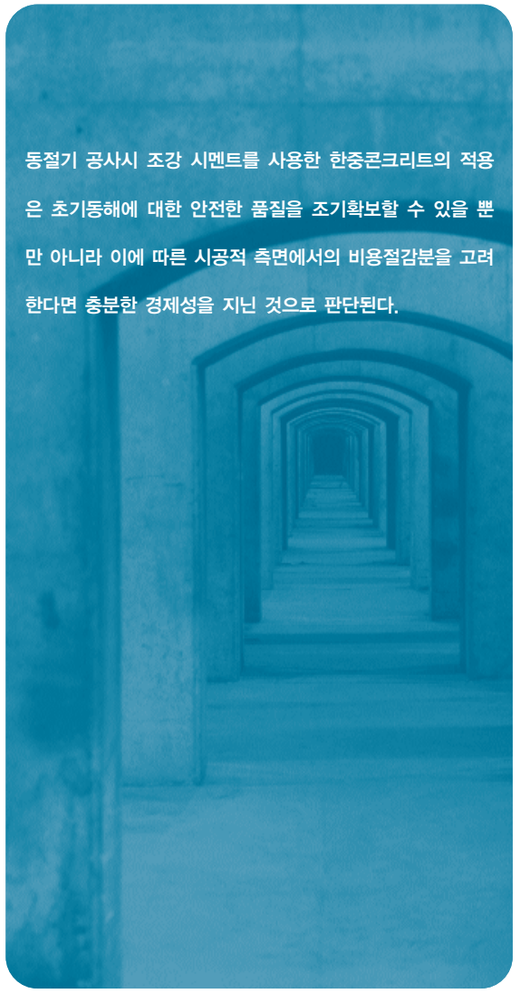
한중공사의 공기단축을 위한 조강시멘트의 적용성

글 | 엄 태 선 쌍용양회 기술연구소 박사 042-865-1755 | E-mail : tsu@ssrc.ssy.co.kr
글 | 장 동 운 쌍용건설 기술개발부 과장 02-3433-7727 | E-mail : safety@ssyenc.com



동절기 공사시 조강 시멘트를 사용한 한중콘크리트의 적용은 초기동해에 대한 안전한 품질을 조기확보할 수 있을 뿐만 아니라 이에 따른 시공적 측면에서의 비용절감분을 고려한다면 충분한 경제성을 지닌 것으로 판단된다.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

사계절이 뚜렷한 국내의 현실은 불가피하게 기온이 낮은 동절기가 존재한다. 일반적으로 기온이 낮은 현상은 건설환경에 불리한 조건을 유발하며 그 중에서도 콘크리트 공사에 직접적으로 큰 영향을 주고 있다.

그러나, 국내 건설현장의 여건상 동절기에도 공사를 연기하거나 중단할 수 없는 현실이므로 이러한 환경조건을 극복할 수 있는 실용적인 방안의 모색이 필요하다.

본 연구에서는 그 중에서 조강시멘트를 이용한 한중콘크리트의 적용성을 검토하여 향후 한중공사에 대비하는 하나의 유효한 방법으로 이용하고자 한다.

한중콘크리트는 소요의 압축강도를 얻기까지 초기동해를 받지 않도록 초기양생이 매우 중요하다. 이는 건설현장에서 자주 경험하는 바와 같이 콘크리트가 초기동해를 받으면 그 후 양생을 계속하더라도 강도의 증진이나 내구성확보가 요구수준에 이르지 않으므로 심각한 문제를 일으키고 있다.

따라서, 콘크리트 타설후 초기에 동결되지 않도록 일정수준의 강도발현시까지 보양해야 하고 특히 구조물의 모서리나 가장자리부분은 보온하기 어려워 초기동해를 받기 쉬우므로 주의해야 한다.

본 연구에서는 조기에 강도를 발현하여 이러한 초기동해의 피해를 최소화하고 양생기간을 단축할 수 있는 조강시멘트를 적용한 실험과 사례에서 얻은 결과를 토대로 현장적용성, 품질특성 및 경제성 검토를 실시하였다.

1.2 조강시멘트의 재료물성

KS규격에 나타나 있는 조강포틀랜드시멘트의 재료물성과 일반적으로 알려져 있는 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다.

일반적인 특성은 보통포틀랜드시멘트와 유사하지만 조기강도가 크고 수화열 발생이 큰 것을 알 수 있으며 이러한 특징이 한중 콘크리트의 적용에 유리한 점이라 볼 수 있다.

