

커버플레이트의 온도변형을 이용한 강구조물의 다단계 프리스트레싱

Multi-Stepwise Prestressing Method of Steel Structure Using Thermal-Expanded Cover-plate

김 상 호¹⁾ · 안 진 희^{2)†} · 김 준 환³⁾ · 김 형 주⁴⁾
Kim, Sang Hyo · Ahn, Jin Hee · Kim, Jun Hwan · Kim, Hyung Ju

요 약 : 본 연구는 압연형강이나 조립형강과 같은 강구조물의 지간증가나 하중 증가로 큰 휨강성이 필요한 경우 상부플랜지나 하부플랜지에 부착하여 구조물의 하중저항성을 향상시켜주는 커버플레이트의 온도변형을 이용한 프리스트레싱 도입 방법의 개발에 관한 것으로 다단계 온도변형이 도입된 커버플레이트를 프리스트레싱 도입을 위한 구조물에 강결한 후 커버플레이트의 수축으로 발생하는 다단계 수축력을 프리스트레싱력으로 이용하는 방법이다. 본 연구에서는 온도변형에 의하여 구조물에 도입되는 프리스트레싱력의 이론적 연구와 다단계 온도변형을 이용한 다단계 프리스트레싱 기법의 도입을 위하여 커버플레이트의 다단계 온도분포에 대한 열전달 이론해의 제시와 H형강을 대상으로 다단계 온도변형에 의한 다단계 프리스트레스 도입 효과를 분석하였다.

ABSTRACT : This study investigates developments in a prestressing method using the thermal-expanded cover-plates that increases the load-carrying capacity of structures by installing it on upper or lower flanges in case that huge flexural stiffness according to the increase in span length or load are required of steel structure, such as rolled H-beam or built-up beam. This method applies multi-stepwise contraction forces generated by the contraction of cover plates as prestressing forces after joining the cover plate applied by multi-stepwise thermal expansion that was applied to induce prestressing to structures. To perform a theoretical investigation of the prestressing force applied to a structure due to the thermal expansion and induce a multi-stepwise prestressing method using multi-stepwise thermal distribution, this study proposes a theoretical heat transfer solution for the multi-stepwise thermal distribution of cover plates and analyzes the effect of a multi-stepwise prestressing method using the multi-stepwise thermal expansion

핵심용어 : 커버플레이트, 강구조, 온도변형, 프리스트레스, 열전달

KEYWORDS : cover-plate, steel structure, thermal expansion, prestress, heat transfer

1. 서론

프리스트레스(Prestress)는 구조물의 하중저항 성능이나 단면효율의 증가를 위한 것으로 지금까지 주로 교량, 포장, 말뚝, 침목과 같이 콘크리트를 이용한 구조물이나 부재에 사용되어 왔다. 콘크리트 구조물의 주요 프리스트레스 도입 방법은 프리스트레싱 강연선과 정착장치를 이용하여 인장에 약한 콘크리트에 직접 압축력을 도입하는 것으로 작용하중에 의하여 콘크리트

트에 인장응력이 발생하지 않도록 큰 압축응력을 도입하여야 한다. 강구조물의 프리스트레스 도입은 콘크리트 구조물과 비교하여 일반적이지는 않으나 콘크리트 구조물과 동일한 방법으로 프리스트레싱 강연선을 이용하거나, 구조물에 직접 변형을 도입한 후 구조물의 변형을 구속하여 프리스트레스를 도입할 수 있다. 프리스트레싱 강연선을 이용한 강구조물의 프리스트레싱에 관한 연구는 김기봉(1998), 박용결(2000) 등이 강연선을 이용하여 프리스트레스가 도입된 강-콘크리트 합성거더

1) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사(sanghyo@yonsei.ac.kr)
2) 교신저자, 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
(Tel. 02-2123-2804, Fax. 02-364-5300, E-mail : palanorange@yonsei.ac.kr)
3) 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정(junnani@yonsei.ac.kr)
4) 학생회원, 연세대학교 대학원 토목공학과 석사과정(hj994@hotmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

교의 휨 보강효과에 대하여 분석하였으며, 정승인(2002) 등은 강연선을 이용하여 프리스트레스가 도입된 강합성형교의 극한 상태 휨거동 해석을 위한 휨 거동해석법을 제시하였다. 구조물에 변형을 이용한 강구조물 프리스트레스 도입에 관한 연구로 임성순(2006) 등은 H형강에 직접 하중을 재하한 후 변형된 H형강 하부에 휨강성이 다른 H형강이나 커버플레이트를 고장력 볼트어음이나 용접으로 일체화한 후 재하된 하중을 제거하여 프리스트레스를 도입한 H형강의 휨 거동을 실험적으로 분석하였다.

강연선을 이용한 프리스트레스 도입방법은 강연선의 긴장을 통한 프리스트레스 도입으로 구조물의 내하성능을 향상시킬 수 있으며 시공 또한 편리하지만(Shiming 등, 2005; Wojciech 등, 2006), 단면강성에 대한 보강이 없으므로 프리스트레싱에 의하여 구조물의 지간 등이 개선되더라도 처짐이나 진동이 커서 사용성에 한계가 있으며, 강연선과 구조물의 정착부에 과도한 응력집중이 발생할 수 있다. 또한 구조물의 변형을 이용한 프리스트레스 방법은 H형강이나 커버플레이트의 부착으로 내하성능과 단면강성을 증가 시킬수 있으나 구조물의 높이나 지간이 길어질 경우 프리스트레싱 도입을 위한 하중재하의 어려움이 발생할 수 있다.

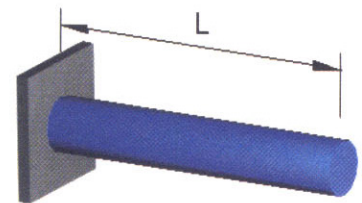
따라서 본 연구는 온도변형이 도입된 커버플레이트를 강구조물에 부착하여 변형의 구속으로 발생하는 커버플레이트의 압축력을 구조물의 거동이나 지간개선에 필요한 프리스트레스로 도입하는 방법에 대하여 이론적 연구를 수행하였으며, 다단계 온도변형을 이용한 다단계 프리스트레싱 기법 도입을 위하여 커버플레이트의 다단계 온도분포에 대한 열전달 이론해의 제시와 H형강을 대상으로 다단계 온도변형에 의한 다단계 프리스트레스 도입 효과를 분석하였다.

