폐섬유를 활용한 콘크리트 벽돌의 압축강도 평가를 위한 실험적 연구

Experimental Study on the Evaluation of the Compressive Strength of Concrete Bricks Containing Waste Fiber

유재은* · 이현우** · 안성노*** · 신재용**** · 정종원*****

Ryou, Jaeeun*, Lee, Hyunwoo**, Ahn, Seongnoh***, Shin, Jaeyong****, and Jung, Jongwon*****

Abstract

Owing to the environmental problems of the 21st century, such as global warming and soil and water pollution, environmental improvement has been recognized as an important issue. The average amount of industrial waste generated nationwide was 160,000 tons per day in 2016, which was enough to cause various environmental problems. Recycling is recognized as the most ideal treatment method because the disposal, incineration, and recycling of waste fiber, which is an industrial waste, and landfill cause many environmental problems such as subsidence, soil pollution, and carbon dioxide emission. Thus, in this study, concrete bricks were produced using waste fiber as the material, and the unconfined compressive strength characteristics according to the mixing amount and blending ratio of the waste fiber were obtained. In addition, the crystal structure of the concrete brick was visualized and analyzed using a scanning electron microscope (SEM), and the physical structure of the concrete brick made from waste fiber was obtained by X-Ray diffraction (XRD). As a result of the experiment, the uniaxial compressive strength of the concrete bricks decreased for increasing amounts of waste fiber. However, there is a value that satisfies the minimum uniaxial compressive strength standard for waste fiber incorporation, which is expected to be commercialized in the future.

Key words : Waste Fiber, Recycling, Concrete Brick, Pollution, Compressive Strength

요 지

21세기에 이르러 지구온난화, 토양오염 및 수질오염 등과 같은 환경적 문제에 직면하면서 환경 개선은 중요한 문제로 인식되고 있다. 전국에 발생하는 산업폐기물은 2016년 기준 하루 평균 160,000톤이며, 이는 다양한 환경문제를 일으키기에 처리가 필수적이다. 산업폐기물 중 하나인 폐섬유의 처리방법은 매립, 소각 및 재활용이 있으며 매립과 소각은 지반침하, 토양오염 및 이산화탄소 배출 등과 같은 많은 환경 문제를 유발하기 때문에, 재활용이 가장 이상적인 처리방법으로 인식되고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 폐섬유를 재료로 활용하여 콘크리트 벽돌을 제작하였으며, 폐섬유의 혼입량 및 배합비 변화에 따른 일축압축강도 특성을 파악하였다. 또한 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 콘크리트 벽돌의 결정 구조를 시각화하여 해석하였으며, X선 회절분석기(XRD)를 이용하여 폐섬유가 혼입된 콘크리트 벽돌의 물리적 구조 탐색 및 구성 성분을 확인하였다. 실험결과, 폐섬유의 혼입량이 증가할수록 콘크리트 벽돌의 일축압축강도가 감소하지만, 폐섬유 혼입에도 최소 일축압축강도 기준을 만족하는 값이 존재하기에, 이는 추후에 상용화가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 폐섬유, 재활용, 콘크리트벽돌, 환경오염, 압축강도

*정회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: ygamja17@naver.com)

Member, Master Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

**충북대학교 토목공학과 석사과정

Master Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

***충북대학교 토목공학과 석사과정

Master Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

****충북대학교 토목공학과 석사과정

Master Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

*****교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학부 부교수(Tel: +82-43-261-2405, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

