

탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 수화 특성에 관한 연구

The Experimental Study on Hydration Properties of Quaternary Component Blended High Fluidity Concrete with CO₂ Reduction

최연왕^{1*} · 오성록¹ · 조준희² · 강현진¹

Yun-Wang Choi^{1*} · Sung-Rok Oh¹ · Jun-Hee Jo² · Hyun-Jin Kang¹

(Received September 10, 2017 / Revised December 3, 2017 / Accepted December 8, 2017)

In this paper, to increase the use of industrial byproducts for CO₂ reduction and to improve construction performance, it was manufactured that CO₂ reduction type quaternary component high fluidity concrete (QC-HFC) with Reduced cement usage by more than 80% and its quality and hydration characteristics were evaluated. QC-HFC was found to satisfy the target performance, and the flow and mechanical properties were similar to those of conventional concrete. The drying shrinkage of QC-HFC decreased about twice compared with the conventional blend, and the hydration heat decreased about 36%. As a result, it can be concluded that the amount of cracks can be reduced by reducing temperature stress due to hydration heat reduction effect and reducing deformation due to relatively small temperature difference between inside and outside. Also, As a result of the simulation of the mass structure, the temperature cracking index of QC-HFC is 1.1 or more, and the cracking probability is reduced by about 35%, so that the crack due to temperature can be reduced.

키워드 : 탄소저감, 4성분계, 고유동, 콘크리트, 수화특성

Keywords : CO₂ Reduction, Quaternary component, High fluidity, Concrete, Hydration properties

1. 서론

최근 산업전반에 걸쳐 이산화탄소 배출에 대한 환경문제가 이슈 됨에 따라 온실가스 배출에 관한 문제가 공동으로 해결 해야 할 과제로 부각되고 있는 실정이다. 2001년 5월 프랑스 파리에서 경제협력개발기구(OECD) 환경각료회의에서 공개된 '회원국의 환경상태 지표'에 따르면 국내 이산화탄소 배출량은 1980~1998년 총 144%가 늘어났으며, 같은 기간 1인당 에너지 사용량의 증가는 1위를 차지하는 것으로 나타남에(Kim 2006) 따라 온실가스 배출량 감소를 위하여 2020년까지 배출 전망치 기준 30%를 감축하기로 하였다. 다양한 산업분야에서 온실가스 배출량이 높은 업종은 화석에너지, 제철, 시멘트 및 석유화학인 것으로 조사되고 있으며(Lee 2012), 각각의 산업분야에서 대안을 제시하고 있는 실정이다.

건설 산업에서는 온실가스를 감축하기 위한 대안 중 하나로써 건설 산업에서 가장 많이 사용되는 시멘트를 저감하기 위한 대책을 강구하고 있다. 시멘트는 성형성과 경제성이 우수한 콘크리트의 주요 재료이며, 다량 사용되기 때문에 시멘트의 사용량을 감축할 수 있는 경우 온실가스 배출량을 크게 저감시킬 수 있다. 시멘트 제조 시 발생하는 이산화탄소는 1톤 생산 시 약 0.8톤이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 국내 전체 온실가스 배출량의 약 6.5%에 해당하는 수준이다. 또한 시멘트 생산량은 2010년~2013년간 비슷한 수준으로 생산 되고 있으며, 이러한 추세가 지속될 경우 시멘트 생산에 의한 온실가스 배출량은 지속적으로 증가 될 것으로 추정된다(Han 2017). 따라서 건설 산업에서는 콘크리트의 주요 재료인 시멘트에 대하여 산업부산물을 시멘트 대체재로써 활용하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 산업부산물을 활용한 콘크리트는 사용량이 증가할수록 온실가스 저감효과와 함께 산업부산물의

* Corresponding author E-mail: crete77@semyung.ac.kr

¹세명대학교 토목공학과 (Semyung University, Jecheon, 27136, Korea)

²(주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 (Daewoo E&C, Suwon, 16297, Korea)

Table 1. Chemical compositions and physical properties of powder

Type	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	L.O.I (%)	Specific surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
OPC	21.60	6.00	3.10	61.40	-	-	3.40	2.50	0.03	3,540	3.15
GGBF	33.33	15.34	0.44	42.12	-	-	5.70	2.08	3.00	4,160	2.90
FA	58.20	26.28	7.43	6.51	0.80	-	1.10	0.30	3.20	3,550	2.18
LSP	0.67	0.39	0.51	95.69	0.44	0.05	1.76	0.17	-	4,160	2.50

처리가 가능하다는 장점이 있지만 시멘트 대체에 따른 품질저하를 최소화하는 것이 매우 중요하다.

한편 최근 건설 동향은 국가적 중점사업으로 전 국토의 산업화가 이루어지고 있으며, 도시의 비대화가 급속히 진행되고 있다. 특히 최근 서울시는 지하공간 통합개발 사업으로 강남권 광역복합 환승센터, 도심지하 35m에 축구장의 약 3.5배크기로 세계 최대 대형 지하발전시설이 건설 중에 있다.

10,000m² 이상의 대형 콘크리트 구조물의 누적 현황은 통계청 자료에 따르면 2012년부터 매년 2.6%씩 증가하여 2016년 기준 향후 2020년까지 약 12%(약 6,200) 가량 증가될 것으로 추산되고 있다(Statistical Office 2017). 이와 같은 대형 구조물은 시공 시 짧은 기간에 막대한 양의 콘크리트를 타설하게 되므로 수화 발열은 필연적이며, 내부에 발생된 수화열은 단면이 클수록 외부로 열 전달이 어렵기 때문에 구조물 내부에 의한 구속으로 표면부터 중심부에 이르는 유해한 균열을 유발시킬 수 있다. 이러한 구조물에 적용되는 콘크리트는 매스콘크리트로 정의하고 있다(Lee 2009).

