



산업부산물의 활성분체 및 세라믹섬유 혼입 콘크리트의 재료성능 평가

Material Performance Evaluation of Ceramic Fiber Reinforced Concrete using Energetically Modified Industrial By-products

최승재¹ · 양달훈¹ · 이태희¹ · 김장호^{2*}

¹연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정, ²연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

Seung Jai Choi¹, Dal Hun Yang¹, Tae Hee Lee¹ and Jang Ho Jay Kim^{2*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

Received 7 September 2018, revised 27 September 2018, accepted 28 September 2018, published online 30 September 2018

ABSTRACT: Social infrastructures and industrial complexes have been actively constructed in South Korea since the 1960s as part of the economic development plan, resulting in rapid industrialization. However, side-effects due to the industrialization have occurred. An increase in industrial by-products or wastes is a typical problem. Although some industrial by-products are recycled in Korea as well as worldwide, some wastes are landfilled or dumped in the sea. Although many researchers have executed various technologies for the disposal of industrial wastes, economic and environmental technologies have not been developed. Thus, this study aims to activate paper and fly ashes during the crush process to overcome the drawback of simple concrete mixed with paper and fly ashes, which cause a reduction in workability and strength, derive an optimal content and replacement ratio of concretes mixed with Energetically Modified Material (EMM), and evaluate the material performance. In addition, the basalt fiber is mixed simultaneously to achieve the reduction of cracks and improve the tensile strength.

KEYWORDS: Ceramic fiber, Concrete, Energetically Modified Material, Fly ash, Paper ash

요약: 한국은 1960년대부터 경제개발의 일환으로 사회기반시설, 공업단지 등이 활발히 건설되었으며 이로 인해 현재까지 산업화가 급격히 이루어졌다. 하지만 산업화에 따라 발생하는 산업부산물 또는 폐기물의 발생량이 점차 증가하고 있다. 일부 산업부산물은 재활용되고 있지만 대부분의 폐기물은 매립되는 실정이다. 이에 따라 산업폐기물 처리를 위한 다양한 방안이 검토되고 있으나 경제성과 환경성을 고려한 기술은 구축되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 제지산업과 화력발전산업에서 발생하는 제지애시, 플라이애시를 활성화하여 적용한 활성분체와 세라믹섬유를 동시 혼입한 콘크리트의 재료성능을 검토하고자 한다. 애시를 분쇄과정에서 활성화시켜 수화도를 높여 물성을 향상시켰으며 동시에 콘크리트의 균열 저감을 위해 세라믹섬유를 동시 혼입하였다. 활성분체 및 세라믹섬유의 재료성능을 검증하기 위하여 KS 규격에 의거하여 원주형 콘크리트 공시체를 제작하였으며 슬럼프 및 재령 28일 압축강도를 측정하였다. 활성분체 플라이애시 20%, 제지애시 10% 혼입 콘크리트에서 활성분체 무혼입 콘크리트 압축강도의 90% 이상으로 나타난 것으로 확인하였다.

핵심어: 세라믹섬유, 콘크리트, 활성분체, 플라이애시, 제지애시

*Corresponding author: jjhkim@yonsei.ac.kr, ORCID 0000-0002-5138-8282

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

한국은 1960년대부터 경제개발의 일환으로 사회기반시설, 공업단지 등이 활발히 건설되었으며 이로 인해 현재까지 산업화가 급격히 이루어졌다. 하지만 산업화에 따른 부작용도 발생하고 있으며, 이 중 대표적 문제점은 산업부산물 또는 폐기물 발생량도 증가한다는 것이다. 한국뿐만 아니라 전 세계적으로 일부 산업부산물은 재활용되고 있기도 하나, 일부 폐기물은 대부분 매립되거나 해양투기 되는 실정이다. 이에 따라 각 국가에서는 산업폐기물 처리를 위한 다양한 법규를 제정·운영하고 있으며, 산업계는 폐기물 법규에 적합한 방안을 도출해야 하는 실정이다. 특히 이 중에서 폐기물 처리문제가 크게 발생하는 산업은 제지산업과 화력발전 산업 등이다 (Korea Environment Corporation 2012). 제지산업과 화력발전의 공정에서 발생하는 제지슬러지, 제지애시, 플라이애시 등의 폐기물 등의 매립 및 투기는 일시적인 방안에 불과하며, 향후 슬러지와 애시의 지속적 처리를 위해서는 경제적이고 효율적인 재활용 방안이 도출되어야 한다.

