

프리스트레스트 콘크리트 거더 철도교의 최적설계

Optimum Design of Prestressed Concrete Girder Railway Bridge

조선규[†] · 이종민^{*} · 서동주^{**} · 이태균^{***} · 이종선^{****}

Sun-Kyu Cho · Jong-Min Lee · Dong-Joo Seo · Tae-Gyun Lee · Joung-Sun Lee

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. However it could be easily verified that the section of PSC girder is excessive design, which has much redundancy against design loads. Thus, in this paper the formulation of the optimum design for PSC girder railway bridge is suggested and dominant design variables and constraints are inquired as performing the optimum design. In order to effective optimum design, design variables are formulated as PSC girder sectional dimension and girder space. The objective is adopted as total cost of PSC girder railway bridge. Also, constraints are formulated according to Korean railway design specification and considering construction-ability such as PS anchorage and girder space. Using the proposed optimum design system, optimum PSC girder railway bridge design has been 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.

Keywords : Optimum design(최적설계), Prestressed concrete girder(프리스트레스트 콘크리트 거더), Sectional dimension(단면 치수)

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트(PSC) 거더교는 기능성과 경제성 측면에서 우수하여 중·소규모의 교량에 많이 적용되는 교량형식으로서 공사현장에서 제작공정이 간편할 뿐만 아니라 다른 교량형식보다 비교적 공사비가 저렴한 장점이 있기 때문에 교량연장이 긴 도로교나 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 왔으나, 최근 한국철도시설공단의 설계 개선으로 동일한 단면에서 PS

강재량을 증가시켜 5개의 거더를 사용하는 형식으로 바뀌고 있다. 그러나 이와 같은 설계 개선과정에서 최적화 이론을 근거로한 합리적인 설계기술을 도입한다면, 국내 PSC 거더 교량형식의 수요를 감안해 볼 때 공사비 절감은 물론 이와 관련된 여러 분야로의 파급효과는 매우 클 것으로 사료되며 경제적인 교량의 건설을 위해 반드시 필요할 것으로 판단된다. 최적화 부분의 이론적인 연구성과가 컴퓨터 기술이 발전함에 따라 실제 교량구조물에 적용되는 연구가 국내·외적에서 활발하게 수행되어 왔다(조효남 외, 1998; Al-Gahtain, 1986; Bond, 1975 등). 국내에서는 합성형 강상형교, 강상판교 그리고 2주형교(조효남 외, 1998, 1999)와 같은 강교 뿐 만 아니라 도로교의 프리스트레스트 콘크리트 교량(김병석, 1992; 조선규 외, 2000, 2001, 2004 등)에 최적설계가 적용되어 최적설계의 실무적용에 대한 연구가 활발히 진행 중이지만, 철도 PSC 거더교에 대한 최적설계와 관련된 연구는 진행된 바가 거의 없는 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 철도 교량에서 많은 비중을 차지하는 PSC 거더교의 구조적 안전성을 유지하면서 보다 경제적인 활용

† 책임저자: 서울산업대학교 철도건설공학과, 교수

* 서울산업대학교 철도건설공학과, 박사과정

** 서울산업대학교 토목공학과, 석사과정

*** 한국철도시설공단, 토목설계1부장

**** (주)남광토건, 기술팀장

을 위해서 PSC 거더교에 최적설계를 도입하여 지배적인 설계변수와 제약조건을 파악함은 물론 PSC 거더교의 최적단면의 도출을 통하여 보다 합리적인 PSC 거더교의 단면을 제안하고자 한다.

2. P.S.C 거더 최적설계의 정식화

PSC 거더 단면의 지배적인 설계인자를 고찰하고 거더의 안전성과 경제성을 함께 만족하는 합리적인 PSC 거더 단면을 위한 PSC 거더 단면의 최적설계를 위한 수리모형에 대한 정식화를 수행하였다.

2.1 목적함수

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

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

여기서,

F_{PSC} : PSC 거더 총 제작비용

F_{BASE} : PSC 거더 제작대 비용

$F_c = C_c \times V_c$: 콘크리트 제작비용

$F_s = C_s \times W_s$: 철근 제작비용

$F_{Ap} = C_{Ap} \times W_{Ap}$: PS강선 제작비용

$F_{sh} = C_{sh} \times L_{Ap}$: 쉬스판 제작비용

$F_{anch} = C_{anch} \times N_{Ap} + C_{ten} \times N_{Ap}$: 정착구 제작비용

$F_{ten} = C_{ten} \times N_{Ap}$: PS강선 긴장비용

$F_f = C_f \times A_f$: PSC 거더 강제 거푸집 제작비용

C_c : 콘크리트 재료단가(타설 및 양생비 포함)

C_s : 철근 재료단가(가공 및 설치비 포함)

C_{Ap} : PS 강선 재료단가

(가공 및 조립비 포함)

