

배합비에 따른 다성분계 시멘트의 기초특성

김태완^{1*}, 전재우², 서민아², 조현형², 배수연²

The Fundamental Characteristics for Mix Proportion of Multi-Component Cement

Tae-Wan Kim^{1*}, Jae-Woo Jeon², Min-A Seo², Hyeon-Hyeong Jo², Su-Yeon Bae²

Abstract: The aim of this research work is to investigate the mix proportion of multi-component cement incorporating ground granulated blast furnace(GGBFS), fly ash(FA) and silica fume(SF) as an addition to cement in ternary and quaternary combinations. The water-binder ratio was 0.45. In this study, 50% and 60% replacement ratios of mineral admixture to OPC was used, while series of combination of 20~40% GGBFS, 5~35% FA and 0~15% SF binder were used for fundamental characteristics tests. This study concern the GGBFS/FA ratio and SF contents of multi-component cement including the compressive strength, water absorptions, ultrasonic pulse velocity(UPV), drying shrinkage and X-ray diffraction(XRD) analyses. The results show that the addition of SF can reduce the water absorption and increase the compressive strength, UPV and drying shrinkage. These developments in the compressive strength, UPV and water absorption can be attributed to the fact that increase in the SF content tends basically to consume the calcium hydroxide crystals released from the hydration process leading to the formation of further CSH(calcium silicate hydrate). The strength, water absorption and UPV increases with an increase in GGBFS/FA ratios for a each SF contents. The relationship between GGBFS/FA ratios and compressive strength, water absorption, UPV is close to linear. It was found that the GGBFS/FA ratio and SF contents is the key factor governing the fundamental properties of multi-component cement.

Keywords: Mix proportion, Multi-component cement, GGBFA/FA ratios, Silica fume(SF)

1. 서 론

최근 친환경 콘크리트에 관한 연구가 국내외에서 활발히 연구되고 있다. 그 중에서도 다성분계 혼합시멘트(multi-component cement; MCC)는 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary Portland cement; OPC)의 사용량을 줄이고, 산업부산물의 재활용을 통해 콘크리트의 성능향상을 함께 고려할 수 있는 방법으로 인식되고 있다. 특히 OPC의 제조시 발생하는 다량의 이산화탄소와 같은 온실가스의 감소와 높은 에너지의 소비를 줄이는 친환경적인 시멘트의 개발을 위해 다성분계 혼합시멘트에 관한 연구가 해외를 중심으로 활발해지고 있다(Gao et al., 2013; Boháč et al., 2014; Lemonis et al., 2015; Bentz et al., 2015; Mermerdaş and Arbili, 2015; Jeong et al., 2015). 지금까지의 다성분계 시멘트는 기존의 다양한 산업부산물을 OPC와 배합하여 그 특성을 파악하고 개선하는 연구가 시작되고 있다. 다

성분계 혼합 시멘트의 배합에 사용되는 주요 재료로는 고로 슬래그 미분말(ground granulated blast furnace slag; GGBFS), 플라이 애시(fly ash; FA), 실리카 폼(silica fume; SF), 바텀애시(bottom ash), 메타카올린(metakaolin), 소성점토(burned clay)(Hassan et al., 2014), 페로니켈 슬래그(ferro-nickel slag)(Lemonis et al., 2015) 등 다양한 혼화재료가 사용되고 있다. 이러한 재료를 혼합한 다성분계 혼합 시멘트는 각각의 혼화재에 의한 충전효과와 상호보완효과 등으로 인해 다양한 장점이 있는 것으로 알려지고 있다. 다성분계 혼합시멘트는 염해내구성 증가(Jones et al., 1997; Ahmed et al., 2008; Song et al., 2008), 황산염 저항성(Goni et al., 2014; Kim et al., 2012) 증가 및 알칼리 실리카 반응(alkali-silica reacting; ASR) 억제(Moser et al., 2010; Kandasamy and Shehata, 2014), 내구성(Kandasamy and Shehata, 2014; Güneysi et al., 2010; Ahn et al., 2013) 등이 우수하다는 연구결과가 지금까지의 국내외 선행연구를 통해 알려져 있다. 또한 기존의 보통 콘크리트에서 고강도 콘크리트(Erdem and Kirca, 2008; Park et al., 2008), 자기충전 콘크리트(self-compacting concrete)(Güneysi et al., 2010; Hassan et al., 2014; Turk, 2012; Celik et al., 2015)등 그 적용 분야가 확대되고 있다. 해외 연구자들은 다성분계 시멘트의 기초특성과 반응 메커니즘에 관한 연구를 수행하여 그 특성을 파악

¹정회원, 부산대학교 생산기술연구소, 교신저자

²학생회원, 부산대학교 토목공학과

*Corresponding author: ring2014@naver.com

Research Institute of Industrial Technology (RIIT), Pusan National University, Busan, 46241, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하기 위한 연구를 통해 다수의 결과가 발표되고 있다(Khan et al., 2000; Berodier and Scrivener, 2015; Bágel, 1998; Pipilikaki and Katsioti, 2009; Gao et al., 2013; Boháč et al., 2014; Lemonis et al., 2015; Bentz et al., 2015; Mermerdaş and Arbili, 2015; Jeong et al., 2015; Celik et al., 2015). 그러나 아직까지 다성분계 혼합 시멘트의 국내 연구결과는 선진국과 비교하여 충분한 연구가 이루어지고 있다고 보기 어렵고(Kim et al., 2015; Lee et al., 2004; Park et al., 2015), 시공에는 더욱 드문 실정이다. 이는 사용되는 무기혼화제의 종류가 다양하고, 일정한 품질의 확보가 어려우며, 명확한 배합비나 규정이 제시되어 있지 않은 때문이다.

본 연구는 다성분계 시멘트의 배합비에 따른 기초특성에 관한 연구이다. 본 연구에서는 다성분계 시멘트의 제조를 위해 OPC와 GGBFS, FA 그리고 SF의 세 가지 혼화재료를 GGBFS/FA 비와 SF의 혼합률에 따른 기초적인 특성을 파악하고자 한다. 기존의 연구에서는 혼화재료들의 배합비에 따른 다성분계 시멘트의 특성 연구가 상대적으로 미흡하다고 판단된다. 따라서 본 연구를 통해 혼화재료간의 상호 배합비에 따른 기초 특성 파악으로 추후 다성분계 친환경 콘크리트의 개발에 기초연구 자료로 적용하고자 한다.

