바잘트 섬유 및 하이볼륨 플라이애시를 사용한 모르타르의 유동특성에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on the Fluidity Properties of Mortar Using Basalt Fiber and High Volume Fly Ash

최연왕^{1*} · 오성록¹ · 박만석¹ · 최병걸¹

Yun-Wang Choi^{1*} · Sung-Rok Oh¹ · Man-Seok Park¹ · Byung-Keol Choi¹

(Received December 19, 2014 / Revised December 26, 2014 / Accepted December 27, 2014)

This study was evaluated influence of fluidity properties according to basalt fiber and high volume fly ash in the mortar level, as part of a basic study for development of fiber reinforced concrete using basalt fiber and high volume fly ash. In the first step, it was evaluated that fluidity properties of mortar according to replacement ratio 6 level of fly ash(10, 20, 30, 40, 50 and 60mass%) and fluidity properties of mortar according to content 5 levels of SP(1.3, 1.5, 1.7, 1.9 and 2.1%) and content 5 levels of VA(0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0%) for dispersion of the basalt fiber, in the second step, it was evaluated that fluidity properties of mortar using High-volume fly ash (50mass%) on 3 levels of basalt fiber length (6, 20 and 30mm). Results of assessment, if after a fiber mixed, it showed that viscosity agent is more effective to improve the fluidity and fiber dispersion than superplasticizer, high volume fly ash (50%) applying the mixing, due to three properties of fly ash, showed that the improved fiber dispersibility and flow improvement.

키워드 : 하이볼륨, 플라이애시, 바잘트 섬유, 섬유보강, 유동특성

Keywords : High Volume, Fly Ash, Basalt Fiber, Fiber Reinforced, Fluidity Properties

1. 서 론

바잘트 섬유(Basalt Fiber)는 산업용으로 사용되는 섬유로서 화산활동의 결과로 발생하는 현무암을 1,500℃로 용융하여 추출된 순수한 무기섬유로 국내의 경우 강원도 철원지역 등에 다량의 현무암이 분포 및 매장되어 있기 때문에 제조기술 및 원료의 수입없이 100% 국내 자원을 이용한 바잘트 섬유가 다양한 용도로 생산되고 있다. 바잘트 섬유는 현무암을 주원료로 이루어진 천연섬유로서 친환경적이며 독성이 없으며, 저렴하고 풍부한 국내 원료를 사용하기 때문에 생산 단가 및 에너지를 절감할 수 있다. 또한 물리적 성질의 경우 기존 섬유와 비교하여 우수한 불연, 방열, 내열, 방음, 흡음 성능뿐만 아니라 내마모성, 내침식성, 경량 및 고강도 특성을 가진 것으로 알려져 있기 때문에(Kim et al. 2011) 기존 섬유의 충분한 대체 가능성을 가지고 있다. 이러한 바잘트 섬유는 현재까지

유리 섬유 및 탄소 섬유 등이 바잘트 섬유와 비교하여 단가 경제력 등이 우위에 있어 섬유 시장의 대부분을 차지하고 있기 때문에 많은 부분에서 연구 및 상용화되지 못하고 있는 실정이지만 점차 세계 각국의 산업용 섬유의 대한 환경 규제가 심해지고, 추후 바잘트 섬유의 대량생산 설비 및 환경이 갖춰질 경우에는 가격 경쟁력 뿐만 아니라 고도화되는 산업구조에 대하여 높은 기능성 소재로서 활용 가능성이 매우 크기 때문에 바잘트 섬유의 생산량 및 사용량은 증가할 것으로 예측되고 있다(Jeon et al. 2009). 이에 따라 최근 동구권을 중심으로 바잘트 섬유에 대한 관련 연구가 활발히 수행되고 있으며, 국내의 경우 강원발전연구원, 전주기계탄소기술원, 인천테크노파크, 구미전자정보기술원 등이 참여하여 바잘트 섬유의 상용화 기반 구축사업 등이 수행되어 고성능 산업용 섬유로서의 응용 및 활용범위를 크게 확대시키고 있다(Jeon et al. 2009).

