

탄소중립을 위한 산업부산물 활용 4성분계 고유동 콘크리트의 품질특성

The Quality Properties of Quaternary Component Blended High Fluidity Concrete Using Industrial By-products for Carbon Neutrality

김용직^{1*}Yong-Jic Kim^{1*}

(Received November 15, 2022 / Revised November 23, 2022 / Accepted November 24, 2022)

In this paper, as part of a study for carbon neutrality, the quality properties of quaternary component high-fluidity concrete, which significantly replaced up to 80 % of the cement usage by using three industrial by-products, were evaluated. As a result of the evaluation, even if a large amount of industrial by-products were replaced by more than 80 % of the amount of cement used, it was possible to obtain quality that satisfies the target performance in all concrete mix. In the case of flow properties, mechanical properties, and durability, compared to the existing standard concrete mix, the performance tends to decrease, but it is judged that the performance above the required performance level can be satisfied. When considered comprehensively, the quaternary component High-Fluidity Concrete with a large mixing amount of fine powder of blast furnace slag showed relatively good performance.

키워드 : 4성분계, 고유동 콘크리트, 산업부산물, 탄소중립

Keywords : Quaternary component, High fluidity concrete, Industrial by-products, Carbon neutrality

1. 서론

파리협정 이후 세계 각국은 탄소중립목표 달성을 위한 장기비전 및 전략을 수립중이며, 국내에서도 '2050 탄소중립 선언'을 시작으로 '2030 NDC 상향안' 및 '2050 탄소중립 시나리오 최종안'을 발표하며 본격적으로 탄소중립 사회로의 전환을 준비하고 있다. 관련 산업 분야에서는 이를 해결하기 위해 다양한 노력을 하고 있다. 시멘트를 주재료로 사용하는 콘크리트 산업분야에서는 시멘트 생산시 연간 약 5,200만톤의 탄소가 배출되는 것으로 추정되고 있어 탄소 배출량 감소를 위하여 시멘트 사용량을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행 되고 있다(KCI 2010).

시멘트 산업에서의 탄소 배출량은 시멘트 1톤 기준 약 800 kg으로 시멘트량의 80 % 수준의 탄소가 발생되며, 국내 총 탄소 배출량의 약 6.5 %에 해당한다. 또한 콘크리트 제조 및 타설까지의 포함할 경우 약 10 % 수준으로 증가된다. 시멘트 제조공정에서 있어서 탄소 배출량은 석회석의 탈탄산화, 킬른 가열을 위한 화석

연료의 연소, 소성 클링커의 분쇄 시 사용 전력 및 발전기 가동 등이 있으며, 탄소 배출량은 석회석의 탈탄산화 과정에서 약 60 %, 화석연료 연소시 약 30 % 수준이 발생한다(Noh 2005). 이에 따라 시멘트 산업의 탄소 배출량 저감 대책은 신규 설비 개발 및 개선, 시멘트 대체를 위한 혼화재 활용 및 혼화재 사용량 증대 등의 노력을 기울이는 실정이지만 설비의 경우 신기술 및 개발비용 증가에 따라 어려움이 있는 실정이다(KCI 2010). 따라서 현실적인 대책은 시멘트 대체제인 혼화재를 사용하거나 사용량을 증대할 경우 시멘트 사용량을 원천적으로 감소할 수 있어 시멘트 사용량 저감에 따른 탄소 배출량을 직접적으로 감소시키는데 기여할 수 있다.

시멘트 대체제인 혼화재는 주로 산업부산물을 활용한 연구가 많이 수행되었으며, 단독 대체하거나, 2성분계 이상을 대체하는 연구가 다양한 각도에서 수행되어 왔다. 그러나 산업부산물을 시멘트 대체재로 활용할 경우에는 품질확보가 어려워 콘크리트 성능 저하의 원인이 되고 있어 품질제어를 위한 소요 기술이 요구되어

* Corresponding author E-mail: yongjic.kim@daejin.ac.kr

¹대진대학교 스마트건설·환경공학부 교수 (Department of Environment and Energy Engineering, Daejin University, Kyonggi-do, 11159, Korea)

관련 KS 규정 부재로 현장 적용이 어렵다는 문제가 있다. 그러나 탄소중립이 요구되는 현 시점에서는 중장기적으로 효과를 기대할 수 있는 신규 설비의 개발 및 개선하는 시간보다는 재료적인 측면을 고려하여 신속하게 대응하고 보다 경제성을 확보할 수 있는 방안으로써 시멘트 사용량을 감축하는 것이 효율적이다(Ministry of Environment 2014).