2. 재료 및 실험

2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 OPC, GGBFS, FA 그리고 SF의 네 종류를 사용하였다. 1종 보통 포틀랜드 시멘트는 국내 S사, GGBFS는 국내 K사, FA는 국내 G사, 그리고 SF는 E사의 제품이다. 각 재료의 성분은 XRF 분석을 통해 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험

본 연구는 다성분계 시멘트의 배합비에 따른 기초 특성에 관한 연구로 다음과 같은 배합 및 시험계획을 수행하였다.

본 연구의 다성분계 시멘트는 OPC를 기반으로 하는 페이스트 배합으로 물-결합재 비(W/B)는 0.45이고, OPC를 50%,

Table 2 Mix properties

Level		Mix ratio(%)				GGBFS/FA
		OPC	GGBFS	FA	SF	
V5	1	50	35	15	0	2.33
	2		35	10	5	3.50
	3		35	5	10	7.00
	4		30	20	0	1.50
	5		30	15	5	2.00
	6		30	10	10	3.00
	7		25	25	0	1.00
	8		25	20	5	1.25
	9		25	15	10	2.50
	10		20	30	0	0.67
	11		20	25	5	0.80
	12		20	20	10	1.00
V4	1	40	40	20	0	2.00
	2		40	15	5	2.67
	3		40	10	10	4.00
	4		35	25	0	1.40
	5		35	20	5	1.75
	6		35	15	10	2.33
	7		30	30	0	1.00
	8		30	25	5	1.20
	9		30	20	10	1.50
	10		25	35	0	0.71
	11		25	30	5	0.83
	12		25	25	10	1.00

40% 그리고 30%로 하고 나머지 50%, 60% 그리고 70%를 GGBFS, FA 그리고 SF를 혼합하였다. 예비실험에서 OPC가 30%인 배합은 일부 시험체의 응결 지연, 균열, 시험체의 파손 등이 발생하여 실험이 수행될 수 없어 OPC의 비율을 50%와 40%의 두 종류로 하고 각 OPC 비율에 따라 나머지 결합재인 GGBFS, FA 또는 SF를 다양한 비율로 배합하였다. 자세한 배합비는 Table 2에 나타내었다.

각각의 배합비율에 따라 재료를 준비하고 KS L 5109에 따라 배합하였다. 배합 후 24h 동안 상대습도(relative humidity; RH) 80±5%, 온도 23±2°C의 항온항습기에 보관하였다. 그 다음 몰드를 제거하고 측정재령까지 동일한 습도와 온도 조건의 항온항습기에 보관하였다. 배합 후 시험체의 보관온도와 습도는 Song et al.(2008), Zhang et al.(2014) 등의 삼성분계 시

Table 1 The chemical properties of materials

	Chemical components(%)							Density (g/mm ³)	Fineness (m ² /kg)	Ig-loss (%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	SO ₃			
OPC	21.32	5.61	3.12	3.94	61.72	0.79	2.51	0.00315	330	2.31
GGBFS	35.30	12.58	0.79	3.19	41.30	0.63	4.75	0.00284	420	0.32
FA	71.00	16.92	3.73	0.95	2.97	1.22	0.61	0.00223	390	2.86
SF	95.50	1.00	0.30	0.50	0.40	1.00	-	0.00200	22000	2.00

멘트 관련연구들을 참고하여 본 연구에 사용된 장비와 목적에 적합하다고 판단되는 범위를 예비실험을 통해 설정하였다.

압축강도 시험은 50 mm × 50 mm × 50 mm 몰드를 사용하였고, 건조수축은 40 mm × 40 mm × 160 mm 몰드를 사용하였다. 흡수율 시험은 KS F 2518 방법에 따라 재령 28일 시험체에 대해 수행하였다. 초음파속도(ultrasonic pulse velocity; UPV)는 PROCEQ CCT-4를 사용하여 재령 28일 시험체에 대해 측정하였다. 측정은 시험체에 대해 수신자와 발진자를 좌우 교대로 측정한 값의 평균값으로 하고, 3개의 동일 배합의 시험체에 대해 측정한 UPV 값의 평균값을 사용하였다. 길이 변화 측정은 KS F 2424의 다이얼게이지 방법에 따라 수행하였다.

미세구조 분석을 위해서는 XRD(X-ray diffraction) 분석을 수행하였다. XRD는 압축강도 측정 후 파쇄된 시험체를 아세톤에 침지시켜 수화정지 시킨 후 분쇄하여 No. 200체를 통과하는 시료를 사용하여 분석하였다.

