

# 연속 강 플레이트거더교에서 내부지점보강과 외부프리스트레싱의 적용에 관한 해석적 연구

## An Analytical Study on Application of Section Increment at Internal Support with External Prestressing Method to Continuous Steel Plate Girder Bridge

심재중<sup>1)\*</sup>                      홍성남<sup>2)</sup>                      박선규<sup>3)</sup>  
Shim, Jae Joong              Hong, Sung Nam              Park, Sun Kyu

### Abstract

It has been verified that there is an effect of diminishing in section bringing in internal core section reinforcement and external prestressing rather than general plate-girder bridge as a consequence of analysis. In particular, positive effect was seen in the aspect of usability when external prestressing was in application as rises gained from it minimized the hanging down of a bridge. Based on the result of analysis, a sectional diagram applicable per number of girder has been illustrated which made it possible to estimate the intensity of internal stress in the future where number of girder is limited to 4 and regression equation is presented after regression analysis has been carried out.

**Keywords** : External prestressing, Internal support, FEA, Regression

### 1. 서론

일반적으로 교량은 단순교에 비해 최대 설계 휨모멘트를 줄일 수 있다는 장점 때문에 연속교로 시공되어지고 있다. 규정에서도 상부구조형식 선정의 기본방침을 원칙으로 연속형식으로 선정한다고 규정하고 있다(도로설계요령, 2002). 하지만 연속교로 시공할 경우, 내부지점부에서는 부모멘트가 발생하기 때문에 이 부분을 충분히 고려해야 한다. 부모멘트의 발생을 억제하기 위한 방법으로는 대표적으로 내부지점부 상단의 프리스트레싱을 통하여 부모멘트 자체를 낮추는 방법과 내부지점부 하단에 I거더를 보강함으로써 단면의 강성을 증대시켜 부분에 생기는 응력을 감소시키는 방법 이렇게 크게 두 가지를 들 수 있다.

근래의 연구에 의하면 내부지점의 부모멘트를 제어하기 위한 방법으로 내부지점의 상단에 프리스트레싱을 도입한 방법을 연구하였다(김두천, 2004; 신재우, 2007). 김경민은 지점부 단면형고 확대를 도입한 연속 프리스트레스트 강 I거더의 휨 실험을 통해 내하력 향상정도를 분석하였다(김경민, 2005). 또한, 텐던의 배치형식과 유사한 정모멘트 구간엔 긴장재를 배치하였을 경우 내부지점부의 부모멘트의 감소 효과를 해석 및 실험적으로 연구하

였다(조두용, 2002; 최덕일, 2008). 그리고 임상훈은 외부 긴장 공법 후 정적 휨 재하 실험을 통해 휨 보강정도를 분석하였다(임상훈, 2001). 또한, 단경간 보에 프리스트레스트력을 도입한 것과 그렇지 않은 것에 대한 비교 실험을 실시하였고, 텐던의 모양 배치와 프리스트레스트력을 다르게 하여 이러한 방법이 단경간보에 미치는 영향을 밝혔다(Wojciech Lorenc et al., 2006). Shiming Chan은 전단열결재 배치와 부모멘트를 받는 경간의 길이를 다르게하여 외부 긴장된 프리스트레스트 강 I거더의 부모멘트 저항능력을 분석하였다(Shiming Chan, 2005).

내부지점의 상단에 프리스트레싱을 하는 방법은 연속되는 병렬식 거더를 사용하는 실제교량에 적용 시 격벽과 브레이싱으로 인하여 시공의 어려움이 예상되므로, 시공성이 우수하고 강성을 키움과 동시에 프리스트레싱의 공간의 확보가 용이한 내부지점부 하부의 단면을 보강하는 방법이 유리할 것으로 고려되어진다.

그러나, 기존의 가설 교량에 국한된 것이어서 실제의 교량에 시공된 사례가 없기 때문에 바로 적용시키기엔 불확실한 부분이 많아 어려움이 있는 실정이다.

본 논문에서는 기존의 실험을 통하여 효과가 입증된 내부지점부 하부의 단면을 보강하는 방법을 실제의 교량에 적용을 위해 주, 보강거더의 높이와 주거더의 개수를 변

1) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정  
2) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정  
3) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

\* Corresponding author : jjsim85@skku.edu 031-290-7530

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

수로 설정하고 유한요소 해석을 통하여 변수 별 응력을 분석하였다. 또한, 허용응력과 합성응력을 검토한 후 실제 교량에 적용 시 가능한 플레이트 거더교의 단면을 선정하고자 한다(도로교 설계기준, 2005)

## 2. 연속 강 플레이트거더교에서 내부지 점보강과 외부프리스트레싱의 적용

### 2.1 프리스트레스트 I거더 보의 기본개념

해석을 위한 가정은 Hooke's의 법칙을 따르고, 미소변형과 Slip은 무시한다. 또한 전단변형과 Saddle 점에서의 마찰은 무시한다.

본론에서는 유연도법, 2차원 격자 해석과 3차원 해석, 세 가지 해석법을 고려하였다.

#### 2.1.1 유연도법

이 해석법은 외부 비부착 프리스트레스트 I거더의 해석에 사용된다. 이러한 형태의 텐던을 I거더에 적용할 경우 텐던은 I거더 끝단에 정착되고 편향부에서의 마찰을 무시하면 편향부에서 텐던은 자유롭게 이동할 것이다. 즉, 절곡되어 있는 I거더 Fig. 1(a)에서 보는 것과 같이 정착단 절점에서 텐던과 I거더의 변위가 일치하며(compatible deformation) 편향부 절점에서는 텐던과 I거더의 변위는 일치하지 않게(incompatible deformation) 된다. 그러므로 텐던과 I거더의 변형에 대한 특별한 적합조건이 필요하다.

텐던은 I거더 끝단의 절점에 부착된 브라켓에 정착되고 I거더 내부의 어느 절점에 부착된 도르래와 같은 편향부에 의해 각 변화가 주어진다. Fig. 1(b)는 편향부를 보여주고 있고, Fig. 1(d)는 편향부에서의 텐던과 I거더 부재의 연결모델을 보여주고 있다.

