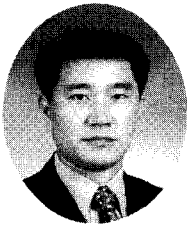
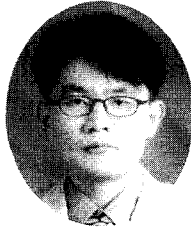


한국고속철도 6-1공구 SRC교각 매스콘크리트의 온도균열제어

- Prevention of Thermal Cracking of SRC Pier of Korea Train Express -



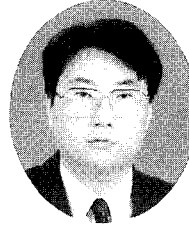
하재담*



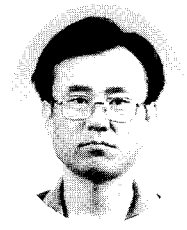
김태홍**



이종열***



노영섭****



김창검*****

1. 서 론

국내 건설경기의 침체에도 불구하고 고속도로나 고속철도 등의 사회 infrastructure에 대한 투자는 꾸준히 진행되고 있으며, 또한 콘크리트 구조물이 대형화 및 특수화됨에 따라 매스콘크리트의 사용이 점차 증대되고 있는 실정이다. 하지만 매스콘크리트 구조물은 기존의 일반콘크리트를 사용하는 경우 시멘트의 수화열로 인하여 온도균열

을 초래할 가능성이 높으며, 이러한 온도균열은 관통균열로 이어져 구조물 내구성 저하의 주요요인으로 작용하게 된다.

따라서 본고에서는 대형 매스콘크리트 구조물인 한국고속철도 6-1공구 SRC교각을 대상으로 설계, 재료, 시공측면과 균열 발생 후 보수·보강 등 다양한 온도균열 제어대책의 장·단점 및 경제성을 상호 비교 검토한 결과, 대상구조물의 온도균열 제어에 가장 효과적인 방안으로 검토된 사

용재료측면에서의 4종 저열 포틀랜드 시멘트를 이용한 매스콘크리트의 온도균열제어 시공사례를 소개하고자 한다.

2. 공사개요

본 온도균열제어의 대상부재인 SRC교각은 한국고속철도 6-1공구 현장(시공사 : (주)한진중공업; 감리단 : 벽산엔지니어링(주))의 회덕분기점 남쪽에 위치하고 있으며, <사진 1>에서 보는바와 같이 경부고속도로와 평행인 대전 천변화 고속도로가 통과하는 라멘구조로써 총 6개(500m3/개)의 교각으로 구성되어 있다.

SRC교각의 개략적 단면개요로써 라멘구조의 기둥(연직부재)은 이미 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 보통콘크리트로 타설되었고, 본 온도균열제어의 대상부재인 횡범(수평부재)은 단면크기가 3.50m(가로)×3.73m(세로)이며, 길이가 38.20m인 대형 매스콘크리트로 설계되어 있다. 또한 콘크리트의 설계 Spec.은 레미콘 25-300-12 규격이며, 특기사항으로 고내구성콘크리트의 기본 요구특성을 만족시키기 위하여 콘크리트 배합조건의 단위수량이 175kg/m³이하로 규정되어 있다.

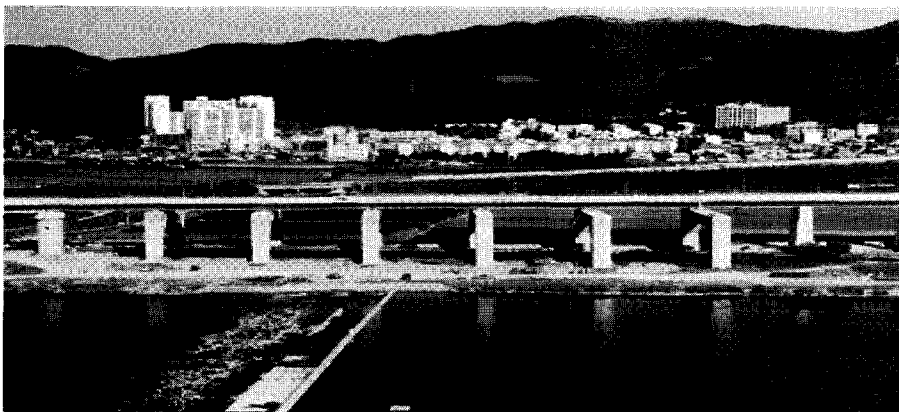


사진 1. 한국고속철도 6-1공구 SRC교각 전경

* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 책임연구원

** 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 연구원

*** 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장

**** 벽산엔지니어링(주) 차장

***** (주)한진중공업 품질관리부 부장

3. 온도균열제어 대책

3.1 온도균열제어 대책 Flow

SRC교각 횡빔의 온도균열제어 대책은 우선적으로 <그림 1>에 나타난 바와 같이 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는 기존배합(이하, "보통배합"으로 표기)에 대하여 실제 현장조건을 모사하여 온도해석을 수행하고, 온도해석 결과 온도균열지수가 1.2이하인 경우 사용재료, 설계 및 시공측면에서 온도균열제어 대책의 장·단점을 비교 검토한 후 온도균열지수 1.2이상을 만족시킬 수 있는 사용재료를 선택하여 별도의 배합설계 및 단열온도상승시험 등을 통하여 최적조건을 선정하는 순서로 온도균열제어 대책을 수립하였다.

