프리스트레스 콘크리트 교량 고강도 강연선 적용 방안

제공처 : 한국도로공사 설계처

출처 : 2013년도 고속도로 설계 실무자료집(2014, 한국도로공사)

1. 일반현황

(1) 고강도 PS강연선(2,160MPa, 2,400MPa) 및 정착장치의 적용을 통한 프리스트레스 콘크리트 교량의 안전성 향상, 단면 축소, 장경간화로 경관개선 및 경제적 설계 구현

(1.1) 고강도 PS강연선 : 1,860MPa 초과 항복강도를 가진 강연선

1.1 PS강연선 종류 및 기술동향

(1) 현재 설계 적용하고 있는 PS강연선의 인장강도는 1,860MPa임.

(2) 고강도 PS강연선은 일본에서 2,230MPa 강연선을 개발(설계 미적용)하였으며, 국내에서는 인장강도 2,160MPa, 2,400MPa 포스트텐션용 비도금 강연선과 2,200MPa 사장교 케이블용 도금 강연선 개발(초장대교량사업단 국책과제, 2012년)

(2.1) PS강연선 관련 기술 동향

구 분	내 용	비 고
국내	· 생산 : 1,720, 1,860, 2,160, 2,400 · 유통 : 1,860, 2,160 · 시방 : 1,720, 1,860, 2,160(2009), 2,400(2011)	KS D 7002 (1965) (2011개정)
일본	· 생산 : 1,720, 1,860, 2,230(2006) · 유통 : 1,860 · 시방 : 1,720, 1,860	JIS G 3536 (1960) (1999개정)
미국	· 생산 : 1,725, 1,860 · 유통 : 1,860 · 시방 : 1,725, 1,860	ASTM A416 (1957) (2012개정)
영국	· 생산 : 1,770, 1,860 · 유통 : 1,860 · 시방 : 1,770, 1,860	BS 5896 (1969) (2007개정)

2. 현황 및 문제점

2.1 현 설계 및 품질 기준

2.1.1 PS 강연선

(1) 콘크리트 구조기준(2013) 2.2.3 강재

(1.1) 프리스트레스 콘크리트에 사용되는 강연선은 KS D 7002의 규정에 따라야 한다.

(2) 도로교 설계기준(2010) 4.6.1.3 (1) PS강재

(2.1) PS강선, PS강봉, PS강연선은 한국산업규격 KS D 7002, KS D 3505에 적합한 것이어야 한다.

(3) 기술표준원 KS D 7002 PC 강선 및 강연선(2011.3.2개정)

(3.1) SWPC7CL(2,160MPa), SWPC7DL(2,400MPa) 강연선 추가

(3.2) 강연선 시험방법 : 인장시험(연신율), 릴랙세이션시험

2.1.2 정착장치 및 접속장치

(1) 콘크리트 표준시방서 해설(2009) 2.4.1 정착장치 및 접속장치

(1.1) 정착장치 및 접속장치의 선정에 있어서는 정착 또는 접속된 PS 강재의 규격에 정해진 인장하중값의 95퍼센트에 이르기 전에 파괴되거나 현저한 변형이 일어나는 일이 없는 구조 및 강도를 갖는 것이어야 한다.

(2) 콘크리트 표준시방서 해설(2009) 2.6.3 정착장치 및 접속장치의 품질검사

(2.1) 정착장치 및 접속장치의 품질검사는 육안관찰에 의한 외관검사와 PSC 텐던 정착장치 및 접속장치의 성능 시험방법(KCI-PS101)의 방법에 의한 성능검사에 따른다.

3. 개선내용

3.1 적용방안 검토

3.1.1 성능기준

(1) PS 강연선

(1.1) 국내 KS기준의 인장시험과 릴랙세이션시험 결과 기준을 만족함.