1. 서 론

전 세계적으로 산업혁명 이후 경제의 성장과 기술의 발전은 인류에게 있어 많은 도움을 주었지만 화석연료의 남용으로 인해 기후변화, 지구온난화, 대기오염, 자원고갈 등 환경적, 사회적 문제가 발생되고 있다. 특히 지구온난화는 21세기의 중요한 환경문제로 인식되고 있으며 이산화탄소는 지구온난화의 주원인이기 때문에 저감이 필요하다. 콘크리트는 20세기서부터 가장 기초적인 토목, 건축재료로써 다양하게 이용되고 있다. 그러나 전체 이산화탄소 배출량 중 8%는 콘크리트 제조 시 배출되고 있다(Cho et al., 2012). 예를들어 1 ton의 시멘트를 생산할 때 0.8 ton의 이산화탄소가 발생(Damtoft et al., 2008)하기 때문에 친환경 콘크리트 활용 또는, 시멘트의 저감을 통하여 이산화탄소 배출량을 감소가 필요한 실정이다. 이러한 이유로 폐유리(Waste-Glass), 폐플라스틱(Waste-Plastic), 폐지(Waste-Paper) 및 폐 PET (Waste-Poly Ethylene Terephthalate) 등 다양한 산업폐기물을 재활용하여 Calcium Sulfo Aluminate (CSA) 팽창재, 철근-콘크리트 보와 같은 콘크리트 구조물 등을 제작하는 연구가 국내외로 활발히 진행 중이며(Yoon et al., 2004), 시멘트의 일부를 고로슬래그(Blast furnace slag)나 플라이애시(Flyash) 등과 같은 산업부산물로 대체하여 친환경 콘크리트를 제작하는 연구(Kim et al., 2004; Han et al., 2009; Lee et al., 2009; Yuan et al., 2018) 또는 시멘트를 사용하지 않는 지오폴리머(Geopolymer)나 고로슬래그 기반 알칼리 활성 콘크리트에 대한 연구 및 무시멘트 복합체(Non-Cement Complex)의 평가(Yang et al., 2006; Hong and Seo, 2010)와 같은 연구도 활발히 진행 중이다(Song et al., 2010; Yang et al., 2008; Yang et al., 2009). 또한, 콘크리트에 황토(Loess)와 고로슬래그(Blast furnace slag)를 혼입하거나 활성 황토(Active Loess), 셀룰로오스 섬유(Cellulose Fiber) 및 재생 PET 섬유 등을 혼입하는 연구도 진행되어왔다. 이외에도 콘크리트 파괴 시, 취성파괴의 양상을 보이는 성질을 개선하고자 연성이 큰 섬유를 콘크리트에 보강하여 성능을 향상시키려는 연구가 진행되었다(Dwarakanath and Nagaraj, 1992; Banthia and Sheng, 1996; Bayasi and Zeng, 1997; Mu et al., 2000). 이전 연구에서 보강재로 활용했던 섬유를 대신하여 폐섬유(WF)가 활용된다면 산업폐기물인 폐섬유(WF)의 재활용이 가능하며, 이는 산업폐기물의 효과적인 처리 및 자원순환의 이점을 동시에 얻을 수 있을거라 기대된다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험 재료

본 연구에서 사용된 실험 재료들은 폐섬유(Waste-Fiber, WF), 보통 포틀랜드 시멘트(Cement), 모래(Sand) 및 석분(Stone dust)이다. 시멘트는 KS L 5201 규정에 의거하여 국내에서 제조되는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 모래는

국내에서 제조되는 사모래를 사용하였으며, 순환 골재인 석분은 원가 절감을 위해 공사현장에서 발생하는 것으로 활용하였다. 모래와 석분의 단위중량은 2.65 kg/cm^3 이며 시멘트의 단위중량은 3.15 kg/cm^3 이다. 폐섬유(WF)는 면과 폴리에스테르의 조합으로 이루어져 있다.

