

잠열성 결합재를 활용한 매스콘크리트의 온도균열 제어 기술 현장 적용 사례

An Application of Thermal Crack Control Technology Using PSLB in Mass Concrete



김용로*
Yong-Ro Kim



이상호**
Sang-Ho Lee



김도수***
Do-Su Kim



길배수****
Bae-Su Khil



최태희*****
Tae-Heui Choi



이학일*****
Hak-Il Lee

1. 서 론

최근 콘크리트구조물은 고층화대형화되고 있는 추세이며, 이에 따라 초고층 콘크리트구조물의 매스기초, 장대형 교량의 부재, LNG 저장 시설 등과 같이 대형 매스콘크리트의 적용이 증가되고 있다.

이와 같은 매스콘크리트의 경우 콘크리트의 수화열에 의해 관통균열로 발생되어 콘크리트구조물의 구조안전성, 사용성 및 내구성 등에 크게 영향을 미치게 되는 온도균열에 대한 제어가 상당히 중요하며, 이에 따라 다양한 온도균열 제어 기술이 개발되어 적용되고 있다.

그러나 지금까지 건설현장에서 매스콘크리트의 수화열 관리 및 온도균열 제어를 위해 적용되고 있는 다양한 기술들은 대형 매스콘크리트에 적용할 경우 수화열 저감 효과가 다소 미흡하거나, 공기저연, 복잡한 공정 및 공법 설계 등이 요구되는 등의 문제점이 현장 실무자들을 통해서 제기되고 있다.

이러한 배경에서 대립산업(주)과 (주)트라이포드에서는 공동 기술개발을 통하여 기존 기술들의 문제점을 보완하고 건설현장에서 매스콘크리트의 온도균열 제어를 위해 용이하게 적용할 수 있는 재료기술로서 잠열성 결합재를 사용한 수화열 저감 및 온도균열 제어기술을 개발하였으며, 건설신기술 제546호(이하, PSLB 공법)로 지정 고시된 바 있다.

본 고에서는 대형 매스콘크리트가 적용되고 있는 교량 현장에서 잠열성 결합재를 사용한 신기술을 적용하여 온도균열을 성공적으로 제어한 현장적용 사례를 소개하고자 한다.

2. PSLB 공법의 개요

2.1 PSLB 공법의 특징

PSLB 공법에서는 매스콘크리트의 수화열을 저감하기 위한 요소기술로서 <그림 1>에 나타낸 바와 같이 일정 온도에서 상변화를 일으키며 에너지를 흡수 및 발산시켜 콘크리트의 수화열 저감, 급격한 온도상승 및 하강을 제어할 수 있을 것으로 기대되는 잠열기술을 적용하였다. 잠열(latent heat)이란 어떤 물질이 고체→액체(또는 액체→고체), 액체→기체(또는 기체→액체)로 상전이 될 때 열을 흡수하거나 방출하는 열로서 상전이가 일어나지 않은 상태에서 온도변화에 따라 열을 흡수 또는 방출하는 현열보다 매우 크다는 특징이 있다. 이러한 잠열의 높은 열흡수 및 방출 효과는 본래의 에너지 저장 및 온도 유지효과 외에도 열을 발산하는 물질에 의해 온도가 상승되는 것을 억제하는 용도로도 효과적으로 이용될 수 있으며, 이러한 용도로 활용되는 물질을 잠열재(latent heat material, LHM) 라고 한다.

잠열량 및 상전이 온도 등은 그 물질의 고유한 특성으로서 사용되는 잠열재마다 잠열량과 상전이 온도가 다르며, 사용온도, 잠열량의 최소 요구량 등 사용 목적에 따라 적당한 물질을 선택할 경우 에너지, 화학, 건설 등 여러 분야에 유용하게 활용될 수

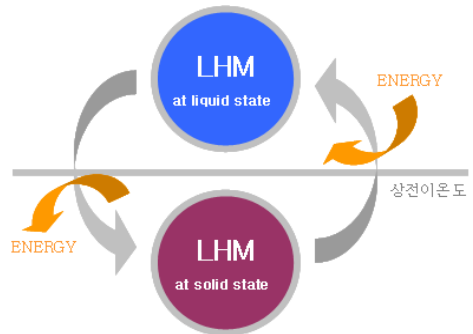


그림 1. 잠열재의 반응 개념도

* 정희원, 대립산업(주) 기술연구소 주임연구원, 공학박사
kyr8447@daelim.co.kr

** 정희원, 대립산업(주) 기술연구소 선임연구원, 공학박사

*** 정희원, (주)트라이포드 기술경영이사, 공학박사

**** 정희원, (주)트라이포드 대표이사, 공학박사

***** 대립산업(주) 속초 구수로 교량현장 공사차장

***** 대립산업(주) 속초 구수로 교량현장 소장

있을 것으로 판단된다.