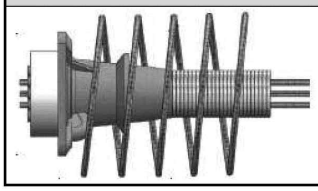
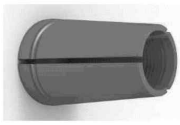
구 분	기 준	시험결과	비 고
인장시험	· 연신율 3.5% 이상	· 연신율 4.2~4.5%	KS JIS ASTM BS
릴랙세이션 시험	· 하중감소 2.5%미만	· 하중감소 0.80%	

(1.2) 국외 ISO15630-3 기준에 의한 굴절인장시험, 피로시험, 응력부식

구 분	기 준	시험결과	비 고
굴절인장 시험	· 20°휨상태에서 인장강도감소 28%이하	· 강도손실률 11.94~15.67%	ISO15630-3 Part 3
피로시험	· 200백만회 피로시험후 파단된 단면손실 0%	· 파단된 강선 없음	
응력부식 성능시험	· 티오시안수용액에 넣고 공칭강도의 80% 가력후 파단 최소2시간이상, 평균5시간이상	· 파단최소시간3.3시간, 평균12.2시간이상	

(2) 정착장치

(2.1) 정착장치는 웻지, 앵커헤드, 앵커캐스팅 등으로 구성

정착장치 셋트	웻지	앵커헤드	앵커캐스팅
			

(2.2) 국내 콘크리트학회 기준에 의한 정하중시험, 피로시험 및 하중전달

구 분	기 준	시험결과	비 고
정하중시험 (인장시험)	· 실제(공칭) 극한하중 95% 이상 · 총신장량 최소 2%	· 실제(공칭) 극한하중 99.4~101.6% · 총신장량2.86~3.90%	KCI
피로시험	· 200백만회 피로시험후 파단된 단면손실 5%미만	· 단면손실 0～2.0%	
하중전달시험 (압축시험)	· 최대균열폭 0.25mm 이하(마지막0.8Fpk) · 공칭극한강도의 110%이상	· 최대균열폭 0.2mm이하 · 공칭극한강도의 113.3~115.7%	

3.1.2 경제성

(1) 검토방향

(1.1) PSC계열 거더 및 박스형식 교량에 대하여 경제성 검토 수행

(1.2) 강연선 강도 상향(1,860→2,400MPa)에 따른 텐던 및 강연선 수량 비교

(2) 검토결과

(2.1) PSC계열 거더 : 강연선 절감량은 평균 22.1%, 공사비 절감량은 평균 3.1%(절감액은 1.9백만원)임

구 분	평균	00계열거더			△△계열거더	
		L=30m	L=40m	L=50m	L=50m	L=60m
강연선절감량 (%)	22.1	18.2	22.4	21.8	25.0	23.4
공사비절감량 (%)	3.1	4.1	1.7	3.7	3.1	3.0
공사비절감액 (백만원/본)	1.977	1.066	0.641	2.033	2.816	3.330

(2.1.1) 고강도 강연선 사용에 따른 공사비 절감 효과 미미함

(2.2) PSC 박스 거더(ILM형식, L=375m) : 강연선 절감량은 32.2%, PT 공사비 절감량은 26.9%(2.5억원)이며,
PSC 박스 거더(MSS형식, L=250m) : 강연선 절감량은 28.2%, PT 공사비 절감량은 16.1%(0.5억원)임

구 분	평균	ILM형식 (L=375m)	MSS형식 (L=250m)
강연선절감량 (%)	30.2	32.2	28.2
공사비절감량 (%)	21.5	26.9	16.1
공사비절감액 (억원)	1.50	2.47	0.54

(2.2.1) 고강도 강연선 사용에 따른 공사비 절감 효과 양호함

3.1.3 시장상황

(1) 생산업체

(1.1) 고강도 강연선 및 정착장치는 특정업체만 생산 가능하여 독점생산에 따른 수급불균형 및 공급가 인상 우려

(1.2) 일반 강연선 및 정착장치 생산업체는 설비추가, 인증절차 등을 통하여 고강도 강연선 및 정착장치 추후 생산 가능

구분	강도(MPa)			비고
	1,860	2,160	2,400	
강 연 선	다수	고려제강 만호제강 (2)	고려제강 (1)	
정착장치	다수	케이티에이 대한피씨 등 (4)	케이티에이 (1)	