해석 3단계에서는 텐던의 강성을 고려해야 하는데 활하중, 추가고정하중이 작용할 때 부정정 여력인 긴장량 증가량을 구하기 위해서는 텐던과 I거더의 신장량에 관한 적합조건을 구해야 한다. 과정은 Fig. 1과 같다.

첫째, Fig. 2(a)에서 보는 것과 텐던을 절단함으로써 정정보로 변환시킨다.

둘째, 하중작용 후 발생한 절단된 텐던의 상대변위를 구한다. 계산의 편의를 위하여 Fig. 2(c)와 같이 텐던이 배치된 절점의 상대변위를 구하여 총합을 구한다.

셋째, 실제 구조물에서 절단된 텐던의 상대변위는 0이므로 하중발생 후 텐던 증가량  $\Delta X$ 를 상대변위를 없애기 위하여 절단된 텐던의 양단에 도입한다. 계산을 간단하기 위하여 Fig. 2(d)에서 보는 것과 같이 텐던이 배치된 절점에 텐던 방향으로 적용한다.

여기서, 하중 변화에 의한 프리스트레스트 텐던의 인장력

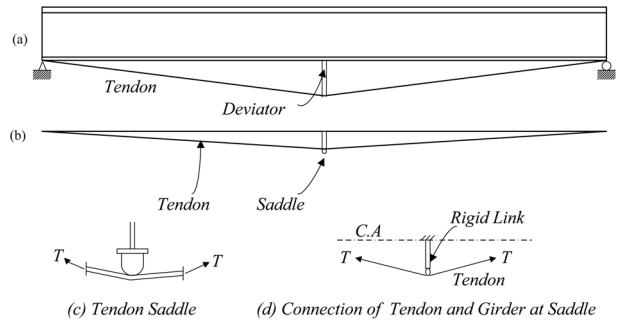


Fig. 1 Drape point of tendon girders with prestressed steel I beam model

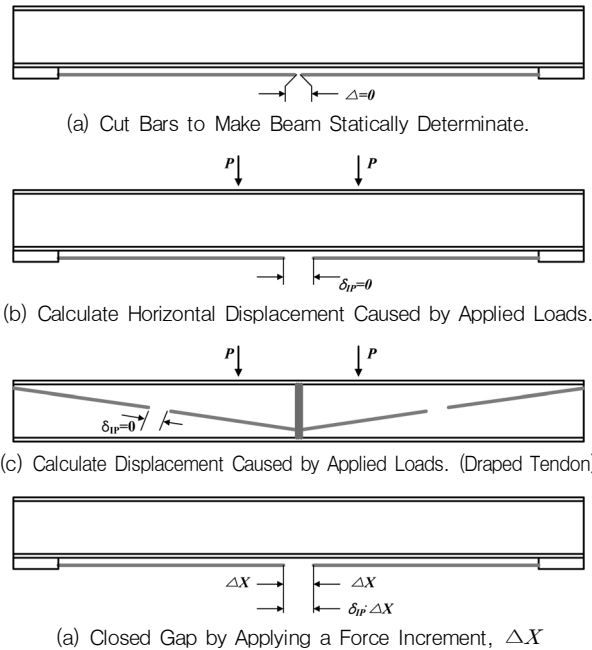


Fig. 2 Variation of tensile prestress load increases

증가량을 산정하기 위해서는 Flexibility method를 이용하여 구하며, 그 과정은 Fig. 2와 같다.

변위 적합 조건식에 의해 다음 식(1)과 같다.

$$\delta_{11} \Delta X + \delta_{1P} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\delta_{11}$  : 단위 텐던 힘에 의한 신장량,  $\delta_{1P}$  : 하중 적용 시 신장량이다. 가상일의 방법에 의해 신장량을 유도하면 다음 식(2), (3)과 같다(Shiming Chan, 2005).

$$\delta_{1P} = \int_0^L \frac{e M_x}{EI} dx \quad (2)$$

$$\delta_{11} = \int_0^L \frac{e^2}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{E_t A_t} dx \quad (3)$$

여기서,  $M_x$  : 하중 작용시 모멘트,  $e$  : 텐던의 편심량이 다. 그리고 Beam과 Tendon의  $E$  : 보의 탄성계수,  $E_t$  :

텐던의 탄성 계수이다.

식(1), (2)를 식(3)에 대입하여 유도해 보면 다음 식(4)과 같다.

$$\Delta X = \frac{\frac{e}{L} \int_0^L M dx}{e^2 + \frac{EI}{E_t A_t} + \frac{I}{A}} \quad (4)$$

여기서 적분 값은 모멘트 다이어그램의 면적과 텐던의 길이에 대한 값이다(Shimming Chan, 2005).

텐던의 증가된 총 프리스트레스력은 초기 프리스트레스력  $X_i$  와 사하중과 활하중에 의하여 증가된 프리스트레스량을 모두 합한 값이 되며 식(5)와 같다.

$$X = X_i + \Delta X_{DL} + \Delta X_{LL+i} \quad (5)$$

여기서,  $X_i$  : 초기 도입 긴장력,  $X_{DL}$  : 추가 사하중에 의해 증가된 긴장력,  $X_{LL+i}$  : 활하중 및 충격하중에 의해 증가된 긴장력이다(Shantong, Z. 1986).