2. 온도변형이 도입된 커버플레이트에 의한 프리스트레싱

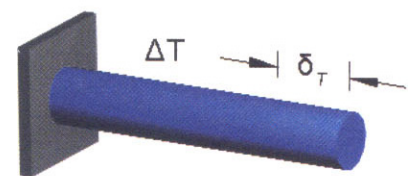
2.1 온도변형

온도변화(thermal variation)는 구조용 재료의 팽창이나 수축에 따라 온도변형(thermal strain)과 온도응력(thermal stress)을 발생시킨다. 그림 1과 같이 균일한 온도변화를 받는 균일단면 봉의 경우 식 (1)과 같이 온도변화(ΔT)에 비례하는 열변형(ϵ_T)이 발생하게 되며, 온도변화에 따라 식 (2)와 같은 온도-변위(δ_T)가 발생하게 된다. 따라서 강봉에는 온도변형에 대한 구속조건이 없으므로 온도팽창이나 수축에 의하여 어떠한 응력도 발생하지 않는다. 하지만 그림 2와 같이 강봉의 양단이 고정된 경우 온도변화에 따른 변위의 구속으로 강봉에

는 온도응력이 작용하게 된다. 양단이 구속된 강봉의 온도변화에 의하여 강봉에 작용하는 온도하중(P) 및 온도응력(f_F)은 평형방정식과 적합방정식 그리고 변위관계식을 이용하여 식 (3), 식 (4)로 나타낼 수 있다. 즉, 온도변화에 의하여 강봉에 도입되는 온도하중은 강봉의 길이(L)와 무관하고, 응력은 길이와 단면적에 관계없이 결정되며, 강봉에는 길이방향의 변형을 변화없이 길이방향의 응력만 존재하게 된다. 이와 같이 온도변화에 의한 변형의 구속에 따른 온도응력이 발생하게 되므로 이를 구조물에 적용할 경우 구조물의 거동이나 단면개선을 위한 프리스트레스로 도입할 수 있게 된다. 여기서 α 는 강봉의 열팽창계수(coefficient of thermal expansion)이며, ΔT 는 강봉의 온도변화이며, A 는 강봉의 단면적, E 는 강봉의 탄성계수이다.



(a) 온도변화가 없는 균일단면 강봉



(b) 균일한 온도변화가 있는 균일단면 강봉

그림 1. 온도변화에 따른 강봉의 길이변화

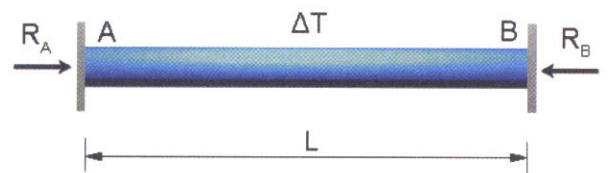


그림 2. 양단고정된 균일단면봉의 온도변화

$$\epsilon_T = \alpha(\Delta T) \quad (1)$$

$$\delta_T = \epsilon_T L = \alpha(\Delta T)L \quad (2)$$

$$P = R_A = R_B = EA\alpha(\Delta T) \quad (3)$$

$$f_F = \frac{P}{A} = \frac{R_A}{A} = \frac{R_B}{A} = E\alpha(\Delta T) \quad (4)$$

2.2 온도변형이 도입된 커버플레이트

커버플레이트(cover plate)는 압연형강이나 조립 H형강과 같은 강구조물이 시간증가나 하중의 증가로 큰 휨강성이 필요할 경우 그림 3과 같이 상부 플랜지나 하부플랜지에 부착하여 구조물의 하중 저항성을 향상시켜주는 강판을 말한다. 커버플레이트는 압연 H형강이나 조립 H형강에 용접이나 볼트로 접합되며, 기존 압연형강에 커버플레이트를 부착하여 사용할 경우 제한된 설계조건에서 시공성 및 가공성이 우수한 부재로의 사용이 가능하며, 플레이트 거더와 같은 조립형강에 사용할 경우 내하능이 떨어진 강교의 보강을 위한 부재로서 사용할 수 있다. 이러한 커버플레이트는 단순히 단면만을 증가시켜 강구조물에 작용하는 하중에 대하여 단면저항 성능만을 높여주는 것이므로 압연 H형강이나 조립 H형강과 같은 강구조물에 커버플레이트를 이용하여 프리스트레싱을 도입할 수 있다면 커버플레이트의 단면증가와 동시에 프리스트레싱 도입효과를 기대할 수 있으므로 강구조물이 가지는 하중저항성을 더욱더 향상시키거나 강구조물의 단면을 감소시킬 수 있다.

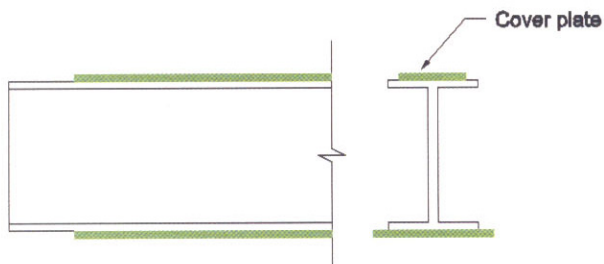


그림 3. 커버플레이트 보

그림 4와 같이 길이방향 팽창변형이 도입된 커버플레이트로 강구조물을 구속할 경우 팽창된 커버플레이트의 구속조건에 따라 강구조물에는 팽창된 강판의 수축변형에 의하여 발생하는 압축력이 도입된다. 따라서 강구조물에는 팽창된 강판의 수축에 의하여 최종적으로 압축력과 중립축을 기준으로 강판 부착 위치 만큼의 편심에 의한 편심모멘트가 작용하게 되므로, 압연 H형강과 같은 강구조물에는 그림 5와 같은 응력이 도입되게 된다.