(2) 적용실적

(2.1) 냉정-부산선 양산천교(L=700m) 강연선(1,860→2,160MPa) 변경

☞ 고강도 강연선 사용에 대한 시공자료 분석 결과
- 정기안전점검보고서, 균열관리대장에 시공관련 특이사항 없음

(2.2) 담양-성산선 남원천교(L=120m) 강연선(1,860→2,160MPa) 변경

(2.2) 국도 광양 태인2교(Extradosed교) 강연선 변경(1,860→2,400MPa) 및 시공(2013. 8)예정

3.1.4 설계자문

(1) 목적 : 고강도 강연선 및 정착장치 성능검토 결과 적정성 및 설계·시공 검토사항 관련 전문가 의견 수렴

(2) 자문의견 및 검토내용

비 고	자문의견	검토내용
설계	· 고강도 강연선 사용에 따른 인장지배단면 설계 필요	· 고강도강연선의 변형률이 항복강도 변형률을 초과하여 인장지배단면 설계 가능
	· 정착장치 시험기준을 고강도 강연선에서도 적용 가능한지 여부 검토 필요	· 정착장치 시험기준은 공칭강도와 실제강도 모두 검토하므로 고강도 강연선에 적용 가능
	· 정착장치 일정구간 직선 및 텐던 곡률기준 필요	· 설계시 강연선 꺽임이 발생하지 않도록 설계 반영
품질	· 고강도강연선 사용에 따른 품질 및 시공기준 필요	· 설계도서에 품질 및 시공 관리기준 반영
기타	· 고강도강연선 정착장치 크기 재설정 필요	· KCI-PS1011에 부합되는 제품 설계 반영

4. 결론

4.1 검토결론

(1) 고강도 강연선은 품질기준을 만족하고 구조적으로 유리하므로, 강연선 강도 상향에 따른 경제적 효과 및 교량슬림화 등 경관설계가 가능함

(2) PSC 계열 거더 적용은 경제적 절감효과가 미미하고, 관련 업계 거더 재설계, 거푸집 제작 등이 필요하므로 설계조건과 경제성 등을 검토 후 필요 강연선 선택 적용