따라서 본 연구에서는 탄소저감을 극대화하기 위한 방안으로 시멘트의 80%를 산업부산물로 대체하고자 하였으며, 최근 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화 및 특수화됨에 따라 복잡한 부재의 형상에 따른 시공 및 품질성능 확보를 위하여 다짐작업 없이 자중만으로 거푸집 구성구석 밀실하게 충전이 가능한 탄소저감형 고유동 콘크리트를 제조하여 실제 대형 구조물 현장의 콘크리트 품질 및 수화특성을 검토하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

본 연구에서 사용된 분체는 보통포틀랜드시멘트(이하, OPC로 약함)와 플라이애시(이하, FA로 약함) 및 고로슬래그미분말(이하, GGBF로 약함)을 사용하였으며, 강도 조절을 위하여 미반응성 광물질인 탄산칼슘(이하, LSP로 약함)을 사용하였다. 사용된 각 분체

Table 2. Physical properties of aggregates

Type	RS	CS	G
Density(g/cm ³)	2.62	2.61	2.62
Absorption(%)	2.11	2.43	0.80
F.M.	2.89	3.01	7.10
G _{max} (mm)	-	-	20

Table 3. Physical properties of chemical admixture

Item	Type	Color	Density (g/cm ³)	Total solids (%)
SP	Liquid	Lemon yellow	1.04±0.01	34

의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2 골재

본 연구에서 사용된 밀도 2.62g/cm³의 강모래(이하, RS로 약함)와 밀도 2.61g/cm³의 부순 모래(이하, CS로 약함)를 50%씩 혼합 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 20mm인 밀도 2.62g/cm³의 화강암질 부순골재(이하, G로 약함)를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

2.1.3 고성능 감수제

본 연구에서 사용된 고성능 감수제는 콘크리트의 유동성확보를 위하여 국내 S사의 폴리칼본산계 고성능 감수제(이하, SP로 약함) 고형분 34% 타입을 선정하였다. SP제의 사용량은 분체 질량에 대하여 0.5~1.5% 수준에서 소요의 유동성능에 만족하는 사용량을 적용하였다. Table 3은 사용된 화학혼화제의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험계획 및 배합

본 연구에서는 사용된 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트 (Quaternary Component blended High Fluidity Concrete, 이하,

Table 4. Mix design

Type	Item	W/P (%)	Unit mass(kg/m ³)							SP (P×%)	
			W	P				RS	CS		G
				OPC	GGBF	FA	LSP				
1	P-HFC(Plain)	30	162	405	54	81	-	441	294	905	1.20
2	QC-HFC	28	160	114	343	57	57	373	373	841	1.25

QC-HFC로 약함)는 분체량을 통하여 점성을 확보하는 매커니즘을 가진 분체계 고유동 콘크리트를 대상으로 하였으며, 각각의 분체를 적용한 콘크리트를 제조하였다. QC-HFC의 배합은 선행연구(Cho 2015)를 통하여 실내시험 결과 중 적합한 배합 1수준을 선정하여 실제 현장에 적용되는 기존 고유동 배합(Plain High Fluidity Concrete, 이하, P-HFC로 약함)과 상대비교를 수행하였다. Table 4는 실제 대형 구조물 현장에 적용된 배합표를 나타낸 것이다. 배합설계는 Nan-Su(Nan et al. 2003)가 제시한 골재 채움율에 따른 PF(Packing Factor)를 수정·보완한 최의 간편 설계 방법(Choi et al. 2013)에 따라 시멘트의 80%를 산업부산물로대체한 QC-HFC를 제조하였다. Fig. 1 및 Fig. 2는 PF 결정방법 및 콘크리트 혼합방법을 나타낸 것이다.

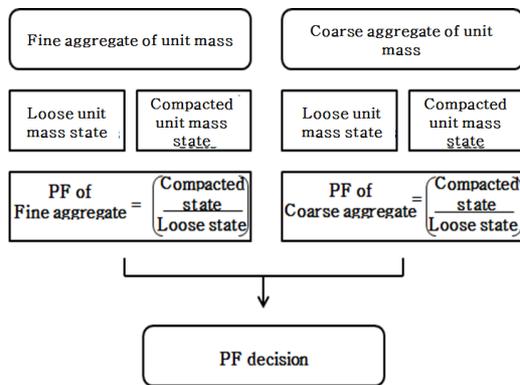


Fig. 1. Decision process of PF according to Choi's simple design method

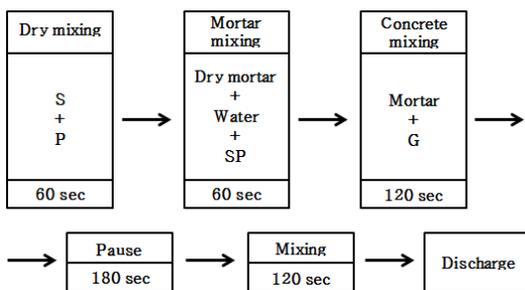


Fig. 2. Concrete mixing method

2.2.2 슬럼프 플로

QC-HFC의 슬럼프 플로는 KS F 2594 “굳지 않는 콘크리트의 슬럼프 플로우 시험방법”에 준하여 슬럼프 플로를 측정하였다.

2.2.3 슬럼프 플로 500mm 도달시간

QC-HFC의 슬럼프 플로 500mm 도달시간은 KCI-CT103 “콘크리트의 슬럼프 플로 시험 방법”에 준하여 동적 재료분리 저항성을 평가하였다.

2.2.4 공기량

QC-HFC의 공기량은 KS F 2421 “굳지 않는 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험방법”에 준하여 공기량을 평가하였다.

2.2.5 압축강도

QC-HFC의 압축강도는 KS F 2403 “콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 제작하였으며, KS F 2405 “콘크리트의 압축강도” 시험방법에 준하여 재령에 따라 만능시험기(U.T.M)를 사용하여 0.6±0.4MPa/s의 속도로 하중을 재하하여 압축강도를 측정하였다.