### 2.1.1 2차원 격자 해석

2차원 격자해석은 교량의 보와 가로보 또는 격벽을 격자로 연결하여 교량의 상부구조의 거동을 해석할 수 있는 일반적인 구조해석의 방법이다. 해석을 위하여 각 영역에 있어서 분산된 힘과 비틀림의 강성도는 제일 가까운 등가 격자보에 집중되어있다고 가정했다. 바닥판은 보들이 길이 방향으로 상대적인 차이를 가지고 놓여 높은 각도로 기울어져 있을 수 있고, 평행이 되지 않게 놓여서 변할 수 있다. 지지된 차도의 곡률은 슬래브의 가장자리에 적절한 곡률을 주어 조절되는 반면에 그것을 지지하는 보는 각 경간에 대하여 직선이다. 각 격자 부재의 휨 강성은 표시된 단면의 도심에 대해 계산되어진다. 종방향 강성은 종방향 부재로 결정되고, 횡방향 강성은 일반적으로 가로보와 바닥판의 강성으로 표현된다, 횡방향 격자 부재의 간격은 다소 유동적이나 유효 경간의 약 1/4에서 1/8정도가 일반적으로 편리하다.

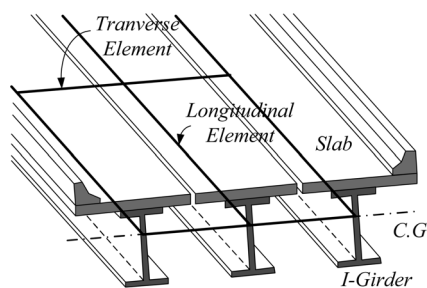


Fig. 3 Two-dimensional grillage Model

바닥판 보가 중립축의 변화를 바닥판 보가 유효 경간의 1/6보다 더 떨어져 있거나, 가장자리 캔틸레버가 유효경간의 1/12를 초과한다면, 전단지연(Shear lag)은 각보에서 플랜지로써 작용하는 슬래브의 유효 폭을 상당히 감소시킨다. 따라서 격자 강성은 감소된 슬래브의 폭을 사용하여 계산되어야 한다.

여러 가지 바닥판이 비틀림을 받을 때, 보 부분은 단지 종방향 비틀림을 받는 보처럼 거동하는 반면, 슬래브 부분은 양방향 비틀림을 받는 슬래브처럼 거동한다. I형 단면의 보의 비틀림 강성도는 휨 강성도에 비하여 매우 낮다. 이때에는 설계 목적상 격자에서 보의 비틀림을 무시할 수 있다.

격자해석의 단점은 임의 보에서의 모멘트는 단지 곡률에 비례하지만, 원래 슬래브의 임의 방향 모멘트는 그 방향 및 직교 방향의 곡률에 의존한다는 사실이다 (Hambly, E. C, 1991).

### 2.1.3 3차원 해석

교량의 3차원 거동은 등가의 2차원 격자해석보다 3차원 공간해석으로 더 간단하게 해석되어진다. 공간해석의 준비는 일반적으로 더 복잡하고, 시간소비가 많으나 3차원 구조물에 대한 공간의 기하학적 유사성은 해석의 정확도를 높인다(Hambly, E. C, 1991).

Shell 요소는 평면과 3차원 구조물의 거동에서 Shell, Membrane 그리고 Plate를 모델링 하는데 사용된다. Membrane 거동은 요소 평면의 연직 방향으로 면내(In-Plane)의 변위 강성성분(u, v)과 회전 강성성분을 포함하는 Isoparametric 공식을 사용한다. Fig. 4는 절점당 국부적으로 5개의 자유도를 가진 기초적인 Shell 요소를 나타낸다.  $K_b$ 와  $K_m$ 은 국부 강성도 행렬로써 각각 휨과 Membrane Action을 나타낸다. Shell의 강성도 행렬  $K_s$  ( $20 \times 20$ )는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_s (20 \times 20) = \begin{bmatrix} K_b (12 \times 12) & 0 \\ 0 & K_m (8 \times 8) \end{bmatrix} \quad (6)$$

그러나 3차원으로 조합하게 되면 위에서 구성하는 5개의 변위 위에도 각 요소에 수직한 면내 회전 변위인  $\theta_z$ 를 받게 된다. 물론 이 회전 변위는 매우 작아 무시할 수 있으나, 이 요소들은 조합하여 전체 구조에 대한 강성도 행렬을 구성할 때에는 변환과 연산의 편리를 위하여 가상

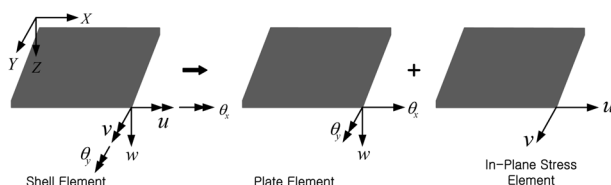


Fig. 4 Shell element

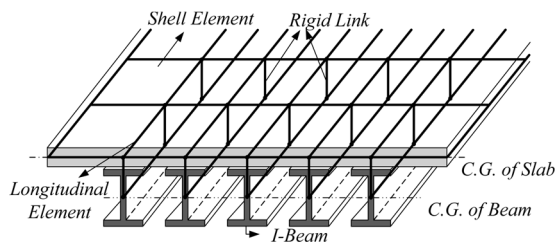


Fig. 5 Shell element analysis model using a three-dimensional

우력  $M_z$ 와 관련지어야 한다. 그리고 전체 구조 좌표계에 대응하는 요소 강성도 행렬은 다음의 식(7)에 의하여 구할 수 있다(Bathe, K. J, 1996).

$$K_s (24 \times 24) = T^T K_s^* T \quad (7)$$

여기서, T는 변환 행렬이고,  $K_s^*$ 는 식(8)과 같다.

$$K_s^* (24 \times 24) = \begin{bmatrix} K_s (20 \times 20) & 0 \\ 0 & K_m (4 \times 4) \end{bmatrix} \quad (8)$$

교량의 실제적인 형상에 보다 가깝게 적용시키기 위해서는 격자 요소만으로는 부족하므로, Fig. 5와 같이 Shell 요소를 이용하여, 바닥판은 Shell 요소, 주형은 격자 요소로 하여 각 부재 축에 있는 절점 사이를 Rigid Links로 연결한다.

이러한 3차원 구조해석은 하나의 평면상에서 부재로 연결되어진 2차원 격자요소 대신 각기 다른 중립축을 가진 부재를 연결함으로써 보다 정확한 해석 방법이 될 수 있다. Shell 요소를 이용할 경우, 차량하중은 시간 중앙에 최대 휨모멘트가 발생 할 수 있도록 교축 직각 방향으로 병렬 재하 하도록 한다.

