

탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 배합 및 품질 특성에 관한 실험적연구

The Experimental Study on Mixing and Quality Properties of Quaternary Component Blended High Fluidity Concrete with CO₂ Reduction

조준희¹ · 김용직¹ · 오성록² · 최연왕^{2*}

Jun-Hee Jo¹ · Yong-Jic Kim¹ · Sung-Rok Oh² · Yun-Wang Choi^{2*}

(Received September 20, 2015 / Revised September 24, 2015 / Accepted September 25, 2015)

In this study, CO₂ reduction type quaternary component high fluidity concrete was produced with more than 80% reduction in cement quantity to increase the use of industrial byproducts and enhance construction performance, thereby reducing CO₂ emissions. Furthermore, the quality properties, and CO₂ reduction performance of this concrete were evaluated. As a result of the quality evaluation of quaternary component blended high fluidity concrete with CO₂ reduction, the target performance could be achieved with a 80% or more reduction of cement quantity by mixing a large amount of industrial byproducts. The required performance level was obtained even though the flow, dynamic, and durability characteristics decreased a little compared to conventional mix. In addition, to analyze the CO₂ reduction performance of quaternary component blended high fluidity concrete with CO₂ reduction, the life cycle assessment (LCA) of the concrete was performed and the results showed that compared to the conventional mix, the carbon emissions decreased by 62.2% and the manufacturing cost by 24.5%.

키워드 : 탄소저감, 4성분계, 고유동, 콘크리트, 품질 특성

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

1. 서론

최근 산업전반에 걸쳐 CO₂ 배출에 대한 환경문제가 이슈화됨에 따라 온실가스 배출에 관한 문제가 산업 전반에 걸쳐 공동으로 해결해야 할 과제로 부각되고 있는 실정이다. 특히 시멘트를 주원료로 사용하는 콘크리트 산업의 경우 경제 개발계획에 따라 산업화 및 도시화가 가속 추진되었으나 이에 따른 지구 온난화, 생태계 파괴, 자원고갈 및 폐기물 처리 등의 다양한 문제가 발생되고 있다.

또한, 시멘트 산업의 경우 연간 약 5,200만톤의 CO₂가 배출되는 것으로 추정됨(2007)에 따라 시멘트를 주재료로 사용하는 콘크리트 산업의 경우에도 온실가스를 감축하기 위한 방안이 요구되고 있는 실정이다(KCI 2010). 시멘트 제조시 발생하는 CO₂는 시멘트 1톤 생산시 약 0.8톤의 CO₂가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 우

리나라 전체 CO₂ 배출량의 약 6.5%에 해당한다. 콘크리트 제조 및 타설까지의 CO₂ 발생량을 고려할 경우에는 그 비율이 약 10% 수준에 해당된다. 시멘트를 제조할 때 배출되는 CO₂는 일반적으로 석회석의 탈탄산 과정, 화석연료 연소, 분쇄 시 소모되는 전력 및 발전기 가동을 위한 기름 연소 등에 기인하고 있으며, 석회석의 탈탄산 과정에서 발생하는 CO₂의 경우 시멘트 제조시 발생하는 CO₂배출량의 약 59%를 차지한다. 또한, 석회석의 소성과정에서 화석연료 연소로 인한 CO₂ 배출량의 경우에도 약 31%를 차지하고 있기 때문에 시멘트 산업이 막대한 에너지원을 필요로 함을 의미한다(Noh et al. 2005).

이에 따라 시멘트 산업에서는 온실가스를 감축하기 위하여 신규 설비의 보완 및 개발, 혼합재 및 혼화재의 함량 증대 등의 노력을 기울이고 있지만 전자의 경우 신기술 개발 및 설비의 개발·설

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

¹(주) 대우건설 기술연구원 토목연구팀 (Daewoo E&C, Suwon, 16297, Korea)

²세명대학교 토목공학과 (Semyung University, Jecheon, 27136, Korea)

치에 따른 초기 투자비용 증대라는 부가적인 부담을 감수해야 하는 어려움이 있다(KCI 2010).

반면, 후자의 경우에는 시멘트 혼합재의 함량 비율을 증대하거나 혼화재를 다량 활용하기 때문에 시멘트 사용량을 원천적으로 감소할 수 있기 때문에 직접적으로 온실가스 발생량을 저감시키는 결과를 얻을 수 있다. 그러나 혼합 시멘트의 경우 특히, 보통포틀랜드시멘트의 KS 표준(KS L 5201)에서 혼합재 함량 비율을 5% 이하로 규정하고 있기 때문에 혼합재 함량 증대에 따른 CO₂ 감축을 제한하고 있는 실정이다.

또한, 혼화재를 적용한 2성분계 이상의 다성분계 콘크리트의 경우에는 여러 각도에서 수많은 연구가 수행되었지만 관련 KS 규정이 제정되어 있지 않아 현장에 적용하는 데 어려움이 따른다는 문제가 있다. 이러한 이유는 다량의 혼합재나 또는 여러 가지 혼화재를 적용함에 따른 성능저하 및 균일한 품질 확보가 어려우며, 품질제어를 위한 소요 기술이 요구되기 때문이다.

