

# 지간장 변화에 따른 프리스트레스트 콘크리트 거더 철도교의 최적단면에 관한 연구

## A Study of Optimum Section of PSC Girder Railway Bridge according to Variation of Span Length

조선규\* 김수현\*\* 이종민\*\*\* 이태균\*\*\*\*  
Cho, Sun-Kyu Kim, Su-Hyun Lee, Jong-Min Lee, Tae-Gyun

### ABSTRACT

Prestressed concrete girder(PSC girder) bridges have been used widely at the railway as well as highway because they are great in the functional and economical efficiency. Also they have the advantage of convenience of design and construction. Generally, the PSC girder railway bridges with span length 25m are adopted in the country and it could be easily verified that the section of PSC girder using railway bridge is excessive design, which has much redundancy against design loads. Thus, in this paper the optimum design for PSC girder railway bridge with span length 30m is performed. And from the results of analysis it is suggested to denote the optimum section which satisfies the structural safety and economical efficiency all together.

### 1. 서론

프리스트레스트 콘크리트(PSC) 거더교는 기능성과 경제성 측면이 우수하여 중·소규모의 교량에 많이 적용되는 교량형식으로 도로교뿐만 아니라 철도교에 오래전부터 널리 건설되어왔다. 특히 공사현장에서 제작공정이 간편할 뿐만 아니라 다른 교량형식보다 비교적 공사비가 저렴한 장점이 있기 때문에 교량연장이 긴 철도교에 많이 적용되어왔다. 특히 철도교는 도로교에 비하여 열차궤도와 관련된 자갈도상, 레일과 같은 고정하중이 추가되어 도로교의 활하중보다 큰 열차하중이 재하되기 때문에 일반적으로 큰 강성의 단면을 필요로 한다. 일반적인 PSC 거더 철도교는 복선을 기준으로 지간장 25m, 교량폭원 10.9m에 6개의 거더를 사용하는 형식이 적용되어 왔다. 그러나 이와 같이 사용되는 현행단면은 설계하중에 대해 필요이상의 여유성을 가지고 있는 과다설계된 단면임을 쉽게 확인할 수 있다(조선규 외, 2005). 따라서 PSC 거더 철도교는 지간장 30m까지 확대 적용이 가능할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 지간장이 30m인 PSC 거더 철도교에 대한 최적설계를 수행하였으며, 이를 토대로 경제성과 안전성을 만족하는 최적단면을 제안하였다.

### 2. PSC 거더교의 정식화

#### 2.1 목적함수

최적설계의 목적함수는 식 (1)에 나타난 바와 같이 PSC 거더교의 총제작비용 함수로 정식화하였다. 총제작비용은 PSC 거더 제작대 비용, 콘크리트 제작비용, 철근 제작비용, PS 강선 제작비용, 쉬스관 제작비용, 정착구 제작비용, PS 강선 긴장비용 및 PSC 거더 강재거푸집 제작비용의 합으로 정식화하였다.

\* 서울산업대학교 철도건설공학과 교수, 정회원

\*\* 서울산업대학교 철도건설공학과 석사과정

\*\*\* 서울산업대학교 철도건설공학과 박사과정

\*\*\*\* 한국철도시설공단, 토목설계1부장

$$F = F_{base} + F_c + F_s + F_{Ap} + F_{sh} + F_{anch} + F_{ten} + F_f \quad (1)$$

여기서,

$F$  : PSC 거더교 총제작비용       $F_{base}$  : PSC 거더 제작대 비용       $F_c$  : 콘크리트 제작비용  
 $F_s$  : 철근 제작비용       $F_{Ap}$  : PS 강선 제작비용       $F_{sh}$  : 쉬스판 제작비용  
 $F_{anch}$  : 정착구 제작비용       $F_{ten}$  : PS 강선 긴장비용       $F_f$  : 강제거푸집 제작비용