C_{sh} : 쉬스판 조립단가

C_{anch} : 정착구 단가

C_{ten} : 긴장작업 단가

C_f : 강제 거푸집 단가

V_c : 콘크리트 체적

W_s : 철근 중량

W_{Ap} : PS강선 중량

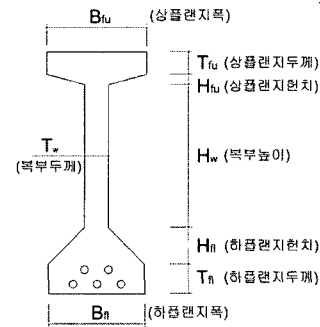
L_{Ap} : PS강선 총길이

N_{Ap} : 텐던 개수

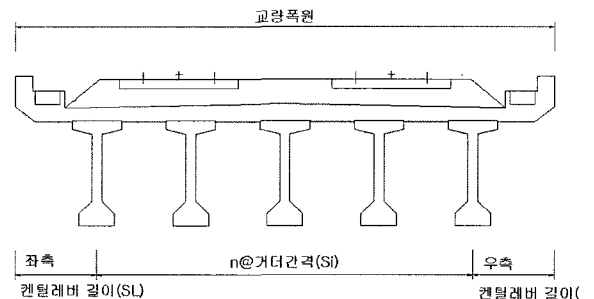
A_f : 강제 거푸집 면적

2.2 설계변수

설계변수는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 PSC 거더 단면형상과 PSC 거더 간격으로 정식화하였다. 거더 단면의 설계변수는 상·하부 플랜지의 폭원, 두께 그리고 현치 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 PS강재인, SWPC7- ϕ 12.7mm를 사용하여 다음 Table 1과 같이 텐던의 가닥수를 조합하는 형식으로 강제량을 설계상수로 정식화하였다. 그리고 PSC 거더가 등간격 및 대칭으로 배치되므로 거더간격을 설계변수로 정식화하여 거더배치가 고려된 PSC 거더교의 최적단면에 대하여 고찰하도록 하였다.



(a) PSC girder section



(b) girder space

Fig. 1. Formulation of design variables

2.3 제약조건

PSC 거더 최적설계를 위한 제약조건은 Table 2에 제시한 바와 같이 현행 철도설계기준-철도교편(2004)을 바탕으로 프리스트레스트 콘크리트 거더의 각 하중단계에 대하여 긴장직후, 손실후 및 합성후 콘크리트 거더의 응력조건[식 (2)~식(7)]과 PS강재의 응력조건[식 (8)~(9)] 그리고 강도 검토[식 (10)~식 (11)]의 규정에 기초하여 P.S.C 거더 단면의 구조거동에 관련된 제약조건을 정식화하였다. 그리고 최적의 거더 배치를 위해서 바닥판의 최소두께규정과 바닥판 사용철근량에 대한 제약조건[식 (12)~(17)]을 정식화하

였으며, 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 다음 식 (22)를 횡방향 좌굴에 대한 제약조건[식 (21)]으로 추가하였다.

Table 1. Combinations of PS tendon

텐던5개인 경우	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10	A11
1번강재	19	12	12	12	12	12	7	7	7	7	7
2번강재	19	19	12	12	12	12	12	7	7	7	7
3번강재	19	19	19	12	12	12	12	12	7	7	7
4번강재	19	19	19	19	12	12	12	12	12	7	7
5번강재	19	19	19	19	19	12	12	12	12	12	7
PS강재량(cm ²)	93.75	86.85	79.95	73.05	66.15	59.25	54.30	49.37	44.43	39.49	34.55

