

## PSC 거더교의 장경간화 평가 기법 : II. 예제 분석

### Assessment for Extending Span Ranges of PSC Girder Bridges : II. Application to a Sample Bridge

전세진\*

Jeon, Se Jin

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate several strategies that can be used to extend the span of conventional PSC girder bridge and to propose a systematic procedure to evaluate the effect of each strategy on the span. In the preceding companion paper, fundamental equations were derived which constitute the assessment graphs and a possible domain for the design. Quantitative evaluation for extension of the span follows here by adopting a sample PSC girder bridge. It apparently shows a number of advantages of the proposed scheme in finding out why and how each strategy contributes to the span extension and in suggesting further improvement for a longer span. The results imply that increasing the strength of a girder, the multistage prestressing with the secondary tendons prestressed before composite action with a deck, and Decked PSC girder are very effective among the strategies examined. It is expected that the span of the PSC girder bridge can be well extended up to 50 m to 70 m which corresponds to a span of the conventional box girder bridges.

**Keywords :** PSC girder, long span, prestressing tendon, high strength, multistage prestressing

#### 요 지

이 연구의 목적은 PSC 거더교를 통상적인 경간 이상으로 장경간화할 수 있는 기법들을 고찰하고, 각 기법이 경간에 미치는 영향을 평가하는 체계적인 방법론을 제안하는 것이다. 전편 논문에서는 평가에 필요한 그래프를 구성하는 기본적인 수식들을 유도한 바 있다. 여기에서는 이러한 방법론을 PSC 거더교 예제에 적용하여 각 장경간화 기법들이 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 제안된 도식적인 방법은 각 기법이 장경간화에 기여하는 이유를 일목요연하게 파악할 수 있고, 더 나아가 장경간화를 위한 개선점을 용이하게 도출할 수 있는 장점이 있음을 보였다. 분석 결과 여러가지 기법들 중 특히 거더의 고강도화, 바닥판 합성 전 2차 긴장을 실시하는 단단계 긴장 기법, Decked PSC 거더 기법 등이 장경간화에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 장경간 거더의 증가된 자중에 대처할 수 있는 시공성 및 경제성만 뒷받침된다면 PSC 거더교도 기존 박스거더교의 영역인 50~70 m 경간까지 충분히 설계 및 시공될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어 :** PSC 거더, 장경간, 프리스트레싱 텐던, 고강도, 단단계 긴장

#### 1. 서 론

국내의 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 거더교는 한국도로공사의 PSC 빔 표준도에 근거하여 도로교의 경우 25~35 m 경간에, 철도교에서는 20~25 m 경간에 주로 적용되어 왔으며, 그러한 경간에 대해서는 가장 경제적인 형식으로 인식되어 왔다. 최근 국내에서 개발된 신형식 거더교들도 주로 50 m 이하 경간에 적용되고 있는 실정이며, 50 m 이상 경간의 거더교는 아직까지 PSC 박스거더교나 강 박스 거더교가 주를 이루어 왔다. 이 연구의 목적은 기존 PSC 거더교를 박스거더교의 영역인 50 m 이상 경간까지 확장하기 위해 적용 가능한 각종 장경간화 기법(PCI, 2003;

White 등, 2004)들의 영향을 합리적이고 체계적으로 분석할 수 있는 기법을 제안하는데 있다. 이 논문의 전편(전세진 등, 2009)에서는 장경간화 기법들을 재료, 설계 및 시공 측면으로 분류하고, PSC 거더 설계에 있어 가장 핵심을 이루는 허용응력설계법에 근거하여 각각의 장경간화 기법이 경간 증가에 미치는 기여도를 일목요연하고 용이하게 평가할 수 있는 방법론을 제안하였다. 여기에서는 제안된 기법을 실제의 PSC 거더교 예제에 적용하여 각 장경간화 기법을 단독으로 또는 조합하여 적용한 경우의 경간 증가량을 비교분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 PSC 거더교의 장경간화를 위한 바람직한 설계 방향에 대하여 논하였다.

\*정회원 · (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : jsj@dwconst.co.kr)

## 2. 예제 개요

장경간화 기법들의 적용 효과를 비교 분석하기 위한 PSC 거더교 예제는 그림 1에서 보는 바와 같이 교폭이 12.6 m 이고 총 5개의 PSC 거더가 2.5 m 간격으로 배치된 단순교로서 통상적으로 빈번히 쓰이고 있는 형태이다. 공정한 비교를 위해 거더의 형고는 한국도로공사의 PSC 빔 표준도 중 35 m 경간에 해당하는 2.2 m의 형고로 고정시킨 후 각 장경간화 기법을 적용했을 때 경간 증가량을 도로교설계기준(2005)에 기초하여 분석해 보았다. 거더 단면은 단면형상을 개선하는 장경간화 기법을 적용하는 경우를 제외하고는 기본적으로 35 m 경간의 표준도와 동일하게 보았다. 바닥판의 두께는 일반 현장타설 바닥판을 염두하여 0.25 m로 보았다. 합성단면의 단면상수 계산시 사용되는 플랜지 유효폭은 내측 거더의 경우 거더 간격과 같은 2.5 m로 산정된다. 설계 활하중은 1등교에 해당하는 DB-24 또는 DL-24를 적용하였다. 긴장재의 제원은 PSC 빔 표준도와 같이 12.7 mm 직경의 강연선 12개를 66 mm 직경의 덕트에 삽입하는 것으로 보았다( $A_{ps}=12 \times 98.71 \times 10^{-6}=1.1845 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ). 이 경우 덕트의 개수가 많아지면 덕트 및 정착구의 최소간격 문제로 배치가 어려울 수도 있지만 이러한 문제는 15.2 mm의 대직경 강연선을 더 많은 개수만큼 삽입하여 덕트의 개수를 줄임으로써 해결할 수 있는 것으로 보았다. 긴장재의 인장강도  $f_{pu}$ 는 1,860 MPa, 즉시손실 후의 초기 프리스트레스  $f_{pi}$ 는 1150 MPa, 모든 손실 후의 유효 프리스트레스  $f_{pe}$ 는 980 MPa로 가정하였다. 고강도 콘크리트를 적용한 경우를 제외하고 거더의 설계기준강도 및 긴장시 초기 압축강도는 표준도에 사용되는 바와 같이 각각  $f_{ck,g}=40 \text{ MPa}$ ,  $f_{ci,g}=32 \text{ MPa}$ 로 보았으며, 바닥판의 설계기준강도 및 초기 압축강도는 현장타설 바닥판에 일반적으로 사용되는 바와 같이 각각  $f_{ck,d}=27 \text{ MPa}$ ,  $f_{ci,d}=21.6 \text{ MPa}$ 로 보았다. 가로보는 단부, 중앙부, 1/4 경간 지점에 위치하는 것으로 보았으며 경간에 위치한 가로보의 두께는 0.3 m이다.