이와 같은 잠열제에는 상당히 다양한 종류가 있지만, 본 PSLB 공법에서는 콘크리트의 사용재료와 유사한 조건으로서 적용하기 위해 무기계 잠열제를 활용하고 있다.

무기계 잠열제는 수화열 계통이 대부분으로 유기계에 비해 밀도가 높고 값이 저렴하며 잠열량이 높은 것이 특징이다. 또한, 이러한 수화물형은 대부분 용융될 때 초기의 구성비와는 다른 구성비로 나누어지는 비합치 용융(incongruently melting)을 나타내는 포정(包晶, peritectic) 계열에 속하며, 대부분 화학공정상의 부산물로 산출되고 있다.

2.2 PSLB 공법 적용 방법

PSLB 공법의 적용은 <그림 2>에서 보는 바와 같이 잠열성 결합제(PSLB)를 생산하는 단계, 생산된 PSLB를 이용하여 레미콘 공장에서 초저발열 기능성 콘크리트를 생산하는 단계 및 생산된 콘크리트를 현장에 타설하는 단계로 이루어진다.

PSLB는 사전에 결합제 생산 공장에서 시공부재 두께, 결합제량 및 온도조건 등에 따라 시멘트, 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬로 구성된 3성분계 결합제에 스트론튬계 잠열제를 2.0~3.5% 혼합하여 생산한다. 생산된 PSLB는 레미콘 공장으로 이송하여 공장의 결합제 사일로에 저장하고, 레미콘 배치플랜트에서 PSLB를 적용한 초저발열 콘크리트를 제조하게 된다. PSLB의 적용에 따른 콘크리트의 시공성에 대한 영향은 거의 없기 때문에 이후의 시공 방법은 기존의 콘크리트 시공 방법과 차이가 없으므로 본 신기술의 적용에 따른 추가 공정이나 공법 관리가 필요 없어 현장 적용이 간편한 특징이 있다.

3. 현장 적용 결과

3.1 현장 개요

잠열성 결합제를 활용한 매스콘크리트의 온도균열 제어 기술인

PSLB 공법을 적용한 현장은 대림산업(주)에서 현재 공사를 진행 중인 속초항 구수로 교량 현장으로서, 현장 개요를 간략히 정리하여 <표 1> 및 <그림 3>에 나타냈다.

PSLB 공법을 적용한 부재는 <표 1>에 나타난 직접기초(부재 크기 : 28×18×3.5m(B×D×H)) 및 기초 상부의 기둥(부재 크기 : ø5.0×6.0m)으로서 수화열 관리가 반드시 필요한 대형 매스콘크리트구조물이다.

3.2 수화열 해석 결과

PSLB 공법의 실제 부재에 대한 현장 적용 전, 콘크리트의 요구 규격인 25-35-150에 대한 배합시험을 실시하여 슬럼프 및 압축강도를 확인한 후, <표 2>와 같은 배합을 설정하였다.

또한, 현장에서 PSLB 공법을 적용하기 전 계획되었던 배합과 PSLB 공법을 적용할 경우의 수화열 해석을 통해 설정된 배합의 적용 가능성 및 콘크리트 타설 방법을 설정하고자 하였다.

기초 부재의 모델링은 <그림 4>와 같이 1/4 모델링을 실시하였으며, 수화열 해석 조건은 <표 3>과 같다.

표 1. 공사 현장 개요

구분	주요 내용	
현장명	속초항 구수로 교량 가설공사	
현장 위치	강원도 속초시 청호동~동명동(수복공원 교차로)	
발주처/설계	속초시 / (주)한석엔지니어링(주)극동엔지니어링	
공사기간	2005년 11월 ~ 2009년 11월	
교량 형식	케이블지지 로케 아치교	
연장	주형 140m, 아치고정점간 거리 138m, 단경간	
폭원	20.0m(양복 4차로, 보차도 병용)	
기초	형식	·시점층 : 직접기초 28×18×3.5m (B×D×H) ·중점층 : 직접기초 + 현장타설말뚝(φ1.5m 20본)
	재료	·직접기초 : 콘크리트(f_{ck} 35 MPa), 5,860 m ³ 철근(f_y 400 MPa) 716 t ·현장타설말뚝 : 콘크리트(f_{ck} 35 MPa), 318 m ³ 철근(f_y 400 MPa) 59 t