그러나, CO₂ 감축을 위한 현 시점에서 신규 설비의 개발 및 보완 보다는 재료적인 측면에서 더 빠르게 대응하고 보다 경제성을 확보할 수 있는 방안의 하나로서 시멘트 사용량을 감축하는 것이 효과적이며 효율적일 것으로 판단된다(Ministry of Environment 2014).

최근 콘크리트 재료분야의 주요 연구 및 기술 개발 사례를 살펴보면 혼화재를 시멘트 대체재로서 활용한 다양한 콘크리트에 대하여 연구 및 활용되고 있지만 특수한 경우를 제외하고 콘크리트 배합에서의 혼화재 사용량이 최대 50% 수준인 것으로 나타나고 있으며, 일반적인 경우 20~30% 수준에서 검토한 사례가 주를 이루고 있다. 더불어 2성분계 이상의 콘크리트 배합의 품질개선을 위한 다양한 연구가 시도되고 있으며, 최근에는 소요성능을 만족하는 콘크리트 배합도 제시되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 탄소저감을 위한 일환의 연구로서 탄소저감 성능을 극대화하기 위한 방안으로써 시멘트 사용량을 80% 수준까지 감소하여 기수행된 연구사례와 비교하여 혼화재 사용량을 대폭 증대시킨 콘크리트 배합의 품질 및 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 콘크리트 배합의 경우에는 최근 다짐작업 없이 자동만으로 거푸집 구성구석까지 밀실하게 충전이 가능한 특징을 가지

고 있는 고유동 콘크리트를 대상으로 하였다(Choi et al. 2008). 사용된 혼화재는 기존 고유동 콘크리트 분야에서 주로 활용되는 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 함께 적용하였으며, 실제로 고유동 콘크리트의 강도 조절 용도로 사용되는 미반응성 결합재로서 탄산칼슘을 모두 포함한 4성분계 고유동 콘크리트의 배합 및 품질 특성을 평가하고자 하였다. 또한, 탄소저감에서 최선의 CO₂ 저감 대책은 현 세 대의 소비요구를 충족시키는 동시에 미래의 발전을 추구하기 위해서는 CO₂ 배출 원단위의 최소화 이기 때문에(KCI 2010) 본 연구에서 제조한 콘크리트 배합의 탄소저감 성능수준을 추가적으로 검토하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

본 연구에서 사용된 분체는 보통포틀랜드시멘트(이하, OPC로 약칭)와 플라이애시(이하, FA로 약칭) 및 고로슬래그 미분말(이하, GGBF로 약칭)을 사용하였으며, 강도 조절 용도로 미반응성 광물질 혼화재인 탄산칼슘(이하, CC로 약칭)을 사용하였다. 사용된 각 분체의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같으며, 각 분체의 SEM (Scanning Electron Microscope) 촬영 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1.2 골재

본 연구에서 사용된 잔골재는 밀도 2,59g/cm³의 낙동강산 강모래(이하, S로 약칭)를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 20mm 인 밀도 2,67g/cm³의 화강암질 부순골재(이하, G로 약칭)를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

2.1.3 고성능 감수제

본 연구에서 사용된 고성능 감수제는 콘크리트의 유동성 확보

Table 1. Chemical compositions and physical properties of powder used in the experiment

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
CC	0.67	0.39	0.51	95.69	0.44	0.05	1.76	0.17	-	4,160	2.50

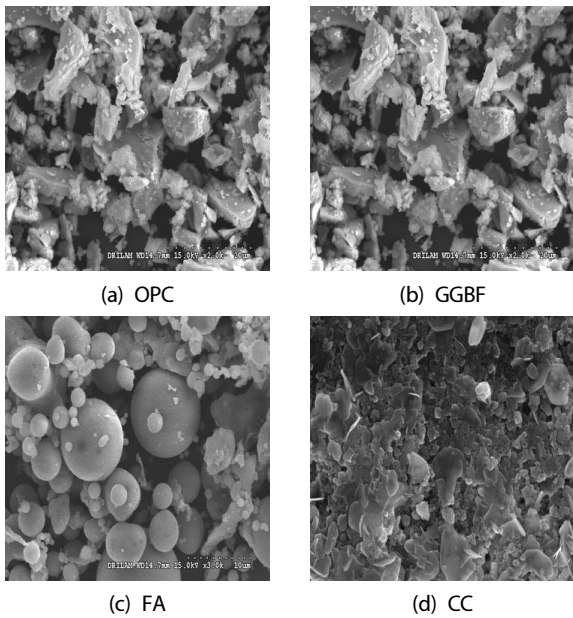


Fig. 1. SEM photograph of the powder

Table 2. Physical properties of aggregates used in the experiment

Type	S	G
Density (g/cm ³)	2.59	2.67
Absorption (%)	1.56	0.80
F.M.	2.70	7.10
Unit weight (kg/m ³)	1.67	1.61
Solid volume (%)	65.27	62.67
Gmax (mm)	-	20