이러한 폐기물의 재활용을 위하여 건설산업에서는 폐기물을 콘크리트나 모르타르 재료에 시멘트 대체물질로 적용하는 방안을 검토하고 있으며 다양한 연구가 수행되고 있다 (Lee et al. 2003). 다양한 연구 결과에 따르면, 플라이애시의 시멘트 대체율이 높아질수록 콘크리트 내부의 포졸란 반응으로 인하여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 소비가 콘크리트 자체의 pH를 감소시키기 때문에 중성화가 촉진되어 내구성이 감소할 뿐만 아니라 콘크리트 응결시간 등의 지연으로 인한 강도 감소의 콘크리트 품질저하가 발생한다. 또한, 제지애시는 CaCO_3 , CaO , C_3A

($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) 및 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 등으로 구성되어 있으며, 이 중 CaO 성분과 C_3A 성분은 콘크리트에 있어 응결 및 강도에 악영향을 준다. 이는 CaO 가 물과 빠르게 반응하여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 변화하고, C_3A 성분도 수화활성도가 매우 높아 급격히 $\text{CAH}(x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O})$ 수화물로 전이되기 때문이다. 수화과정에서 흡수된 혼합수는 결정수로 변화하여, 결국 작업성 감소로 이어질 수밖에 없다 (Ko et al. 2009). 따라서 작업성 저하와 강도 감소를 저하시키기 위해서 제지애시의 CaO 와 C_3A 성분의 pre-hydration하여 수화물로 전환시킨 후 콘크리트 혼합재로 사용하거나, 석고의 혼합에 따른 응결 지연 방안 등이 검토되고 있다.

또한, 콘크리트가 인장강도가 낮으며 균열이 발생하기 쉬운 취성재료라는 단점을 극복하기 위해서 다양한 건설현장에서 1900년대 중반부터 콘크리트 균열 제어와 인성을 유지하기 위한 목적으로 섬유 보강 콘크리트를 사용해 왔다. 그러나 유기고분자인 섬유와 무기재료인 콘크리트와의 접착력 저하가 고질적 문제로 대두되고 있으며, 콘크리트 폐기 시 사용된 유기 섬유는 장기간의 분해시간이 필요하여 커다란 환경위해 요인이 되기도 한다 (Yoon 2012). 또한 유리섬유, 금속섬유 등의 무기 섬유 보강 섬유는 시멘트의 수화시에 형성되는 알칼리성 환경에서의 강도저하 및 부식의 문제점이 발견되고 있어서 장기간 동안 보강효과를 지속시키기 어렵다는 단점이 있다. 그러나 무기 섬유 중 현무암 섬유는 천연재료인 용암이 굳어져 형성된 현무암만을 사용하여 제조되는 순수한 무기 섬유이다. Table 1과 같이 현무암 섬유는 콘크리트용 섬유 중 높은 인장강도 값과 시멘트 매트릭스와 유사한 비중 값을 보유하고 있다. 또한, 열에 대한 안정성이 뛰어나고, 사용온도가 매우

Table 1. Physical properties of ceramic fiber and cement matrix

Fiber type	Diameter	Specific gravity (g cm^{-3})	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (GPa)	
Steel	5 - 500	7.84	200	0.5 - 2.0	
PolyPropylene	6 - 200	0.91	5 - 77	0.15 - 0.75	
PVA	10 - 20	1.3	2 - 2.5	0.9	
Cellulose	-	1.2	10	0.3 - 0.5	
Carbon	PAN	7 - 9	1.6 - 1.7	230 - 380	2.5 - 4.0
	Pitch	9 - 15	1.6 - 2.15	28 - 480	0.5 - 3.0
Basalt	9 - 13	2.5 - 2.8	85 - 95	3.1 - 4.8	
Glass	9 - 15	2.60	70 - 80	2 - 4	
Cement Matrix	-	2.50	10 - 45	0.004	

넓으며, 고강도, 방음성, 내화학적, 내충격성 등을 고루 갖춘 소재이다. 특히 구성 성분이 자연골재인 현무암 그대로이기 때문에 시멘트와의 접착성이 매우 크며, 폐기 시에도 전혀 환경 저해 요인이 없는 친환경성 섬유소재이다. 이러한 현무암섬유 filament를 절단하여 제조된 현무암 단섬유(Basalt Chopped Fiber)는 시멘트 수화시의 알칼리 조건에 대한 내구성이 뛰어나고, 물성면에서도 유기계 섬유나 유리섬유에 비하여 우수하다 (Jiang et al. 2014, Lipatov et al. 2015).