그림 2. 신기술의 적용 방법



그림 3. 완공 후 교량 조감도

표 2. 설정된 콘크리트 배합(25-35-150)

W/B (%)	s/a (%)	단위결합재량 (kg/m ³)	단위수량 (kg/m ³)	단위질량(kg/m ³)			
				PSLB	S1	S2	G
38.4	46.0	417	160	417	745	93	961

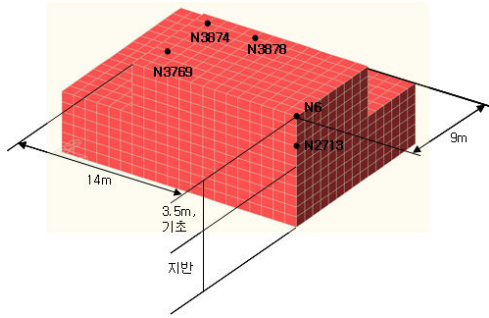


그림 4. 기초 부재 모델링 개요 및 주요 절점

표 3. 콘크리트 수화열 해석 조건

구분	주요 조건
배합	- 레미콘사 제출 배합 - 단위결합재량 417kg/m ³ (고로슬래그미분말 40%) - PSLB 적용 배합 - 단위결합재량 PSLB 417kg/m ³
양생	- 거푸집 : 합판거푸집 - 양 생 : 타설 초기부터 양생포를 사용하여 보온 양생
타설	- 콘크리트 타설은 분할하지 않음
온도	- 속초지역의 기상 자료를 참조하여 5월 평균기온 15℃ 적용(외기온) - 콘크리트 온도는 기존 실적 등을 참조하여 20℃로 설정
대류 경계	- 콘크리트 표준시방서 제시 값 사용 - 합판거푸집 : 8.0 W/(m ² ·℃), 양생포 : 5.0 W/(m ² ·℃)
단열 온도식	- 콘크리트 표준시방서 제시 식 적용 - 레미콘사 : K=56.70, α=1.2495 - PSLB : K=33.93, α=0.3080
강도 발현식	- 압축강도 : $f_{cu}(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95t} f_{cu}(91)$ - 인장강도 : $f_{sp}(t) = 1.4 \sqrt{f_{cu}(t)}$

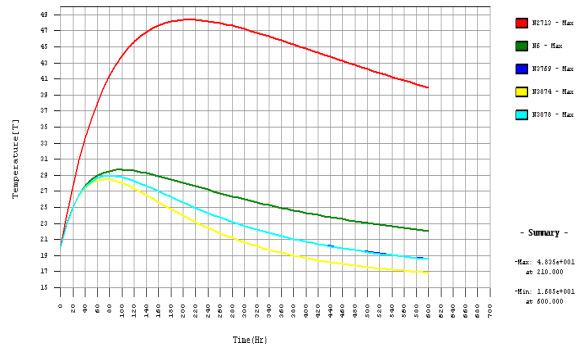
<그림 5>는 주요 절점에서의 온도 이력을 나타낸 것으로서, 수화열 해석 결과 중심부 최고 온도는 PSLB의 경우 약 48℃, 레미콘사 제출 배합의 경우 약 77℃의 수준으로서 PSLB 공법의 우수한 수화열 저감 효과를 확인할 수 있었다. <표 4>는 각 주요 절점에서의 최대 온도 및 온도균열 지수를 간략히 정리하여 나타낸 것으로서 PSLB 공법의 경우 온도균열의 취약부위 및 시점에서 온도균열지수 1.2 이상을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

이상과 같은 수화열 해석 결과로부터 현장에서 사전에 적용을 계획하였던 기존 레미콘사의 제출 배합에 비해 PSLB 공법을 적용함으로써 최고 수화온도를 약 29℃ 정도 저하시킬 수 있고, 분

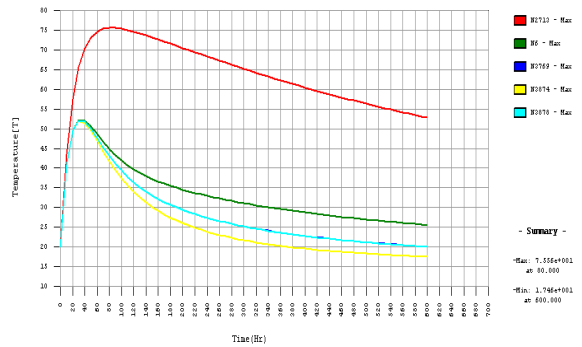
할 타설을 하지 않더라도 온도균열지수 1.2 이상을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, 설정된 배합 및 PSLB 공법의 적용이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

