

대단면 터널 라이닝 적용 고성능 콘크리트의 수화열 특성

민경환¹, 정형철², 양준모³, 윤영수^{4*}

Heat of hydration characteristics on high-performance concrete for large dimensional tunnel linings

Kyung-Hwan Min, Hyung-Chul Jung, Jun-Mo Yang, Young-Soo Yoon

Abstract In this study, experiments of development and application of 50 MPa high-performance concrete are performed for large dimensional tunnel linings. In order to produce 50 MPa high-performance concrete, eight optimal mixtures replacing with fly ash and ground granulated blast furnace slag up to 50 percent of type I Portland cement were selected then tests for mechanical properties and simple adiabatic temperature rise tests were carried out. And in order to assess the quantitative characteristics of heat of hydrations of developed mixtures, three mixtures that the type I Portland cement (OPC) and each one mixture of binary and ternary mixtures (BS30, F15S35) were reselected, then the adiabatic temperature rise tests and mock-up tests were performed. Consequently, the comparisons between the results of mock-up tests and finite element analysis can be enhanced the reliability of analyzing routines of thermal behaviours of the developed high-performance concrete.

Keywords: High-performance concrete, heat of hydration, fly ash, blast furnace slag, adiabatic temperature rise test, mock-up test

요 지 본 연구는 대형·대단면 터널 라이닝 구조물에 적용하기 위해 50 MPa급 고성능 콘크리트의 개발 및 적용을 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 플라이애쉬와 고로슬래그미분말을 1종 시멘트 단위량의 50%까지 치환한 8종의 배합을 선정하여, 8종의 배합의 역학적 특성에 관한 실험과 간이 단열온도 상승실험을 실시하였다. 또한 정량적인 평가를 위해 8종의 배합 중 1종 시멘트만을 사용한 배합(OPC) 및 2성분계 배합과 3성분계 배합중 각각 1종(BS30, F15S35)을 재선정하여 단열온도 상승실험과 Mock-up 실험을 수행하였다. 실물 부재 크기의 시험체의 수화열 측정결과를 유한요소해석과 비교하여 해석루틴의 신뢰도 향상을 기대할 수 있었다.

주요어: 고성능 콘크리트, 수화열, 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 단열온도 상승실험, mock-up 실험

1. 서 론

대형·대단면의 지하 공간의 창출에 대한 요구는 단순히 지상 공간의 부족에 따라 발생하는 수요뿐만 아니라 경제 규모의 성장과 건설 기술의 발달, 인간의 생활 형태의 변화 등의 복합적인 요소에 따른 새로운 공간의 개발에 대한 필요성에서 비롯된 것이라 할 수 있다. 외국의 경우는 대형·대단면 지하공간 활용을 국가 주요사업의 일환으로 추진하고 있다(Boniface 1999; Monnikhof et al. 1999; Rienzo et al. 2008; Romer et al. 2003; Yuan et al. 2000).

국내에서는 터널 시공 방법에 있어서 공사기간과 공사비용을 줄이기 위한 수단으로 터널 굴착 작업과 라이

닝 콘크리트 구조물 공사를 효율적으로 병행 시공하는 공법을 많이 적용하고 있다. 하지만 발파 시 발생하는 진동은 강도가 충분히 발현되지 않은 라이닝 콘크리트에 균열을 발생시키거나 강도를 저하시킬 수 있으므로 이를 예방하기 위한 대책을 수립하는 것이 상당히 중요하다. 건설재료로서 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트는 시멘트, 잔골재 및 굵은 골재를 물과 혼합하여 수화반응을 거쳐 경화하게 되는데, 이때 콘크리트는 건조수축으로 인한 변형과 수화열에 의한 온도응력이 발생하며, 이와 같은 변형과 응력은 콘크리트 내에 미세한 균열을 발생시켜, 콘크리트의 내구성능 저하와 공용수명의 단축을 초래한다. 반면 균열 방지에 관한 국내 시방서의 지침은 단위수량 제한 규정과 허용균열폭 관련 규

¹고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (E-mail: alskh@korea.ac.kr)

²고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (E-mail: jhc00@korea.ac.kr)

³고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (E-mail: jmyang@korea.ac.kr)

^{4*}고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)

정이 유일하나 이것도 지하구조물에 대한 일괄적인 적용은 어렵다(건설교통부 1996; 대한건축학회 2006; 한국콘크리트학회 2007; 한국콘크리트학회 2003).

대형·대단면 라이닝에 고성능 콘크리트를 적용하는 것은 설계적 측면에서 대안 확보에 대한 유연성 증대와 고강도화에 따른 단면 감소, 보다 수밀화된 구조로 인한 내구성 증대와 유지관리의 용이성 등 다양한 긍정적 효과를 예상할 수 있다. 하지만 강도 발휘의 측면만을 강조한 기존의 배합설계로는 재료분리의 가능성, 유동화 감소, 수화열 증가 등의 품질관리의 문제점 등이 아직 해결해야 할 부분으로 남아 있다.