바닥판 상부에 작용하는 활하중이나 2차 고정하중(포장, 방호벽 등)에 대한 거더 횡분배 이론에는 여러 가지가 있으나 여기에서는 좀 더 정확성을 기하기 위하여 유한요소법으로 전체 교량을 모델링하는 방법을 취하였다. 즉, 바닥판은 셀 요소로, 거더와 가로보는 빔 요소로 모델링한 뒤 DL 및 DB 하중을 주어진 교폭을 고려하여 횡방향으로 1차로부터 3차로까지 배치하고(3차로의 경우 0.9의 감소계수 적용) 종방향으로는 영향선 이론에 따라 가장 불리한 위치에 재하함과 동시에 2차 고정하중을 추가로 고려한 후 유한요소해석을 통해 거더에 발생하는 최대 휨모멘트를 산정하였다. 이러한 최대 휨모멘트를 발생시키는 하중들을 등가의 분포하중  $w_l$ (거더에 작용하는 선하중)로 환산하면 거더의 제원이나 경간, 내측 및 외측 거더 여부 등에 따라 약간의 차이는 있지만 최대 20 kN/m를 초과하지 않았다. 따라서, 이 예제에서는  $w_l=20 \text{ kN/m}$ 로 보았다. 내측 및 외측 거더는 작용하는 단면력 및 합성단면의 단면계수에 약간의 차이가 있지만 예비해석 결과 단계별 응력 수준에 큰 차이가 있지는 않았으므로 편의상 내측 거더를 분석대상으로 삼았다. 가로보 자중에 의한 휨모멘트와 동일한 효과를 발생시키는 등가의 분포

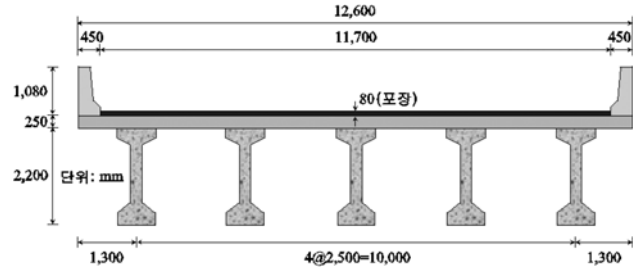


그림 1. PSC 거더교 예제

하중  $w_c$ 는 같은 내측 거더라도 경간별로 약간의 차이가 있지만 불리한 경우를 가정하여  $w_c=2 \text{ kN/m}$ 로 두었다.

콘크리트의 초기와 사용시 허용인장응력 및 허용압축응력은 설계기준별로 차이가 있는데 도로교설계기준(2005)을 기초로 할 때 전편 논문(전세진 등, 2009)의 허용응력과 콘크리트 압축강도의 관계를 나타내는 계수는 각각  $a_1=0.25$ ,  $a_2=0.55$ ,  $a_3=0.5$ ,  $a_4=0.4$ 이다. 다만, 초기 허용인장응력은 1.4 MPa를 초과하면 안된다는 제한사항이 있다.

## 3. 예제 분석

### 3.1 일반 PSC 거더

#### 3.1.1 표준형 PSC 거더

한국도로공사의 PSC 빔 표준도에 의한 거더의 제원을 플랜지 유효폭 내의 바닥판과 함께 나타내면 그림 2와 같다. 단면 제원은 다음과 같으며, 기호의 의미는 전편 논문(전세진 등, 2009)을 참조하도록 한다;  $\gamma_c=2,500 \text{ kgf/m}^3$ ,  $\gamma_{c,d}=2,500 \text{ kgf/m}^3$ ,  $A_c=0.8067 \text{ m}^2$ ,  $A_d=0.625 \text{ m}^2$ ,  $I_c=0.4795 \text{ m}^4$ ,  $A_c^*=1.3697 \text{ m}^2$ ,  $I_c^*=1.0153 \text{ m}^4$ ,  $y_i=1.143 \text{ m}$ ,  $y_b=1.057 \text{ m}$ ,  $y_{i,g}^*=0.622 \text{ m}$ ,  $y_{i,d}^*=0.872 \text{ m}$ ,  $y_b^*=1.578 \text{ m}$ ,  $e_p=0.929 \text{ m}$ . 또한, 단순교이므로  $b_1=b_2=b_3=0.125$ 이다.

대상 표준도의 경우 5개의 덕트를 배치하여 35 m 경간에 사용되고 있다. 전편 논문(전세진 등, 2009)에서 제안된 도식적인 방법을 통해 이론적으로 분석한 결과 같은 표준도 단면에서 최대 배치 가능한 덕트의 개수 및 최대 경간은 그림 3과 같이 6개 덕트 및 42 m 경간으로 파악되었다. 또한 그림 3에 함께 나타내었듯이 표준도와 같이 5개의 덕트를 배치하더라도 약 39 m 경간까지는 가능한 것으로 나타나므로 현재 사용되는 35 m 경간은 다소의 여유 및 안전율을 둔 것으로 파악된다. 한편, 덕트 개수 5~6개 수준에서는 최대 경간을 좌우하고 있는 사용시의 거더 상연응력 및 하연응력에 대한 식이 서로 상당히 근접하고 있어 상하연의

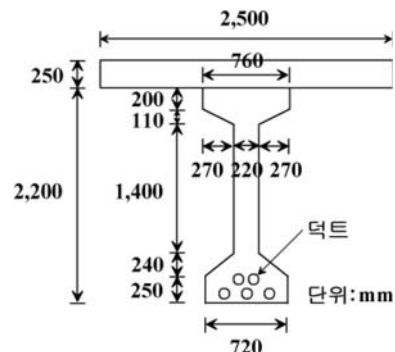


그림 2. PSC 빔 표준도(35 m)

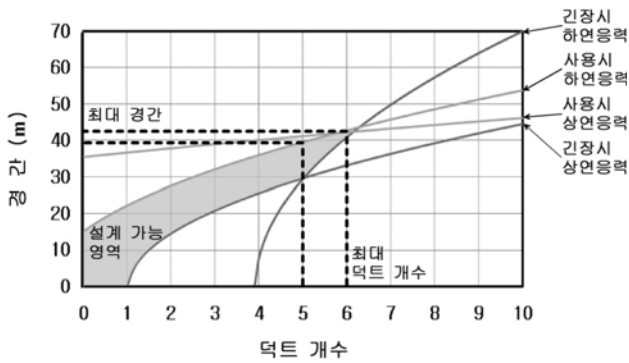


그림 3. 일반 PSC 거더교의 경간 평가

여유도가 유사하므로 단면설계상의 효율성이 비교적 우수한 것으로 판단된다.