Table 2. Constraints of PSC girder optimum design

구분	제약조건	기호설명
PSC 거더 단면	긴장 직후 휨 응력 $G_1 : f_{iu} \leq f_{iua} \quad (2)$ $G_2 : f_{il} \leq f_{ila} \quad (3)$	f_{iu}, f_{il} = 프리스트레스 도입 직후 거더 상·하단에서의 휨응력 f_{iua}, f_{ila} = 손실전 콘크리트 상·하단의 허용휨인장응력
	손실 후 휨 응력 $G_3 : f_{su} \leq f_{sua} \quad (4)$ $G_4 : f_{sl} \leq f_{sla} \quad (5)$	f_{su}, f_{sl} = 손실후 사용하중 상태에서 거더 상·하단의 휨응력 f_{sua}, f_{sla} = 손실후 콘크리트 상·하단의 허용휨압축응력
	합성 후 휨 응력 $G_5 : f_{tu} \leq f_{tua} \quad (6)$ $G_6 : f_{tl} \leq f_{tla} \quad (7)$	f_{tu}, f_{tl} = P.S.C보 상·하단의 휨응력 f_{tua}, f_{tla} = P.S.C보 상·하단의 허용휨응력
	긴장직후 P.S강재응력 $G_7 : f_{pci} \leq f_{pcia} \quad (8)$	f_{pci}, f_{pcia} = 긴장 직후 PS 강재 응력 및 허용응력
	손실 후 P.S강재응력 $G_8 : f_{pce} \leq f_{pcea} \quad (9)$	f_{pce}, f_{pcea} = 손실후 PS 강재의 유효응력 및 허용응력
	휨 강도 $G_9 : M_u \leq \phi M_n \quad (10)$	M_u = 극한휨강도, ϕM_n = 설계휨강도
	전단강도 $G_{10} : S_u \leq \phi S_n \quad (11)$	S_u = 극한전단강도, ϕS_n = 설계전단강도
바닥판	바닥판 최소두께 $G_{11} : T_{SL} \leq T_{mL} \quad (12)$ $G_{12} : T_{Si} \leq T_{mi} \quad (13)$ $G_{13} : T_{SR} \leq T_{mR} \quad (14)$	T_{SL} = 좌측 쉐일레버부 두께, T_{mL} = 좌측 바닥판 최소두께 T_{Si} = 내측 바닥판 두께, T_{mi} = 내측 바닥판 최소두께 T_{SR} = 우측 쉐일레버부 두께, T_{mR} = 우측 바닥판 최소두께
	바닥판 사용철근량 $G_{14} : A_{S_L} \leq A_{S_{used}} \quad (15)$ $G_{15} : A_{S_i} \leq A_{S_{used}} \quad (16)$ $G_{16} : A_{S_R} \leq A_{S_{used}} \quad (17)$	A_{S_L} = 좌측 쉐일레버부 바닥판 필요철근량 A_{S_i} = 내측 바닥판 필요철근량, $A_{S_{used}}$ = 최대사용철근량 A_{S_R} = 우측 쉐일레버부 바닥판 필요철근량
	기하적 조건	
기하적 조건	켄틸레버 길이제한 $G_{17} : S_L \leq 0.8 \times S_i \quad (18)$ $G_{18} : S_R \leq 0.8 \times S_i \quad (19)$	S_L = 좌측 쉐일레버부 길이, S_L = 내측 거더간격 S_L = 우측 쉐일레버부 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

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

여기서,

y_i : 거더의 수직방향에 대한 거더 무게중심으로부터 회전 축까지의 거리

β_y : 거더의 자중에 의한 횡방향 처짐량

3. 최적설계 시스템 구성

PSC 거더교 최적설계 정식화를 바탕으로 최적설계 시스템을 구성하였다. 최적화 알고리즘은 참고문헌 8)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, 단일변수 함수의 최적해 탐색은 다항식 보간법(Polynomial Interpo-

lation)과 황금분할법(Golden Section Method)을 조합하여 적용하였다. 최적설계 시스템은 Fig. 2에 나타낸 바와 같으며, 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 25m로 하였으며, 폭원은 10.9m의 복선교량으로서 대상구조물의 거더 횡방향 배치는 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같다. 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 참고문헌[7]을 바탕으로 Table 3에 나타낸 바와 같으며, 목적함수 산정에 반영하였다. 또한 최적설계를 위한 설계변수(PSC 거더의 단면치수)의 초기치는 현재 일반적으로 사용되고 있는 단면(현행사용단면)의 제원과 동일하게 적용하였으며, 설계변수의 하한치와 상한치는 Table 4와 같다.

4.2 최적설계 결과 및 고찰

Table 1의 PS 강제조합 중에서 제약조건을 만족하는 PSC 거더 단면의 최적설계 결과를 PS 강제량의 변화에 따라 현행사용단면의 값과 함께 Table 5에 나타내었으며, Fig. 3에 그 형상을 도시하였다.

목적함수 최소조건외 최적단면 산정결과 PS강제의 A09 조합(강제량: 44.43 cm^2)에서 현행사용단면 보다 거더 당 제작비용이 약 215만원 감소된 1,769만원으로서 가장 경제적인 단면으로 나타났다(현행사용단면: 1,984만원). 거더 높이 최소조건외의 관점에서는 A05조합에서 거더 높이가 표준 단면보다 약 38cm 감소된 197cm의 단면이 산출되었으나 거더 당 제작비용은 강제량 별 최적단면에서 가장 높은 2,190만원이 산출되었다. 이는 현행사용단면의 제작비용보다 약 10% 증가된 비용이다. 또한 현행사용단면에서의 강제량과 동일한 A07조합에서는 거더 당 제작비용 1,844만원,