2.2 콘크리트 벽돌 제작

본 연구에서는 경제성과 시공성이 고려된 최적의 배합비를 도출하기 위해 다양한 배합비를 선정해 두었다. 배합비의 선정은 실제 현장에서 제작되는 기본 콘크리트 벽돌($190 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 57 \text{ mm}$)의 중량배합을 고려하여 사모래와 석분의 양을 동일한 절대용적의 폐섬유(WF)로 대체하였다(KS F 4004). 실험과정은 다음과 같다. 첫째, 선정된 배합비에 맞게 중량배합을 결정한다. 둘째, 결정된 중량배합에 따라 폐섬유(WF), 시멘트, 모래, 석분, 물을 교반기를 활용하여 10여분간 고르게 섞는다. 셋째, 사전에 제작된 나무틀 거푸집($190 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 57 \text{ mm}$)에 교반된 모르타르를 타설한 뒤, 다짐봉(2.5 kg)을 연직으로 50 cm의 높이에서 3회 낙하시켜 다짐을 실시하였다. 또한 특징인이 다짐을 실시함으로써 실험자의 숙련도에 따른 다짐의 영향을 최소화하였다. 넷째, 제작된 콘크리트 벽돌을 28일간 상온 양생을 실시한다. 이때 상온 양생 온도 22°C 에서 실시하였다.

2.3 실험방법

콘크리트 벽돌은 각 배합비 당 폐섬유(WF)의 혼입량을 0 g, 20 g, 40 g, 60 g, 80 g, 100 g으로 변화시켜 6가지 종류의 벽돌을 제작하였다. 본 연구에서 배합비는 시멘트:모래:석분의 비로 나타내었으며, 각각의 배합비에 따라 일축압축강도 실험을 실시하였다. 콘크리트 벽돌의 양생기간은 28일 기준으로 하여, 양생이 완료된 이후 일축압축강도 실험을 실시하였다. 총 15개의 콘크리트 벽돌을 제작한 후, 일축압축시험장비(Universal Testing Machine, UTM)를 활용하여 일축압축강도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 폐섬유(WF) 혼입량에 따른 강도 변화

Fig. 1은 폐섬유(WF) 양에 따른 일축압축강도 변화를 나타낸다. 모든 실험결과에서 폐섬유(WF)의 양이 증가함에 따라 일축압축강도가 감소함을 나타낸다. 시멘트와 석분, 모래의 비율이 각각 1:1:2의 부피비를 갖는 콘크리트 벽돌은 폐섬유(WF)의 양이 0 g에서 60 g로 증가함에 따라 일축압축강도는 37.63 MPa 에서 10.45 MPa 로 감소하였다. 또한 폐섬유(WF)가 80 g 이상 혼입된 콘크리트 벽돌의 일축압축강도는 13 MPa 이하이므로 실시하지 않았다(KS F 4004). 1:2:3의 부피비를 갖는 콘크리트 벽돌은 폐섬유(WF)의 양이 0 g에서 100 g로 증가함에 따라 일축압축강도는 11.05 MPa 에서 1.35

MPa로 감소하였으며, 폐섬유(WF)가 혼입되지 않은 콘크리트 벽돌의 일축압축강도 또한 13 MPa를 넘지 못하였고(Fig. 1b), 1:2:1.5의 부피비를 갖는 콘크리트 벽돌은 폐섬유(WF)의 양이 0 g에서 100 g로 증가함에 따라 일축압축강도는 42.65 MPa에서 6.52 MPa로 감소하였으며(Fig. 1c), 마지막으로 1:0.85:1.2의 부피비를 갖는 콘크리트 벽돌은 폐섬유(WF)의 양이 0 g에서 40 g로 증가함에 따라 일축압축강도는 34.33 MPa에서 8.5 MPa로 감소하였다(Fig. 1d). 폐섬유(WF) 혼입량에 따른 강도 변화는 공통적으로 폐섬유(WF)의 혼입량이 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 그 이유로써는 첫째, 폐섬유(WF) 콘크리트 벽돌의 배합 시 폐섬유(WF)의 혼입으로 인한 잔골재량의 감소와 둘째, 폐섬유(WF)와 모르타르의 재료분리현상으로 벽돌 내의 공극 증가로 인한 강도 감소로 판단된다.