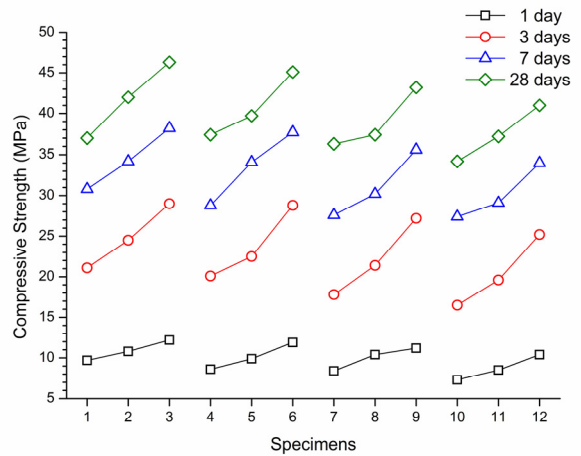
3. 결 과

3.1 압축강도

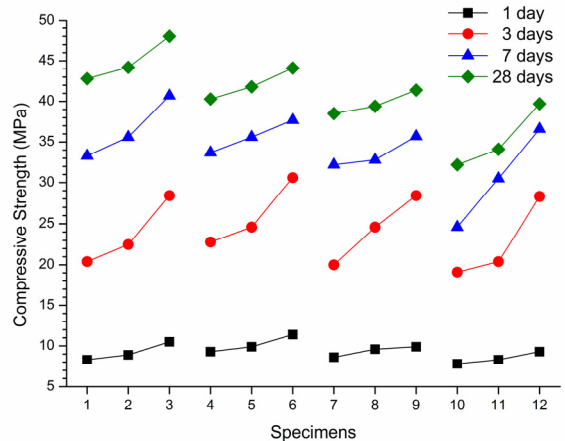
Fig. 1은 측정 재령(1, 3, 7, 28일)에서 각 시험체의 압축강도를 나타낸 것이다. 40% OPC 배합(V4 series)의 경우를 살펴보면, GGBFS의 치환율이 낮아질수록(FA 치환율이 높아질수록) 모든 측정 재령에서 압축강도가 감소하고 있었다(1, 2, 3 < 4, 5, 6 < 7, 8, 9 < 10, 11, 12). 또한 SF의 치환율이 높아질수록 강도가 향상되는 효과를 나타내었다(3 > 2 > 1, 6 > 5 > 4, 9 > 8 > 7, 12 > 11 > 10). 선행 연구에서도 SF의 치환율 증가에 따른 강도 향상효과가 나타난 다성분계 연구들이 있었다(Khan et al., 2000; Bágel, 1998; Wongkeo et al., 2012; Turk, 2012; Erdem and Kirca, 2008; Mermerdaş and Ardili, 2015).

이러한 결과는 GGBFS가 FA보다 배합 후 초기재령에서 상대적으로 더 빨리 수화반응을 일으켜 반응 생성물질을 형성하여 강도 향상에 긍정적인 효과를 일으킨 때문으로 판단된다. SF의 치환율이 10%까지 높아지면서 반응 생성물질과 시험체 조직내에 공극을 메워주는 filler 효과와 일부 Si 성분이 C-S-H(calcium-silicate-hydrate)형성에 기여하면서 강도 향상에 긍정적인 효과를 나타내는 것으로 생각된다(Khan et al., 2000; Wongkeo et al., 2012; Turk, 2012; Erdem and Kirca, 2008).

50% OPC(V5 series) 시험체들의 압축강도 특성도 40% OPC 시험체와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 GGBFS의 치환율이 낮아짐에 따라(FA 치환율이 높아짐에 따라) V5 시험체들의 강도변화율이 V4 시험체들의 강도 변화율과 비교하여 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 원인은 V5 배합이 V4에



(a) V4 specimens

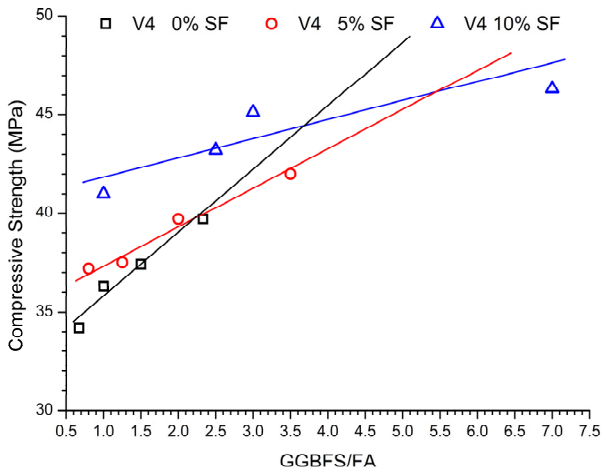


(b) V5 specimens

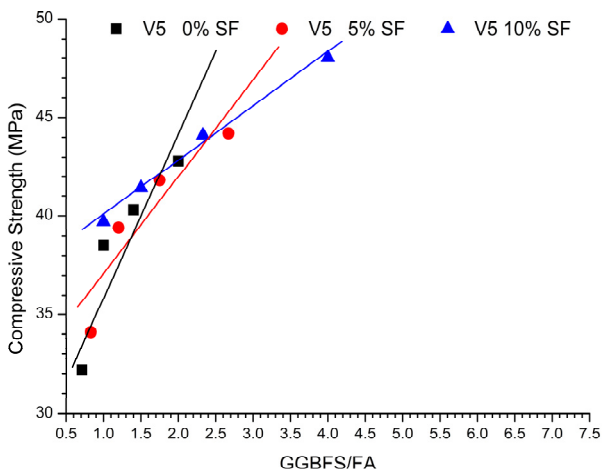
Fig. 1 Compressive strength of different mix proportion

비해 상대적으로 OPC의 양이 많아 반응성 재료들의 수화반응을 유도할 충분한 알칼리 환경을 조성하였기 때문으로 판단된다. 이와 반대로 V4의 경우 반응성 재료들이 충분히 수화반응을 유도하기 위한 알칼리 환경을 만들기에는 다소 부족한 OPC양으로 인해 수화반응이 늦어져 상대적으로 강도 향상이 작은 것으로 판단된다(Jeong et al., 2015).

Fig. 2는 재령 28일에서의 압축강도와 GGBFS/FA 비(Table 2에서)와의 관계를 나타낸 것이다. SF의 배합 유무에 관계없이 모두 GGBFS/FA 비가 증가함에 따라 강도도 증가하는 선형적인 관계가 있는 것으로 나타났다. Fig. 2에서 V5 시험체들(Fig. 2(b))이 V4 시험체들(Fig. 2(a)) 보다 GGBFS/FA의 비에 따른 강도 변화율을 의미하는 기울기가 더욱 급하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 상대적으로 OPC의 치환율이 높은 배합의 경우, 동일한 SF 치환율에서 GGBFS/FA 비에 따라 강도 증가율에 미치는 영향을 추정할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 강도에 영향을 미치는 요소 중 GGBFS가 FA와 비교하여 상대적으로 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이는



(a) V4 specimens



(b) V5 specimens

Fig. 2 Relationship of compressive strength and GGBFS/FA ratios

GGBFS의 수화반응이 FA 보다 상대적으로 더 활발하고, 이러한 수화반응성의 차이는 반응생성물질과 내부 공극에 영향을 미쳐 강도향상에 영향을 미치는 것으로 판단된다(Berodire and Scrivener, 2015; Mermerdaş and Ardili, 2015; Güneyisi et al., 2010).

