

# PSC 합성거더교의 온도차에 관한 해석적 연구

## An Analytical Study on the Temperature Difference of PSC Composite Girder Bridge

전세진\*                      김영진\*\*                      김성운\*\*\*                      김철영\*\*\*\*  
Jeon, Se Jin                  Kim, Young Jin                  Kim, Seong Woon                  Kim, Cheol Young

### ABSTRACT

The temperature difference of deck and girder is one of the major factors that affect the stress distribution of a section, and therefore, the design of a composite girder bridge. However, domestic design codes of highway and railway bridges, respectively, present different shapes of design equations regarding the temperature difference, which may induce some confusion to the designers. In this study, each design equation is investigated on a theoretical basis and compared together. Some other methodologies such as finite element method and other equations from a different point of view are also taken into account for further comparison. An example of a railway bridge is presented to verify the result of each scheme.

### 1. 서 론

합성거더교에서 바닥판과 거더의 온도차는 주요 설계하중의 하나로서 바닥판과 거더에 적지 않은 응력을 유발할 수 있는 요인이다. 국내의 도로교설계기준<sup>1)</sup>과 철도설계기준<sup>2)</sup>에서는 바닥판과 거더의 완전합성을 가정하여 이러한 온도차가 유발하는 응력의 산정식을 제시하고 있지만 각 기준의 식 형태에는 차이가 있다. 하지만, 그에 대한 이론적 배경 고찰이나 비교 연구가 부족하여 적용시 설계자들이 혼란을 느낄 우려가 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 각 설계기준에 제시된 식들의 이론적 배경을 추적해가며 수식의 변형을 통해 비교고찰해 보았다. 보 이론에 근거한 이론적인 엄밀식 및 실제 교량의 유한요소해석을 통해서도 응력을 산정하여 추가적으로 비교하였다. 그리고, 수식과 유한요소해석의 결과에 차이를 유발할 수 있는 요인들을 분석하였다.

### 2. 국내 설계기준의 비교고찰

국내 설계기준에서는 온도차 고려시 바닥판과 거더의 온도가 각각 일정한 단상(段狀) 분포를 가정하

\*정회원 · 대우건설기술연구원 토목연구팀 선임연구원

\*\*정회원 · 대우건설기술연구원 토목연구팀 수석연구원

\*\*\*정회원 · 대우건설기술연구원 상무

\*\*\*\*정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수

고 있으며, 콘크리트 합성거더교에서는 그 차이를 5°C로 본다. 철도설계기준<sup>2)</sup>에서는 바닥판과 거더 각각에 발생하는 축력 및 모멘트를 식 (1) 및 식 (2)에서 구하여 두가지 단면력에 의한 바닥판 상하연 합성응력을 식 (3)과 같이 구한다. 식 (2)에서 바닥판과 거더에 발생하는 모멘트는 각각의 강성비를 가지고 총모멘트를 분배하여 구하는 것이 특징이다. 여기에서, 첨자 c는 바닥판, 첨자 s는 거더를 나타내며, n은 탄성계수비, α는 선팽창계수, ±t는 바닥판과 거더의 온도차로서 바닥판 온도가 거더보다 높은 경우가 -, 낮은 경우가 +이다.

$$N_c = N_s = \frac{\alpha(\pm t) E_s}{\frac{n}{A_c} + \frac{1}{A_s} + \frac{nd^2}{I_c + nI_s}}$$

$$M_c = \frac{I_c}{I_c + nI_s} N_c d \quad M_s = \frac{nI_s}{I_c + nI_s} N_c d$$

$$f_{ca} = \frac{N_c}{A_c} - \frac{M_c}{I_c} y_{ca} \quad f_{da} = \frac{N_c}{A_c} + \frac{M_c}{I_c} y_{da}$$