Table 3. Physical properties of chemical admixture used in the experiment

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

를 위하여 국내 S사의 폴리칼본산계 고성능 감수제(이하, SP로 약칭) 고품분 34% 타입을 선정하였다. SP제의 사용량은 분체 질량에 대하여 0.5~1.5% 수준에서 소요의 유동성능에 만족하는 사용량을 적용하였다. Table 3은 사용된 화학 혼화제의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험계획 및 배합

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

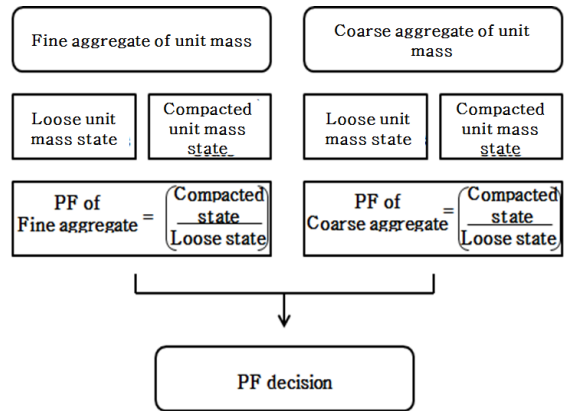


Fig. 2. Decision process of PF according to Choi's simple design method

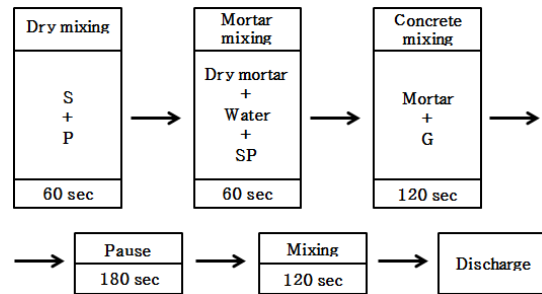


Fig. 3. Concrete mixing method

Table 4. Experimental parameters(mixing ratio of used powder)

Type	Mix (Mixing name)	Powder (mass.%)			
		C	GGBF	FA	CC
1	OPC (Plain)	100	0	0	0
2	GGBF60 FA10 CC 10 (G60F10C10)	20	60	10	10
3	GGBF50 FA10 CC 20 (G50F10C20)	20	50	10	20
4	GGBF40 FA10 CC 30 (G40F10C30)	20	40	10	30
5	GGBF50 FA20 CC 10 (G50F20C10)	20	50	20	10
6	GGBF40 FA20 CC 20 (G40F20C20)	20	40	20	20
7	GGBF30 FA20 CC 30 (G30F20C30)	20	30	20	30
8	GGBF40 FA30 CC 10 (G40F30C10)	20	40	30	10
9	GGBF30 FA30 CC 20 (G30F30C20)	20	30	30	20
10	GGBF20 FA30 CC 30 (G20F30C30)	20	20	30	30

Table 5. Concrete mix

No.	W/P (%)	Unit mass (kg/m ³)						
		W	P				S	G
			OPC	GGBF	FA	CC		
1	32	155	484	0	0	0	820	860
2		155	97	291	48	48	796	835
3		155	97	242	48	97	793	832
4		155	97	194	48	145	789	828
5		155	97	242	97	48	789	828
6		155	97	194	97	97	786	824
7		155	97	145	97	145	782	821
8		155	97	194	415	48	782	820
9		155	97	145	145	97	779	817
10		155	97	97	145	145	775	813

약칭)의 배합의 경우 분체량을 통하여 점성을 확보하는 매커니즘을 가진 분체계 고유동 콘크리트를 대상으로 하였으며, QC-HFC의 품질 특성을 평가하기 위하여 OPC만을 사용한 Plain 배합과 OPC 사용량을 80% 감소시키고 각각의 분체를 적용한 4성분계 콘크리트를 제조하였다.

각 배합의 혼합률은 기수행된 연구사례를 통하여 소요 성능을 만족할 수 있을 것으로 판단되는 혼합률 범위를 선정하여 총 10수준의 콘크리트를 제조하였다.

QC-HFC 배합설계는 Nan-Su(Nan et al, 2003)가 제시한 골재 채움률에 따른 PF(Packing Factor)를 수정·보완한 최의 간편설계 방법(Choi et al, 2013)에 따라 QC-HFC를 제조하였다.

Fig. 2 및 Fig. 3은 최의 간편설계 방법에 따른 PF 결정 방법 및 콘크리트 혼합방법을 나타낸 것이며, Table 4 및 Table 5는 실험변수 및 콘크리트 실험 배합표를 나타낸 것이다.

2.2.2 슬럼프 플로 및 공기량

QC-HFC의 슬럼프 플로는 KS F 2594 “굳지 않는 콘크리트의 슬럼프 플로우 시험방법”에 준하여 슬럼프 플로를 측정하였으며, 공기량 시험의 경우 KS F 2421 “굳지 않는 콘크리트의 압력 법에 의한 공기함유량 시험방법”에 준하여 공기량을 평가하였다.