3.3 Mock-up 시험 결과

현장에서 PSLB 공법을 적용하기 위한 최종적인 사전 검토로서, 실제 타설이 이루어질 기초부재와 유사한 크기의 모의부재를



(a) PSLB 공법



(b) 레미콘사 제출 배합

그림 5. 주요 절점에서의 온도이력

표 4. 주요 절점에서의 최대온도 및 온도균열지수

위치	구분	최대온도		온도균열지수	
		온도(℃)	시점(hr)	지수	시점(hr)
표면부 6	PSLB	29.7	100	1.21	220
	제출배합	52.0	30	0.78	120
표면부 3769	PSLB	29.7	80	1.21	220
	제출배합	52.0	30	0.78	120
표면부 3874	PSLB	28.9	70	3.38	180
	제출배합	52.0	30	1.84	110
표면부 3878	PSLB	29.2	70	1.30	220
	제출배합	52.0	30	0.80	120
중상부 2713	PSLB	43.6	220	5.00	-
	제출배합	75.6	80	5.00	-

이용하여 시험 적용을 실시하였다.

<그림 6>은 mock-up 시험 장면을 나타낸 것이며, <그림 7>은 수화열 계측 결과를 나타낸 것으로서 PSLB의 적용에 의해 모의 부재 중심부 최고온도가 약 43℃ 정도의 낮은 수준으로 제어가 되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 mock-up 시험시 콘크리트의 슬럼프는 규격상의 목표 슬럼프를 만족하였으며, 채취된 압축강도의 공인 시험기관에 의한 평가 결과, 채령 28일에서 설계기준강도 확보에 문제가 없는 것을 확인하여, 최종적으로 당 현장의 기초 및 기둥 부재에 PSLB 공법을 적용하는 것으로 결정하였다.

3.4 시공 결과

당 현장에서의 PSLB 공법 적용은 2007년 6월 26일 실시되었으며, 부재 타설시의 평균기온은 약 25℃ 수준으로서, 콘크리트 수화열 해석시의 입력 데이터와 비교하여 약 10℃ 정도 의기온이 높은 상태에서 콘크리트 타설이 진행되었다.

<그림 8>은 현장에서의 PSLB 공법 적용 장면을 나타낸 것으로서, 레미콘 공장에서는 결합재만을 PSLB로 대체하여 기존의 레미콘 생산방식과 동일하게 레미콘을 생산하였으며, 현장으로의 레미콘 운반, 레미콘 품질시험, 타설 및 양생 등 콘크리트 공사에 관련된 모든 항목들도 기존 콘크리트 공사의 관리와 동일하



그림 6. Mock-up 시험 장면

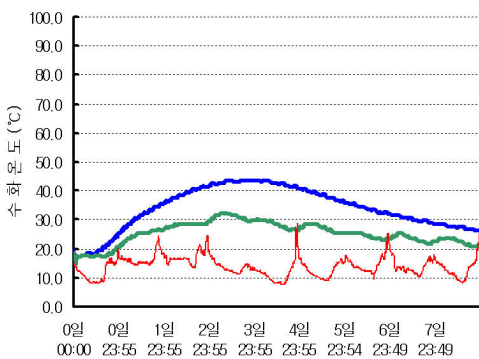


그림 7. 모의부재의 수화열 계측 결과



- 레미콘 생산
- 기존 생산방식 대로 적용



- 레미콘 품질 시험
- KS F 4009 및 현장 시방에 준한 품질관리



- 콘크리트 타설
- 콘크리트표준 시방서 및 현장 시방에 준한 타설



- 콘크리트 양생
- 콘크리트표준 시방서 및 현장 시방에 준한 보양

그림 8. PSLB 공법 현장 적용 장면

게 수행되었다.

<그림 9>는 현장의 대형 매스콘크리트 부재에 PSLB 공법을 적용한 후, 부재 내부의 수화온도를 측정한 결과를 나타낸 것으로서, 부재 중심부의 최고 수화온도가 약 58℃의 수준으로 낮게 관리되고 있어 PSLB 공법의 적용에 의해 대형 매스콘크리트의 수화온도가 효과적으로 관리된 것을 확인하였다.

<그림 10>은 콘크리트 양생을 완료하고, 거푸집을 제거한 후의 콘크리트 표면 상태를 나타낸 것으로서 콘크리트 부재 상부 표면에 미세한 초기 수축균열이 일부 발견되었을 뿐 콘크리트 상부 및 측면에 유해한 균열은 전혀 발생하지 않은 것으로 관찰되어, PSLB 공법에 의해 콘크리트를 일체 타설하여도 부재 두께 3.5m 및 6.0mm의 대형 매스콘크리트 부재의 온도균열을 효과적으로 제어한 것을 확인할 수 있었다.