3.2 흡수율

Fig. 3은 재령 28일에서 측정된 각 시험체들의 흡수율 결과이다. 흡수율은 시험체 내부의 공극 또는 균열과 같은 결함에 따라 영향을 받는다. OPC의 배합비에 따라 흡수율 차이가 발생하고 있는데, 모든 배합에서 50% OPC 배합(V5 series)이 40% OPC 배합(V4 series) 보다 낮은 흡수율을 나타내고 있었다. 이는 배합되는 결합재 중에 OPC가 상대적으로 증가함에 따라 GGBFS, FA, 그리고 SF와의 활성화 반응을 증대시켜 반응생성물질 등의 생성 촉진에 영향을 미쳐 시험체 내부의 폐

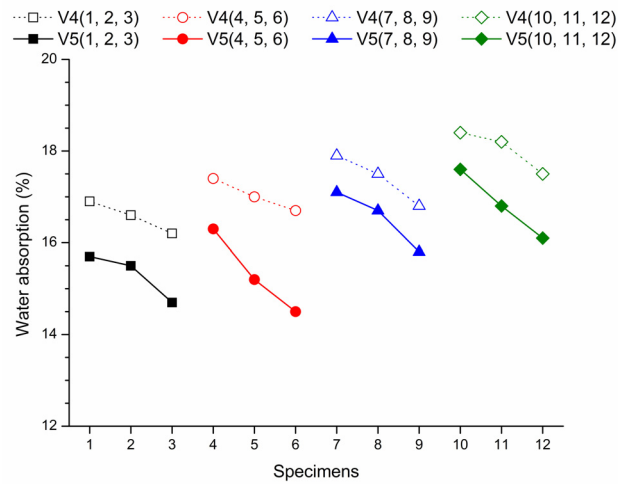


Fig. 3 Water absorption

이스트 조직을 치밀하게 만들었기 때문으로 판단된다. 또한 V5와 V4 시험체 모두 SF의 치환율이 10%인 시험체(3, 6, 9, 12)가 5%(2, 5, 8, 11) 또는 0%(1, 4, 7, 10)인 시험체 보다 낮은 흡수율을 나타내었다. 이는 SF가 반응생성물질 간의 공극을 메우는 filler 효과 등을 통해 상대적으로 낮은 공극률과 시험체 내부 조직의 치밀화에 기인한 것으로 생각된다(Khan et al., 2000; Bágel, 1998; Wongkeo et al., 2012). 흡수율 결과에서 상대적으로 GGBFS의 치환율이 감소할수록(FA 치환율이 증가할수록) 흡수율이 증가하는 경향을 나타내고 있었다(1, 2, 3 < 4, 5, 6 < 7, 8, 9 < 10, 11, 12). 이러한 경향은 V5와 V4 모두에서 나타나고 있다. 이는 동일한 시험조건에서 FA가 GGBFS 보다 활성화하여 반응 생성물질을 만드는 효과가 상대적으로 늦기 때문으로 판단된다. 본 연구의 측정재령에서 볼 때 재령 28일까지는 FA 보다는 GGBFS가 활성화 효과가 상대적으로 우수하여 반응생성물질의 형성과 조직의 치밀화에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. 선행연구에서는 GGBFS가 FA 보다 시험체 내부의 총 공극률을 감소시키는데 더 효과적이라는 연구결과가 있었다(Berodier and Scrivenet, 2015). 공극감소는 흡수율 감소에 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 따라서 OPC의 치환율과 SF의 치환율이 적정 범위에서 증가하고, GGBFS가 FA보다 일정 수준 많은 배합에서 시험체의 흡수율은 낮아지고, 이는 시험체 내부 조직이 치밀화 되는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 4는 GGBFS/FA비와 흡수율과의 관계를 나타낸 것이다. V4와 V5 시험체 모두 낮은 GGBFS/FA 비에서 높은 흡수율을 나타내고 있었다. 또한 SF 치환율이 증가함에 따라 흡수율이 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 동일 SF 치환율에서는 GGBFS/FA 비가 높을수록 낮은 흡수율을 나타낼 것으로 판단된다. 그리고 SF의 치환율이 증가함에 따라 V4와 V5

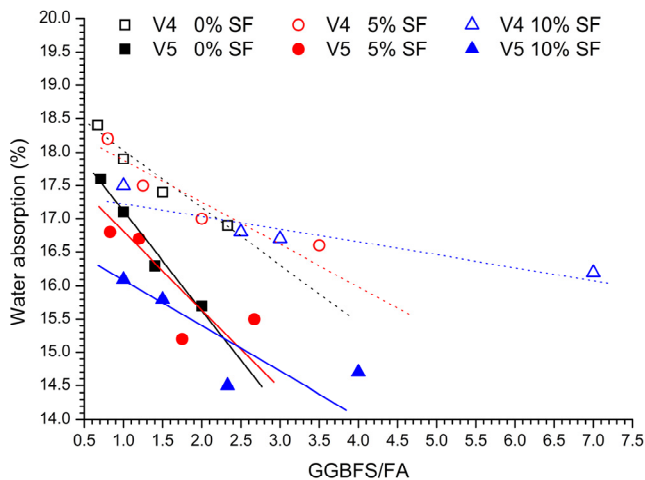


Fig. 4 Relationship of water absorption and GGBFS/FA ratios

시험체들의 흡수율 기울기가 감소하고 있다. 이는 SF의 치환이 각 배합에서 흡수율을 감소시키는 효과를 발휘하고, SF의 치환율이 증가할수록 GGBFS/FA비에 따른 흡수율 감소효과가 더욱 큰 것으로 나타났다.