2.2.6 건조수축

QC-HFC의 건조수축은 콘크리트 슬래브 바닥판 상부 표면에서 약 100mm 아래 위치로 고정하여, 콘크리트 매립게이지(PMFL-60-2LT)를 설치하여 콘크리트 타설 후 약 170일간 측정하였다. 측정 장비로는 TDS-501 데이터 로거를 사용하였으며, 표면 상부 동적하중으로 인한 데이터는 제외하였다.

2.2.7 수화열

QC-HFC의 수화열은 온도응력이 크게 작용될 것으로 예측되는 매트 기초 부 끝단지점에서 표면부 및 중앙부분에 온도측정 게이지를 매립하여 수화열을 측정하였다.

2.2.8 수화열해석

QC-HFC의 수화열 해석은 현장 콘크리트 구조물의 측정된 결과 값과 단열온도 상승시험을 통한 함수를 이용하여 MIDAS 프로그램을 활용한 수화열 해석을 시공단계에 따라 해석하였으며, 일반적인 변수 값은 콘크리트 시방서에서 제시한 값을 사용하여 실제 시간대별 온도 데이터를 반영한 수화특성을 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슬럼프 플로우

Fig. 3은 P-HFC 및 QC-HFC의 슬럼프 플로우 측정결과를 나타낸 것이다. 측정 장소는 타설 현장에서 레미콘 3대의 콘크리트 물량을 받아 측정을 실시하였다. Fig. 3의 결과 P-HFC와 QC-HFC의 슬럼프 플로는 600mm 이상으로 JSCE에서 제안된 고유동 콘크리트 등급 1등급인 것으로 나타났으며, 목표 슬럼프 플로우 600mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

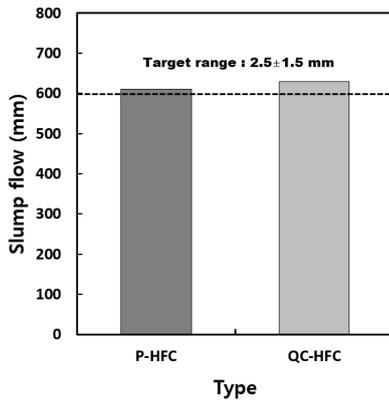


Fig. 3. Test results of slump flow

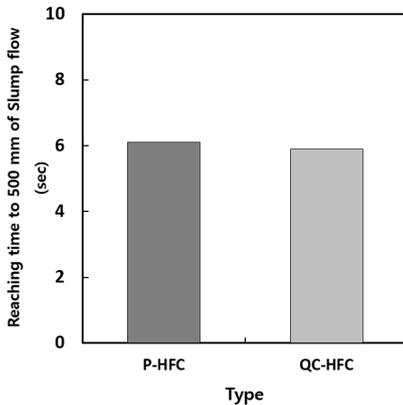


Fig. 4. Test results of reaching time to 500mm

3.2 슬럼프 플로우 500 mm 도달시간

Fig. 4는 P-HFC 및 QC-HFC의 슬럼프 플로우 500mm 도달시간 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과 P-HFC는 6.1sec, QC-HFC는 5.9sec로 나타나 큰 차이 없이 동등수준으로 판단되며, 재료분리는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

3.3 공기량

Fig. 5는 P-HFC 및 QC-HFC의 공기량 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과 P-HFC 및 QC-HFC의 공기량은 3.8% 및 3.2%로 나타나 목표 공기량 범위인 $2.5 \pm 1.5\%$ 이내를 만족하는 것으로 나타났다.

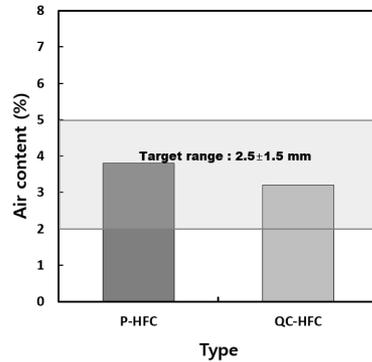


Fig. 5. Test results of air content

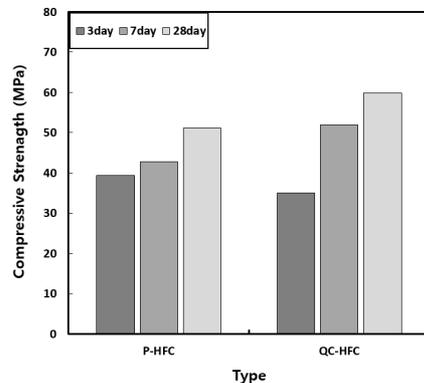


Fig. 6. Test results of compressive strength

는 35MPa로 측정되어 QC-HFC의 재령 3일 압축강도는 P-HFC와 비교하여 약 11.2% 작은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 P-HFC의 배합비의 경우 QC-HFC와 비교하여 OPC의 사용량이 많으며, QC-HFC의 경우 P-HFC와 비교하여 대체 결합재 혼합량이 증가하였기 때문에 초기 재령 강도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 재령 28일 이후에는 QC-HFC의 압축강도가 60MPa를 상회하는 결과가 나타나 P-HFC의 압축강도와 비교하여 15% 증가하는 경향이 나타났다. 또한, P-HFC 및 QC-HFC의 재령 28일 압축강도는 목표 강도 50MPa를 만족하는 것으로 나타났다.

3.5 건조수축

Fig. 7은 P-HFC 및 QC-HFC의 건조수축 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과 P-HFC와 QC-HFC의 수축 변형률은 초기 재령의 경우 수축 변형이 급격히 발생되었으며, 180일 이후 일정한 값에 수렴하는 결과가 나타났다. 또한 QC-HFC의 수축변형률은 P-HFC의 수축변형률과 비교하여 약 40% 감소하는 경향이 나타남에 따라 기존 현장에 적용되는 배합인 P-HFC 보다 QC-HFC의 치수 안정성이 더 양호한 것으로 판단된다.

