

고로슬래그 미분말을 이용한 알칼리자극제 기반의 보강그라우트재 개발

서 혁¹ · 정수근² · 김대현^{3*}

¹조선대학교 토목공학과 박사 후 과정, ²조선대학교 토목공학과 석사과정, ³조선대학교 토목공학과 교수

Development of Alkali Stimulant-Based Reinforced Grouting Material from Blast Furnace Slag Powder

Hyeok Seo¹ · Sugeun Jeong² · Daehyeon Kim^{3*}

¹Graduated Student, Department of Civil Engineering, Chosun University

²Master Student, Department of Civil Engineering, Chosun University

³Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

Abstract

Grouting is used for reinforcement and waterproofing of soft ground to increase its bearing capacity, reduce the impacts of rising or lowering groundwater levels, and reduce subsidence due to vibration and general causes. This study investigated the enhancement of grout strength and hardening time by the addition of reinforcing fibers, and the development of non-cement grouting materials from blast furnace slag. An experiment was performed to measure the increase in grout strength resulting from the addition of 0.5% increments of aramid and carbon reinforcing fibers. The results show that the uniaxial compressive strength of grout increases with increasing content of reinforcing fiber. Comparison of three admixtures of finely powdered blast furnace slag and 10%, 20%, and 30% calcium hydroxide stimulating agent showed that the uniaxial compressive strength of the mixture increases with increasing content of alkaline stimulant; however, the strength was lower than for 100% pure cement. The reaction of calcium hydroxide with blast furnace slag powder, which increases the strength of the grout, is more effective if injected as a solution rather than a powder.

Keywords: blast furnace slag, aramid fiber, carbon fiber, uniaxial compressive strength, energy dispersive X-ray test



*Corresponding author: Daehyeon Kim
E-mail: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received: 17 February, 2021
Accepted: 12 March, 2021

© 2021 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

그라우팅 공법은 연약지반의 보강과 방수 및 지하수위저하 또는 상승과 진동으로 인한 침하 및 부등침하로 손상된 구조물의 지지력을 높이고 차수를 높이는 목적으로 사용된다. 본 연구는 보강섬유를 이용하여 그라우트재료의 강도와 경화시간을 증대시키기 위하여 고로슬래그 기반의 무시멘트 그라우트재를 개발하고자 하였다. 이와 관련하여 본 연구에서는 고로슬래그 3종 미분말의 알칼리 자극제인 수산화칼슘을 미분말 형태로 배합하여 사용하였고 수산화칼슘의 함유량은 고로슬래그 미분말 대비 10, 20, 30% 까지 치환하여 사용하였다. 또한 보강섬유 유무에 따른 강도를 비교하기 위하여 각 섬유를 0.5%씩 추가하여 실험을 수행하였다. 보강섬유인 아라미드 및 탄소섬유 함유량이 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하였는데 이는 그라우트재 내에 섬유에 의한 가교작용이 일축압축강도를 증가시킨 것으로 확인할 수

있다. 또한 알칼리자극제의 함유량이 증가할수록 일축압축강도가 증가하였으나 순수한 시멘트 100%일 때 보다는 낮은 강도를 확인할 수 있었다. 이는 알칼리자극제인 수산화칼슘이 고로슬래그 미분말과 반응했을 때 강도 증가에 영향을 미칠 수는 있으나, 시멘트와 비교하였을 때 미분말형태보다는 용액의 형태가 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

주요어: 고로슬래그 미분말, 아라미드섬유, 탄소섬유, 일축압축강도, EDX시험

서론

연구의 배경 및 목적

그라우팅 공법은 토목 분야에서 주로 불안정한 사면의 보강이 목적이거나 매립지역, 제방 또는 댐 등의 차수를 필요로 하는 곳, 구조물의 보수·보강, 연약지반 보강의 수단으로 개발되었으며, 최근에는 발전소, 고속철도, 단지조성, 도로 및 공항, 항만, 지하철 등 수많은 대규모 국가 산입시설물 건설공사에 사용되고 있다. 하지만 그라우팅 공법과 같은 지반개량 공법의 고결제로 사용되는 시멘트의 사용량 증가로 인하여 환경오염에 대한 문제점이 대두되고 있다.

이와 같은 문제를 해결하고자 Park(2015)은 친환경 미생물을 이용한 Bio Groutig 공법의 모래지반에서의 적용성 평가를 수행하였으나 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement, 이하 OPC)에 비해 경제성에 대한 문제가 있었다. Choi(2016)는 친환경적 공법인 자기치유 그라우팅 공법(Self-healing Smart Grouting Method, 이하 SSG)의 공학적 특성에 관한 연구를 시도하였으나 젤타임을 위한 규산소다 함유량에 따른 환경오염은 배제할 수 없었다.

위와 같이 환경오염 문제의 대부분을 차지하는 보통포틀랜드시멘트(OPC)는 전 세계 CO₂ 발생량의 3~7%를 차지하고 있다. 시멘트 1톤을 생산 시 약 0.9톤의 이산화탄소가 배출된다고 할 때 한국의 시멘트생산량은 연간 약 6,000만 톤으로서 해마다 약 5,400만 톤의 이산화탄소가 배출되고 있다. 이는 한국 온실가스 기여도의 88.6%로 시멘트 대체재의 개발이 여러 분야에서 이루어져야 할 시대적 과제라고 할 수 있다(Park, 2017).