3.2 보통배합의 온도해석 검토

3.2.1 온도해석 조건

현장의 시공조건을 고려한 보통배합에 대한 온도해석을 통하여 온도균열 발생 가능성을 검토하였으며, 해석 프로그램은 3차원 비정상 열전도 유한요소해석기법(범용 열전도해석프로그램, ABAQUS)를 사용하였고, 콘크리트의 수화발열, 압축강도 및 인장강도, 그리고 탄성계수 등 시간의존성 물성 치들을 고려하였다.

대상 구조물의 모델링은 실 구조물의 대칭성을 고려하여 1/4만 모델링하였으며, 현치부는 생략하였다. 또한, <그림 2>(유한요소 Mesh)에 나타난 바와 같이, 기둥부(연직부재)까지 모델링하여 해석을 실시하였다. 다만 기둥의 하단은 완전구속으로 보았으며, 온도철근은 없는 것으로 가정하였다.

해석에 사용된 콘크리트 배합조건은 <표 1>에 나타난 바와 같이 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는 기존 시방배합 조건이며, 콘크리트의 재료특성으로 온도

해석에 필요한 최대온도상승량(K) 및 반응속도(α)는 콘크리트 표준시방서 상의 제시 값을 기준으로 구하였다. 또한 온도해석에 필요한 기타 입력 Data로써 콘크리트의 열적 특성은 <표 2>에 나타난 바와 같이 콘크리트의 일반적인 값을 사용하였으며, 양생기간동안의 외기온도는 온도균열제어에 가장 불리한 조건인 여름철 조건(25℃)를 적용하였고, 콘크리트의 치기온도도 25℃를 적용하여 해석을 수행하였다.

- 1) AD1 : 리그닌계 AE감수제
- 2) AD2 : 나프탈렌계 고성능 유동화제

또한 콘크리트의 28일과 91일 압축강도는 각각 380 및 418kg/cm²로 산정됨에 따라 콘크리트 표준시방서를 근거로 온도응력 해석에서 필요한 재령별 탄성계수 및 인장강도를 추정하였다.

표 1. 경부고속철도 6-1공구 보통배합 시방배합표(25-300-12)

배합	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)						단열온도상승특성	
			W	C	S	G	AD1 ¹⁾	AD2 ²⁾	K(℃)	α
1종 보통배합	45.0	45.0	171	380	770	992	1.14	2.28	54.8	1.408

표 2. 기타 입력 Data

특성	data	
열전도율(Kcal/mhr℃)	2.2	
비열(Kcal/kg℃)	0.25	
밀도(Kg/m ³)	2,350	
대류계수(Kcal/m ² hr℃)	상부(양생포)	5.0
	측면(합판)	7.0
외기 온도(℃)	25.0	
콘크리트 치기 온도(℃)	25.0	

