을 이용하고, 철근의 경우는 완전 탄-소성식을, 콘크리트는 Hognestad식을 이용한다.
 - ⑤ 모든 층에서의 내력을 합한다.
 - ⑥ 증립축에 대한 내력의 합이 0에 수렴하도록 이분법을 이용하여 증립축을 구한다.
 - ⑦ 수렴조건을 만족하는 경우 모든 층에서의 모멘트를 합하여 단면의 휨모멘트를 구한다.
 - ⑧ 단면의 연단변형률을 증가시켜 ①~⑦과정을 반복한다.

위의 과정을 통해 얻은 해석결과를 실험결과와 함께 그림 4, 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 단면분할법에 의한 해석 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

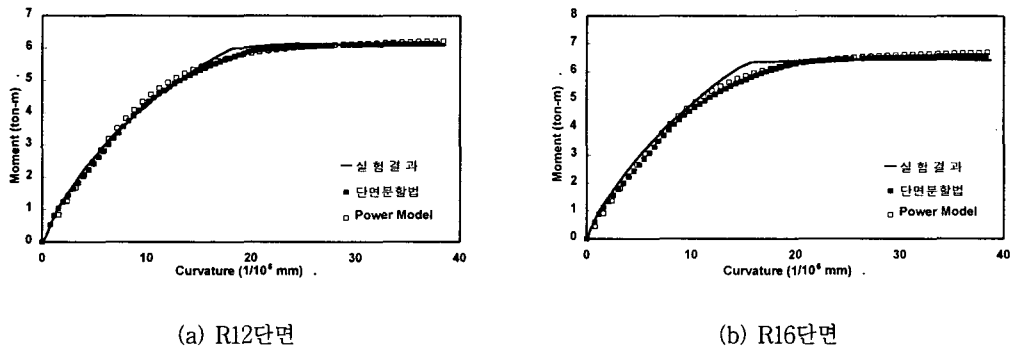


그림 4. 실험결과(사각형리브 단면)와 해석결과의 비교

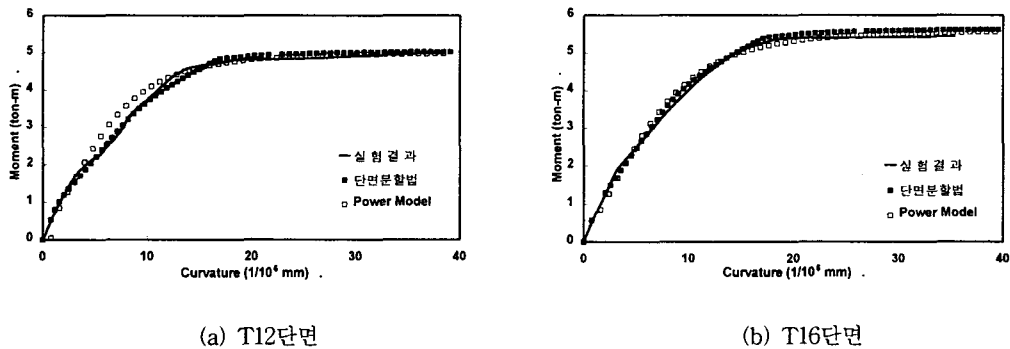


그림 5. 실험결과(삼각형리브 단면)와 해석결과의 비교

(2) Power Model

Power Model은 보와 기둥의 연결부 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 모멘트-회전각 관계를 공식화하기 위한 방법이다⁽⁶⁾. Power Model외에도 Cubic-B-spline Model, Polynomial Model, Exponential Mode 등이 있으나, 적은 양의 실험 결과로도 충분히 정확한 곡선을 그릴 수 있는 Power Model을 합성보의 모멘트-곡

를 관계를 공식화하는데 사용해 보았다. Power Model은 초기강도, 극한모멘트, 형상변수의 3가지 변수를 통해 식 (8)과 같은 모멘트-곡률 관계 공식을 구할 수 있다. 초기강도는 모멘트-곡률 관계의 기울기인 R_{ki} 로 대체할 수 있으며, 극한모멘트는 소성모멘트인 M_p 로 대체할 수 있다.

$$M = \frac{R_{ki} \cdot \Phi}{\left\{ 1 + \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } R_{ki} &= \frac{a_0 M_{pc}}{\Phi_y} \\ \Phi_0 &= \frac{M_p}{R_{ki}} \end{aligned}$$