따라서 본 연구에서는 대형·대단면 지하공간에 적용하기 위한 고성능 콘크리트의 개발 및 적용을 위한 연구의 일환으로 50 MPa급의 고성능 콘크리트 제조를 위해 플라이애쉬와 고로슬래그미분말의 치환에 따른 최적 배합을 선정하고, 단열온도와 Mock-up 실험체의 온도 측정, 유한요소 해석을 통해 고성능 콘크리트의 수화열 특성을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 고성능 콘크리트의 수화열

시멘트가 물과 완전히 반응하면 발열 반응에 의해 80~120 kcal/kg 정도의 열이 발생하고, 콘크리트의 열전도율은 상대적으로 작기 때문에 매스콘크리트에서의 수화열은 내부 온도를 상승시키게 된다. 현재 각국의 시방서에서 정의하는 매스 콘크리트는 표 1과 같다(쌍용양회공업(주) 2005). 즉 수화열 및 이에 따른 온도균열을 고려해야 하는 매스콘크리트는 부재의 크기 자체의 문제

이기 보다는 사용하는 콘크리트의 수화열 거동 자체에 따라 평가되어야 한다.

포틀랜드시멘트는 석회석, 규석, 점토, 철광석 및 석고 등의 주원료를 적절히 배합하고, 이것을 1,300°C 정도의 고온에서 용융시킨 후 소성하여 얻어진 클링커(Clinker)에 석고를 약 3% 첨가한 후 미세 분쇄하여 제조한다. 이때 시멘트 중에는 여러 가지 성분이 많이 포함되어 있지만 그 중에서 C₃S(Alite), C₂S(Belite), C₃A(Aluminate), C₄AF(Ferrite) 등의 4가지 성분이 주를 이루고 이의 구성에 따라서 포틀랜드시멘트의 수화열량과 반응속도에 영향을 준다(Mehta & Monteiro 2006).

반면 기존의 강도 발현 위주의 배합설계로는 단위시멘트량이 증가하고, 부배합에 따른 수화열 감소를 위해 저발열형 시멘트를 선택하는 대안을 사용한다. 이 중 4종 시멘트는 수화열 저감에는 탁월하나 강도 발현이 지연되고, 단가가 높아지는 문제점이 있다. 따라서 수화열을 저감시키고 경제성을 재고하는 목적으로 플라이애쉬나 고로슬래그미분 등의 산업 부산물을 혼화재로 사용하는 방안이 다양하게 적용되고 있다(Barnett et al. 2006; Bentz 2008; Bouzouzaa & Nalhotra 2001; Jones & McCarthy 2006; Larrad & Sedran 2002; Liwua & Min 2006; Schindler & Folliard 2005; Schutter 1999; Yang & Yan 2006).

본 연구에서는 대형·대단면에 적용하기 위한 50 MPa급의 고성능 콘크리트에 4종 시멘트를 사용하지 않고, 플라이애쉬와 고로슬래그미분말을 1종 시멘트량의 50%까지 치환한 8종의 배합을 선정하여 역학적 특성에 대한 실험과 간이 단열온도 상승실험을 실시하였다. 또한 정량

표 1. 매스콘크리트의 구분

국가	관련 시방서	구분
국내	콘크리트표준시방서	<ul style="list-style-type: none"> • 넓이가 넓은 평판구조: 두께 0.8 m 이상 • 하단이 구속된 벽체: 두께 0.5 m 이상 • 프리스트레스트 콘크리트 구조물 등 부배합을 사용하는 경우
	건축공사표준시방서	<ul style="list-style-type: none"> • 부재단면의 최소치수가 0.8 m 이상이고, 수화열에 의한 콘크리트의 내부 최고온도와 외기온도와의 차이가 25°C 이상으로 예상되는 콘크리트
일본	콘크리트표준시방서	<ul style="list-style-type: none"> • 부재단면의 최소치수가 0.5 m 이상인 경우 단열 온도상승 특성평가 후 온도해석 수행
	건축공사표준시방서	<ul style="list-style-type: none"> • 부재치수가 0.8 m 이상으로서 수화열에 의한 내부의 최고 온도와의 기온의 차가 25°C 이상으로 예상되는 콘크리트
미국	ACI Committee 207	<ul style="list-style-type: none"> • 열 발생 및 이에 따른 체적변화로 인해 발생하는 균열의 최소화를 위해 대책을 필요로 하는 체적이 큰 현장타설 콘크리트

적인 평가를 위해 8종의 배합중 3종의 배합을 재선정하여 단열온도 상승실험과 실물 부재 크기의 시험체를 제작하여 수화열을 측정하고, 유한요소해석 결과와 비교하였다.

3. 실험 방법

3.1 재료 및 배합

대형·대단면 구조물 적용 고강도 콘크리트의 배합은 설계기준강도 50 MPa을 안정적으로 획득하면서, 워커빌리티와 내구성을 고려해 물-시멘트 비 36%, 단위수량 170 kg/m³, 잔골재율 50%, 슬럼프플로우 50±5 cm, 공기량 5.0±1.5%로 결정하였다. 이를 토대로 결합재의 구성을 달리하여 표 2와 같은 8종의 배합을 선정하였다. 여기서 OPC는 보통포틀랜드시멘트이고, FA는 플라이애쉬, BS는 고로슬래그미분말을 의미하며(3 성분계 배합은 각각 F와 S), FA와 BS 뒤의 숫자는 전체 결합재량 중 혼화재로 치환한 양(%)을 의미한다.