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

¹세명대학교 토목공학과 (Semyung University, Jecheon, 390-711, Korea)

Table 1. Chemical compositions and physical properties of binder

Type	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	L.O.I (%)	Specific surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
OPC	61.60	19.80	4.50	3.01	3.57	2.10	1.20	3,540	3.15
FA	5.95	52.83	18.08	1.43	7.74	0.01	6.14	3,710	2.20

한편, 지구온난화의 원인인 온실가스 감축이 전 세계적인 이슈가 되고 있으며, 국내에서도 온실가스 30% 감축을 위하여 전 분야에 걸쳐 다양한 정책 및 기술개발이 이루어지고 있는 실정이다(IPCC 2013). 특히, 콘크리트의 산업 분야에서는 화력발전소에서 발생하는 플라이애시의 자원화를 통하여 이산화탄소를 대량 발생시키는 시멘트의 대체재로써 활용하고자 하는 방안이 활발히 연구되고 있으며, 플라이애시를 콘크리트에 적용할 경우 워커빌리티 향상, 수화열 감소, 장기강도 증진, 내구성 증대 등의 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Choi et al, 2012). 콘크리트에 적용되는 플라이애시는 조기강도 및 품질의 불균일 문제 등으로 인하여 통상 그 사용량이 30% 이하로 아직까지는 제한적인 실정이지만 최근 플라이애시를 대량 활용하기 위한 연구에 관심이 집중되고 있다. 국외의 경우 1980년대 Malhotra에 의하여 플라이애시를 50% 이상 혼합한 High Volume Fly Ash Concrete가 개발된 이후(P.Kumar Mehta 2004) 다양한 구조물에 HVFAC의 현장적용이 이루어졌으며, 성능 중심형 설계 개념을 도입하고 있는 유럽에서는 EN 197(BS 2004)의 CEM IV에 플라이애시 혼합률을 36~55% 까지 규정함으로써 플라이애시의 활용범위를 넓히고 있는 등 플라이애시의 사용량을 증대시키기 위한 노력 및 연구가 국내외적으로 최근까지 수행되고 있다(Kim et al, 2009). 플라이애시가 다량 사용된 콘크리트의 제조기술은 녹색성장을 실현하기 위한 녹색 패러다임에 걸맞는 친환경 기술이기 때문에(Korea conformity laboratories 2011) 온실가스를 획기적으로 저감하고 산업부산물의 재활용률을 대폭 증대시킬 수 있는 기술이므로 집중적인 투자가 이루어져야 할 것으로 판단된다(Choi et al, 2014).

따라서 본 연구에서는 천연소재인 바잘트 섬유를 고부가가치 산업인 콘크리트에 적용 및 활성화하고 플라이애시를 50% 이상 대량 활용하기 위한 일환의 기초 연구로써 바잘트 섬유와 하이볼륨 플라이애시가 콘크리트의 유동특성에 미치는 영향을 모르타르 수준에서 검토하고자 한다. 이를 통하여 바잘트 섬유 및 하이볼륨 플라이애시를 활용한 섬유보강 콘크리트 제조시 굳지않은 콘크리트의 워커빌리티를 예측하고 품질제어를 할 수 있는 기초 품질 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

본 논문에서 사용된 결합재는 밀도 3.15g/cm³ 및 분말도 3,540cm²/g의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)와 밀도 2.20g/cm³ 및 분말도 3,710cm²/g의 플라이애시(이하 FA로 약함)를 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 결합재의 화학성분 및 물리적 특성을 나타낸 것이다.

2.1.2 잔골재

본 논문에서 사용된 잔골재는 밀도 2.60g/cm³의 낙동강산 강모래(이하 S로 약함)를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 잔골재의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

2.1.3 바잘트 섬유

본 논문에서 사용된 바잘트 섬유(이하 BF로 약함)는 국내 B사의 바잘트 섬유를 사용하였으며, 총 3가지 길이수준(6mm, 20mm 및 30mm)에 대하여 검토하였다. Table 3은 실험에 사용된 바잘트 섬유의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

Table 2. Physical properties of fine aggregates

Type	Density (g/cm ³)	F.M.	Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)
River sand	2.60	2.70	1.56	1,670

Table 3. Physical properties of fiber

Type	Length (mm)	Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
BF	6 20 30	18	2,500	89	2.46

2.1.4 화학 혼화제

실험에 사용된 화학 혼화제는 고형분 20% 및 25%의 폴리카본

산계 고성능 감수제(이하 SP로 약함)와 액상형 우레탄계 증점제(이하 VA로 약함) 및 소포제(이하 AA로 약함)를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험계획 및 배합