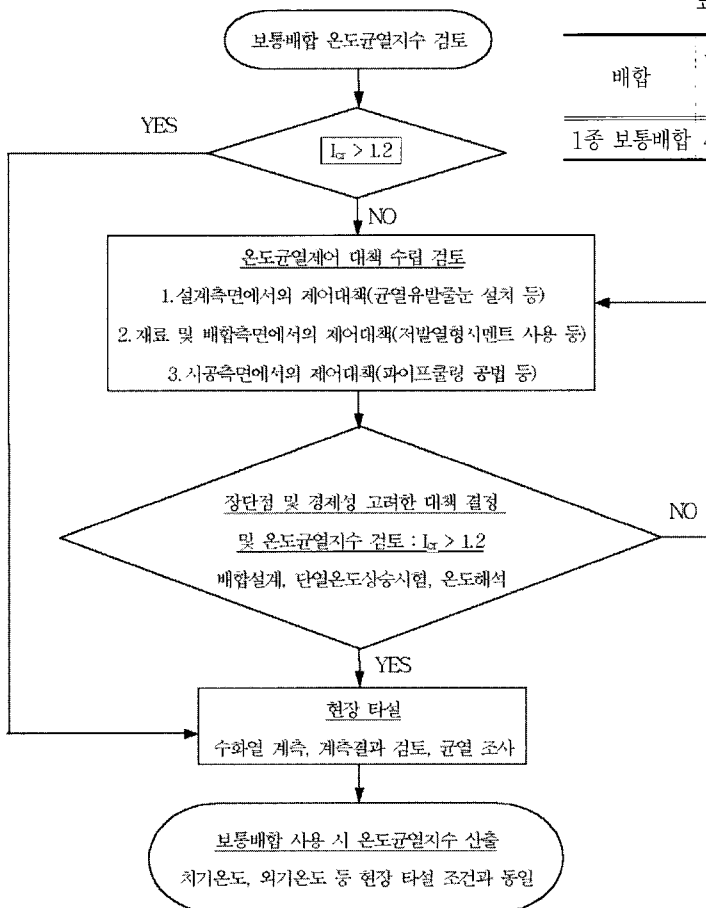


그림 1. 온도균열제어 대책 Flow

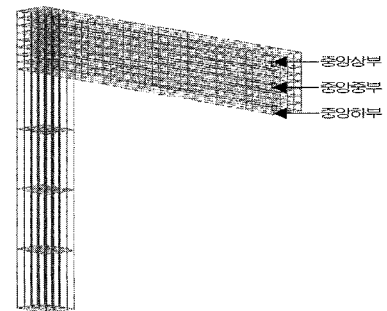


그림 2. 유한요소 mesh 및 결과 출력지점

콘크리트의 열팽창계수는 10.3×10^{-6} 로 가정하였고, 콘크리트는 <사진 2>에서 보는바와 같이 SRC교각의 형법 철골 및 거푸집에 의하여 구속을 받고 있으므로 해석에서 자중에 의한 처짐은 무시하였다.

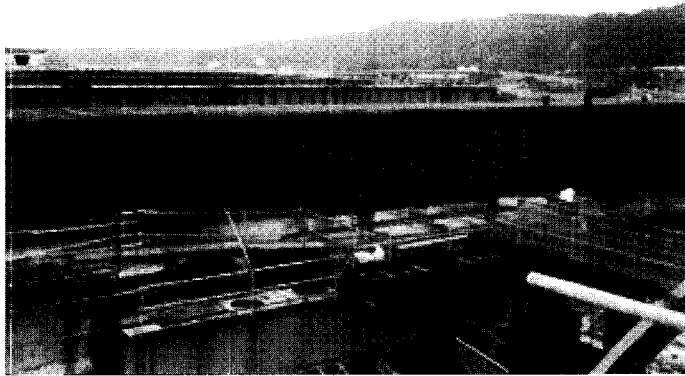


사진 2. SRC교각 형법 철골

3.2.2 온도해석 결과

보통배합에 대한 수화열 해석결과 <그림 3> 및 <그림 4>에서 보는바와 같이 중앙중부의 최대온도 상승량은 70.5°C 이며, 최고온도 도달시점은 콘크리트 타설 후 2 일째인 것으로 분석되었다.

또한, 이러한 수화열 해석결과를 이용한 온도응력 및 온도균열지수의 산정결과 <그림 5> 및 <그림 8>에서 보는바와 같이 보통배합의 경우 온도균열 발생확률의 척도인 최소 온도균열지수가 0.84로 산정됨에 따라 콘크리트 표준시방서의 적용기준을 고려할 때 온도균열제어를 위해서는 별도의 대책이 필요한 것으로 예측되었다.

3.3 온도균열 제어대책 검토

온도균열 제어대책으로 설계측면, 재료측면, 시공측면 및 균열 발생 후 보수·보강 등 다양한 온도균열 제어방안들에 대한 장·단점 및 경제성을 비교 검토한 결과 <표 3>에서 보는바와 같이 본 구조물의 온도균열 제어에 가장 효과적이며, 또한 상대적으로 공사비가 저렴한 것으로 평가되는 사용 재료측면에서의 제어대책인 4종 저열 포트랜드 시멘트 사용 방안을 채택하였다.