### 3.1.2 고강도 콘크리트의 영향

현실적으로 현장타설 바닥판의 경우 고품질 확보에 어려움이 있을 것으로 보아 기본 설계기준강도를 유지하였으며, 거더의 설계기준강도를 기존 국내 연구(한국도로공사, 1998)나 관련 전문가들의 의견을 참조하여 기존 40 MPa에서 60 MPa 또는 80 MPa로 증가시켜 그 영향을 분석하였다. 거더 콘크리트의 고강도화는 허용응력을 증가시켜 경간을 확장하는 효과가 있으며, 바닥판과의 강도 차이가 더욱 벌어짐에 따라 증가된 탄성계수비가 단면상수 계산시 영향을 미친다. 설계기준강도 60 MPa에서 변동되는 단면상수는  $A_c^* = 1.3075 \text{ m}^2$ ,  $I_c^* = 0.9786 \text{ m}^4$ ,  $y_{i,g}^* = 0.657 \text{ m}$ ,  $y_b^* = 1.543 \text{ m}$ 이며, 80 MPa에 대해서는  $A_c^* = 1.2662 \text{ m}^2$ ,  $I_c^* = 0.9524 \text{ m}^4$ ,  $y_{i,g}^* = 0.683 \text{ m}$ ,  $y_b^* = 1.517 \text{ m}$ 이다.

그림 4는 강도가 증가됨에 따라 추가로 삽입 가능한 덕트의 개수와 그에 따라 증가되는 경간을 비교하여 보여주고 있으며, 이처럼 각각의 설계 변수가 경간에 미치는 영향을 일목요연하게 파악할 수 있다는 것이 제안된 방식의 큰 장점이다. 편의상 설계 가능 영역만을 비교하였으며, 이를 구성하는 그래프들은 생략하였다. 40 MPa에서 42 m 경간까지 가능했던 것이 60 MPa에서는 51 m, 80 MPa에서는 59 m 경간으로 장경간화가 가능하며, 이처럼 고강도화가 장경간화에 미치는 영향은 매우 두드러짐을 알 수 있다. 각각의 강도별로 곡선의 형태를 비교해보면 가장 큰 차이를 보이는 것이 압축응력과 관련된 곡선들인 긴장시 하연응력과 사용시 상연응력이며, 따라서 이들 곡선들의 변화가 강도 측면에서 장경간화를 가능케한 주요 요인이라고 할 수 있다.

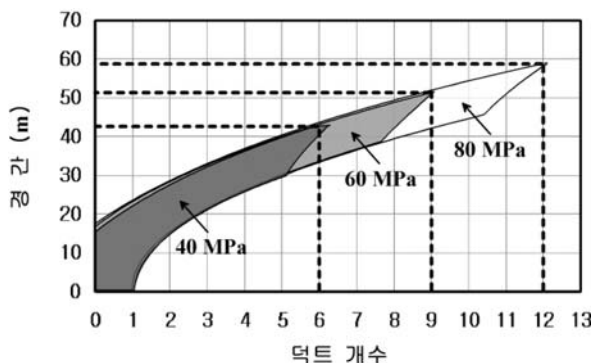


그림 4. 고강도 콘크리트 거더의 영향 평가

미국의 AASHTO 설계기준(2002)을 참조한 국내 도로교설계기준(2005)에 제시된 허용응력은 초기 허용인장응력을 콘크리트 강도에 관계 없이 1.4 MPa로 제한하고 있어 고강도화의 장점이 제약된다는 지적이 있었으며(민경환 등, 2008), 주된 이유는 초기 압축강도가 32 MPa(설계기준강도 40 MPa 정도에 해당)를 초과할 경우에는 그 증가분이 초기 허용인장인력에 반영되지 않기 때문이라고 하였다. 하지만, 이 연구에 의하면 장경간 영역에서 최대 경간을 결정하는 곡선은 초기 허용인장응력에 관련된 긴장시 상연응력은 아닌 것으로 나타났으므로 대상 표준도에 있어서 설계기준상의 그러한 제한 사항이 장경간화에 큰 제약이 되지 않을 것으로 판단된다.

### 3.1.3 경량 콘크리트의 영향

경량 콘크리트의 단점이라고 할 수 있는 강도 저하 문제를 극복하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있지만 여기에서는 비교적 강도가 낮은 바닥판에만 경량 콘크리트를 적용한 상황을 가정하였다. 실제로 국내의 경우 현재까지는 교량 구성 요소 중 경량 콘크리트 바닥판에 대한 연구가 주를 이루고 있는 실정이다. 여기에서는 바닥판 콘크리트의 단위중량이 2,300 kgf/m<sup>3</sup>에서 1,800 kgf/m<sup>3</sup>로 경감되었다고 가정했으며, 이 때 철근을 고려한 바닥판의 단위중량은 2,000 kgf/m<sup>3</sup>이다.

그림 5와 같이 바닥판에만 경량 콘크리트를 적용한 경우 경간에 미치는 영향은 비교적 미미해서 일반 콘크리트 적용시의 경간인 42 m 보다 2 m 정도 증가한 것으로 나타났다. 이는 바닥판 지중의 크기가 상대적으로 기타의 지중이나 활하중에 비해 크지 않기 때문으로 판단된다. 따라서, 경량 콘크리트를 통해 장경간화를 달성하기 위해서는 거더 자체에도 이를 적용하는 방안을 강구해야 할 것으로 생각된다.