3.2 배합비에 따른 강도 변화

Table 1은 KS F 4004 규정에 의거하여 콘크리트 벽돌의 최소 일축압축강도의 값(13 MPa)을 만족하는 폐섬유(WF) 콘크리트 벽돌 시험체의 중량배합표로써, 제작된 시험체 당 각각의 물, 시멘트, 모래 및 석분의 양을 나타낸다. Fig. 2는 다양한 배합비에서의 콘크리트 벽돌의 일축압축강도의 변화를 나타낸다. 각 배합비 당 폐섬유(WF)가 혼입되지 않은 콘크리트 벽돌을 기준으로 T3, T1, T4, T2의 순으로 일축압축강도가 감소하며, 또한 폐섬유(WF)가 혼입된 경우에도 위와 유사한 거동을 보인다(Table 2). 가장 높은 일축압축강도를 보인 T3의 배합비는 1:2:1.5이며, T1과 T4와 비교하였을 때, 단위 벽돌 부피당 시멘트의 함량이 제일 낮지만 골재량과 시멘트량의 합이 T1, T4보다 높기 때문에 일축압축강도가 크다고 판단된다.

Fig. 1. The Variation of Uniaxial Compressive Strength of Concrete Bricks Including Waste-fiber

Table 1. The Mix Proportion of 6 Types of Concrete Bricks

Number	Mixing ratio	Water (g)	Cement (g)	Sand (g)	Stone dust (g)	Waste-fiber (g)
T1-1	1:1:1.2	199.81	570.89	480.27	576.32	0
T1-2	1:1:1.2	199.81	570.89	438.19	525.83	20
T3-1	1:2:1.5	153.45	438.42	737.66	553.24	0
T3-2	1:2:1.5	153.45	438.42	683.21	512.41	20
T4-1	1:0.85:1.2	207.03	591.51	422.98	597.14	0
T4-2	1:0.85:1.2	207.03	591.51	383.47	541.36	20

Table 2. A Comparison of Previous Result of Concrete Brick Using Other Raw Materials

Raw material	Compressive Strength (MPa)	Absorption (%)	Reference
Waste-Fiber	23.2	65	
Waste Ash	11.1	27	Kim et al. (2009)
Charcoal	27	-	Kim et al. (2005)
Blast Furnace Slag and Recycled Fine Aggregate	19.0	6	Ha et al. (2017)

3.3 X-ray Diffraction (XRD)

Fig. 2a는 X선 회절분석기(X-ray Diffractometer)를 사용하여 콘크리트 벽돌의 화학적 성분 분포를 나타낸 것이다. 콘크리트의 주성분인 석영화된 이산화규소(SiO_2 (Quartz), SQ), 이산화규소(SiO_2 (Silicon Oxide), SS) 및 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$, Ca)이 관찰되었으며, 석영화된 이산화규소가 165000 cps 값으로 가장 높은 에너지로 관찰되었다. Fig. 2b는 폐섬유(WF)가 혼입된 콘크리트 벽돌의 화학적 성분 분포를 나타낸 것으로 Fig. 2a와 비교하였을 때, 콘크리트의 주성분인 석영화된 이산화규소(SQ), 이산화규소(SS) 및 수산화칼슘(C)은 동일하게 관찰되었으나 폐섬유(WF)의 혼입으로 인해 지르코늄(Zr), 마그네슘(Mg) 등의 원소들이 추가적으로 관찰되었다.

3.4 Scanning Electron Microscope (SEM)

폐섬유(WF)가 혼입된 콘크리트 벽돌의 구조를 시각적으로 분석하기 위하여 SEM 장비를 사용하였으며, Fig. 3은 콘크리트 벽돌의 입자 구조를 나타낸다. T3-1, T3-2 시험체를 28일간 양생시킨 후 샘플을 채취한 뒤, SEM을 통하여 100배, 2000배, 10000배, 20000배 확대한 입자들의 형상을 이미지화하여 분석하였다. Figs. 3a, 3b 및 3c는 T3-1 시험체의 샘플을 채취하여 각각 100배, 2000배, 20000배 확대하였다.