[표1.1] 시멘트의 품질 특성의 일람표(경향)

특성 / 시멘트종류	비표면적	강도		수화열	화학 저항성	수축	수밀성
		단기	장기				
보 통	중	중	중	중	중	중	중
조 강	대	대	중	대	중	중	중

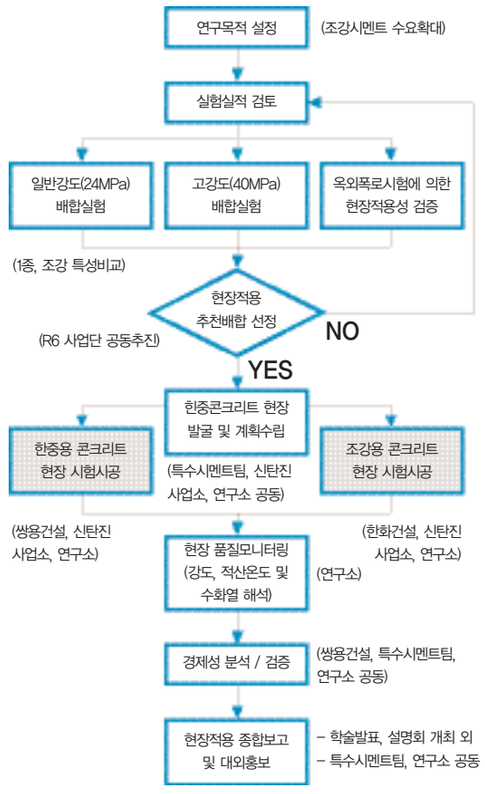
[표1.2] 포틀랜드시멘트의 화합물 조성의 일례(단위:%)

항 목	C3S	C2S	C3A	C4AF
보 통	51	24	9	11
조 강	62	15	9	10

[표1.3] 포틀랜드시멘트의 KS규격(KS L 5201)

항목 \ 종류		보통 (1종)	조강 (3종)
비표면적(㎠/g)		2,800이상	3,300이상
안정도(%)	Autoclave	0.8 이하	0.8 이하
응결	초결(min)	60 이상	60 이상
	종결(h)	10 이하	10 이하
수화열 (cal/g)	7d	–	–
	28d	–	–
압축강도(kgf/㎠)	1d	–	130 이상
	3d	130 이상	250 이상
	7d	200 이상	280 이상
	28d	290 이상	310 이상
SiO_2 (%)		–	–
Al_2O_3 (%)		–	–
Fe_2O_3 (%)		–	–
MgO (%)		5.0 이하	5.0 이하
SO_3 (%)		3.0 이하	3.5 이하
강열감량(%)		3.0 이하	3.0 이하
C_3S(%)		–	–
C_2S(%)		–	–
C_3A(%)		–	15 이하

[그림1.1] 연구내용 및 추진 Flow



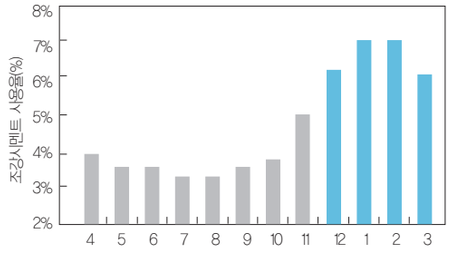
2. 이론적 고찰 및 한중콘크리트 적용기술

2.1 한중콘크리트의 정의 및 적용이유

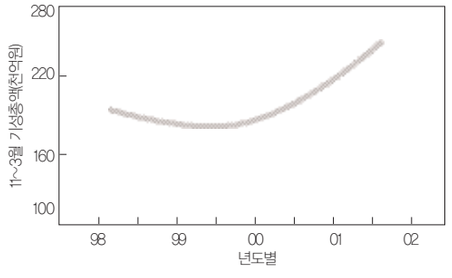
- 콘크리트표준시방서(2003): 하루의 평균기온이 4℃ 이하가 되는 기상조건하에서는 응결경화반응이 몹시 지연되어, 밤중이나 새벽뿐만 아니라 낮에도 콘크리트가 동결할 염려가 있으므로 한중콘크리트로 시공해야 한다.
- Cold Weather Concreting, ACI 306R-88, Reapproved 1997.