이러한 사회적인 문제점 때문에 시멘트를 일정량을 산업부산물로 대체하는 노력이 증가하고 있는 추세이다. 최근 대두되고 있는 고로슬래그 미분말은 선철을 생산하는 제철 산업에서 나오는 산업부산물을 분말화하여 생산되는 포졸란계 혼화재이다(Kim, 2012). 선철의 생산과정에서 발생하는 대표적인 부산물인 고로슬래그 미분말은 과거에 산업폐기물로 처리되었으나 최근에는 성토용 골재, 벽돌 및 콘크리트용 골재를 비롯한 콘크리트의 혼화재로 활용되고 있다. 특히 알칼리 자극제와 고로슬래그 미분말의 반응성을 활용한 무시멘트 콘크리트 또는 건설자재 개발에 대한 시도는 자원 순환형 친환경 재료로서의 고로슬래그를 적극 활용함으로써 천연자원을 보전하고 에너지 소비와 이산화탄소의 저감에 크게 기여할 것으로 기대된다(Hyeon, 2017).

또한 취성재료인 시멘트가 가지지 못한 인장, 수평력에 대한 특성을 해결하기 위한 방법으로 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, 이하, FRC)가 있다. Romualdi and Batson(1963)이 FRC공법의 메커니즘을 규명하면서 그 우수성이 입증되었고, 본 연구에서도 이에 관한 연구를 지속적으로 수행 중이다.

이에 본 연구에서는 그라우팅에서의 문제점들을 해결하기 위하여 시멘트 일부분을 줄이고 고로슬래그 미분말로 대체하였고, 알칼리자극제인 수산화칼슘은 기존 용액 형태에서 미분말 형태로 전환하여 사용하였다. 이를 통하여 주입재가 지반에 주입시 지반환경에 대한 문제를 개선하고자 하였다. 또한 보강섬유인 아라미드섬유와 탄소섬유를 무게대비 0.5%를 사용하여 인장, 수평력을 증대 시 내진 성능도 향상시킬 수 있는 보강 그라우트재를 개발하고자 한다.

선행연구 분석

국내에서는 1970년대 지하철 공사가 시작됨과 동시에 그라우팅 공법이 주로 활용되기 시작하였으며, 이후 1980년대 일본에서 LW공법과 SGR공법 등 다양한 그라우팅 공법이 도입되어 현재까지 많은 건설현장에 사용되고 있다. 1990년대에 들어서는 약액의 내구성이 문제가 되어 실리카졸계약액을 비롯한 항구성 그라우트재 개발이 본격화되었고, 2000년대에 들어서는 세계적으로 환경문제가 대두되어 무시멘트나 SSG공법과 같은 친환경 약액이 개발되었다.

고로슬래그는 Ca 성분을 다량 함유하고 있는 재료로, 플라이애쉬와 혼합하여 지오폐리머의 제조에 사용할 경우 반응성을 증진시키고 경화체의 성능을 향상시킬 수 있다(Guerrieri and Sanjayan, 2009; Oh et al., 2010). 반응 초기에 보통 포틀랜드시멘트의 수화생성물과 유사한 C-S-H겔 및 C-(A)-S-H를 생성하고(Nath and Kumar, 2013), 플라이애쉬의 알루미늄 실리케이트 겔 형성을 촉진하는 역할을 한다(Bernal et al., 2012). 하지만 고로슬래그의 빠른 반응성은 유동성을 저하시키고, 건조수축을 유발할 수 있는 인자로 작용한다(Marjanović et al., 2015).

국내에서 또한 고로슬래그 미분말과 시멘트를 이용한 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 시멘트 대비 일정 비율을 치환하는 형태의 연구가 수행되었다. Kim et al.(2013), Jeong et al.(2015) 등은 순환골재로써 고로슬래그 미분말을 활용하는 연구를 주로 수행하였다. 이후 많은 연구자들이 고로슬래그 뿐만 아니라 경제적인 측면에서 강점을 지닌 골재를 재활용하여 환경친화적인 모르타르의 개발에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

또한 건설현장에서의 시공성과 물리적 특징을 분석하기 위해 고로슬래그 미분말의 치환율과 분말도에 연구의 초점이 맞춰져 있는 경우가 많았다(Han et al., 2009; Jang and Ji, 2013; Jo, 2013; Kim et al., 2014) 등은 시멘트와 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 시험체의 압축강도 및 특성을 측정하였다. 그 결과 치환율이 높아질수록 유동성은 증가하고, 공기량은 소량 감소하는 것으로 나타났다. 강도는 재령 28일을 기준으로 초기에는 일반 시멘트에 비해 낮았으나, 이후에는 동등 이상의 강도를 발휘하는 것으로 나타났다.

