

고유동 자기충전 콘크리트의 압축강도 수준에 따른 수화발열 특성

Properties of Hydration Heat with Compressive Strength Level of High Flowing Self-Compacting Concrete

최연왕* · 정재권** · 이재남*** · 김병권****

Choi, Yun Wang · Jung, Jea Gwone · Lee, Jae Nam · Kim, Byoung Kwon

Abstract

The research analyzes and investigates conventional concrete, hydration heat, set, and mechanical properties by making high flowing self-compacting concretes of binary blend and ternary blend as one of evaluations about the properties of the hydration heat of high flowing self-compacting concrete with a strength of 30, 50, and 70 MPa. In addition, it estimates concrete adiabatic temperatures by calculating a thermal property value of powder obtained by measuring a heat evolution amount for powder used in concrete, a thermal property value of concrete obtained by conducting a simple adiabatic temperature test, and a normal thermal property value of material used in concrete, using a simple equation. Moreover, it analyzes and investigates the hydration heat property of high flowing self-compacting concrete and the thermal stress caused by hydration heat by conducting a 3D temperature stress analysis for the hydration heat and the adiabatic temperature obtained by temperature analysis, using MIDAS CIVIL 06 program.

Keywords : High flowing self-compacting concrete, Hydration heat, Thermal stress

요 지

본 연구에서는 강도수준(30, 50 및 70 MPa)에 따른 고유동 자기충전 콘크리트의 수화발열 특성을 알아보기 위하여 2 성분계 및 3 성분계 고유동 자기충전 콘크리트를 제조하여 일반콘크리트와 수화열, 응결 및 역학적 특성을 분석 고찰 하였으며, 콘크리트에 사용된 분체에 대한 미소수화열량을 측정하여 얻은 분체의 열특성값, 간이단열온도실험을 실시하여 얻은 콘크리트의 열특성값 및 콘크리트에 사용된 재료의 일반적인 열특성값을 간편한 방법의 추정식을 이용하여 콘크리트 단열온도를 추정하였다. 또한, 온도해석에 의하여 얻어진 수화열 및 단열온도 특성값을 MIDAS CIVIL 06 프로그램을 이용하여 3차원 온도응력 해석을 실시하여 고유동 자기충전 콘크리트의 수화발열 특성 및 수화열에 의한 온도응력을 분석 고찰하였다.

핵심용어 : 고유동 자기충전 콘크리트, 미소수화열, 온도응력

1. 서 론

최근 급속시공과 현장인력감소 등에 대한 유용성으로 고유동 자기충전 콘크리트에 대한 관심과 현장적용이 점차 늘어나고 있으며, 또한 건설 구조물이 대형화 및 장대화 됨에 따라 대단면 매스콘크리트의 적용도 증가되고 있는 실정이다. 매스콘크리트 구조물은 시멘트 수화열에 의하여 콘크리트 내부에서 발생된 열이 콘크리트의 열전도율이 낮아 외부로 빠져나가는데 많은 시간이 소요됨에 따라 콘크리트 내부의 온도가 상당히 높게 상승되며, 이때 발생하는 온도응력은 콘크리트의 인장강도보다 큰 경우가 많아 균열을 유발시켜 구조물의 품질 및 내구성을 저하시키는 중요한 요인이 된다

(문대중, 1998; 최성우 등 2006). 따라서 국내 건설 현장에서는 매스콘크리트 구조물의 수화열 저감 기술로 시공단계에서의 프리쿨링, 분할타설 및 파이프쿨링 등의 방안을 적용하는 사례가 많지만, 적용의 용이성 및 경제성 등을 고려할 경우 재료적 측면에서의 수화열 저감 방안에 대한 필요성이 요구되고 있다.

특히, 고유동 자기충전 콘크리트(이후 'HSCC'라 약함)의 경우 소요의 점성을 확보하기 위하여 일반콘크리트(이후 'CC'라 약함)보다 단위분체량이 증가되기 때문에 HSCC를 매스콘크리트 부재에 사용할 경우에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

국내 HSCC의 수화발열과 관련된 기존 연구는 국내의

*정회원 · 교신저자 · 세명대학교 토목공학과 교수 (E-mail : crete77@semyung.ac.kr)

**정회원 · 세명대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : jjg4329@nate.com)

***한국건설품질시험원 건설재료연구실 연구원 (E-mail : jjnam52@nate.com)

****세명대학교 토목공학과 겸임교수 (E-mail : k1111bk@empal.com)

Table 1. Chemical compositions and physical properties of OPC and admixtures

Type \ Item	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	Insol. (%)	L.O.I (%)	Surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
OPC	61.40	21.60	6.00	3.40	3.10	2.50	0.21	0.03	3,540	3.15
LSP	43.80	11.06	4.13	1.42	1.44	0.30	-	35.66	4,600	2.69
S G	42.12	33.33	15.34	5.70	0.44	2.08	-	3.00	4,159	2.90
F A	6.51	58.20	26.28	1.10	7.43	0.30	-	3.20	3,550	2.18

경우 40 MPa 이상의 고강도 영역에서 일부 수행되어 왔으며, 보통강도(30 MPa) 수준에서의 연구는 찾아보기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강도수준(30, 50 및 70 MPa)에 따른 HSCC의 수화발열 특성을 알아보기 위하여 2성분계 및 3성분계 HSCC를 제조하여 CC와 수화발열, 응결 및 역학적 특성을 분석 고찰 하였으며, 콘크리트에 사용된 분체에 대한 미소수화열량 측정값과 간이단열온도 실험결과를 활용하고 간편하게 콘크리트 단열온도를 추정하는 방법을 제시하였다. 또한, 온도해석에 의하여 얻어진 수화열 및 단열온도 특성 값을 MIDAS CIVIL 06 프로그램을 이용하여 3차원 온도응력 해석을 실시하여 HSCC의 수화발열 특성 및 수화발열에 의한 온도응력을 분석 고찰하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 무기질 혼화제

시멘트는 밀도 3.15 g/cm³ 및 분말도 3,540 cm³/g의 보통포틀랜드시멘트(이후 ‘OPC’라 약함)를 사용하였으며, 분체계 HSCC를 제조하기 위하여 석회석 미분말(이후 ‘LSP’라 약함), 고로슬래그 미분말(이후 ‘SG’라 약함) 및 플라이애시(이후 ‘FA’라 약함)를 사용하였다. Table 1은 OPC 및 혼화제의 화학성분 및 물리적 성질을 정리한 것이다.

2.1.2 골재

잔골재는 낙동강산 강모래(이후 ‘S’라 약함)를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 20 mm인 석회암질 부순골재(이후 ‘G’라 약함)를 사용하였다. Table 2는 굵은골재 및 잔골재의 물리적 성질을 정리한 것이다.

2.1.3 혼화제

HSCC의 유동성 확보를 위하여 혼화제는 국내 H사의 폴리카르본산계 고성능감수제(이후 ‘SP’라 약함)를 사용 하였다.

2.2 시멘트 페이스트 실험

2.2.1 미소수화열

Table 2. Physical properties of aggregates

Type \ Item	Gmax (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.	Unit Mass (kg/m ³)
G	20	2.68	1.01	6.94	1,626
S	-	2.57	2.07	2.76	1,659

Table 3. Mixture proportions of cement paste

Type	W/P	P (g/m ³)			
		OPC	LSP	SG	FA
OPC	0.5	10	-	-	-
LSP30	0.5	7.44	2.56	-	-
SG30	0.5	7.24	-	2.76	-
FA30	0.5	7.92	-	-	2.08
LSP20FA20	0.5	6.91	1.71	-	1.38
LSP20FA10	0.5	7.60	1.71	-	0.69
SG10FA20	0.5	7.70	-	0.92	1.38
SG20FA10	0.5	7.47	-	1.84	0.69

*페이스트 기호설명

예; LSP30 : OPC에 대하여 LSP를 30%(Vol. %) 혼합

SG10FA20 : OPC에 대하여 각각 SG 10% 및 FA 20%(Vol. %) 혼합

혼화제의 종류 및 혼합률에 따른 페이스트의 수화열 특성을 알아보기 위하여 W/C 50%의 OPC페이스트를 기준으로 OPC에 대하여 LSP, SG 및 FA를 2성분계 및 3성분계 부피비로 치환 하였으며, 기건상태(온도 20°C)에서 72시간 동안 미소수화열량계를 사용하여 페이스트의 수화열량을 측정 하였다. Table 3은 페이스트 배합표이다.