  "Cold Weather" : A period when for more than three successive days the average daily outdoor temperature drops below 40°F(약 4.5℃). The average~
- 寒中コンクリートの適用期間は, JASS5では打ち込み後 28 日間の積算温度が370 oD · D以下となる期間, 土木學會示方書では 日平均氣温が 4 ℃以下になると予想された 期間と規定されている.
- 한중 공사에 의한 이익과 경비가 상쇄하고, 또는 이윤이 있는 경우(S건설)
- 준공기한의 관계로 공기단축이 필요한 경우(H건설)
- 공사지연으로 겨울철에 접어든 경우나 동절기가 장기간 지속되는 지역의 공사
- 겨울철이 아니면 공사가 불가능한 경우 또는 긴급을 요구하는 경우

[그림2.1] 월별 조강시멘트 사용율(일본)



[그림2.2] 동절기 공사의 증가추이(국내)



2.2 국내기온조건을 고려한 한중콘크리트의 적용시기

하루의 평균기온이 4℃ 이하로 되는 것이 예상되는 기상조건 하에서는 응결경화반응이 몹시 지연되어, 밤중이나 새벽뿐만 아니라 낮에도 콘크리트가 동결할 염려가 있으므로 한중콘크리트로서 시공할 것을 콘크리트 표준시방서에 규정하고 있다.

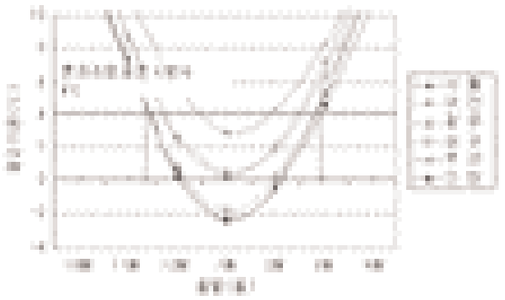
한중콘크리트의 현장적용시기를 결정하기 위해서는 우선, 우리나라의 지역별, 월별 기온자료의 분석이 필요하였다.

[표2.1] 주요 지역의 월별 평균기온 (℃)

구 분	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월
서 울	25.4	20.8	14.4	6.9	0.2	−2.5	−0.3	5.2	12.1	17.4	21.9	24.9
대 전	25.5	20.3	13.8	6.8	0.7	−1.9	0.2	5.4	12.4	17.6	22.0	25.3
광 주	26.1	21.4	15.4	8.7	2.8	0.5	1.9	6.5	12.9	17.8	22.0	25.5
대 구	26.1	21.3	15.4	8.6	2.5	0.2	2.1	7.1	13.8	18.7	22.5	25.7
부 산	25.7	22.1	17.3	11.3	5.6	3	4.3	8.3	13.4	17.4	20.5	24.2
인 천	24.9	20.7	14.5	7.2	0.6	−2.4	−0.5	4.5	10.7	15.9	20.4	24.0

지역별 월평균기온을 근거로 하여 다음 그림과 같이 지역별 평균기온에 따른 한중콘크리트의 적용시기를 추정하였다.

[그림2.3] 한중콘크리트의 적용시기 추정



분석결과 남부지방으로 갈수록 평균 4℃이하의 기간이 짧아지는 반면, 중부지방인 서울, 인천 및 대전 지역에서의 월평균 기온 및 하루의 평균기온을 고려한다면 한중콘크리트의 적용가능한 시기는 11월~3월이라 판단된다.

2.3 적산온도(maturity) 개념의 도입 및 적용시기 판단

적산온도(maturity)는 콘크리트의 강도를 콘크리트 온도와 시간과의 함수로서 일반적으로 다음 식으로 나타낸다.

$$M = \sum_{0}^{t} (\theta + A)\,\Delta t$$

여기서, -M : 적산온도(maturity)(°D · D(℃ · Day, ℃ · hr))

-θ : Δt 시간 중의 콘크리트 일평균 양생온도(℃)

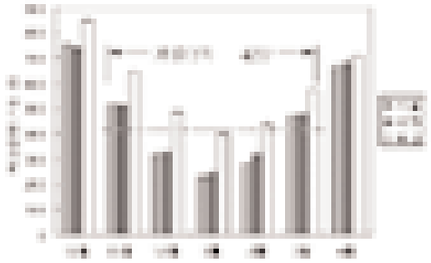
- A : 정수(일반적으로 10℃ 사용)

-Δt : 시간(일(day))

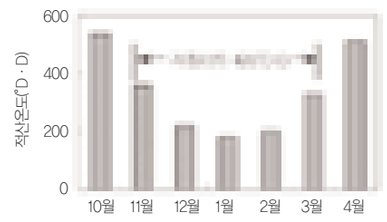
다만, θ는 가열보온양생 혹은 단열보온양생을 하는 기간에서는 콘크리트의 예상 일평균 양생온도로 하며, 위의 보온양생을 하지 않은 기간에는 예상 일평균기온으로 한다.