최근 시멘트 대체재로서 산업부산물을 활용한 연구사례를 검토할 경우 시멘트 대체율이 최대 50 % 수준이며, 일반적인 경우 20~30 % 수준으로 나타나고 있다. 또한 2가지 이상의 산업부산물을 활용한 2성분계 이상의 콘크리트 배합의 품질개선을 위한 다양한 연구가 시도되어 왔으며, 최근에는 3성분계 콘크리트 배합도 제시되고 있다.

이에 따라 본 논문에서는 탄소중립을 위한 일환의 연구로서 3가지의 산업부산물을 활용하여 시멘트 사용량에 대하여 80 %까지 대폭 대체한 콘크리트의 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 적용 대상 콘크리트는 다짐작업 없이 자중만으로 거푸집 구성구석까지 밀실하게 충전이 가능한 특징을 가지고 있는 고유동 콘크리트(Choi et al, 2008)에 적용하고자 하였다. 따라서 산업부산물을 활용한 4성분계 고유동 콘크리트를 제조하였으며, 유동, 역학 및 내구성능에 대한 품질특성을 평가하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

본 연구에서 사용된 결합재는 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며, 혼화재로서 활용된 산업부산물은 플라이애시(FA), 고로슬래그 미분말(GGBFs) 및 화력발전소에서 배출된 탄산칼슘(CC)

Table 1. Chemical and physical properties of binder

Type	OPC	GGBFs	FA	CC
SiO ₂ (%)	21.6	33.33	58.2	0.67
Al ₂ O ₃ (%)	6.00	15.34	26.28	0.39
Fe ₂ O ₃ (%)	3.10	0.44	7.43	0.51
CaO (%)	61.40	42.12	6.51	95.69
Na ₂ O (%)	0.00	0.00	0.80	0.44
K ₂ O (%)	0.00	0.00	0.00	0.05
MgO (%)	3.40	5.70	1.10	1.76
SO ₃ (%)	2.50	2.08	0.30	0.17
L.O.I (%)	0.03	3.00	3.20	0.00
Specific surface area (cm ² /g)	3,540	4,160	3,550	4,160
Density (g/cm ³)	3.15	2.90	2.18	2.50

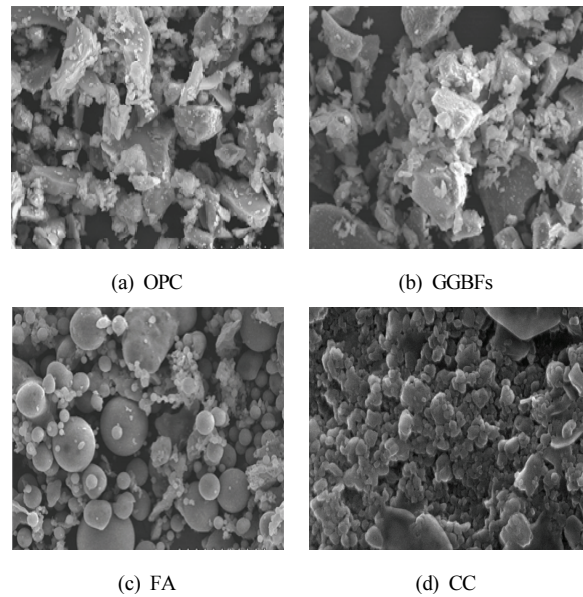


Fig. 1. Particle shape of the binders by SEM photograph

을 사용하였다. Table 1은 결합재(B)의 화학 및 물리적 성질을 나타낸 것이며, Fig. 1은 결합재의 SEM에 의한 입자의 형태를 나타낸 것이다.