Kim(2017)은 고로슬래그 미분말을 20~40%까지 치환하였고 보강섬유인 탄소섬유를 사용하여 고강도의 차수 그라우트재를 개발하고자 하였다. 샌드겔 일축압축강도 시험결과, 고로슬래그 미분말의 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 감소하는 경향을 나타내었고, 탄소섬유의 함유에 따라 공시체의 일축압축강도는 증가하였다. Seo et al.(2019)은 고로슬래그 미분말의 알칼리 자극제인 수산화 칼슘을 용액형태로 배합하여 보강그라우트재를 개발하고 하였으며, 고로슬래그 미분말의 치환율은 30~60%까지 적용하였다.

Cho et al.(2020)은 고로슬래그 미분말과 페로니켈슬래그를 시멘트의 50%까지 치환한 삼성분계 시멘트의 미세구조분석 및 수화 특성을 분석하고 기초물성 시험을 통해 그 특징을 평가하였고, 저조한 강도 발현을 보이지만 재령일 증가에 따라 강도 증진을 보였다.

섬유보강은 길이가 짧고 단면이 얇은 섬유를 시멘트계 혹은 고분자계 재료에 무작위로 혼입하여 휨·인장강도, 인성 및 에너지 흡수능력을 향상시키는 공법을 말한다(Shah, 1984). 시멘트계 재료에 섬유를 이용한 보강은 1963년 Romualdi와 Batson이 인성 향상에 섬유 보강 콘크리트(FRC)의 우수성을 입증하면서 관심이 집중되었다.

이후 많은 실험적 연구를 통해 강섬유는 시멘트 복합체의 휨·인장강도 및 인성 향상에 유효한 보강재임이 확인되었다. Shah and Rangan(1971)은 시멘트에 강섬유를 혼합하여 인장강도와 휨강도를 측정한 결과 휨강도는 20배가 증가하고 인장강도는 2배가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이와같이 섬유를 보강한 재료는 균열제어성능, 휨·인장성능, 압축성능 등에서 우수한 특성을 보이고 있어 시멘트의 단점을 보완하고 구조물의 유지 보수 및 보강에 있어 높은 활용성을 지니고 있다. 보강성능의 수준은 섬유의 형상, 혼입률에 따라 상이한 결과가 도출되며 강섬유의 부착특성이 섬유보강에 주요 영향 인자로 자리잡았다(Gao et al., 1997; Banthia and Sappakittipakorn, 2007).

최근에는 섬유유 변수별 부착방법에 대한 연구가 수행되었으며, 이중간의 섬유 즉, Hybrid 강섬유를 이용한 시멘트 복합체 보강에 관한 연구가 진행 중이다(Banthia and Sappakittipakorn, 2007; Kang et al., 2016). 2020년에 Kwon이 Hybrid 섬유보강 콘크리트의 압축 및 인장 거동을 통해 응력·변형률 특성을 평가하였다.

이처럼 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체자원으로써의 연구는 많이 수행되었고, 보강섬유 또한 인장과 휨에 대한 강도가 우수하다고 판단되었다. 하지만 이 두 재료 모두 그라우트재으로써의 연구 및 보강섬유와의 혼합에 대한 연구는 부족할 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체자원으로 사용하고자 하였으며, 보강섬유를 이용하여 인장, 수평력을 증대시키고 내진 성능도 향상시킬 수 있는 보강 그라우트재를 개발하고자 한다. 또한 기존에 용액의 형태로 사용하였던 알칼리저극제인 수산화칼슘의 주입을 미분말 형태도 전환함으로써 고로슬래그와의 공학적인 메커니즘을 규명하고자 하였다.

그라우팅 공법 재료

그라우팅 공법 개요

그라우팅공법의 목적은 현탁액상의 시멘트 물질을 일정 압력상태에서 지반 내에 주입하여 지반개량, 용수방지, 안정성 증가를 위하여 현탁액상의 시멘트 물질을 일정 압력상태에서 지반내에 주입하여 성질을 개선하는 것이다. 액상 주입재는 주입 후 시간 경과에 따라 양생 되면서 강도와 강성이 증가한다. 주입재 구성물질의 다양한 성질에 따라 양생에 따른 강도와 강성의 발현 정도가 다르게 나타나며, 소정의 목적에 따라 다른 성질의 시멘트 주입재를 사용한다.

주입에 의한 지반의 성질 개선 범위는 크게 4가지로 정리할 수 있으며, 이는 지반의 차수, 투수성의 저감, 지반 변형의 감소, 지반 강도의 증가이다. 주입재는 재료특성(입경, 입도, 비중, 분말도, 투수계수, 구성 재료의 종류, 배합비 등)에 따라 성질(유동성, 침투성, 강도, 강성)이 변화하여 침투효과와 보강효과가 크게 차이가 난다.

보강섬유

흔히 슈퍼섬유라 불리는 보강섬유는 금속과 같거나 그 이상의 강도를 지닌 섬유로써 아라미드섬유, 탄소섬유, 플론섬유 등이 있으며, 흔히 단독으로 사용되기보다는 플라스틱이나 금속과 함께 복합재료로 사용되는데, 이를 섬유강화금속·섬유강화 플라스틱이라 불린다. 슈퍼섬유의 대표적인 것은 탄소섬유와 파라계 아라미드이다.

보강섬유의 경우 강도 20 g/d 이상, 탄성률 50 g/d 이상을 동시에 만족하여야 하며 g/denier는 섬유에서 사용하는 실의 굵기를 나타내는 단위로 1 g/denier는 9,000 m인 실의 무게가 1 g으로 정의된다.