본 연구에서는 초기양생시간에 근거한 강도발현 특성 파악이 목적이므로, ℃ · hr 를 사용하여 적산온도(maturity) 및 압축강도와의 상관성을 분석하였다.

[그림2.4] 주요지역의 적산온도값(국내)



[그림2.5] 동절기에서 적산온도값(일본)



2.4 콘크리트표준시방서에서의 한중콘크리트 관련내용

건설교통부 제정 콘크리트표준시방서(2003) 제8장에서 한중콘크리트에 대한 일반적인 표준을 규정하고 있으며 관련규격을 다음과 같다.

- 제2장 일반콘크리트
- 제5장 거푸집 및 동바리
- 제7장 매스콘크리트
- 고속도로공사 전문시방서 7-5 콘크리트공
- 건축공사표준시방서 05025 한중 콘크리트 공사

다음은 본 연구와 관련한 콘크리트표준시방서의 내용을 요약한 것이다.

[표2.2] 심한 기상작용을 받는 콘크리트의 양생종료시의 소요압축강도의 표준(MPa)

구조물의 노출 \ 단 면	얇은 경우	보통의 경우	두꺼운 경우
① 계속해서 또는 자주물로 포화되는 부분	15	12	10
② 보통의 노출상태에 있고①에 속하지 않는 부분	5	5	5

[표2.3] 소요의 압축강도를 얻는 양생일수의 표준(보통의 단면)

구조물의 노출상태 \ 시멘트의 종류		보통 포틀랜드 시멘트	조강포틀랜드+보통포틀랜드 +촉진제	혼합 시멘트 B종
① 계속해서 또는 자주	5℃	9일	5일	12일
구조물의 노출상태	10℃	7일	4일	9일
② 보통의 노출상태에 있고	5℃	4일	3일	5일
①에 속하지 않는 부분	10℃	3일	2일	4일

[표2.4] 거푸집의 해체(콘크리트의 압축강도를 시험할 경우)

부 재	콘크리트 압축강도(fcu)
확대기초, 보옆, 기둥, 벽 등의 측벽	5MPa 이상
슬래브 및 보의 밑면, 아치 내면	설계기준강도 ×2/3(fcu ≥2/3fck) 다만, 14MPa 이상

한중콘크리트의 보온양생 방법은 급열양생, 단열양생, 피복양생 및 이들을 복합한 방법 중 한가지 방법을 선택하여야 한다. 본 현장에서는 외기온도를 판단하여 1차 적용시 급열양생(열풍기) 및 단열양생(양생포)을 복합하여 실시하였다.

3. 실험실적 검토 및 현장적용 배합 선정

3.1 현장적용을 위한 실험실적 배합검토

실험실적 검토는 일반강도 배합, 고강도 배합 및 옥외폭로시험을 실시하였다. 그 결과 1종 시멘트 대비 조강시멘트의 우수한 특성, 특히 저온조건에서 보다 우수한 조강성을 확인할수 있었으며 이를, 근거로 현장적용을 위한 실험실적 배합검토를 다음조건과 같이 실시하였다.

[표3.1] 쌍용기술연구소 단독('03. 12) 배합실험 결과 (변동계수 10%, 할증계수 1.2)

설계기준 강도 (MPa)	단위 시멘트량 (kg/㎥)	W/C (%)	S/a (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	압축강도 (MPa) 1D	2D	3D	7D	28D	할증 강도 (×1,2)
24	290	63	45	4.4	14.0	7	15	17	23	32	28.8
27	305	59	44	4.1	14.0	8	17	19	24	34	32.4

[표3.2] 신탄진사업소 / 연구소 공동('04. 1) 배합실험 결과(변동계수 10%, 할증계수 1.2)