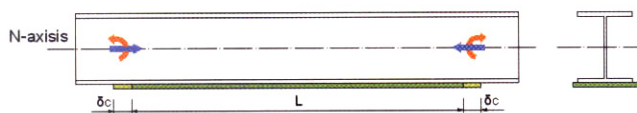


그림 4. 변형이 도입된 커버플레이트의 보

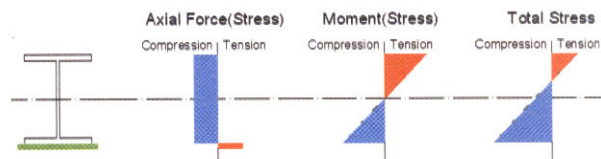


그림 5. 커버플레이트의 편심압축력에 의한 H형강의 도입응력

프리스트레싱 도입을 위한 커버플레이트의 길이방향 변형을 발생시키기 위해서는 프리스트레싱 강연선의 긴장법과 동일하게 물리적으로 강한 힘을 이용하여 커버플레이트에 인위적인 변형을 유도한 후 변위를 구속하여 프리스트레싱을 도입할 수 있으나 강연선과 달리 커버플레이트는 변형을 도입하기 위한 장비가 현재 존재하지 않으며, 인위적으로 변형을 도입할 수 있는 장비가 있다 하더라도 커버플레이트에 인위적인 도구를 부착하여 직접 변형을 도입해야 함으로써 커버플레이트의 손상이 발생하거나 프리스트레싱 도입에 물리적으로나 경제적으로 과도한 투자가 필요할 것이다. 하지만 식 (2)와 같은 온도-변위관계에 따라 강재의 온도변형을 이용하여 커버플레이트의 길이방향 변형을 유도한다고 하면 온도 도입을 위한 간단한 도구만으로 손쉽게 커버플레이트의 변형을 유도할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 프리스트레싱 도입을 위한 커버플레이트의 변형도입 방법으로 커버플레이트의 온도변화에 의하여 발생하는 온도변형을 이용하였다.

2.3 온도변형에 의한 프리스트레싱

커버플레이트의 변형에 의하여 강구조물에 도입되는 프리스트레싱은 그림 2의 양단고정된 균일단면 강봉의 온도하중 및 온도응력과 동일한 방법으로 계산될 수 있다.

커버플레이트의 변형에 의하여 구조물에 도입되는 응력은 평형방정식, 적합조건식 및 변위관계식을 이용하여 계산할 수 있다. 그림 6은 변형이 도입된 커버플레이트의 응력해석을 위하여 팽창변형이 도입된 커버플레이트와 응력이 도입된 최종상태의 커버플레이트의 하중변위 관계를 나타낸 것으로, 커버플레이트의 팽창변형을 δ_c 라고 하고, 커버플레이트의 양단을 구속한 후 발생하는 커버플레이트의 인장력과 강구조물의 압축력을 P_C , P_G 라고 하면 하중-변위관계식에 따라 커버플레이트의 수축 변형량 δ_{CF} 와 강구조물의 수축량 δ_G 는 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$\delta_{CF} = \frac{P_C L}{2EA_C} \tag{5}$$

$$\delta_G = \frac{P_G L}{2EA_G} + \frac{P_G e L}{2EI_G} y \quad (6)$$

따라서 최종변형량 δ 는 커버플레이트와 강구조물 모두 같아야 하므로 식 (7)과 같은 적합조건식으로 나타낼 수 있다. 커버플레이트의 팽창변형량 δ_C 를 식 (8)과 같은 온도변화에 의한 식으로 가정하면, 적합조건식 식 (7)은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \delta_C - \delta_{CF} = \delta_G \quad (7)$$

$$\delta_C = \frac{\alpha \Delta T L}{2} \quad (8)$$

$$\frac{\alpha \Delta T L}{2} - \frac{P_C L}{2EA_C} = \frac{P_G L}{2EA_G} + \frac{P_G e L}{2EI_G} y \quad (9)$$

최종변형량이 발생한 후 커버플레이트의 인장력 P_C 와 강구조물의 압축력 P_G 가 같으므로 식(9)의 적합조건식은 식 (10)과 같이 커버플레이트에 작용하는 인장력과 강구조물에 작용하는 압축력으로 나타낼 수 있다. 압연 H형강의 경우 형강의 하연에서 중립축까지의 거리 y 가 $H/2$ 이므로 식 (10)은 식 (11)과 같다. 따라서 온도변형에 의하여 강구조물 상연과 하연에 도입되는 프리스트레스 f_{SU} , f_{SL} 은 식 (12), 식 (13)과 같고, 최종 변형량 δ 는 식 (14)와 같게 된다.

온도변형에 의하여 발생하는 프리스트레싱력의 식 (10)을 커버플레이트의 온도변형과 관련된 변수들로 정리하면 식 (15)와같이 나타낼 수 있다. 따라서 커버플레이트 도입 프리스트레싱력은 온도변화와 단면적에 비례함을 알 수 있다. 또한, 프리스트레싱력이 식 (16)과 같이 프리스트레스 도입 강구조물의 단면강성 및 단면적에 비례하므로 단면강성이 크거나 단면적이 큰 구조물에 도입할 경우 도입 프리스트레싱력이 커짐을 알 수 있다.

$$P = P_C = P_G = \frac{\alpha (\Delta T) E A_C A_G I_G}{A_G I_G + A_C I_G + A_C A_G e y} \quad (10)$$

$$P_C = P_G = \frac{2\alpha (\Delta T) E A_C A_G I_G}{2A_G I_G + 2A_C I_G + A_C A_G e H} \quad (11)$$

$$f_{SL} = \frac{P}{A_G} - \frac{P e}{I_G} y \quad (12)$$

$$f_{SU} = \frac{P}{A_G} + \frac{P e}{I_G} y \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\alpha (\Delta T) A_C L (I_G + A_G e y)}{2(A_G I_G + A_C I_G + A_C A_G e y)} \quad (14)$$

$$P = \alpha (\Delta T) E A_C \frac{1}{1 + \frac{A_C}{A_G} + \frac{A_C e y}{I_G}} \quad (15)$$

$$P \propto \left(\frac{1}{1 + \frac{A_C}{A_G} + \frac{A_C e y}{I_G}} \right) \quad (16)$$