2.2.3 충전성

굳지 않는 상태의 QC-HFC의 충전성을 평가하기 위하여 U-box 충전성 장치의 중앙부에 격리판을 설치하고 한쪽에 시료를 채운 후 격리판을 들어 올려 콘크리트가 철근 사이를 통과하여 반대편으로 충전된 상승 높이를 측정하였다(Japan Society of Civil Engineers 2013).

2.2.4 압축강도

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

2.2.5 탄소저감 및 경제성

QC-HFC의 탄소저감 성능은 건설부문의 전과정평가(Life Cycle Assessment: LCA)를 수행하여 분석을 실시하였으며, 제조단계의 경제성 평가를 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슬럼프 플로

Fig. 4는 각 콘크리트 배합의 슬럼프 플로 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과 Plain 및 QC-HFC 배합은 모두 목표 슬럼프 플로인 600mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

또한, QC-HFC 배합에서 사용 분체의 혼합률에 따른 영향을 고려하여 볼 때 FA 혼합률 10%가 혼합된 G60F10C10, G50F10C20 및 G40F10C30 배합의 경우 GGBF 및 CC 혼합률 변화에 따른 슬럼프 플로는 CC의 혼합률이 증가할수록 슬럼프 플로가 감소하는 경향이 나타났으며, FA 20% 및 FA 30%의 경우에도 동일한 경향이 나타났다. 이러한 원인은 GGBF의 혼합률이 감소하고 CC의 혼합률이 증가함에 따라 슬럼프 플로가 감소하는 경향이 있기 때문에 GGBF가 CC와 비교하여 슬럼프 플로 향상에 유리한 것으로

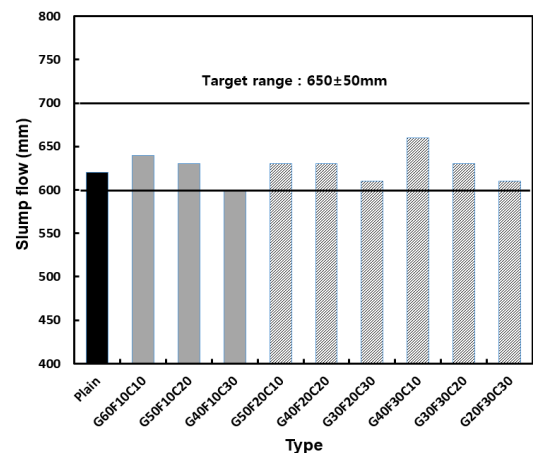


Fig. 4. Slump flow of QC-HFC

판단되며, 레올로지 측면에서 검토할 경우 CC가 GGBF보다 항복 응력을 증가시키는 경향이 있는 것으로 나타나고 있기 때문에(Jo 2015) 항복응력과 직접적인 관계가 있는 슬럼프 플로의 경우에도 이러한 원인에 기인한 것으로 판단된다.

3.2 공기량

일반적으로 콘크리트 매트릭스 내 공기량이 3% 미만일 경우 동결융해저항성이 크게 감소되며, 또한 공기량이 5% 이상일 경우 동결융해저항성의 효과가 크지 않다고 보고 있다. 또한 과도한 공기량은 콘크리트의 역학적 특성 또는 콘크리트 내구성 저하 등 오히려 역효과가 발생하게 된다. 따라서 일반적인 경우 보통강도가 요구되는 구조물의 공기량은 역학적 특성에 영향을 적게 미치는 선에서 동결융해에 따른 내구성 확보를 위하여 $4.5 \pm 1.5\%$ 의 범위를 최적범위로 설정하고 이 범위를 만족하여야 한다고 제시하고 있다(KCI 2009). 그러나 분체계 고유동 콘크리트는 일반적으로 다량의 분체 사용에 따라 40 MPa 이상의 고강도 영역에 해당하므로 목표 공기량 범위를 1% 낮춘 $3.5 \pm 1.5\%$ 로 설정하였다. 고강도 영역은 내부 구조가 치밀해져 침투수의 저항성이 커지므로 동결융해에 따른 저항성도 증가하게 되기 때문에 일반적인 고강도 영역의 공기량 범위를 목표 공기량으로 하였다.

Fig. 5는 Plain 및 QC-HFC의 공기량 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과 Plain 및 QC-HFC는 모두 목표 공기량 범위인 $3.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 결과가 나타났지만 QC-HFC 배합에서 혼합된 분체에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 AE를 사용한 경우 FA의 혼합률 증가에 따라 공기량이 다소 감소하는 경향이 나타났으나 이러한 원인은 일반적인 국내의 FA 특성상

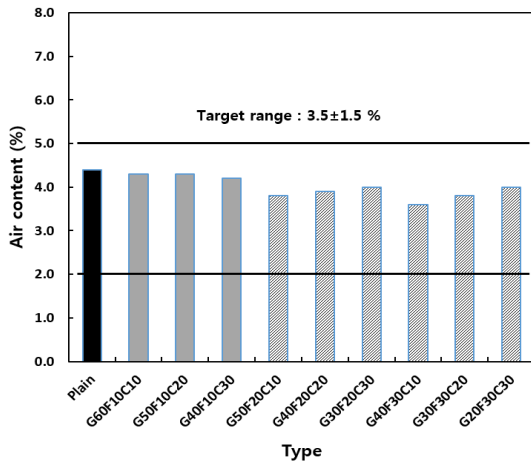


Fig. 5. Air content of QC-HFC

미연소 탄소분을 포함하고 있기 때문에 공기량 흡착에 의한 결과로 판단된다(Choi et al. 2013).