(3) PSC 박스 거더 적용은 상부형식, 경간장 등의 설계조건과 경제성 등을 검토 후 고강도 강연선 설계 적용

4.2 향후 추진계획

(1) 적용

(1.1) 신규 착수 설계노선부터 적용

(2) 기대효과

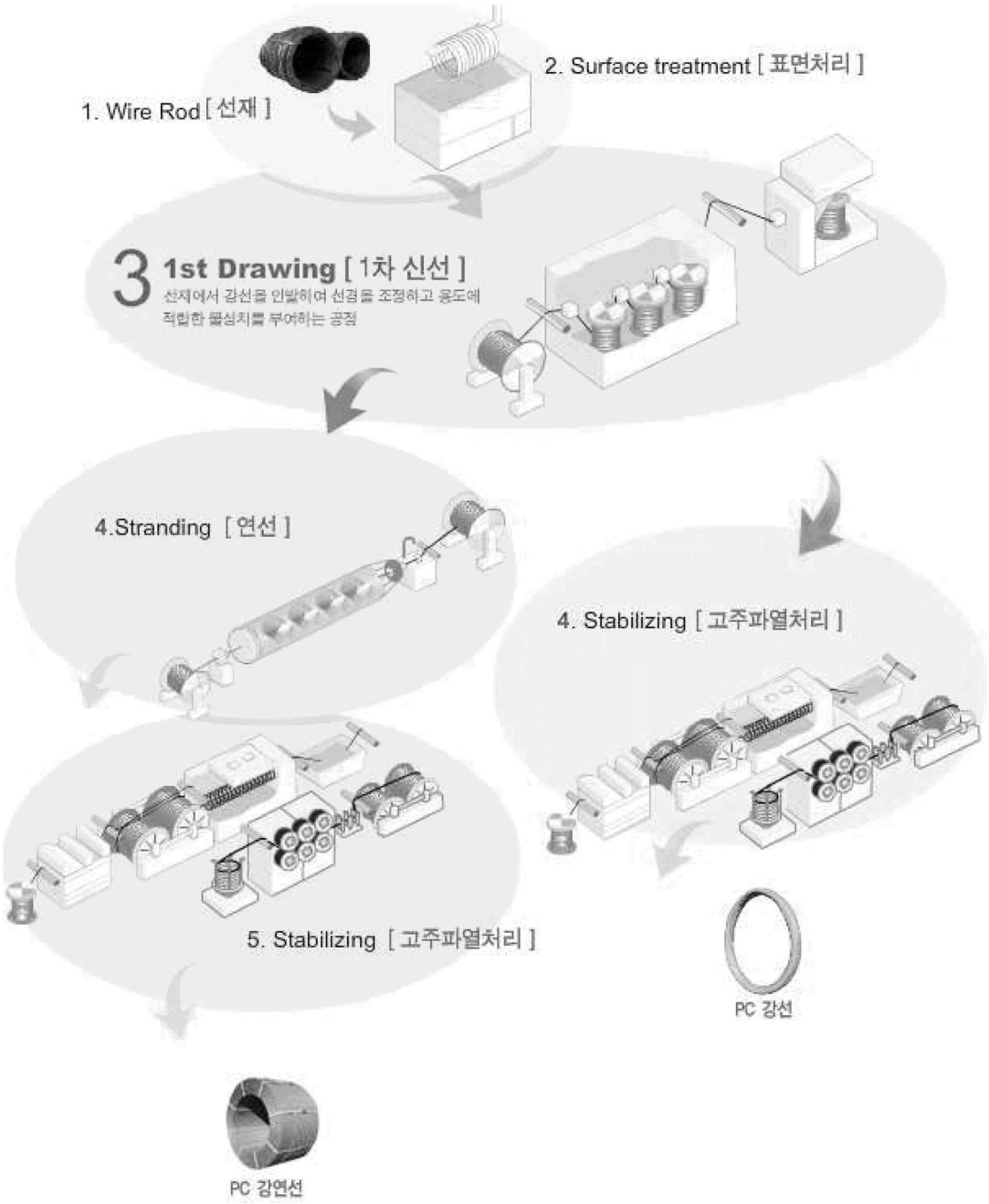
(2.1) PS구조물의 경관 개선 및 경제적 설계 구현

(2.2) 현 설계노선 적용시 공사비 약 9억원 절감 예상

(2.2.1) 함양~울산선 지곡교 등 PSC박스거더 6개소 × 1.5억원/개소 = 9억원

5. 기타

5.1 PS 강연선 생산 프로세스



5.2 강연선 및 정착장치 단가

(1) PS 강연선 단가

구분	강도(MPa)			비고
	1,860	2,160	2,400	
인장강도 비 (%)	100	115	128	SWPC (Φ12.7mm)
단 가 (천원/톤)	1,875	2,156 (115%)	2,244 (120%)	
생산업체	다수	고려제강 만호제강	고려제강	

(2) 정착장치 단가

구분	강도(MPa)			비고
	1,860	2,160	2,400	
인장강도 비 (%)	100	115	128	
단 가 (천원/개)	1,717	1,918 (118%)	2,182 (127%)	Φ15.2mm 13H
생산업체	다수	케이티에이 대한피씨 등	케이티에이	

(3) 철근 단가

구분	강도(MPa)			비고
	SD300	SD400	SD500	
인장강도 비 (%)	100	127	141	
단 가 (원/ton)	784,000	789,000 (101%)	819,000 (104%)	D19기준
생산업체	다수	다수	다수	

5.3 경제성 분석 결과

5.3.1 PSC계열 거더 적용성 검토

(1) 검토 조건

(1.1) 텐던 수량을 고정하고, 강연선 수량만 변경 : Case 1

(1.2) 텐던 수량과 강연선 수량을 동시에 변경 : Case 2

(2) 경제성 분석

(2.1) OO거더(L=30m)