2.1.2 골재

본 연구에서 사용된 골재는 낙동강산 강모래(S)와 화강암질 부순골재(CA)를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

Table 2. Physical properties of aggregates

Type	Fine aggregate (S)	Coarse aggregate (CA)
Density (g/cm ³)	2.59	2.67
Absorption (%)	1.56	0.80
F.M.	2.70	7.10
Unit mass (kg/m ³)	1.67	1.61
Solid volume (%)	65.27	62.67
G _{max} (mm)	-	20

2.1.3 고성능 감수제

본 연구에서 사용된 고성능 감수제는 고유동 콘크리트의 유동성 확보를 위하여 국내 S사의 폴리카복실계 고성능 감수제(HPWRA)를 사용하였다. HPWRA의 사용량은 결합재 질량에 대하

Table 3. Physical properties of chemical admixture

Item	Type	Density (g/cm ³)	Total solids (%)
HPWRA	Liquid	1.04 ± 0.01	34

여 0.5~1.5 % 수준에서 소량의 유동성을 만족할 수 있도록 혼합하였다. Table 3은 HPWRA의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험계획 및 배합

본 연구에서는 4성분계 고유동 콘크리트(High Fluidity Concrete, HFC)를 제조하기 위하여 분체량을 통하여 점성을 확보하는 분체계 고유동 콘크리트를 적용하였다. HFC는 OPC만을 활용한 Plain을 대상으로 OPC량 대비 80 %까지 대체한 4성분계 HFC를 제조하였다. Table 4는 HFC의 결합재 비율을 나타낸 것이며, Table 5는 콘크리트 배합을 나타낸 것이다.

2.2.2 굳지 않은 콘크리트

슬럼프 플로는 KS F 2594에 준하여 슬럼프 플로를 측정하였으며, 슬럼프 플로 500 mm 도달시간은 KCI-CT103에 준하여 동적 재료분리 저항성을 평가하였다. 또한 충전성은 U-box 충전성 장치의 중앙부에 격리판을 설치하고 한쪽에 시료를 채운 후 격리판을 들어 올려 콘크리트가 철근 사이를 통과하여 반대편으로 충전된 상승 높이를 측정하였으며, V-Lot 시험 장치를 사용하여 시료

Table 4. Mixing ratio of binder for HFC

Mix No.	Binders (weight, %)			
	OPC	FA	GGBFs	CC
HFC-P	100	0	0	0
HFC-1	20	10	60	10
HFC-2	20	10	50	20
HFC-3	20	10	40	30

Table 5. Concrete mix table

No.	W/B (%)	Unit mass (kg/m ³)						
		W	Binder				S	CA
			OPC	FA	GG BFs	CC		
HFC-P	32	155	484	0	0	0	820	860
HFC-1		155	97	48	291	48	796	835
HFC-2		155	97	48	242	97	793	832
HFC-3		155	97	48	194	145	789	828

를 시험 장치에 채운 후 토출구를 개방하여 시료가 완전히 흘러내렸을 때까지의 유하시간(sec)을 측정하였다(Choi et al, 2006). 공기량 시험은 KS F 2421에 준하여 공기량을 평가하였다.

2.2.3 경화한 콘크리트

압축강도는 KS F 2405에 준하여 재령에 따른 압축강도를 평가하였으며, 인장강도는 KS F 2423에 준하여 재령 28일에 쪼갬인장 강도를 평가하였다. 또한 정탄성계수는 KS F 2438에 준하여 재령 28일 압축강도와 정탄성계수의 상관관계를 평가하였다. 경화한 콘크리트의 내구성은 동결융해 및 염해저항성을 평가하였다. 동결융해 저항성은 KS F 2456에 준하여 상대동탄성계수를 평가하였으며, 염소이온침투 저항성은 KS F 2711에 준하여 염소이온확산계수를 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트의 품질특성