해외에서는 Brameshuber(2006), Mechtcherine(2013)이 기둥의 내진보강 공법으로 강성 또는 연성능력을 향상시키는 연구를 진행해 왔다. 국내에서 Hur et al.(2013)은 섬유의 재료별 특성에 따른 철근콘크리트 공시체를 제작하여 반복횡하중 실험을 통하여 평가하였다. Kim(2010)은 아라미드섬유를 혼입한 보강콘크리트에 대한 연구를 수행하였고, Yang(2017)은 아라미드를 활용한 그라우팅공법의 보강효과에 관한 연구를 수행하였다. 또한 내진보강을 위해 보강섬유 공법은 경량, 고강도 및 고연성 등 여러 가지 우수한 성능으로 건축물의 구조부재를 강화하는 효과가 있다. Kim(2017)은 고로슬래그와 탄소섬유를 이용한 차수그라우팅에 관한 연구를 수행하였으나 고로슬래그와 수화반응과 치환율에 대한 연구 및 환경성 평가에 대한 연구는 부족한 실정으로 본 연구를 통하여 해결하고 추가로 탄소섬유와 아라미드섬유에 따른 종합적인 비교 분석을 수행하고자 한다. 최근에는 탄소섬유를 포함시킨 콘크리트의 압축강도와 동탄성계수 등의 특성을 확인한 결과를 통해 콘크리트와 탄소섬유의 구조성능 사이의 선형관계를 확인하였다(Lee and Eo, 2020; Yoo et al., 2020).

아라미드섬유

아라미드섬유는 1965년에 유리섬유의 강도와 석면의 내열성을 갖는 섬유를 목표로 개발에 성공한 방향족 고분자를 원료로 한 합성섬유이며, 지방족 폴리아미드(Aliphatic polyamide)의 Nylon과 크게 나뉘는 대표적인 용어이다. 아라미드의 종류로써 파라계 아라미드와 메타계 아라미드로 구분된다. 메타계는 고온에 내열성이 우수하고, 파라계 아라미드는 고탄성 및 고강도의 특징을 갖는다. 특히, 파라계 아라미드는 탄성률이 500~1,000 g/denier 정도로 탄성률이 좋으며, 인장강도 또한, 20 g/denier 이상을 가지고 있다. 또한, 분해온도가 400°C 이상, -160°C 이하에서도 섬유의 특성을 유지할 수 있어 내한·내열성 및 우수한 내구성을 가지고 있다. 아라미드섬유는 다른 유기섬유와 다른 특성을 가지고 있고 가격대비 우수한 성능을 유지할 수 있어 최초의 산업화 이후, 부직포 및 원사를 비롯하여 직물 등의 형태로 방탄방호용과 로프, 각종 복합재료, 케이블 등 산업자재의 용도로 정보통신, 자동차, 국방, 우주항공 등 다양한 관련 산업 분야에서 사용이 확대되고 있는 고부가가치 소재이다(Yang, 2017). Choi et al.(2019)은 아라미드 섬유 및 스트립으로 보강된 필로티 RC기둥의 내진 성능실험을 수행하는 등 내진성능을 충분히 향상시킴을 알수 있었다.

탄소섬유

탄소섬유는 탄소 원소의 질량 함유율이 90% 이상으로 이루어진 섬유상의 탄소 재료를 의미한다. 원료에 따라 PAN계 탄소섬유와 Pitch계 탄소섬유가 대표적이며, 이 외에 셀룰로오스계 탄소섬유 등이 있다. PAN계 탄소섬유는 프리커서(폴리아크릴로니트릴 섬유)를 열안정화와 탄소화를 거쳐 고강도·고탄성률의 성질을 부여하며, 항공 우주 및 산업 분야의 재료용, 스포츠 레저 분야 등 광범위한 용도로 쓰이고 있다. Pitch계 탄소섬유는 피치 프리커서(콜타르 또는 석유 중질유 분을 원료로 얻어지는 피치섬유)를 탄소화하여 얻는 것으로, 제조조건에 따라 저탄성률에서 고탄성률·고강도의 광범위한 성질을 얻을 수 있다. 초고탄성률품은 고강도 용도 외에 뛰어난 열전도율과 도전성으로 인해 다양한 용도로 쓰이고 있다(Seo and Park, 2010). 또한 현재 RC건축물의 구조보강에 사용하는 탄소섬유의 구조설계는 대부분 ACI Committee 440(2017)을 따라 파단강도 및 변형률을 결정하고, ASTM D3039(2007)에서는 변형률계를 통해 시편 면내/외 변형률을 측정하여 일정수준 이하인 경우에만 유효한 시험으로 판정할 것을 권고하고 있다.

Fig. 1은 실험에 사용된 보강섬유의 사진이다.



(a) Aramid fiber



(b) Carbon fiber

Fig. 1. Experimental fiber.

