

고속철도 침목용 고강도콘크리트의 개발

Development of High Strength Concrete for the Sleepers of High Speed Rail

백 상 현^{*} 엄 태 선^{**} 곽 천 탁^{***} 정 재 현^{***} 박 중 방^{****} 김 인 재^{*****}
Paik, S. H. Um, T. S. Koak, C. T. Jung, J. H. Park, J. B. Kim, I. J.

In the present study, we have developed high strength concrete for the sleepers of high speed rail and verified its applicability by in-situ applications. Concrete for sleepers is manufactured by steam curing at low temperature(below 55°C), and should be finished its manufacturing process such as placing, curing, demolding and prestressing in 24 hours. The sleepers need its compressive strength above 350kg/cm² in 15 hours, air-entrainment for durability and nominal design strength of 600kg/cm², considering its quality variation at factory. We performed the optimum mix design of concrete and verified the rightness of the use of TYPE III cement. Finally, we have confirmed the manufactured sleepers satisfy the required material properties through in-situ application.

1. 서론

철도침목은 안정성과 내구성이 요구되는 기간 산업시설로서, 열차의 속도가 증가할수록 콘크리트의 침목은 고강도 특성이 요구(표1참조)되며, 또한 국내의 동절기 기후를 감안할 때 적용되는 콘크리트는 내구성을 확보하기 위하여 공기연행이 절대적으로 요구되고 있다.

표 1 열차의 속도에 따른 콘크리트의 요구강도

항 목 \ 강 도	열차속도 증가에 따른 콘크리트 요구강도						비 고
속도 (km/h)	55	65	70	90	140	210-300	(경부고속철도)
허용응력 (kg/cm ²)	40	65	70	140	155	200-270	탈형강도: 350kg/cm ²
설계기준강도(kg/cm ²)	120	200	210	450		600-800	28일강도: 600kg/cm ²
비 고	재 래 선			고 속 전 철			

고속철도 침목의 안정성유지를 위하여 단위시멘트량을 증가시키고 다량의 고성능감수제 사용하여 물-시멘트비를 낮춤으로써 강도, 작업성 및 내구성을 확보하는 콘크리트 배합설계는 콘크리트의 유통성이 급격히 저하되어 작업성유지 및 안정적 품질관리가 곤란하며, 또한 저온 증기양생(55°C이하)에서 1일 생산공정의 탈형강도가 발현되지 않는다. 특히, PC강선은 부배합 콘크리트가 건조수축와 Creep이 커서 Relaxation이 커지므로 안정성이 문제로 발생할 수 있다. 따라서, 단위시멘트량을 적게 사용한

- * 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 연구원
- ** 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 책임연구원(공학박사)
- *** 쌍용양회(주) 건자재사업팀 과장(건축사)
- **** 쌍용양회(주) 건자재사업팀 사원
- ***** 한국고속철도공단 궤도국 공사부 부장(기술사)
- ***** 한국고속철도공단 궤도국 공사부 과장(기술사)

조강성, 고강도특성 및 동결융해 저항성 등의 내구성을 갖는 조강형의 콘크리트배합을 적용하는 것이 타당하다. 유럽 등 구미에서는 이런 목적에서 PZ 525R로 분류되는 조강형시멘트(초조강시멘트, 조강시멘트)를 사용하여 조기탈형과 저온양생으로 고내구성의 고속철도 침목을 생산하고 있다.

본 연구에서는 조강시멘트를 사용하여 저온 촉진양생(55℃이하)과 1일 이내의 생산공정 완료가 용이하면서 고속철도침목의 설계기준을 만족하는 고강도 콘크리트를 개발하기 위하여 현장의 품질변동을 고려한 배합강도와 작업성을 만족하는 콘크리트 조건 및 표준배합을 제시하고, 생산공장의 원재료에 대한 특성 및 원재료에 따른 콘크리트 특성 등을 검증하여 그의 적용성을 확인하고자 하였다.

2. 실험조건

2.1 원재료

표준배합을 결정하기 위해 사용한 조강시멘트, 골재 및 혼화제 등 원재료의 특성은 표 2와 같다.