실험에 사용된 시멘트는 비중 3.16, 분말도 341 m²/kg의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 추가로 사용된 결합재는 비중 2.13, 분말도 348 m²/kg의 플라이애쉬와, 비중 2.91, 분말도 453 m²/kg의 제3종 고로슬래그미분말이다. 잔골재는 조립률 2.6의 세척사이고, 굵은 골재는 최대치수 20 mm, 조립률 6.6의 쇄석을 사용하였다. 또한 혼화제는 폴리카본산제 고성능AE감수제와 공기연행제를 사용하였다.

3.2 압축강도 및 할렬인장강도

일반적인 철근콘크리트 구조물의 설계에 있어서 콘크

리트의 인장강도는 무시하지만 사용성 측면에서 균열을 저감시키기 위한 노력으로 인장강도의 중요성이 점차 부각되고 있다. 일반강도 영역에서 콘크리트의 압축강도 증가에 따라 인장강도 역시 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있지만 고강도 콘크리트에서는 이러한 경향이 성립하지 않기도 한다(Carrasquillo et al. 1981; Kovler et al. 1999). 콘크리트의 인장강도는 공시체에 직접인장응력을 일직선으로 유지하기가 힘들고, 공시체의 양단의 맞물림 장치를 만들기 어렵기 때문에 ASTM과 KS 모두 직접인장강도 시험은 규정되어 있지 않고, 할렬인장강도를 통해 간접적으로 평가하고 있다.

대형·대단면 적용 50 MPa급 고성능 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도는 각각 KS F 2405와 KS F 2423에 따라 실험을 실시하였다. 공시체는 제작 1일 후 탈형하고 20±3℃의 항온 수조에서 수중 양생하였고, 압축강도와 할렬인장강도는 7, 28, 56 일 재령에 각각 측정하였다.

3.3 간이 단열온도 상승실험

선정된 8종의 배합의 수화열 거동을 비교평가하기 위해 간이 단열온도 상승실험을 실시하였다. 간이 단열온도 상승실험은 사진 1과 같이 스티로폼 단열재료 64ℓ 용량의 거푸집(40×40×40 cm)을 제작하여 내부에 콘크리트를 타설하고, 부재 중앙의 온도를 측정하였다. 고강도 콘크리트의 수화 반응에 의한 수화반응열을 측정하기 위해 열전자쌍(Thermocouple)을 콘크리트 중앙부에 매입하고, 데이터로거를 연결하여 하여 12일간 온도변화를 측정하였다.

표 2. 변수별 배합비

Mixture	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)					
			Water	Cement (I)	FA	BS	Fine Agg.	Coarse Agg.
OPC	36	50	170	472	-	-	842	855
FA10				425	47	-	833	846
FA20				378	94	-	825	838
BS30				331	-	142	835	847
BS50				236	-	236	830	843
F10S40				236	47	189	824	836
F15S35					71	165	821	833
F20S30					94	142	818	830

3.4 단열온도 상승실험

단열온도 상승실험은 대상 콘크리트에 대한 단열 상태를 유지하며 발생하는 온도 상승량을 측정하는 방법으로 매스콘크리트 온도 상승 예측에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 콘크리트 단열온도상승은 식 (1)과 같은 지수형태의 함수로 나타내며 여기서 최대상승온도값(K)과 반응속도(a)로써 단열온도상승 특성을 나타낸다.

$$T = K(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

식 (1)은 초기의 발열상태를 과도하게 평가하고 수화열이 천천히 일어나는 저발열형 시멘트의 경우나 지연제를 첨가한 경우에는 적합성이 떨어진다. 반면 재료의 반응속도와 온도의 관계에 대한 Arrhenious 법칙에 의거한 형태의 물리적인 의미와 함께 식 형태가 간단하여 수화열 해석시 입력 값으로 널리 사용하고 있다. 단열온도 상승실험과 Mock-up 실험은 앞서 선정한 8개 배합 중 3개 배합을 재선정하여 실시하였다. 3개 배합은 기본군이 OPC 외에 2성분계 배합과 3성분계 배합에서 각각 1종씩을 선정하였다. 단열온도 상승실험은 콘크리트를 배합 직후에 50 ℓ 원기둥 용기에 타설한 후 그 용기를 단열온도 상승실험기에 넣고 단열온도 상승량을 측정하였다. 계측은 타설 직후부터 30분 간격으로 실시하고, 7일간 측정하였다.