본 연구에서는 바잘트 섬유와 하이볼륨 플라이애시가 콘크리트의 유동특성에 미치는 영향을 모르타르 수준에서 검토하기 위하여 첫 번째 단계로 플라이애시와 바잘트 섬유의 사용이 모르타르 유동특성에 각각 미치는 영향을 평가하였다. 플라이애시 6수준(10, 20, 30, 40, 50 및 60mass%)에 따른 모르타르 배합과 바잘트 섬유를 총 체적에 대하여 1% 사용한 경우를 기준으로 SP제 5수준(1.3, 1.5, 1.7, 1.9 및 2.1%) 및 VA 5수준(0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0%)에 따른 모르타르 배합을 제조하여 모르타르 플로우, 레올로지 및 섬유 분산성을 검토하였다. 첫 번째 단계를 통하여 얻은 특성과 화학

혼화제의 적정량을 선정한 다음 두 번째 단계에서 바잘트 섬유 길이 3수준(6, 20 및 30mm)에 대하여 OPC 100% 배합 및 FA 50% 배합에 각각 적용한 모르타르의 유동특성을 평가하였다. Table 4는 실험에 적용된 각 단계별 변수를 나타낸 것이며, Table 5는 각

Table 4. Experiment variable according to each step

Step	Item		Experiment Variable
1	Replacement ratio of FA (mass%)		0, 10, 20, 30, 40, 50, 60
	Mixing ratio of BF (20 mm, 1%, on total volume)	Solids content of SP (%)	20%, 25%
		Content of SP (%)	1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 2.1
2	Mixing ratio of BF (1%, on total volume)	Content of VA (%)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
		Type of binder	OPC 100, FA 50
	Length of BF (mm)		6, 20, 30

Table 5. Mix design according to each experiment variable

No. (Step-Item-Variable)	W/B	Unit mass (kg/m ³)				Content of SP (%)	Solids content of SP, (%)	Content of VA (%)	Mixing ratio of BF (%)	Length of BF (mm)	
		W	C	FA	S						
1-1-1	0.30	130	437	0	784	1.55	20	non	non	-	
1-1-2	0.30	130	396	44	784	1.40					
1-1-3	0.30	130	350	87	784	1.25					
1-1-4	0.30	130	306	131	784	1.20					
1-1-5	0.30	130	262	175	784	1.10					
1-1-6	0.30	130	219	219	784	1.00					
1-1-7	0.30	130	175	262	784	0.90					
1-2-1	0.30	130	437	0	784	1.55	25		non	1	20
1-2-2	0.30	130	437	0	784	1.3					20
1-3-1	0.30	130	437	0	784	1.3					20
1-3-2	0.30	130	437	0	784	1.5					20
1-3-3	0.30	130	437	0	784	1.7					20
1-3-4	0.30	130	437	0	784	1.9					20
1-3-5	0.30	130	437	0	784	2.1					20
1-4-1	0.30	130	437	0	784	1.5		0.2			20
1-4-2	0.30	130	437	0	784			0.4			20
1-4-3	0.30	130	437	0	784			0.6			20
1-4-4	0.30	130	437	0	784			0.8			20
1-4-5	0.30	130	437	0	784			1.0			20
2-1-1	0.30	130	437	0	784			0.6			6
2-1-2	0.30	130	437	0	784			0.8			20
2-1-3	0.30	130	437	0	784			1.0			30
2-2-1	0.30	130	219	219	784			0.6			6
2-2-2	0.30	130	219	219	784			0.8			20
2-2-3	0.30	130	219	219	784			1.0			30

변수에 따른 모르타르 배합을 나타낸 것이다.

2.2.2 모르타르 플로우

모르타르의 플로우 시험은 KS L 5111에 규정하는 플로우 테이블을 이용하여 KS L 5105의 플로우 결정 방법에 준하여 측정을 실시하였다.