3.3 재료분리 저항성

재료분리 저항성은 굳지 않은 QC-HFC에서 구성 재료 사이의 질량차 등에 의하여 발생하는 상대 이동에 저항하는 성질로서, 물과 고체의 분리, 페이스트와 골재의 분리 및 모르타르와 굵은 골재의 분리 성상으로 흔히 나타난다. 따라서, QC-HFC의 재료분리 저항성 평가는 JSCE에서 제시된 “고유동 콘크리트의 자기충전성 평가 기준”에 제시된 슬럼프 플로 500mm 도달시간과 V-Lot 유하 시간을 통하여 평가하였다.

Fig. 6은 Plain 및 QC-HFC의 슬럼프 플로 500mm 도달시간을 나타낸 것이며, Fig. 7은 재료분리 저항성능의 목표 범위인 V-Lot

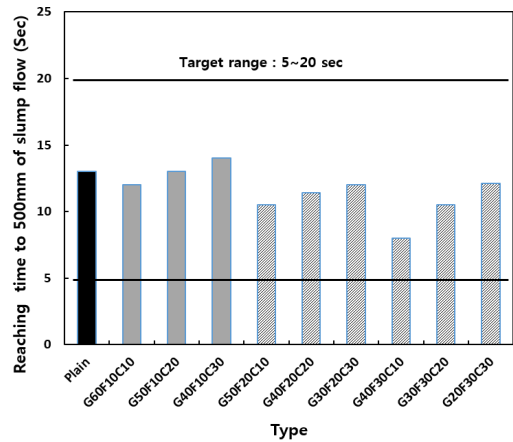


Fig. 6. Reaching time to 500 mm of slump flow of QC-HFC

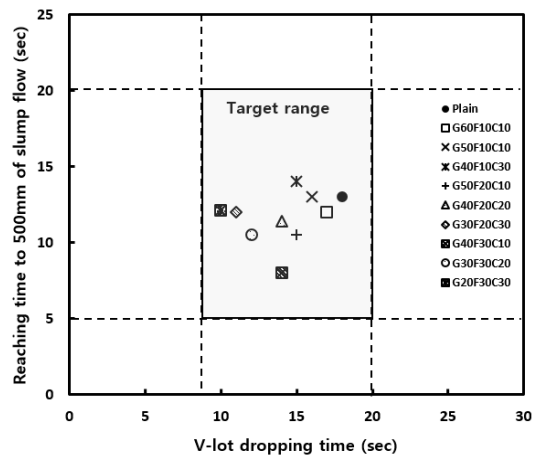


Fig. 7. Relationship between reaching time to 500 mm of slump flow and V-lot dropping time

유하시간과 슬럼프 플로 500mm 도달시간과의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 6의 결과 Plain 및 QC-HFC은 모두 목표 슬럼프 플로 500mm 도달시간인 5~20sec 범위에 만족하는 것으로 나타났다. QC-HFC의 슬럼프 플로 500mm 도달시간은 FA 혼합률 증가에 따라 감소하는 경향이 나타났으며, CC의 혼합률이 증가할수록 슬럼프 플로 500mm 도달시간이 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 원인은 레올로지 측면에서 검토할 경우 CC가 GGBF보다 소성점도를 약 2배 증가시키는 경향이 있는 것으로 나타나고 있으며(Jo 2015), FA의 경우 사용량이 증가할수록 소성점도가 커지는 경향이 있기 때문에(Choi et al, 2014) 콘크리트 점성의 평가지표인 슬럼프 플로 500mm 도달시간의 경우 이러한 원인에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Plain 및 QC-HFC의 재료분리 저항성능 평가결과를 나타낸 것으로 슬럼프 플로 500mm 도달시간과 V-Lot 유하시간의 관계 및 목표 범위를 나타낸 것이다.

Fig. 7의 결과 Plain 및 QC-HFC 배합은 목표 타겟 범위를 모두 만족하는 것으로 나타남에 따라 충분한 재료분리 저항성을 가진 것으로 판단된다.

3.4 충전성

고유동 콘크리트는 콘크리트의 자중에 의하여 거푸집 구석까지 밀실하게 채워야 하는 특성을 갖춰야 하므로 QC-HFC의 충전성을 평가할 필요가 있다. QC-HFC의 충전성 평가는 JSCE에서 제시된 “고유동 콘크리트의 자기충전성 평가 기준”에 제시된 U-Box 시험을 통하여 평가하였다.