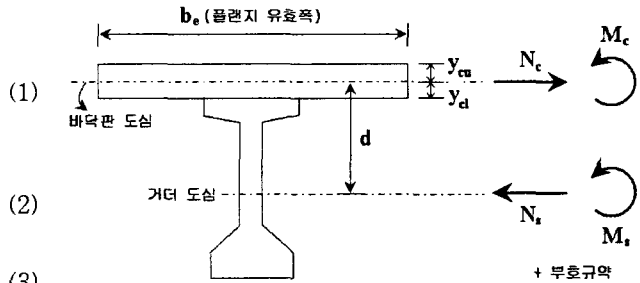


그림 1 철도설계기준상의 온도변화에 대한 고려

한편, 도로교설계기준<sup>1)</sup>은 바닥판의 온도 상승 및 하강에 의한 중방향 길이 변화를 거더가 구속한다는 관점에서 접근하며 이 때 구속에 의해 발생하는 식 (4)와 같은 축력 및 모멘트가 산출하는 바닥판의 합성응력을 식 (5)에서 구한다. 철도설계기준의 합성응력 산정시에는 온도에 의한 신축분이 식 (3)에 포함되지 않으며 다른 방식으로 고려되지만 식 (5)의 도로교설계기준의 합성응력은 온도에 의한 신축분을 감해주고 있음에 주의한다. 기호 체계는 비교시의 일관성을 위해 철도설계기준에 맞추었으며, d<sub>c</sub>, A, I의 의미는 아래를 참조한다. 단, ±t는 철도설계기준과는 달리 바닥판 온도가 거더보다 높은 경우가 +, 낮은 경우가 -이다.

$$N = E_c [\alpha(\pm t)] A_c \quad M = Nd_c$$

$$f_c = \frac{1}{n} \left[ \frac{N}{A} - \frac{M}{I} y \right] - E_c [\alpha(\pm t)]$$

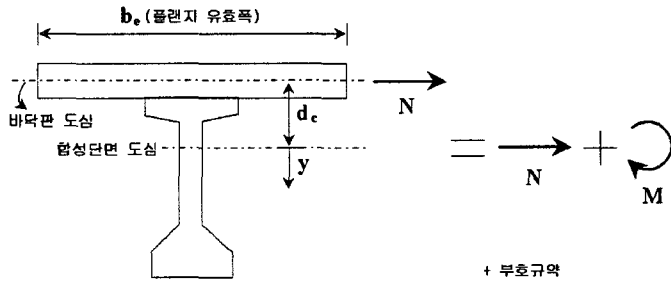


그림 2 도로교설계기준상의 온도변화에 대한 고려

이상에서 철도교 및 도로교설계기준의 설계식들은 접근방법이나 식의 형태에서 차이가 있는 것으로 보이지만 그에 대한 비교분석은 아직 이루어진 바 없다고 생각된다. 비록 철도교와 도로교 설계시 각각의 설계기준을 따르면 되겠지만, 같은 물리적 현상을 설명함에 있어 각 기준에 따른 계산 결과가 차이를 보인다면 설계자들에게 혼란을 유발할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 수식의 변형을 통해 두 설계기준의 식들을 비교고찰해보고자 한다. 이를 위해 그림 3과 같이 바닥판 및 거더 중립축에 대한 국부좌표계를 각각 y<sub>c</sub> 및 y<sub>s</sub>로 정의하며, 합성단면의 중립축을 기준한 좌표계를 y로 둔다. 또한, 합성단면 중립축에서 바닥판 중립축 및 거더 중립축까지의 거리를 각각 d<sub>c</sub> 및 d<sub>s</sub>로 정의한다. 그러면, d = d<sub>c</sub> + d<sub>s</sub>, y<sub>c</sub> = y + d<sub>c</sub>, y<sub>s</sub> = y - d<sub>s</sub>가 성립하고 도심의 성질로부터

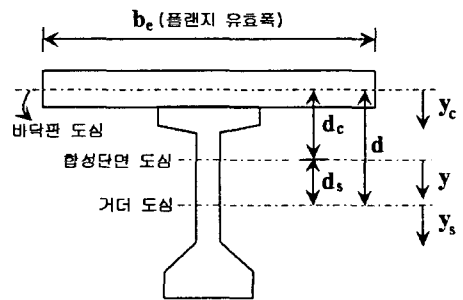


그림 3 온도변화에 대한 기호의 정의

$A_c d_s/n = A_s d_s$ 도 성립한다. 한편,  $A$  및  $I$ 를 거더 물성을 기준으로 한 합성단면의 환산값으로 본다면  $A = A_s/n + A_s$ ,  $I = I_s + I_s/n + A_s d_s^2 + A_c d_c^2/n$ 이 성립한다. 이러한 관계식들을 철도교 및 도로교설계기준의 식들에 대입하여 정리해 본 결과 바닥판 및 거더의 응력 계산식이 정확히 같은 형태로 일치함을 증명할 수 있었다. 본 증명을 통해 바닥판과 거더의 온도차의 영향 계산시 도로교 및 철도교 여부에 관계없이 두가지 기준에 제시된 어느 식을 써도 무방함을 밝혔다. 이상에서는 바닥판의 응력 산정식을 비교분석하였지만 거더의 응력 산정식 또한 유사한 절차를 거쳐 동일성을 증명할 수 있다.