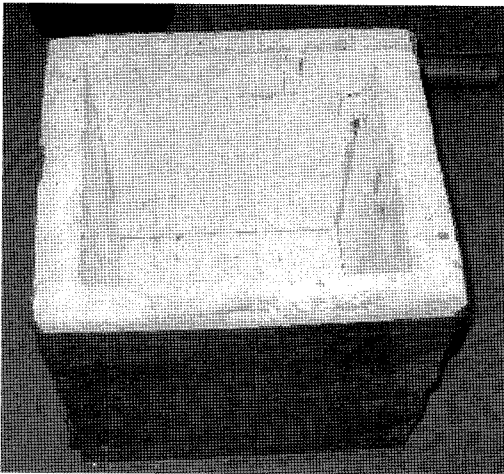


사진 1. 간이단열온도상승실험 거푸집

3.5 Mock-Up 실험

본 연구에서는 실제 부재 크기의 실험체의 수화열을 측정하기 위해 1.2×1.2×1.2 m의 입방체를 제작하고, 시험체 내부의 온도와 외기 온도를 측정하였다. 시험체 내부의 온도는 그림 1과 같이 중앙부(0.6, 0.6, 0.6 m) 중앙상단(0.6, 0.6, 1.0 m) 중앙하단(0.6, 0.6, 0.2 m), 측면(0.2, 0.6, 0.6 m), 모서리(0.2, 0.2, 1.0 m) 5개소에 대해서 감도 0.5℃의 아이버튼(i-button)을 2개씩 매입하여 측정하였다. 기존 열전자쌍과 테이터로거를 연결하여 콘크리트의 온도를 측정하는 시스템은 외부의 전원이 추가로 필요하고, 장비 활용의 편의성을 위해 연장선이 길어져야 단점이 있으나, 아이버튼은 추가의 전원 없이 자체적으로 충분한 양의 데이터를 축적할 수 있어서 현장 부재의 모니터링과 같은 상황에 유용하게 사용할 수 있다. 또한 Mock-up 실험체의 유한요소해석을 결과와 비교하여 고성능 매스콘크리트의 수화열 예측에 대한 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

4. 실험 결과 및 해석

4.1 압축강도 및 할렬인장강도

콘크리트의 압축강도는 표 3과 같이 전 배합이 7일 재령에서 30 MPa을 넘었고, 28일 재령에서는 설계강도를 안정적으로 얻을 수 있었다. 초기 재령과 표준 재령의 강도 증가는 거푸집 제거시기를 앞당겨 시공 속도를

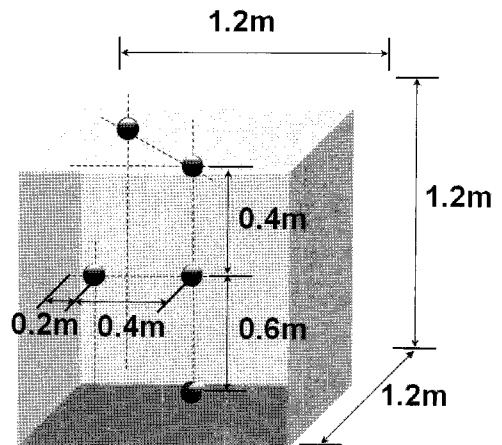


그림 1. Mock-Up 부재 크기 및 형상

표 3. 재령별 강도 측정 결과

Mixture	Compressive Strength (MPa)			Splitting Tens. Strength (MPa)			Tens./Comp. Strength ratio (%)
	7day	28day	56day	7day	28day	56day	
OPC	57.90	63.20	67.87	3.30	3.50	3.70	5.45
FA10	56.14	63.79	68.20	3.24	3.59	3.80	5.57
FA20	42.67	58.78	67.20	2.69	3.07	3.40	5.06
BS30	47.87	65.89	70.50	3.30	3.55	4.00	5.67
BS50	42.71	63.57	73.10	2.65	3.82	4.20	5.75
F10S40	31.27	72.10	77.40	3.10	3.90	4.10	5.30
F15S35	39.63	70.62	76.50	3.00	3.96	4.05	5.29
F20S30	39.20	64.48	74.30	2.76	3.46	3.60	4.85

향상시키고, 구조물의 단면 및 자중 감소, 이에 따른 유연한 설계 대안 효과 등의 장점이 있다. 결합재 구성에 따른 압축강도의 경향은 플라이애쉬의 경우 보다 고로슬래그 미분말의 치환에 따른 강도 발현이 더 우수한 것으로 나타났다. 반면 플라이애쉬로 다량 치환한 경우에는 초기 재령에서 강도 발현이 다소 늦어지는 경향을 보이나, 표준 재령에서는 충분히 강도발현을 하는 것으로 나타났다. 할렬인장강도는 기존 연구에서와 같이 큰 폭의 변화를 갖지 않았고, 재령에 따라 압축강도가 증가하여도 비례하여 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나지는 않았다.

4.2 간이 단열온도 상승실험

간이 단열온도 상승실험 결과는 그림 2~3과 같다. 2성분계 배합의 간이 단열온도 상승실험 결과는 플라이애쉬의 치환에 의한 수화열 저감 효과가 나타나고, 다량의 혼화재를 치환할수록 수화열 발현이 지연되고, 최고 온도와 온도 하강 속도가 작아졌다.