### 3. 수치해석 및 분석

#### 3.1 해석 대상 교량 제원 및 설계변수

본 연구에서 사용된 예제 교량의 제원은 플레이트 거더 교 단면을 채택하였다. 교량의 제원은 다음과 같다(도로교 설계편람, 2001).

- 교폭 : 12.6m
- 교량등급 : 도로교 1등급
- 설계 활하중 : DB-24
- 충격계수 :  $I=15/(40+L)$
- 거더의 개수 : 5개(주형간격:2.6m)
- 슬래브 두께 : 24cm
- 설계 고정하중 : 철근콘크리트( $25\text{kN/m}^3$ )
- 아스팔트콘크리트( $23\text{kN/m}^3$ )

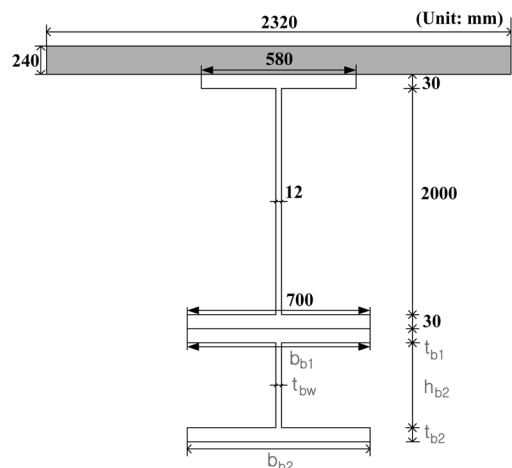


Fig. 6 Set the variable girder reinforcement

Table 1 Design parameters of reinforced girders

설계변수			
상부플랜지 두께	tb1	웹의 두께	tbw
하부플랜지 두께	tb2		
하부플랜지 폭	bb2	웹의 높이	hb2

- 사용재료 : 상,보강거더(SM490), 가로보(SM400), 콘크리트( $f_{ck}=27\text{MPa}$ ), 강연선(SWPC7B)

보강거더 단면을 변화시키면서 적용가능 단면을 결정하는 해석을 시행하기 위해 Fig. 6, Table 1과 같이 변수를 설정하였다.

그러나 보강거더의 상부 플랜지부분은 실제 시공 시 주거더의 하부 플랜지와 볼트 연결을 시켜야하는 부분이므로 주거더의 하부 플랜지 폭과 같도록 하였다.

#### 3.2 선행 변수해석

내부지점부에 보강하는 보강거더에 설정된 변수의 영향을 살피고 중요한 영향을 미치는 변수를 추려내기 위해 선행해석을 수행하였다. 플랜지 두께의 범위는 도로교 설계기준을 참고하였다(도로교 설계기준, 2005). 플랜지 전체 폭이 700mm일 때 사용할 수 있는 최소두께가 21.5mm인 것을 감안하여 22mm부터 30mm 까지 변화시켜가며, 보강거더 복부의 높이는 프리스트레싱을 위한 정착공간과 보강했을 시 정착을 위한 공간과 주거더와 보강거더의 높이의 합이 기존의 플레이트거더교의 내부지점부 높이를 초과하지 않는 범위로 제한을 두기 위해 50cm부터 100cm까지 변화시켜가며 그에 따른 응력을 검토하였다. 그 결과 하부플랜지와 상부플랜지는 두께가 8mm가 증가할 때 응력의 감소는 약 0.2%정도인 것으로 나타났으며 복부의 높이가 50cm증가할 때 주거더의 상부플랜지의 응력이 약 3%정도 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.3 본 해석

#### 3.3.1 해석 모델

본 해석에서 변수는 주거더의 높이의 범위는 기존의 단면보다 크지 않는 범위로 1.0m부터 1.5m, 보강거더의 높이의 범위는 0.5m부터 1.0m로 각각 10cm씩 높이를 바꿔가면서 해석을 수행하였다. 거더 개수의 변수를 3개(주거더 간격 5.2m), 4개(주거더 간격 3.47m), 5개(주거더 간격 2.6m)로 하여 모델을 제작한 후 해석을 수행하였다(도로교 설계편람, 2001).

요소의 분할은 거더는 Fig. 7(a)와 같이 교축방향으로 2.6m 간격으로, 가로보는 1개 요소로 모델링하였고 콘크리트 바닥판은 Shell요소로 제작한 다음 주거더의 node와 Rigid Link로 연결시켰다.

#### 3.3.2 설계하중에 대한 해석

내부지점부가 보강된 플레이트거더 교량을 가장 잘 묘사 할 수 있는 3차원 해석을 수행하였으며, 하중은 도로교 설계편람을 참고하여 가장 불리한 응력을 발생시키는 DB-24를 선택하였다(도로교 설계편람, 2001). 하중조합 시 하중증가계수는 사하중 1.3, 활하중 2.15를 사용하였고 슬래브인 Shell 요소는 FEA프로그램의 특성상 유효하중을 바로태울경우 결과 값의 오차가 커지므로, 프레임 요소에 영향선 해석을 수행한 다음 지간중양과 내부지점에 최대 정모멘트와 부모멘트가 발생 할 수 있도록 차량하중을 절점하중으로 치환하여 모델을 해석을 수행하였다.

설계하중에 대한 응력 검토를 위해 고려한 하중조합 경우는 다음과 같다. 응력의 검토지점은 Fig. 8과 같다.