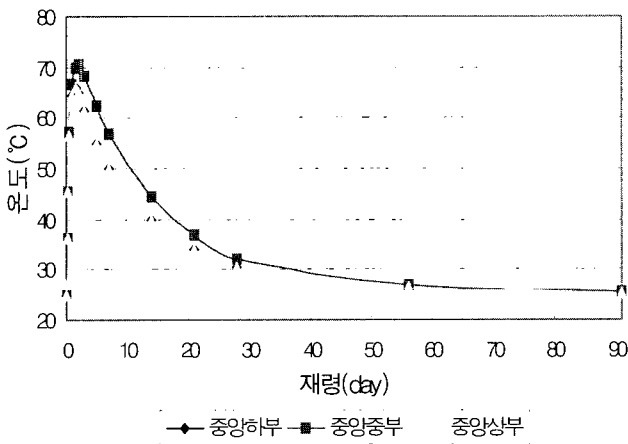


그림 3. 보통배합의 수화열 해석결과

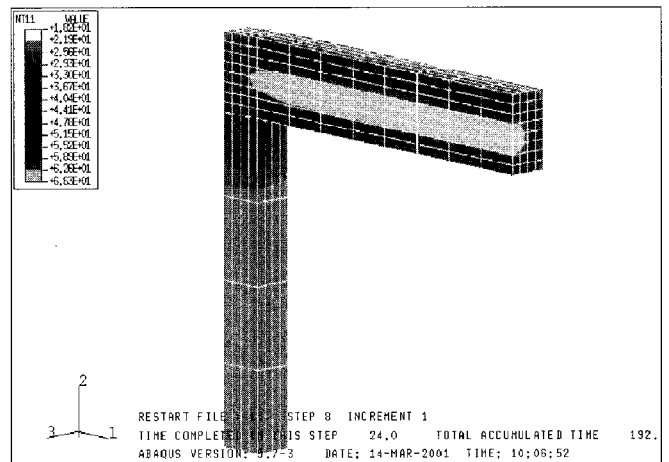


그림 4. 보통배합의 온도분포 Contour

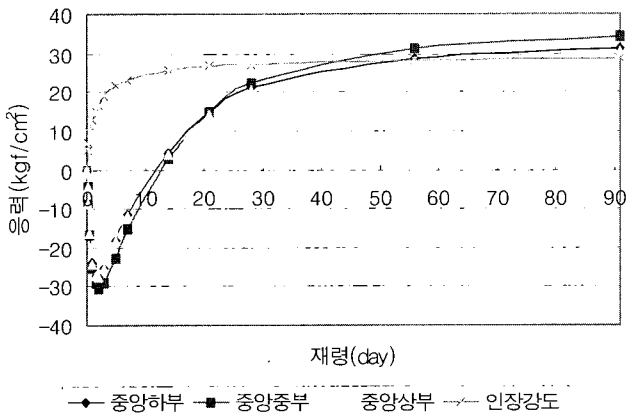


그림 5. 보통배합의 온도응력 해석결과

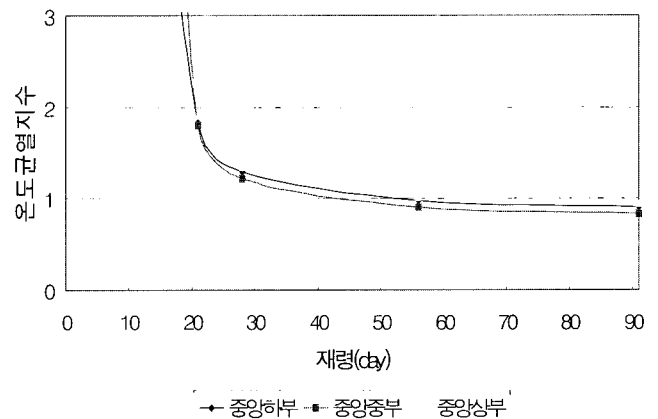


그림 6. 보통배합의 온도균열지수 산정결과

표 3. 온도균열 제어대책 비교

구분	설계측면		재료측면	시공측면		균열발생후 보강
	온도철근 배근	균열유발준비 설치	저열 포틀랜드 시멘트 사용	프리쿨링공법	파이프쿨링공법	
개요	작은 간격으로 이음(신축, 시공) 두어 구속도 완화 및 철근 조밀 배근하여 균열폭을 허용치 이내로 억제하는 방법	온도응력은 타설되는 블록의 크기에 큰 영향을 받으므로 줄눈을 설치하여 응력을 집중시키거나 특정 단면에 균열을 발생시키는 방법	온도상승을 가능한 작게 발생시키도록 저발열콘크리트등을 사용하여 수화발열 속도를 제어하는 방법	타설온도를 저하시키므로써 구조물에서의 온도균열발생 및 내재하게 될 온도응력을 저감하는 방법	콘크리트의 타설에 앞서 파이프를 배치하고 타설 직후 통수시켜 콘크리트의 수화열을 저감시키는 방법	콘크리트의 수화열 및 기타 요인으로 인하여 발생된 균열을 콘크리트 경화후 보강하는 방법
장점	건조수축 및 온도균열은 시방서 규정에 의거 배치 가능	균열 유도	수화열에 의한 균열 억제 우수함 콘크리트의 품질 향상 및 강도증진. 핵발전소, 댐 등 주요구조물에 적용됨	사용 실적 많음 콘크리트 재료온도, 배합온도 및 타설온도까지 총체적 온도저감관리시 균열억제 효과 우수	사용 실적 많음 (프리쿨링보다 실적 많음) 초기 재령에서의 내부 온도최대치를 낮추어 균열억제 효과 우수	수화 균열외의 기타균열까지 보강가능 보강 실적 많음
단점	수화열에 의한 균열분산에 대한 기준은 없음 온도균열 발생허용	줄눈부 보강시 공사비가 고가 보구조물에 설치 곤란 균열부 보강 필요	거푸집 탈형 시간 증가 시멘트 사일로 추가 설치 배합설계 검증필요	Ice Plant설치 (SRC교각만 사용시 비경제적임) 배합설계 검증 필요 (얼음사용시)	파이프망 배치, 직경, 냉각수 유속 및 수온, 통수기간등 계획 수립이 필요하고 적절하지 않을 경우 의외의 균열 발생됨	공사비 고가
공사비	52,776원/m ³	71,593원/m ³	63,303원/m ³	71,095원/m ³	108,804원/m ³	134,538원/m ³
비고		유발준비부 예폭시 보강		얼음 구매시 공사비 증가		예폭시 보강