3성분계의 경우는 다량의 혼화재로 대체함에 따라 수화열 발생 지연효과와 수화열 저감효과가 두드러지게 나타났다. 즉 4종 시멘트를 사용하지 않고도 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬를 각각 단독 또는 혼용하여 1종 시멘트의 단위량을 대체하여, 소요 강도발현에 적합하면서 수화열을 감소시킬 수 있는 데에 충분히 유리한 것으로 판단된다.

4.3 단열온도 상승 실험

대형·대단면 라이닝 적용 콘크리트의 수화열 거동에

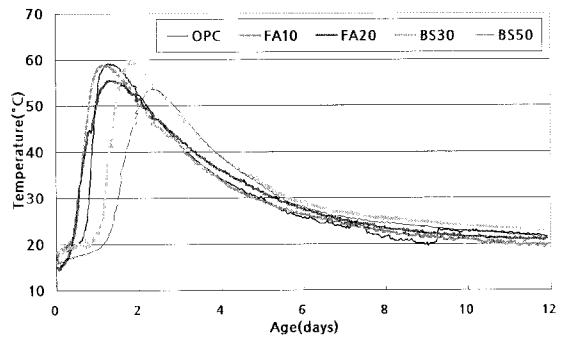


그림 2. 2성분계 간이 단열온도 상승곡선

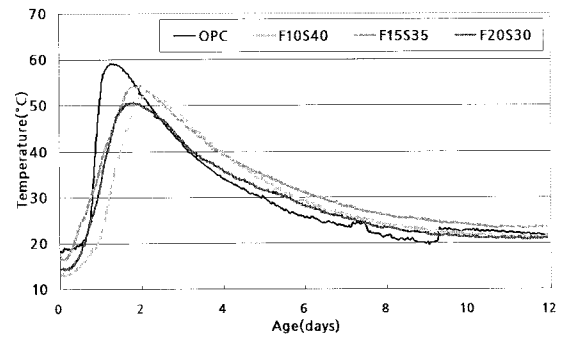


그림 3. 3성분계 간이 단열온도 상승곡선

관한 정량적 평가를 위해 8종의 배합 중 3종을 다시 선정하여 단열온도상승실험을 실시하였다. 재선정된 3종의 배합은 1종시멘트만 사용한 배합(OPC)과 2성분계 및 3성분계 배합에서 각각 1종씩을 선정하였다.

2성분계 배합중 선정된 배합은 BS30이고, 3성분계 배합중에서는 F15S35 배합을 최종적으로 선택하였다.

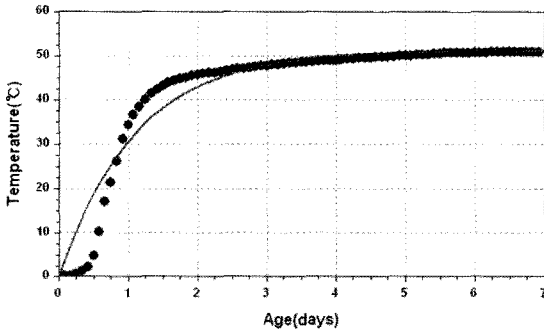


그림 4. OPC 단열온도 상승곡선($K=51.3$, $a=0.911$)

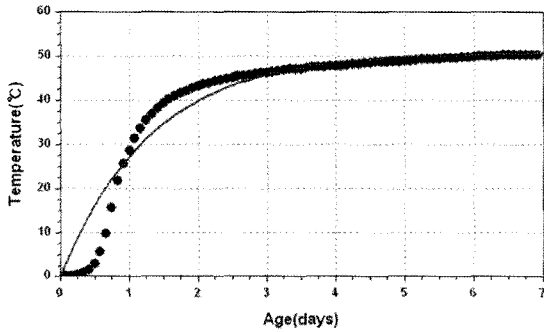


그림 5. BS30 단열온도 상승곡선($K=50.9$, $a=0.768$)

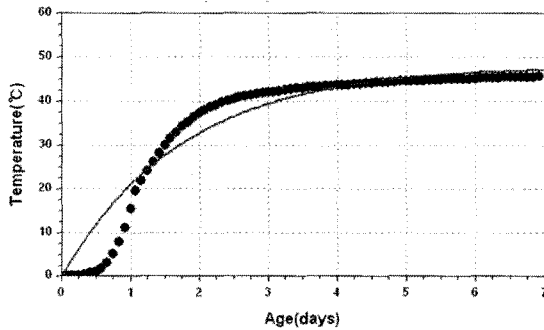


그림 6. F15S35 단열온도 상승곡선($K=48.0$, $a=0.576$)