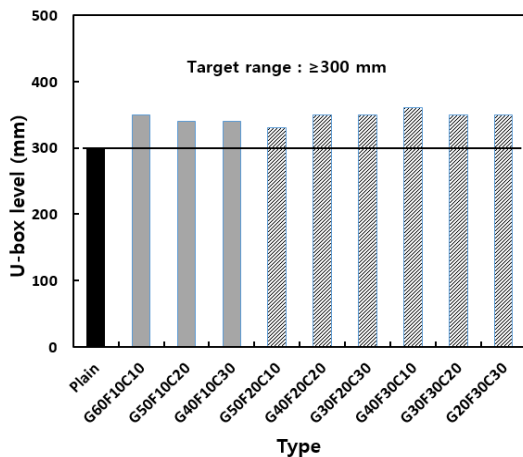


Fig. 8. U-Box passing level of QC-HFC

Fig. 8은 Plain 및 QC-HFC의 충전성 평가를 위한 U-Box 통과 높이를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 Plain 및 QC-HFC은 목표 타겟 범위인 300mm 이상으로 모두 만족하는 것으로 나타났으며, Plain과 비교하여 충전성이 평균 17%, 최대 20% 향상되는 결과가 나타남에 따라 OPC를 감소하고 혼합 분체를 다양 활용할 경우 Plain과 비교하여 충전성을 향상될 것으로 판단된다.

3.5 압축강도

Fig. 9는 Plain 및 QC-HFC의 재령일에 따른 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 Plain 배합의 경우 재령 28일 강도가 58MPa로 나타났으며, QC-HFC의 경우 사용 분체에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 특히, CC의 경우 반응성 결합재가 아닌 충전재로서의 역할만 하기 때문에 CC의 혼합률 증가에 따라 재령에 따른 압축강도는 감소하는 경향이 나타난 것으로 판단되며, GGBF와 FA의 일반적인 연구사례를 참고할 경우 FA를 혼합한 배합이 GGBF와 비교하여 압축강도가 감소하는 경향이 나타남에 따라 GGBF의 혼합률이 감소하고 FA의 혼합률이 증가할수록 재령에 따른 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 원인은 GGBF의 경우 FA와 달리 파쇄되어 발생되기 때문에 알칼리화된 물과 접촉 및 반응이 촉진되므로 GGBF의 활성도가 더 큰 원인에 기인한 것으로 판단된다(Choi et al, 2013).

또한, FA의 경우 포졸란 반응을 하는 구조재료 중 하나이기는 하지만 입자 자체가 유리질 표면으로 피복되어 있어 피복이 파괴되는데 시간과 조건이 소요되므로 GGBF와 비교하여 상대적으로 활성화 속도가 늦어져 강도가 감소하는 것으로 판단된다. 강도발현을 측면에서 검토할 경우에는 재령 91일 이후 GGBF 및 FA의

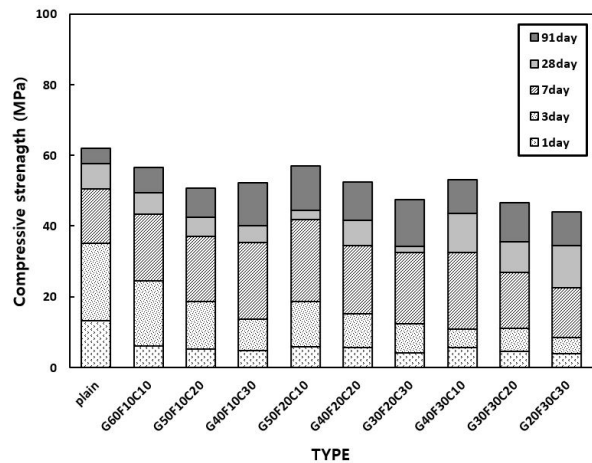


Fig. 9. Compressive strength of QC-HFC

포졸란 반응 등에 따라 장기강도 발현율이 큰 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한 CC가 30% 혼합된 QC-HFC의 장기강도는 Plain의 재령 91일 강도와 비교하여 모두 70% 수준으로 CC의 혼합률이 증가한 만큼 GGBF 및 FA의 반응성 결합재의 감소에 따른 결과로 판단된다.

3.6 탄소저감 및 경제성

Fig. 10 및 Table 6은 Plain 및 QC-HFC의 탄소저감 성능 분석을 위한 건설부문 콘크리트의 전 과정 평가를 수행한 결과를 나타낸 것이다. Table 6 및 Fig. 10의 결과 Plain의 CO₂ 배출량은 자재단계 466.4kg-CO₂/m³, 운송단계 1.48kg-CO₂/m³, 제조단계 2.14 kg-CO₂/m³의 CO₂가 배출되는 것으로 나타났다. CO₂ 배출량을 단계별 분석 결과 전체 CO₂ 배출량에서 중 자재단계의 배출량이 전

체대비 약 98.7%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 운송단계 0.32%, 제조단계 0.01% 순으로 나타났다.