2.2.3 모르타르 레올로지

모르타르의 소성점도 및 항복응력을 측정하기 위하여 Brookfield

Fig. 1. Mortar rheometer

(a) Hysteresis model

(b) Bingham model

Fig. 2. Analysis model of rheology

사의 모르타르 점도계 DV-III Ultra 모델을 사용하였으며, 챔버 크기를 변형한 모르타르 점도계를 사용하여 전단속도(Shear rate)의 변화에 따른 전단응력(Shear stress)의 변화량을 측정하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 모르타르 점도계를 나타낸 것이다. 또한, Fig. 2 (a)와 같이 Hysteresis loop area에 의한 측정값의 이력현상을 피하기 위하여 전단속도를 하강계단식으로 설정하여 측정하였으며, 측정된 전단응력의 직선회귀분석을 통하여 Fig. 2 (b)와 같이 Bingham 모델로 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 플라이애시 및 바잘트 섬유의 기초 품질 특성

3.1.1 플라이애시의 유동특성

Fig. 3 및 Fig. 4는 FA 혼합률에 따른 각 배합의 모르타르 플로우 및 SP제 사용량을 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과 OPC의 플로우는

Fig. 3. Mortar flow according to replacement ratio of FA

Fig. 4. SP contents according to replacement ratio of FA

170mm로 나타났으며, FA 혼합률 10% 증가에 따라 플로우가 약 5~10% 증가하는 경향이 나타났다. 또한 Fig. 4의 결과 FA 혼합률 10% 증가에 따라 SP의 사용량은 약 7~10% 감소하는 경향이 나타났다. 보다 정량적으로 평가하기 위하여 레오미터를 활용하여 레올로지를 측정한 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6이다. Fig. 5 및 Fig. 6의 결과 소성점도는 FA 혼합률 10% 증가에 따라 약 5~10% 증가하는 것으로 나타났으며, 항복응력의 경우 FA 혼합률 60% 수준으로 감소하였다가 FA 혼합률 증가에 따라 증가하는 경향이 나타났다. FA혼합률 증가에 따라 목표 플로우를 만족하기 위한 SP가 감소한 원인은 Fig. 7와 같이 FA의 3가지 특성에 의한 것으로 보고되고 있다(Choi et al, 2012). 첫 번째는 FA의 구형인 입형을 가지고 있으므로 볼-베어링 역할에 따른 유동성 향상(Fig. 7 (a)), 둘째 FA가 OPC와 혼합되면서 결합재의 입도분포가 넓어짐에 따른 유동성 향상(Fig. 7 (b))(Lee 2003), 마지막으로 FA의 높은 제타전위

에 따라 정전기적 반발효과 증가에 따른 입자간 응집억제로 유동성이 향상(Fig. 7 (c))되는 것으로 나타난다(Choi 2014). 따라서 FA

(a) Spherical particle shape

Fig. 5. Bingham rheology curve according to replacement ratio of FA

Fig. 6. Plastic viscosity and yield stress according to replacement ratio of FA

(b) Wide particle size distribution

(c) Electrostatic repulsion (zeta potential)

Fig. 7. Three properties of FA

의 이와같은 효과는 작업성이 크게 감소하는 섬유보강 모르타르 또는 섬유보강 콘크리트에 적용시 OPC만을 적용한 배합과 비교하여 워커빌리티 증가뿐만 아니라 FA 혼합률 증가에 따라 화학 혼화제의 사용량도 감소되기 때문에 경제적인 제도가 가능한 것으로 판단된다. 또한 섬유 분산성의 경우에는 모르타르 매트릭스 자체에 어느 정도의 점성을 가지고 있어야만 섬유 뭉침 현상저감 및 분산이 효율적으로 이루어지기 때문에 FA를 다량 혼합함으로써 증가되는 점성을 통하여 섬유분산 및 워커빌리티 확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