설계기준 강도 (MPa)	단위 시멘트량 (kg/㎥)	W/C (%)	S/a (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	압축강도 (MPa) 1D	2D	3D	7D	28D	할증 강도 (×1,2)
24	295	60	46	5.7	14.5	6	12	16	22	32	28.8
27	315	56	45	6.7	15.5	7	14	18	25	35	32.4

3.2 현장적용 추천배합 선정

현장적용시에는 실험실적 요건보다 품질저하를 일으킬수 있는 변수 요인이 많이 존재한다. 예를 들면, 동절기 공사시 밤낮의 외기온도변화, 레미콘의 운반거리 및 타설전 장시간의 대기시간, 펌프카의 성능, 타설장소의 조건 등 콘크리트 품질에 영향을 미칠 요소들이 그것이다. 앞선 실험실적 결과와 현장상황을 고려하고 S공장과의 협의결과, 한중콘크리트의 초기동해의 방지 및 안정품질의 확보에 최적배합을 다음표와 같이 선정하였다.

[표3.3] 현장적용 추천배합 선정

설계기준강도 (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	단위량(kg/㎥) W	C	S	G	SP (C×%)
25-24-15	57.9	45.9	177	306	811	982	0.5
25-27-15	53.5	44.9	178	333	783	986	0.5

4. 한중, 조강 콘크리트의 현장적용 및 품질특성 분석

동절기 한중콘크리트 품질특성을 살펴보고자 대덕 테크노밸리의 쌍용건설 및 한화건설 현장의 실제 아파트 구조물에서 현장적용을 추진하였다. 1, 2차 현장적용시는 낮은 온도하에서의 시공으로 초기동해에 대한 안전품질을 확보하는데 목표를 가지고 추진하였으며 그 결과를 토대로 1종시멘트 대비 조강시멘트의 조기강도 발현 효과를 얻어 거푸집 해체시기를 단축할 수 있는 가능성을 확인하였다. 3, 4, 5차 현장적용시는 외기온도가 높지만 보통포틀랜드시멘트 대비 14일이내에 설계기준강도(여기서는 24MPa)가 발현되어 후속공사를 앞당기는 목표를 갖고 현장적용을 추진하였다.

[그림4.1] 테크노밸리 현장 및 시공 전경

현장적용 대상 건물

배근 상태 (타설전)

슬럼프 시험(조강콘크리트)

양생관리

4.1 조강시멘트 현장적용 개요 및 품질모니터링 결과종합

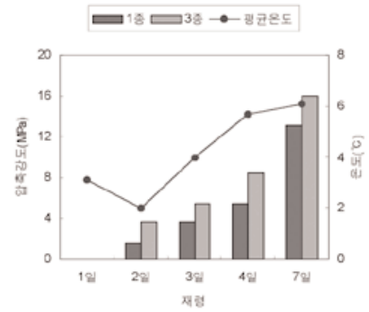
조강시멘트를 사용한 현장적용 조건 및 품질특성은 다음과 같다.

[표4.1] 현장적용 개요

구분 (타설일)	목적 (건설사)	외기(최고 /최저/평균)	현장 양생	단위 시멘트량 (kg/㎥)	호칭 강도 (MPa)	타설량 (㎥)	적용위치	총물량 (㎥)
1차 (2/10) (3/9)	한중용 (쌍용)	6.6/-7.1/-0.4	양생포,열풍기	332	27	129	406동2층	1500
		14.1/-1.1/6.2	외기노출	331	27	110	409동4층	
3차 (3/16)	조강용 (한화)	22.4/5.9/15.3	외기노출	314	24	150	램프	899
4차(3/30)		-	외기노출	333	24	422	기계실 외	
5차(3/31)		-	외기노출	333	24	327	램프	