3.1.1 슬럼프 플로 및 500 mm 도달시간

Fig. 2 및 Fig. 3은 슬럼프 플로 및 슬럼프 플로 500 mm 도달시간을 나타낸 것이다. Fig. 2의 결과, 모든 배합은 목표 슬럼프 플로인 600 mm 이상을 만족하는 것으로 나타났으며, JSCE 1등급 기준 600-700 mm를 만족하여 4성분계 HFC의 작업성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. GGBFs 60 %인 HFC-1은 HFC-P의 슬럼프 플로와 비교하여 약 3 % 증가하는 경향이 있었으며, CC가 증가할수록 비례적으로 감소하는 결과가 나타났다. CC 30 %인 HFC-3은 HFC-P의 슬럼프 플로와 비교하여 약 3 % 감소하였다. 이러한 결과는 GGBFs에 의하여 슬럼프 플로가 향상되는 것으로 판단되지만 슬럼프 플로 감소 원인은 CC 증가에 의한 원인보다는 GGBFs 감소에 의한 영향이 더욱 지배적인 것으로 판단되며, 이에 따라서 GGBFs 감소의 영향으로 슬럼프 플로가 감소한 것으로 판단된다. Fig. 3의 결과, 모든 배합은 목표 슬럼프 플로 500 mm 도달시간인 5-20 sec 범위에 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 슬럼프 플로 500 mm 도달시간이 GGBFs가 감소하고 CC가 증가할수록 슬럼프 플로 500 mm 도달시간이 증가하는 것으로 판단되며, 일반적으로 CC가 GGBF 보다 소성점도를 증가 시킨다는 결과가 알려져 있기 때문에 점성의 평가지표인 슬럼프 플로 500 mm 도달시간은 이러한 원인에 기인한 것으로 판단된다(Kim 2022).

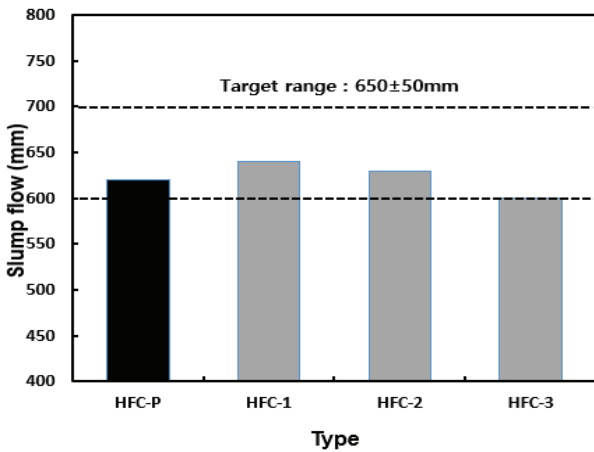


Fig. 2. Slump flow

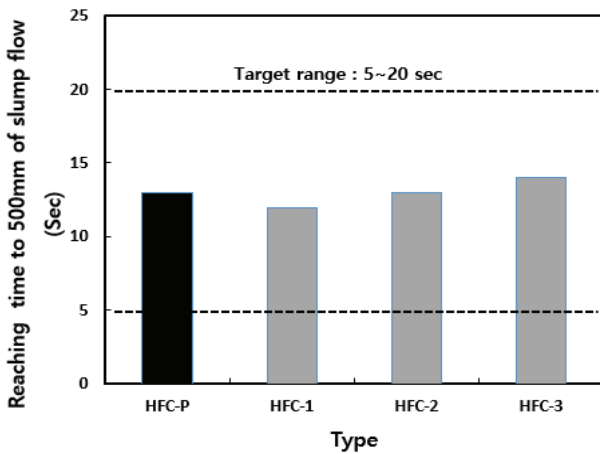


Fig. 3. Reaching time to 500 mm of slump flow

3.1.2 U-Box 및 V-Lot

Fig. 4는 U-Box의 충전성 평가 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과, HFC-P의 U-Box 레벨은 300 mm로 나타났으며, 목표 U-Box 레벨을 만족하는 것으로 나타났다. 4성분계 배합인 HFC-1, HFC-2 및 HFC-3의 U-Box 레벨은 350, 340, 330 mm로 나타났으며, 목표 타겟 범위인 300 mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 4성분계 HFC는 목표 충전성 확보가 가능한 것으로 판단되며, 약 10 % 이상 증가되는 것으로 판단된다. 재료분리 저항성은 구성재료 사이의 질량차 등에 의하여 발생하는 상대 이동에 저항하는 성질로써, 물과 고체의 분리, 페이스트와 골재의 분리 및 모르타르와 굵은 골재의 분리 성상으로 흔히 나타난다. 물과 고체가 분리되는 경우는 콘크리트 자유수(과잉수)의 양과 점성, 고체 입자의 밀도 및 표면상태에 영향을