3.6 수화열

Fig. 8은 P-HFC 및 QC-HFC의 수화열 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 P-HFC 중앙부의 최고 온도는 88.5°C, 표면부의 최고 온도는 69.3°C로 나타났으며, QC-HFC 중앙부의 최고 온도는 56.6°C, 표면부의 최고 온도는 50.4°C로 나타나 QC-HFC의 경우 중앙부 36%, 표면부 27% 수중수화열을 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 또한 P-HFC의 내·외부 온도차는 19.2°C, QC-HFC 내·외부 온도차는 6.2°C로 QC-HFC의 내·외부 온도차는 P-HFC과 비교하여 약 67.7%로 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 결과를 통하여 기존 배합인 P-HFC에 대하여 QC-HFC를 대체 적용할 경우 수화열저감 효과가 있을 것으로 판단되며, 상대적으로 작은

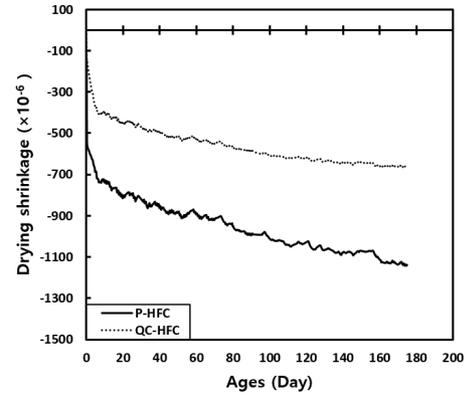


Fig. 7. Measurement results of drying shrinkage

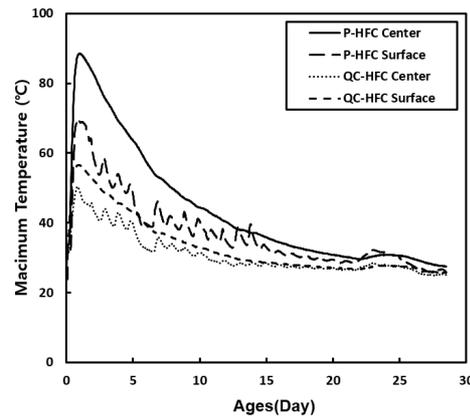


Fig. 8. Measurement results of hydration heat

내·외부 온도차로 인하여 온도응력에 따른 변형의 감소로 균열 발생량이 저감될 것으로 판단된다.

3.7 수화열 해석

QC-HFC의 측정된 결과 값을 이용하여 MIDAS 프로그램을 활용한 매스 구조물 해석을 수행하였다. 평판 콘크리트 기초 구조물의 수화특성을 시공단계에 따라 해석하였으며, 실제 시간대별 온

Table 5. Analysis Model and conditions

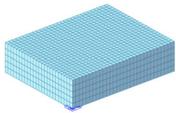
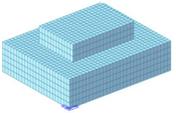
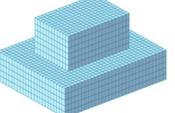
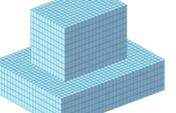
Type	Ground	Mat foundation 1	Mat foundation 2	Mat foundation 3
Structure specifications(m)	24×19.2×4	14.4×9.6×2.4	14.4×9.6×2.4	14.4×9.6×2.4
Cumulative elapsed time(hr)	-	150 hr	900 hr	1,300 hr
Modelling				

Table 6. Specifications and variables

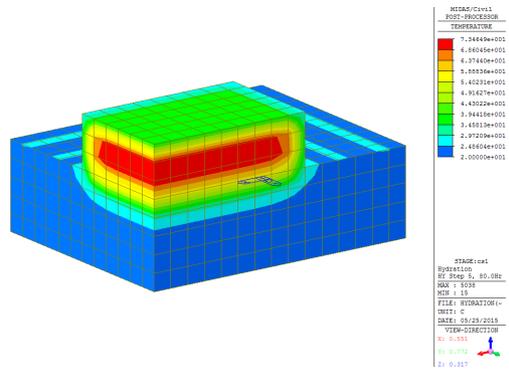
Type		Unit	P-HFC	QC-HFC
Mechanical properties	Compressive strength	MPa	50	
	Coefficient of thermal expansion	/°C	10 × 10 ⁻⁵	
Thermal properties	Specific heat	kcal/(kg·°C)	0.25	
	Thermal conductivity	kcal/(m·hr°C)	2.3	
Convection coefficient		kcal/(m ² ·°C)	Steel formwork: 12.04 Exposure to outside air : 12.04	
Final adiabatic temperature rise		°C	59.5	37.5
Reaction rate(α)		-	1.133	0.630

Table 7. Analysis location and cumulative time

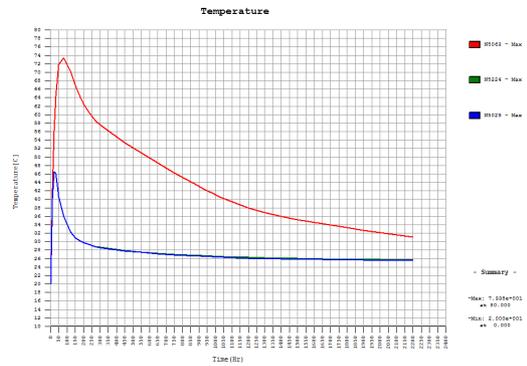
Type	Analysis position	Cumulative analysis time(hr.)
Mat foundation 1	Inner center	10, 20, 30, 50, 80, 120, 150
	X-direction side surface portion	
	Y-direction side surface portion	
Mat foundation 2	Inner center	10, 20, 30, 50, 80, 120, 150, 300, 400, 500, 600, 750
	X-direction side surface portion	
	Y-direction side surface portion	
Mat foundation 3	Inner center	10, 20, 30, 50, 80, 120, 150, 300, 400, 500, 600, 750, 900, 1000, 1100, 1200, 1300
	X-direction side surface portion	
	Y-direction side surface portion	

도 데이터를 적용하여 매스 구조물의 수화열해석을 수행하였다. 해석모델 및 조건은 Table 5에 나타내었으며, Table 6은 수화열 해석에 사용된 제원 및 변수 값을 나타낸 것이다. 또한, Table 7은 해석부위 및 누적시간을 나타낸 것이다. 각 시공단계에 따른 P-HFC 및 QC-HFC의 최대 온도 도달시단면내 온도분포, 최대 인장응력 및 온도균열지수를 나타낸 것이 Fig. 9~14이며, 종합 해석 및 결과 및 해석 절점을 나타낸 것이 Table 8 및 Fig. 15이다.