2.3 콘크리트 실험

2.3.1 간이단열온도

HSCC의 수화발열 특성을 알아보기 위하여 정육면체의 단열상자(300×300×300 mm)를 제작 후 CC 및 HSCC를 타설 하였으며, 중심부에 온도 센서를 설치하여 데이터로거(TDS-303)에 의해 1시간 간격으로 온도이력을 측정 하였다. Fig. 1은 간이단열온도실험을 위하여 사용된 시험체의 체원 및 사진이다.

콘크리트의 수화발열특성을 알아보기 위하여 CC 및 HSCC 배합은 목표강도 3수준(30, 50 및 70 MPa)으로 총 9배치의 배합을 실시하였다. 또한, CC 배합은 현장에서 주로 사용되는 콘크리트 배합을 고려하여 슬럼프 170±20 mm 배합을 기준으로 하였으며, HSCC 배합은 골재 채움율(PF)(한국전력공사 전력연구원, 1998)을 이용한 2성분계 및 3성분계 분체계 배합으로 제조하였다. CC 및 HSCC 배합은 Table 4이며, HSCC의 유동성능은 Table 5이다.

2.3.2 응결시간

HSCC의 응결 특성을 알아보기 위하여 응결 시험은 KS F 2436에 따라 관입침을 25 mm까지 침입시켜 응력이 3.5

Table 4. Mixture proportions of concrete

Type	Specified concrete strength (28 day, MPa)	W/C (%)	W/P (Vol. %)	S/a (%)	Unit mass (kg/m ³)							SP (×P. %)	Slump (mm) /Slump flow (mm)	
					W	P				S	G			
						OPC	LSP	SG	FA					
CC	OPC1	30	50	-	45	178	356	-	-	-	768	979	0.3	Slump (mm) = 170±20
	OPC2	50	35	-	45	172	492	-	-	-	717	931	0.5	
	OPC3	70	26	-	39	179	690	-	-	-	551	917	0.8	
HSCC	LSP30	30	47	35	51	178	378	138	-	-	786	802	0.9	Slump flow (mm) = 650±50
	LSP20 FA20	30	55	36	51	178	324	92	-	75	786	802	0.9	
	SG10 FA20	50	44	33	51	173	390	-	51	77	786	802	0.9	
	SG20 FA10	50	44	33	51	173	390	-	103	39	786	802	0.9	
	SG10 FA20	70	31	24	46	151	480	-	63	95	687	856	2.1	
	SG20 FA10	70	31	23	46	151	480	-	126	47	687	856	2.1	

Table 5. HSCC fluidity

Item	Rank	Standard Index	Mixture					
			JSCE 2 grade	LSP30	LSP20 FA20	SG10 FA20	SG20 FA10	SG10 FA20
Flowability	Slump flow(mm)	600-700	650	540	660	670	740	750
Segregation resistance ability	Time required to flow through V-funnel (sec)	7-13	7.9	7.5	11.1	10.8	25.0	21.2
	Time required to reach 500 of slump flow (sec)	3-15	3.1	4.5	4.9	4.6	5.1	5.11
Filling height of U-box test (mm)		≈300	330	340	350	350	340	330

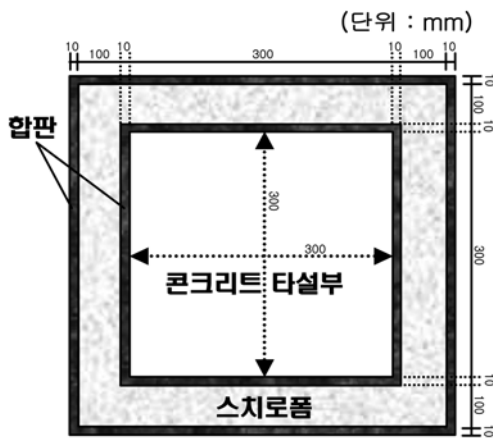


Fig. 1 Semi adiabatic temperature apparatus of concrete

MPa일 때의 시간을 초결시간, 28 MPa일 때의 시간을 종결 시간으로 하여 측정하였다.

2.3.3 압축강도

콘크리트의 압축강도 시험은 Ø100×200 mm 원주형 몰드에 CC는 2층 8회 다짐을 하였으며, HSCC는 다짐을 하지 않은 상태에서 제작하였다. 또한, 24시간 후 몰드를 탈형하여 20±2°C의 양생수조에서 재령 28일 까지 표준양생을 하여 KS F 2405에 따라 압축강도를 측정하였다.

2.3.4 쪼갬 인장강도 및 정탄성계수

콘크리트의 쪼갬 인장강도 및 정탄성계수는 압축강도용 공시체와 동일한 방법으로 제조한 콘크리트 공시체를 이용하여 재령 28일에 KS F 2423 및 KS F 2438에 따라 측정하였다.

3. 단열온도 및 온도응력 검토

3.1 단열온도 추정

3.1.1 최대단열온도 추정

콘크리트 단열온도 식은 실험식으로서 단열온도상승량을 재령에 대한 함수로 표현하는 여러 가지 방법들이 있으며, 일반적으로 콘크리트 단열온도 상승은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서,

T : 시간 t에서 단열온도상승값(°C)

K : 콘크리트 최대단열온도상승값(°C)
 α : 단열온도상승속도 상수

단열상태에서 콘크리트의 온도상승은 OPC의 수화와 함께 시작하며, OPC페이스트가 수화함에 따라 골재의 열특성값에 의하여 콘크리트의 온도상승특성이 결정된다. 이때 OPC 수화에 의한 OPC페이스트의 최대 상승온도는 최대누적수화열량을 온도로 환산한 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_p = \frac{Q}{S_p} \quad (2)$$

여기서,

K_p : 시멘트페이스트에 의한 최대온도상승값(°C)
 Q : 시멘트페이스트의 최대누적수화 발열량(cal/g)
 S_p : 시멘트페이스트 비열(cal/g·°C)

식 (2)는 OPC페이스트의 총 수화에 대한 최대온도상승을 표현하기 위하여 OPC페이스트에 골재가 혼합(콘크리트)된다고 가정한다면, 골재의 열전도율, 열확산율 및 밀도에 따라 온도상승특성이 달라진다. 이때 OPC페이스트에 대한 콘크리트의 단위체적당 온도를 1°C 올리는데 필요한 열량비를 식 (2)에 적용하여 콘크리트 최대 단열온도상승값을 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$K_C = \frac{S_p \cdot \rho_p}{S_c \cdot \rho_c} \cdot K_p \quad (3)$$

여기서,

K_c : 콘크리트 최대단열온도상승값(°C)
 S_p : 시멘트페이스트 비열(cal/g·°C)
 S_c : 콘크리트 비열(cal/g·°C)
 ρ_p : 시멘트페이스트 단위용적질량(kg/m³)
 ρ_c : 콘크리트 단위용적질량(kg/m³)

식 (3)에서 OPC페이스트의 비열은 식 (4)와 같이 페이스트를 구성하는 각 재료의 비열로부터 계산할 수 있다.