모멘트-곡률 관계의 기울기인 R_{ki} 는 M_p , a_{00} , Φ_y 로 이루어져 있다. 소성모멘트는 그림 6과 같은 응력 분포로 가정하여 구할 수 있으며 식 (9)와 같다. 그리고, 콘크리트충진 강관기둥의 모멘트-곡률 관계를 예측하기 위해 Ge와 Usami가 제안한 모멘트-곡률 관계식⁽⁷⁾으로부터 a_{00} 를 구할 수 있는데, 원래 a_{00} 는 축력과 폭-두께비로 구성되어 있으므로 축력이 0인 합성보에 맞게 수정하면 식 (10)과 같다. Φ_y 는 강재가 항복했을 때의 곡률로서 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_p &= t_e d_n^2 \sigma_y + \frac{1}{2} k_1 d_n^2 (B_e - 2t_e) \sigma_{ck} + 2 B_r t_e \left(d_n - \frac{t_e}{2} \right) \sigma_y + t_e (D - d_n)^2 \sigma_y \\ &+ \frac{2 \pi d_c^2}{4} \left(d_n - c_c - \frac{d_c}{2} \right) \sigma_{b,y} + t_e (B_e - 2t_e) \left(D - d_n - \frac{t_e}{2} \right) \sigma_y \\ &+ \frac{2 \pi d_t^2}{4} \left(D - d_n - c_t - \frac{d_t}{2} \right) \sigma_{b,y} \end{aligned} \quad (9)$$

$$a_{00} = \frac{0.128 R + 0.281}{0.5} \quad (10)$$

$$\Phi_y = \frac{\sigma_y}{E_s N_s} \quad (11)$$

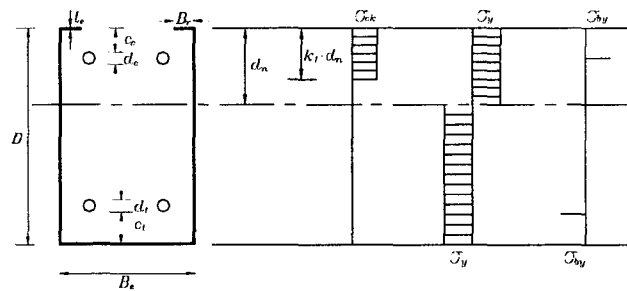


그림 6 소성모멘트 계산을 위한 응력 분포

단면분할법에서 처짐 계산을 간단하게 하기 위해 유효폭과 유효두께로 단면을 이상화시켰으며, a_{00} 는 탄성좌굴해석을 수행하여 직접 좌굴응력을 구하여 폭-두께비를 계산하였다. 실험 결과와 Power Model의 해석 결과를 비교하면 형상 변수 n 이 2.8일 때 가장 잘 일치함을 알 수 있으며, 해석결과는 단면분할법의 해석 결과와 함께 그림 4, 5에 나타내었다.

3.2 합성보의 하중-처짐 관계

하중-처짐 관계를 구하기 위해서 사용한 수치해석법에는 Newmark법과 단계별 수치적분법이 있다⁽⁸⁾. Newmark법은 하중조절법이기 때문에 극한하중 이후의 거동은 예측할 수 없다. 따라서 극한하중 이후의 거동을 예측할 수 있는 변위조절법인 단계별 수치적분법을 이용하여야 한다. 합성보의 하중-처짐 관계를 단계별 수치적분법에 의해 구하기 위해서는 중간 계산 과정에서 모멘트-곡률 관계 공식이 필요하므로, 앞절에서 언급한 Power Model을 하중-처짐의 수치해석에 적용해 보았다. 단계별 수치적분법의 계산과정은 길이 방향으로 합성보를 나누고 나누어진 점(station) 중 첫 번째 점의 처짐을 가정하여, 다음 점으로 계속해서 처짐을 계산해 가는 방식으로 첫 번째로 가정한 처짐은 반복계산 동안 변하지 않고 각각의 처짐에 대한 힘을 구하면 된다. 단계별 수치적분법의 자세한 계산과정은 아래와 같다.