표 2 조강시멘트의 화학성분과 물리특성

시멘트	화 학 성 분 (%)									blaine (cm ² /g)	초결 (min)	종결 (hr)	압축강도(kg/cm ²)		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig-loss				3일	7일	28일
3종	19.7	5.9	3.0	62.1	3.0	0.10	0.75	4.2	1.1	4520	185	4:45	243	355	466

표 3 굵은 골재(최대치수 19mm)의 특성

특성 종류	골 재 특 성						
	비중	흡수율	단위용적중량	실적율	조립율	파쇄율	마모율
규 격	>2.55	<2.0%	>1500kg/m ³	-	-	-	<40%
D 사	2.68	0.4%	1560kg/m ³	58.2%	7.2	15.9%	12.8%

표 4 잔골재의 특성

특성 종류	골 재 특 성					
	비중	흡수율	단위용적중량	실적율	조립율	씻기손실량
규 격	>2.50	< 2.0%	> 1450kg/m ³	-	2.3-3.1	< 3.0%
D 사	2.62	1.4%	1650kg/m ³	63.1%	2.80	1.6%

표 5 콘크리트배합을 위한 혼화제

회사명	종류	계열	감수효과	색깔
M 사	고성능감수제	나프탈렌계	약 10%	흑갈색
K 사	AE제	-	-	부색

2.2 양생 및 다짐

중기양생은 55℃이하에서 15시간이내의 탈형강도를 목표로 한 양생조건은 표 6과 같고 다짐은 2층으로 하여 Table Vibrating을 하였다.

표 6 고속철도 침목을 생산하기 위한 양생 및 다짐조건

구분	최고온도 (℃)	승온경사 (℃/hour)	강온경사 (℃/hour)	전치 (hrs.)	중기양생조건			총양생 시간 (hrs.)	다짐 및 성형
					승온 (hrs.)	등온 (hrs.)	강온 (hrs.)		
시방	55이하	15이하	10이하	2이상	-	-	-	>12	진동다짐
시험조건	50	12	8	3	2.5	6	3.5	15	진동다짐

2.3 시방배합의 조건설정

시방배합은 공장제품의 현장변동 6~8%와 적정 작업성유지를 위해 표 7과 같이 설정하였다.

표 7 설계기준강도의 활중과 적정 슬럼프 조건의 설정

항목	실제압축강도 (kg/cm ²)	시방배합강도 (kg/cm ²)		슬럼프(cm)		공기량 (%)
		활중계수	배합강도	시방서	시험조건	
요구 Spec.	600	1.12	672	8	8±2	4±1
		1.15	690			

3. 실험결과

3.1 제안된 배합검토

고속철도자문단(DEC)와 TGV측에서 제공된 자료를 근간으로 한 콘크리트배합(PZ525R:조강시멘트)은 시험배합에서 콘크리트의 상태가 매우 거칠고 작업이 불가능할 정도이고 슬럼프와 공기량의 측정이 불가능하였다. 이를 강제적인 2층 다짐을 수행하였는데, 이 경우의 강도결과는 무의미하며 현장적용과 작업이 용이한 고속철도용 고강도콘크리트 제조에 대한 검토가 요구되었다.

표 8 시방배합의 시험배합 결과

구분	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m ³)					슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kg/cm ²)			
			C	W	S	G	A.D			1일	7일	14일	28일
추천	30	35	400	120	650	1263	4	측정 불가능		529	724	605	764

3.2 표준시방배합의 선정을 위한 시험배합

초기 유동성과 고강도를 위한 혼화제의 과다사용(2%이상)은 점성이 커지고, 시간경과에 따른 슬럼프손실이 심각하게 발생하므로 표 9에서와 같이 고성능감수제의 사용량을 1.5~2.0%이하로 억제하면서 단위수량과 시멘트를 증가시켜 강도보상과 작업성을 증진하는 것이 고내구성의 고속철도 침목생산에 유리하다는 실험실적 검토결과를 도출하였다. 각 시험배합에 따른 강도특성은 동일 물시멘트의 배합이므로 단위시멘트량 405~465kg/m³의 변화에 따른 강도의 변화는 거의 없었다.

표 9 침목용 단위수량의 선정을 위한 배합조건

시험 수준	S/a (%)	W/C (%)	단위재료량(kg/m ³)				A. D		AE제	
			C	W	S	G	%	kg	%	gram
1	0.37	0.33	465	153	657	1112	1.40	6.51	0.020	110.00
2			435	144	656	1143	1.50	6.53	0.020	129.46
3			405	134	675	1176	1.70	6.89	0.028	95.39

표 10 배합조건별 굳지않은 콘크리트의 특성

특성 수준	Slump(cm)		Air (%)	특 성 평 가
	초기	15분후		
1수준	8.4	7.2	4.0	- 양호함, 슬럼프 손실 거의 없음
2수준	10.9	7.5	3.2	- 타설가능한 작업상태, 슬럼프 손실 다소 발생
3수준	4.7	3.2	3.0	- 고유동화제 과량에도 요구슬럼프를 만족 못함 - 매우 거칠고 점성이 커서 작업상태 불량(3층다짐)