Fig. 3a는 T3-1 시험체를 100배 확대한 SEM 이미지로써 콘크리트 벽돌의 원재료인 시멘트, 물, 모래 및 석분의 결정구조를 확인할 수 있으며, Figs. 3b 및 3c를 확인한 결과, 시멘트의 수화반응으로 인해 CaO , SiO_2 , H_2O 로 이루어진 C-S-H 구조 및 결정체 내부에 존재하는 물의 증발에 따라 공극이 발생한 것을 확인할 수 있다. Figs. 3d, 3e 및 3f는 T3-2 시험체의 샘플을 채취하여 각각 100배, 2000배, 10000배 확대한 SEM 이미지를 나타낸 것으로, Figs. 3a, 3b 및 3c와 달리 폐섬유(WF)의 혼입이 시각적으로 뚜렷이 나타난다. Figs. 3d, 3e, 3f에서 폐섬유(WF)의 일부는 C-S-H 구조와의 물리적 결합을 확인할 수 있으나, 다른 부분에서 그렇지 못한 것으로 보아, 폐섬유(WF)의 혼입이 일축압축강도의 저하를 일으킨다고 판단된다.

3.5 용출시험을 통한 환경 유해성 평가

Table 3은 폐섬유(WF)가 혼입된 콘크리트 벽돌의 환경 유해성 평가를 실시한 결과를 나타낸다. KS F 4004 규정에 따라 콘크리트 벽돌의 최소 일축압축강도 조건을 만족하는 벽돌은 T1-1, T1-2, T3-1, T3-2, T4-1, T4-2로 총 6개이며, Table 3과 같이 6개의 콘크리트 벽돌은 모두 환경 유해성 평가 기준치보다 낮은 수치를 나타내므로, 본 연구에서 제작된 콘크리트 벽돌 모두 환경에 무해하다고 판단된다.

Fig. 2. XRD Results of Waste Fiber (WF), Mortar, Waste-fiber+Mortar

(a) T3-1 WF 0 g

(b) T3-1 WF 0 g

(c) T3-1 WF 0 g

(d) T3-2 WF 20 g

(e) T3-2 WF 20 g

(f) T3-2 WF 20 g

Fig. 3. SEM Images of C-S-H Structure Fiber Composites

Table 3. Evaluation of Environmental Hazard for Six Specimens Satisfying Minimum Uniaxial Compressive Strength of Bricks and Raw Materials

Sample	CN ⁻ (ppm)	Cr ⁶⁺ (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	As (ppm)	Pb (ppm)	Hg (ppb)
Reference value	<1	<1.5	<3	<0.3	<1.5	<3	<5
Waste-fiber	-	0.04	0.01	-	-	0	0.0018
Cement	-	0.04	0	-	-	0	0.0023
Sand	-	0.05	0.01	-	-	0.01	0.0428
Stone dust	-	0.03	0	-	-	0	0.0013
T1-1	-	0.04	0	-	-	0	0.0154
T1-2	-	0.03	0	-	-	0.02	0.0151
T3-1	-	0.04	0	-	-	0	0.0125
T3-2	-	0.03	0.02	-	-	0.04	0.0123
T4-1	-	0.03	0	-	-	0.01	0.0136
T4-2	-	0.04	0.01	-	-	0	0.0134