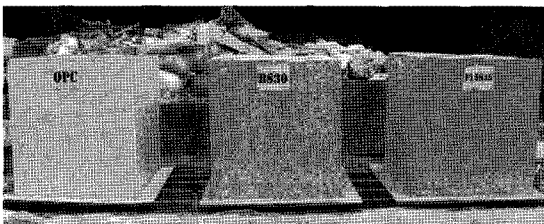


사진 2. Mock-Up 시험체

표 4. 단열온도 상승실험 결과

	최대상승온도 K	반응속도계수 a
OPC	51.3	0.911
BS30	50.9	0.768
F15S35	48.0	0.576

플라이애쉬를 사용할 경우 수화열 저감에는 효과적이
나, 플라이애쉬 자체의 품질이 일정하지 못하여, 강도
발현과 수축, 내구성 등에서 다소 불리한 것으로 판단되
었고, 고로슬래그미분말을 다량 치환할 경우 역시 강도
발현과 수축량이 커지는 문제가 발생하여 BS30 배합이
선정되었다. 3성분계 배합은 모두 시멘트량의 50%를
치환하여 수화열 저감이 확연하게 나타나지만, 플라이
애쉬와 고로슬래그미분말 각각의 효과의 상승작용으로
F15S35 배합이 3종의 배합중 가장 안정적인 것으로 나
타났다.

재선정된 3종의 배합에 대한 단열온도 상승실험 결과
는 그림 4~6과 같고, 식 (1)에 대한 계수의 회귀분석
결과는 표 4와 같이 나타났다. OPC에 비해 BS30의 최
고 단열온도상승량은 크게 차이가 나타나지는 않았으나,
반응속도가 다소 저감되는 경향을 보였고, F15S35는 최
대상승온도와 반응속도가 모두 저감되었다.

4.4 Mock-up 실험 결과

OPC, BS30, F15S35 3종의 배합에 대한 Mock-up 실
험 결과는 그림 7~9와 같다. OPC 부재 중앙부의 최고
온도는 32시간에 59.3°C이고, BS30과 F15S35 부재 중
앙부의 최고 온도는 각각 46시간에 51.0°C, 51시간에
41.0°C로 나타났다. 각 부재의 중앙, 중앙상단, 중앙하
단, 측면, 모서리의 최고 온도와 최고온도 도달시간은
표 5에 정리된 바와 같다. 1종시멘트만을 단독으로 사용
한 배합에 비해 고로슬래그미분말을 30% 치환한 배합
은 중앙부의 최고 온도가 8.3°C 저감되었고, 도달시간도
14시간이 지연되었다. 또한 플라이애쉬와 고로슬래그미
분말을 동시에 사용한 3성분계 배합은 OPC에 비해 최
고온도가 18.3°C 낮고, 도달시간도 19시간이 지연되는
것으로 나타났다. 각 부재의 위치별로는 중앙부, 중앙하
단, 중앙상단, 측면, 모서리 순으로 나타났다.

OPC 부재 중앙부의 온도상승률과 온도하강률은 각각
4.5°C/hr와 0.88°C/hr이고, BS30 부재 중앙부의 온도상승

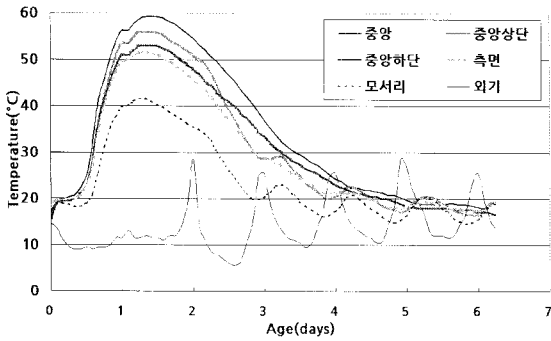


그림 7. OPC Mock-up 실험 결과

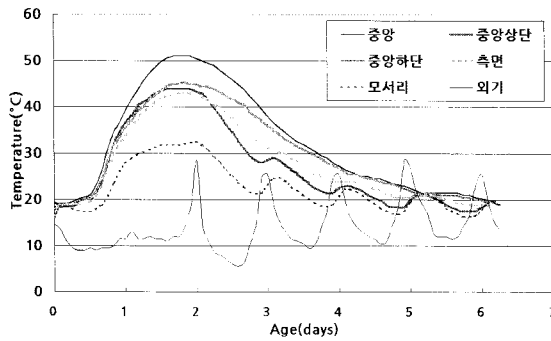


그림 8. BS30 Mock-up 실험 결과

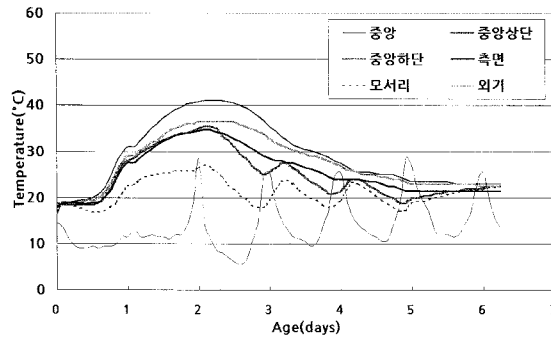


그림 9. F15S35 Mock-up 실험 결과

률과 하강률은 각각 2.5°C/hr와 0.75°C/hr이었다. F15S35 배합은 다량의 혼화재 치환과 함께 타설일과 이튿날의 외기 온도가 낮아 수화반응이 상당히 지연되어 온도상승률과 하강률이 각각 1.5°C/hr와 0.63°C/hr로 나타났다.