- ① 자중+콘크리트하중(합성전)
- ② 자중+포장+방호벽+프리스트레스력+차량하중+ $\Delta P$
- ③ 자중+포장+방호벽+프리스트레스력
- ④ 자중+포장+방호벽+차량하중

#### 3.3.3 매개변수의 영향

##### 1) 주거더 높이의 영향

주거더의 높이에 대한 해석결과는 Fig. 9, 10에 나타내었다. 주거더의 높이가 증가 할수록 내부 지점부 주거더

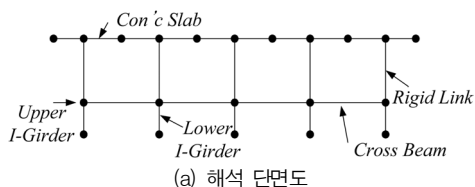


Fig. 7 Three-dimensional frame model

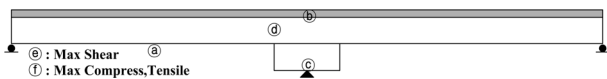


Fig. 8 Review major stress points

의 지간중양의 하연에 생기는 인장응력은 감소하는 것으로 나타났다. 주거더의 높이가 감소할수록 전단력에 저항하는 면적이 줄어들기 때문에 전단응력이 증가하는 것을 볼 수 있다.

##### 2) 보강거더의 높이의 영향

보강거더의 높이에 대한 해석결과는 내부지점부에 대한 보강거더의 보강이 내부 지점부 주거더의 상연에서 발생하는 인장응력을 감소시킬 것으로 예상하였으나 Fig. 11이 보여주듯 보강거더 형고의 확대가 내부지점부의 주거더 상연에 발생하는 인장응력에 미치는 영향은 미비하였다. 그러나 Fig. 12에서 보여주듯이 내부지점부의 전단응력은 50cm정도 보강할 때 약 3, 4, 5거더 모두 약 20%정도를 감소하였다. 보강거더 보강 시 휨 인장 응력 보다는 전단응력의 검토를 기반으로 하여 보강의 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다.

##### 3) 거더 간격의 영향

거더 간격의 영향에 대한 해석결과는 Fig. 13, 14에 나타내었다. 거더 개수가 증가할수록 단면에 발생하는 인장응력과 전단응력이 감소하였으며, 응력 검토지점 중 지간중양의 하연 부분이 거더의 개수에 가장 변화 폭이 큰 것으로 나타났으며, 내부지점부에 있는 주거더의 상연이 가장 작게 영향을 받는 것으로 나타났다.

내부 지점부 보강거더의 하연 응력은 3거더 일 때와 5거더 일 때의 응력이 약 50%정도 감소하는 것으로 나타났으며 상연응력과 하연응력의 결과를 종합해본 결과 거

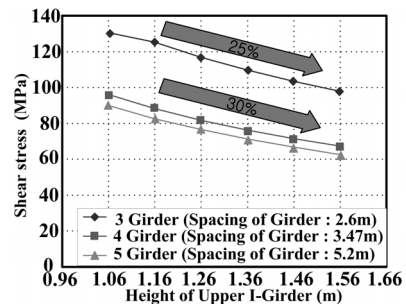


Fig. 9 Variation of the main girder high shear stress(Strengthening reinforced girder height : 1.06m)

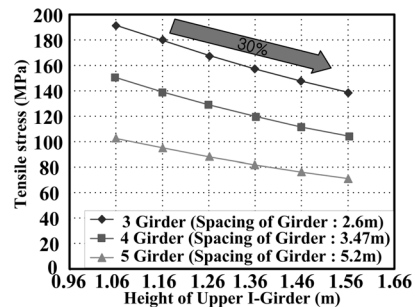


Fig. 10 Changes in the main girders of high stress of inferior (Reinforcing the central span girders reinforced height : 1.06m)

더의 개수가 늘어날수록 주거더의 상연의 인장력은 감소하고 보강거더 하연의 압축응력 또한 감소하는 것으로 나타나 적절한 거더의 개수(간격)를 찾는 것이 중요하다고 판단된다.

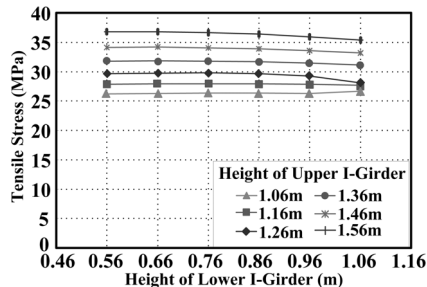


Fig. 11 Staged at the height of the girder reinforced tensile stress (Internal point, Girder spacing : 2.6m)

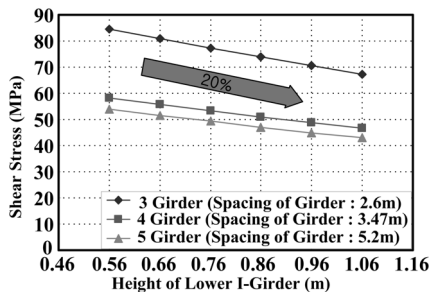


Fig. 12 Variation of shear reinforcement girder height (Internal point, Reinforced the main girder height : 1.56m)

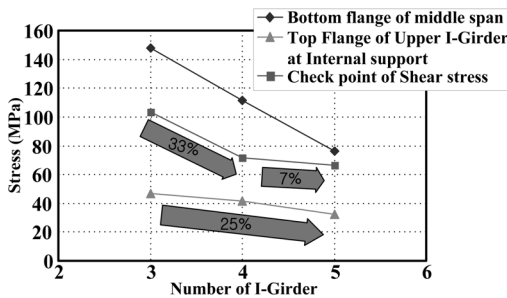


Fig. 13 Girder according to the number of changes in each branch (Main girder height : 1.4m, Reinforcement girder height : 0.56m, 3 → 4 girder : 1.73m, 4 → 5 girder : 0.87m)

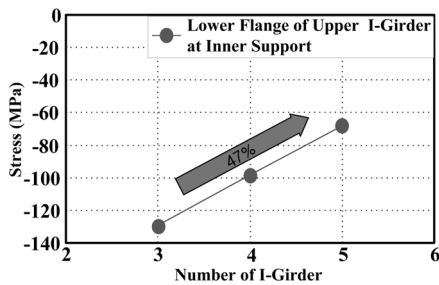


Fig. 14 Stress due to the number of girders Internal point inferior (Main girder height : 1.4m, Reinforcement girder height : 0.56m)

## 4. 적용 가능한 단면 산정

### 4.1 응력검토

정모멘트단면의 압축(상부)플랜지의 허용응력은 콘크리트 바닥판에 의해 판의 국부좌굴이 충분히 방지된 경우이므로 SM490의 허용응력인 190MPa를 적용하였으며 최대부모멘트단면의 압축(하부)플랜지의 허용응력은 최소 두께의 제한 값인  $t \leq b/11.2 = 28.48\text{mm}$  이상인 30mm를 사용하였으므로 190MPa로 적용하였다. 또한, 전단응력은 SM490의 허용응력인 110MPa를 상한 값으로 하여 최대전단응력 발생지점의 응력을 검토하였다.