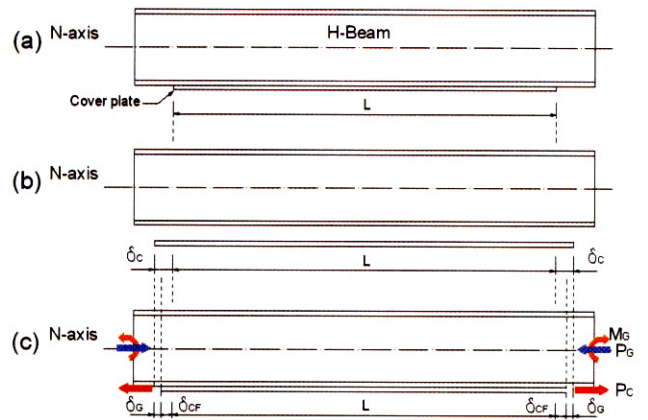


그림 6. 변형이 도입된 커버플레이트

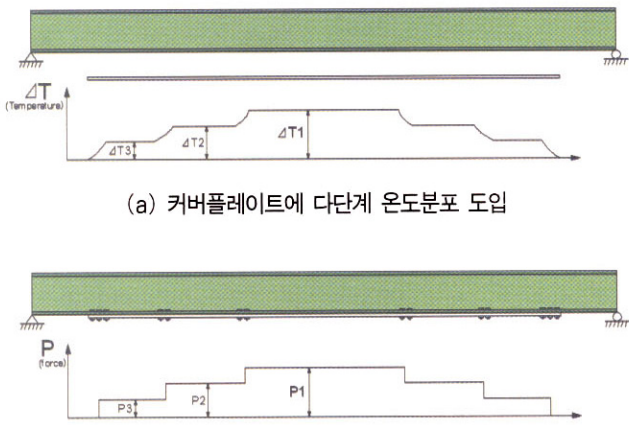
여기서, P 는 프리스트레싱력, E 는 강재의 탄성계수, A_C 는 커버플레이트의 단면적, A_G 는 강구조물의 단면적, I_G 는 강구조물의 단면 2차모멘트, e 는 강구조물에 도입되는 축하중의 편심거리, H 는 강구조물의 높이, y 는 강구조물 하연에서 중립축까지의 거리이다.

3. 다단계 온도분포를 이용한 다단계 프리스트레싱

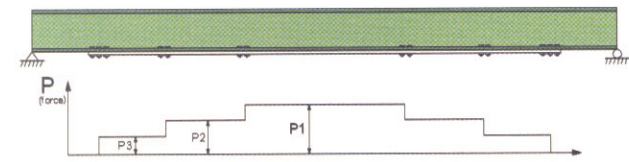
커버플레이트의 온도변형을 이용한 프리스트레싱은 강재의 열변형 특성에 따라 발생하는 열응력을 이용하므로 그림 7과같이 커버플레이트에 다단계 온도분포에 의하여 발생하는 다단계 열변형 특성을 이용할 경우 구조물의 거동특성에 따라 필요한 프리스트레싱력의 다단계 도입이 가능하다. 또한 다단계 프리스트레싱에 따라 고정장치부가 여러곳에 분산되게 되므로 고정장치부에서 발생할 수 있는 응력집중의 문제를 최소화 할 수 있다.

다단계 온도분포에 의한 다단계 프리스트레싱의 도입을 위해서 커버플레이트는 직접적으로 커버플레이트를 가열하는 가열 구간과 직접적인 가열이 없는 고정장치부로 구분된다. 고정장치부는 직접적인 가열을 유도하지 않으나, 가열구간에 의한 열전달로 비선형 온도분포가 발생하게 된다. 따라서 커버플레이

트의 열변형에 의한 다단계 프리스트레싱력의 결정 및 커버플레이트의 설계를 위해서는 다단계 온도분포 도입에 따른 커버플레이트의 온도분포의 결정이 매우 중요하다.



(a) 커버플레이트에 다단계 온도분포 도입



(b) 다단계 온도분포에 의한 다단계 프리스트레싱
그림 7. 다단계 온도분포에 의한 다단계 프리스트레싱

3.1 커버플레이트의 다단계 온도분포 이론해

다단계 프리스트레싱 도입을 위한 커버플레이트는 그림 8과 같이 가열을 유도하는 구간 L_A , L_B 와 고정장치부 A_T , B_T 로 단순화 할 수 있다. 가열구간 L_A 와 L_B 는 프리스트레싱 도입을 위한 모재와의 상대온도차 ΔT_A , ΔT_B 를 도입하기 위하여 전자식 가열판을 이용하여 직접 가열하며, A_T 와 B_T 구간은 가열구간 L_A 와 L_B 의 전도에 의한 열전달로 비선형 온도분포가 유도된다. 따라서 커버플레이트의 다단계 온도분포 이론해를 결정하기 위해서는 열전달에 의하여 비선형 온도분포가 유도되는 A_T 와 B_T 구간의 온도분포의 결정이 필요하다. 열전달 구간 A_T , B_T 의 온도분포는 열역학 제1법칙인 에너지보존법칙에 따라 2차 미분방정식으로부터 유도할 수 있다.

커버플레이트에서 발생하는 정상상태의 에너지 균형은 그림 9와 같이 에너지보존법칙에 따라 식 (17a)와 식 (17b)로 나타낼 수 있다(Bejan, 1993). 전도에 의한 Fourier 열전도 방정식 식(18)과 대류에 의한 열전달식 식 (19)를 이용하면 커버플레이트에서 발생하는 정상상태의 에너지 균형은 식 (20)과 같이 표현된다. 여기서, q_k 는 전도에 의한 열전달율(W), q_c 는 대류열전달율(W), k 는 열전도도($W/m \cdot ^\circ C$), h_c 는 대류열전달계수($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A_w 는 열전달 방향에 수직인 면적(m^2), A_c 는 대류열전달이 발생하는 면적(m^2), dT/dx 는 온도경사($^\circ C/m$), T_s 는 물체의 표면온도($^\circ C$), T_∞ 는 대기온도($^\circ C$)이다.