따라서 본 연구에서 배합수의 비열은 1 cal/g·°C 사용하였으며, 시멘트 혼화제의 비열은 일반적으로 사용하고 있는 0.22 cal/g·°C 사용하였다(Choi *et al.*, 2006; Dhir, 1986).

$$S_p = \frac{S_c \cdot \rho_c + S_b \cdot \rho_b + S_w \cdot \rho_w}{\rho_c + \rho_b + \rho_w} \quad (4)$$

여기서,

S_c : 시멘트 비열(cal/g·°C)
 S_b : 혼화제 비열(cal/g·°C)
 S_w : 배합수 비열(cal/g·°C)
 ρ_c : 시멘트 단위용적질량(kg/m³)
 ρ_b : 혼화제 단위용적질량(kg/m³)
 ρ_w : 배합수 단위용적질량(kg/m³)

또한, 콘크리트의 비열은 콘크리트표준시방서에 제시된 식 (5)와 같이 표현된다.

$$S_c = \frac{k_C}{(h_c^2 \cdot \rho)} \quad (5)$$

여기서,

k_c : 콘크리트 열전도율(kcal/m·hr·°C)

h_c^2 : 콘크리트 열확산율(m²/hr)
 ρ : 콘크리트 단위용적질량(kg/m³)

특히, 식 (5)의 콘크리트 열전도율(k)은 콘크리트의 구성성분 중 약 70% 차지하는 골재에 의해 열특성값이 크게 변화되기 때문에 골재부피비, 함수상태 및 온도를 고려하여 식 (6)(Dhir 1986)과 같이 표현되며, 간이단열온도실험을 통하여 얻은 시간에 따른 각각의 온도를 적용하여 계산된 열전도율의 평균값을 사용하였다.

$$k = k_{ref}(0.8 + 0.2R_h)(0.34 + 1.03AG)(1.04 - 0.002T) \quad (6)$$

여기서,

k_{ref} : 온도 20°C, 완전습윤상태인 콘크리트의 열전도율로서 2.0(kcal/m·hr·°C)이다.
 R_h : 상대습도
 AG : 골재부피비(골재량/전체량)
 T : 온도(°C)

3.1.2 상승속도 추정

단열상태에서 콘크리트의 온도상승속도는 화학 반응속도의 개념으로 보았을 때 용매, 전해질의 성질 및 농도의존성(Hwang and Shen 1991), 콘크리트의 경우 배합수, 시멘트, 혼화제, 혼화제의 성질 및 콘크리트전체에 대한 분체의 부피비 등에 의하여 결정되기 때문에 반응속도 상수의 계산은 많은 변수를 가지고 있어 이론적으로는 규명하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 여러 가지 변수들이 복합적으로 작용한 단열온도상승속도 상수(α)를 간편한 방법으로 추정하기 위하여 미소수화열 및 간이단열온도의 상관성을 분석하여 단열 온도상승속도 상수를 추정 하였다.

Fig. 2의 TypeI은 Table 4의 OPC1 배합의 시간 경과에 따른 간이단열온도 이력을 나타낸 것이며, TypeII는 TypeI 곡선의 단위시간에 대한 온도의 차를 정리한 것이다. TypeI의 간이단열온도 이력곡선을 보면 최초시간부터 200시간까지 3개의 변곡점(A, B 및 C)을 나타내고 있으며, 최초시간부터 변곡점 A구간은 시멘트의 활발한 수화 반응에 의하여 콘크리트의 온도가 급격히 상승하는 구간이다. 변곡점 A-B 구간은 시멘트의 수화반응에 의하여 콘크리트의 전체적인 온도는 상승하지만 시간경과에 따른 상승량은 감소하는 구간이며, 변곡점 B는 콘크리트의 온도상승량 및 손실량이 같아

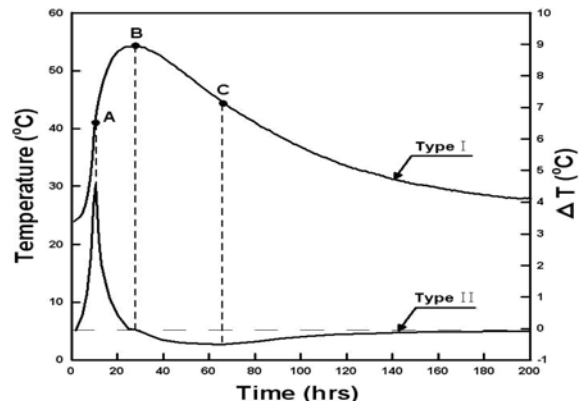


Fig. 2 Curve of semi adiabatic temperature and curve of a variation of temperature per an hour

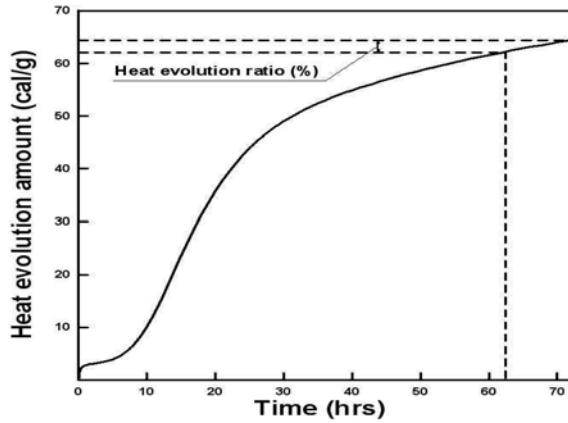


Fig. 3 Curve of heat evolution ratio per an hour

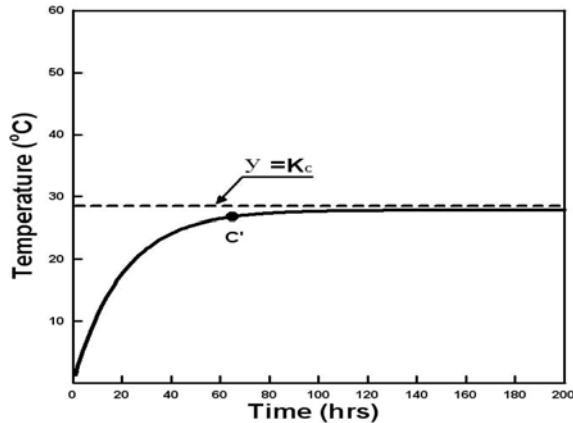


Fig. 4 Presumption of concrete adiabatic temperature

지는 시점이다(최대단열온도). 또한, 변곡점 B-C구간은 실질적으로 콘크리트는 발열하지만 외부로의 온도손실량이 더 크기 때문에 콘크리트의 온도가 감소하는 구간이며, 변곡점 C 이후부터는 콘크리트 자체발열량은 미소하거나 없으며 외부 온도에 의존되어 콘크리트의 온도가 감소하는 구간이다. 특히, 외부로의 열 손실량이 없을 경우 OPC의 수화단계 중 초기 C₃A의 활성화, 가속기 및 감속기에 C₃S의 수화 발열 반응에 의한 콘크리트의 온도상승은 최초시간에서 변곡점 C 전에 나타나며, 변곡점 C 이후부터는 C₂S 및 C₄AF 같은 장기 반응형 화합물이 천천히 수화해 가는 단계이다.