따라서 본 연구에서는 강도 저하와 작업성 감소를 야기하는 제지애시 및 플라이애시 단순 혼입 콘크리트의 단점을 극복하고자 제지애시 및 플라이애시를 분쇄과정에서 활성화시키고 활성분체를 혼합한 콘크리트의 최적 배합비와 치환율을 도출하고 재료성능을 평가하는 것이다. 또한, 동시에 인장강도를 향상시키고 균열저감을 도출하기 위해서 현무암섬유를 동시 혼입하였다.

2. 산업부산물의 활성분체 재료 및 활성화 방법

애시 및 석고 등을 분쇄 후 적용하는 방안은 미국과 스웨덴 등 석탄회, 화산재, 슬래그 등의 천연 포졸란 물질을 활성화시켜 콘크리트 혼합재로 사용하고 있는 국가의 일부 연구에서만 수행되고 있으며 (Vladimir et al. 1999), 진동밀 등과 같은 분쇄 기기를 이용하여 분쇄된 이와 같은 활성분체를 EMM (Energistically Modified Material)으로 통칭한다. EMM 기술은 입자에 전단력 또는 충격력 등을 가하여 입자 자체를 미세하게 분쇄하기도 하지만, Fig. 1에서와 같이 입자에 균열(Crack)과 전위(Dislocation) 및 격자 결함(Lattice Defect) 등을 발생시켜 활성화하는 것이다. 활성화된 입자는 수화과정에서 활성에너지를 소모하여 수화도를 향상시키는 특징을 발현한다. 즉 활성입자의 에너지를 낮추어 안정한 물질로 변화하려 하는 특징을 이용하는 것이다 (Jeong and Kang 2009). 또한, EMM 기술은 제조공정의 단순화와 탄소 발생량 감소로 인하여 기존 시멘트 제조기술보다 에너지 소비가 적고, 경제성을 확보할 수 있는 신기술이며 (Johansson et al. 1999, Justnes et al. 2005, Yeon et al. 2005), Justnes et al. (2005)은 기계적으로 활성화된 플라이애시를 사용할 경우, 1일 및 7일 수화물 모두에서 좀 더 치밀한 구조를 형성하였다고 하였다.

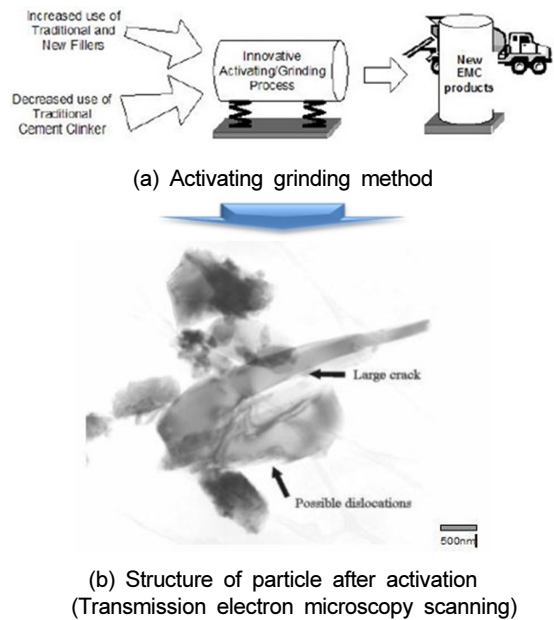


Fig. 1. Introduction of activating grinding method and structure of particle.

Kumar et al. (2007)은 진동밀과 어트리션 밀 등에서 활성화된 플라이애시의 특성을 분석하였는데 특히 진동밀을 사용하여 활성화된 플라이애시가 레미콘 공장에 적용된 경우, 활성 플라이애시 사용은 비활성 플라이애시 사용 보다 월등한 강도 증진효과가 도출되었다고 보고하였다.