4.2 현장양생 조건에 따른 시멘트 종류별 강도발현 특성

[그림4.2] 시멘트 종류에 따른 재령별 강도특성



[표4.2] 품질모니터링 결과종합

구분(타설일)	시멘트 종류	양생 방법	기호	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(MPa) 1일	2일	3일	5일	7일	10일	14일	21일	28일
1차 (2/10)	1종	표준	1R-1	16.5	4.5	2.2	-	12.4	-	21.5	-	-	-	29.9
		표준	1S-11	15.5	5.6	2.7	7.4	12.8	-	19.7	-	-	-	28.1
		현장	1F-11			측불	1.7	4.2	-	15.5	-	-	-	26.7
		표준	1S-12	17.0	4.8	2.5	6.8	13.6	-	21.8	-	-	-	31.6
		현장	1F-12			측불	1.2	3.2	-	10.9	-	-	-	19.6
	3종	표준	1R-3	17.0	3.5	2.4	-	16.9	-	25.4	-	-	-	32.1
		표준	1S-31	15.0	4.1	5.9	13.4	18.3	-	24.8	-	-	-	32.2
		현장	1F-31			측불	4.3	6.1	-	17.7	-	-	-	27.4
		표준	1S-32	15.0	3.8	4.7	11.9	16.3	-	22.2	-	-	-	30.0
		현장	1F-32			측불	3.0	4.6	-	14.3	-	-	-	21.7
2차 (3/9)	3종	표준	2R-3	-	-	-	-	13.4	-	19.8	-	23.7	-	
		표준	2S-3	-	-	6.8	10.1	12.3	-	16.2	-	18.8	-	28.9
		현장	2F-3			측불	4.5	6.6	-	14.2	-	18.7	-	27.7
3차 (2/10)	1종	표준	3S-1	17.5	-	-	-	10.9	15.6	17.4	-	21.6	23.7	30.8
		현장	3F-1			-	-	4.8	11.7	13.8	-	17.2	20.2	28.5
	3종	표준	3R-3	15.5	4.1	-	-	13.5	-	20.5	-	24.2	-	
		표준	3S-3	17.5	3.8	-	-	15.5	17.8	20.6	-	23.5	25.4	29.0
		현장	3F-3			-	-	9.8	13.6	16.5	-	20.4	21.7	25.0
4차 (3/31)	3종	표준	4S-3	17.5	4.5	-	-	9.4	-	19.2	20.5	21.0	22.1	23.8
		현장	4F-3			-	-	6.9	-	17.8	19.0	20.4	22.2	23.4
5차	3종	표준	5S-3	16.0	5.2	-	-	11.7	-	22.5	26.8	28.0	29.6	30.4
		현장	5F-3			-	-	10.8	-	20.8	23.1	25.6	27.3	28.4

4.3 초기 외기 온도차에 의한 3종 시멘트의 강도발현 영향

[그림4.3] 초기 외기 온도차에 의한 재령별 강도특성

[표4.3] 외기온에 따른 현장양생에서의 강도특성

구분 (타설일)	외기온 (평균)	현장 양생	거푸집 해체	양생 조건	압축강도(MPa) 1D	2D	3D	7D
1차 (2/10)	-0.4℃	양생포, 열풍기	3일	표준	5.3	12.7	17.3	23.5
				현장	측불	3.7	5.4	16.0
2차 (3/9)	6.2℃	외기 노출	2일	표준	6.8	10.1	12.3	16.2
				현장	측불	4.5	6.6	14.2

4.4 적산온도(maturity) 및 압축강도와의 상관성 분석

콘크리트 타설후 이러한 낮은 외기에 대한 양생방법을 선택하여 실시하였으며 실제적인 콘크리트의 온도변화 모니터링을 위하여 다음 그림과 같이 온도센서를 매립하였다.

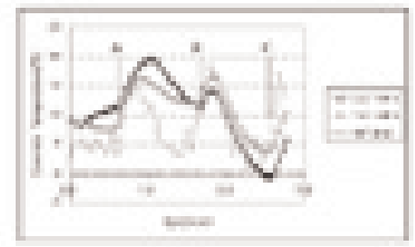
[그림4.4] 온도센서 설치

온도센서 설치 장면

온도센서 설치상태

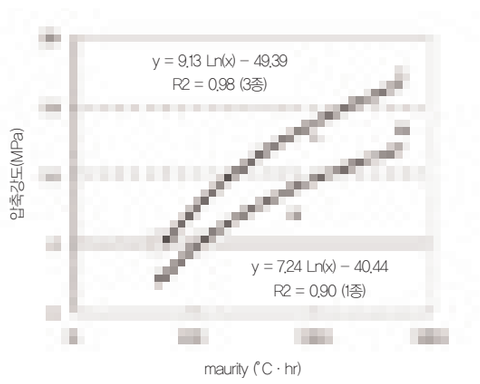
종합적으로 볼 때, 부재두께가 작아서 콘크리트 중심부와 표면부 사이의 온도차가 거의 나타나지 않았으며 다음그림은 1종, 3종 시멘트를 사용한 한중콘크리트 타설후 재령별 온도이력과 시공시 현장에서 얻은 주요사항을 나타낸 것이다.