따라서 콘크리트의 온도상승에 크게 영향을 미치는 구간을 최초시간에서 변곡점 C로 결정하였으며, Fig. 2를 통하여 얻은 변곡점 C의 X좌표를 Fig. 3의 시간경과에 따른 누적미소수화발열 곡선에 적용하면 최대 누적수화열량에 대한 변곡점 C 시간에서의 누적수화열 비율을 알 수가 있다. 따라서 식 (2)를 이용하여 계산된 최대 단열온도상승값(K_c)에 누적수화열 비율을 적용하면 Fig. 4와 같이 C'을 지나며, y=K_c와 수렴하는 식 (7)으로 표현할 수 있다.

$$T(t) = K_c \left(1 - e^{-\alpha' \frac{t}{24}} \right) \quad (7)$$

여기서,

- T(t) : 시간 t에서 단열온도상승값(°C)
- K_c : 콘크리트 최대단열온도상승값(°C)
- α' : 단열온도상승속도 상수

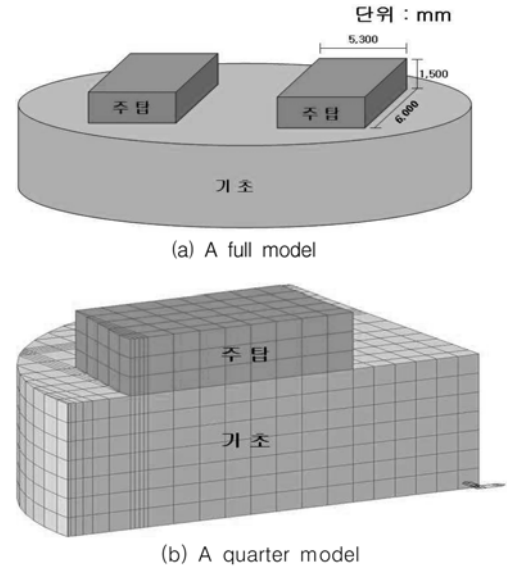


Fig. 5 A quarter model of hydration heat

3.2 온도응력 해석

콘크리트의 수화발열에 의한 온도응력 평가의 일환으로 사장교 주탑 매스콘크리트 구조물을 대상으로 수화발열 및 온도해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS CIVIL 06이며, 경계조건은 대칭 경계조건을 이용하여 1/4모델링을 하였다. 이때 기초(수중콘크리트) 구간은 양생이 완료되어 상시 20°C로 유지되고 발생온도 및 균열지수에 대하여 무시하는 것으로 가정(내부구속) 하였으며, 주탑은 1.5 m로 일괄 타설을 실시한 것으로 하였다. Fig. 5는 해석 적용 모델링을 나타낸 것이다.

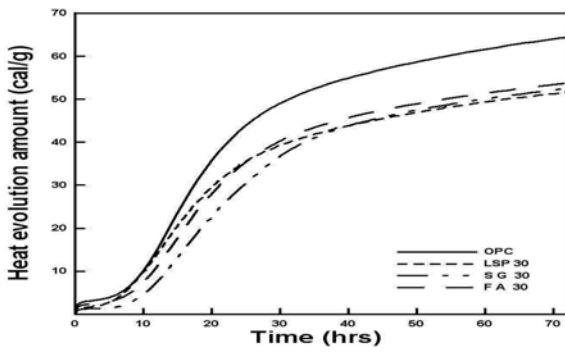
4. 실험결과 및 고찰

4.1 페이스트 미소수화열 특성

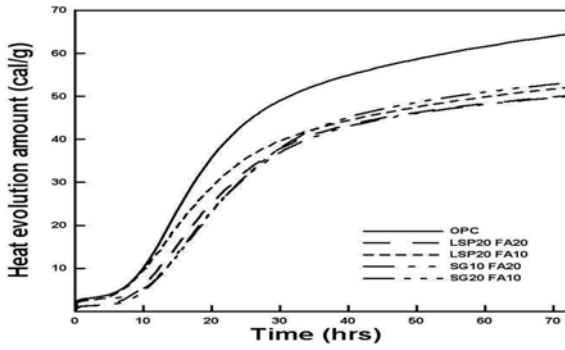
시멘트의 수화발열량과 발열속도는 각각 수화 반응성을 나타내는 지표로서 사용할 수 있으며, 응결 및 경화 특성과 온도 상승을 예측하기 위해 사용할 수 있다(Tiplin, 1959).

혼화제의 종류 및 혼합률에 따른 페이스트의 수화발열 특성을 알아보기 위하여 OPC페이스트를 기준(W/C 50%)으로 하여 OPC에 대하여 LSP, SG 및 FA를 부피비로 혼합한 페이스트의 시간경과에 따라 측정된 수화열량을 누적시켜 정리한 것이 Fig. 6이다. Fig. 6의 결과 최초미소수화열 발생 4시간 이후 수화발열속도가 급격히 증가하였으며, 14시간 전후로 최고상승속도가 발생하였다. 이때 혼화제 혼합에 따른 수화열의 감소경향이 뚜렷하게 나타났다.

72시간에서 누적수화열량은 2성분계 배합인 LSP30, SG30 및 FA30의 경우 OPC보다 약 20, 18 및 16% 저감되었다. 기존 연구에 의하면 SG 및 FA를 증량비로 혼합할 경우 SG보다 FA에서 수화열량이 낮게 나타나는 것으로 보고되었다(Zhang *et al.*, 2002). 그러나 Fig. 6의 경우 FA30보다 SG30의 수화발열량이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 Table 3과 같이 혼화제를 OPC에 대한 동일한 부피비로 혼합할 경우 SG보다 FA가 상대적으로 낮은 밀도로 인하여 혼합 질량은 감소되기 때문에 상대적으로 OPC량이 증가되어 누적수화열량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한,



(a) Binary blend



(b) Ternary blend

Fig. 6 Hydration heat of different types of paste

LSP30의 경우 14시간까지의 누적수화발열 경향이 OPC와 매우 유사하게 나타났으며, 72시간 누적수화열량은 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 LSP의 경우 C₃S의 초기 수화를 촉진시킬 뿐 다른 수화 반응성이 없기 때문에 LSP 혼합량에 비례하여 단위시멘트량이 감소되어 수화열량이 감소된 것으로 판단된다.

3성분계 배합인 LSP20FA20, LSP20FA10, SG10FA20 및 SG20FA10의 경우 72시간에서 누적수화열량은 OPC보다 약 22, 19, 23 및 18% 저감되었으며, 2성분계 보다 3성분계가 동일 혼합물에 대하여 수화열량이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 OPC용 혼화재로 LSP, SG 및 FA를 사용할 경우 혼화재의 혼합에 따른 단위시멘트량 감소로 수화열량이 감소된 것으로 판단된다. 또한, SG20FA10의 경우 40시간 이후 경과시간에 따른 누적수화열량이 LSP20FA20, LSP20FA10 및 SG10FA20 보다 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 40시간 이후 SG 및 FA의 활성화에 의한 발열반응으로 누적수화열량이 증가한 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 콘크리트 배합 설계시 SG 및 FA를 혼합할 경우 초기 수화반응을 지연시킬 수 있으며, LSP 및 FA의 혼합으로 콘크리트 온도저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 2성분계 보다 3성분계 HSCC 배합이 온도 저감에 유리할 것으로 판단된다.

4.2 콘크리트 응결 특성

콘크리트 응결은 수화 초기에 초결이 발생하여 미소수화열 상승 Peak점에서 종결되며(Taplin, 1959), 사용재료에 따라 촉진 및 지연특성이 변화되기 때문에 콘크리트의 수화 및 강도에 큰 영향을 미친다. 특히, HSCC는 CC보다 다량의 혼화재 및 SP를 사용하기 때문에 응결 및 경화 시간을 지

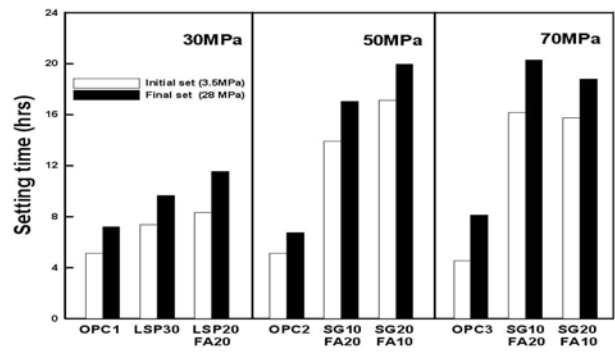


Fig. 7 Initial setting and final setting of different types of concrete

연시킬 수 있으므로 콘크리트 관입저항시험을 통한 초기 응결 특성의 평가가 필요하다.