4. 저열 포틀랜드 시멘트의 적용

4.1 콘크리트 배합설계

SRC교각의 횡빔에 타설되는 콘크리트의 Spec.은 레미콘 25-300-12 규격배합이므로 레미콘공장의 변동계수를 고려한 증가계수 1.2를 적용하여 콘크리트의 배합강도를 360kgf/cm²로 선정하였다. 다만 저열 포틀랜드 시멘트의 배합설계 시 콘크리트의 요구 Spec. 중 거푸집 탈형시기가 현장의 공기문제로

인하여 재령 14일 기준으로 설계기준강도의 70%인 210kgf/cm²을 만족하도록 규정되어 있어 이를 고려하였으며, 또한 단위수량의 경우 고내구성콘크리트의 요구조건으로 규정하고 있는 175kg/m³이하가 되도록 고성능 AE감수제를 사용하여 배합설계를 수행하였으며 사용재료에 대한 내역은 <표 4>와 같다.
배합설계 방법은 시적 배합시험을 통하여 우선적으로 물-시멘트비와 압축강도 관계식을 도출하고, 그 결과를 근거로 하여, <표 4>에 나타낸바와 같이 세부적인 배합

시험을 행하여 재령별 압축강도를 측정후 잠정적으로 배합 2를 선정하였다.

4.2 저열배합의 온도해석 검토

4.2.1 온도해석 조건

해석을 위한 입력 Data 중 저열배합의 최대온도상승량(K) 및 반응속도(α)는 단열온도상승시험을 통하여 구하였으며, 기타 일반적인 열적특성 값은 보통배합의 조건과 동일하게 적용하였다.

표 4. 저열배합 콘크리트의 사용재료

재 료	종류 또는 산지	특 성
시 멘 트(C)	저열 포틀랜드 시멘트	비중 3.22, Blaine 3.500cm ² /g
플라이애시(F/A)	삼 천 포 산	비중 2.20 Blaine 3.900cm ² /g, 강열감량 3.5%
잔 골 재(S)	강 사	비중 2.58, 흡수율 1.0%, 조립율 2.94
굵 은 골 재(G)	쇄 사	비중 2.72, 흡수율 0.7%, 조립율 7.00, 실적율 57.8%
화학혼화제(SP)	고성능AE감수제	나프탈렌계 + 폴리카본산계

표 5. 저열배합 콘크리트의 시방배합표

Mix	Slump (cm)	Air Content (%)	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)					fcu(kgf/cm ²)				
					W	B		S	G	SP	7d	14d	28d	56d
						C	F/A							
배합 1			41.0	45.5	171	396	21	776	979	3.336	217	306	388	521
배합 2	12±2.5	4.5±1.5	39.7	45.2	172	412	22	763	975	3.472	257	330	414	537
배합 3			38.2	44.9	174	433	23	747	967	3.648	294	342	434	554

표 6. 양생조건 및 대류계수

재령	상부		측면		하부	
	양생조건	대류계수(Kcal/m ² h°C)	양생조건	대류계수(Kcal/m ² h°C)	양생조건	대류계수(Kcal/m ² h°C)
7일 까지	양생포	5.0	합판+스티로폼	1.5	합판+스티로폼	1.5
7일 이후	-	12.0	-	12.0	-	12.0

표 7. 재령별 평균 외기 온도

재령(day)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
외기온도(°C)	10.05	11.12	13.66	13.52	13.22	15.44	17.34	16.27	14.20	15.97	19.03	18.68	13.31	9.57

또한 현장의 양생조건과 그에 따른 콘크리트 표면의 대류계수는 <표 6>에 나타난 바와 같이 상부는 타설 후 7일 까지 양생 포를 덮고, 측면 및 하부는 합판에 스티로폼을 사용한 조건이며, 7일 이후는 별도의 양생을 실시하지 않는 것으로 하였다.

외기 온도는 <표 7>에 나타난 바와 같이 본 구조물이 타설될 일자의 1년전(1999년) 대전지역 평균 외기 온도를 적

용하였다.