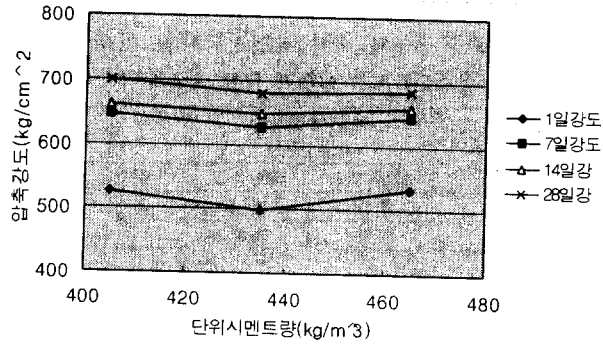


그림 1 단위시멘트량에 따른 압축강도발현(W/C = 33%고정)

3.3 적정 W/C 선정

현장의 변동계수를 6-8%로 가정할 때, 배합강도 할증계수는 1.12~1.15이며 이에 따라 압축강도기준으로 670~690kg/cm²의 시방배합강도를 요구한다. W/C에 따른 강도추정식을 보면(표11, 그림2참조) 시방배합강도를 만족하는 적정 W/C는 32~33%로 추정(표12참조)되며, 이에 따른 단위시멘트량의 적정량은 440kg/m³이하로 판단된다.

표 11 배합조건에 따른 콘크리트의 물성

시험 수준	S/a (%)	W/C (%)	단위재료량(kg/m ³)						S.P.		슬럼프 (cm)	Air (%)	압축강도 (kg/cm ²)				휨강도 (kg/cm ²)	
			C	W	S	G	%		gram				1일	7일	14일	28일	7일	28일
							%	kg	%	gram								
1	37	33	440	145	653	1138	1.45	6.38	0.025	110.00	6.5	3.3	533	582	623	672	78	86
2	36	28	518	145	612	1113	1.55	8.03	0.025	129.46	6.0	3.2	628	651	-	775	-	-
3	38	38	382	145	690	1151	1.55	5.91	0.025	95.39	7.5	4.3	468	532	-	602	-	-
4	37	36	403	145	704	1226	1.55	6.24	-	-	6.0	2.3	481	538	575	618	72	78

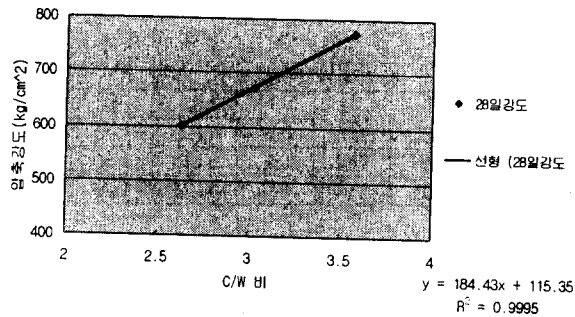


그림 2 압축강도-C/W비 관계 도출 결과

표 12 요구배합강도와 W/C의 관계

변동 계수	할증 계수	실계강도 (28일)	배합강도 (28일)	a	b	C/W	W/C (%)
6%	1.12	600	672	115.4	184.4	3.0943	33.1
8%	1.15	600	690				32.0

표 13 단위시멘트량과 배합강도의 관계

시험 수준	S/a (%)	W/C (%)	단위재료량(kg/m ³)								압축강도 (kg/cm ²)		
			C	W	S	G	S.P.		AE제		1일	7일	28일
							%	Kg	%	gram			
1수준	37	33.0	440	145	633	1138	1.50	6.60	0.026	114.4	475	587	685
2수준		33.7	430	145	656	1143	1.50	6.45	0.026	111.8	464	574	669
3수준		34.5	420	145	660	1149	1.50	6.30	0.025	105.0	451	559	650
4수준		35.4	410	145	663	1154	1.50	6.15	0.025	102.5	452	522	603

3.4 현장골재과 배합의 미세조정

현장골재에 대한 물리적 특성을 분석한 결과, 현장의 굵은골재는 육안으로도 입형의 차이가 있으며 실적율(단위용적중량,비중)의 차이를 보면 G사의 실적율이 커서 작업성 및 강도에 있어서 다소 유리하며, 골재의 강건성은 D와 H사가 양호한 결과를 보였다. 한편, 잔골재의 품질은 T와 H사의 잔골재의 씻기손실과 유기불순물 등으로 보아 품질저하가 예견되는데 그의 따라 단위시멘트량의 약 5-10kg/cm³ 상향 조정 등의 조치와 함께 주기적인 골재의 수입검사가 필요하다.