혼화재의 혼합 및 강도수준에 따른 CC 및 HSCC의 응결 특성을 알아보기 위하여 관입저항 침에 의한 콘크리트의 응결 시간을 측정하여 정리한 것이 Fig. 7이다. Fig. 7의 결과 HSCC가 CC 보다 응결 시간이 지연되었으며, HSCC의 경우 보통강도 수준(30 MPa) 보다 고강도 수준(50 및 70 MPa)에서 응결 지연이 크게 나타났다. 특히, 보통강도 수준의 경우 OPC1 보다 LSP30에서 초결은 1.4배, 종결은 1.3배 지연되었으며, LSP20FA20에서 초결 및 종결은 1.6배 지연되었다. 이러한 결과는 Fig. 6의 미소수화열 측정 결과와 같이 혼화재를 혼합한 HSCC의 응결시간은 CC의 응결 시간 보다 초기 수화반응의 감소로 초결 및 종결이 지연된 것으로 판단된다.

고강도 수준의 경우 OPC2 보다 SG10FA20에서 초결은 2.7배, 종결은 2.5배 지연되었으며, SG20FA10에서 초결은 3.3배, 종결은 3배 지연되었다. 또한, OPC3 보다 SG10FA20에서 초결은 3.5배, 종결은 2.5배 지연되었으며, SG20FA10에서 초결은 3.4배, 종결은 2.3배 지연되었다. 이러한 결과는 혼화재의 혼합으로 인한 OPC량의 감소 및 다량의 SP 첨가로 OPC입자 주위에 얇은 피막이 형성되었기 때문에 응결이 지연된 것으로 판단된다.

4.3 콘크리트 수화발열 특성

혼화재의 혼합 및 강도수준에 따른 CC 및 HSCC의 수화발열 특성을 알아보기 위하여 시간경과에 따라 Fig. 1 시험체의 중심부 온도이력을 측정하여 나타낸 것이 Fig. 8이다. Fig. 8의 결과 콘크리트 온도는 20~29시간에 최대온도로 나타난 이후 점차 감소하는 경향이 나타났다. Fig. 8(a)의 목표강도 30 MPa인 경우 OPC1 보다 LSP30 및 LSP20FA20에서 최대상승온도는 각각 13 및 3% 상승 하였다. 특히, 최대상승 온도 도달시간은 LSP30의 경우 2시간 단축되었으며, LSP20FA20의 경우 OPC1과 동일하게 나타났다. 이러한 원인은 CC보다 HSCC가 분체량이 많아 최대상승온도가 상승하였으며, LSP30의 경우 LSP가 C₃S의 활성화에 기인함에 따라 초기수화의 촉진으로 최대상승온도 도달시간이 단축된 것으로 판단된다. Fig. 8(b)의 목표강도 50 MPa인 경우 OPC2 보다 SG10FA20 및 SG20FA10에서 최대상승온도는 각각 7 및 4%의 온도저감 효과가 나타났으며, 최대상승온도 도달시간은 각각 14 및 6시간 지연 되었다. 또한, Fig. 8(c)

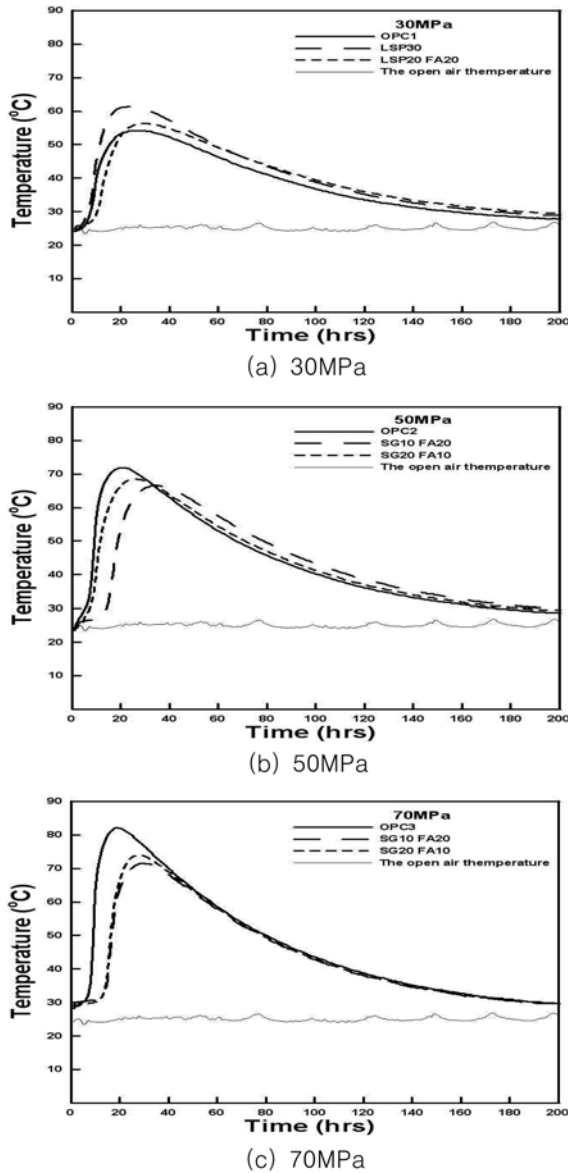


Fig. 8 Curves of semi adiabatic temperature

의 목표강도 70 MPa인 경우 OPC3 보다 SG10FA20 및 SG20FA10에서 최대상승온도는 각각 10 및 13%의 온도저감 효과가 나타났다. 또한, 최대상승온도 도달시간은 각각 8 시간 및 10시간 지연 되었다. 이러한 원인은 Fig 6의 미소 수화열 측정 결과와 같이 혼화재의 혼합에 따른 단위시멘트 량 감소로 수화열량이 감소된 원인으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 고강도수준(50 및 70 MPa) HSCC의 경우 CC보다는 최대상승온도가 저감되지만 보통강도(30 MPa) 수준 CC의 분체량 보다는 분체량이 증가하기 때문에 최대상승온도가 증가하는 것을 알 수 있다.

4.4 콘크리트 역학적 특성

압축강도와 쪼갬 인장강도와의 관계는 CEB-FIP(유럽콘크리트위원회) 코드에서 제시한 압축강도에 따른 인장강도의 최대·최소값을 표현한 식과 비교하였으며, 압축강도수준별 CC 및 HSCC의 쪼갬 인장강도를 정리한 것이 Fig. 9이다. Fig. 9의 결과 압축강도가 증가함에 따라 쪼갬 인장강도는 증가하였으며, CC 및 HSCC에서 CEB-FIP 코드에서 제시한 식과 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 인장·압축강도(f_t/f_c)비는