4.2.2 수화열 및 온도응력 해석결과
저열배합에 대한 수화열 해석결과 <그림 7>에서 보여주는 바와 같이 최대온도 상승부위는 단면의 중앙중부로써 최대온도 상승량은 60.1°C이며, 최고온도 도달시점은 콘크리트 타설 후 6일째인 것으로 나타났다.

또한, 온도해석 결과를 이용한 저열배합의 온도응력 및 온도균열지수의 산정결과 <그림 8> 및 <그림 9>에서 보는바와 같이 저열배합의 경우 최소 온도균열지수는 1.20 이상으로 산정 됨으로써 결과적으로 보통배합 대비 온도균열 저감효과가 큰 것으로 예측됨에 따라 본 구조물의 적용배합은 4종 저열 포틀랜드 시멘트를 사용한 시험배합 중 <표 5>의 배합 2를 최종적으로 선정하였다.

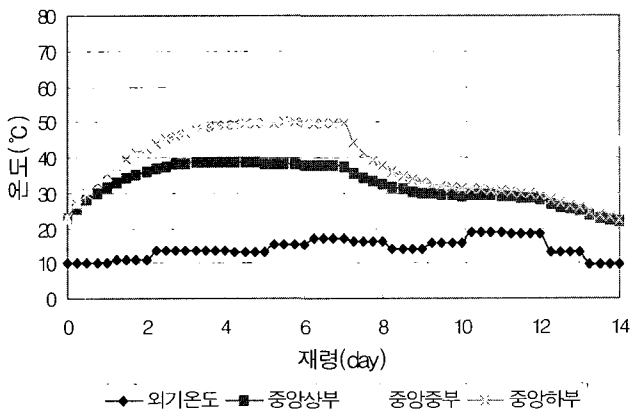


그림 7. 저열배합의 수화열 해석결과

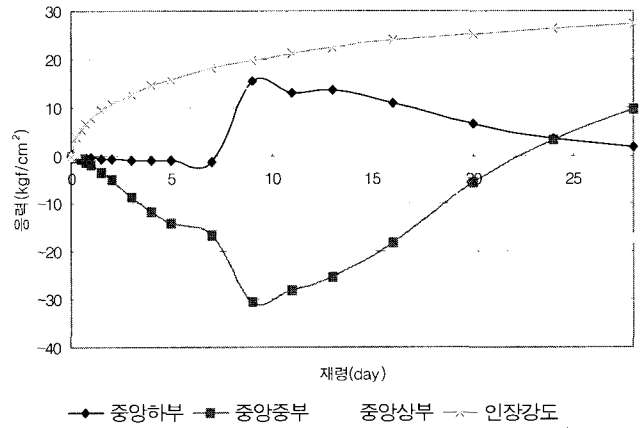


그림 8. 저열배합의 온도응력 해석결과

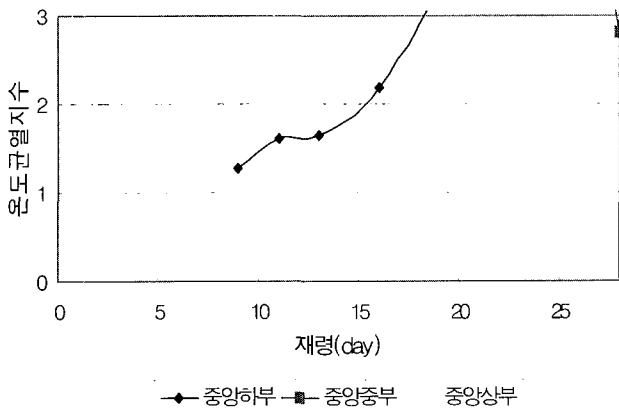


그림 9. 저열배합의 온도균열지수 산정결과