### 3. 이론적인 엄밀해와의 비교

보 이론에 근거한 이론적인 엄밀해는 다음과 같이 유도해 볼 수 있다<sup>3)</sup>. 온도에 의해 유발되는 단면 곡률은 식 (6)과 같으며, 여기에서 온도  $\pm t$ 와 거더 물성을 기준으로 환산한 단면폭  $b$ 는 중립축부터의 거리  $y$ 에 따른 함수이다. 한편 온도에 의해 유발되는 축방향 변형률은 식 (7)과 같다. 따라서, 실제 발생하는 응력은 온도에 의한 신축의 영향을 제외하여 식 (8)과 같이 산정할 수 있다. 이 때, 여러가지 부호규약은 그림 2의 도로교설계기준을 참조한다.

$$\psi = \frac{M}{E_s I} = \frac{1}{E_s I} \int \sigma_y dA = \frac{\alpha}{I} \int [\pm t(y)] y b(y) dy \quad (6)$$

$$\epsilon_0 = \frac{N}{E_s A} = \frac{1}{E_s A} \int \sigma dA = \frac{\alpha}{A} \int [\pm t(y)] b(y) dy \quad (7)$$

$$f_c = E_c [(\epsilon_0 + \psi) - \alpha(\pm t)] \quad (8)$$

그런데, 바닥판에 온도 변화가 발생할 때 식 (6) 및 식 (7)을 식 (8)에 대입하여 정리한 결과 도로교 설계기준의 식인 식 (5)와 정확히 일치함을 알 수 있었다. 따라서, 결론적으로 철도설계기준 식, 도로교설계기준 식, 이론적인 엄밀식 간의 동등성이 증명된다. 즉, 설계기준에 의한 식들은 근사식이 아니며 보 이론에 근거한 엄밀한 계산식을 그대로 재현할 수 있음을 알 수 있다.

### 4. 예 제 : PSC 합성거더 철도교

본 예제에서는 경간 25 m의 PSC 합성거더 철도교를 대상으로 이상에서 언급한 설계식 및 이론식을 적용하여 바닥판의 응력을 산정해 보았으며 유한요소해석 결과와도 비교하였다. PSC 거더 및 바닥판의 설계기준강도는 35 MPa이고, 바닥판의 두께는 200 mm이다. 바닥판 온도가 거더보다 5°C 낮은 경우를 고려하였으며, 콘크리트의 선팽창계수는  $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이다. 수식에 의한 계산시에는 먼저 플랜지 유효폭 개념을 통해 바닥판 중에서 각 합성거더 계산에 포함되는 범위를 결정해야 하는데, 설계기준에 따르면 본 합성거더의 경우 거더 중심간 거리인 2 m가 플랜지 유효폭이 된다. 덕트의 단면적 및 PS 강재를 고려한 환산단면에 대해 계산하면 내측거더의 경간 중양을 기준으로  $A = 1.2893 \text{ m}^2$ ,  $I = 1.1150 \text{ m}^4$ 이다. 한편, 유한요소해석에는 범용구조해석 프로그램 LUSAS<sup>4)</sup>를 사용하였으며, 8절점 솔리드요소로 구성된 유한요소모델은 그림 4와 같다.

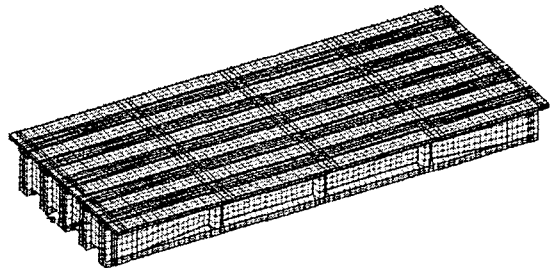


그림 4 해석대상 교량의 유한요소모델

그림 5는 해석 결과로서 바닥판의 높이별 응력 분포를 보여주고 있는데, 바닥판의 온도 하강시 바닥판이 종방향으로 수축하려는 거동을 거더가 외적으로 구속하여 바닥판에 인장응력이 유발된다는 점은 서로 같으나 유한요소해석에 의한 결과가 수식에 의한 결과보다 응력을 좀 더 크게 평가하고 있다.