고로슬래그 미분말

고로슬래그미분말은 선철을 제조하는 공정에서 부산물로 발생하는 고온의 용융상태인 슬래그에 물을 분사후 급냉시킨 고로수쇄슬래그를 미세한 분말의 형태로 분쇄한 것을 고로슬래그 미분말이라고 한다. 이러한 고로슬래그 미분말은 잠재수경성을 지니고 있고, 그 자체의 경화성질은 미약하지만 보통 포틀랜드시멘트와 혼합한 경우 수산화칼슘이나 황산염의 작용에 의해 경화가 촉진되어 포틀랜드시멘트에서 얻을 수 없는 다른 특성을 얻을 수 있다.

수화발열 속도의 저감 및 콘크리트의 온도상승 억제 효과, 블리딩의 감소, 장기 강도의 향상, 수밀성의 향상, 염화물이온 침투 억제에 의한 철근 부식 억제 효과, 황산염 등에 의한 화학 저항성의 향상, 알칼리 반응의 억제 효과, 유동성의 향상 등 이와 같은 특성을 갖는 고로슬래그 미분말은 혼화재료로서 사용함에 따라 목적에 맞는 콘크리트의 특성을 얻을 수 있다. 국내에서는 고로슬래그 미분말은 현재 고로시멘트로서의 사용이 대부분이지만, 고로슬래그 미분말의 뛰어난 특성을 더욱 효율적으로 사용할 필요가 있으며, 고로슬래그 미분말의 규격화 및 콘크리트용 혼화재료로서의 활용이 요구되고 있다.

실내실험

샌드겔 일축압축강도실험

본 실험에서는 주입재 배합비를 중량비로 계산하여 Fig. 2와 같이 흙 시료 80%와 주입재료 20%를 사용하여 흙 시료 공시체의 일축압축강도를 측정함으로써 지반개량재료에 대한 평가를 수행하기 위해 샌드겔 공시체를 제작하였다.



(a) Material mixing



(b) Aerial curing



(c) Shape of test specimen after test

Fig. 2. Process of uniaxial compression experiment test.

샌드겔은 규산소다 3호와 물 배합을 하면 공시체가 성형되지 않고 규산소다 3호 자체가 지반의 강도를 낮추기 때문에 본 배합비에서는 제외를 하였다. 보강섬유인 아라미드와 탄소섬유 혼입율이 증가할수록 공시체 내에 섬유인자들이 시멘트와 결합하여 섬유 인자들이 실철근과 같은 역할을 하여 공시체의 전단파괴에 대한 저항성을 높여줄 것으로 기대하였으며, 표면유체처리율이 공시체 배합비 교반시 섬유의 뭉침현상을 방지하여 균열 제어에 효과적일 것으로 기대하였다(Nam et al., 2014).

Ca(OH)₂의 경우기존 연구에서는 1 mol로 단위로 환산하여 용액의 형태로 고로슬래그와 1:1로 배합하였으나, 본 연구에서는 미분말 형태를 그대로 유지하며 주입하였다. 이는 용액과 미분말 형태일때의 수산화 칼슘이 고로슬래그에 미치는 강도에 대한 영향을 확인하기 위함이다.

공시체 제작에 사용된 몰드의 크기는 $5 \times 5 \times 5$ cm의 정사각형 몰드로 제작하였다. 공시체 제작에 사용된 몰드는 주철로 제작하였으며, 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위해 용기 안쪽에 윤활제를 얇게 도포하였다. 준비된 몰드에 주입재를 넣고, 24시간 후 공시체를 탈형하여 기중양생을 통해 3, 7, 14, 28일까지 기중양생하였다.

Soil은 사질토를 사용하였으며, OPC는 시멘트, BFS(Blast furnace slag powder)는 고로슬래그 미분말, W(Water)는 물을 나타내었다.

Table 1은 샌드겔 일축압축강도 측정을 위한 그라우트재의 배합비이다.

Table 1. Mixing ratio of grout materials using reinforcing fiber

A		B liquid			C
Soil (g)	OPC (g)	BFS (g)	Ca(OH) ₂ (ml)	W (ml)	Fiber (g)
202	45 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	20	Carbon
	0 (0%)	40.5 (90%)	4.5 (10%)		
	0 (0%)	36 (80%)	9 (20%)		Aramid
	0 (0%)	31.5 (70%)	13.5 (30%)		

Fig. 2a는 공시체의 재료들을 배합중인 모습이고 Fig. 2b는 기중양생 중인 공시체의 전경이고 Fig. 2c는 샌드겔의 일축압축강도 측정을 위한 시험과정을 나타낸 것이다.

EDX 실험

본 연구에서 EDX(Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer)분석을 위한 장비로 사용한 전자현미경은 Fig. 3과 같은 LV-SEM(Low Vacuum Scanning Electron Microscope)이다. LV-SEM은 전자총에서 방출된 전자 빔(Electron Beam)을 집속시켜 시료표면을 주사, 시료 표면에서 발생하는 여러 전자 형태를 검출기로 감지, 시료의 표면 형태 및 성분 분석이 가능하다. 이를 통하여 공시체 표면에 나타나는 원소를 파악할 수 있으며, 공시체 입자의 화학적상태를 확인할 수 있다.