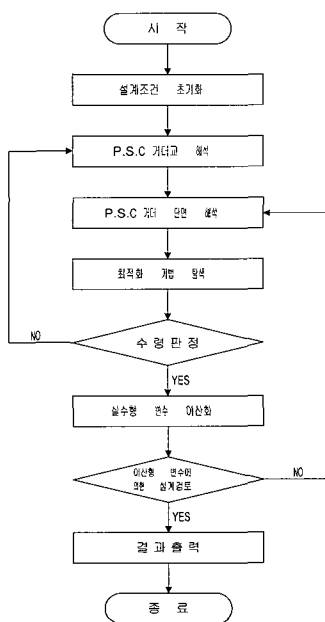


Fig. 2. Flow chat for PSC girder optimum design

Table 3. reduction cost of PSC girder

구 분		단 가
PSC 거더 제작대 비용	F_{BASE}	452.0 천원/식
콘크리트 재료단가(타설 및 양생비 포함)	C_c	118.0 천원/m ³
철근 재료단가(가공 및 설치비 포함)	C_s	1,500.0 천원/tonf
PS강선 재료단가(가공 및 조립비 포함)	C_{Ap}	2,729.0 천원/tonf
쉬스관 조립단가	C_{sh}	15.0 천원/m
정착구 단가	C_{anch}	116.0 천원/EA
긴장작업 단가	C_{ten}	79.0 천원/EA
강재 거푸집 단가	C_f	49.0 천원/m ²

거더 높이 201.5cm(현행사용단면: 235cm)가 산출되어 현행 사용단면은 비경제적인 과도한 단면임을 알 수 있다.

Fig. 4는 PS 강재량이 따른 PSC 거더의 제작비용을 총 거더 제작비용과 각각의 공종별 제작비용을 나타낸 것으로서 PS 강재량이 작은 경우, 거더 당 제작비용의 변동은 작으나, PS 강재량이 큰 경우에는 거더 당 제작비용의 증가율이 큰 것을 확인할 수 있다(Fig. 4(a)). 그러나 Fig. 4(b)에서 프리

Table 4. Lower and upper bound of design variables

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

스트레스공과 관련된 제작비용은 PS 강재량이 감소함에 따라 선형적으로 감소하고 있어 PS 강재량과 거더 당 제작비용은 선형적인 비례관계가 아니라는 것을 확인 할 수 있다. 이는 PS 강재량이 많은 경우, PS 강재의 긴장 시 큰 압축력이 도입되기 때문에 허용응력을 만족하기 위한 거더의 단면이 증가해야 되고 이에 따라 거더의 단면과 관련된 콘크리트공, 강재거푸집공 및 철근공도 동시에 증가하여 거더 당 제작비용이 크게 증가하는 것이며, PS 강재량이 작은 경우에는 프리스트레스의 감소에 의한 소요 휨강성을 보완하기 위해 거더의 높이가 증가하고 이에 따라 거더의 단면과 관

Table 5. Results of optimum design (the number of girders : 5 EA)

턴던 배치	거더 제원 (m)								거더 높이 (m)	거더 면적 (m ²)	총강재량 (cm ²)	거더 당 제작비용 (만원)	총 제작비용 (만원)	
	상부 플랜지 폭원	상부 플랜지 두께	상부 현치 높이	복부판 두께	복부판 높이	하부 플랜지 폭원	하부 플랜지 두께	하부 현치 높이						
현행사용단면	1.000	.180	.090	.200	1.520	.680	.320	.240	2.350	.861	54.30	1,984	9,920	
최적 설계 단면	A05	1.440	.185	.070	.225	1.055	.825	.355	.305	1.970	1.015	66.15	2,190	10,950
	A06	1.070	.185	.080	.200	1.125	.800	.300	.300	1.990	.864	59.25	1,968	9,840
	A07	.835	.185	.085	.200	1.195	.800	.245	.305	2.015	.786	54.30	1,844	9,220
	A08	.765	.185	.085	.200	1.275	.770	.235	.285	2.065	.757	49.37	1,777	8,885
	A09	.715	.185	.065	.200	1.495	.745	.235	.275	2.255	.766	44.43	1,769	8,845
	A10	.540	.185	.085	.200	1.710	.775	.235	.290	2.505	.797	39.49	1,782	8,910

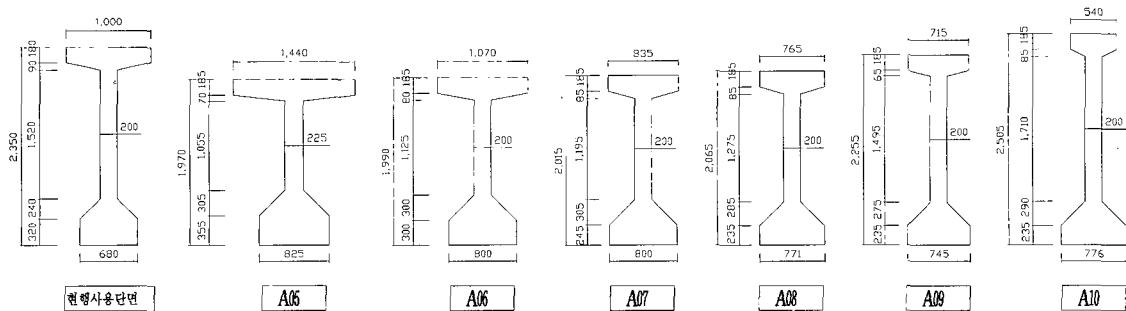
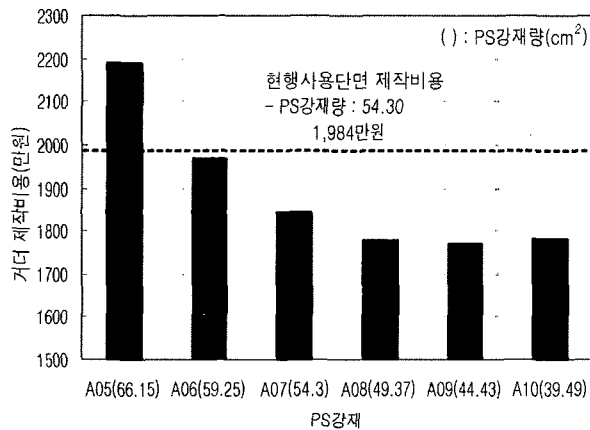