## 2.2 설계변수

설계변수는 PSC 거더 단면형상과 PSC 거더 간격으로 정식화하였다. 거더 단면의 설계변수는 상·하부 플랜지의 폭원, 두께 그리고 헨치 두께 그리고 복부의 두께 및 높이로 정식화하였다. 그리고 앞서 연구된 프리스트레스 콘크리트 거더교의 단면최적설계(조선규, 2000)의 결과에서 PSC 거더 단면의 최적설계 문제는 매우 비선형성이 큰 문제임을 확인한 바 있다. 따라서, 실무에서 보편적으로 많이 사용되고 있는 PS 강재인, SWPC7- $\phi$ 12.7mm를 사용하여 다음 표 1과 같이 5개의 덕트 안에 텐던의 가닥수를 조합하는 형식으로 강재량을 설계상수로 정식화하였다. 그리고 PSC 거더가 등간격 및 대칭으로 배치되므로 거더간격을 설계변수로 정식화하여 거더배치가 고려된 PSC 거더교의 최적단면에 대하여 고찰하도록 하였다.

표 1. PS 강재의 조합

| 구 분                      | A01   | A02   | A03   | A04   | A05   | A06   |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1번 강제                    | 19    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    |
| 2번 강제                    | 19    | 19    | 12    | 12    | 12    | 12    |
| 3번 강제                    | 19    | 19    | 19    | 12    | 12    | 12    |
| 4번 강제                    | 19    | 19    | 19    | 19    | 12    | 12    |
| 5번 강제                    | 19    | 19    | 19    | 19    | 19    | 12    |
| PS 강재량(cm <sup>2</sup> ) | 93.75 | 86.85 | 79.95 | 73.05 | 66.15 | 59.25 |

## 2.3 제약조건

PSC 거더 최적설계를 위한 제약조건은 표 2에 제시한 바와 같이 현행 철도설계기준-철도교편(2004)을 바탕으로 프리스트레스 콘크리트 거더의 각 하중단계에 대하여 긴장직후, 손실후 및 합성후 콘크리트 거더의 응력조건[식(2)~식(7)]과 PS 강재의 응력조건[식(8)~(9)] 그리고 강도검토[식(10)~식(11)]의 규정에 기초하여 PSC 거더 단면의 구조거동에 관련된 제약조건을 정식화하였다. 그리고 최적의 거더 배치를 위해서 바닥판의 최소두께규정과 바닥판 사용철근량에 대한 제약조건[식(12)~(17)]을 정식화하였으며, 기하학적 형상에 대한 제약조건으로 정착장치의 사용개수에 따른 정착판 설치에 필요한 최소 필요 거더높이에 대한 제약조건[식(20)]과 바닥판 쉐일레버 길이가 내측거더 간격의 80%를 초과하지 않도록 제약조건[식(18)~(19)]을 정식화하였다. 또한 PSC 거더는 폭이 좁은 I형 단면이기 때문에 약축에 대한 횡방향 강성이 낮은 편이다. 따라서 거더의 운반이나 거치시 횡방향 좌굴을 방지하기 위하여 Mast(1989)가 제안하여 PCI Design handbook 3rd Edition에 적용된 식(22)를 횡방향 좌굴에 대한 제약조건[식(21)]으로 추가하였다.