#### 4.1.1 하중단계별 부분응력(전단, 휨)검토

콘크리트가 하중으로 작용할 때의 하중단계에서는 콘크리트가 단면의 강성에 기여하지 못하므로 상대적으로 많은 단면에서 허용응력을 초과함을 볼 수 있었다. 전체적으로 3거더(거더간격 5.2m)인 경우는 대부분의 단면에서 휨응력을 초과하여 사용할 수 없음을 알 수 있고 반면에 5거더(거더간격 2.6m)인 경우는 모든 단면에서 휨과 전단응력이 허용응력범위 안으로 들어옴을 알 수 있다.

#### 4.1.2 합성응력 검토

프리스트레스력이 도입되는 단면으로 축 방향력과 휨 모멘트를 동시에 받게 된다. 따라서 부분응력이 허용응력을 초과하지 않는 단면에 한하여 식(9)에 의해 합성응력을 검토해야 한다.

$$\frac{f_c}{f_{caz}} + \frac{f_{bcy}}{f_{bagy} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ey}}\right)} + \frac{f_{bcz}}{f_{bao} \left(1 - \frac{f_c}{f_{Ez}}\right)} \leq 1 \quad (9)$$

$f_c$  : 단면에 작용하는 축 방향력에 의한 압축응력

$f_{bcy}, f_{bcz}$  : 각각 강축(y축) 약축(z축) 둘레에 작용하는 휨모멘트에 의한 휨 압축응력

□ : 허용응력이하    ■ : 허용응력초과

상부1.0	3거더	4거더	5거더	상부1.1	3거더	4거더	5거더	상부1.2	3거더	4거더	5거더
0.56	NG	NG	OK	0.56	NG	OK	OK	0.56	NG	OK	OK
0.66	NG	NG	OK	0.66	NG	OK	OK	0.66	NG	OK	OK
0.76	NG	NG	OK	0.76	NG	OK	OK	0.76	NG	OK	OK
0.86	NG	NG	OK	0.86	NG	OK	OK	0.86	NG	OK	OK
0.96	NG	NG	OK	0.96	NG	OK	OK	0.96	NG	OK	OK
1.06	NG	NG	OK	1.06	NG	NG	OK	1.06	NG	OK	OK
상부1.3	3거더	4거더	5거더	상부1.4	3거더	4거더	5거더	상부1.5	3거더	4거더	5거더
0.56	NG	OK	OK	0.56	NG	OK	OK	0.56	OK	OK	OK
0.66	NG	OK	OK	0.66	NG	OK	OK	0.66	OK	OK	OK
0.76	NG	OK	OK	0.76	NG	OK	OK	0.76	OK	OK	OK
0.86	NG	OK	OK	0.86	NG	OK	OK	0.86	OK	OK	OK
0.96	NG	OK	OK	0.96	NG	OK	OK	0.96	OK	OK	OK
1.06	NG	OK	OK	1.06	NG	OK	OK	1.06	OK	OK	OK

Fig. 15 Loads can be applied step by step cross section

상부1.0			상부1.1			상부1.2		
3거더	4거더	5거더	3거더	4거더	5거더	3거더	4거더	5거더
0.56		OK	0.56	NG	OK	0.56		OK
0.66		OK	0.66	NG	OK	0.66		OK
0.76		OK	0.76	NG	OK	0.76		OK
0.86		OK	0.86	NG	OK	0.86		OK
0.96		OK	0.96	NG	OK	0.96		OK
1.06		OK	1.06		OK	1.06		OK

Fig. 16 The result of composite stress

$f_{caz} : \frac{f_{cag} \cdot f_{cal}}{f_{cao}}$  에 의해 산출되는 약축(z축) 방 향의 허 용응력

- $f_{cag}$  : 허용 축 방향응력
- $f_{cao}$  : 허용 축 방향응력의 상한 값
- $f_{cal}$  : 국부좌굴에 대한 허용응력
- $f_{bagy}$  : 허용 휨 압축응력
- $f_{bao}$  : 허용 휨 압축응력의 상한 값
- $f_{Ey}, f_{Ez}$  : 각각 강축(y축) 및 약축(z축) 둘레의 허 용 오 일러 좌굴응력(MPa)

$$f_{Ey} = 1,200,000 / \left(\frac{l}{r_y}\right)^2$$

$$f_{Ez} = 1,200,000 / \left(\frac{l}{r_z}\right)^2$$

$l$  : 각 장에 규정되어 있는 유효 좌굴길이(mm)  
 $r_y, r_z$  : 각각 y축 및 z축 둘레의 단면2차반경(mm)

일반적인 합성교량에 공통으로 적용되는 합성응력의 검토 식은 식(10)과 같다.

$$\left(\frac{f}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v}{v_a}\right)^2 < 1.2 \quad (10)$$

- $f$  : 축방향력과 휨모멘트에 의한 수직응력(MPa)
- $v$  : 축방향력과 휨모멘트에 의한 전단응력(MPa)
- $f_a$  : 허용인장응력(MPa)
- $v_a$  : 허용전단응력(MPa)

식(9), (10)로 합성응력을 검토한 결과는 다음과 같다.