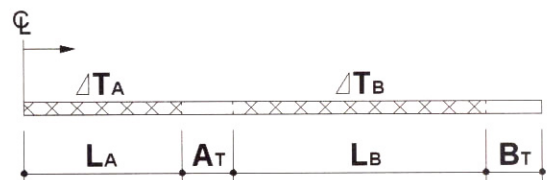


그림 8. 커버플레이트의 다단계 열변형 경계조건

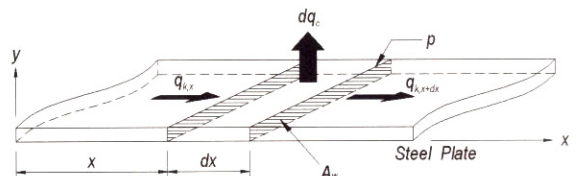


그림 9. 일정한 단면을 갖는 보강강판의 열전달

식 (20)에서 dx 가 0으로 수렴하고, k 와 h_c 가 일정하다면 식 (20)은 식 (21)과 같고, 물체의 표면온도와 대기온도의 온도차를 식 (22)와 같이 정의하면 식 (23)과 같은 2차 미분방정식으로 나타낼 수 있다. 식 (24)는 2차 미분방정식 식 (23)의 일반해이다. 여기서, A_w 는 강판의 단면적, p 는 커버플레이트의 윗변장, $m^2 = h_c p / k A_w$, A , B 는 적분상수이다.

$$\left[\begin{array}{c} x \text{에서 요소로} \\ \text{들어가는} \\ \text{열전도율} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} x + dx \text{에서} \\ \text{요소로부터의} \\ \text{열전도율} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{요소로부터의} \\ \text{열대류율} \end{array} \right] \quad (17a)$$

$$q_{k,x} = q_{k,x+dx} + dq_c \quad (17b)$$

$$q_k = -kA_w \frac{dT}{dx} \quad (18)$$

$$q_c = h_c A_c (T_s - T_\infty) \quad (19)$$

$$kA_w \left[\frac{dT}{dx} \Big|_{x+dx} - \frac{dT}{dx} \Big|_x \right] = h_c p dx [T_s(x) - T_\infty] \quad (20)$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{h_c p}{kA_w} [T_s(x) - T_\infty] = 0 \quad (21)$$

$$T_s(x) - T_\infty = \theta(x) \quad (22)$$

$$\frac{d^2 \theta(x)}{dx^2} - m^2 \theta(x) = 0 \quad (23)$$

$$\theta(x) = A \cosh(mx) + B \sinh(mx) \quad (24)$$

온도분포 일반해인 식 (24)에 열전달구간 A_T 의 경계조건을 대입하면 열전달구간 A_T 에서의 온도분포를 쉽게 구할 수 있다. 열전달구간 A_T 의 경우 그림 10과 같이 양단의 온도가 ΔT_A 과 ΔT_B 인 구간과 접해 있으므로 경계조건은 식 (25) 및 식 (26)과 같이 나타내어진다. 열전달구간 A_T 의 경계조건 식 (25), 식 (26)을 연립하여 계산하면 식 (27)과 같은 열전

달구간 A_T 의 온도분포 이론해를 유도할 수 있다.

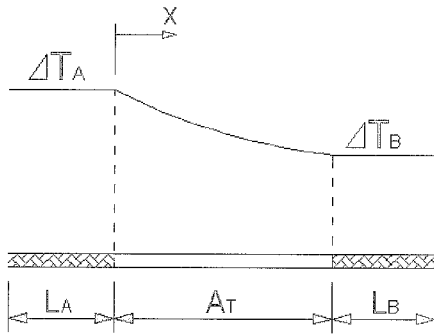


그림 10. 열전달구간 A_T 의 경계조건

$$\theta(0) = A \cosh(0) + B \sinh(0) = \Delta T_A - T_\infty \quad (25)$$

$$\theta(A_T) = A \cosh(mA_T) + B \sinh(mA_T) = \Delta T_B - T_\infty \quad (26)$$

$$T(x) = (\Delta T_A - T_\infty) \left[\cosh(mx) - \frac{\cosh(mA_T)}{\sinh(mA_T)} \sinh(mx) \right] + (\Delta T_B - T_\infty) \frac{\sinh(mx)}{\sinh(mA_T)} + T_\infty \quad (27)$$

열전달구간 B_T 의 경우 그림 11과 같이 가열구간 L_B 의 끝단에서의 온도가 ΔT_B °C로 일정하고 자유단에서는 대류에 의한 열전달이 발생하므로 경계조건은 식 (28), 식 (29)와 같다. 열전달구간 B_T 의 경계조건 식 (29)에 2차 미분방정식의 일반해 식 (24)를 편미분하여 경계조건식 (28)과 연립하면 식 (31)과 같은 열전달 구간의 온도분포 이론해를 구할 수 있다. 식 (30)은 2차 미분방정식 일반해의 편미분이다. 커버플레이트의 두께 및 폭이 길이에 비해 매우 작으므로 두께 및 폭 방향의 온도는 일정한 것으로 가정하였다.

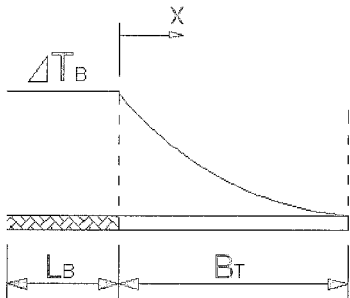


그림 11. 열전달구간 B_T 의 경계조건

$$\theta(0) = A \cosh(0) + B \sinh(0) = \Delta T_B - T_\infty \quad (28)$$

$$-k \frac{d\theta(x)}{dx} \Big|_{x=B_T} = h_{c, B_T} \theta(B_T) \quad (29)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=B_T} = mA \sinh(mB_T) + mB \cosh(mB_T) \quad (30)$$

$$T(x) = (\Delta T_B - T_\infty) \left[\cosh m(B_T - x) + \frac{h_c}{mk} \sinh m(B_T - x) \right] / \left[\cosh(mB_T) + \frac{h_c}{mk} \sinh(mB_T) \right] + T_\infty \quad (31)$$

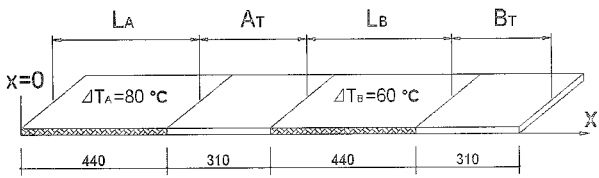
다단계 온도커버플레이트의 길이방향 변형률과 변형량은 식 (1)과 식 (2)에 의하여 결정되므로 열전달에 의한 비선형 온도분포 구간 A_T , B_T 의 온도변형량은 식 (32)와 식 (33)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 다단계 온도분포에 의한 커버플레이트의 다단계 온도변형량은 가열구간의 온도변형량과 열전달구간의 온도변형량의 합으로 결정된다.