QC-HFC의 CO₂ 배출량 분석결과 Plain과 비교하여 62.2%로 CO₂ 배출량이 감소하는 경향으로 나타나 탄소저감 효과가 큰 것으로 판단된다. 따라서 QC-HFC는 시멘트 사용량이 기준 100%에서 20% 수준으로 감소하게 되기 때문에 CO₂ 배출량이 크게 감소된 것으로 판단된다.

또한 OPC를 제외한 GGBF, FA 및 CC 에 따른 CO₂ 배출량은 미비한 수준인 것으로 나타났으며, 이러한 원인은 콘크리트 생산 과정에서 발생하는 CO₂ 원단위의 비율이 OPC가 매우 높은 부분을 차지하기 때문에 GGBF, FA 및 CC 등 차체 혼합물 변화에 따른 CO₂ 배출량에 대한 저감은 영향이 미비한 것으로 판단된다.

Fig. 11 및 Table 7은 QC-HFC의 경제성 분석 결과를 나타낸 것으로 전 과정에서 재료에 국한하여 제조원가의 경제성을 분석하

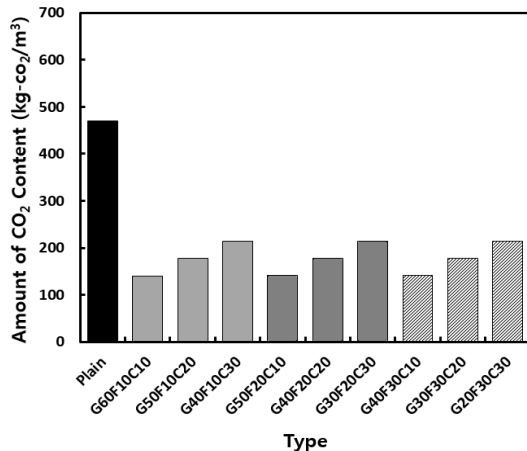


Fig. 10. Amount of CO₂ content of QC-HFC

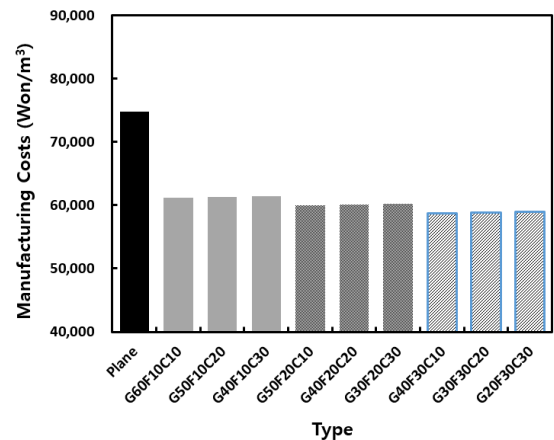


Fig. 11. Manufacturing costs of QC-HFC

Table 6. Analysis results on the amount of CO₂ content

Type	CO ₂ Emissions in accordance with step (kg-CO ₂ /m ³)				
	Materials	Transport	Manufacture	Total	
1	Plain	466.4	1.48	2.14	470.03
2	G60F10C10	138.1	0.97	1.51	140.52
3	G50F10C20	175.1	0.96	1.57	177.59
4	G40F10C30	211.3	0.95	1.65	213.90
5	G50F20C10	138.5	0.95	1.43	140.85
6	G40F20C20	175.4	1.04	1.44	177.96
7	G30F20C30	211.7	1.03	1.44	214.20
8	G40F30C10	138.8	0.84	1.43	141.14
9	G30F30C20	175.8	1.23	1.44	178.56
10	G20F30C30	212.1	1.10	1.44	214.68

Table 7. Analysis results on manufacturing cost of QC-HFC

Type	CO ₂ Emissions in accordance with step (kg-CO ₂ /m ³)						
	OPC	GG	FA	CC	S	G	SP
Cost (won)	76.0	45.0	25.0	50.0	18.0	18.0	1,000
1	36,784	-	-	-	14,760	15,480	7,744
2	7,372	13,095	1,200	2,400	14,328	15,030	5,808
3	7,372	10,890	1,200	4,850	14,274	14,976	5,808
4	7,372	8,730	1,200	7,250	14,202	14,904	6,776
5	7,372	10,890	2,425	2,400	14,202	14,904	6,776
6	7,372	8,730	2,425	4,850	14,148	14,832	7,275
7	7,372	6,525	2,425	7,250	14,076	14,778	7,744
8	7,372	8,730	3,625	2,400	14,076	14,760	7,260
9	7,372	6,525	3,625	4,785	14,022	14,706	7,260
10	7,372	4,365	3,625	7,250	13,950	14,634	7,260