4. 결 론

본 연구에서는 산업폐기물 중 하나인 폐섬유(WF)를 활용하여 기초 건설재료인 콘크리트 벽돌에 혼합하여 제작된 폐섬유(WF) 콘크리트 벽돌의 사용 가능성을 일축압축강도, 환경유해성 및 SEM, XRD를 활용한 구조 특성 연구를 통하여 평가하였다. 폐섬유(WF) 혼입량을 0 g, 20 g, 40 g, 60 g, 80 g, 100 g으로 변화시켜 총 6가지 종류의 콘크리트 벽돌을 제작하였으며, 콘크리트 벽돌 제작 시 폐섬유(WF) 혼입량 및 배합비의 변화에 따른 일축압축강도 특성을 파악하였다. 또한, SEM을 사용하여 폐섬유(WF)가 혼입된 콘크리트 벽돌의 구조를 시각적으로 확인하였으며, XRD를 이용하여 폐섬유(WF)가 혼입된 콘크리트 벽돌의 물리적 구조 탐색 및 구성 성분을 확인하였다. 또한, 새로이 제작된 폐섬유(WF) 콘크리트 벽돌의 환경유해성을 평가하였다. 본 연구의 요약 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 폐섬유(WF)의 혼입량이 증가함에 따라 콘크리트 벽돌의 일축압축강도는 감소하는 경향을 보였으며, 폐섬유(WF)가 혼입되지 않는 벽돌과 폐섬유(WF)가 20 g 혼입된 벽돌과의 일축압축강도의 차이가 급격히 발생하였다. 그 결과, 폐섬유(WF)가 40 g 이상으로 혼입된 경우에는 콘크리트 벽돌의 최소 일축압축강도 기준을 만족하지 못하였다.
- (2) 각각 시멘트, 모래 및 석분비 1:1:1.2, 1:2:3, 1:2:1.5, 1:0.85:1.2의 4가지 세트에 대해 실험을 실시한 결과, 1:2:1.5의 배합비에서 가장 높은 일축압축강도 값이 측정되었다. 이는 단위 부피에서의 시멘트, 모래, 석분량의 합이 가장 많기 때문이라고 판단된다. 또한 1:2:1.5의 배합비에서 폐섬유(WF)가 20 g 혼입된 시험체에서 가장 높은 일축압축강도값이 측정되었다.
- (3) 1:2:1.5의 배합비에서 폐섬유(WF)가 각각 0 g, 20 g

혼입된 두 시험체에 대하여 XRD 실험을 실시한 결과, 두 시험체 모두 콘크리트의 주성분인 석영화된 이산화규소(SiO₂), 이산화규소(SS) 및 수산화칼슘(Ca) 등이 관찰되었으나, T3-2는 폐섬유(WF)의 혼입으로 인해 지르코늄(Zr), 마그네슘(Mg) 등의 성분이 추가적으로 관찰되었다.

- (4) SEM 이미지로부터 폐섬유(WF)를 포함한 콘크리트 벽돌의 결정 구조를 시각화하여 해석한 결과, 일부 C-S-H 구조와 폐섬유(WF)의 물리적인 결합을 확인하였으나, 대부분의 C-S-H 구조와 폐섬유의 결합이 이루어지지 않은 것이 폐섬유(WF)의 혼입으로 인한 콘크리트 벽돌의 일축압축강도의 감소를 나타낸 것으로 판단된다.
- (5) CN⁻, Cr⁶⁺, Cu, Cd, As, Pb, Hg에 대해서 환경 유해성평가를 실시한 결과, 모든 검출량에 대하여 기준치보다 낮게 측정되었다. 이는 폐섬유(WF) 콘크리트 벽돌이 환경에 무해하다는 것을 입증한다.