3.3 초음파속도(UPV)

Fig. 5는 재령 28일 시험체의 UPV를 측정한 결과이다. UPV의 경향은 흡수율 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

50% OPC 배합(V5 series)이 40% OPC 배합(V4 series) 보다 높은 UPV를 나타내었다. 또한 10% SF 배합(3, 6, 9, 12)이 5%(2, 5, 8, 11)와 0% SF 배합(1, 4, 7, 10) 보다 높은 UPV가 나타났다. 동일한 OPC 치환율에서 GGBFS의 치환율이 감소할수록(FA 치환율이 증가할수록) UPV가 감소하였다. UPV는 시험체 내부 상태를 나타내는 개략적인 방법으로 가장 널리 사용되고 있는 방법 중 하나이다. Fig. 5에 나타난 UPV 결과에

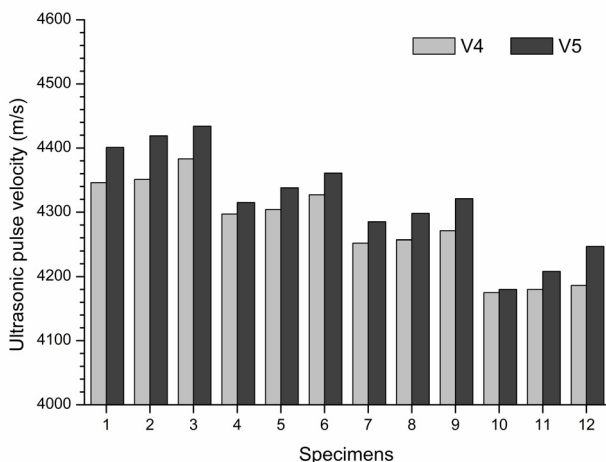


Fig. 5 UPV results

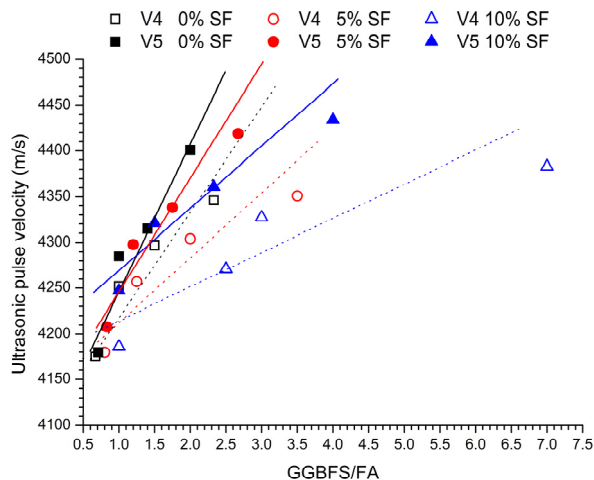


Fig. 6 Relationship of UPV and GGBFS/FA ratios

서 UPV의 증가는 시험체 내부 조직이 치밀하다고 생각할 수 있다. 따라서 OPC의 치환율이 높고(50% OPC > 40% OPC), SF가 적정 수준 배합되고(10% SF > 5% SF > 0% SF), GGBFS가 FA보다 높은 배합일 경우 상대적으로 시험체 내부 조직을 치밀화시켜 UPV가 증가하는 것으로 판단된다. 또한 SF 치환율이 높은 시험체의 UPV가 증가한 것은 SF의 공극 충전효과에 의한 시험체 내부의 치밀화에 효과를 주는 것으로 생각된다(Khan et al., 2000; Bágel, 1998).

Fig. 6은 UPV와 GGBFS/FA 비와의 관계를 나타낸 것이다. V4와 V5 시험체 모두 높은 GGBFS/FA 비에서 높은 UPV를 나타내고 있었다. 동일한 SF 치환율에서 GGBFS/FA 비가 높을수록 높은 UPV를 나타내었다. 두 배합 모두 UPV와 GGBFS/FA 비와의 관계를 나타내는 직선의 형상이나 기울기는 유사하게 나타났다. 그러나 V5 시험체의 기울기가 V4보다 다소 크게 나타나고 있다. 이는 OPC의 혼합율이 높을수록 GGBFS/FA 비에 따른 UPV 향상 효과가 큰 것으로 나타났다.

3.4 건조수축

건조수축은 재령 63일까지 측정하였다. 63일 이후에 건조수축 측정 중 일부 시험체의 심한균열과 부분 파손 등으로 더 이상의 계측이 어려웠고, 대부분의 시험체가 28일 이후 완만한 건조수축률을 나타내고 있어 63일까지의 건조수축률을 측정하였다.

Fig. 7은 각 시험체의 건조수축 측정값 중 재령 28일과 63일 건조수축률을 나타낸 것이다. 건조수축은 시험체가 천천히 내부의 수분을 잃어가면서 조직이 수축하는 과정이다. 이러한 건조수축에 영향을 주는 원인은 다양하며, 아직까지 명확한 건조수축의 영향인자에 대한 연구가 진행 중이다.

건조수축 측정 결과, 40% OPC(V4)와 50% OPC(V5) 모두

28일과 63일 건조수축 측정값은 V4 시험체가 상대적으로 크게 측정되었다. 이는 OPC와 비교하여 GGBFS, FA 그리고 SF의 느린 수화반응으로 수화반응에 관여하지 못한 잉여수의 영향이 큰 때문으로 판단된다.

40% OPC와 50% OPC 배합 모두에서 SF의 치환에 따라 건조수축이 증가하는 경향을 보이고 있었다(Güneyisi et al., 2010; Wongkeo et al., 2012). 이러한 결과는 SF의 표면적이 다른 배합재료(OPC, GGBFS, FA)보다 크고, 배합시 요구되는 단위수량의 증가 등에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 8은 GGBFS/FA 비와 63일 건조수축 값의 관계를 나타낸 것이다. V4와 V5 시험체 모두 동일 SF 치환율에서 GGBFS/FA 비가 높을수록 건조수축 값이 작게 나타나고 있었다. 따라서 건조수축 측정 결과를 보면, SF를 배합하지 않는 경우가 가장 낮은 건조수축을 나타내었고, SF를 배합할 경우는 GGBFS/

FA 비가 높은 배합이 건조수축 감소에 효과가 있을 것으로 판단된다. 그러나 10% SF 치환 시험체의 경우 V4와 V5 모두 GGBFS/FA 비에 따른 건조수축의 감소 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. Berodier and Scrivenet(2015)의 연구에서 GGBFS가 FA 보다 시험체 내부의 총 공극률을 감소시키는데 더 효과적이라는 연구결과가 있었다. 이를 바탕으로 GGBFS/FA 비가 높은 배합은 총 공극을 감소시켜 낮은 흡수율, 높은 초음파 속도 그리고 건조수축의 감소에도 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.5 XRD 분석