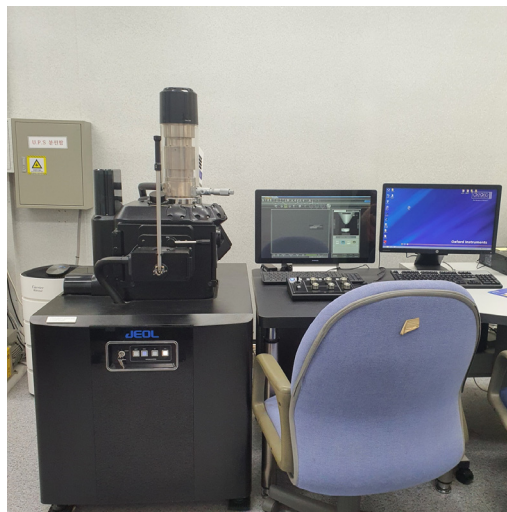


Fig. 3. Low vacuum scanning electron microscope.

실험결과

샌드겔 공시체 일축압축 강도 실험 분석

Fig. 4에서 시멘트는 “OPC”, 고로슬래그 미분말을 “BFS”, 아라미드섬유는 “A”, 탄소섬유는 “C”로 표기하였고, 숫자는 배합비의 %를 나타내었다.

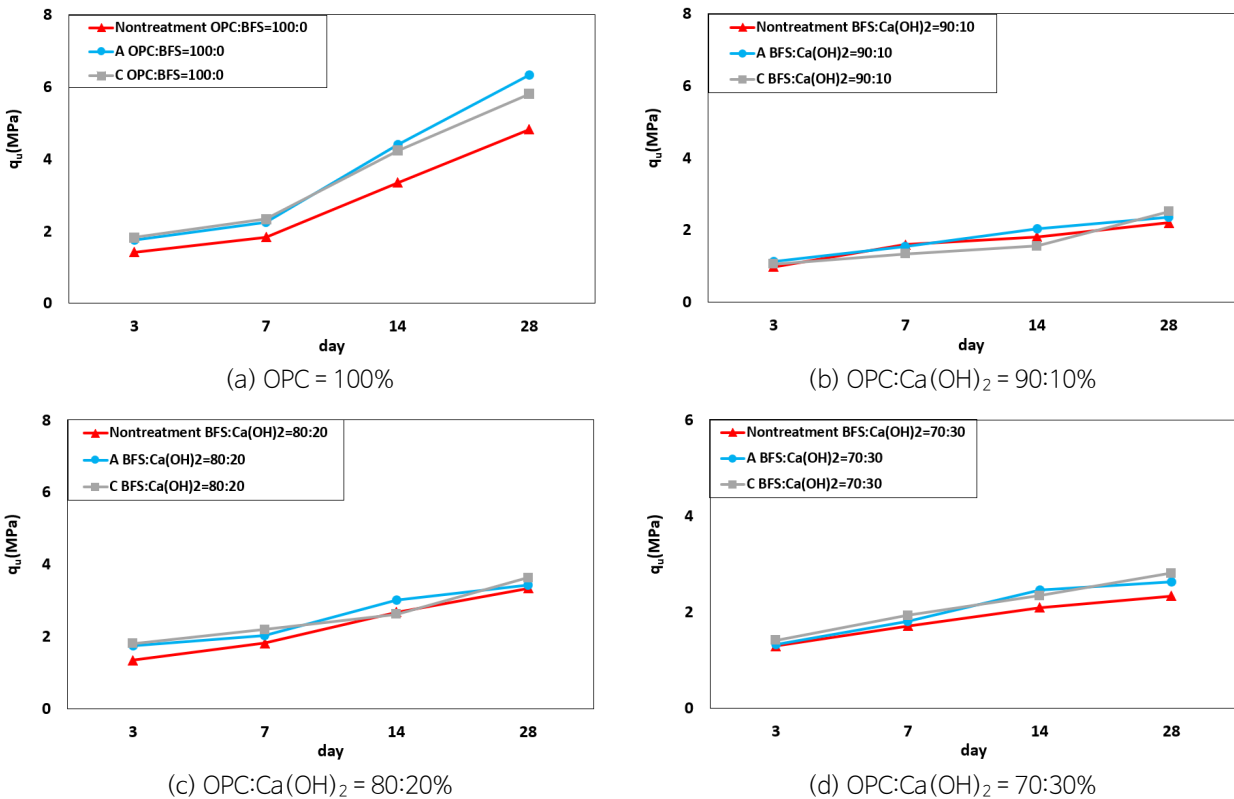


Fig. 4. Analysis of uniaxial compression strength according to reinforcing fibers.

보강섬유의 유무에 따른 일축압축강도 분석

Fig. 4a는 OPC = 100%일 때, 아라미드, 탄소섬유 함유량에 따른 각 재령일의 일축압축강도를 분석한 것이다. 재령 3일 강도에서는 무처리에서 1.36 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 1.82 MPa로 가장 높게 나타났다. 재령 28일 강도에서는 무처리에서 4.82 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 5.8 MPa로 가장 높게 나타났다.

Fig. 4b는 BFS:Ca(OH)₂가 90:10%일 때, 아라미드, 탄소섬유 함유량에 따른 일축압축강도를 분석한 것이다. 재령 3일 강도에서는 무처리에서 0.98 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 1.12 MPa로 가장 높게 나타났다. 재령 28일 강도에서는 무처리에서 2.20 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 2.51 MPa로 가장 높게 나타났다.