받으며, 페이스트와 골재의 분리 및 모르타르와 굵은골재의 분리는 점성, 골재의 입도분포, 입형, 밀도 및 표면상태 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 혼합 분체의 종류 및 그 성질의 영향과 혼화제의 종류 및 투입량에 따라 영향을 받는다. 따라서 재료분리저항성 평가는 JSCE에서 제시된 “고유동 콘크리트의 자기충전성 평가 기준(표 3.5)”에 제시된 슬럼프 플로 500 mm 도달시간(sec)과 V-Lot 유하시간으로써 평가할 수 있다. Fig. 5는 V-lot 유하시간과 슬럼프 플로 500 mm 도달시간의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과, 모든 배합은 목표 타겟 범위를 모두 만족하는 것으로 나타나 재료분리 저항성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

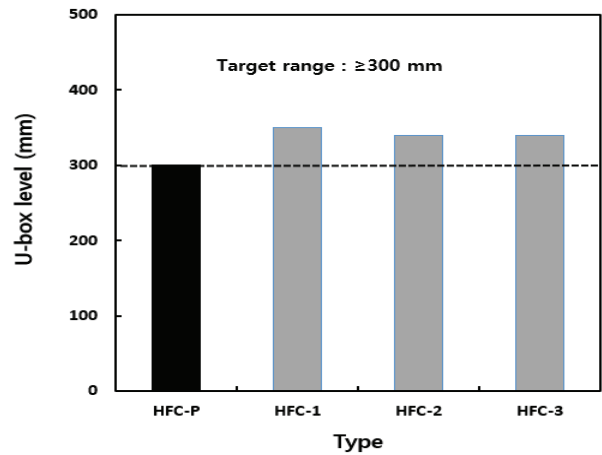


Fig. 4. U-Box level

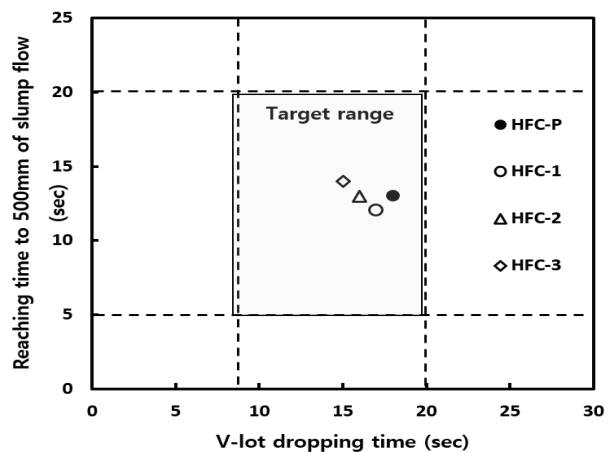


Fig. 5. Correlation between V-lot dropping time and reaching time to 500 mm of slump flow

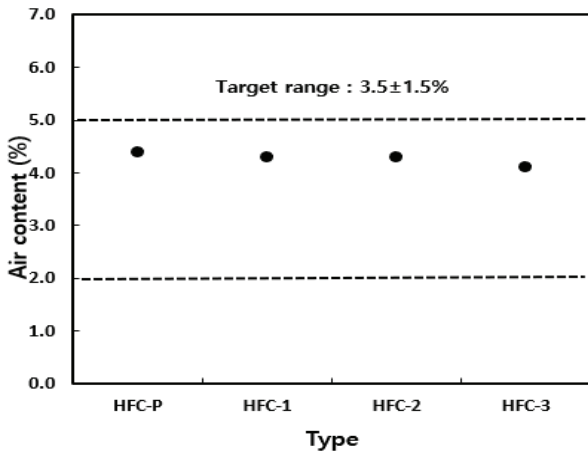


Fig. 6. Air content

3.1.3 공기량

Fig. 6은 공기량 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과, 모두 목표 공기량 범위인 $3.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 결과가 나타났다. 일반적으로 콘크리트 매트릭스내 공기량이 3% 미만일 경우 동결융해저항성이 크게 감소되며, 또한 공기량이 5% 이상일 경우 동결융해저항성의 효과가 크지 않다고 보고 있다(Lee et al. 2008). 또한, 과도한 공기량은 콘크리트의 역학적 특성 또는 콘크리트 내 구성 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 최적 범위로 설정하고 이 범위를 만족하여야 한다고 제시하고 있다. 그러나 본 연구에서는 설계기준강도 50 MPa에 대한 배합설계를 수행하였으므로 목표 공기량 범위를 1% 낮춘 $3.5 \pm 1.5\%$ 로 설정하였다. 설계기준강도 50 MPa은 고강도 영역이므로 내부 구조가 치밀해져 침투수의 저항성이 커지므로 동결융해에 따른 저항성도 증가하게 되기 때문에 일반적인 고강도 영역의 공기량 범위를 목표 공기량으로 하였다.