### 3.1.4 단면형상 개선의 영향

그림 2와 같은 표준도 단면을 휨효율이 좀 더 높은 단면으로 개선하는 것이 경간에 미치는 영향을 분석해 보았다. 최적 단면을 선정함에 있어 기존에 제안된 단면이나 단면 분석자료(박영하 등, 2008; Bardow 등, 1997; Meir 등, 1997)도 함께 참조하였다. 공정한 비교를 위해 콘크리트 물량이 동일하도록 단면적은 그림 2와 동일한 상태에서 전편 논문(전세진 등, 2009)의 식 (1)과 같은 휨효율 계수(신현목, 2008)가 최대가 되도록 단면 상세를 조절해 보았다. 그림 2

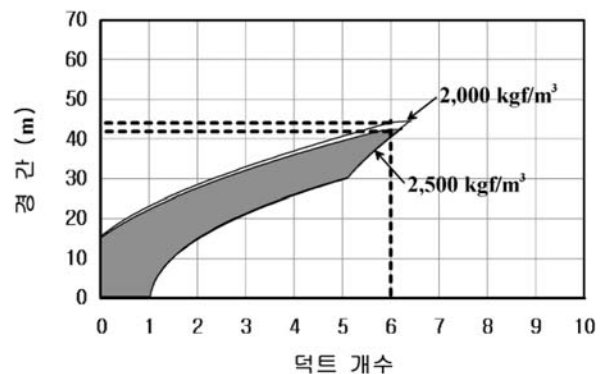


그림 5. 경량 콘크리트 바닥판의 영향 평가

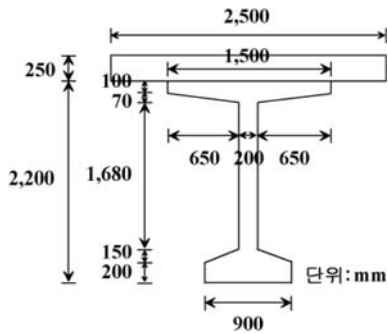


그림 6. 개선된 단면(Bulb-T형)

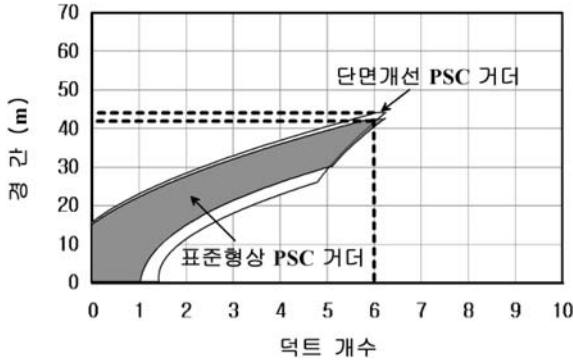


그림 7. 개선된 단면의 영향 평가

의 표준 형상에 대한 휨효율 계수는 합성 전후 각각 0.492, 0.539이며, 이를 그림 6과 같이 Bulb-T 단면으로 개선한 결과 휨효율 계수가 합성 전후 각각 0.555 및 0.562까지 향상될 수 있었다. 이 과정에서 복부 두께는 포물선형 텐던이 복부를 통과하는데 요구되는 최소 두께 수준으로 줄였으며, 상부플랜지의 폭을 넓혔다. 하부플랜지의 크기는 단면 효율성 이외에도 배치해야 할 텐던의 개수, 거더 거치시 전도에 대한 안전성, 슈(shoe)의 크기, 타설시 충전성 등을 두루 고려하여 결정해야 한다. 상부플랜지와 하부플랜지의 상대적인 크기는 중립축의 위치에 영향을 미치는데 예를 들어 중립축이 상승하면 텐던의 편심이 커져서 프리스트레싱의 효과가 커지는 반면 하연까지의 연단거리가 증가하여 고정하중이나 활하중에 의한 하연 인장응력이 증가하는 등 장단점이 혼재하게 된다. 따라서, 최적 단면에 대한 절대적인 기준은 없으며 거더 제원이나 하중 조건 등에 따라 여러 가지 경우를 검토해 보아야 한다. 그림 6에서  $I_c=0.5428 \text{ m}^4$ ,  $I_c^*=1.0471 \text{ m}^4$ ,  $y_t=1.105 \text{ m}$ ,  $y_b=1.095 \text{ m}$ ,  $y_{t,g}^*=0.6 \text{ m}$ ,  $y_b^*=1.6 \text{ m}$ ,  $e_p=0.967 \text{ m}$ 로 표준 PSC 거더와 비교할 때 단면 2차모멘트는 합성 전후 각각 13.2% 및 3.1%만큼 증가하였다.

그림 7은 단면을 개선했을 때의 경간 증가량을 표준적인 PSC 거더 단면을 사용했을 때와 비교하고 있으며, 약 2 m 정도 경간이 증가하였다.

### 3.1.5 거더 연속화의 영향

한 예로 2경간의 경우 바닥 타설시 종방향으로 2개의 단순지지된 거더 사이가 함께 타설되어 거더가 연속화된다면 포장 및 활하중에 의한 모멘트가 단순교일때의 56% 수준으로 감소한다. 한편, 바닥 타설 이전에 이미 거더를 연속화시킬 경우 바닥 자중에 의한 모멘트 역시 같은 폭으로 감소하여 경간이 더욱 길어질 수 있다. 그림 8에서 경우

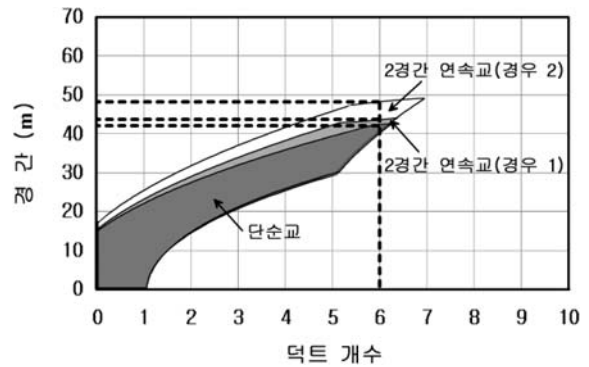


그림 8. 거더 연속화의 영향 평가

1이 전자에 해당하며 단순교일 때의 42 m 보다 1 m 남짓 경간이 증가한다. 경우 2는 후자에 해당되며 약 48 m 경간까지 가능한 것으로 분석된다.

물론 연속교의 경우에는 중간 지점부에서 발생하는 부모멘트에 대한 추가적인 검토도 필요하지만 이는 적절한 보강 또는 프리스트레싱 텐던의 연속화를 통해 충분히 대처할 수 있는 것으로 보였다.