3. 최적배합비 선정을 위한 실험 개요

활성분체 (제지애시, 플라이애시) 및 세라믹섬유 혼입 콘크리트의 재료적 성능을 검증하기 위하여 KS F 2405 (콘크리트 압축강도 시험방법), KS F 2402 (콘크리트의 슬럼프 시험 방법)에서 제시하는 시험방법을 통해 콘크리트 압축강도 및 콘크리트의 유동성을 나타내는 슬럼프 시험을 수행한다. 압축강도 시험을 위한 대상부재로는 KS F 2403 (콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법)에 의한 활성분체 및 세라믹섬유 혼입 27 MPa의 설계기준강도로 선정하여 콘크리트의 원주형 공시체를 제작하여, 재령 28일 압축강도를 측정한다. 또한, 적절한 유동성 발현을 위해 목표 슬럼프로 150 - 180 mm 선정하여 활성분체와 세라믹섬유의 최적 혼입 조건을 도출한다.

3.1 배합설계

본 연구에서는 결합재로서 시멘트, 플라이애시 제지 애시를 사용하였고 골재로 잔골재와 굵은골재를 사용하였으며, 혼화제를 첨가하였다. 결합재는 S사에서 만들어진 비중 3.15의 1종 보통 포틀랜드시멘트와 비중이 2.63의 플라이애시 및 비중 2.81의 제지애시를 혼입하여 사용하였다. 잔골재는 비중 2.61의 세척사를, 굵은골재는 비중 2.66, 최대치수 25 mm인 자갈을 사용하였다. 혼화제는 물/바인더비 및 슬럼프를 유지시키려는 목적과 콘크리트의 충분한 유동성을 주어 워커빌리티를 증가시켜 시공을 쉽게하려는 목적으로 AE제 (air-entraining agent)를 모든 배합에 시멘트 대비 0.3%를 사용하였다. AE제의 물리적 특성은 Table 2와 같다. 배합설계는 일반적으로 PC 패널의 27 MPa 압축강도를 기준으로 하여 배합비를 선정한 후, 활성분체를 시멘트 중량비 대비 각 0, 10, 20%로 3수준으로 혼입하여 배합하였으며 섬유 혼입율에 따른 인장성능 평가를 위하여 현무암섬유를 각 0.2, 0.4%로 혼입하였다. 또한, 물/바인더비를 55%로 고정하였으며, 본 연구에서 사용한 활성분체 혼입 콘크리트의 배합비는 아래 Table 3에 나타내었다. 또한, 본 연구에서 선정한 양생 방법은 실제 현장 적용을 위해 기건양생으로 선정하였으며, 전자는 공시체 탈형 후 20°C, 60% 상대습도의 조건에 노출시켜 양생기간에 따른 강도 발현을 검토하였다.

3.2 작업성과 강도를 고려한 활성분체와 세라믹섬유의 최적혼입율 선정

본 연구에서는 활성분체의 시멘트 대비 치환율을 각 10%, 20% 및 세라믹섬유 혼입율을 0.2% 0.4%로 선정하여 작업성과 시공성을 확인하기 위하여 슬럼프 및 공기량을 측정하였으며 강도를 확인하기 위하여 콘크리트 타설 후 재령 3일, 7일, 28일 압축강도 및 인장강도를 측정하였다.

시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 진동밀로 분쇄시킨 활성 플라이애시와 제지 애시를 사용하였으며, 유동성을 확보하기 위해 AE제와 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였으며, 잔골재는 해사, 굵은골재는 부순자갈을 사용하였다. 또한 국내 A사에서 생산한 현무암섬유를 사용하였다.

3.2.1 플라이애시 혼입율에 따른 실험 결과

플라이애시 최적 치환율을 산정하기 위하여 시멘트 대비 치환율을 각 0%, 10%, 20% 3수준으로 선정하여 굳지 않은 콘크리트 특성으로 슬럼프 및 공기량을 평가하였으며 굳은 콘크리트 특성으로 압축강도와 인장강도성능을 평가하였다. 압축강도, 인장강도 실험결과를 각 Figs. 2 and 3에 나타내었다.