$$FS = \frac{y_t}{\beta_y} \geq 2 \quad (22)$$

여기서,

$y_t$  : 거더의 수직방향에 대한 거더 무게중심으로부터 회전축까지의 거리

$\beta_y$  : 거더의 자중에 의한 횡방향 처짐량

표 2. PSC 거더 최적설계의 제약조건

| 구 분                                            | 제 약 조 건                       | 기 호 설 명                                                                                        |                                                                                                                                  |                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PSC<br>거더<br>단면                                | 긴장 직후<br>휨 응 력                | $G_1 : f_{iu} \leq f_{iua} \quad (2)$<br>$G_2 : f_{il} \leq f_{ila} \quad (3)$                 | $f_{iu}, f_{il}$ = 프리스트레스 도입 직후 거더 상·하단에서의 휨응력<br>$f_{iua}, f_{ila}$ = 손실전 콘크리트 상·하단의 허용휨인장응력                                    |                                                                                                                                                  |
|                                                | 손 실 후<br>휨 응 력                | $G_3 : f_{su} \leq f_{sua} \quad (4)$<br>$G_4 : f_{sl} \leq f_{sla} \quad (5)$                 | $f_{su}, f_{sl}$ = 손실후 사용하중 상태에서 거더 상·하단의 휨응력<br>$f_{sua}, f_{sla}$ = 손실후 콘크리트 상·하단의 허용휨압축응력                                     |                                                                                                                                                  |
|                                                | 합 성 후<br>휨 응 력                | $G_5 : f_{tu} \leq f_{tua} \quad (6)$<br>$G_6 : f_{tl} \leq f_{tla} \quad (7)$                 | $f_{tu}, f_{tl}$ = PSC 보 상·하단의 휨응력<br>$f_{tua}, f_{tla}$ = PSC 보 상·하단의 허용휨응력                                                     |                                                                                                                                                  |
|                                                | 긴장직후<br>PS 강제응력               | $G_7 : f_{pci} \leq f_{pcia} \quad (8)$                                                        | $f_{pci}, f_{pcia}$ = 긴장 직후 PS 강제응력 및 허용응력                                                                                       |                                                                                                                                                  |
|                                                | 손실 후<br>PS 강제응력               | $G_8 : f_{pce} \leq f_{pcea} \quad (9)$                                                        | $f_{pce}, f_{pcea}$ = 손실후 PS 강제의 유효응력 및 허용응력                                                                                     |                                                                                                                                                  |
|                                                | 휨 강 도                         | $G_9 : M_u \leq \phi M_n \quad (10)$                                                           | $M_u$ = 극한휨강도, $\phi M_n$ = 설계휨강도                                                                                                |                                                                                                                                                  |
|                                                | 전단강도                          | $G_{10} : S_u \leq \phi S_n \quad (11)$                                                        | $S_u$ = 극한전단강도, $\phi S_n$ = 설계전단강도                                                                                              |                                                                                                                                                  |
|                                                | 바닥판                           | 바닥판<br>최소두께                                                                                    | $G_{11} : T_{SL} \leq T_{mL} \quad (12)$<br>$G_{12} : T_{Si} \leq T_{mi} \quad (13)$<br>$G_{13} : T_{SR} \leq T_{mR} \quad (14)$ | $T_{SL}$ = 좌측 쉐플레버부 두께, $T_{mL}$ = 좌측 바닥판 최소두께<br>$T_{Si}$ = 내측 바닥판 두께, $T_{mi}$ = 내측 바닥판 최소두께<br>$T_{SR}$ = 우측 쉐플레버부 두께, $T_{mR}$ = 우측 바닥판 최소두께 |
|                                                |                               | 바닥판<br>사용철근량                                                                                   | $G_{14} : A_{SL} \leq A_{S_{used}} \quad (15)$                                                                                   | $A_{SL}$ = 좌측 쉐플레버부 바닥판 필요철근량                                                                                                                    |
|                                                |                               |                                                                                                | $G_{15} : A_{Si} \leq A_{S_{used}} \quad (16)$                                                                                   | $A_{Si}$ = 내측 바닥판 필요철근량, $A_{S_{used}}$ = 최대사용철근량                                                                                                |
| $G_{16} : A_{SR} \leq A_{S_{used}} \quad (17)$ | $A_{SR}$ = 우측 쉐플레버부 바닥판 필요철근량 |                                                                                                |                                                                                                                                  |                                                                                                                                                  |
| 기하적<br>조 건                                     | 켄틸레버<br>길이제한                  | $G_{17} : S_L \leq 0.8 \times S_i \quad (18)$<br>$G_{18} : S_R \leq 0.8 \times S_i \quad (19)$ | $S_L$ = 좌측 쉐플레버부 길이, $S_L$ = 내측 거더간격<br>$S_L$ = 우측 쉐플레버부 길이                                                                      |                                                                                                                                                  |
|                                                | 거더높이                          | $G_{19} : H_{min} \leq H_g \quad (20)$                                                         | $H_g$ = 거더높이, $H_{min}$ = 정착장치 설치 필요최소형고                                                                                         |                                                                                                                                                  |
|                                                | 횡방향좌굴                         | $G_{20} : 2 \leq FS \quad (21)$                                                                | FS = 횡방향 좌굴 검토 계수, 횡방향 좌굴 안전계수 : 2                                                                                               |                                                                                                                                                  |