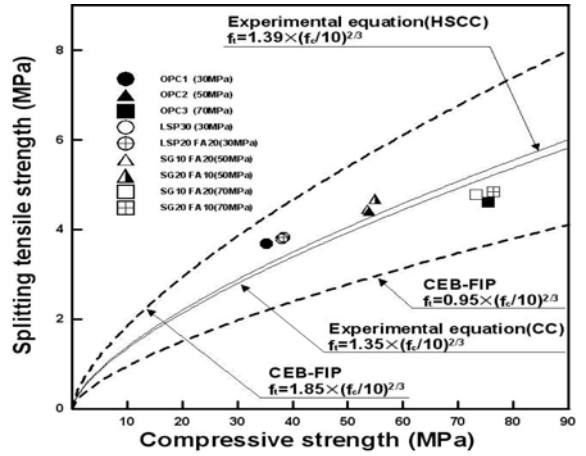


Fig. 9 Relationship between compressive strength and splitting tensile strength

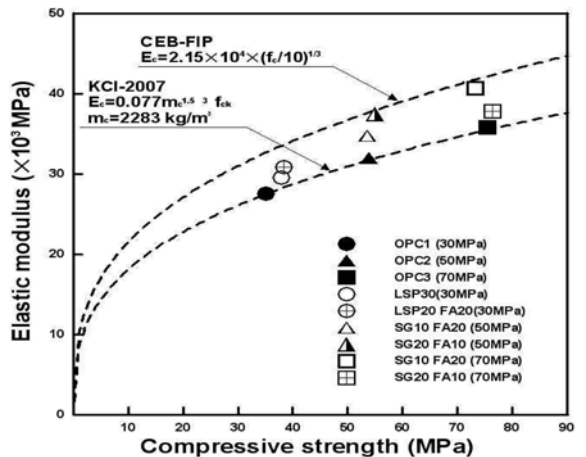


Fig. 10 Relationship between compressive strength and elastic modulus

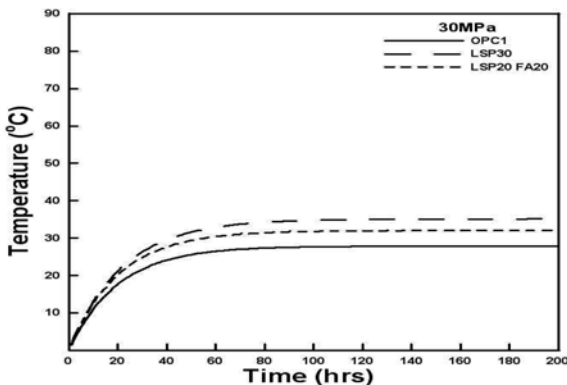
목표강도 30 MPa의 경우 OPC1, LSP30 및 LSP20FA20에서 각각 10%로 나타났으며, 목표강도 50 MPa의 경우 OPC2, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 8.2, 8.3 및 8.5%로 나타났다. 또한, 목표강도 70 MPa의 경우 OPC3, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 6.1, 6.5 및 6.3%로 나타났다. 이러한 결과 강도수준에 따른 CC 및 HSCC의 인장강도는 유사하며, 혼화재 및 SP의 혼합이 콘크리트의 인장강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

압축강도와 정탄성계수와의 관계는 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회) 및 CEB-FIP Code(유럽콘크리트위원회)에서 제시한 식과 비교하였으며, 압축강도수준별 정탄성계수의 관계를 정리한 것이 Fig. 10이다. Fig. 10의 결과 압축강도가 증가함에 따라 탄성계수는 증가하였으며, 모든 배합에서 콘크리트구조설계기준과 CEB-FIP Code에 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 동일강도에서 탄성계수는 CC보다 HSCC에서 7~33% 크게 나타났다. 특히, 2성분계 보다 3성분계가 탄성계수의 증가가 크게 나타났다.

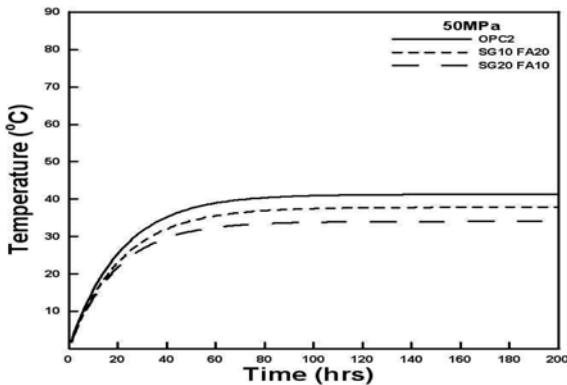
이러한 결과는 HSCC의 경우 유동성 확보를 위하여 다량의 SP를 첨가하여 OPC 입자 표면이 강한 부의 전하 상태로 되기 때문에 혼합 수의 표면 장력이 작아져 혼합수와 OPC 및 포졸란 재료의 충분한 화학적 상호 작용이 발생한 결과 천이대의 밀도가 개선되어 CC보다 탄성계수가 크게 나타난 것으로 판단된다.

Table 6. Presumption results of adiabatic temperature

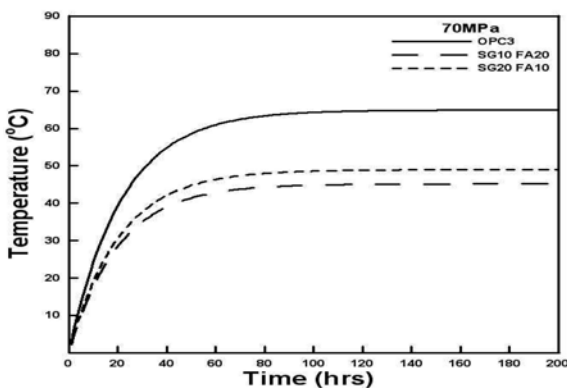
Type		Target strength (MPa)	K_c ($^{\circ}\text{C}$)	α'
C	OPC1	30	27.85	1.20
	OPC2	50	41.28	1.15
	OPC3	70	64.93	1.11
H S C C	LSP30	30	35.12	1.10
	LSP20FA20	30	32.03	1.19
	SG10FA20	50	34.03	1.22
	SG20FA10	50	37.82	1.12
	SG10FA20	70	45.15	1.19
	SG20FA10	70	48.96	1.17



(a) 30MPa



(b) 50MPa



(c) 70MPa

Fig. 11 Curves of presumptive concrete adiabatic temperature

4.5 수화발열량과 단열온도 상관성

CC와 HSCC의 단열온도상승 특성을 검토하기 위하여 미소수화열 및 간이단열온도실험에 의하여 얻은 값을 식 (6)을

이용하여 콘크리트 최대단열온도상승값(K_c) 및 단열온도 상승속도상수(α')를 추정하여 정리한 것이 Table 6이다. 또한, Table 5의 관계식들을 이용하여 강도 수준별 시간에 따른 콘크리트 단열온도 관계를 정리한 것이 Fig. 11이다.

Fig. 11(a)의 결과 목표강도 30 MPa의 경우 OPC1 보다 LSP30 및 LSP20FA20에서 K_c 값은 각각 26.1 및 15.0% 상승 하였으며, α' 값은 OPC1, LSP30 및 LSP20FA20에서 각각 1.20, 1.10 및 1.19로 나타났다. 이러한 결과는 CC보다 HSCC가 분체량이 많기 때문에 분체보다 열전도율이 높은 골재량이 감소되어 페이스트의 수화열에 의한 열전도량의 감소로 K_c 값이 상승한 것으로 판단되며, HSCC의 경우 혼화제의 혼합에 따른 단위시멘트량 감소로 시간에 따른 페이스트의 누적수화열의 증가율이 감소되었기 때문에 α' 값이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 11(b)의 결과 목표강도 50 MPa의 경우 OPC2 보다 SG10FA20 및 SG20FA10에서 K_c 값은 각각 17.6 및 8.4% 감소 되었으며, α' 값은 OPC2, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 1.15, 1.22 및 1.12로 나타났다. 또한, Fig. 11(c)의 결과 목표강도 70 MPa의 경우 OPC3 보다 SG10FA20 및 SG20FA10에서 K_c 값은 각각 30.5 및 24.6% 감소 하였으며, α' 값은 OPC3, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 1.11, 1.19 및 1.17로 나타났다. 이러한 원인은 고강도 수준 (50 및 70 MPa)에서 CC보다 HSCC가 동일한 강도수준에서 혼화제의 혼합에 따른 단위시멘트량이 크게 감소하기 때문에 K_c 및 α' 값이 작게 나타난 것으로 판단된다.

이러한 결과는 Fig. 8의 간이단열온도이력과 같은 경향으로 수화가 진행되는 콘크리트의 사용재료에 대한 열특성값 및 수화열특성이 콘크리트 단열온도 추정식에 잘 반영된 것으로 판단되며, 강도 수준(30, 50 및 70 MPa)에 따른 HSCC는 동일한 분체량을 사용한 CC보다는 최대단열온도 상승값이 감소되지만 보통강도(30 MPa) 수준의 CC보다는 분체량 증가 및 골재량 감소로 최대단열온도 상승값이 증가하는 것을 알 수 있다.