플라이애시는 일반적으로 인공포졸란에 속하며 그 자체는 수경성이 거의 없으나 시멘트와 혼합하여 사용하게 되면 상온에서 반응하여 불용성의 규산칼슘을 만드는 포졸란반응을 일으킨다. 이러한 포졸란반응에 의

Table 2. Physical properties of air-entraining agent

Admixture	Type	Specific gravity (g cm ⁻³)	pH	Color
Air-entraining agent	Liquid	0.95 - 1.05	6.0 - 8.0	Dark brown

Table 3. Concrete mix proportion

Design strength (MPa)	Case	Unit weight (Kg m ⁻³)						
		Water	Cement	EMM	Fine aggregate	Coarse aggregate	Admixture	Fiber
27	Plain	209	380	0	829	904	0.114	0
	PA10, FA10	209	342	38	843	918	0.114	0
	PA20, FA20	209	304	76	841	916	0.114	0
	PA10BF0.2, FA10BF0.2	209	342	38	843	918	0.114	0.217
	PA20BF0.4, FA20BF 0.4	209	304	76	841	916	0.114	0.434

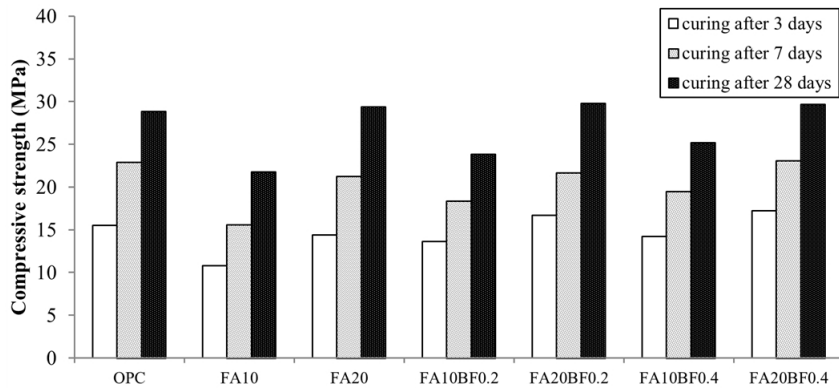


Fig. 2. Compressive strength of fly ash concrete.

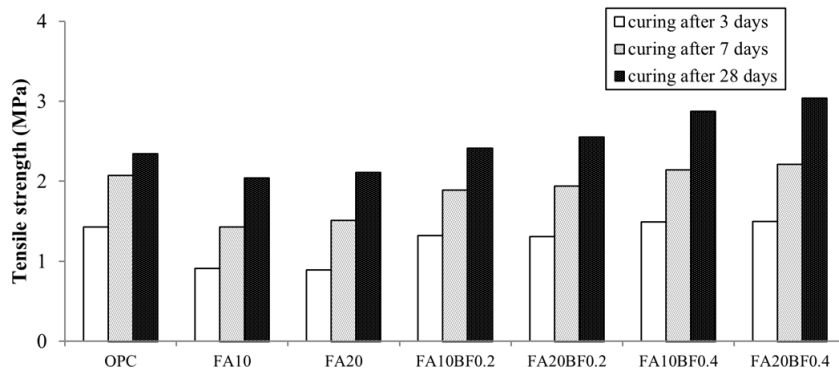


Fig. 3. Tensile strength of fly ash concrete.

해 플라이애시 주변이 포졸란반응의 생성물로 충전되면서 시멘트경화체가 단단히 결합되어 초기강도는 낮지만 장기재령에서 강도가 증가되고 콘크리트의 수밀성과 내구성을 크게 향상시킨다고 보고된다. 특히 플라이애시 혼입량이 증가할수록 재령 초기에서 플라이애시를 함유한 콘크리트의 강도 발현률은 낮으나, 재령 28일 압축강도가 크게 증가하는데 본 연구에서도 앞서 보고되었던 바와 같이 플라이애시 혼입량이 가장 높은 플라이애시 치환 20% 콘크리트에서 가장 높은 재령 28일 압축강도인 29.4 MPa를 나타내었다. 이는, OPC의 재령 28일 압축강도인 28.9 MPa보다 높은 강도를 발현한 것으로서 진동밀을 통해 분말도를 증가시키고 플라이애시를 활성화시켰기 때문이라고 판단된다. 또한, 섬유 혼입을 증가에 따라 압축강도는 크게 증가하지 않으나 섬유 무혼입 콘크리트에 비해 0.2%, 0.4% 혼입에서 각각 22.6%, 29.9% 인장강도가 증가한 것으로 나타났다. 이는 현무암섬유 혼입을 증가가 콘크리트 인장성능 증가에 기여한 것으로 판단된다.