### 3. 최적설계 시스템 구성

PSC 거더고 최적설계 정식화를 바탕으로 최적설계 시스템을 구성하였다. 최적화 알고리즘은 참고 문헌 7)의 Vanderplaats(1985)가 개발하여 공개한 범용 최적화 알고리즘 모듈인 ADS(Automated Design Synthesis)를 사용하였으며, 모듈내에서 조합 가능한 여러 가지 탐색기법들을 적용한 결과, 그 중에서 가장 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있었던 기법인 확장 승수 라그랑지법(Augmented Lagrange Multiplier Method, ALM)을 사용하였다. 또한 다변수 무제약 최적화 탐색기법으로는 1차 도함수만을 사용하여 함수의 Hessian Matrix의 역행렬을 근사화 시켜 효율적으로 탐색벡터를 구할 수 있는 Variable Metric Method중에서 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldforb-Shanno)방법을 사용하였으며, 단일변수함수의 최적해 탐색은 다항식 보간법(Polynomial Interpolation)과 황금분할법(Golden Section Method)을 조합하여 적용하였다. 최적설계 시스템은 종방향 및 횡방향 구조해석을 통하여 PSC 거더 단면과 거더 간격의 변화에 따른 단면력을 제약조건 산정에 반영되도록 구성하였다. 그리고 설계변수는 실수형으로 정식화되었기 때문에 최적결과는 실제적으로 제작되기 어려운 값이다. 따라서, 실제 설계단면에 이용할 수 있도록 실수형 변수를 거더단면 치수에 대해서는 5mm 단위와 거더간격에 대해서는 10mm 단위로 이산화시키고 설계검증을 거쳐 최종적으로 이산형 최적해를 산출하도록 최적설계 시스템을 구성하였다.

#### 4. 최적설계 결과

##### 4.1 설계조건

PSC 거더 철도교 최적설계를 위한 대상구조물의 지간장은 30m로 하였으며, 폭원은 10.9m의 복선교량이다. 설계활하중은 1등급 교량용 LS-22 열차하중을 적용하였으며 설계에 적용된 재료 특성치와 제반 설계상수들은 콘크리트설계기준·해설(2000)의 값을 적용하였다. PSC 거더교의 제작비용을 산출하기 위한 각 건설재료 및 공정별 단가의 구성은 표 3에 나타낸 바와 같으며, 이를 목적함수 산정에 반영하였다. 또한 현재 일반적으로 사용되고 있는 지간장 25m의 PSC 거더의 단면(현행사용단면)은 과도한 단면이기 때문에 최적설계를 위한 설계변수(PSC 거더의 단면치수)의 초기치는 현행사용단면의 제원과 동일하게 적용하였으며, 설계변수의 하한값과 상한값은 표 4와 같다.

표 3. PSC 거더의 공정별 제작단가

| 구분                      |              | 단가                      |
|-------------------------|--------------|-------------------------|
| PSC 거더 제작대 비용           | $F_{\Delta}$ | 452.0 천원/식              |
| 콘크리트 재료단가(타설 및 양생비 포함)  | $C_c$        | 118.0 천원/m <sup>3</sup> |
| 철근 재료단가(가공 및 설치비 포함)    | $C_s$        | 1,500.0 천원/tonf         |
| PS 강선 재료단가(가공 및 조립비 포함) | $C_{Ap}$     | 2,729.0 천원/tonf         |
| 쉬스관 조립단가                | $C_{sh}$     | 15.0 천원/m               |
| 정착구 단가                  | $C_{anc}$    | 116.0 천원/EA             |
| 긴장작업 단가                 | $C_{ten}$    | 79.0 천원/EA              |
| 강재 거푸집 단가               | $C_f$        | 49.0 천원/m <sup>2</sup>  |