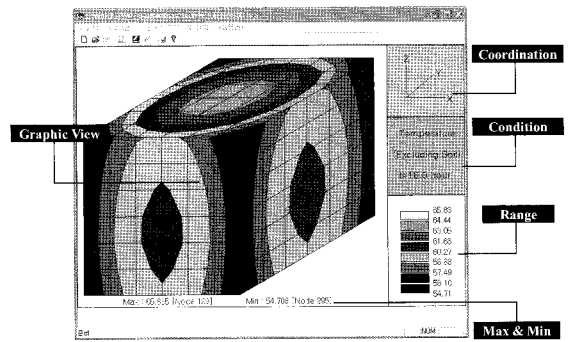
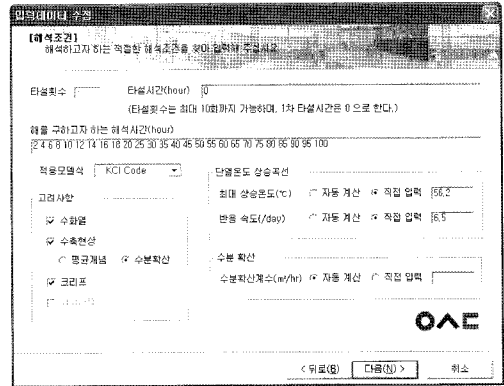


그림 10. HeatCon 프로그램

4.5 유한요소 해석

유한요소해석에 사용한 HeatCon 프로그램은 비정상 상태의 열전달 및 수분확산 평형방정식을 정식화하여 수화열을 해석한다(민경환 등 2007). HeatCon 프로그램은 시간영역에서의 차분화는 시간 선택에 관계없이 비교적 안정된 해를 가지는 기존의 Newmark-β 방법을 사용하지 않고, 자중을 고려한 2계 시간의존 해석이 가능한 Crank-Nicolson 방법을 채택하였다. 표 5에 정리된 바와 같이 OPC와 BS30의 경우 실험 결과와 해석 결과가 유사하게 나타나 해석 루틴의 신뢰성을 기대할 수 있었다. F15S35의 경우 다량의 혼화재 치환에 따른 일반강도와 고강도에서의 열전달 특성이 아직 명확히 규정되지 않아 모서리부분의 온도 예측은 다소 차이를 보이지만, 다른 부분의 최대 온도와 발생시간은 비교적 유사하게 예측하였다.

표 5. 배합별 최대온도 발생시기

배합	측정위치	실험 결과		해석결과(HeatCon)	
		최고온도 (°C)	최고온도 도달시간 (hr)	최고온도 (°C)	최고온도 도달시간 (hr)
OPC	중앙	59.3	32	57.9	34
	중앙상단	56.0		54.6	
	중앙하단	53.0		55.6	
	측면	51.8		54.7	
	모서리	41.5		49.0	
BS30	중앙	51.0	46	49.4	42
	중앙상단	44.0		46.6	
	중앙하단	45.5		47.4	
	측면	43.0		46.8	
	모서리	32.3		45.7	
F15S35	중앙	41.0	51	38.8	54
	중앙상단	35.5		36.7	
	중앙하단	36.5		37.3	
	측면	34.8		36.8	
	모서리	27.0		36.0	

5. 결 론

본 연구는 대형·대단면 라이닝에 50 MPa급 고성능 콘크리트를 적용하기 위한 연구의 일환으로 재료기술 개발과 재료의 역학적 특성 및 수화열 특성에 관한 실험을 실시하였다. 일련의 실험과 해석적 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 콘크리트 압축강도는 8종의 배합 모두 7일 재령에서 30 MPa를 넘었고, 28일 재령에서 설계강도를 모두 안정적으로 획득하였다.
2. 간이 단열온도 상승실험을 통해 플라이애쉬와 고로슬래그미분말을 치환한 배합은 수화열이 저감되고, 수화반응이 지연되는 것으로 나타났다.
3. 대형·대단면 라이닝 적용 고성능 콘크리트의 수화열 거동에 관한 정량적 평가를 위해 8종의 배합 중 3종(OPC, BS30, F15S35)을 다시 선정하여 단열온도 상승실험과 Mock-up 실험을 실시하였다. 1종시멘트만을 단독으로 사용한 배합에 비해 고로슬래그미분말을 30% 치환한 배합은 중앙부의 최고 온도가

8.3°C가 저감되었고, 도달시간도 14시간이 지연되었다. 또한 플라이애쉬와 고로슬래그미분말을 동시에 사용한 3성분계 배합은 OPC에 비해 최고온도가 18.3°C 더 낮고, 도달시간도 19시간이 지연되는 것으로 나타났다.