한편, 활성화된 플라이애시 혼입량이 증가할수록 OPC에 비해 슬럼프는 다소 증가하였으며 공기량이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 플라이애시 분쇄과정에서 다공성 물질이 미세한 단일입자로 전환되어 흡수율이 저하되었으며, 볼베어링 효과로 인하여 워커빌리티 향상과 고성능 감수제 사용으로 인한 지연 효과 때문인 것으로 판단된다.

3.2.2 제지애시 혼입율에 따른 실험 결과

제지애시 최적 치환율을 산정하기 위하여 시멘트 대비 치환율을 각 0%, 10%, 20% 3수준으로 선정하여 굳지 않은 콘크리트 특성으로 슬럼프 및 공기량을 평가하였으며 굳은 콘크리트 특성으로 압축강도와 인장강도 성능을 평가하였다. 압축강도, 인장강도 실험결과를 각 Figs. 4 and 5에 나타내었다.

본 연구에서 사용한 제지애시는 분쇄하여 제지애시의 흡수성을 줄이고 작업성을 높이기 위하여 ball mill로 분쇄하고 무수석고를 혼입한 것이다. 특히, 제지에

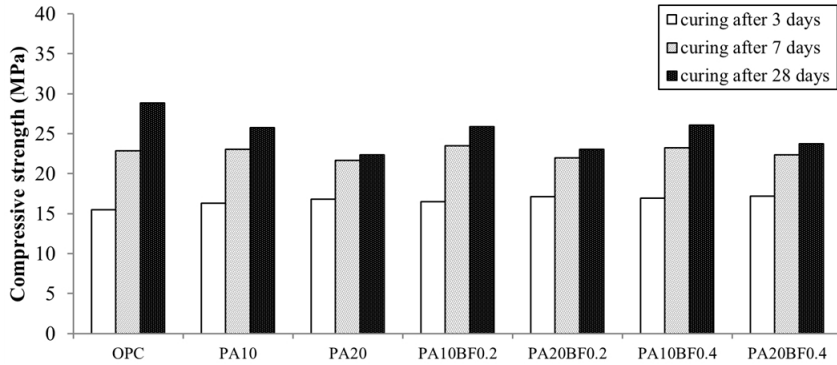


Fig. 4. Compressive strength of paper ash concrete.

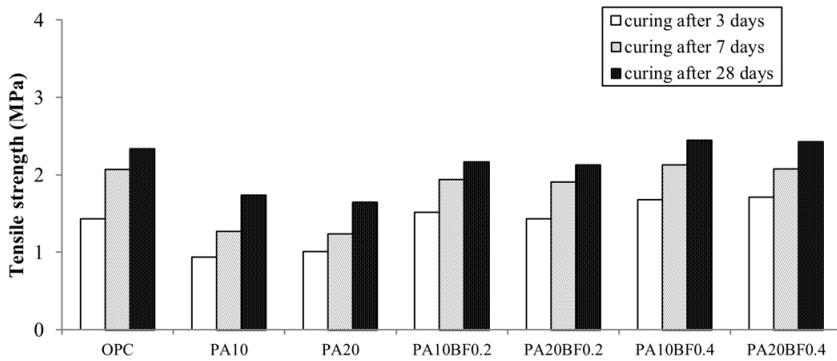


Fig. 5. Tensile strength of paper ash concrete.

시는 주요 구성 성분이 CaO , SiO_2 및 Al_2O_3 으로 구성되어 있어 초기 흡습성이 매우 높으므로 조기강도 증진 및 경제성 효과를 획득하기에 충분한 것으로 알려져 있어 플라이애시와는 다르게 재령 3일 압축강도에서 치환율 10%, 20%에서 각 16.3 MPa, 16.8 MPa를 나타내 OPC가 15.5 MPa인 것에 비해 조기강도 증진에 효과적인 것으로 나타난다. 이는 제지애시가 수화수 처리과정에서 석고성분과 반응하여 에트링자이트를 생성하여 조기강도 증진에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 재령 28일 압축강도에서는 제지애시 10%, 20% 치환 조건일 때 OPC보다 낮은 25.8 MPa, 22.4 MPa로 압축강도가 도출되며, 20% 치환조건일 때 10% 치환조건일 경우보다 낮게 도출되었는데 이는 수화수 처리과정에서 수화반응에 참여하지 못한 CaO 등의 성분이 압축강도 저하에 영향을 주는 것으로 판단된다.