표 4. 설계변수의 하한값과 상한값

| 설계변수     | 초기치   | 하한치   | 상한치   |
|----------|-------|-------|-------|
| 상부플랜지 폭원 | 1.000 | 0.500 | 1.500 |
| 상부플랜지 두께 | 0.180 | 0.180 | 0.300 |
| 상부현치높이   | 0.090 | 0.030 | 0.300 |
| 복부두께     | 0.200 | 0.200 | 0.350 |
| 복부높이     | 1.520 | 0.500 | 2.000 |
| 하부플랜지폭원  | 0.680 | 0.500 | 1.500 |
| 하부플랜지두께  | 0.320 | 0.230 | 0.350 |
| 하부현치높이   | 0.240 | 0.150 | 0.400 |

##### 4.2 최적설계 결과 및 고찰

표 1의 PS 강제조합 중에서 제약조건을 만족하는 PSC 거더 단면의 최적설계 결과를 PS 강제량의 변화에 따라 현행사용단면(지간장 : 25m)의 값과 함께 표 5에 나타내었으며, 그림 1에 그 형상을 도시하였다. 목적함수 최소조건의 최적단면 산정결과 PS 강제량이 가장 적은 A06조합(강제량 : 59.25cm<sup>2</sup>)에서 거더 당 제작비용이 최대치보다 약 843만원 감소된 2,346만원으로서 가장 경제적인 단면으로 나타났다. 또한 A06조합의 단면을 지간장 25m의 현행사용단면과 단위길이 당 거더의 제작비용을 비교할 경우, 현행사용단면보다 작은 값이 산출되어 지간장이 5m 증가함에도 불구하고 더욱 경제적인 단면인 것으로 나타났다. 거더 높이 최소조건의 관점에서는 PS 강제량이 가장 많은 A02조합에서 가장 낮은 거더 높이가 산출되었으나 거더 당 제작비용은 강제량 별 최적단면에서 가장 높은 3,189만원이 산출되었다.

표 5. 최적설계결과

| 단면 배치    | 거더 제원 (m) |          |         |        |        |          |          |         |       | 거더 높이 (m) | 거더 면적 (m <sup>2</sup> ) | 총 강제량 (cm <sup>2</sup> ) | 단위 길이 당 거더 제작비용 (만원) | 거더 당 제작비용 (만원) | 총 제작비용 (만원) |
|----------|-----------|----------|---------|--------|--------|----------|----------|---------|-------|-----------|-------------------------|--------------------------|----------------------|----------------|-------------|
|          | 상부플랜지 폭원  | 상부플랜지 두께 | 상부현치 높이 | 복부관 두께 | 복부관 높이 | 하부플랜지 폭원 | 하부플랜지 두께 | 하부현치 높이 |       |           |                         |                          |                      |                |             |
| 최적 설계 단면 | A02       | 1.360    | .185    | .095   | .355   | 1.390    | .945     | .350    | .300  | 2.320     | 1.352                   | 86.85                    | 106.3                | 3,189          | 15,945      |
|          | A03       | 1.250    | .185    | .095   | .260   | 1.455    | .860     | .355    | .305  | 2.395     | 1.157                   | 79.95                    | 97.5                 | 2,924          | 14,620      |
|          | A04       | 0.975    | .185    | .120   | .210   | 1.480    | .810     | .355    | .305  | 2.445     | 1.005                   | 73.05                    | 89.2                 | 2,675          | 13,375      |
|          | A05       | 0.805    | .185    | .080   | .200   | 1.600    | .805     | .275    | .305  | 2.445     | 0.884                   | 66.15                    | 82.2                 | 2,467          | 12,335      |
|          | A06       | 0.765    | .185    | .090   | .200   | 1.695    | .765     | .235    | .285  | 2.490     | 0.841                   | 59.25                    | 78.2                 | 2,346          | 11,730      |
| 현행사용단면   | 1.000     | .180     | .090    | .200   | 1.520  | .680     | .320     | .240    | 2.350 | .861      | 54.30                   | 79.36                    | 1,984                | 9,920          |             |