Fig. 3. Proposed optimum sections 1 (unit : mm)

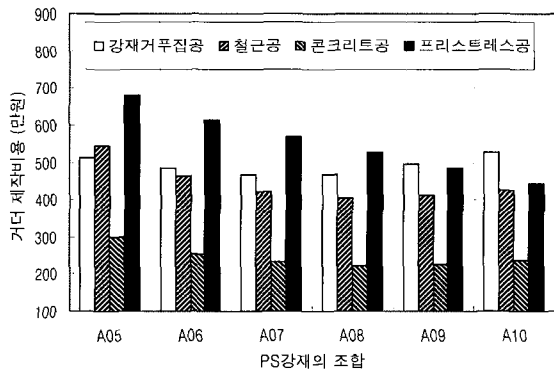
런된 콘크리트공, 강재거푸집공 및 철근공이 증가하기 때문에 프리스트레스공과 관련된 제작비용은 감소하지만 거더의 제작비용에서는 큰 변동이 없는 것으로 판단된다.

그러나 이와 같이 PS 강재량에 따른 프리스트레스에 의해 PSC 거더의 단면이 결정되기 때문에 거더의 제작비용에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 PS 강재량인 것으로 판단된다. Fig. 5, Fig. 6은 PS 강재량에 따른 거더의 면적과 단면2차모멘트를 나타낸 것으로서 PS 강재량이 많은 경우 거더의 단면적이 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, PS 강재량이 작은 경우에는 단면2차모멘트가 PS 강재량이 많은 경우에 비해 상대적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

PS 강재량의 변화에 따른 거더 형상의 변화는 PS 강재량이 증가할수록 거더의 높이는 감소하고 상부플랜지의 폭은 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 하부플랜지의 폭 및 두께는 다소 증가하는 것으로 나타났으나 복부판의 두께, 상부플랜지의 두께에서는 큰 변화가 발생하지 않았다. Fig.