Fig. 9~14의 결과 기초 1단의 P-HFC 및 QC-HFC의 최대 온도는 73.4 및 48.3°C, 기초 2단 77.2 및 52.1°C, 기초 3단 74.8 및 50.3°C로 나타났다.



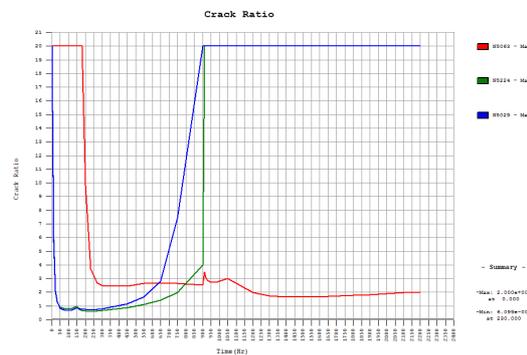
(a) Temperature distribution



(b) Hydration temperature according to time(Hr)



(c) Temperature stress according to time(Hr)



(d) Crack ratio according to time(Hr)

Fig. 9. P-HFC(Mat foundation 1)

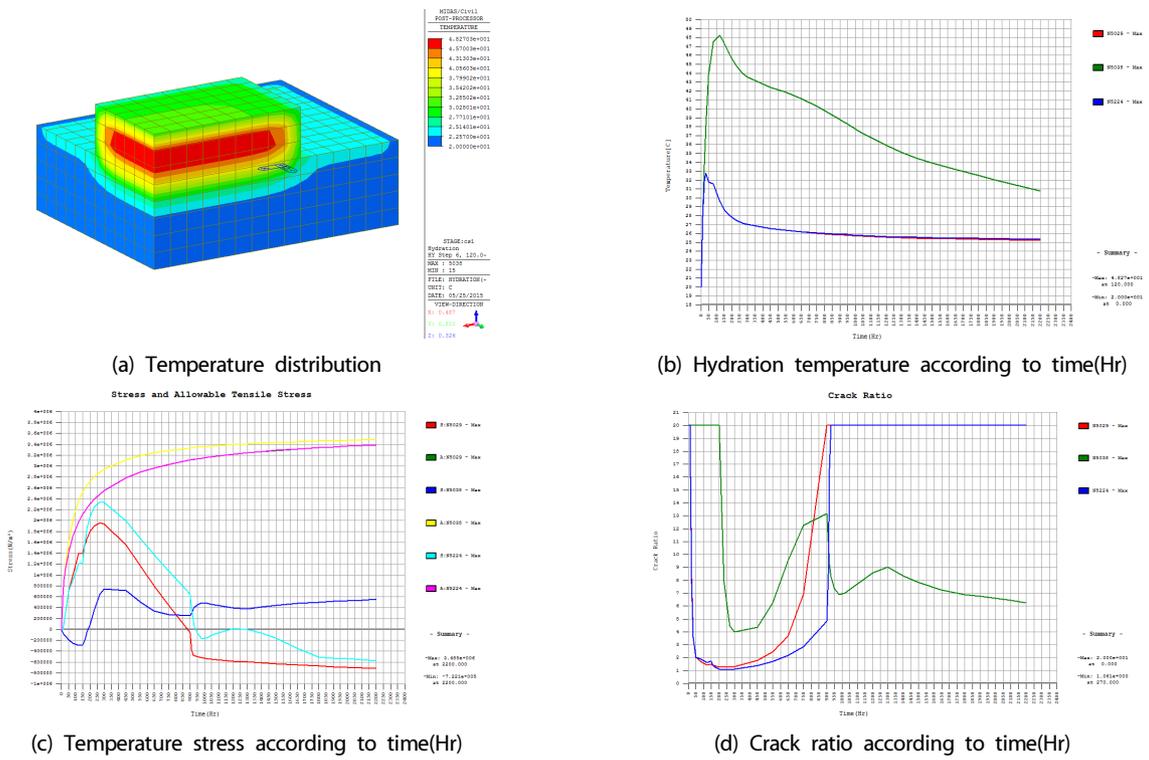


Fig. 10. QC-HFC(Mat foundation 1)