## 3.2 다단계 긴장식 PSC 거더

### 3.2.1 바닥판 합성 전 2차 긴장시

바닥판 합성 전 2차 긴장시 1차 및 2차 텐던의 편심은 각각  $e_{p,1}=0.929 \text{ m}$ ,  $e_{p,2}=0.857 \text{ m}$ 이다. 제안된 도식적 방법의 장점 중 하나는 각 장경간화 기법을 적용했을 때 장경간이 가능한 이유를 논리적으로 설명할 수 있다는 것이다. 그림 9는 바닥판이 합성되기 이전에 1개의 2차 텐던을 긴장한 경우의 설계 가능 영역을 보여주고 있다. 그림 9와 그림 3을 비교해 보면 다단계 긴장시의 장점을 파악할 수 있으며, 그림 3의 일반 PSC 거더는 2차 텐던의 개수가 0인 다단계 긴장의 특수한 경우로도 볼 수 있다. 이를 살펴보면 2차 텐던을 긴장함으로써 사용시 상하연응력에 해당하는 그래프의 위치를 상향시켜 설계 가능 영역의 크기가 확장되었음을 알 수 있다. 특히, 일반 PSC 거더는 사용시 하연응력이 설계 가능 영역의 크기를 좌우하는 경우가 많은데 2차 긴장을 통해 이러한 사용시 하연응력 그래프의 위치가 크게 상향되는 효과에 주목할 만 하다. 그 결과 최대 가능 경간 및 각각의 덕트 개수에서 가능한 경간이 증가하게 된다. 2차 텐던의 개수를 늘려가면 이처럼 상하연응력의 그래프도 계속 상향되지만 2차 긴장시 상하연응력의 그래프도 함께 상향되게 된다. 2차 텐던의 개수가 특정한 개수에 이르면 설계 영역의 하한을 지배하는 2차 긴장시 하연응력의 그래프가 과도

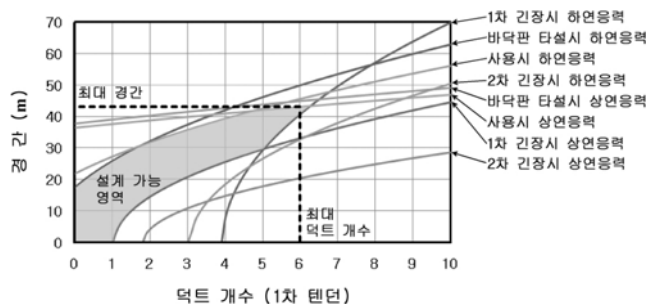


그림 9. 다단계 긴장의 경간 평가(2차 텐던이 1개일 때)

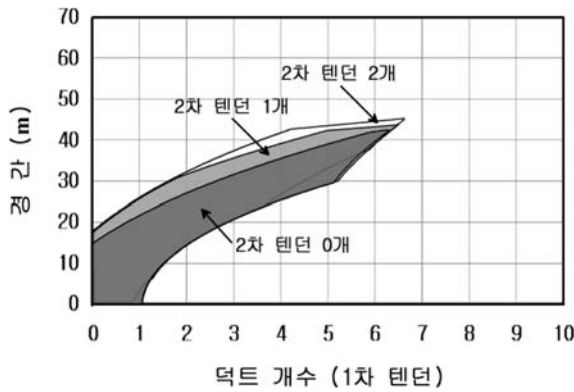


그림 10. 다단계 긴장의 영향 평가(바닥판 합성 전 2차 긴장시)

하게 상향되어 결국 설계 가능 영역이 존재하지 않게 되는 시점이 나타나며, 이러한 과정을 통해 이론적으로 배치 가능한 2차 텐던의 최대 개수를 구할 수 있다. 또한 그림 9에 내재된 다단계 긴장의 또 다른 의미로 한번에 긴장하는 경우 이론적으로 배치가 불가능한 개수의 텐던도 2차에 거쳐 다단계로 분산시켜 긴장하면 설계 가능 영역이 형성될 수 있어 장경간화가 가능하다는 점도 파악할 수 있다.

그림 10은 주어진 예제에서 2차 텐던의 개수를 변화시켜 가며 설계 가능 영역 형태의 변화 및 최대 가능한 경간을 비교한 것이다. 편의상 2차 텐던 개수가 0~2개인 경우만을 나타내었지만 이론적으로 2차 텐던은 4개까지 배치 가능한 것으로 나타났다. 하지만 설계 가능 영역의 형태상 2차 텐던이 3개일 때 45 m의 최대 경간이 산출되었다.

첨언하자면 이 예제의 경우 장경간 구간을 지배하고 있는 것이 사용시의 상연응력이어서 2차 텐던 개수 증가에 따른 경간 증가량이 크지는 않았지만 만약 장경간 구간을 사용시의 하연응력이 지배하는 예제였다면 경간 증가 경향이 더욱 두드러졌을 것으로 생각된다. 이러한 사실은 사용시 하연응력이 지배하는 덕트 개수 3~4개 구간에서는 경간 증가량이 더욱 뚜렷하다는 점으로 뒷받침될 수 있다.

### 3.2.2 바닥판 합성 후 2차 긴장시

바닥판 합성 후 2차 긴장시 1차 및 2차 텐던의 편심은 각각  $e_{p,1}=0.929$  m,  $e_{p,2}^*=1.378$  m이다. 이 경우에도 2차 긴장에 의해 사용시 상하연응력과 관련된 그래프를 상향시켜 설계 가능 영역을 확장시킨다는 기본 원리는 3.2.1과 동일하지만 식의 형태상 상향되는 경향이 다소 둔화되어 바닥판 합성 전 2차 긴장시보다 효율성이 떨어진다. 또한 이 예제의 경우에는 전면 논문(전세진 등, 2009)의 식 (15)와 같이 바닥판의 허용응력을 고려한 제약조건 때문에 최대 배치 가능한 2차 텐던의 개수가 2개로 제한되는 단점도 나타났다. 그림 11은 2차 텐던의 개수를 변화시켜 가며 설계 가능 영역의 형태 및 최대 가능 경간을 비교한 것으로서 이 예제의 경우에는 2차 텐던 개수에 따른 최대 경간의 증가량이 미미하게 나타나고 있다. 마찬가지로 장경간 구간을 사용시의 하연응력이 지배했다면 2차 긴장에 의한 경간 증가 경향이 더욱 뚜렷했을 것으로 생각된다.