Fig. 9는 제령 28일 시험체의 XRD 분석결과이다. V5와 V4 시험체들 모두 유사한 반응생성물질을 나타내고 있다. portlandite (P), calcium carbonate(CC) 그리고 calcium carbonate silicate (CS) 등이 검출되고 있었다. 또한 SF의 치환율이 0%에서 10%

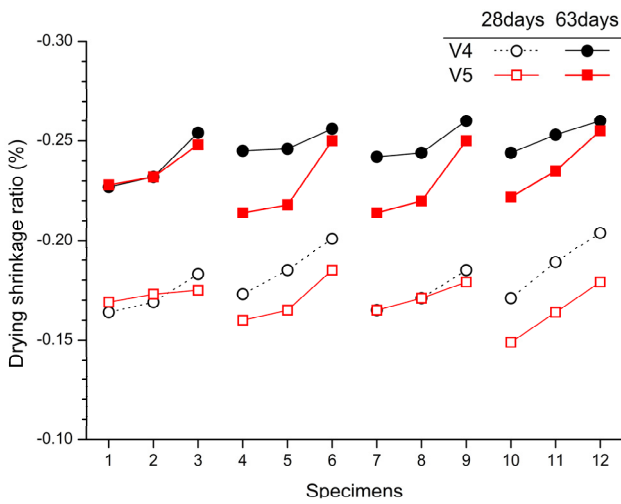


Fig. 7 Drying shrinkage of different mixes

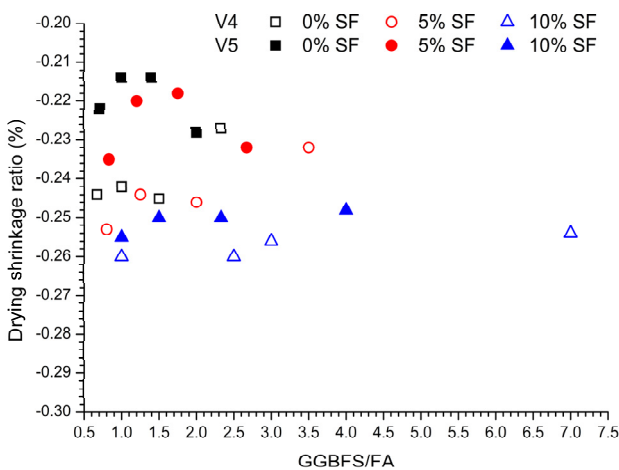
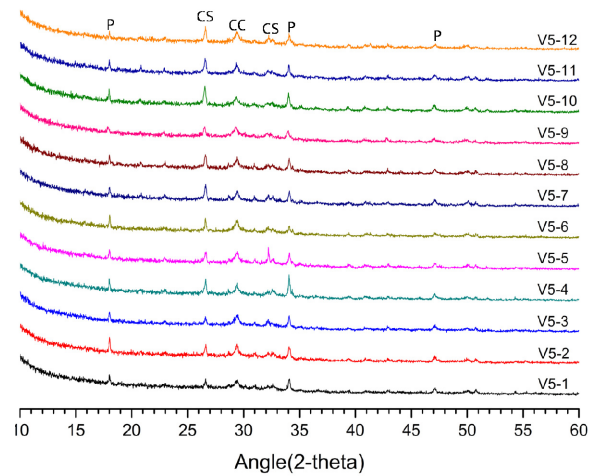
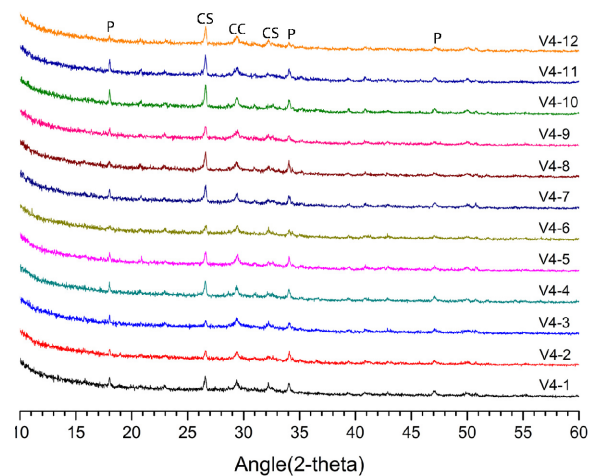


Fig. 8 Relationship of drying shrinkage with GGBFS/FA ratios



(a) V5 specimens



(b) V4 specimens

Fig. 9 XRD analysis at 28 days(P : portlandite, CS : calcium carbonate silicate, CC : calcium carbonate)

로 증가함에 따라 CS가 감소하고 CC는 증가하는 경향성을 나타내고 있었다. 이러한 결과는 재령이 증가함에 따라 portlandite (P)가 소모되어 C-S-H와 같은 비정형의 반응생성물질을 만드는데 사용되어 감소하는 것으로 판단된다. 또한 SF의 치환율이 증가함에 따라 SF의 높은 비정형 실리카의 함유량과 높은 표면적이 GGBFS나 FA와의 화학적 반응성을 향상시켜 강도 향상에 영향을 미치는 것으로 판단된다(Erdem and Kirca, 2008).