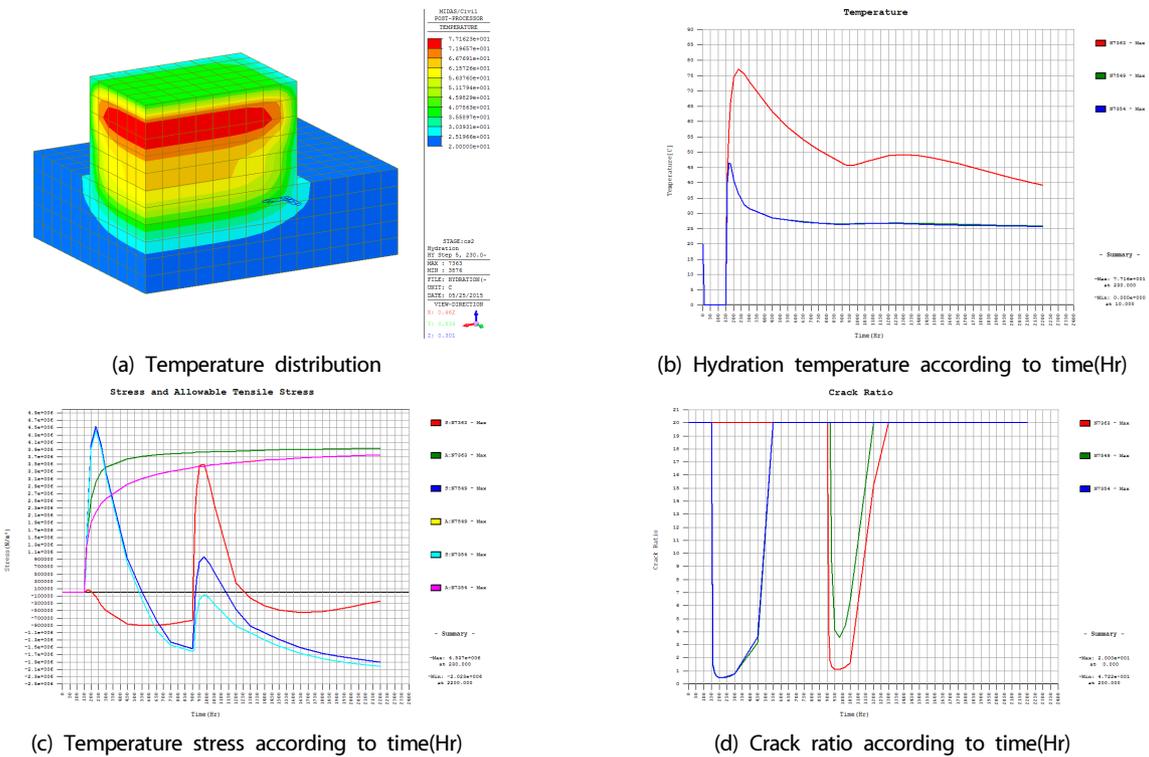
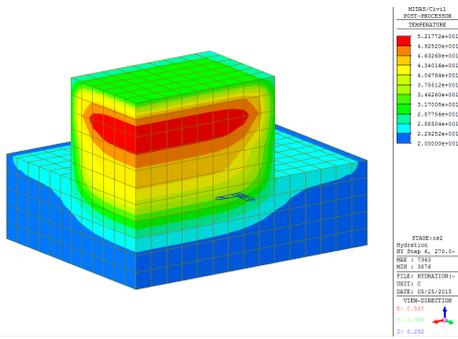
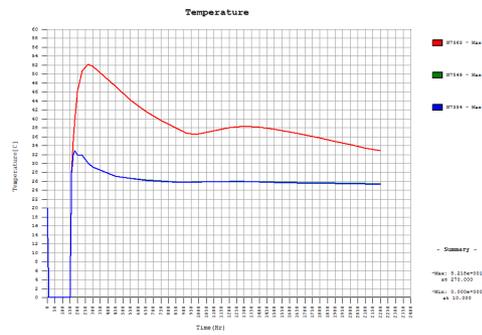


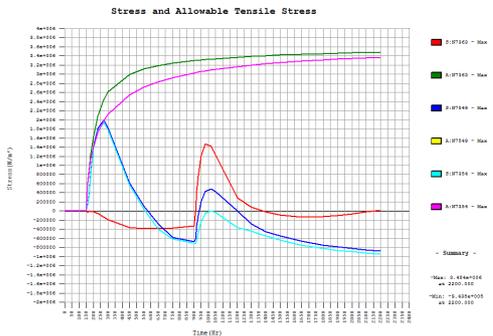
Fig. 11. P-HFC(Mat foundation 2)



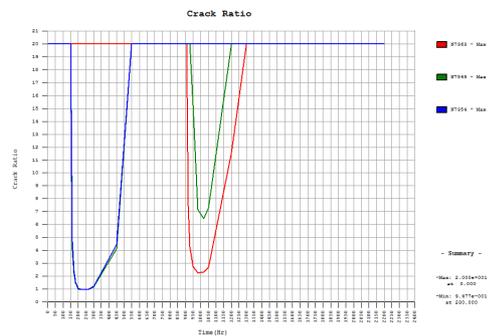
(a) Temperature distribution



(b) Hydration temperature according to time(Hr)

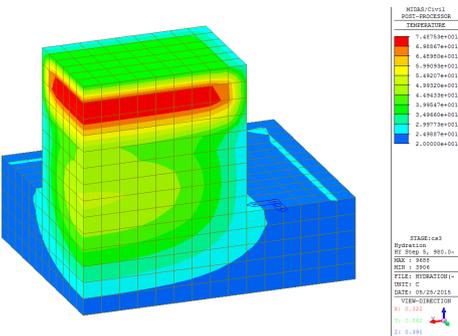


(c) Temperature stress according to time(Hr)

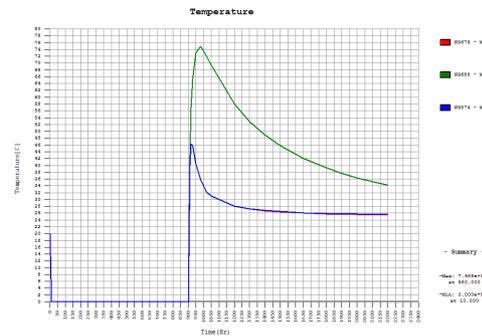


(d) Crack ratio according to time(Hr)

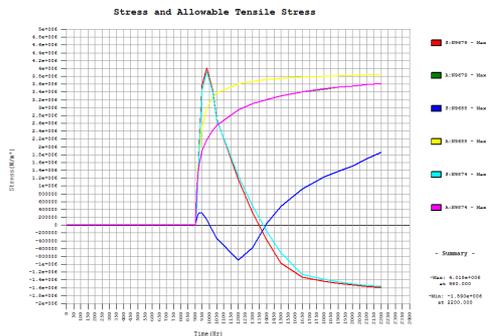
Fig. 12. QC-HFC(Mat foundation 2)



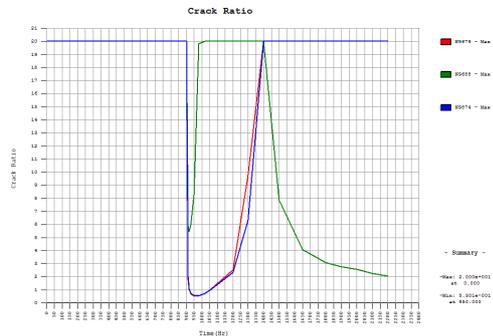
(a) Temperature distribution



(b) Hydration temperature according to time(Hr)