$$\Delta L_x = a \int_0^x [(\Delta T_A - T_\infty) \left\{ \cosh(mx) - \frac{\cosh(mA_T)}{\sinh(mA_T)} \sinh(mx) \right\} + (\Delta T_B - T_\infty) \frac{\sinh(mx)}{\sinh(mA_T)}] dx \quad (32)$$

$$\Delta L_x = a \int_0^x (\Delta T_B - T_\infty) \left[(\cosh m(B_T - x) + \frac{h_c}{mk} \sinh m(B_T - x)) / (\cosh(mB_T) + \frac{h_c}{mk} \sinh(mB_T)) \right] dx \quad (33)$$

3.2 커버플레이트의 다단계 온도분포 유한요소해석

본 연구에서 유도한 커버플레이트의 다단계 온도분포 이론해의 검증용 위하여 그림 12의 커버플레이트를 대상으로 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS 13.7을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 커버플레이트의 열전달 해석을 위하여 커버플레이트를 2차원 평면요소인 plane-field 요소를 사용하였으며, 가열구간에서 온도변화가 발생하지 않는 열평형상태인 정상상태의 열전달만을 고려하였다. 열원과 접하게 되는 커버플레이트의 시작점은 일정한 온도가 계속 가해지는 것으로 가정하였으며, 열원과 접하는 구간을 제외한 커버플레이트의 측면, 윗면, 단부에서는 대류로 인한 열손실이 발생하도록 하였다. 복사에 의한 영향과 열원에 의해 덥혀진 공기가 상승하면서 열전달에 미치는 영향은 매우 미소하므로 무시하였다. 표 1은 커버플레이트의 열전달 해석조건이며, 그림 13은 열전달 해석을 위한 커버플레이트의 유한요소 모형이다.



(단위 : mm)

그림 12. 다단계 온도분포 이론해 검증을 위한 대상 커버플레이트



그림 13. 다단계 온도분포 열전달 해석을 위한 유한요소 모형

표 1 커버플레이트의 열전달 해석조건

분 류		해석조건
단면제원	길이(Length)	1500 mm
	폭(Width)	300 mm
	두께(Thickness)	15 mm
열전달조건	대기온도(T_{∞})	20 °C
	대류열전달계수(h_c)	0.0000035 $W/mm^2 \cdot ^\circ C$
	열전도도(k)	0.06 $W/m \cdot ^\circ C$

그림 14는 표 1의 열전달 해석조건에 따른 커버플레이트의 열전달 구간과 가열구간의 온도분포 이론해와 유한요소 해석결과를 비교한 것으로, 이론해와 유한요소해석 결과가 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

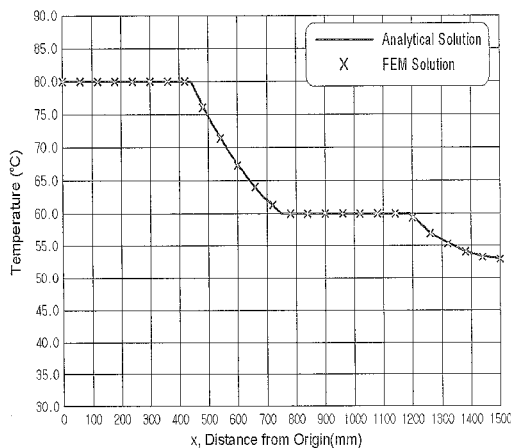


그림 14. 커버플레이트의 열전달 이론해와 유한요소해석

4. 온도변형에 의한 다단계 프리스트레싱

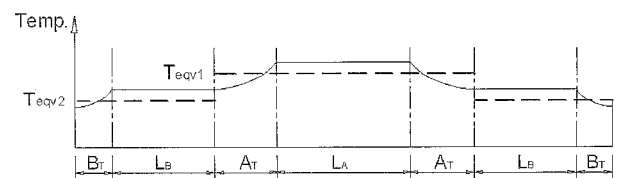
4.1 다단계 온도분포 해석을 위한 등가가열온도

커버플레이트의 다단계 온도분포 및 온도팽창 이론해는 구속

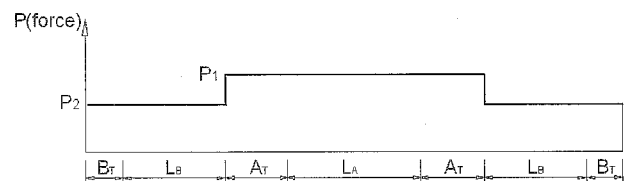
조건이 없는 커버플레이트를 부분적으로 가열하였을 때 발생하는 커버플레이트의 비선형 온도분포에 의하여 결정되는 것으로, 다단계 온도분포에 의하여 도입되는 프리스트레싱력은 단순한 열응력 해석으로 계산할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 다단계 온도분포에 의하여 도입되는 프리스트레싱력의 해석을 위하여 등가가열온도라는 개념을 정의하기로 한다. 등가가열온도는 식 (34)와 같이 커버플레이트의 다단계 온도분포에 의하여 발생한 다단계 온도변형을 커버플레이트 전체구간에 대한 온도로 환산한 것으로 그림 15와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, T_{eqv} 는 등가가열온도, T_{∞} 는 대기온도이다.

등가가열온도에의하여 그림 15와 같이 도입되는 다단계 프리스트레싱을 이용하여 큰 프리스트레싱의 도입이 필요한 구간에는 주변 가열온도보다 상대적으로 높은 온도를 도입하고, 작은 프리스트레싱의 도입이 필요한 구간에서는 낮은 온도를 도입하여 보다 작은 프리스트레싱을 도입할 수 있다. 따라서 프리스트레싱 도입을 위한 고정장치부가 분산되므로 고정장치부의 응력집중현상을 감소시킬 수 있으며, 그림 16과 같이 다단계로 도입된 프리스트레싱에 의하여 구조물의 응력상태를 효율적으로 제어할 수 있다. 그림 16에서 그래프 (1)은 커버플레이트의 부착이 없는 경우 작용하중에 의하여 발생하는 하부플랜지의 응력상태이고, 그래프 (2)는 커버플레이트의 단면증가에 의하여 감소된 하부플랜지의 응력상태이며, 그래프 (3)은 다단계 열변형에 의하여 거더에 도입된 다단계 프리스트레싱에 의한 하부플랜지의 응력상태이다. 따라서 거더의 하부플랜지에는 그림 16에서와 같이 동일한 수준의 응력상태를 가지게 된다.