구분	Case 1			Case 2			비 고
인장강도(MPa)	1,860	2,160	2,400	1,860	2,160	2,400	
Tendon (강연선)	3(12) 2(7)	3(10) 2(6)	3(9) 2(5)	3(12) 2(7)	2(15) 2(6)	2(14) 2(5)	
강연선량(톤)	1.788	1.522	1.359	1.788	1.522	1.463	
절감율(%)	-	85.1	76.0	-	85.1	81.8	
PT공사비(백만원)	9.957	9.637	9.195	9.957	9.081	8.872	
절감율(%)	-	96.8	92.3	-	91.2	89.1	
거더공사비(백만원)	26.035	25.716	25.274	26.035	25.178	24.969	
절감율(%)	-	98.8	97.1	-	96.7	95.9	

(2.2) OO거더(L=40m)

구분	Case 1			Case 2			비 고
인장강도(MPa)	1,860	2,160	2,400	1,860	2,160	2,400	
Tendon (강연선)	3(15) 2(7)	3(12) 2(7)	3(11) 2(6)	3(15) 2(7)	-	-	
강연선량(톤)	2.797	2.389	2.171	2.797	-	-	
절감율(%)	-	85.4	77.6	-	-	-	
PT공사비(백만원)	13.531	13.340	12.890	13.531	-	-	
절감율(%)	-	98.6	95.3	-	-	-	
거더공사비(백만원)	37.731	37.540	37.090	37.731	-	-	
절감율(%)	-	99.5	98.3	-	-	-	

(2.3) OO거더(L=50m)

구분	Case 1			Case 2			비 고
인장강도(MPa)	1,860	2,160	2,400	1,860	2,160	2,400	
Tendon (강연선)	4(15) 2(7)	4(12) 2(7)	4(11) 2(6)	4(15) 2(7)	3(15) 2(9)	3(15) 2(6)	
강연선량(톤)	4.343	3.667	3.336	4.343	3.709	3.395	
절감율(%)	-	84.4	76.8	-	85.4	78.2	
PT공사비(백만원)	19.571	19.152	18.497	19.571	18.862	17.506	
절감율(%)	-	97.8	94.5	-	96.4	89.4	
거더공사비(백만원)	54.870	54.451	53.797	54.870	54.185	52.837	
절감율(%)	-	99.2	98.0	-	98.8	96.3	

(2.4) △△거더(L=50m)

구분	Case 1			Case 2			비 고
인장강도(MPa)	1,860	2,160	2,400	1,860	2,160	2,400	
Tendon (강연선)	4(14) 2(12)	4(11) 2(11)	4(10) 2(10)	4(14) 2(12)	3(15) 2(11)	3(14) 2(9)	
강연선량(톤)	4.558	3.760	3.418	4.558	3.818	3.418	
절감율(%)	-	82.5	75.0	-	83.8	75.0	
PT공사비(백만원)	27.613	26.980	25.903	27.613	26.511	24.863	
절감율(%)	-	97.7	93.8	-	96.0	90.0	
거더공사비(백만원)	91.215	90.603	89.530	91.215	90.043	88.399	
절감율(%)	-	99.3	98.2	-	98.7	96.9	

(2.5) △△거더(L=60m)

구분	Case 1			Case 2			비 고
인장강도(MPa)	1,860	2,160	2,400	1,860	2,160	2,400	
Tendon (강연선)	4(15) 2(19)	4(13) 2(15)	4(11) 2(15)	4(15) 2(19)	3(15) 2(19)	3(15) 2(15)	
강연선량(톤)	6.662	5.574	5.030	6.662	5.644	5.100	
절감율(%)	-	83.7	75.5	-	84.7	76.6	
PT공사비(백만원)	38.062	37.077	35.253	38.062	36.637	34.800	
절감율(%)	-	97.4	92.6	-	96.3	91.4	
거더공사비(백만원)	112.88	111.92	110.10	112.88	111.38	109.55	
절감율(%)	-	99.1	97.5	-	98.7	97.0	

5.3.2 PSC 박스거더 적용성 검토

(1) 검토조건

(1.1) 텐던 수량을 고정하고, 강연선 수량만 변경 : Case 1

(1.2) 텐던 수량과 강연선 수량을 동시에 변경 : Case 2

(2) 경제성 분석

(2.1) ILM형식 PSCB 교량(L=375m)