(a) Total production cost of PSC girder



(b) Production cost per construction progress

Fig. 4. Comparison of production cost of PSC girder

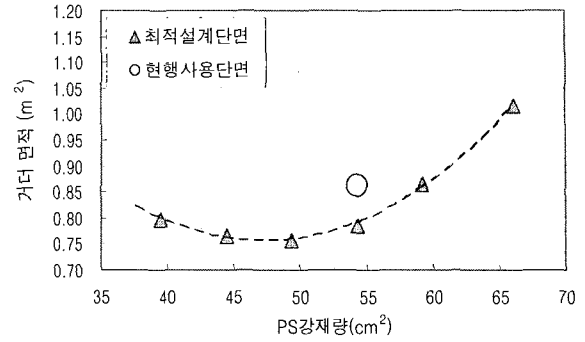


Fig. 5. Area of PSC girder

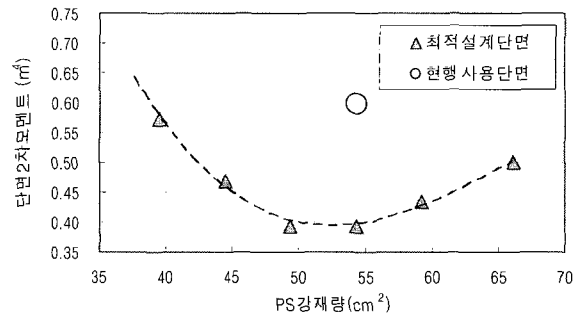


Fig. 6. Moment of inertia of PSC girder

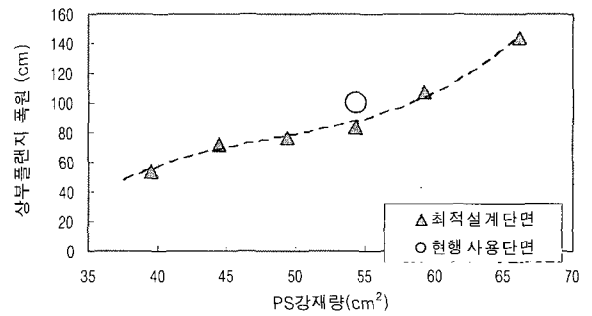


Fig. 7. Width of upper flange

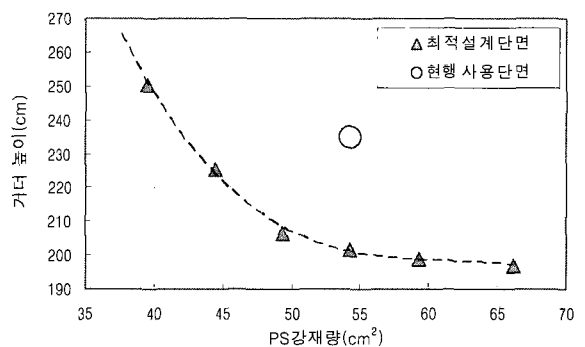


Fig. 8. Height of PSC girder

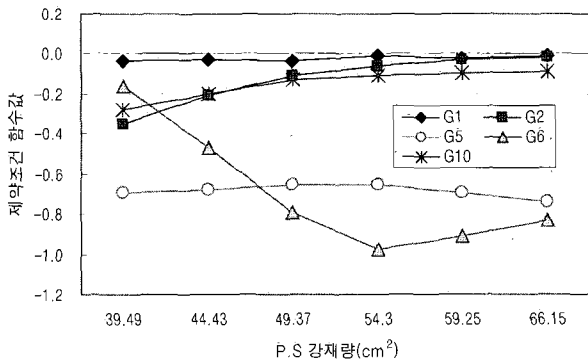


Fig. 9. Variation trend of constraints (the number of girders : 5EA)

7, Fig. 8은 PS 강재량에 따른 상부플랜지의 폭원과 거더의 높이를 나타낸 것이다. 앞서 언급하였듯이 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 PS강재도심까지의 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 P.S 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 현상을 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

PSC 거더의 최적설계 시 지배적인 제약조건은 PS 강재 긴장 후 거더 상연에 작용하는 응력에 대한 제약조건(G1)으로 나타났다. Fig. 9는 PS 강재량에 따른 제약조건 함수값의 변화추이를 나타낸 것으로서 PS 강재 긴장 후 거더 상연에 작용하는 응력이 모든 PS 강재 조합에서 가장 지배적인 제약조건임을 확인할 수 있으며 PS 강재량이 많은 경우에는 높은 프리스트레스에 의해 PS 강재 긴장 후 거더 하연에서의 압축응력에 대한 제약조건(G2)도 상부에서의 응력제약조건과 비슷한 수준으로 근접하는 것을 알 수 있다. 거더 하연에서는 거의 모든 경우에서 PS강재의 긴장 후 응력제약조건이 사용하중 상태에서의 응력제약조건(G6)보다 지배적인 것으로 나타났으나 PS 강재량이 가장 작은 경우에는 사용하중 상태에서의 응력제약조건이 PS 강재 긴장 후의 응력제약조건보다 지배적인 것으로 나타났다. 따라서 PSC 거더의

Table 6. Results of optimum design (the number of girders : 4 EA)

탠던 개수	탠던 배치	거더 제원 (m)								거더 높이 (m)	거더 면적 (m ²)	총 강재량 (cm ²)	거더 당 제작비용 (만원)	총 제작비용 (만원)
		상부 플랜지 폭원	상부 플랜지 두께	상부 현치 높이	복부판 두께	복부판 높이	하부 플랜지 폭원	하부 플랜지 두께	하부 현치 높이					
	표준단면	1.000	.180	.090	.200	1.520	.680	.320	.240	2.350	.861	54.30	1,984	9,920
최적 설계 단면	A05	1.735	.185	.035	.200	1.370	.800	.340	.305	2.235	1.053	66.15	2,297	9,188
	A06	1.210	.185	.095	.200	1.355	.800	.300	.305	2.240	.954	59.25	2,095	8,380
	A07	1.030	.185	.100	.200	1.430	.800	.235	.305	2.255	.879	54.30	1,976	7,904
	A08	.800	.185	.100	.200	1.650	.800	.235	.300	2.470	.866	49.37	1,941	7,764

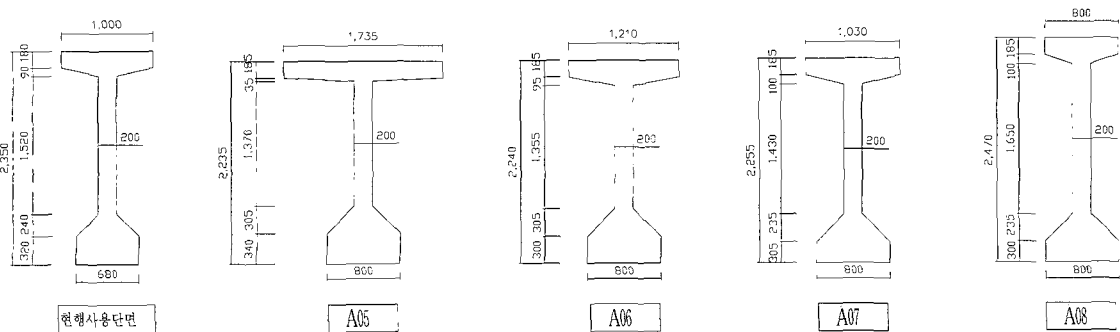


Fig. 10. Proposed optimum sections 2 (unit : mm)