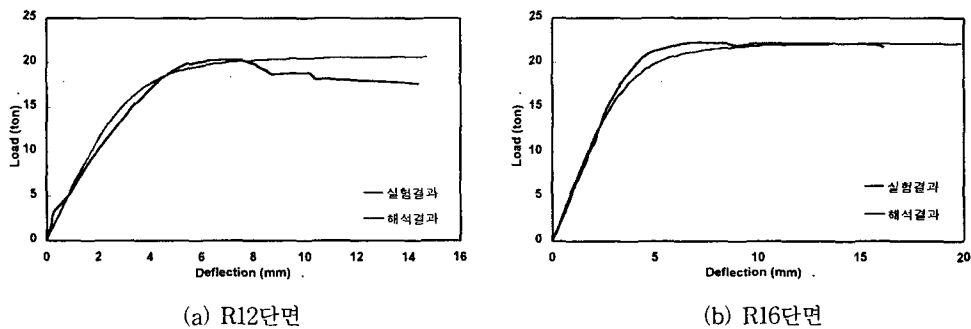


그림 7. 실험결과(사각형리브 단면)와 해석결과의 비교

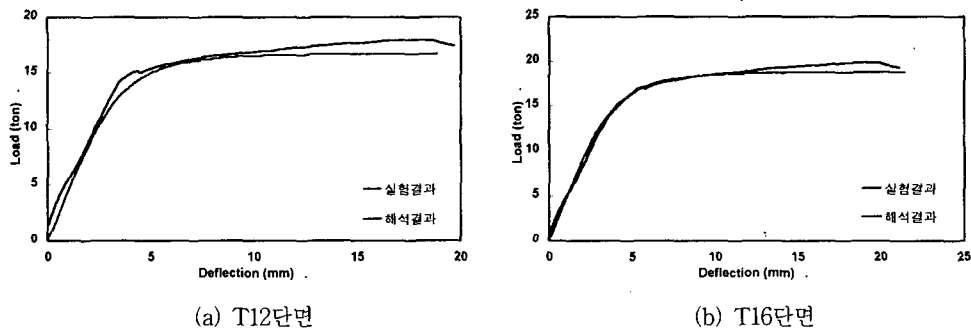


그림 8. 실험결과(삼각형리브 단면)와 해석결과의 비교

- ① station1에서의 처짐을 임의로 가정한다.
- ② 가정된 하중에 대한 station1의 모멘트를 계산한다.
- ③ 이미 알고 있는 모멘트-곡률 관계를 이용하여 station1에서의 곡률을 구한다.

④ 두 번째 station의 처짐은 아래의 식을 이용하여 계산한다.

$$y_s = -\phi_{s-1} (\Delta x)^2 + 2y_{s-1} - y_{s-2} \quad (12)$$

여기서, y_s : station s에서의 처짐

ϕ_{s-1} : station (s-1)에서의 곡률

Δx : station사이의 거리

- ⑤ 합성보의 마지막 station까지 곡률과 처짐을 계산한다.
- ⑥ 만약에 마지막 station에서의 처짐이 0이 아니면, 하중을 늘려 모멘트를 계산한다.
- ⑦ ③~⑥과정을 반복하여 마지막 station에서의 처짐이 0에 수렴하도록 한다.
- ⑧ ①~⑦과정을 반복하여 필요한 하중-처짐 관계를 구한다.

하중-처짐 관계를 수치해석적으로 구한 결과와 실험결과를 그림 7, 8에서 비교해 보았다. 그림에서 볼 수 있듯이 해석결과와 실험결과가 비교적 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 합성보의 모멘트-곡률 관계를 예측할 수 있는 단면분할법을 개발하였다. 이방법은 냉간성형강재, 철근과 콘크리트의 재료비선형을 포함할 수 있으며, 냉간성형강재와 콘크리트 사이의 슬립의 영향도 고려할 수 있다. Power Model은 초기강도, 형상변수와 소성모멘트의 3가지 변수를 사용하여 간단하게 합성보의 모멘트-곡률 관계를 공식화할 수 있으며 이 결과를 하중-처짐 관계에 쉽게 이용할 수 있었으며, 실험 결과와도 잘 일치하였다. 합성보의 하중-처짐 관계를 해석하기 위해 사용한 단계별 수치적분법은 실험결과와 비교하여 신뢰할 만한 결과를 도출 할 수 있었다.

참고문헌

1. Uy B. and Bradford M. A., "Ductility of Profiled Composite Beams. Part I: Experimental Study", *Journal of Structural Engineering*. Vol. 121, No. 5, 1995, pp.876-882
2. Oehlers, D. J., "Composite Profiled Beams", *J. Struct. Engrg., ASCE*. Vol. 119, No. 4, 1993, pp.1085-1100
3. Ge H. and Usami T., Development of Earthquake Resistant Ultimate Strength Design Method for Concrete-Filled Steel Structures, NUCE Research Report, Nagoya University, Japan, 1994
4. Ramberg W. and Osgood W. R. "Description of Stress-Strain Curves by Three-Parameters", Technical Note, NACA, No. 902, 1943
5. Lodygowski T. and Szumigala M. "Engineering models for numerical analysis of composite bending members." *Mech. of Struct. and Mach.*, Vol. 20, No. 3, 1992, pp.363-380
6. Kish N. and Chen W. F., "Moment-rotation Relations of Semi-Rigid Connections with Angles", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 116(7), 1990, pp.1813-1834
7. Hognestad E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members", *University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin Series No. 399*, 1951, pp.128
8. Chen W. F. and Lui E. M., *Structural Stability*, Elsevier, Ltd., 1996