Fig. 4c는 BFS:Ca(OH)₂가 80:20%일 때, 아라미드, 탄소섬유 함유량에 따른 일축압축강도를 분석한 것이다. 재령 3일 강도에서는 무처리 일 때 1.22 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 1.80 MPa로 가장 높게 나타

났다. 재령 28일 강도에서는 무처리에서 3.17 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 3.63 MPa로 가장 높게 나타났다.

Fig. 4d는 BFS:Ca(OH)₂가 70:30%일 때, 아라미드, 탄소섬유 함유량에 따른 일축압축강도를 분석한 것이다. 재령 3일 강도에서는 무처리에서 1.29 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 1.41 MPa로 가장 높게 나타났다. 재령 28일 강도에서는 무처리에서 2.33 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 2.81 MPa로 가장 높게 나타났다.

수산화칼슘(Ca(OH)₂) 함유량에 따른 일축압축강도 분석

Fig. 5a는 OPC = 100%와 BFS:Ca(OH)₂가 90:10, 80:20, 70:30%일 때 재령일에 따른 일축압축강도를 분석한 것이다. 재령 3일 강도에서는 OPC 100%의 경우 1.36 MPa로 가장 높게 나타났으며, 알칼리자극제 함유량에서는 BFS:Ca(OH)₂가 80:20%일 때 1.34 MPa로 가장 높게 나타났으며, 90:10%일 때 0.98 MPa로 가장 낮게 나타났다. 재령 28일 강도에서는 OPC 100%가 4.82 MPa로 가장 높게 나타났으며, 알칼리자극제 함유량에서는 BFS:Ca(OH)₂가 80:20%일 때 3.17 MPa로 가장 높게 나타났으며, 90:10%일 때 2.20 MPa로 가장 낮게 나타났다.

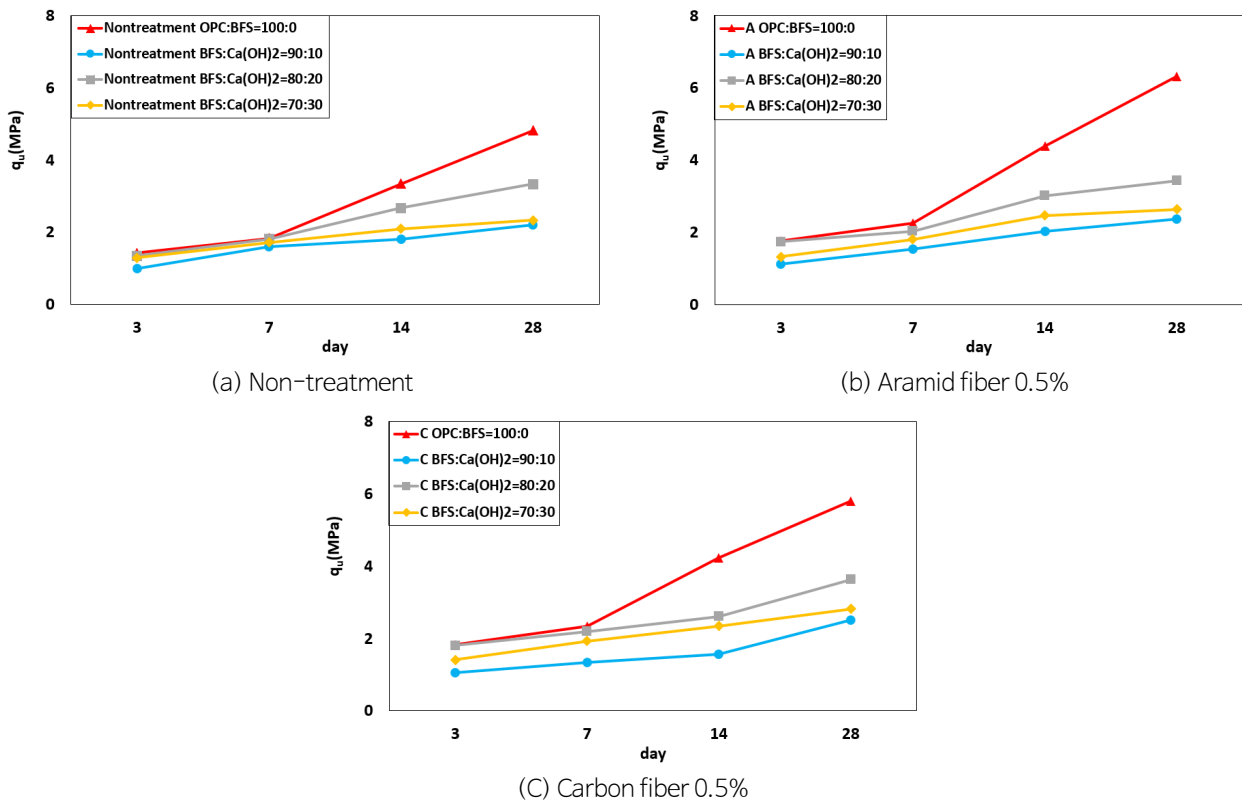


Fig. 5. Analysis of uniaxial compression strength by Ca(OH)₂ content.