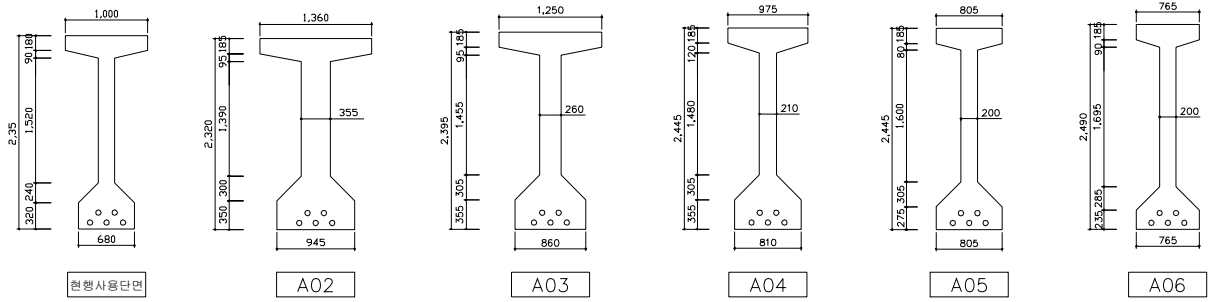


그림 1. PSC 거더 최적단면 (단위 : mm)

PS 강재량의 변화에 따른 거더 형상의 변화는 PS 강재량이 증가할수록 거더의 높이는 감소하고 상부플랜지의 폭은 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 하부플랜지의 폭 및 두께, 복부판의 두께는 다소 증가하는 것으로 나타났으나 상부플랜지의 두께에서는 큰 변화가 발생하지 않았다. 그림 2, 그림 3은 PS 강재량에 따른 상부플랜지의 폭원과 거더의 높이를 나타낸 것이며, 그림 4와 그림 5는 각각 PS 강재량 변화에 따른 PSC 거더의 면적과 단면2차모멘트를 나타낸 것이다.

표 5에서 확인할 수 있듯이 PS 강재량이 많은 경우 높은 프리스트레스에 저항하기 위해 거더의 단면적은 증가하게 된다. 그러나 거더의 단면적을 증가시키기 위해 거더의 높이를 증가시키면 휨에 저항하기 위한 휨강성은 증가하지만 중립축에서 PS 강재도심까지의 편심량도 증가하게 되어 프리스트레스에 의해 거더에 발생하는 모멘트가 커질 뿐만 아니라 중립축에서 거더 상, 하연까지의 거리도 증가하여 거더 상, 하연에서의 응력은 증가하게 된다. 따라서 거더의 휨강성을 증가시키는 동시에 PS 강재의 편심량 및 중립축에서 거더 상, 하연까지의 거리를 감소시킬 수 있는 방법은 거더의 높이를 낮추고 상, 하부플랜지의 면적을 증가시키는 것이다. 이와 같은 이유로 PS 강재량이 증가할수록 거더의 높이는 감소하고 상, 하부플랜지의 면적을 증가시키기 위한 상, 하부플랜지의 폭이 증가하는 것으로 판단된다.