3.2 경화한 콘크리트의 품질특성

3.2.1 압축강도 및 쪼갬인장강도

Fig. 7은 재령 1일, 3일, 7일, 28일 및 91일 압축강도 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과, 모든 배합은 재령 28일에 목표 강도인 50 MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

HFC-P의 재령 28일강도는 58 MPa로 나타났으며, GGBFs가 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 경향이 나타났다. 또한 CC가 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결

과는 GGBFs의 일반적인 연구사례를 참고할 경우 GGBFs의 증가됨에 따라 압축강도가 감소한 것으로 판단되며, GGBFs가 감소함에도 압축강도가 감소된 원인은 CC의 경우 반응성 결합재가 아니라 충전재 역할만 하기 때문에 GGBFs가 감소하더라도 CC의 증가에 따라 압축강도가 감소된 것으로 판단된다. 따라서 GGBFs의 강도감소 원인 보다는 CC의 의한 영향이 더욱 지배적인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 재령 28일 압축강도와 쪼갬인장강도의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과, 쪼갬인장강도에 따른 압축강도 비는 0.06–0.08 수준으로 일반적인 콘크리트와 유사한 수준인 것으로 나타났으며, 콘크리트 구조설계기준에서 제시한 일반 콘크리트 인장강도 경험식에 따른 예측 값과 유사한 범위인 것으로 나타났다.