(c) Temperature stress according to time(Hr)



(d) Crack ratio according to time(Hr)

Fig. 13. P-HFC(Mat foundation 3)

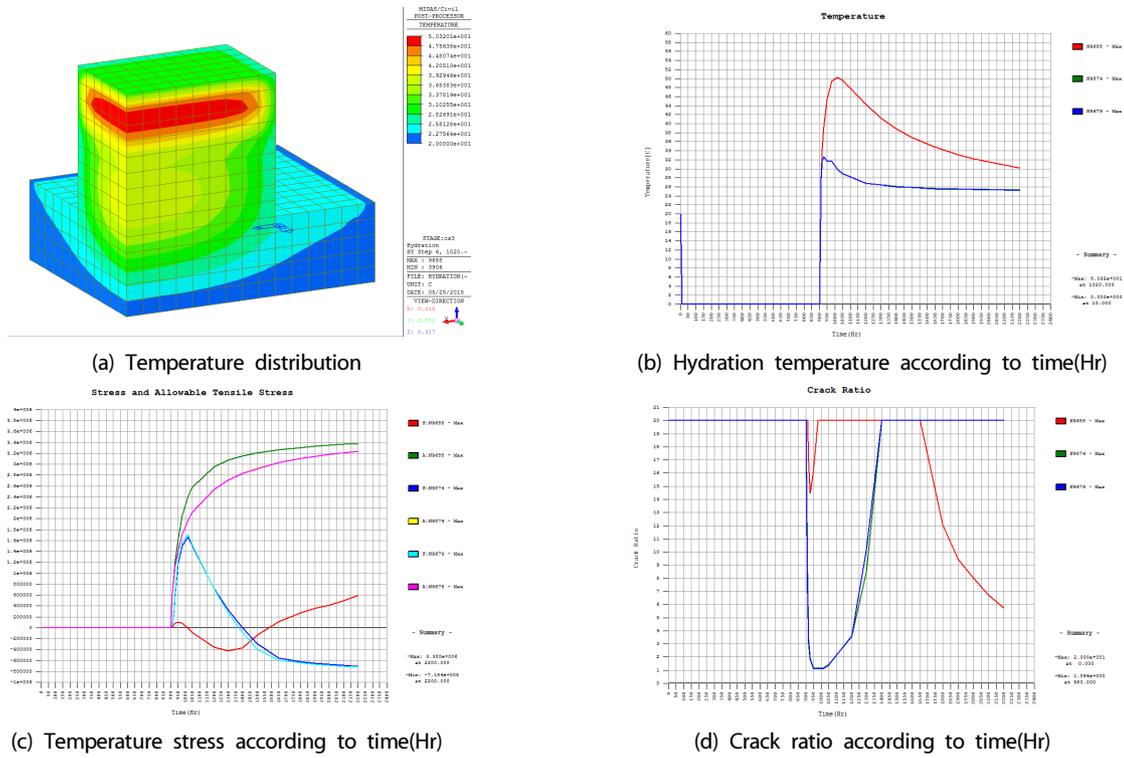


Fig. 14. QC-HFC(Mat foundation 3)

Table 8. Results of comprehensive analysis

Type(Maximum temperature reaching time)	Analysis node	Maximum temperature in the center(°C)		Maximum tensile stress(MPa)		Temperature crack index(I_{cr})	
		P-HFC	QC-HFC	P-HFC	QC-HFC	P-HFC	QC-HFC
Mat foundation 1 (150hr)	5038	73.4	48.3	-	-	-	-
	5224	-	-	4.60	2.35	0.7	1.1
	5029	-	-	3.85	1.96	0.6	1.1
Mat foundation 2 (300hr)	7363	77.2	52.1	-	-	-	-
	7549	-	-	4.54	1.98	0.5	2.3
	7354	-	-	4.42	1.98	0.5	1.0
Mat foundation 3 (1050hr)	9688	74.8	50.3	-	-	-	-
	9874	-	-	4.01	1.71	0.5	1.1
	9679	-	-	3.92	1.67	0.5	1.1

따라서 QC-HFC의 최대 온도는 P-HFC의 최대 온도와 비교하여 약 32% 감소되는 결과가 나타났다. 또한 온도균열지수 산정을 위한 최대 온도 도달 시점의 P-HFC 및 QC-HFC의 최대 인장응력은 X방향 측면 표면부에서 기초 1단의 경우 4.60MPa 및 2.36MPa, 기초 2단의 경우 4.54MPa 및 1.98MPa, 기초 3단의 경우 4.01MPa 및 1.71MPa로 나타났으며, 이에 따른 P-HFC 및 QC-HFC의 온도 균열지수는 기초 1단 : 0.7 및 1.2, 기초 2단 : 경우 0.5 및 2.3,

기초 3단 : 경우 0.5 및 1.2로 나타났다.

또한 P-HFC 및 QC-HFC의 Y방향 최대 인장응력은 기초 1단 : 3.85MPa 및 1.96MPa, 기초 2단 : 4.42MPa 및 1.98MPa, 기초 3단 : 3.92MPa 및 1.67MPa로 나타났으며, 이에 따른 온도균열지수는 기초 1단 : 0.6 및 1.2, 기초 2단 : 0.5 및 1.0, 기초 3단 : 0.5 및 1.2로 나타났다. 따라서 QC-HFC의 최대 인장응력은 P-HFC와 비교하여 최소 49%~최대 57% 감소하는 경향이 나타났으며, 온도균