### 3.3 Decked PSC 거더

Decked PSC 거더에서는 바닥판과 거더가 일체로 타설되

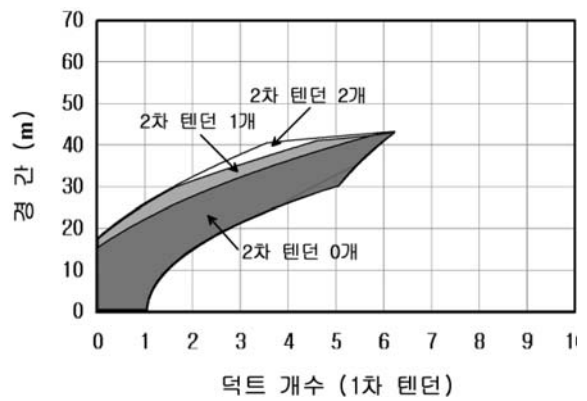


그림 11. 다단계 긴장의 영향 평가(바닥판 합성 후 2차 긴장시)

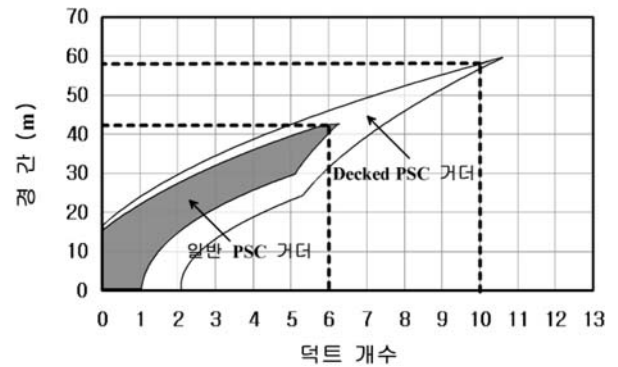


그림 12. Decked PSC 거더의 영향 평가

어 제작되므로 바닥판의 강도도 거더의 강도와 같은 40 MPa로 보았다. 이 때  $A_c^*=1.4317$  m<sup>2</sup>,  $I_c^*=1.0487$  m<sup>4</sup>,  $y_{i,d}^*=0.839$  m,  $y_b^*=1.611$  m,  $e_p^*=1.438$  m이다. 그림 12는 Decked PSC 거더의 크게 확장된 설계 가능 영역을 일반 PSC 거더와 비교하여 보여주고 있으며, 일반 PSC 거더의 최대 경간인 42 m가 Decked PSC 거더에서는 58 m까지 장경간화됨을 알 수 있다. 기존의 Decked 거더에 대한 연구(Cisneros 등, 2008; Smith 등, 2008)는 급속 시공이나 Decked 거더의 횡방향 일체성 확보 방법 등에 초점이 맞추어져 있었으나, 이 연구 결과에 의하면 PSC 거더의 장경간화를 위해서도 적용이 유력한 기법 중 하나로 생각된다.

## 4. 분석결과 비교고찰

이상과 같이 단면형상 개선 기법을 제외하고는 단면형상을 35 m 경간의 도로교용 표준 PSC 거더(형고 2.2 m)와 동일하게 설정한 상태에서 각각의 장경간화 기법을 적용한 결과를 요약하면 표 1 및 그림 13과 같다. 여기에서는 좀 더 명확한 비교를 위해 소숫점 단위까지 경간을 표시하였다. 교량 및 거더 단면의 제원이나 하중 조건 등에 따라 각 기법이 장경간화에 영향을 미치는 정도에는 변동이 있을 수 있다. 이 예제의 경우에는 고강도 콘크리트, 거더 연속화, Decked PSC 거더 기법이 특히 효과적인 것으로 나타났다. 하지만, 2.2 m 형고를 유지하면서 단일 기법만을 적용하면 기법에 따라 60 m 경간에 가깝게 장경간화가 될 수 있지만 이를 초과하지는 못할 것으로 예측되었다. 따라서, PSC 거더를 70 m 경간까지 더욱 장경간화하기 위해서는 장경간화 기법을 몇가지 조합하여 적용함과 동시에 합리적인 범위 내

표 1. 장경간화 기법의 적용 결과(형고 2.2 m)

장경간화 기법		개선 사항	최대 텐던(덕트) 개수 <sup>2)</sup>	최대 경간 (표준 거더 대비 증가량)	장경간 순위
미적용	표준 PSC 거더 <sup>1)</sup>	-	6	42.2 m	10
재료 개선	고강도 콘크리트 I	거더 설계기준강도 40 MPa → 60 MPa	9	51.4 m (+21.8%)	3
	고강도 콘크리트 II	거더 설계기준강도 40 MPa → 80 MPa	12	59.1 m (+40.0%)	1
	경량 콘크리트	바닥판 단위중량 2,500 kgf/m <sup>3</sup> → 2,000 kgf/m <sup>3</sup>	6	43.8 m (+3.8%)	6
설계 및 시공 개선	단면형상 개선	I형 → Bulb-I형 (단면적 및 형고 동일, 합성 전후 단면2차 모멘트값 각각 13.2% 및 3.1% 증가)	6	43.6 m (+3.3%)	7
	연속화 I (2경간 연속)	포장 및 활하중에 대해 연속 거동	6	43.4 m (+2.8%)	8
	연속화 II (2경간 연속)	바닥판 지중, 포장 및 활하중에 대해 연속 거동	6	48.2 m (+14.2%)	4
	다단계 긴장 I	바닥판 합성 전 2차 긴장	6(1차 텐던)+3(2차 텐던)	44.7 m (+5.9%)	5
	다단계 긴장 II	바닥판 합성 후 2차 긴장	6(1차 텐던)+2(2차 텐던)	42.5 m (+0.7%)	9
	Decked PSC 거더	거더와 바닥판을 일체 제작 및 긴장	10	58.3 m (+38.2%)	2

<sup>1)</sup>실제로는 텐던 5개를 삽입하여 35 m 경간에 적용.

<sup>2)</sup>덕트 개수가 많아서 덕트 및 정착구 배치가 어려운 경우 강연선의 직경 및 덕트당 강연선 개수를 증가시켜 덕트 개수를 줄여야 함.

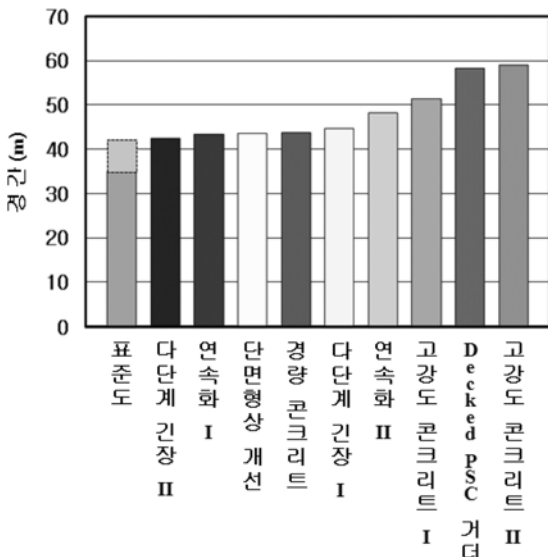
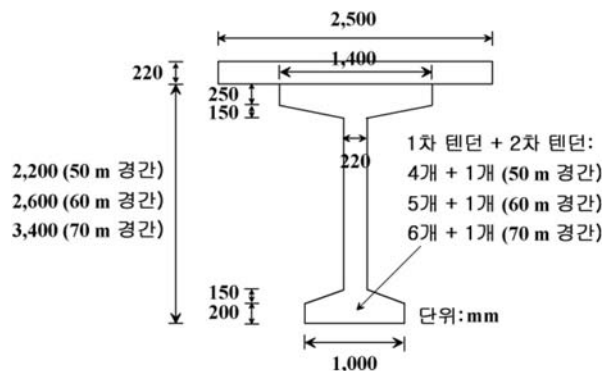