4.6 온도응력 검토

CC와 HSCC의 온도응력을 검토하기 위하여 MIDAS CIVIL 06 프로그램을 이용하여 3차원 온도응력 해석을 실시하였으며, 동일한 환경조건을 위하여 외기온도 20 $^{\circ}\text{C}$, 초기

Table 7. Analysis results of hydration heat and thermal stress

Type		Target strength (MPa)	Maximum temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Maximum thermal stress (MPa)
C	OPC1	30	43.03 (53hr)	1.13
	OPC2	50	53.32 (53hr)	1.94
	OPC3	70	71.51 (53hr)	3.58
H S C C	LSP30	30	48.06 (53hr)	1.45
	LSP20FA20	30	46.25 (53hr)	1.49
	SG10FA20	50	48.00 (51hr)	1.76
	SG20FA10	50	50.52 (55hr)	1.97
	SG10FA20	70	56.63 (51hr)	2.36
	SG20FA10	70	59.58 (51hr)	2.62

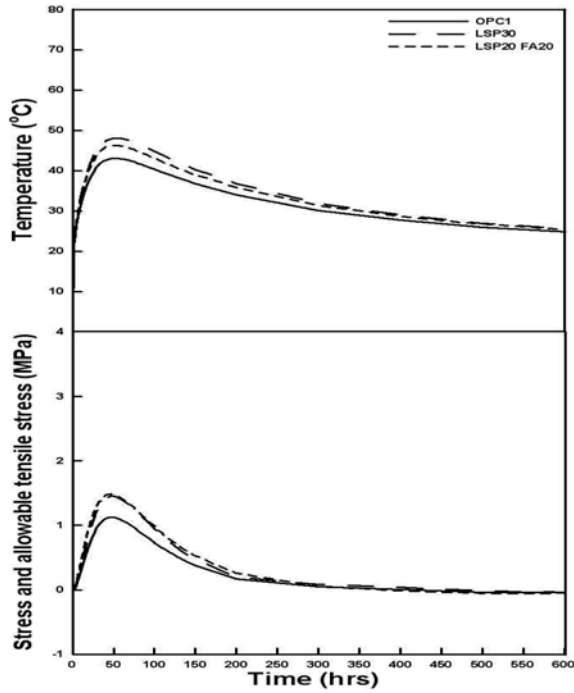


Fig. 12 Temperature history curves and thermal stress history curves according to time (30 MPa)

온도 17°C 및 대류계수는 12로 고정하여 CC 및 HSCC의 압축강도 수준에 따른 열특성 값을 변화하여 수화열 및 온도응력을 해석한 결과를 정리한 것이 Table 7이다. Table 7의 결과 목표강도가 높을수록 최대상승온도 및 최대온도응력은 증가 하였으며, 목표강도 증가에 따른 최대상승온도 및 최대온도응력의 증가율은 CC보다 HSCC가 낮게 나타났다. 이러한 결과는 목표강도가 높을수록 분체량이 많아지기 때문에 수화열에 의한 최대상승온도가 증가하며, CC보다 HSCC가 동일한 강도 수준에 대하여 혼화제의 혼합으로 단위시멘트량이 감소되기 때문에 최대상승온도 및 최대온도응력의 증가율이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

4.6.1 목표강도 30 MPa 해석결과

Fig. 12는 목표강도 30 MPa CC 및 HSCC의 시간에 따른 수평방향 중심부 온도이력 및 수평방향 표면부 온도응력을 나타낸 것이다. Fig. 12의 결과 콘크리트 타설 후 최대상승온도는 OPC1 보다 LSP30 및 LSP20FA20에서 각각 11.7 및 7.5% 상승하였으며, 최대상승온도 도달시간은 OPC1, LSP30 및 LSP20FA20에서 동일한 53시간으로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 7의 간이단열온도실험과 같이 CC보다 HSCC가 분체량이 많아 최대상승온도가 상승한 것으로 판단된다. 또한, 콘크리트 타설 후 최대 온도응력은 OPC1, LSP30 및 LSP20 FA20에서 각각 1.13, 1.45 및 1.49 MPa로 나타났다. 이러한 결과는 목표강도 30 MPa의 경우 CC보다 HSCC가 분체량이 많아지기 때문에 수화열에 의한 최대상승 온도가 증가하며, 구속된 내부의 온도가 상승함에 따라 표면 최대 온도응력이 증가한 것으로 판단된다.

4.6.2 목표강도 50 MPa 해석결과

Fig. 13은 목표강도 50 MPa CC 및 HSCC의 시간에 따른 수평방향 중심부 온도이력 및 수평방향 표면부 온도응력

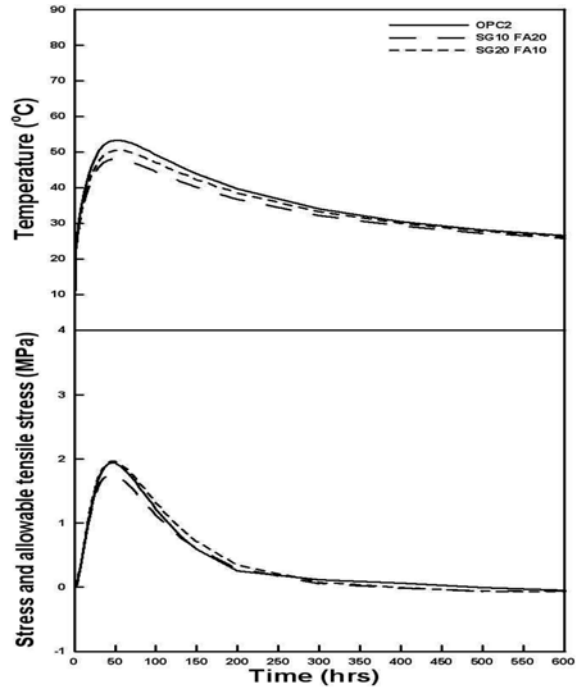


Fig. 13 Temperature history curves and thermal stress history curves according to time (50 MPa)

을 나타낸 것이다. Fig. 13의 결과 콘크리트 타설 후 최대상승온도는 OPC2 보다 SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 10 및 5.3% 감소하였으며, 최대상승온도 도달시간은 OPC2, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 53, 51 및 55 시간으로 나타났다. 이러한 원인은 Fig. 8의 간이단열온도실험과 같이 목표강도 50 MPa의 경우 혼화제의 혼합으로 CC보다 HSCC가 단위시멘트량의 감소로 최대상승온도가 감소한 것으로 판단된다. 또한, 결과 콘크리트 타설 후 최대온도응력은 OPC2, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 1.94, 1.76 및 1.97 MPa로 나타났다. 이러한 원인은 목표강도 50

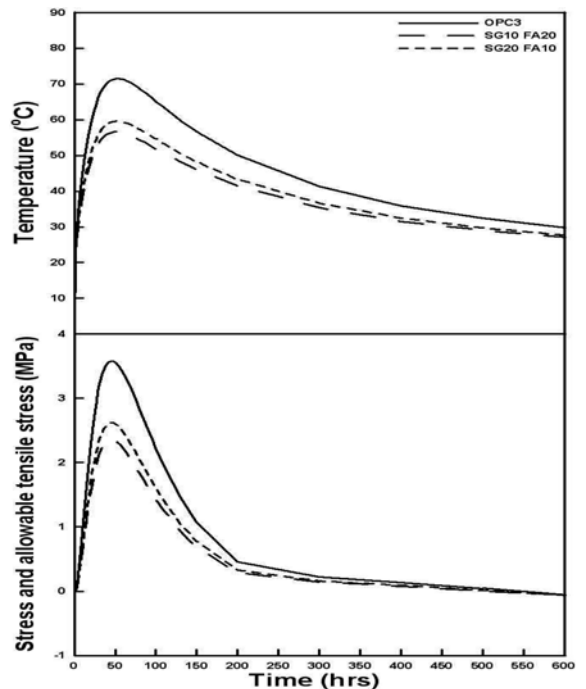


Fig. 14 Temperature history curves and thermal stress history curves according to time (70 MPa)

MPa HSCC는 CC보다 단위시멘트량이 감소하기 때문에 수화열에 의한 최대상승온도가 감소하며, 구속된 내부의 온도가 감소함에 따라 표면 최대온도응력이 감소한 것으로 나타난 것으로 판단된다.