[그림4.5] 시멘트 종류에 따른 재령별 온도이력



여기서, A: 급열양생, B: 양생포 제거, C: 거푸집 해체시기를 나타낸 것이다. 급열양생후 1종 시멘트 대비 3종 시멘트를 사용한 콘크리트의 내부 온도가 높게 나타나는바 이로 인한 초기 안정적인 품질확보가 가능할 것으로 판단된다.

[그림4.6] 적산온도와 압축강도와의 상관성



조강시멘트는 1종시멘트 대비 강도발현속도가 빠른 것으로 나타났다. 5MPa의 강도발현시기를 표준양생 조건하의측정 강도값과 적산온도와의 상관성을 분석한 결과, 거푸집 해체시기를 단축할 수 있을 것으로 판단되었다.

[표4.4] 압축강도 5MPa 발현시의 적산온도

구 분	시멘트 종류	5MPa 발현 재령(hr)	maturity(℃ · hr)	거푸집 해체시기(일)
표준양생 (20℃)	1종	25	532	2
	3종	18	387	1

[그림4.7] 콘크리트 타설 1일 후 온도 분포, 3종 시멘트

4.5 수화열 해석기법을 이용한 강도추정

3종 시멘트 적용의 타당성 즉, 조기강도 발현을 통한 양생기간 단축을 해석적인 측면에서 입증하기 위하여 유한요소법을 이용한 수화열 해석을 실시하였다. 해석 결과특성으로는 압축강도, 인장강도, 탄성계수 등을 얻었다. 적용된 배합, 계측된 외기온도 등을 엄밀하게 고려하여 실제와 유사한 조건의 해석을 실시하였다. 콘크리트의 양생 과정에서 발생하는 재질특성의 변화는 온도와 시간의 함수 형태로 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영하기 위해 등가재령 개념을 사용하였다. 등가재령은 CEB-FIP MODEL CODE를 사용하여 산정하였다.

[그림4.8] 수화열 해석결과

[그림4.9] 압축강도 해석결과

이상의 해석결과를 요약하면 다음표와 같다.

[표4.5] 해석결과 요약

평가 항목	배합 종류(시멘트 종류)	
	1종 시멘트	3종 시멘트
중심부 최대 온도	17.5℃	24.0℃
타설 3일 후 압축강도	104kgf/㎠	137kgf/㎠
타설 3일 후 인장강도	14kgf/㎠	16kgf/㎠
타설 3일 후 탄성계수	41,357kgf/㎠	44,335kgf/㎠

동일재령 3일에서 3종 시멘트를 사용한 경우 1종 대비 약 30% 이상의 높은 강도값을 나타내고 있다. 다음 그림은 수화열 해석결과와 표준양생을 실시한 현장측정 강도를 비교한 것으로 실제 측정값이 다소 높게 강도가 발현되고 있다.

[그림4.10] 해석결과 및 현장측정과의 비교

5. 한중콘크리트의 경제성

조강시멘트가 1종시멘트 대비 제조비용이 증가하므로 재료적 측면에서만 본다면 원가가 증가한다. 금번 한중콘크리트의 1차 현장적용시 배합조건을 기준으로 재료적 측면에서만 본다면(표 5.1), 조강시멘트 사용한 한중콘크리트가 단위체적당 1종시멘트+플라이애쉬 대비 약 17% 원가상승이 있는 것으로 나타났다.

[표5.1] 시멘트 재료비

구 분		재료비 (원/톤)	증감율 (%)	시멘트량 (kg/㎥)	단가 (원/㎥)	증감율 (%)	비고
한중	1종+FA	60,611	100	332+45	21,316	100	적용배합
	3종	75,150	124	331	24,875	117	
				350	26,600	123	추천
조강	1종+혼화재	55,695	100	261+87	16,844	100	적용배합
	3종	75,150	135	314	23,597	140	
				330	24,800	147	추천

주) 적용기준: FA= 26,520원/톤(12%사용) 및 혼화재= 27,000원/톤(25%사용)

그러나, 시공적 측면까지 고려하여 총공사비에 대한 검토결과(표5.2), 3종 시멘트가 오히려 경제성 있는 것으로 추정된다.