3.1.2 바잘트 섬유의 유동특성

섬유로 보강된 모르타르 및 콘크리트의 경우 일반적으로 섬유 뭉침 현상 또는 워커빌리티가 크게 감소하는 경향을 나타낸다 (Choi et al. 2014). 따라서 BF를 적용한 배합의 경우 섬유 뭉침현상을 저감하고 워커빌리티를 확보할 수 있도록 최적의 화학 혼화제 적용범위를 평가하고자 SP제 사용량 및 VA 사용량에 따라 모르타르 플로우, 섬유 분산성 및 레올로지를 측정하였다. 또한 BF를 혼합한 모든 배합은 고형분 20%의 SP제는 유동성 향상시키는 데 있어서 성능이 떨어지므로 고형분 25%를 적용하여 배합을 실시하였다. Fig. 8은 OPC 기준 배합에 총 체적의 1%의 20mm BF를 혼합한 배합에 대하여 SP 사용량에 따른 모르타르 플로우를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 BF를 혼합하지 않은 배합의 경우 SP 1.3%에서 목표 플로우인 180mm를 만족하는 것으로 나타났으며, BF 1% 혼합시 섬유 뭉침 현상과 함께 140mm 플로우로 나타났다. SP제 사용량을 0.2% 증가시킨 1.5%의 경우 섬유 뭉침 현상은 해소되지 않았으나 플로우가 약 7% 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 SP제 사용량 1.5% 이후 증가량에 대해서는 더 이상의 플로우 증가는 나타나지 않았으며, 약 4배이상 사용한 경우에도 플로우 증가는 나타나지 않았다. 또한 재료분리가 발생하여 푸석한 형태의 물성으로 나타남에 따라 SP 사용량 증가는 섬유의 분산성 개선에 효과가 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서 재료분리가 발생하지 않는 수준에서 플로우 값을 갖는 SP 1.5%를 기준으로 하여 VA를 첨가하여 플로우와 함께 섬유 분산성을 평가하였다. Fig. 9는 VA 첨가에 따른 플로우 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 VA 첨가량 증가에 따라 플로우가 약 7~10% 증가하는 경향이 나타났으며, VA 첨가량 0.6% 이상의 경우 섬유 뭉침현상이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통하여 BF를 사용한 배합의 플로우 및 섬유 분산성을 위해서는 SP 1.5%와 VA를 0.6%를 표준으로 하고 BF의 길이 및 혼합량에 따라 VA 첨가량 조절을 통하여 섬유 뭉침 현상을 저감

Fig. 8. Mortar flow according to dosage of SP

Fig. 9. Mortar flow according to dosage of VA

할 수 있을 것으로 판단되지만 VA는 기본 매커니즘이 내부에 갇힌 공기를 발생시키므로 강도저하에 유의하여 사용량을 결정하거나 소포제 등을 활용하여 기포를 제거하여야 할 것으로 판단된다. Fig. 10 및 Fig. 11은 BF를 혼합한 배합의 SP제 사용량 및 VA 첨가에 따른 모르타르 플로우 측정사진을 나타낸 것이다. Fig. 12 및 Fig. 13은 VA 첨가량에 따른 빙행 레올로지 곡선과 소성점도 및 항복응력을 나타낸 것이다. Fig. 12 및 Fig. 13의 결과 섬유 분산성이 개선된 VA 0.6% 이상의 경우에는 소성점도 및 항복응력 증가와 함께 직선수준의 선형 회귀곡선을 얻을 수 있었으나 이하의 경우에는 섬유 뭉침현상으로 인하여 굴곡된 형태로 나타나 챔버내 충전이 어렵고 측정 데이터의 신뢰성이 떨어지는 것으로 나타났다.

Fig. 10. Test result of mortar flow according to SP

Fig. 11. Test result of mortar flow according to VA

Fig. 12. Bingham rheology curve according to dosage of VA

Fig. 13. Plastic viscosity and yield stress according to dosage of VA

3.2 바잘트 섬유 및 하이볼륨 플라이애시를 활용한 모르타르의 유동특성

Fig. 14는 OPC와 FA50의 BF 길이에 따른 모르타르 플로우를 나타낸 것이며, Fig. 15 및 Fig. 16는 OPC 및 FA50의 소성점도 및 항복응력을 나타낸 것이다. Fig. 14의 결과 BF의 길이에 관계없이 모든 배합에서 FA50이 섬유 분산성뿐만 아니라 플로우 측정값도 큰 경향이 나타났으며, 본 연구의 경우 FA50의 6, 20 및 30mm BF를 적용한 배합이 OPC와 비교하여 플로우가 약 17, 20 및 25% 증가하는 결과가 나타났다. 또한 Fig. 15 및 Fig. 16의 결과 FA 혼합에 따른 소성점도 및 항복응력의 증가가 섬유 분산성 개선 및 플로우 향상에 기여하여 OPC보다 항복응력이 약 18% 최대 36% 낮아지는 경향으로 나타남에 따라 BF를 혼합한 배합은 OPC 단독사용보다는 FA의 다량 사용을 통하여 SP제 사용량 감소, VA 첨가량 감소, 소성점도 증가에 따른 섬유 분산성 개선, 이를 통하여 BF를 활용한 모르타르 배합의 소성점도 및 항복응력의 감소효과로 이어