그림 13. 장경간화 기법의 적용 결과(형고 2.2 m)

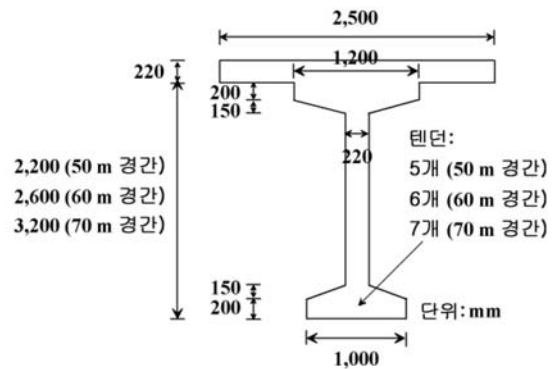
에서 형고를 약간 증가시키는 것이 효과적일 것으로 생각된다. 이에 대해서는 5장에서 추가로 분석하였다.

### 5. 장경간 PSC 거더의 제안

여기에서는 이상의 분석을 통해 효과적이라고 판명된 몇몇 장경간화 기법을 결합하여 50~70 m 경간에 적합하다고 생각되는 장경간 PSC 거더를 제안해 보았다. 여기에서 특별히 언급하는 사항 이외의 조건들은 2장의 교량 예제와 동일하다. 대표적으로 50 m, 60 m 및 70 m 경간에 대해 제안하였다. 먼저 공통적으로 적용된 사항으로 단면 내에 배치 가능한 제한된 개수의 덕트를 가지고도 장경간에서 요구되는 많은 개수의 강연선을 수용하기 위해서 강연선의 직경은 표준도의 12.7 mm에서 15.2 mm로 증가시키고, 덕트당 강



(a) 유형 1



(b) 유형 2

그림 14. 제안된 장경간 PSC 거더

연선 개수도 표준도의 12개에서 15개로 증가시켰다. 이에 따라 덕트의 직경도 표준도의 66 mm에서 85 mm로 증가하였다. 차후 고강도의 강연선이 개발되면 덕트의 개수나 직경을 좀 더 줄일 수 있는 여지가 있을 것으로 기대된다. 경간 중앙에서  $f_{pi}=1223$  MPa,  $f_{pe}=1077$  MPa로 설계기준이 허용하는 최대 수준까지 긴장한 것으로 보였다.

그림 14(a)는 제안된 첫 번째 유형의 장경간 거더로서 다

단계 긴장 I(바닥판 합성 전 2차 긴장)을 적용하되 2차 긴장시 바닥판 경화도에 대한 제약으로부터 벗어나기 위해 설계기준강도 35 MPa의 프리캐스트 바닥판(김영진 등, 1997)을 거처한 상태에서 2차 긴장을 실시한 후에 바닥판과 거더를 합성시키는 것으로 보았다. 바닥판의 두께는 증가된 강도를 고려하여 0.22 m로 현장타설 바닥판보다 작게 설계하였다. 거더의 강도는 PSC 빔 표준도보다 다소 증가된 50 MPa로 두었다. 단면은 휨효율이 향상되도록 최적화시키되, 증가된 덕트의 직경을 고려하여 복부의 두께는 0.22 m로 두었다. 형고는 각각의 공간에 있어 가능한 한 최소화시켜 보았다. 2차 텐던 개수에 대한 영향 평가로부터 각 공간에 있어 2차 텐던의 개수는 1개로 두었다. 그림 15(a)의 설계 가능 영역에서 보듯 추가의 안전도를 확보하거나 덕트 및 정착구 배치시의 편의를 도모할 수 있도록 1차 텐던의 개수 및 경간을 정하였다.

한편 그림 14(b)는 또 다른 장경간 기법들을 조합시킨 두 번째 유형의 거더를 보여주고 있다. 여기에는 Decked PSC 거더 기법과 단면 최적화 기법이 반영되었으며 단, 설계기준 강도는 표준도와 같은 40 MPa로 두었다. 역시 바닥판 부분의 두께는 강도를 고려해 0.22 m로 두었고, 형고는 각 공간에서 최소화시켜 보았다. 이미 언급했던 바와 같이 Decked PSC 거더에서는 프리스트레스의 효율이 극대화됨에 따라 그림 14(a)의 첫 번째 유형보다 낮은 설계기준강도를 보유하고 있음에도 불구하고 첫 번째 유형과 총 텐던의 개수는 동일한 수준으로, 형고는 유사하거나 더 낮은 수준으로 설계가 가능하였으며 그림 15(b)에서 보듯 안전율은 오히려 첫 번째 유형보다 더 큰 편이다.

여기에서 다루지는 않았지만 PSC 거더가 장경간화되면서 텐던의 길이가 길어지면 프리스트레스의 마찰손실값 또한 비

례하여 증가한다. 그런데, 국내 기준(한국도로교통협회, 2005)의 마찰계수값은 비교적 큰 범위로 지정되어 있으며, 마찰계수값이 해외 기준에 비해 비교적 크다는 지적을 받아 왔다. 이러한 점은 프리스트레스의 효율을 과소평가하여 PSC 거더의 장경간화를 저해할 수 있는 요인이 되므로, 마찰계수의 합리적인 범위를 규명하려는 연구(전세진 등, 2008)는 PSC 거더의 장경간화에도 일부 관련되어 있다고 볼 수 있다.