구 분	Case 1			Case 2			비 고
인장강도(MPa)	1,860	2,160	2,400	1,860	2,160	2,400	
Tendon (강연선)	12(26) 7(14) 19(12)	9(26) 7(14) 14(12)	8(26) 7(14) 12(12)	12(26) 7(14) 19(12)	11(22) 7(14) 17(10)	11(18) 7(14) 17(10)	
강연선량(톤)	167.46	130.16	116.80	167.46	126.80	113.62	
절감율(%)	-	77.7	69.7	-	75.7	67.8	
공사비(억원)	9.17	7.73 (1.44)	7.42 (1.75)	9.17	7.43 (1.74)	6.70 (2.47)	
절감율(%)	-	84.3	80.9	-	81.1	73.1	

(2.2) MSS형식 PSCB 교량(L=250m)

구 분	Case 1			Case 2			비 고
인장강도(MPa)	1,860	2,160	2,400	1,860	2,160	2,400	
Tendon (강연선	19(12)	15(12)	13(12)	19(12)	19(4) 17(6)	22(2) 19(6)	
강연선량(톤)	71.45	56.41	48.89	71.45	57.21	51.32	
절감율(%)	-	78.9	68.4	-	80.1	71.8	
공사비(억원)	3.41	3.05 (0.36)	2.87 (0.54)	3.41	2.93 (0.48)	2.86 (0.54)	
절감율(%)	-	89.4	84.4	-	85.9	83.9	

5.4 고강도 강연선 설계자문 결과 보고

(1) 추진목적

(1.1) 고강도 PS강연선(2,160MPa, 2,400MPa) 및 정착장치의 적용을 통한 프리스트레스콘크리트 구조물의 안전성 향상, 단면 축소, 장경간화로 경관개선 및 경제적 설계 구현

(2) 고강도 강연선 검토결과

(2.1) 성능기준 : PS강연선 및 정착장치 국내·외 기준 만족

(2.2) 경제성 : PSC계열 거더 : 공사비 평균 3.1%(2백만원) 절감

PSC박스(L=375m) 거더 : PT공사비 26.9%(2.5억원) 절감

(2.3) 시장상황 : 2,400MPa 강연선 및 정착장치는 특정업체만 생산가능

(3) 설계자문 결과 : 반영 14건, 미반영 4건

구분	자문의견	조치내용	비고
김동수	장대교량 적용효과 기대	장대교량 최적설계 시행	반영
	인장지배단면으로 설계	인장지배단면으로 설계가능	반영
	프리스트레스 손실량 검토	프리스트레스 손실량식 제공	반영
김우종	정착구 제원 제공	시험기준 부합 제품 사용	미반영
	제작업체의 자발적인 적용	설계조건과 경제성검토 적용	반영
박찬민	케이블시스템 피로시험 필요	시험기준 부합 제품 사용	반영
	품질 및 시공관리 기준 필요	설계도서에 품질기준 수록	반영
	응력부식에 대한 대비	설계도서에 품질기준 수록	반영
이원철	인장지배단면으로 설계	인장지배단면으로 설계가능	반영
	항복응력 산정법 필요	항복강도 기준 만족	미반영
	정착장치 시험 규정 검증	공칭, 실제강도 모두 만족	반영
	탄소당량, 저온취성화 검토	용접관련 규정으로 미적용	미반영
	정착구 지압응력, 보강철근	설계기준 부합 제품 설계	반영
이재형	선진국 상용화 되지 않았음	시방기준 적합제품 설계	반영
	정착장치 일정 직선구간 필요	강연선 꺽임 방지 설계시행	반영
	강연선 다발 곡률기준 필요	강연선 꺽임 방지 설계시행	반영
	절단시 소선 길이 상이	설계도서에 기준 마련하겠음	반영
	정착장치 크기 재설정	시험기준 부합 제품 사용	미반영

(4) 향후추진계획

(4.1) 고강도 강연선 적용방안 수립(5월)