Fig. 14. Mortar flow of OPC and FA50 according to length of BF

Fig. 15. Plastic viscosity and yield stress of OPC according to length of BF

Fig. 16. Plastic viscosity and yield stress of FA50 according to length of BF

저 결과적으로 소요 플로우 향상을 통한 워커빌리티 향상 효과가 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

바잘트 섬유와 하이볼륨 플라이애시가 콘크리트의 유동특성에 미치는 영향을 모르타르 수준에서 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 바잘트 섬유를 혼합한 모르타르의 플로우 및 레올로지 평가결과, 섬유 혼합 후 플로우 및 섬유 분산성 개선에는 SP를 과다투입시 재료분리 현상이 발생하므로 점성부여에 따른 VA가 더 유효한 것으로 나타났다. 그러나 VA를 사용할 경우에는 내부 기포 발생에 인한 강도저하 문제에 대하여 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.
2. FA 혼합률에 따라 모르타르 매트릭스 자체의 소성점도 및 항복응력을 증가시키지만 섬유가 혼합된 배합의 경우에는 FA 특성에 기인하여 섬유 분산성 개선효과, 모르타르 매트릭스 자체의 소성점도 및 항복응력을 감소시켜 소요 플로우 향상을 통한 워커빌리티 향상 효과가 있는 것으로 판단된다.
3. FA 혼합률이 증가할수록 강도저하 현상, 특히 조기강도에 대한 문제가 발생할 것으로 판단되지만 바잘트 섬유 혼합시 압축강도가 증가하는 경향이 있는 것으로 보고되고 있으므로(Tehmina Ayub et al. 2014) FA를 다량 혼합할 경우 바잘트 섬유 사용에 따른 강도보상에 대하여 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구지원(13RDRP-B066780)에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- BS EN 1992-1-1. (2004). Eurocode 2, The British Standards Institution.
- Choi, Y.W., Choi, B.K., Park, M.S., Sung, D. (2014). "A Study on the Rheology Properties for Development of Sprayed High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites for Protection and Blast Resistant," Proceedings of Korean Recycled Construction Resource Institute, 188-196.
- Choi, Y.W., Park, M.S., Choi, B.K., Oh, S.R. (2014). "The Properties of Strength Development of High Volume Fly Ash

- Concrete with Reduction of Unit Water Content,” Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute, **2(1)**, 46–51.
- Choi, Y.W., Chu, S.B., Park, M.S., Kim, J.H., Kim, T.H., Kim, K.H. (2012). “The Effect of HVFA on the Reduction of Unit Water of Concrete,” Proceedings of Korean Recycled Construction Resource Institute, **12(1)**, 176–179.
- IPCC. (2007) “Climate Change 2007–Synthesis Report,” Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jeon, S.H., Kim, H.D. (2009). “Physical Properties of Basalt Chopped Fiber Reinforced Cement Composite,” Journal of The Korea Academia–Industrial Cooperation Society, **10(6)**, 1298–1303.
- Kim, J.M., Kim, K.N. (2011). “Basalt of Cheorwon, and Industrial Fibers,” Research Institute for Gangwon, Reports of Policy, 1–11.
- Kim, S.S., Choi, S.J., Jeong, Y. (2009). “An Experimental Study on the Strength Development Properties of HVFA Concrete by Fly-ash Replacement Ratio,” Proceeding of Korea Concrete Institute, **21(2)**, 279–280.
- Korea Conformity Laboratories. (2011). “Development & Commercialization of Green Construction Materials utilizing High Volume Coal Combustion Products,” Korea Conformity Laboratories.
- Korea Meteorological Administration. (2012). “The Prospect Report on Climate Change of the Korean Peninsula”.
- Lee, S.H., Kim, H.J.. (2003). Etsuo Sakai, Masaki Daimon, “Effect of Particle Size Distribution of Fly ash–Cement System on the Fluidity of Cement Pastes,” Cement and Concrete Research, **33(2)**, 763–768.
- P.Kumar Mehta. (2004). “High–Performance, High–Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development,” International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology.
- Tehmina Ayub, Nasir Shafiq, M. Fadhil Nuruddin. (2014). “Mechanical Properties of High–Performance Concrete Reinforced with Basalt Fibers,” Journal of Procedia Engineering, **77**, 131–139.