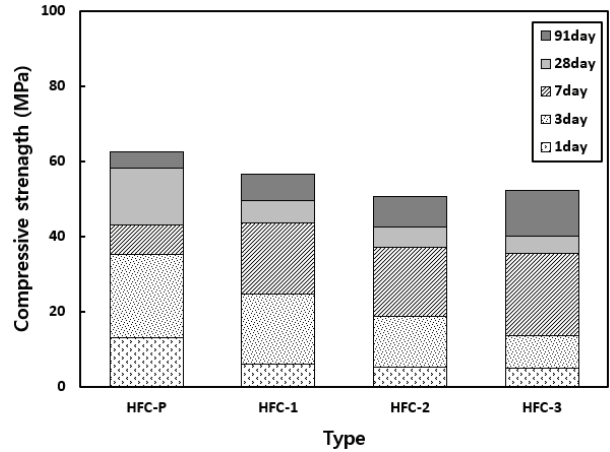


Fig. 7. Compressive strength

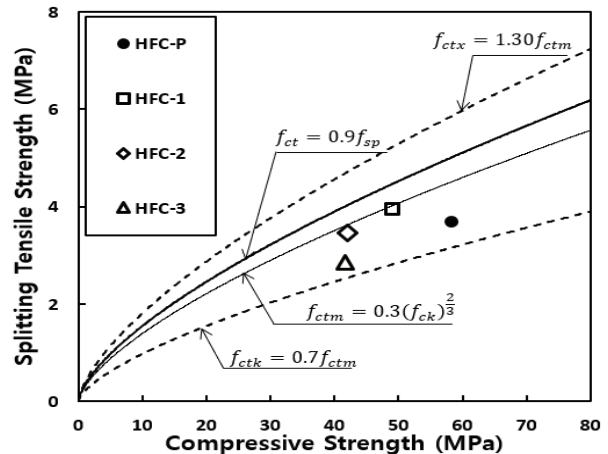


Fig. 8. Splitting tensile strength

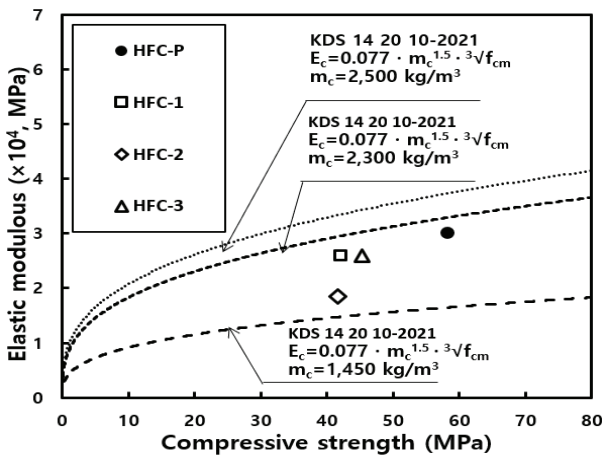


Fig. 9. Elastic modulus

3.2.2 정탄성계수

Fig. 9는 압축강도와 정탄성계수의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과, 일반적으로 알려진 결과와 동일하게 압축강도 발전에 따라 비례적인 경향이 나타났으며, 압축강도와 정탄성계수의 관계는 콘크리트 구조설계기준에서 제시한 정탄성계수 경험식에 따른 예측 값과 유사수준의 범위인 것으로 나타났다(KCI 2007).

3.2.3 동결융해 저항성

Fig. 10은 동결융해 실험에 따른 상대동탄성계수 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과, HFC-P 및 HFC-1은 300 cycle 경과 후에도 동등수준을 유지하였다. 그러나 HFC-2 및 HFC-3의 경우에는 300 cycle 경과 후 약 90 % 수준으로 나타났다.

이러한 원인은 급속 동결융해 저항성 시험의 경우 시편 제작 후 14일이 경과된 시점에 시험이 수반되므로 조기강도 및 강도발현이 Plain에 비하여 상대적으로 낮은 경우 동결융해 반복에 따른 열화가 더 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 그러나 장기재령 측면에서 동결융해 저항성은 모든 배합에 대해서 충분한 공기량이 확보되어 있기 때문에 동결융해 저항성은 확보된 것으로 간주할 수 있다. 이는 KS표준의 동결융해 촉진시험의 시험 시기와 관련된 문제로 다성분계와 같이 조기강도 확보가 어려운 경우에는 시험시기를 조절할 필요가 있을 것으로 판단된다. KS 표준 동결융해 시험 시기는 재령 14일에 수행하도록 규정되어 있으나 이는 종래 일반 콘크리트에 관련된 내용이므로 조기강도 확보가 불가능한 경우에는 유동적으로 시험시기를 결정할 수 있는 방안 등 대책마련이 필요한 것으로 판단된다. 본 연구결과의 역학특성을 고려하여 평가할 경우 GGBFs의 잠재수경성반응 등에 의하여 콘크리트의 내

부 미세구조가 더욱 밀실하게 되어 동결융해저항성은 크게 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

3.2.4 염소이온침투 저항성

Fig. 11은 염소이온 확산계수를 나타낸 것이다. Fig. 11의 결과, HFC-1의 확산계수는 HFC-P의 확산계수와 비교하여 약 12 % 감소하는 것으로 나타났지만 HFC-2 및 HFC-3의 확산계수는 HFC-P의 확산계수와 비교하여 약 13 % 및 약 15 % 증가하는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 실제 측정값을 비교할 경우 크지 않으므로 동등수준인 것으로 판단된다. 그러나 재령 91일 이후 염소이온 침투 저항성을 고려할 경우 염소이온 확산계수가 작아질 것으로 예상됨에 따라 염소이온침투 저항성은 더욱 향상될 것으로 판단된다.