#### 4.2 거더 개수별 적용가능단면 제시

본 연구에 대상이 되는 교량제작에 있어서의 변수는 허 용응력과 합성응력을 넘지 않는 범위에서의 사용성을 만 족시키는 단면의 면적과 경간장을 들 수 있다. 교량의 지

상부1.0			상부1.1			상부1.2		
3거더	4거더	5거더	3거더	4거더	5거더	3거더	4거더	5거더
0.56		30	0.56		24	0.56		29
0.66		29	0.66		24	0.66		28
0.76		28	0.76		23	0.76		28
0.86		28	0.86		23	0.86		27
0.96		27	0.96		22	0.96		26
1.06		26	1.06		21	1.06		26

Fig. 17 Applicable sections and required steel weight

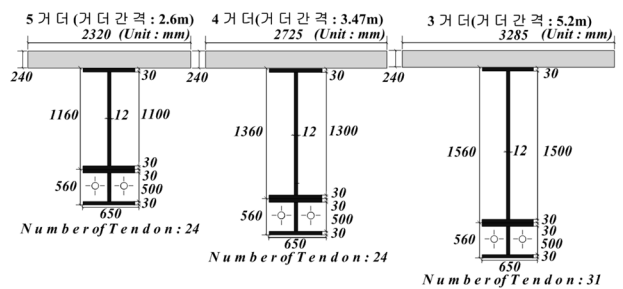


Fig. 18 Applicable sections and tendon number

간은 변수로 설정하지 않았으므로 결국 텐던을 사용하여 단면을 얼마나 줄일 수 있는지의 여부가 적용가능단면 산 정에 있어서 가장 중요한 목표라고 할 수 있다. 따라서 여 러 가지 부분응력의 검토와 합성응력의 검토를 통과한 단 면을 그때의 필요한 텐던의 개수는 다음과 같다.

거더 개수가 늘어나고 단면의 면적이 커질수록 필요한 텐던의 개수는 줄어들 수 있다. 거더의 단면을 줄이 고 텐던의 개수를 늘리는 것으로 적용가능 단면 산정의 기준을 설정하였으며 그 결과 제시된 거더 개수별 적용가 능 단면은 다음과 같다.

#### 4.3 회귀분석

주거더와 보강거더가 서로 변하지 않을 때의 휨과 전단 응력의 변화를 알기 위해 각각 높이별로 Microsoft Excel 을 이용해 단순 회귀분석을 시행하여 회귀 식을 제시하였 으며, 휨 응력에 대한 다중회귀분석을 통계 범용프로그램 인 SPSS를 이용하여 실시하였으며 그에 따른 결과 값과 회귀 식을 제시하였다.

##### 4.3.1 단순 회귀분석

독립변수가 주거더일 때 휨 응력에 미치는 영향과 보강 거더일 때 휨 응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 조사 한 데이터를 기초로 하여 산점도를 그린 후 예상되는 회 귀모델 식의 형식을 결정하고 단순 회귀분석을 실시하여 회귀계수와  $R^2$  값을 구하였다. 여기서  $R^2$  값은 식(11)과 같으며 총변동의 제곱 합은 식(12)와 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (0 \leq R^2 \leq 1) \quad (11)$$

$$SST = SSE + SSR \quad (12)$$

여기서, SST : 총변동의 제곱 합, SSE : 잔차변동의 제곱 합, SSR : 회귀변동의 제곱 합

$R^2$  값은 결정계수로 총변동의 제곱 합과 회귀변동의 제곱 합으로 나타낼 수 있으며  $R^2$ 이 1에 가까울수록 제안된 회귀식의 설명력이 높다고 할 수 있다. 단순회귀분석은 복잡한 과정을 요하는 것이 아니기 때문에 Microsoft Excel을 이용하여 각 거더 높이별 회귀계수를 찾고 회귀식을 제안하였으며 결정계수인  $R^2$ 의 값을 구하여 회귀식의 설명력을 나타내었으며 휨 응력과는 달리 전단응력은 보강거더 단면의 증감과 관계가 없는 곳에서 허용응력 초과가 나타났기 때문에 주거더의 변화에 따른 회귀 식만을 제안하였다.

주거더의 변화에 따른 전단응력의 산점도의 형태는 자연로그와 비슷함을 알 수 있었으며 회귀 식 또한 자연로그를 이용해서 나타내었다.  $R^2$ 의 값은 1로 설명력이 매우 높다고 판단할 수 있다.

주거더에 따른 산점도는 4차식과 유사하게 나타낼 수 있으며 따라서 회귀식은 4차식의 형태로 정리하였다.  $R^2$ 의 값은 최소값이 0.94이상으로 설명력이 매우 높다고 판단된다.

보강거더에 따른 산점도는 3차식과 유사하게 나타낼 수 있으며 따라서 회귀식은 3차식의 형태로 정리하였다.  $R^2$ 의 값은 최소값이 0.99이상으로 설명력이 매우 높다고 판단된다.

#### 4.3.2 다중 회귀분석

다중회귀분석을 시행하기 위해 세워진 가설은 다음과 같다.

- 가설 : 거더 높이는 휨 응력에 영향을 미칠 것이다.  
이 가설을 검증하기 위해 거더의 높이가 휨 응력에 어느 정도 영향을 미치고 있는가를 다중회귀분석을 통해 검토하였다. 이를 위해 주거더와 보강거더의 높이를 각각 독립변수로 설정하였으며 휨 응력을 종속변수로 하는 회귀분석을 실시하여 각 변수가 휨 응력에 미치는 영향을 조사하였다.

다중회귀분석에선 독립변수가 2개 이상이기 때문에 하나의 독립변수가 다른 독립변수의 변화에 영향을 미칠 수 있으므로 다중공선성(Multicollinearity)을 분석을 통한 변수들 간의 상관관계를 분석해야한다. 이번 논문에선 Tolerance로 다중공선성을 판단하였으며 그 값은 1로 다중공선성의 문제는 없는 것으로 판단된다.