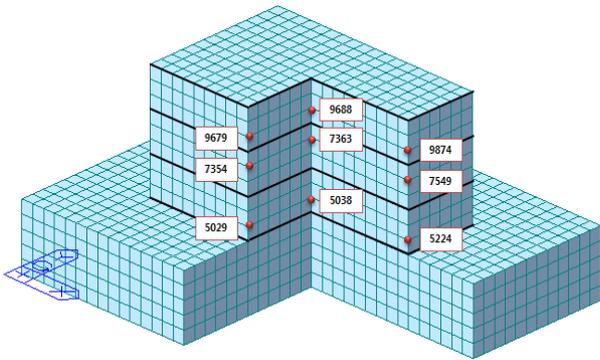


Fig. 15. Analytical positions and nodes

열지수의 경우 최소 70%~최대 230% 증가되는 경향이 나타났다. 이러한 결과를 통하여 P-HFC의 기초 1단, 기초 2단 및 기초 3단의 온도균열지수가 0.7 미만이므로 유해한 균열이 발생한 것으로 평가할 수 있으며, QC-HFC의 기초 1단, 기초 2단 및 기초 3단의 온도균열지수의 경우 0.7 이상 1.2 미만의 범위로 나타남에 따라 균열 발생은 허용하지만 유해한 균열 발생을 제한할 경우 만족하는 것으로 나타났다. P-HFC 및 QC-HFC의 X방향 균열 발생확률은 기초 1단 : 90% 및 35%, 기초 2단 : 95% 및 0%, 기초 3단 : 95% 및 35%로 나타났으며, Y방향 균열 발생확률은 기초 1단 : 90% 및 35%, 기초2단 : 95% 및 50%, 기초 3단 : 95% 및 35%로 나타났다. 따라서 본 구조제원 및 조건으로 국한된 경우 P-HFC는 사용이 불가한 것으로 판단되며, QC-HFC의 경우 각 시공단계에서 온도균열지수 “0.7 이상 1.2 미만”으로 나타남에 따라 일반적인 토목 구조물의 범위를 만족하는 것으로 판단된다. 유해하진 않지만 균열 발생을 억제하기 위해서는 수화열 저감을 위하여 설계 크기, 타설 높이 조절 및 시공단계 조절 등의 대책이 필요할 것으로 판단된다. 또한 해석결과에 따르면 온도 응력 따른 온도응력이 3일 내 허용 인장력 이내로 들어오므로 타설 3일 후 거푸집 탈형이 가능한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 탄소저감을 극대화하고 대형 구조물에 적용 가능한 콘크리트를 제조하기 위하여 시멘트의 80%를 산업부산물로 대체한 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트를 제조하였으며, 현장 품질 및 조건들을 반영하여 수화 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 품질은 다량의 산업부산물을 사용하여 목표 성능을 만족하는 결과를 얻을 수 있었으

며, 유동 및 역학적특성의 경우 기존에 적용되는 콘크리트와 유사한 수준인 것으로 나타났다.

2. 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 건조수축은 기존 배합과 비교하여 약 2배 이상, 수화열의 경우 약 36% 감소하는 것으로 결과가 나타남에 따라 대체 적용할 경우 수화열저감 효과에 따른 온도응력 감소, 상대적으로 작은 내외부 온도차로 인한 변형 감소로 균열 발생량을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.
3. 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 매스 구조물의 시뮬레이션을 실시한 결과 온도균열지수 1.1 이상으로 균열발생 확률이 약 35% 감소하는 결과가 나타남에 따라 온도에 의한 균열을 저감시킬 수 있을 것으로 판단되며, 동등한 조건일 경우 기존의 콘크리트와 상대적으로 유리한 성능뿐만 아니라 다량의 산업부산물 사용에 따른 탄소저감 및 재료가가 저감으로 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2016학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Cho, J.H., Kim, Y.J., Oh, S.R., Choi, Y.W. (2015). The experimental study on mixing and quality properties of quaternary component blended high fluidity concrete with CO₂ reduction, *Journal of Construction Engineering and Management*, **3(3)**, 268–276 [in Korean].

Choi, S.W., Cho, H.T., Yoo, D.H. (2006). “The Experimental study on the heat hydration properties of concrete according to binder conditions,” *Proceeding of Korea Concrete Institute, Special Articles*, **18(6)**, 769–776 [in Korean].

Han, H.S. (2017). A Study on the Properties of CO₂-Reducing Multicomponent Concrete Containing Calcium Carbonate, *Master’s Thesis, Hanyang University* [in Korean].

Kim, K.H. (2006). Study Environmental Design of Concrete structures Considering Reduced CO₂ emission, *Master’s Thesis, Yonsei University* [in Korean].

Lee, B.K. (2012). Study on the Establishments to Strengthen Competitiveness in Korea Cement industry, *Master’s Thesis, Yonsei University* [in Korean].

Lee, J.N. (2009). Study on the Hydration Heat Properties of High Flowing Self Compaction Concrete, Master's Thesis, Yonsei University [in Korean].
Nan, S, Miao, B. (2003). A new method for the mix design of

medium strength flowing concrete with low cement content, Cement and Concrete Composite, **25(2)**, 215-222 [in Korea].
Statistical Office. (2017) <http://kostat.go.kr/portal/korea/index.action> [in Korean].

탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 수화 특성에 관한 연구

본 논문에서는 탄소저감을 위한 산업부산물 사용 증대 및 시공성능 향상을 위하여 시멘트 사용량을 80% 이상 감소시킨 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트(QC-HFC)를 제조하여 품질특성 및 수화특성 평가를 수행하였다. QC-HFC의 품질은 목표 성능을 만족하는 결과를 얻을 수 있었으며, 유동 및 역학특성의 경우 기존에 적용되는 콘크리트와 유사한 수준인 것으로 나타났다. QC-HFC의 건조수축은 기존 배합과 비교하여 약 2배 이상, 수화열의 경우 약 36% 감소하는 것으로 결과가 나타났으며, 그 결과 수화열 저감 효과에 따른 온도응력 감소, 상대적으로 작은 내외부 온도차로 인한 변형 감소로 균열 발생량을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 매스 구조물의 시뮬레이션을 실시한 결과 온도균열지수 1.1 이상으로 균열발생 확률이 약 35% 감소하는 결과가 나타남에 따라 온도에 의한 균열을 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.