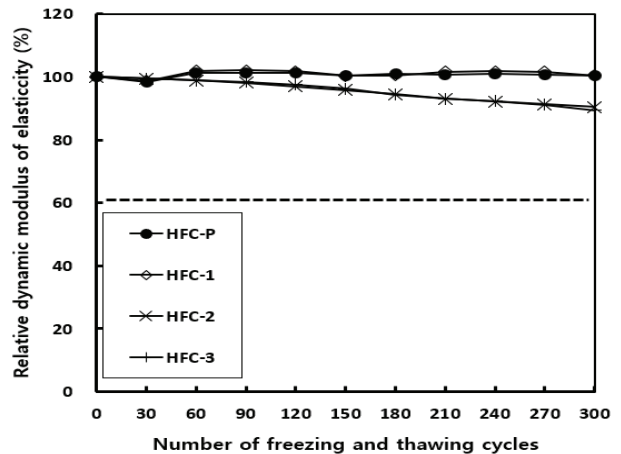


Fig. 10. Relative dynamic modulus of elasticity

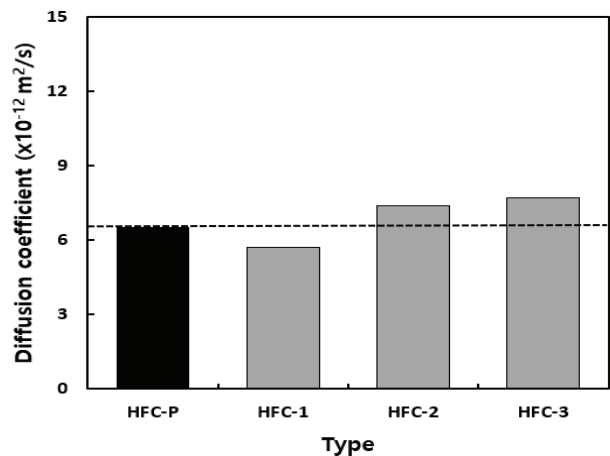


Fig. 11. Concrete mixing method

4. 결론

본 논문에서는 탄소중립을 위한 일환의 연구로써 3가지의 산업 부산물을 활용하여 시멘트 사용량에 대하여 80 %까지 대폭 대체한 4성분계 고유동 콘크리트의 품질특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 4성분계 고유동 콘크리트의 굳지않은 콘크리트 품질특성을 평가한 결과, 목표 슬럼프 플로 및 슬럼프 플로 500 mm 도달시간을 확보할 수 있었으며, 충전성 및 재료분리저항성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.
2. 4성분계 고유동 콘크리트의 경화한 콘크리트 품질특성을 평가한 결과, 산업부산물에 의하여 압축강도, 쪼갬인장강도 및 탄성계수와 같은 역학특성이 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 하지만 목표 이상을 만족할 수 있는 것으로 판단된다.
3. 4성분계 고유동 콘크리트의 내구성을 평가한 결과, 동결융해저항성 및 염소이온침투 저항성을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, 종합적으로 고려할 경우 고로슬래그 미분말 혼합량이 큰 4성분계 고유동 콘크리트가 상대적으로 우수한 성능을 보였다.

이러한 결과를 통하여 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 소요성능 수준 이상의 성능을 만족할 수 있는 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

References

Baek, C.H., Tae, S.H., Roh, S.J., Lee, J.H., Shin, S.W. (2011). A study on the requisite elements of LCCO₂ evaluation system at planning stage of building, Korean 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, International Journal of Concrete Structures and Materials, **2(2)**, 145–152 [in Korean].

Choi, Y.W., Kim, Y.J., Shin, H.C., Moon, H.Y. (2006). An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, **36(9)**, 1595–1602.

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 the Korean Recycled Construction Resources 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 the Korean Recycled Construction Resources 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)**, 22–25 [in Korean].

Choi, Y.W., Park, M.S. (2013). The application technology of concrete utilizing high volume fly ash, Magazine of RCR, **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, Semyung University.

KCI(KOREA CONCRETE INSTITUTE) (2010). Concrete and the Environment, Gimundang`s Book, 32–41.

KCI(KOREA CONCRETE INSTITUTE) (2007). Concrete Structure Design Criteria, KOREA CONCRETE INSTITUTE.

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

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)**.

Su, N., Miao, B. (2003). A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, Cement and Concrete Composites, **25(2)**, 215–222.

탄소중립을 위한 산업부산물 활용 4성분계 고유동 콘크리트의 품질특성

본 논문에서는 탄소중립을 위한 일환의 연구로써 3가지의 산업부산물을 활용하여 시멘트 사용량에 대하여 80 %까지 대폭 대체한 4성분계 고유동 콘크리트의 품질특성을 평가하였다. 평가결과, 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 소요성능 수준 이상의 성능을 만족할 수 있는 것으로 판단된다. 종합적으로 고려할 경우 고로슬래그 미분말 혼합량이 큰 4성분계 고유동 콘크리트가 상대적으로 우수한 성능을 보였다.