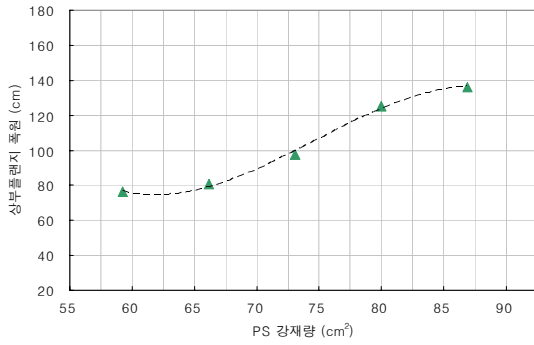


그림 2. 상부플랜지 폭원

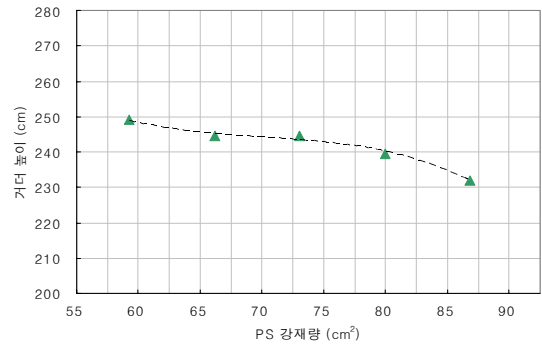


그림 3. PSC 거더 높이

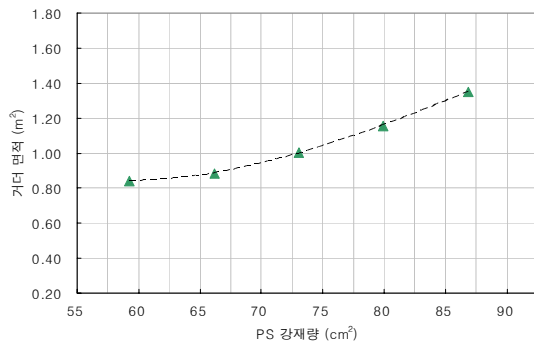


그림 4. PSC 거더의 면적

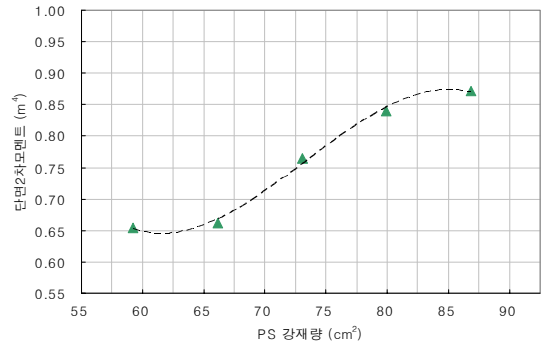


그림 5. PSC 거더 단면2차모멘트

## 5. 결론

본 연구에서 제안한 지간장 30m에 대한 PSC 거더 철도교의 최적설계단면으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 목적함수 최소조건의 최적단면 산정결과 PS 강재량이 가장 적은 PS 강제조합에서 가장 경제적인 단면으로 나타났다. 또한 PS 강재량이 가장 적은 PS 강제조합의 단면을 지간장 25m의 현행사용단면과 단위길이 당 거더의 제작비용을 비교할 경우, 현행사용단면보다 작은 값이 산출되어 지간장이 5m 증가함에도 불구하고 더욱 경제적인 단면인 것으로 나타났다.
- (2) 거더 높이 최소조건의 관점에서는 PS 강재량이 가장 많은 PS 강제조합에서 가장 낮은 거더 높이가 산출되었으나 거더 당 제작비용은 강재량 별 최적단면에서 가장 높게 산출되었다.
- (3) PS 강재량의 변화에 따른 거더 형상의 변화는 PS 강재량이 증가할수록 거더의 높이는 감소하고 상부플랜지의 폭은 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 하부플랜지의 폭 및 두께, 복부판의 두께는 다소 증가하는 것으로 나타났으나 상부플랜지의 두께에서는 큰 변화가 발생하지 않았다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(2004) 철도설계기준(철도교편)
2. 한국콘크리트학회(2000), 콘크리트구조설계기준·해설
3. 조선규, 최외호(2000) “프리스트레스트 콘크리트 보 단면의 최적설계”, 한국콘크리트학회논문집, 제12권 4호, pp. 91-101.
4. 조선규, 윤석구, 박영하(2004) “표준단면을 위한 프리스트레스트 콘크리트 거더의 단면최적설계”, 대한토목학회논문집, 제 24권 4A호, pp. 853-859.
5. 조선규, 이종민, 서동주, 이태균, 이종선(2005) “프리스트레스트 콘크리트 거더 철도교의 최적설계”. 한국철도학회논문집, 제8권 3호, pp.267-275
6. Garret N. Vanderplaats (1984). Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications, McGraw-Hill, Inc.
7. Garret N. Vanderplaats(1985), ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.
8. Robert F. Mast (1989). Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beams-Part1. PCI Journal, Vol.34, No.1, pp. 34-53