한편, PSLB 공법의 현장 적용 시 레미콘의 품질관리 시험 결

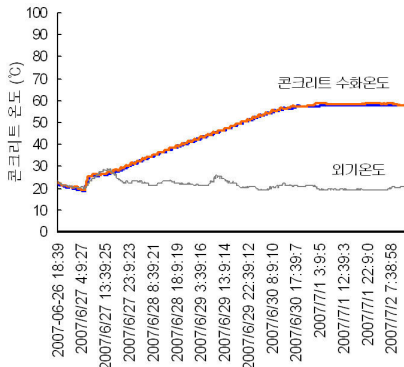
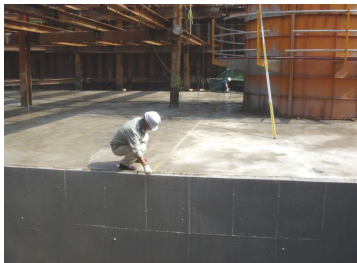


그림 9. 현장 적용 시 수화열 계측 결과



(a) 기초상부 표면



(b) 기초 측면



(c) 기둥 측면

그림 10. 거푸집 제거 후 균열 관찰 현황

과 균지 않은 콘크리트에 있어서 배합설계 시 목표로 한 슬럼프 및 공기량을 모두 만족하였으며, 콘크리트 시공에는 전혀 문제가 없는 것이 확인되었고, 콘크리트 양생 후, 거푸집 제거 강도 및

재령 28일 압축강도의 확보에도 전혀 문제가 없는 것으로 확인되어, 대형 매스콘크리트의 수화열 관리 및 온도균열 제어를 위한 PSLB 공법의 유효성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본고에서는 대형 매스콘크리트구조물의 수화열 저감 및 온도균열 제어 기술로서 건설신기술로 인증된 PSLB 공법을 당사에서 시공 중인 현장의 대단면의 기초 및 기둥부재에 적용한 사례를 정리하여 보고하였다. PSLB 공법의 현장 적용 결과 외부온도가 평균 약 25°C인 환경조건하에서 콘크리트 부재 두께 3.5m 및 6.0m의 대형 매스콘크리트 부재에 있어서 부재 중심부의 최고 수화온도를 약 58°C 수준으로 관리할 수 있었으며, 거푸집 제거 후, 콘크리트 부재 상부 및 측면에 대한 균열 관찰 결과 유해한 균열이 전혀 발견되지 않고 있어, 대형 매스콘크리트구조물의 온도균열 제어기술로서 개발된 PSLB 공법의 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 잠열성 결합재를 활용한 대형 매스콘크리트구조물의 온도균열 제어 기술인 PSLB 공법을 적용하여 당사 현장의 대형 매스콘크리트구조물을 성공적으로 시공하였으며, 콘크리트 구조물의 고품질화 요소기술로서 온도균열을 제어하기 위한 기술을 확보하게 된 것으로 판단된다. 또한 개발된 PSLB 공법의 경우 서중 환경 및 대형 매스콘크리트구조물에서 수화열 저감 및 온도균열 제어 효과가 상당히 우수한 기술이므로 최근 수주가 증가되고 있는 중동 지역 등의 건설구조물 구축 등에도 활용이 가능할 것으로 판단되며, 지금까지 현장에서 대형 매스콘크리트구조물의 적용시 온도균열 발생의 불안감을 해소하는 기술로서 활용 확대가 가능할 것으로 기대된다. □

참고문헌

1. 김도수 외, “화학적 잠열소재(PCM)가 첨가된 시멘트 및 모르타르의 수화열 저감효과에 대한 실험적 연구”, 한국세라믹학회 추계학술발표회 논문집, 2006. 5.
2. 김용로 외, “잠열성 무기화합물이 첨가된 시멘트페이스트의 수화온도 평가”, 한국세라믹학회 추계학술발표회 논문집, 2006. 10.
3. 김용로 외, “분말형 수화열저감재를 사용한 저발열 콘크리트의 수화발열 특성”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2006. 11, pp.709 ~ 712.
4. 건설교통부, 매스콘크리트구조물에서의 수화열 저감기법에 관한 연구, 건설교통부 연구개발사업 최종보고서, 1998. 1.
5. 건설교통부, 초저발열콘크리트의 개발 및 대형 매스콘크리트구조물의 수화열제어 시공기술 개발, 건설교통부 연구개발사업 최종보고서, 1998. 12.
6. 日本建築學會, マスコンクリートにおける技術の現状, 2001. 6.