4.6.3 목표강도 70 MPa 해석결과

Fig. 14는 목표강도 70 MPa CC 및 HSCC의 시간에 따른 수평방향 중심부 온도이력 및 수평방향 표면부 온도응력을 나타낸 것이다. Fig. 14의 결과 콘크리트 타설 후 최대상승온도는 OPC3 보다 SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 20.8 및 16.7% 감소하였으며, 최대상승온도 도달시간은 OPC3, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 53, 51 및 51 시간으로 나타났다. 이러한 원인은 Fig. 8의 간이단열온도실험과 같이 목표강도 70 MPa HSCC는 혼화재의 혼합으로 CC보다 단위시멘트량이 감소되어 최대상승온도가 크게 감소한 것으로 판단된다. 또한, 콘크리트 타설 후 최대온도응력은 OPC3, SG10FA20 및 SG20FA10에서 각각 3.58, 2.36 및 2.62 MPa로 나타났다. 이러한 원인은 목표강도 70 MPa HSCC는 CC보다 단위시멘트량이 감소하기 때문에 수화열에 의한 최대 상승 온도가 감소하며, 구속된 내부의 온도가 감소됨에 따라 표면 최대온도응력이 감소한 것으로 판단된다.

4.7 온도균열지수 검토

콘크리트의 온도균열지수는 인장강도와 온도응력의 비이며, 정밀한 해석 방법으로 콘크리트표준시방서에 제시된 식 (8)과 같이 표현된다. 특히, 온도균열지수는 그 값이 클수록 균열이 발생하기 어려우며, 재령에 따라 가장 작은 값을 구하여야 한다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}}{f_t} \quad (8)$$

여기서,

$f_t(t)$: 재령 t 일에서의 수화열에 의해 발생한 부재중의 온도응력 최대치

$f_{sp}(t)$: 재령 t 일에서의 콘크리트 인장강도로서 양생온도를 고려하여 구함

따라서 CC와 HSCC의 온도균열지수를 검토하기 위하여 MIDAS CIVIL 06 프로그램을 이용하여 3차원 온도응력 해석에 의하여 얻은 값을 식 (8)을 이용하여 최소 온도균열지

Table 8. Minimum crack ratio of different types of concrete

Type		Target strength (MPa)	Minimum crack ratio
C C	OPC1	30	1.92
	OPC2	50	1.58
	OPC3	70	1.17
H S C C	LSP30	30	1.63
	LSP20FA20	30	1.66
	SG10FA20	50	1.76
	SG20FA10	50	1.64
	SG10FA20	70	1.61
	SG20FA10	70	1.52

수를 정리한 것이 Table 8이다. Table 8의 결과 강도수준(30, 50 및 70 MPa)이 증가함에 따라 HSCC 및 CC에서 최소온도균열지수는 각각 낮게 나타났으며, 보통강도 수준(30 MPa)의 경우 최소온도균열지수는 HSCC보다 CC가 낮게 나타났다. 특히, 고강도수준(50 및 70 MPa)의 경우 최소온도균열지수는 동일한 목표강도에서 HSCC보다 CC가 높게 나타났다. 이러한 원인은 보통강도 수준의 경우 HSCC는 CC보다 분체량이 증가하기 때문에 수화열에 의한 최대 상승 온도가 증가하며, 구속된 내부의 온도 상승으로 인하여 표면의 온도균열지수가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 고강도 수준의 경우 HSCC는 CC보다 단위시멘트량이 감소하기 때문에 수화열에 의한 최대상승온도가 감소하며, 구속된 내부의 온도가 감소함에 따라 온도응력의 감소로 온도균열지수가 높게 나타난 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 보통강도 수준(30 MPa) HSCC의 경우 CC보다는 온도균열지수의 감소로 균열저감에 불리할 것으로 판단되며, 고강도 수준(50 및 70 MPa) HSCC의 경우 CC보다는 온도균열지수의 증가로 균열저감에 유리할 것으로 판단된다.

5. 결 론

1. 고유동 자기충전 콘크리트의 응결은 일반콘크리트 보다 혼화재의 혼합에 따른 초기수화반응의 감소로 응결이 지연되며, 고성능감수제의 혼합으로 응결이 지연되는 것을 알 수 있었다.
2. 고유동 자기충전 콘크리트는 동일한 분체량을 사용한 일반콘크리트보다는 최대상승온도가 저감되지만 보통강도(30 MPa) 수준 일반콘크리트의 분체량 보다는 분체량이 증가하기 때문에 최대상승온도가 증가하는 것을 알 수 있었다.
3. 본 연구에서는 현장에서 비교적 쉽게 수행할 수 있는 간이단열온도시험과 시멘트 미소수화열 특성을 활용한 콘크리트 단열온도 추정방법을 제시하였다. 이러한 추정결과는 기존 연구 결과와 유사한 결과를 나타내었으며 이 추정방법을 사용함으로 현장구조물의 사전균열제어대책 마련에 유용할 것으로 판단된다.
4. 고강도 수준(50 및 70 MPa)에서는 일반콘크리트보다 고유동 자기충전 콘크리트가 단위시멘트량이 감소하기 때문에 수화열에 의한 최대상승온도가 감소하여 구속된 내부의 온도가 감소함에 따라 표면 최대온도응력이 감소하였으며, 일반콘크리트보다 고유동 자기충전 콘크리트가 분체량이 많아지기 때문에 수화열에 의한 최대상승온도가 증가하여 구속된 내부의 온도가 상승함에 따라 표면 최대온도응력이 증가하는 것을 알 수 있었다.
5. 보통강도 수준(30 MPa) HSCC의 경우 CC보다는 온도균열지수의 감소로 균열저감에 불리할 것으로 판단되며, 고강도 수준(50 및 70 MPa) HSCC의 경우 CC보다는 온도균열지수의 증가로 균열저감에 유리할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설핵심연구개발사업

의 고성능·다가능 콘크리트의 개발 및 활용기술(05 건설핵심 D11-1)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 문대중(1998) 광물질혼화재를 사용한 콘크리트의 단열온도상승 추정에 대한 연구, 박사학위논문, 한양대학교 대학원.
- 최성우, 조현태, 유득현(2006) 결합재 조건에 따른 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 18(6), pp. 769-776.
- 한국전력공사 전력연구원(1998) 콘크리트 구조물에서의 수화열 저감 방안 연구, 최종보고서. pp. 55-79.
- Choi, Y.W., Kim, Y.J., Shin, H.C., and Moon, H.Y. (2006) An experimental research on the fluidity and mechanical proper-

- ties of high-strength lightweight self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 9, pp. 1595-1602.
- Dhir, R.K. (1986) Pulverized-Fuel Ash, Cement Replacement Materials, Surrey University Press., pp. 197-255.
- Hwang, C.L. and Shen, D.H. (1991) The effects of blast-furnace slag and fly ash on the hydration of portland cement, Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp. 1137-1147.
- Taplin, J.H. (1959) A method for following the hydration reaction in portland cement paste, Austral. J. Appl. Sci., pp. 329-345.
- Zhang, Y., Sun, W., and Liu, S. (2002) Study on the hydration heat of binder paste in high-performance concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 9, pp. 1483-1488.

(접수일: 2009.2.27/심사일: 2009.4.11/심사완료일: 2009.7.23)