유한요소해석과 계산식 결과의 차이를 유발하는 주요 요인은 다음과 같은 것으로 생각된다. 첫째, 계산시 전단지연(Shear lag) 효과를 고려하여 플랜지 유효폭 가정을 도입하는 데 비록 설계기준에 제시된 값이 있지만 엄밀히 말해 하중조건 등에 따라 차이가 발생한다. 둘째, 유한요소해석시 채택한 유한요소수에 따라 일부 차이가 발생한다. 셋째, 계산식은 보의 기본 이론인 평면 유지의 베르누이 가정에 근거하고 있으므로 응력이 선형으로 분포되지만 실제로는 이러한 가정이 정확하게 성립하지는 않으므로 유한요소해석 결과는 완전한 선형 분포가 아닐 수도 있다. 넷째, 계산식에서는 거더의 구속만을 고려하지만 유한요소해석에서는 거더와 더불어 가로보가 바닥판의 온도 신축을 구속하므로 구속효과 및 그에 의해 유발되는 바닥판 인장응력이 더 커진 면이 있다. 본 연구 결과 이러한 요인들의 영향으로 설계기준이나 이론식은 온도차가 유발하는 종방향 인장응력을 과소평가할 가능성이 있으므로 주의할 요한다. 이러한 경향은 기존 연구<sup>5)</sup>에서도 지적되었던 바 있다.

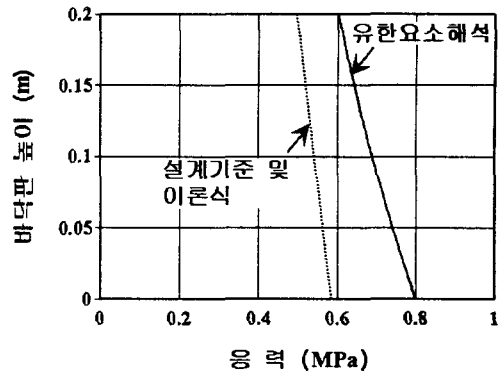


그림 5 온도차에 의한 바닥판의 종방향 응력

## 5. 결 론

합성거더교에서 바닥판과 거더의 온도차의 영향을 합리적으로 평가함으로써 바닥판과 거더의 응력을 실제적으로 산정하여 구조안전성 및 사용성을 올바르게 평가할 수 있으며, 특히 프리캐스트 바닥판 교량의 경우 바닥판의 종방향 프리스트레스 수준을 결정하기 위한 중요 자료로 활용된다. 본 연구에서는 국내의 대표적인 교량 설계기준인 도로교설계기준과 철도설계기준에 제시된 바닥판과 거더의 온도차에 의한 응력 산정식들을 비교고찰해 보았으며, 그 외에 단면 온도변화를 다루는 이론적인 엄밀식과도 비교해 보았다. 비록 이러한 식들의 형태는 서로 다르지만 수식의 변형을 통해 결국은 동일한 형태로 치환될 수 있음을 보였다. 따라서, 합성거더 교량의 온도차의 영향 평가시 어떠한 수식을 사용하더라도 결과는 동일하다. PSC 합성거더교의 예제에서는 이러한 수식들에 의한 결과와 정밀 유한요소해석 결과를 비교하였으며, 결과 차이를 유발할 수 있는 요인들을 분석하였다. 본 연구에서 논의한 사항들은 콘크리트거더 뿐 아니라 강거더에 대해서도 유효하며, 교량 설계자들이 온도변화의 영향을 고려할 때 좀 더 명확한 구조적인 개념을 가지고 일관성 있게 적용하는데 도움이 되리라 기대된다.

## 참고문헌

1. 한국도로교통협회, “도로교설계기준”, 2005.
2. 대한토목학회, “철도설계기준(철도교편)”, 2004.
3. Ghali, A., Favre, R. and Badry, M., “Concrete Structures: Stresses and Deformations”, 3rd ed., Spon Press, 2002.
4. “LUSAS Ver. 13 - Modeller User Manual”, FEA Ltd., 2005.
5. 정철현, 심창수, 김영진, 장승필, “합성형교량 바닥판의 종방향 거동”, 대한토목학회 논문집, 제19권, 제I-4호, 1999, pp. 495-504.