4. 결 론

OPC의 50%와 40%를 GGBFS, FA 그리고 SF를 혼합한 다 성분계 시멘트의 배합비에 따른 기초특성에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 압축강도는 SF의 배합률이 5%에서 10%로 증가할수록 강도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 반응 생성물질과 시험체 조직내에 공극을 메워주는 filler 효과와 일부 Si 성분의 C-S-H(calcium-silicate-hydrate)형성에 기여하면서 강도 향상에 긍정적인 효과를 나타내는 것으로 생각된다. 또한 동일 SF 배합률에서 GGBFS/FA 비가 높을수록 압축강도는 큰 값을 나타내었다. 본 연구의 범위에서 볼 때 50% OPC 배합에서는 GGBFS/FA 비가 2.0이상, 40% OPC 배합에서는 2.2 이상일 때 각 SF 배합률에서 높은 강도가 측정되었다.
- 2) 흡수율과 UPV 결과는 SF 치환율이 증가할수록 낮은 흡수율과 높은 UPV를 나타내었다. 또한 흡수율과 UPV 모두 GGBFS/FA비가 증가하고 SF 치환율이 증가할수록 시험체 내부 조직을 치밀하게 하여 강도향상에 긍정적인 효과를 미치는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 압축강도에서와 유사하게 SF의 filler 효과와 C-S-H(calcium-silicate-hydrate)의 형성에 기여하는 등의 결과로 생각된다.
- 3) 건조수축은 SF의 치환율이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 SF의 높은 분말도와 관계있는 것으로 판단된다. GGBFS/FA와 건조수축과의 관계는 뚜렷한 경향성이 나타나지 않았다. 5% 이하의 SF 치환율에서 GGBFS/FA가 높을 때 상대적으로 건조수축이 작게 나타났다.
- 4) XRD 분석 결과 반응 생성물질은 GGBFS/FA의 비와 SF의 치환율에 따라 portlandite와 calcium carbonate 등의 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 SF를 사용한 경우 OPC, GGBFS 또는 FA와의 반응에 영향을 미치므로 배합되는 재료들의 특성이 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구의 범위에서 살펴볼 때, GGBFS/FA의 비와 SF의 치환율에 따라 다 성분계 시멘트의 기초특성이 다양하게 변화되고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF -2015R1D1A3A01019583).

References

1. Ahmed, M. S., Kayali, O., Anderson, W. (2008), Chloride Penetration in Binary and Ternary Blended Cement Concretes as Measured by two Different Rapid Methods, *Cement & Concrete Composites*, 30, 576-582.
2. Ahn, S. H., Jeon, S. I., Nam, J. H., An, J. H. (2013), Durability Evaluation of Ternary Blended Concrete Mixtures Adding Ultra Fine Admixture, *Journal of the Korean Society of Road Engineering*, 15(5), 101-110.
3. Antiohos, S. K., Papadakis, V. G., Chaniotakis, E., Tsimas, S. (2007), Improving the Performance of Ternary Blended Cements by Mixing Different Types of Fly Ashes, *Cement and Concrete Research*, 37, 877-885.
4. Bágel, L. (1998), Strength and Pore Structure of Ternary Blended Cement Mortars Containing Blast Furnace Slag and Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, 28(7), 1011-1020.
5. Bentz, D. P., Jones, S. Z., Snyder, K. A. (2015), Design and Performance of Ternary Blended high-volume Fly Ash Concretes of Moderate Slump, *Construction and Building Materials*, 84, 409-415.
6. Berodier, E., Scrivener, K. (2015), Evolution of pore structure in blended systems, *Cement and Concrete Research*, 73, 25-35.
7. Boháč, M., Palou, M., Novotný, R., Másilko, J., Všíanský, D., Staněk, T. (2014), Investigation on Early Hydration of Ternary Portland Cement-blast-furnace Slag-metakaolin Blends, *Construction and Building Materials*, 64, 333-341.
8. Celik, K., Meral, C., Gyrsel, A. P., Mehta, P. K., Horvath, A., Monteiro, P. J. M. (2015), Mechanical Properties, Durability, and Life-Cycle Assessment of Self-consolidating Concrete Mixtures Made with Blended Portland Cements Containing Fly Ash and Limestone Powder, *Cement & Concrete Composites*, 56, 59-72.
9. Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn E. M. R. (2012), Experimental Characterization of Binary and Ternary Blended-cement Concretes Containing Ultrafine Residual Rice Husk and Sugar Cane Bagasse Ashes, *Construction and Building Materials*, 29, 614-646.
10. Erdem, T. K., Kirca, Ö. (2008), Use of Binary and Ternary Blends in High Strength Concrete, *Construction and Building Materials*, 22, 1477-1483.
11. Gao, Y., Geert De Schutter, Ye, G., Huang, H., Tan, Z., Wu, K.