$$\Delta L = \alpha(T_{eqv} - T_{\infty})L \quad (34)$$



(a) 비선형 온도분포에 대한 다단계 등가가열온도



(b) 등가가열온도 개념을 이용한 다단계 프리스트레싱

그림 15. 등가가열온도 개념을 이용한 다단계 프리스트레싱

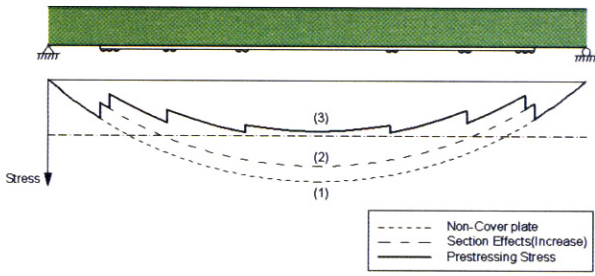


그림 16. 커버플레이트의 온도변형 다단계 프리스트레싱 효과

4.2 온도변형에 의한 다단계 프리스트레싱 효과

커버플레이트의 온도변형에 의한 다단계 프리스트레싱 효과의 분석을 위하여 H형강을 대상으로 응력도입효과를 분석하였다. 커버플레이트는 다단계 온도변형을 도입하기 위하여 가열 구간 A와 가열구간 B로 나누어 2단계의 프리스트레싱을 도입하였다. 그림 17은 대상 H형강 및 커버플레이트의 제원이다.

온도변형에 의한 프리스트레스 도입효과 분석은 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS 13.7을 이용하였으며, 커버플레이트의 가열온도 및 H형강의 높이를 변화시켜 도입응력의 변화를 확인하였다. H형강 및 커버플레이트는 LUSAS에서 지원하는 thin shell 요소인 QSI4 요소를 사용하여 그림 18과 같이 모형화 하였으며, H형강과 커버플레이트의 고정장치부는 equivalence node를 사용하여 강결로 모형화 하였다.

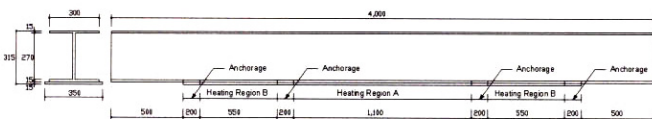


그림 17. H형강 및 커버플레이트의 제원(단위 : mm)

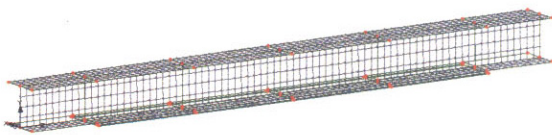


그림 18. 대상 H형강과 커버플레이트의 유한요소 모형

그림 19는 커버플레이트의 가열구간 A와 가열구간 B에 등가 가열온도 100℃와 60℃를 도입한 경우, H형강 상하부 플랜지에 도입된 커버플레이트의 다단계 프리스트레스로 다단계 온도변형에 의하여 H형강에 다단계 프리스트레스가 도입됨을 확인할 수 있다. 또한 커버플레이트의 온도수축에 의하여 발생한 다단계 편심 축하중에 의하여 H형강의 하부플랜지가 상부플랜지보다 큰 프리스트레스가 도입됨에 따라 강-콘크리트 합성거더교와 같이 사용하중에 의하여 정모멘트 구간의 상부플랜지보

다 하부플랜지에 작용응력이 더 크게 발생하는 경우 커버플레이트의 열변형을 이용한 다단계 프리스트레싱을 이용하여 강-콘크리트 합성거더에 효율적인 응력을 도입할 수 있을 것으로 판단된다.

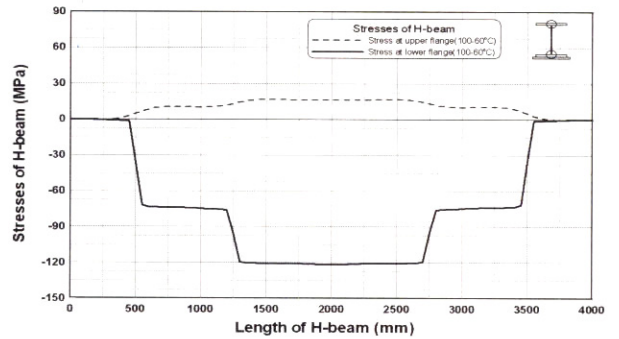


그림 19. 대상 H형강 상하부 플랜지의 응력

그림 20과 그림 21은 다단계 가열구간 A의 온도변화에 따른 상하부 플랜지의 도입 프리스트레스로, 가열구간 B의 도입 온도변화에 따라 H형강에 도입되는 프리스트레스 도입량이 미소하게 변화하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 온도변화에 의하여 가열구간 B에 도입된 다단계 프리스트레스 효과이다. 그림 22와 그림 23은 커버플레이트에 다단계 등가가열온도 100-60℃를 도입한 대상 H형강의 높이 변화에 따른 상하부 플랜지의 도입 프리스트레스의 변화로 커버플레이트에 도입된 온도가 일정하므로 도입된 편심 축하중의 크기는 일정하나, H형강의 높이의 증가에 따라 도입된 모멘트의 증가로 H형강 상부플랜지의 인장응력은 증가하고 하부의 압축응력은 감소하고 있음을 알 수 있다.