Table 2 Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.985	0.970	0.970	10.42099
2	0.992	0.984	0.984	7.59129

- a. Predictors: (Constant), 주거더  
b. Predictors: (Constant), 주거더, 보강거더  
c. Dependent Variable: 휨응력

Table 3 Coefficients

Model		Unstandardized Coefficients		Sig.
		B	Std. Error	
1	(Constant)	554.565	4.608	0.000
	주거더	-348.312	3.488	0.000
2	(Constant)	515.334	4.120	0.000
	주거더	-348.312	2.541	0.000
	보강거더	48.433	2.948	0.000

- a. Dependent Variable: 휨응력

- 회귀식의 설명력은 다음과 같다.  
Model 1 : 주거더 1개의 변수가 종속변수 휨응력의 97%를 설명하고 있다.  
Model 2 : 보강거더가 추가적으로 투입된 결과 설명력이 98.4%로 증가하였다.
- 회귀방정식은 다음과 같다.  
Model 1 :  $Y(\text{휨응력}) = 554.565 - 348.312 \times \text{주거더}$   
Model 2 :  $Y(\text{휨응력}) = 515.334 - 348.312 \times \text{주거더} + 48.433 \times \text{보강거더}$

## 5. 결론

본 연구에서는 연속 강 플레이트 거더교에 내부 지점보강과 외부 프리스트레싱 시스템을 적용시킨 단면을 변수를 변화시키면서 변수의 영향을 분석하고 부분응력과 합성응력을 검토하여 적용 가능한 단면을 각 거더 개수(간격)별로 제시하였다. 보강거더와 주거더의 높이, 거더의 개수(간격)를 변수로 설정하여 해석을 실시한 후 제한적 범위 하에서 도출한 결과는 다음과 같다.

1) 내부 지점부보강과 외부 프리스트레싱 시스템을 해석모델을 통하여 적용가능 한 단면을 제시하였다. 본 결과 실제교량에도 적용가능 할 것으로 판단되었다. 그러나 본 논문에서 제시한 시스템은 시공과정이 중요한 프리스트레싱이 도입되며, 가교이외는 시공사례가 없기 때문에 현장적용 시 신뢰성을 확보하기 위해서는 실험적 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

2) 내부 지점부 보강과 외부 프리스트레싱의 시스템을 해석을 통하여 프리스트레싱력 도입 시 편심으로 인한 모멘트의 작용과 새들을 설치하여 얻은 상향력과 그에 따른 솟음량으로 인하여 교량의 처짐을 감소시켜 사용성 측면



에서 긍정적인 효과를 나타내었다.

3) 거더 개수별 적용가능 단면을 조사한 결과 기존의 플레이트 거더교보다 단면의 크기가 줄었으며, 그것으로 인해 증가되는 휨 응력은 프리스트레싱으로 보완가능 하였다. 그러나 전단응력은 허용응력 초과 단면이 발생하여 기존의 플레이트 거더교와는 다르게 전단응력이 중요한 검토요소가 됨을 확인하였다.

4) 설계자가 본 논문에서 적용한 시스템을 사용하여 단면을 고려할 경우 단면에 발생하는 응력 값을 예측하는데 도움을 주기위하여 단순, 다중 회귀분석을 통한 휨과 전단응력의 예측 식을 제안하였다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 산하 한국건설교통기술평가원의 「성능중심의 건설기준 표준화 연구단」에 의해 수행되는 2006 건설교통 R&D 정책 인프라 사업(06-기반구축-A-01)의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 건설교통부, 도로교 설계편람, 2001.
2. 김경민, 지점부 단면형교 확대를 도입한 연속 프리스트레스트 Steel I-Girder의 휨 거동, 성균관대학교 석사학위 논문, 2005.

3. 김두천, 2경간 연속슬래브교 외부강선 보강 공법의 개발 연구, 아주대학교 석사학위 논문, 2004.
4. 신재우, 외부강선을 이용한 연속교 보강공법의 실험적 연구, 아주대학교 석사학위 논문, 2007.
5. 임상훈, 외부 비부착 텐던을 가진 프리스트레스트 Steel I-Beam의 휨 거동특성, 성균관대학교 석사학위 논문, 2001.
6. 조두용, 연속 프리스트레스트 강 I-Girder의 휨 거동특성, 성균관대학교 석사학위 논문, 2002.
7. 최덕일, 외부 긴장재로 보강된 연속 강합성교의 증가 프리스트레스트를 사용한 내하율 선정, 한양대학교 석사학위 논문, 2008.
8. 한국도로공사, 도로설계요령, 2002.
9. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 2005.
10. Bathe, K. J., Finite Element Producers, Prentice-Hall, 1996.
11. Hambly, E. C., Bridge deck behaviour, 2nd Edition, E&Fnspon, 1991.
12. Lorenc Wojciech, Kubica Ernest, "Behavior of composite beams prestressed with external tendons : Experimental study", Journal of constructional steel research, Vol. 62, Issue 12, 2006, pp.1353-1366.
13. Shantong, Z., Prestressed steel structures, Harbin Polytechnical Inc., China, 1986, pp.144-169.
14. Shiming Chan., "Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments", Journal of constructional steel research, Vol. 61, Issue 12, 2005, pp.1613-1630.

(접수일자 : 2009년 9월 11일)  
(심사완료일자 : 2010년 1월 13일)

## 요 지

본 연구에서는 해석의 결과 내부 지점부 보강과 외부프리스트레싱의 도입이 일반 플레이트거더교의 단면보다 단면감소의 효과가 있음을 확인하였으며 특히 외부프리스트레싱의 도입으로 얻은 속임은 교량의 치짐을 감소시켜 사용성 측면에서 긍정적인 효과를 나타냄을 확인하였다. 해석결과를 바탕으로 하여 거더 개수 별 적용가능 단면을 도시 하였으며, 거더 개수가 4개일 경우에 한하여 회귀분석을 시행해 회귀식을 제시함으로써 추후에 이와 같은 단면을 사용할 때 응력예측을 가능할 수 있게 하였다.

**핵심 용어 :** 외부프리스트레싱, 내부지점 보강, 유한요소해석, 회귀분석