본 연구에서는 산업폐기물 중 하나인 폐섬유(WF)를 혼입하여 다양한 배합비로 콘크리트 벽돌을 제작하여 일축압축강도를 평가한 결과, 폐섬유(WF)의 혼입량이 증가함에 따라 일축압축강도가 감소하는 결과를 보였다. 이는 콘크리트 벽돌 제작 시 폐섬유(WF)의 혼입으로 인한 모래와 석분량의 감소 및 폐섬유(WF)-모르타르간의 부분적 결합으로 인해 콘크리트 벽돌 내의 공극이 증가한 것으로 판단된다. 따라서, 콘크리트 벽돌 제작 시 폐섬유(WF)-모르타르간의 완전한 결합이 이루어진다면 본 연구보다 향상된 일축압축강도를 얻을 수 있다고 사료되며, 더 나아가 본 연구에서 도출된 최적의 배합비를 기초자료로 활용하여 향후, 유사한 연구가 진행된다면 폐기물의 효과적인 처리 및 자원순환의 측면에서 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- Banthia, N., and Sheng, J. (1996). Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 18, No. 4, pp. 251-269.
- Bayasi, M.Z., and Zeng, J. (1997). Composite slab construction utilizing carbon fiber reinforced mortar. *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 4, pp. 442-446.
- Cho, C.G., Lim, H.J., Yang, K.H., Song, J.K., and Lee, B.Y. (2012). Basic mixing and mechanical tests on high ductile fiber reinforced cementless composites. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, pp. 121-127.
- Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., and Gartner, E.M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 115-127.
- Dwarakanath, H.V., and Nagaraj, T.S. (1992). Deformational behavior of fiber reinforced concrete beams in bending. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 10, pp. 2691-2698.
- Ha, J.H., Ha, G.J., and Yi, D.R. (2017). Performance evaluation for alkali-activated slag concrete bricks using the blast furnace slag and recycled fine aggregate. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 19, No. 3, pp. 127-133.
- Han, C.G., Kim, S.H., and Son, H.J. (2009). Engineering characteristics analysis of high strength concrete followed in replacement ratio increase in blast furnace slag. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 4, No. 3, pp. 62-68.
- Hong, G.H., and Seo, M.C. (2010). Bond performance evaluation of the eco-friendly concrete mixed with hwang-toh and blast furnace slag. *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 26, No. 3, pp. 19-26.
- Kim, H.S., Jung, B.G., and Kang, D.H. (2009). Quality characteristics of waste ash brick with incineration ash of municipal solid wastes. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 36-41.
- Kim, K.S., Jang, S.Y., and Lee, K.M. (2004). Compressive strength and durability characteristics of fly ash concrete. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 4A, pp. 703-711.
- Kim, Y.M., Chung, Y.G., and Ryu, H.K. (2005). A study on the properties of concrete bricks and radon releases using charcoal. *Proceedings of Annual Conference*, The Regional Association of Architectural Institute of Korea, Vol. 1, No. 1, pp. 443-446.
- Lee, S.S., Song, H.Y., and Lee, S.M. (2009). An experimental study on the influence of high fineness fly ash and water-binder ratio on properties of concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 1, pp. 29-35.
- Mu, B., Li, Z., and Peng, J. (2000). Short fiber-reinforced cementitious extruded plates with high percentage of slag and different fibers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 8, pp. 1277-1282.
- Song, J.G., Yang, K.H., Kim, G.W., and Kim, B.J. (2010). Properties of sodium alkali-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS) mortar. *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 26, No. 6, pp. 61-68.
- Yang, K.H., Kim, S.Y., and Song, J.G. (2006). The mechanical characteristics of concrete mixed with activated hwangtoh and specialty cellulose fiber. *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 22, No. 1, pp. 111-118.
- Yang, K.H., Oh, S.J., and Song, J.G. (2008). Mechanical properties of alkali-activated slag-based concrete using lightweight aggregates. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, pp. 405-412.
- Yang, K.H., Sim, J.I., Lee, S., and Hwang, H.Z. (2009). Workability, compressive strength and fire resistance characteristics of cementless alkali-activated lightweight mortars. *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 25, No. 8, pp. 151-158.
- Yoon, S.W., and Rho, J.S. (2004). Preparation and application of CSA expansive additives using

industrial wastes. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 3, pp. 369-374.

Yuan, T., Yang, J.M., Kim, K.D., and Yoon Y.S. (2018). Evaluating strength development and durability of high-strength concrete with 60% of ground-granulated blast furnace slag. *J. Korean Soc. Hazard*

Mitig., Vol. 18, No. 7, pp. 307-314.

<i>Received</i>	January 21, 2019
<i>Revised</i>	January 23, 2019
<i>Accepted</i>	January 30, 2019