표 14 현장 굵은골재의 특성

특성 종류	골재 특성						
	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)	조립율	파쇄율 (%)	마모율 (%)
규격	>2.55	< 2.0	> 1500	-	-	-	< 40
D 사	2.68	0.4	1560	58.2	7.2	15.9	12.8
H 사	2.63	0.5	1530	58.3	6.8	16.7	15.9
T 사	2.64	0.6	1510	57.2	6.9	24.2	20.8
G 사	2.62	0.6	1550	59.3	7.1	23.4	18.5

표 15 현장 잔골재의 특성

특성 종류	골재 특성						
	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)	조립율	씻기손실량 (%)	*유기불순물
규격	>2.50	<2.0	>1450	-	2.3-3.1	<3.0	농황색 수준
D 사	2.62	1.4	1650	63.1	2.80	1.6	농황색
H 사	2.60	1.2	1670	64.4	2.61	2.7	담황색
T 사	2.62	0.9	1640	62.7	2.61	1.5	담황색
G 사	2.61	0.8	1690	64.9	3.00	3.6	엷은 적색

* 유기불순물 : 육안에 의한 색상 판정

3.5 조기강도추정 및 현장적용

공장 PC제품은 재료, 공정, 계량, 양생 등 제조과정에서의 이상을 조기에 발견하여 관리하고, 또한 생산제품의 출하관리를 위하여 조기에 품질을 예측할 필요가 있다. 따라서 조기강도를 추정할 수 있는 도구를 필요로 하는데, 공장 PC제품에 조강시멘트를 이용한 고강도콘크리트의 조기강도추정식을 산정하기 위하여 저온 축진양생조건에서 7일과 28일 강도와와의 관계를 분석한 결과는 그림 3과 같다. 여기서, 관계식은 상관계수가 0.96로 유의성을 지녀 현장 품질관리를 위한 용도로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

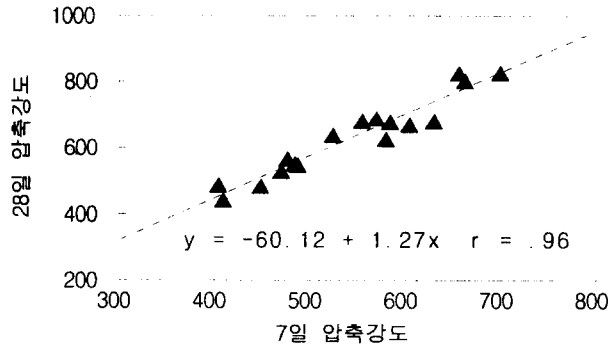


그림 3 7일강도와 28일강도와와의 강도추정식

한편, 앞서 제시된 표준시방배합과 현장골재를 사용한 현장시험결과, 시험의 오차발생(계량, 공기량, 슬럼프 등)이 상존하기는 하였으나 양호한 적용성을 확인하였으며 총괄적인 현장적용 결과는 추후 보고할 예정이다.

4. 결론

고속철도 사업과 관련하여 국내 시공환경과 설계기준에 적합한 고강도, 고내구성의 고속철도침목용 고강도콘크리트를 제조하기 위한 조건 및 그의 현장적용성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 저온축진양생(55°C 이하)과 1일 생산작업에서 전 공정을 완료하기 위해서는 유럽에서 추천하고 있는 조강시멘트의 사용이 필요하다.
- 2) 생산성과 원활한 작업을 위하여 현업에서 요구되는 콘크리트의 슬럼프는 $8 \pm 2\text{cm}$ 이며 이를 만족하는 적정 단위시멘트량은 440kg/m^3 이하 이었다.
- 3) 시멘트의 사용량을 줄이기 위하여 과도한 고유동화제의 사용(1.5~2.0% 이상)은 오히려 작업성과 생산성을 저하시킬 것으로 판단된다.
- 4) 생산공장에 입하되는 골재 품질특성을 분석한 결과, 일부 굵은 골재는 작업성, 내충격성 및 내마모성 등의 영향이 우려되었으며, 잔골재는 유기불순물, 이토분에 의한 작업성과 강도저하가 예견되어 표준배합의 단위시멘트량에 비하여 $5 \sim 10\text{kg/m}^3$ 내의 미세조정과 주기적 골재수입검사 등이 요구된다.

참고문헌

1. "최신 콘크리트공학", 한국콘크리트 학회., 1996.
2. "경부고속철도 침목 시방서", 한국고속철도공단
3. "Prestressed Concrete Sleepers", Indian Concr. J. Vol. 54(12), pp 309, 1980.
4. "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete" ACI Committee 363 ACI Manual of Concrete Practice, Part, 1, 1996.