[표5.2] 시공비용을 고려한 경제성 검토

구분	1종 시멘트 적용 콘크리트		조강 시멘트 적용 콘크리트		비고
	계산근거	금액 (천원)	계산근거	금액 (천원)	
재료비	36,000원/㎥×129㎥/층	4,644	42,000원/㎥×129㎥/층	5,418	–
열풍기 연료비	8,000원/㎥×32평 ×3.3×2 일/층	1,690	8,000원/㎥×32평 ×3.3×1 일/층	845	순수연료비
일반 관리비	2,000,000원/일 ×0.2×2일/층	800	2,000,000원/일 ×0.2×1일/층	400	전체공사일
공통가설 총공사비 (대비율)		7,134 (100%)		6,663 (93%)	–

조기강도 발현에 의한 거푸집 해체시기를 줄이는 공기단축 및 열풍기 사용일수에 따른 연료비 절감 등을 고려한다면 총공사비는 조강포틀랜드시멘트를 사용하는 것이 더욱 유리할 것으로 판단된다.

참고로, 대덕테크노밸리 현장에서 시험시공한 사례에서 조강시멘트의 적용효과를 살펴보면 〔표5.3〕과 같다.

6. 종합결론

조강포틀랜드시멘트를 사용한 한중콘크리트의 현장적용성, 품질특성 및 경제성 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

6.1 실험실적 배합검토 및 특성평가

1) 일반강도의 콘크리트 배합의 경우 조강포틀랜드시멘트는 보통포틀랜드시멘트에 비해 저온에서 조강성이 우수한 결과를 얻었다.
2) 고강도배합 콘크리트의 경우 저온양생(5℃)에서 조강시멘트의 우수한 조강 효과를 얻었으며 동절기 양생시간 단축가능성을 확인하였다.
3) 옥외 폭로시험 결과 일반강도 배합의 경우 조강포틀랜드시멘트의 강도발현속도가 실내 조건과 유사하게 높게 나타났고, 양생시간 단축도 실내시험의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

6.2 현장시방배합 검증 및 재현성 검토

한중콘크리트의 현장적용 배합선정을 하고자 실제 공사현장에서 사용되는 원부재료를 입수, 실험실적 실험을 실시한후, 다음표와 같이 최적배합을 추천하였다.

6.3 현장시험시공 및 품질모니터링(쌍용, 한화건설)

1) 1,2차 현장(쌍용건설)적용은 측면 거푸집 탈형을 위한 5MPa의 조기발현이 목적이며 조강시멘트의 경우, 재령 1일 이전에 목표강도(표준양생)가 발현되었다.

2) 3차 현장(한화건설)적용은 공기단축을 위한 조강용 콘크리트의 목적으로 실시한 결과, 조강시멘트가 재령 14일에 목표를 달성하여 조강용 콘크리트로서 가능성을 확인하였다.

배 합	W/C (%)	S/a (%)	단위량(kg/㎥)				SP (C×%)	비 고
			W	C	S	G		
25-24-15	57.9	45.9	177	306	811	982	0.5	1종 344kg/㎥
25-27-15	53.5	44.9	178	333	783	986	0.5	–

3) 유한요소법을 이용한 수화열 해석기법에서도 재령 3일에서 보통포틀랜드시멘트 대비 조강포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트가 약 30% 향상된 우수한 강도특성을 발휘하였다.

구 분	시멘트 종류	5MPa 발현		
		재령(hr)	maturity(℃ · hr)	거푸집 해체시기(일)
표준양생	1종	25	532	2
(20℃)	3종	18	387	1

6.4 경제성 검토

한중 및 공기단축을 위한 공사에서 시공적 효과를 고려한 조강시멘트 사용에 따른 경제성 검토결과는 다음과 같다.

1) 한중공사시 조강 시멘트를 사용함으로써 순수공사 비용(재료비+부대비용)은 약 7%정도 감소 되는 것으로 판단되며,
2) 공사 기간은 층 당 1일 정도 단축 가능할 것으로 예상된다.
3) 따라서, 한중공사 및 공기단축을 위한 조강 시멘트의 적용은 재료단가의 상승에도 불구하고 경제성 있는 한중(조강)콘크리트의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

상기의 다양한 검토결과, 동절기 공사시 조강 시멘트를 사용한 한중콘크리트의 적용은 초기동해에 대한 안전한 품질을 조기확보할 수 있을 뿐만 아니라 이에 따른 시공적 측면에서의 비용절감분을 고려한다면 충분한 경제성을 지닌 것으로 판단된다.