마찬가지로, 제지애시 혼입율이 증가할수록 슬럼프가 현저히 감소하는데 20% 치환조건인 경우 약 70%까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 CaO 등 제지애시의 급결성 물질이 발생함에 따라 유동성이 크게 감소하

는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 유동성과 재령 28일 압축강도를 종합적으로 고려하였을 때, 제지애시 10% 치환이 가장 우수한 배합으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 활성분체 플라이애시, 제지애시 및 현무암섬유 혼입 콘크리트의 작업성, 강도, 균열특성을 평가하기 위하여 슬럼프, 공기량, 압축강도, 인장강도 실험을 수행하였으며 이를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 진동밀, 불밀 등을 통해 수화과정에서 활성에너지를 소모하여 수화도를 향상시킨 플라이애시 및 제지애시를 콘크리트에 적용 시 OPC 대비 28일 재령 압축강도를 최대 각 101.7%, 89.2%까지 발현할 수 있으며, 유동성과 강도를 동시에 고려할 경우 플라이애시는 시멘트 대비 20% 치환, 제지애시는 10% 시멘트 대비 치환일 경우 가장 우수한 것으로 나타

났다. 따라서 플라이애시 20%, 제지에서시 10% 치환 콘크리트를 사용할 경우 OPC와 비슷한 재료성능을 나타내므로 현장적용에 있어 환경성과 재료강도를 동시에 고려한 콘크리트 재료를 개발하였다고 판단된다.

- 2) 유기계섬유에 비해 친환경적인 현무암섬유를 콘크리트에 혼입 시 0.4% 혼입에 의한 인장강도 성능은 섬유무혼입 대비 최대 29.9%까지 발현할 수 있으므로 콘크리트의 균열 제어성과 인장능력을 효과적으로 증가시키며 콘크리트와의 접착성 또한 우수한 것으로 판단된다. 강섬유, 플라스틱섬유 혼입 콘크리트와 비교했을 때 환경성과 인장성능을 동시에 고려할 수 있으므로 본 연구의 재료가 우수하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 BK21 플러스 사업 중 레질리언트 사회기반시설 창의인재양성사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Jeong, Y.G., and Kang, D.W. 2006. Reducing to Unbonded Carbon in T-Fired Boiler, KOSCO Symposium, The Korean Society of Combustion, Jeju., Korea: 275. (in Korean)
- Jiang, C., Fan, K., Wu, F. and Chen, D. 2014. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design* 58: 187-193.
- Johansson, K., Larsson, C., Antzutkin, O.N., Forsling, W., Kota, H.R. and Ronin, V. 1999. Kinetics of the hydration reactions in the cement paste with mechanochemically modified cement 29Si magic-angle-spinning NMR study. *Cement and Concrete Research* 29(10): 1575-1581.
- Justnes, H., Elfgren, L. and Ronin, V. 2005. Mechanism for performance of energetically modified cement versus corresponding blended cement. *Cement and Concrete Research*, 35(2): 315-323.
- Ko, J.C., Kim, S.H., Park, Y.G., Jeon, J.Y., Kim, J.H. and Park, J.S. 2009. Pyrolysis Characteristics of Sludge Discharged from Paper Mill Process. *Journal of the Korea Organic Resource Recycling* 17(1): 80-87. (in Korean)
- Korea Environment Coporation. 2012. Waste generation and processing status in Korea. Ministry of Environment, Korea. (in Korean)
- Kumar, R., Kumar, S. and Mehrotra, S.P. 2007. Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation. *Resources, Conservation and Recycling* 52(2): 157-179.
- Lee, C.K., Ahn, K.K. and Heo, Y. 2003. Use of sewage sludge ash for construction material. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, 4. (in Korean)
- Lipatov, Y.V., Gutnikov, S.I., Manylov, M.S., Zhukovskaya, E.S. and Lazoryak, B.I. 2015. High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete. *Materials & Design* 73: pp. 60-66.
- Vladimir, P.R. and aggsturml Om, M.H. 1999. Method for producing cement. *Cement and Concrete Composites* 21(3): 245.
- Yeon, I.K., Park, S.C., Jo, B.R., Kim, K.Y. and Lee, M.H. 2005. Physico-Chemical Characteristics of Activated Paper Sludge Incineration Fly Ash. *Journal of Korea Society of Waste Management* 22: 317-325. (in Korean)
- Yoon, K.J. 2012. Application of environment friendly materials with recycling paper mill sludges, Chungbuk National University, Dissertation. (in Korean)