또한, 이 연구에서는 주로 장경간 PSC 거더의 설계와 관련된 이론적인 측면을 다루었지만 추후 장경간 PSC 거더가 국내에서 실용화되기 위해서는 시공성 및 경제성에 대한 심도깊은 분석도 이루어져야 할 것으로 생각된다. 예를 들어 장경간 거더의 운반이나 가설시 장경간 거더의 증가된 중량을 수용할 수 있는 트레일러나 크레인의 가용 용량 및 비용에 대한 분석이 필요할 것이다. 분석 결과 장경간 거더 1본 전체를 운반하고 가설하는 데에 어려움이 있다면 미주 지역에서 실용화되어 있는 분절 거더 기법(Abdel-Karim 등, 1992)의 적용성도 함께 검토되어야 할 것이다. 이 연구의 결과 PSC 거더를 장경간화 할 수 있는 이론적인 근거는 충분한 것으로 생각되며 시공성 및 경제성만 뒷받침된다면 PSC 거더를 기존 박스거더교의 영역인 50~70 m까지 장경간화하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 PSC 거더교를 통상적인 경간 이상으로 장경간화할 수 있는 기법들을 고찰하고, 각 기법이 경간에 미치는 영향을 평가하는 체계적인 방법론을 제안하였다. 여기에서는 전편 논문에서 제안된 방법론을 PSC 거더교 예제에 적용하여 각 장경간화 기법이 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 제안된 도식적인 방법은 각 기법이 장경간화에 기여하는 이유를 일목요연하게 파악할 수 있고, 더 나아가 장경간화를 위한 개선점을 용이하게 도출할 수 있는 장점이 있음을 보였다. 분석 결과 여러가지 기법들 중 특히 거더의 고강도화, 거더의 연속화, Decked PSC 거더 기법 등이 장경간화에 크게 기여하는 것으로 나타났으며 거더 제원에 따라서는 바닥판 합성 전 2차 긴장을 실시하는 다단계 긴장 기법도 효과적이었다.

효과적으로 판명된 몇몇 장경간화 기법들을 조합하여 50 m, 60 m 및 70 m의 장경간 PSC 거더를 설계해 보았다. 연구 결과 PSC 거더도 적절한 형고의 범위에서 기존의 박스거더교의 영역인 50~70 m 경간까지 장경간화 될 수 있는 충분한 이론적인 근거를 가지고 있다고 판단되며, 시공성 및 경제성에 대한 분석만 보완된다면 국내에서도 실용화될 수 있는 가능성이 크다고 사료된다.

## 참고문헌

- 김영진, 정철현, 박철림(1997) 급속 시공을 위한 프리캐스트 콘크리트 교량 바닥판의 활용, 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제19권 제1호, pp. 68-75.
- 민경환, 이재용, 정해문, 안태승, 윤영수(2008) I형 PSC 거더에 적용된 고강도 콘크리트의 허용인장응력 증가 효과, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 433-436.

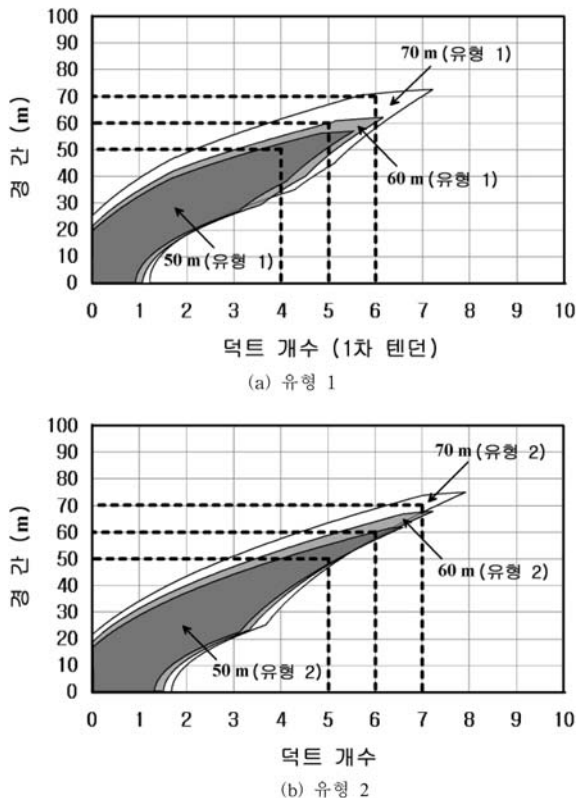


그림 15. 제안된 장경간 PSC 거더의 설계 가능 영역

- 박영하, 김우중(2008) 표준 형식 PSC 빔 거더교의 저형고 장경간화, **콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제20권 제3호, pp. 20-25.
- 신현목(2008) 프리스트레스트 콘크리트, 제10판, 동명사.
- 전세진, 박인교, 김광수, 이만섭, 조재열, 박찬민(2008) 실측값을 활용한 긴장재 마찰계수의 산정, **콘크리트학회 가을학술발표회 논문집**, 한국콘크리트학회, pp. 297-300.
- 전세진, 최명성, 김영진(2009) PSC 거더교의 장경간화 평가 기법: I. 경간 평가 기법의 제안, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제3A호, pp. 235-241.
- 한국도로공사 도로연구소(1998) **콘크리트 장경간보 개발에 대한 연구**.
- 한국도로교통협회(2005) **도로교설계기준**.
- Abdel-Karim, A.M. and Tadros, M.K. (1992) *State-of-the-Art of Precast/Prestressed Concrete Spliced I-Girder Bridges*, Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI).
- American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO) (2002) *Standard Specifications for Highway Bridges*, 17th Ed.
- Bardow, A.K., Seraderian, R.L., and Culmo, M.P. (1997) Design, fabrication and construction of the New England Bulb-Tee girder, *PCI Journal*, Vol. 42, No. 6, pp. 30-40.
- Cisneros, R.A., Fulginiti, L.H., Krause, S.L., Medlock, R.D., and Wandzilak, T.J. (2008) Decked girders for accelerated bridge construction, *Proceedings: Accelerated Bridge Construction - Highway for Life Conference*.
- Meir, J.V., Ciccirelli, M.R., Ramirez, J.A., and Lee, R.H. (1997) Alternatives to the current AASHTO standard bridge sections, *PCI Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 56-66.
- Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI) (2003) *Precast Prestressed Concrete Bridge Design Manual*, 2nd Ed.
- Smith, M.Z., Li, Y., and Ahlborn, T.M. (2008) Analysis of longitudinal joint connections for decked precast prestressed concrete girder bridges, *Proceedings: Accelerated Bridge Construction - Highway for Life Conference*.
- White, C.D. and Castrodale, R.W. (2004) *Extending Span Ranges of Precast Prestressed Concrete Girders*, National Cooperative Highway Research Program(NCHRP) Report 517, Transportation Research Board.
- (접수일: 2009.1.30/심사일: 2009.3.30/심사완료일: 2009.3.30)