4. 유한요소해석결과 OPC와 BS30의 경우 실험 결과와 해석 결과가 유사하게 나타나 해석 루틴의 신뢰성을 기대할 수 있었다. F15S35의 경우 다량의 혼화재 치환에 따른 일반강도와 고강도에서의 열전달 특성이 아직 명확히 규정되지 않아 모서리부분의 온도 예측은 다소 차이를 보이지만, 다른 부분의 최대 온도와 발생시간은 비교적 유사하게 예측하였다.
5. 고로슬래그미분말이나 플라이애쉬를 각각 단독 사용 또는 혼용하여 1종 시멘트 단위량을 대체함으로써, 소요 강도발현 및 수화열 저감에 충분히 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술개발사업(04핵심기술 C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1996), 터널표준시방서.
2. 대한건축학회 (2006), 건축공사표준시방서.
3. 민경환, 이태규, 정해문, 윤영수 (2007), 프리스트레스트 콘크리트 교량용 60 MPa급 고강도 콘크리트의 수화열 특성, 대한토목학회 2007년도 정기학술대회논문집, pp. 416-419.
4. 쌍용양회공업(주) (2005), 매스콘크리트의 온도균열 제어방안, 시멘트·콘크리트기술자료집, 쌍용양회(주) 기술연구소, pp. 2-5.
5. 한국콘크리트학회 (2003), 콘크리트표준시방서.
6. 한국콘크리트학회 (2007), 콘크리트구조설계기준.
7. Barnett, S.J., Soutsos, M.N., Millard, S.G. and Bungey, J.H. (2006), Strength Development of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag: Effect of Curing Temperature and Determination of Apparent Activation Energies, *Cem. Con. Res.*, Vol. 36, No. 3, pp. 434-440.
8. Bentz, D.P. (2008), A Review of Early-age Properties of Cement-based Materials, *Cem. Con. Res.*, Vol. 38, No. 2, pp. 196-204.
9. Boniface, A. (1999), Some Technical Lessons Learnt from Construction of the Lesotho Highlands Water Project Transfer Tunnel, *Tunn. Undrg. Spa. Tech.*, Vol. 14, No. 1, pp. 29-35.
10. Bouzouza, N. and Malhotra, V.M. (2001), Performance of Lab-Produced HVFA-Blended Cements in Concrete, *Con. Int'l*, Vol. 23, No. 4, pp. 31-35.
11. Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H. and Slate, F.O. (1981), Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, *J. Proc. ACI*, Vol. 78, No. 3, pp. 171-178.
12. Jones, M.R., and McCarthy, A. (2006), Heat of Hydration in Foamed Concrete: Effect of Mix Constituents and Plastic Density, *Cem. Con. Res.*, Vol. 36, No. 6, pp. 1032-1041.
13. Kovler, K., Schamban, I., Igarashi, S. and Bentur, A. (1999), Influence of Mix Proportions and Curing Conditions on Tensile Splitting Strength of High Strength Concretes, *Mate. Stru.*, Vol. 32, No. 7, pp. 500-505.
14. Larrard, F.D. and Sedran, T. (2002), Mixture-proportioning of High-performance Concrete, *Cem. Con. Res.*, Vol. 32, No. 11, pp. 1699-1704.
15. Liwua, M. and Min, D. (2006), Thermal Behavior of Cement Matrix with High-volume Mineral Admixtures at Early Hydration Age, *Cem. Con. Res.*, Vol. 36, No. 10, pp. 1992-1998.
16. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M (2006), *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, 3rd Ed., McGraw-Hill, NY., pp. 213-222.
17. Monnikhof, R.A.H., Edelenbos, J., van der Hoeven, F. and van der Krogt, R.A.A (1999), The New Underground Planning Map of the Netherlands: a Feasibility Study of the Possibilities of the Use of Underground Space, *Tunn. Undrg. Spa. Tech.*, Vol. 14, No. 3, pp. 341-347.
18. Rienzo, F.D., Oreste, P. and Pelizza, S. (2008), Subsurface Geological-Geotechnical Modelling to Sustain Underground Civil Planning, *Eng. Geol.*, Vol. 96, No. 3-4, pp. 187-204.
19. Romer, M., Holzer, L. and Pfiffner, M. (2003), Swiss Tunnel Structural: Concrete Damage by Formation of Thumasite, *Cem. Con. Comp.*, Vol. 25, No. 8, pp. 1111-1117.
20. Schindler, A.K. and Folliard, K.J. (2005), Heat of Hydration Models for Cementitious Materials, *ACI Mate. J.*, Vol. 102, No. 1, pp. 24-33.
21. Schutter, G.D. (1999), Hydration and Temperature Development of Concrete Made with Blast-furnace Slag Cement, *Cem. Con. Res.*, Vol. 29, No. 1, pp. 143-149.
22. Wang, J.C. and Yan, P.Y. (2006), Influence of Initial Casting Temperature and Dosage of Fly Ash on Hydration Heat Evolution of Concrete under Adiabatic Condition, *J. Therm. Anal. Calo.*, Vol. 85, No. 3, pp. 755-760.
23. Yuan, Y., Jiang, X. and Lee, C.F. (2000), Tunnel Water-proofing Practice in China, *Tunn. Undrg. Spa. Tech.*, Vol. 15, No. 2, pp. 227-233.