였다. Fig. 11 및 Table 7의 결과 QC-HFC은 Plain 배합과 비교하여 OPC를 80% 저감되었기 때문에 제조원가에서 1m³ 당 약 15,000원 이 감소되어 약 21%의 제조단가 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 탄소저감을 위한 일환의 연구로서 산업부산물의 사용량 증대 및 시공성능 향상을 위하여 시멘트 사용량을 80% 이상 감소시킨 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트를 제조하여 배합 및 품질특성을 평가하였으며, 탄소저감 성능을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시멘트 사용량 80%을 다량의 산업 부산물을 활용하여 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트를 제조한 결과 소요의 목표 성능을 만족하는 품질을 얻을 수 있었으며, 고유동 콘크리트의 주요 성능인 충전성 및 재료분리 저항성의 경우 시멘트만 사용한 배합과 비교하여 동등 수준 이상의 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 다량의 산업 부산물을 활용한 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 압축강도의 경우 사용된 각 분체의 특성에 따라 비례적인 감소가 나타났으며, 미반응성 분체의 활용으로 소비자가 요구하는 소요의 강도를 만족할 수 있는 배합제조 및 품질관리가 가능한 것으로 판단된다.
3. 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트는 시멘트 사용량을 80% 감소하였기 때문에 시멘트만 사용한 배합과 비교하여 탄소저감 성능이 큰 것으로 나타났으며, 이에따른 친환경 및 경제성이 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(11기술혁신 F04-탄소저감형연구단)수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Bak, J.H., Tea, S.H., Noh, S.J., Lee, J.H., Sin, S.W. (2011). "A Study on the Requisite Elements of LCCO₂ Evaluation System at Planning Stage of Building", Journal of Construction Engineering and Management, **12(3)**, 31-41.

Choi, Y.W., Choi, W., Kim, B.K., Jung, J.G. (2008). "Flowability

and Strength Properties of High Flowing Self-Compacting Concrete Using for Tunnel Lining", Journal of Korea Concrete Institute, **2(3)**, 145-152 [in Korean].

Choi, Y.W., Oh, S.R., Kim, J.H., Kim, K.H. (2013). "A Study on the Quality Properties of Exposed High Fluidity Concrete Using Fly Ash and Limestone Powder", Journal of Korean Recycled Construction Resource Institute, **1(1)**, 67-75 [in Korean].

Choi, Y.W., Oh, S.R., Park, M.S., Choi, B.K. (2014). "The Experimental Study on the Fluidity Properties of Mortar Using Basalt Fiber and High Volume Fly Ash", Journal of Korean Recycled Construction Resource Institute, **2(4)**, 345-353 [in Korean].

Choi, Y.W., Oh, S.R., Park, M.S., Choi, B.K., Kim, J.H. (2013). "The Compressive Strength Properties of High Fluidity Concrete with High Volume Fly Ash", Proceeding of Korean Recycled Construction Resource Institute, **13(2)** [in Korean].

Choi, Y.W., Park, M.S. (2013). "The Application Technology of Concrete Utilizing High Volume Fly Ash", Proceeding of Korea Concrete Institute, Special Articles, **8(2)**, 13-16 [in Korean].

Jo, J.H. (2015). "A Study on the Quality Properties of Multi Component Blended High Fluidity Concrete with CO₂ Reduction", Master's Thesis of Semyung University [in Korean].

KCI(Korea Concrete Institute), (2009). "Concrete Structure Design Criteria".

KCI(Korea Concrete Institute), (2010). "Concrete and the Environment", Gimundang, 32-41.

Ministry of Environment (2014). "Roadmap for the Country's Greenhouse Gas Reduction Goals", Relevant Ministries Joint Session Report.

Nan, S. Miao, B. (2003). "A New Method for the Mix Design of Medium Strength Flowing Concrete with Low Cement Content", Journal of Cement and Concrete Composites, **25(2)**, 215-222.

Noh, D.H. (2005). "Industrial Sector to Reduce Greenhouse Gas Emissions and Energy Potential Estimates, the Cement Industry", Journal of Energy Economic Research Conference, Research Reports, **2005(12)**.

Japan Society of Civil Engineers, (2013). "Concrete Standard Specification(Standard Test Methods for Self-Compacting Concrete)", JSCE.

Japan Society of Civil Engineers, "High-flow Concrete Construction Guidelines", JSCE, 40-45.

탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 배합 및 품질 특성에 관한 실험적연구

본 논문에서는 탄소저감을 위한 산업부산물 사용 증대 및 시공성능 향상을 위하여 시멘트 사용량을 80% 이상 감소시킨 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트를 제조하여 품질특성, 및 탄소저감 성능을 수행하였다. 탄소저감형 4성분계 고유동 콘크리트의 품질특성 평가를 수행한 결과 다량의 산업부산물을 혼합하여 시멘트 사용량을 80% 이상 감소시킨 배합에서 목표 성능을 만족하는 품질을 얻을 수 있었으며, 유동특성, 역학특성 및 내구특성의 경우 기존 기준 배합과 비교하여 다소 성능이 감소되는 경향이 나타났지만 소요 성능 수준 이상의 성능을 만족할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 탄소저감형 다성분계 고유동 콘크리트의 탄소저감 성능을 분석하기 위하여 콘크리트의 전 과정 평가를(LCA) 실시한 결과 기존 기준 배합과 비교하여 약 62.2%의 탄소저감 성능이 있는 것으로 나타났으며, 제조비용의 경우 약 24.5%의 원가 절감이 되는 것으로 나타났다.