단면형상에 가장 큰 영향을 미치는 제약조건은 PS 강제 긴장시 거더 상, 하연에서의 응력인 것을 알 수 있으며, PS 강제량 조합 중에서 A10과 같이 PS 강제량이 작은 경우에는 PS 강제의 긴장시기뿐만 아니라 사용하중 상태에서의 응력 조건도 거더의 단면형상에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.3 거더 개수 감소에 따른 최적설계결과

현재 PSC 거더교에서는 복선을 기준으로 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 5개의 거더가 사용되고 있다. 그러나 앞서 확인한 바와 같이 현행 표준단면은 필요 이상으로 큰 과도한 단면을 가지고 있기 때문에 거더의 개수를 감소시키는 것이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 동일한 교량폭원과 하중에서 4개의 거더를 사용하는 경우에 대한 최적설계를 수행하였으며 제약조건을 만족하는 결과값을 Table 6과 Fig. 10에 나타내었다. 이 때 설계변수는 거더 5개인 경우 상부플랜지의 폭원이 상한치에 근접하는 결과가 나왔으므로 상부플랜지의 폭원에 대한 상한치를 2.0m로 변경하여 최적설계를 수행하였다.

4개의 거더를 사용한 PSC 거더교 최적설계 결과에서도 PS 강제량이 증가함에 따라 거더의 높이는 감소하고 상부플랜지의 폭은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 PS 강제량이 어느 수준을 넘어서게 되면 높은 프리스트레스에 저항하기 위한 휨강성과 단면적을 증가시키기 위해 거더 높이의 감소량은 작아지는 것으로 나타났다. 거더 4개를 사용하는 경우에서 거더의 최소높이는 PS 강제량이 가장 많은 A05조합에서 223.5cm로서 거더 5개를 사용하는 현행사용단면(235cm)보다 11.5cm감소하였으나 거더 5개를 사용하는 경우의 최소 거더 높이(197cm) 보다는 26.5cm 증가하였다.

거더 당 제작비용은 일반적으로 동일한 PS 강제량에서 5개의 거더를 사용한 경우보다 크게 산출되었으나 거더 개수의 감소로 인해 거더의 총 제작비용은 감소하는 것으로 나타났다. 거더 4개를 사용하는 경우 최소의 총 제작비용은 PS 강제조합 A08로서 거더 5개를 사용하는 현행사용단면보다 약 22%감소하고, 거더 5개를 사용하는 경우의 최소비용 최적단면(A09)보다 12% 감소한 7,764만원이 산출되었다. 이와 같이 PSC 거더의 최적단면은 교량에 사용된 거더의 개수와 PS 강제량 등의 영향을 받으며, 거더의 개수와 PS 강제량이 감소할수록 거더의 총 제작비용은 감소하게 되며, 이와 반대로 거더의 개수와 PS 강제량이 증가할수록 거더의 높이는 낮아지나 거더의 총 제작비용은 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 총 공사비의 절감을 목적으로 하는 경우에는 거더의 개수와 PS 강제량을 감소시켜 PSC 거더의 최적단면을 산정하는 것이 효과적이며, 교하공간의 확보가

필요한 시공조건에서는 거더의 개수와 PS 강제량을 증가시켜 최적단면을 산정하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

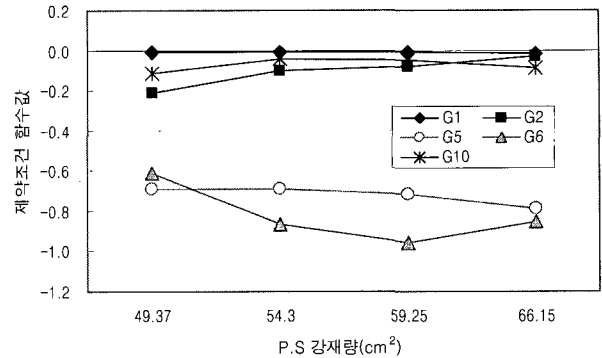


Fig. 11. Variation trend of constraints (the number of girders : 4 EA)