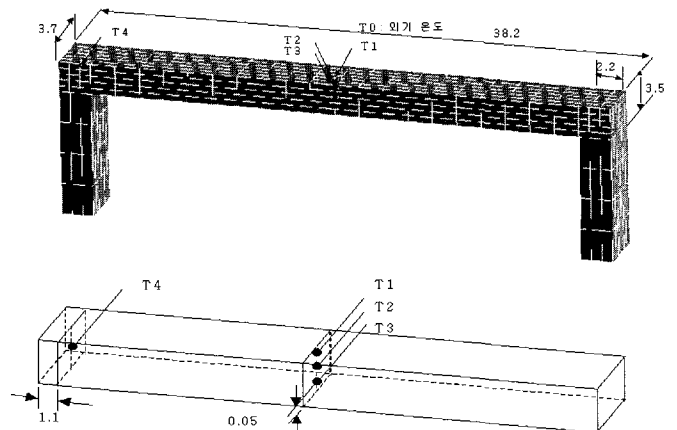


그림 10. 열전대 설치도

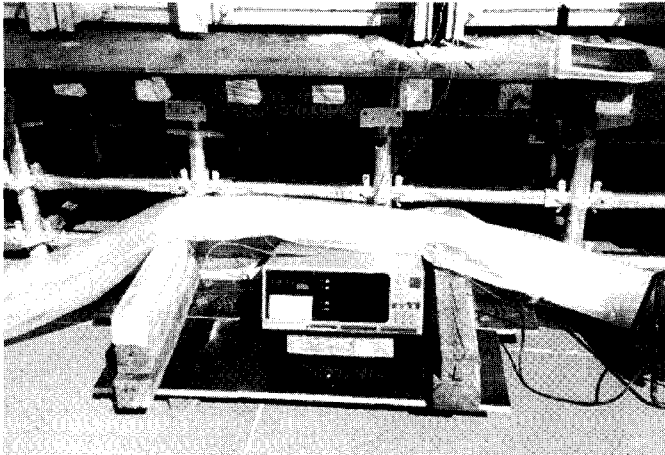


사진 3. Data Logger

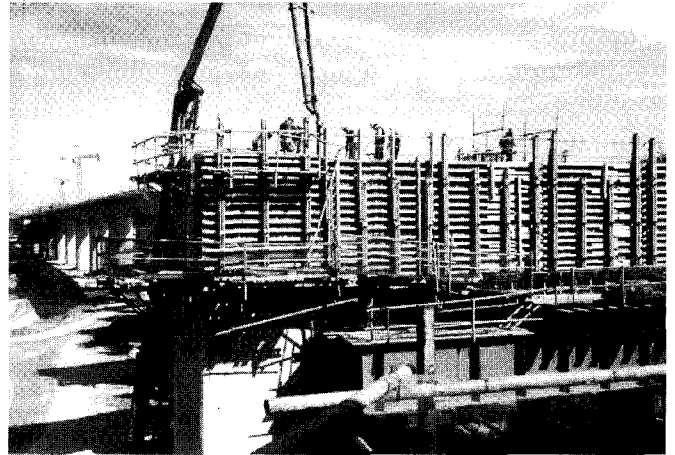


사진 4. 콘크리트 타설장면

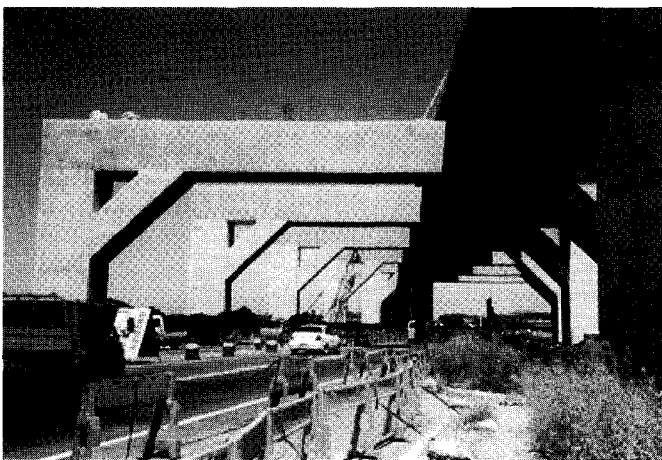


사진 5. 거푸집 탈형 후의 전경

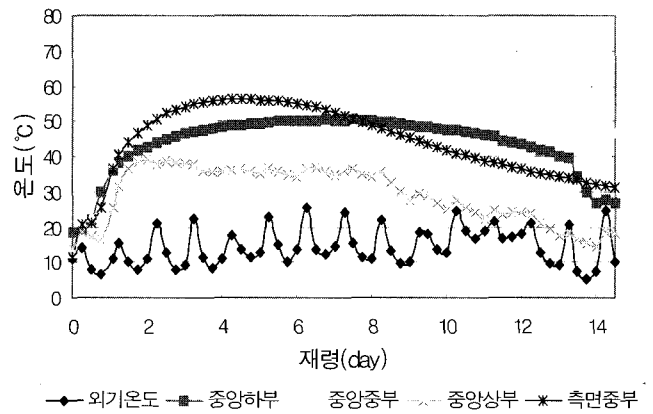


그림 11. 저열배합의 수화열 현장계측 결과

4.3 저열배합의 실 구조물 타설 및 현장계측

4.3.1 온도계측기 설치

저열배합의 실 구조물 현장타설에 따른 해석결과와 비교검증을 위하여 수화열 현장계측을 실시하였으며, 현장계측 부위는 그림 10에 나타낸 바와 같이 SRC교각 횡빔의 측면부(1개소), 중앙부(3개소), 외기(1개소)에 Thermo couple(열전대) K-type 을 매립하고, 자동온도 측정 및 기록장치인 KYOWA사 UCAM-70A Data Logger 에 연결한 후 수화열을 현장 계측하였다.