- (2013), Characterization of ITZ in Ternary Blended Cementitious Composites: Experiment and Simulation, *Construction and Building Materials*, 41, 742-750.
12. Gao, Y., Geert De Schutter, Ye, G., Yu, Z., Tan, Z., Wu, K. (2013), A Microscopic Study on Ternary Blended Cement based Composites, *Construction and Building Materials*, 46, 28-38.
 13. Goni, S., Frias, M., Vegas, I., Garcia, R. (2014), Sodium Sulphate Effect on the Mineralogy of Ternary Blended Cements Elaborated with Activated Paper Sludge and Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 54, 313-319.
 14. Goni, S., Frias, M., Vegas, I., Garcia, R., Vigil de la Villa, R. (2012), Effect of Ternary Cements Containing Thermally Activated Paper Sludge and Fly Ash on the Texture of C-S-H gel, *Construction and Building Materials*, 30, 381-388.
 15. Güneysi, E., Gesoğlu, M., Özbay, E. (2010), Strength and Drying Shrinkage Properties of Self-compacting Concretes Incorporating Multi-system Blended Mineral Admixtures, *Construction and Building Materials*, 24, 1878-1887.
 16. Hassan, I., O., Ismail, M., Forouzani, P., Majid, Z., A., Mirza, J. (2014), Flow Characteristics of Ternary Blended Self-consolidating Cement Mortars Incorporating Palm Oil Fuel Ash and Pulverised Burnt Clay, *Construction and Building Materials*, 64, 253-260.
 17. Jeong, Y., Park, H., Jun, Y., Jeong, J-H., Oh, J. E. (2015), Microstructural Verification of the Strength Performance of Ternary Blended Cement Systems with High Volumes of Fly Ash and GGBFS, *Construction and Building Materials*, 95, 96-107.
 18. Jones, M. R., Dhir, R. K., Magee, B. J. (1997), Concrete Containing Ternary Blended Binders: Resistance to Chloride Ingress and Carbonation, *Cement and Concrete Research*, 27(6), 825-831.
 19. Kandasamy, S., Shehata, M. H. (2014), Durability of Ternary Blends Containing High Calcium Fly Ash and Slag Against Sodium Sulphate Attack, *Construction and Building Materials*, 53, 267-272.
 20. Kandasamy, S., Shehata, M. H. (2014), The Capacity of Ternary Blends Containing Slag and High-calcium Fly Ash to Mitigate Alkali Silica Reaction, *Cement & Concrete Composites*, 49, 92-99.
 21. Khan, M. I., Lynsdale, C. J., Waldron, P. (2000), Porosity and Strength of PFA/SF/OPC Ternary Blended Paste, *Cement and Concrete Research*, 30, 1225-1229.
 22. Kim, M. S., Beak, D. I., Kang, J. H. (2012), Sulfate and Freeze-thaw Resistance Characteristic of Multi-component Cement Concrete Considering Marine Environment, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(3), 26-32.
 23. Kim, R. H., Kim, G. Y., Lee, B. K., Shin, K. S., Sing, G. Y. (2015), Effects of Micropores on the Freezing-Thawing Resistance of High Volume Slag Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 67-74.
 24. Lee, P. S., Kwon, K. J., Kim, S. M. (2004), The Comparative Experimental Study of Short and Long-term Behavior of the Blended High-Fluidity Cement Concrete and Existing Nuclear Power Plant Structural Concrete, *The Korea Institute For Structural Maintenance and Inspection*, 8(4), 195-202.
 25. Lemonis, N., Tsakiridis, P. E., Katsiotis, N. S., Antiohos, S., Papageorgiou, D., Katsiotis, M. S. (2015), Hydration Study of Ternary Blended Cements Containing Ferronickel Slag and Natural Pozzolan, *Construction and Building Materials*, 91, 130-139.
 26. Li, Y., Kwan, A. K. H. (2014), Ternary Blending of Cement with Fly Ash Microsphere and Condensed Silica Fume to Improve the Performance of Mortar, *Cement & Concrete Composites*, 49, 26-35.
 27. Menéndez, G., Bonavetti, V., Irassar, E. F. (2003), Strength Development of Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Blast- furnace Slag, *Cement & Concrete Composites*, 25, 61-67.
 28. Mermerdaş, K., Arbili, M. M. (2015), Explicit Formulation of Drying and Autogenous Shrinkage of Concretes with Binary and Ternary Blends of Silica Fume and Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 94, 371-379.
 29. Moser, R. D., Jayapalan A. R., Garas, V. Y., Kurtis, K. E. (2010), Assessment of binary and ternary blends of metakaolin and Class C fly ash for alkali-silica reaction mitigation in concrete, *Cement and Concrete Research*, 40, 1664-1672.
 30. Owaid, H. M., Hamid, R., Taha, M. R. (2014), Influence of Thermally Activated Alum Sludge Ash on the Engineering Properties of Multiple-blended Binders Concretes, *Construction and Building Materials*, 61, 216-229.
 31. Park, C. B., Kim, H. S., Jeon, J. Y., Kim, E. K., Ryu, D. H. (2008), Properties of Ternary or Quaternary High Strength Concrete Using Silica Fume & Meta Kaolin, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(3), 307-315.
 32. Park, K. C., Lim, N. G. (2015), Chloride Penetration of Concrete Mixed with High Volume Fly Ash and Blast Furnace Slag, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(1), 90-99.
 33. Pipilikaki, P., Katsioti, M. (2009), Study of the Hydration Process of Quaternary Blended Cements and Durability of the Produced Mortars and Concretes, *Construction and Building Materials*, 23, 2246-2250.
 34. Saca, N., Georgescu, M. (2014), Behavior of Ternary Blended Cements Containing Limestone Filler and Fly Ash in Magnesium Sulfate Solution at Low Temperature, *Construction and Building Materials*, 71, 246-253.
 35. Song, H. W., Lee, C. H., Lee, K. C., Kim, J. H., Ann, K. Y. (2008), Chloride Penetration Resistance of Ternary Blended Concrete and Discussion for Durability, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(4), 439-449.
 36. Turk, K. (2012), Viscosity and Hardened Properties of Self-compacting Mortars with Binary and Ternary Cementitious Blends of Fly Ash and Silica Fume, *Construction and Building Materials*, 37, 326-334.
 37. Vance, K., Aguayo, M., Oey, T., Sant, G., Neithalath, N. (2013), Hydration and Strength Development in Portland Cement Blends Containing Limestone and Fly Ash or Metakaolin, *Cement & Concrete Composites*, 39, 93-103.
 38. Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Chaipanich A. (2012), Compressive Strength and Drying Shrinkage of Fly Ash-bottom Ash-silica Fume Multi-Blended Cement Mortars, *Materials and Design*, 36, 655-662.
 39. Zhang, T., Liu, X., Wei, J., Yu, Q. (2014), Influence of Preparation Method on the Performance of Ternary Blended Cements, *Cement & Concrete Composites*, 52, 18-26.

요 지 : 본 연구는 고로슬래그 미분말 (GGBFS), 플라이애시 (FA) 그리고 실리카 폼 (SF)을 각각 세 종류와 네 종류로 시멘트와 혼합한 다성분계 시멘트의 특성 연구에 관한 것이다. 물-결합재 비는 0.45 이다. 본 연구에서는 혼화재료를 시멘트의 50%와 60% 비율의 두 가지로 치환하였으며, 각 배합에 대해서 GGBFS는 20~40%, FA는 5~35% 그리고 SF는 0~10%를 배합하여 기초특성에 관한 실험을 수행하였다. GGBFS/FA 비와 SF 치환율에 따른 다성분계 시멘트에 대해 압축강도, 물 흡수율, 초음파 속도 (UPV), 건조수축 그리고 XRD 분석을 수행하였다. 실험결과 SF를 치환함에 따라 흡수율은 감소하고 압축강도, UPV와 건조수축은 증가하였다. 이러한 압축강도, 흡수율 그리고 UPV 등의 결과는 SF의 혼합률이 증가함에 따라 용출된 수산화칼슘을 소비하여 CSH의 형성에 기여하기 때문이다. 각 SF 혼합률에서 GGBFS/FA 비가 증가함에 따라 강도, 흡수율 그리고 UPV도 증가하였다. GGBFS/FA 비와 강도, 흡수율, UPV는 선형적인 관계를 나타내었다. 본 연구를 통해 GGBFS/FA비와 SF 치환율은 다성분계 시멘트의 기초 특성에 중요한 요소임을 발견할 수 있었다.

핵심용어 : 배합비, 다성분계 시멘트, GGBFA/FA 비, 실리카 폼(SF)