그림 11은 4개의 거더를 사용한 경우 제약조건에 대한 함수값을 나타낸 것으로서 5개의 거더를 사용한 경우와 비슷한 양상을 보임을 알 수 있다. 그러나 5개의 거더를 사용한 경우와 다소 다른 점은 PS 강제 긴장시 거더 상, 하연에서의 응력제약조건 뿐만 아니라 지점부 전단강도에 대한 제약조건(G10)도 PSC 거더의 단면형상에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 바닥판 상부에서의 하중은 동일하나 거더 개수의 감소로 인해 거더 당 부담하는 전단력의 크기가 커짐에 따라 발생한 현상인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 철도교용 PSC 거더의 최적설계를 위해 전용 최적설계프로그램을 개발하였으며, 이를 이용한 최적설계 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) PS 강제량의 변화에 따른 거더 형상의 변화는 PS 강제량이 증가할수록 거더의 높이는 감소하고 상부플랜지의 폭은 증가하는 것으로 나타났으며, 하부플랜지의 폭원 및 두께는 다소 증가하는 것으로 나타났으나 복부판의 두께, 상부플랜지의 두께에서는 큰 변화가 발생하지 않았다.
- (2) PSC 거더의 단면형상에 가장 큰 영향을 미치는 제약조건은 PS 강제 긴장시 거더 상, 하연에서의 응력인 것으로 나타났으며, PS 강제량이 작은 경우에는 사용하중 상태에서의 거더 하연응력도 단면형상에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 거더 개수의 감소로 인한 거더 당 부담하는 하중이 증가하는 경우에는 지점부 전단강도도

PSC 거더의 단면형상에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

- (3) 거더 5개를 기준으로 PS 강재량 별 최적단면 산정결과 PS강재의 A09조합(강재량: 44.43 cm^2)에서 현행사용 단면 보다 거더 당 제작비용이 약 11% 감소되어 가장 경제적인 단면으로 나타났으며, 거더 높이 최소조건의 관점에서는 PS 강재량이 가장 많은 A05조합에서 거더 높이가 가장 작게 산출되었다.
- (4) 거더 4개를 사용하는 경우, 거더의 최소높이는 PS 강재량이 가장 많은 A05조합(223.5cm)에서 거더 5개를 사용하는 현행사용단면(235cm)보다 작게 나타났으나 거더 5개를 사용하는 경우의 최소 거더 높이(197cm) 보다 는 크게 나타났다. 거더 당 제작비용은 4개의 거더를 사용한 경우가 동일한 PS 강재량에서 5개의 거더를 사용한 경우보다 크게 산출되었으나 거더 개수의 감소로 인해 거더의 총 제작비용은 감소하는 것으로 나타났다. 거더 4개를 사용하는 경우 최소의 총 제작비용은 PS 강재 조합 A08로서 거더 5개를 사용하는 표준단면보다 약 22%감소하고, 거더 5개를 사용하는 경우의 최소비용 최적단면(A09)보다 12% 감소하는 것으로 산출되었다.
- (5) PSC 거더의 최적단면은 교량에 사용된 거더의 개수와 PS 강재량 등의 영향을 받으며, 거더의 개수와 PS 강재량이 감소할수록 거더의 총 제작비용은 감소하게 되며, 이와 반대로 거더의 개수와 PS 강재량이 증가할수록 거더의 높이는 낮아지나 거더의 총 제작비용은 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 총 공사비의 절감을 목적으로 하는 경우에는 거더의 개수와 PS 강재량을 감소시켜 PSC 거더의 최적단면을 산정하는 것이 효과적이며, 교하공간의 확보가 필요한 시공조건에서는 거더의 개수와 PS 강재량을 증가시켜 최적단면을 산정하는 것이 효과

적일 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2004) 철도설계기준(철도교편)
2. 조선규, 최외호(2000) "프리스트레스트 콘크리트 보 단면의 최적설계", 한국콘크리트학회논문집, 제12권 4호, pp. 91-101.
3. 조선규, 조효남, 민대홍, 이광민, 김환기(2000) "설계민감도 해석을 이용한 P.S.C 박스거더교의 최적설계", 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 2호, pp.205-216.
4. 조선규(2001) "이동식 비계공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더교의 최적설계", 단국대학교 박사학위논문
5. 조선규, 윤석구, 박영하(2004) "표준단면을 위한 프리스트레스트 콘크리트 거더의 단면최적설계", 대한토목학회논문집, 제 24 권 4A호, pp.853-859.
6. 한국콘크리트학회(2000), 콘크리트구조설계기준·해설
7. 철도청(2003), 중앙선(덕소~양수간)복선전철 건설공사 구조계 산서 및 도면
8. Garret N. Vanderplaats(1985), ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.
9. Al-Shaleh, Khaled Saad (1994), Optimum Design of Straight Steel Box Girder Bridges, Ph.D dissertation, Georgia Institute of Technology.
10. Al-Gahtain, Ahmed (1986). Optimum Design of Welded I-Beams Subjected to Highway Bridge Loads. Ph.D dissertation, Univ. of Iowa
11. Lust, R.V. and L.A.Schmit (1985), Alternative Approximation Concepts for Space Frame Synthesis, AIAA/ASME /ASCE/ AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp. 333-348, April
12. Garret N. Vanderplaats (1984). Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications, McGraw-Hill, Inc.
13. Robert F. Mast (1989). Lateral Stability of Long Prestressed Concrete Beams-Part1. PCI Journal, Vol.34, No.1, pp. 34-53