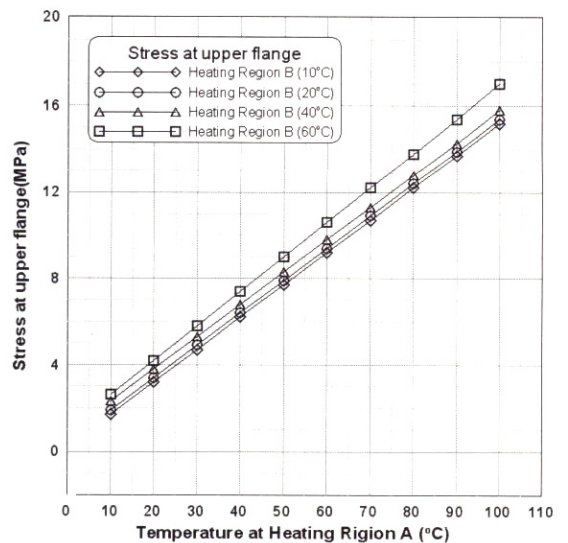


그림 20. 가열구간 A의 온도변화에 따른 상부플랜지의 응력

5. 결론

본 연구는 온도변형이 도입된 커버플레이트를 강구조물에 부착하여 온도변형의 구속으로 발생하는 커버플레이트의 압축력을 구조물의 거동이나 지간 개선에 필요한 프리스트레스로 도입하는 방법에 대한 연구로, 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 온도변형이 도입된 커버플레이트의 열응력을 이용하여 구조물의 거동이나 지간 개선에 필요한 프리스트레스를 도입할 수 있으며, 커버플레이트의 열변형에 의하여 도입되는 프리스트레스는 커버플레이트의 온도변화와 단면적에 비례하고, 프리스트레싱 도입 구조물의 단면강성 및 단면적이 큰 구조물의 경우 프리스트레싱 효율이 높아진다.
- (2) 커버플레이트의 다단계 온도변형을 이용한 프리스트레싱 도입 및 커버플레이트의 설계를 위하여 다단계 온도분포가 도입된 커버플레이트의 비선형 온도분포식을 제시하였으며, 이를 유한요소해석과 비교분석한 결과 제안된 다단계 온도분포식이 유한요소해석 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다.
- (3) 커버플레이트의 다단계 온도변형을 이용한 H형강의 응력도입 구조해석결과, 다단계 온도변형으로 도입된 다단계 편심 프리스트레싱력이 H형강의 상부플랜지보다 하부플랜지에 더 많은 응력을 도입시키므로, 강-콘크리트 합성거더교와 같이 사용하중에 의하여 정모멘트 구간의 상부플랜지보다 하부플랜지에 작용응력이 더 크게 발생하는 구조물의 효율적인 응력도입 방법으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)승화이엔씨의 연구비 지원 및 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원을 받아 연구된 것으로 본 연구를 가능케 한 (주)승화이엔씨 및 교육인적자원부에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김기봉, 정영수, 최혁주, 강보순 (1998) 외부 후 긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제10권, 제4호, pp. 701-708
- 박용걸, 박영훈, 이승용 (2000) 외부 후 긴장 공법을 이용한 강

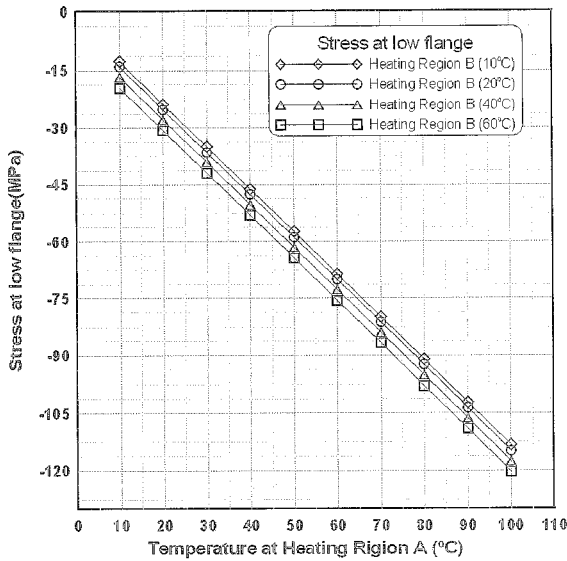


그림 21. 가열구간 A의 온도변화에 따른 하부플랜지의 응력

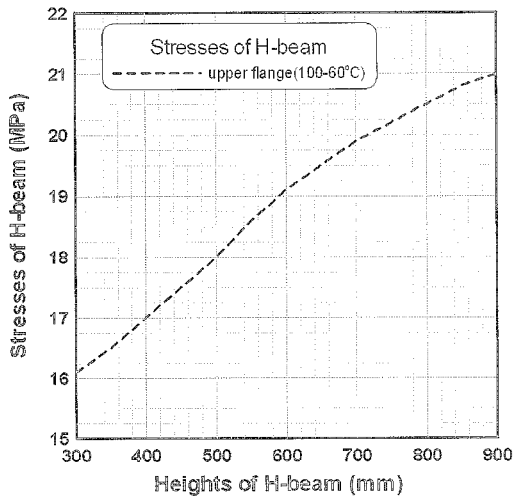


그림 22. H형강의 높이 변화에 따른 상부플랜지의 응력

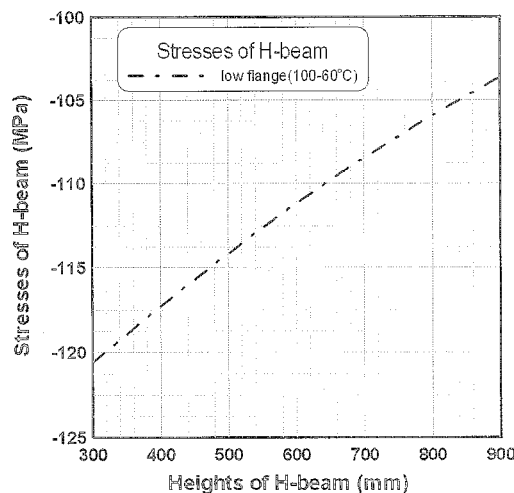


그림 23. H형강의 높이 변화에 따른 하부플랜지의 응력

합성보의 보강에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제12권, 제5호, pp. 594-558
정승인, 류형근, 장승필 (2003) 외부프리스트레스트 강합성 교량의 탄소성 휨 거동해석, 한국강구조학회 논문집, Vol.15, No.1, pp. 59~68
임성순, 정찬택 (2006) 프리스트레스된 압연강재보(H-BEAM)의 휨 거동에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제2호, pp. 239-250
한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005
건설교통부, 도로설계편람(III), 2000
Bejan, A., *Heat transfer* (1993), John Wiley & Sons. Inc.

Shiming C. and Ping G. (2005) Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, pp. 515~530.

Wojciech L. and Ernest K. (2006) Behavior of composite beams prestressed with external tendon: Experimental study, *Journal of Constructional Steel Research*, In Press

(접수일자 : 2006. 9. 15 / 심사일 2006. 10. 13 /
심사완료일 2006. 10. 26)