4.3.2 실 구조물 현장타설

4종 저열 포틀랜드 시멘트를 사용하는 저열배합은 S사 신탄진공장에서 출하되어 2대의 펌프카를 이용하여 실 구조물에 타설되었다. 저열배합에 사용되는 4종 저열

포틀랜드 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 비교할 때 원재료, 제조공정, 등이 거의 동등하고 단지 시멘트의 광물조성을 변경하여 수화발열량을 대폭 감소시킨 시멘트이기 때문에 레미콘의 제조, 운반, 타설에 이르기까지 특별한 조치는 필요하지 않았다.

4.3.3 현장계측 및 외관조사 결과

SRC교각 횡빔 매스콘크리트는 2000년 하반기에 타설 되었으며 이중 수화열 현장계측을 수행한 2번 교각 횡빔은 11월 13일에 타설되어 수화열계측은 타설일로부터 11월 27일까지 14일간 수화열 현장계측을 수행하였고, 타설 당일 콘크리트의 치기온도는 23°C이었다.

수화열 현장계측 결과 <그림 11>에서 보는바와 같이 단면의 중앙중부에서 최대 온도 상승 량이 64.1°C로 계측되었고, 최고온도 도달시점은 5.5일인 것으로 나타

났다. 또한 거푸집 탈형 후 외관 균열조사를 실시한 결과 온도균열은 물론 건조수축에 의한 표면균열도 발생하지 않은 것으로 조사되었다.

5. 맺음말

콘크리트 구조물의 균열은 필연적인 현상이며 특히, 매스콘크리트 구조물은 시멘트의 수화열에 의해 온도균열 발생확률이 매우 높고, 이러한 온도균열은 관통균열로 이어져 구조물에서 내구성 저하의 주요요인으로 작용하므로 가급적 온도균열 발생을 저감시키는 대책이 필요하다고 할 수 있다.

한국고속철도 6-1공구 SRC교각 횡빔은 단면 특성상 대형 매스콘크리트 구조물로서 기존에 설계된 보통배합을 적용하여 온도해석을 수행한 결과 최소 온도균열지수가 0.84 수준으로 온도균열 발생확률이

매우 높은 것으로 예측되었다. 이에 본 구조물의 온도균열 제어대책으로 설계측면, 재료측면, 시공측면에서의 온도균열 제어방안에 대한 검토결과 사용재료측면에서 4종 저열 포틀랜드 시멘트를 사용하는 방안을 채택하였다.

결과적으로 4종 저열 포틀랜드 시멘트를 사용하여 해당구조물을 완벽하게 시공하였으며, 실 구조물 타설 시 수화열 현장계측 및 외관조사를 실시한 결과 실제로 온도균열이 전혀 발생하지 않은 것으로 나타나 4종 저열 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 수화 발열량 자체를 대폭적으로 저감시킬 수 있어 대형 매스콘크리트의 온도균

열을 제어하는데 매우 효과적인 방안이라는 것을 본 시공사례에서 확인할 수 있었다.

또한 본 구조물과 같이 대형 매스콘크리트의 경우 구조물의 안전성 및 내구성 확보를 위해서는 온도균열 제어에 대한 검토가 필수적이며, 그에 따른 적절한 제어대책을 선정하여 시행하는 것이 중요하다고 할 수 있다. □

참고문헌

1. 日本コンクリト工學協會, “マスコン크리트 온도應力研究委員會報告書”, 1985.
2. ACI 207.1R-87, “Mass Concrete”, ACI

Committee 207, 1987.

3. 김진근 외 4인, “시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구”, KCI 논문집, 제 7권 3호 1995.
4. 하계담 외 5인, “저열 포틀랜드(벨라이트) 시멘트 콘크리트의 특성”, KCI 가을 학술발표회, 1998.
5. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서”, 1999.
6. 한국건설기술연구원, “고속전철 교량/터널 구조 및 유지관리 시스템 개발(교량부문)”, 건설교통부 외, 1999. 10.
7. 하계담 외 3인, “결합재 종류에 따른 콘크리트의 단열온도상승특성 및 단열온도상승에 따른 압축강도특성에 관한 연구”, KCI 봄 학술발표회, 2001.

2000년도 시멘트 구매 현황

(단위 : 천톤)

지역별	구분	사업체 수	구매량	구매방법		
				협동조합	대리점	시장
서울		32	192	106	86	
부산		18	46	18	20	8
대구		21	27	17	10	
인천		11	65	54	11	
광주		13	23	14	9	
대전		9	100	4	96	
울산		22	42		42	
경기		78	334	155	179	
강원		26	82	47	30	5
충북		40	135	22	113	
충남		35	154	15	139	
전북		38	321	1	320	
전남		114	158	81	77	
경북		84	222	92	87	43
경남		68	61	45	16	
제주		23	31	2	29	
합계		632	1,993	673	1,264	56

자료 : 「2000년도 시멘트가공업기본실태조사보고서」, 한국시멘트가공업협동조합연합회, 2001.