Fig. 5b는 아라미드섬유 함유량이 0.5%일 때 OPC 100%와 BFS:Ca(OH)₂ 90:10, 80:20, 70:30% 배합비를 각 재령일에 따른 일축압축강도를 분석한 것이다. 재령 3일 강도에서는 OPC 100%의 경우 1.76 MPa로 나타났으며, 알칼리자극제 함유량에서는 BFS:Ca(OH)₂가 80:20%일 때 1.74 MPa로 가장 높게 나타났으며, 90:10%일 때 1.12 MPa로 가장 낮게 나타

났다. 재령 28일 강도에서는 OPC 100%가 6.32 MPa로 가장 높게 나타났으며, 알칼리자극제 함유량에서는 BFS:Ca(OH)₂가 80:20%일 때 3.43 MPa로 가장 높게 나타났으며, 90:10%일 때 2.36 MPa로 가장 낮게 나타났다.

Fig. 5c는 탄소섬유 함유량이 0.5%일 때 OPC 100%와 BFS:Ca(OH)₂ 90:10, 80:20, 70:30% 배합비를 각 재령 일에 따른 일축압축강도를 분석한 것이다. 재령 3일 강도에서는 OPC 100%의 경우 1.82 MPa로 나타났으며, 알칼리자극제 함유량에서는 BFS:Ca(OH)₂가 80:20%일 때 1.8 MPa로 가장 높게 나타났으며, 90:10%일 때 1.05 MPa로 가장 낮게 나타났다. 재령 28일 강도에서는 OPC 100%가 5.8 MPa로 가장 높게 나타났으며, 알칼리자극제 함유량에서는 BFS:Ca(OH)₂가 80:20%일 때 3.63 MPa로 가장 높게 나타났으며, 90:10%일 때 2.51 MPa로 가장 낮게 나타났다.

Table 2는 샌드겔 공시체의 일축압축강도를 나타내었다.

Table 2. Uniaxial compressive strength test result of sand-gel

Classification	Mixing ratio	Uniaxial compression strength (MPa)			
		3 day	7 day	14 day	28 day
Non-treatment	OPC:BFS = 100:0	1.42	1.83	3.34	4.82
	BFS:Ca(OH) ₂ = 90:10	0.98	1.59	1.81	2.2
	BFS:Ca(OH) ₂ = 80:20	1.34	1.81	2.67	3.17
	BFS:Ca(OH) ₂ = 70:30	1.21	1.71	2.09	2.33
Carbon fiber 0.5%	OPC:BFS = 100:0	1.76	2.25	4.39	6.32
	BFS:Ca(OH) ₂ = 90:10	1.12	1.54	2.03	2.36
	BFS:Ca(OH) ₂ = 80:20	1.74	2.03	3.01	3.43
	BFS:Ca(OH) ₂ = 70:30	1.32	1.80	2.46	2.63
Aramid fiber 0.5%	OPC:BFS = 100:0	1.82	2.33	4.23	5.80
	BFS:Ca(OH) ₂ = 90:10	1.05	1.34	1.56	2.51
	BFS:Ca(OH) ₂ = 80:20	1.80	2.19	2.61	3.63
	BFS:Ca(OH) ₂ = 70:30	1.41	1.93	2.34	2.81

수산화칼슘(Ca(OH)₂)의 주입 형태의 따른 일축압축 강도 분석

Fig. 6은 기존에 수행하였던 용액 형태의 수산화칼슘을 주입한 샌드겔 공시체와 본 연구에서 수행한 미분말 형태로 주입한 샌드겔 공시체의 일축압축강도 결과를 비교한 것이다.

Fig. 6a는 섬유가 함유되지 않은 OPC = 100%일 때의 수산화칼슘 주입형태에 따른 일축압축강도를 나타낸 것이다. 재령 3일차에서 수산화칼슘 미분말의 경우 1.29 MPa, 수산화칼슘 용액의 경우 3.68 MPa로 약 2.2배 이상 높게 측정되었다. 재령 28일차에서는 수산화칼슘 미분말의 경우 2.33 MPa, 수산화칼슘 용액의 경우 5.39 MPa로 약 2.3배 이상 높게 측정되었다. 재령일이 증가함에 따라 샌드겔의 일축압축강도는 증가한 것으로 확인되었다.

Fig. 6b는 아라미드섬유 함유량이 0.5%일 때의 수산화칼슘 주입형태에 따른 일축압축강도를 나타낸 것이다. 재령 3일차에서 수산화칼슘 미분말의 경우 1.32 MPa, 수산화칼슘 용액의 경우 4.69 MPa로 약 3.5배 이상 높게 측정되었다. 재령 28일차에서는 수산화칼슘 미분말의 경우 2.63 MPa, 수산화칼슘 용액의 경우 6.09 MPa로 약 2.3배 이상 높게 측정되었다. 재령일이 증가함에 따라 샌드겔의 일축압축강도는 증가한 것으로 확인되었다.

이는 고로슬래그의 강도를 증대시켜주는 알칼리 자극제의 주입형태가 미분말 형태보다는 용액형태로 혼합되었을때가 더 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

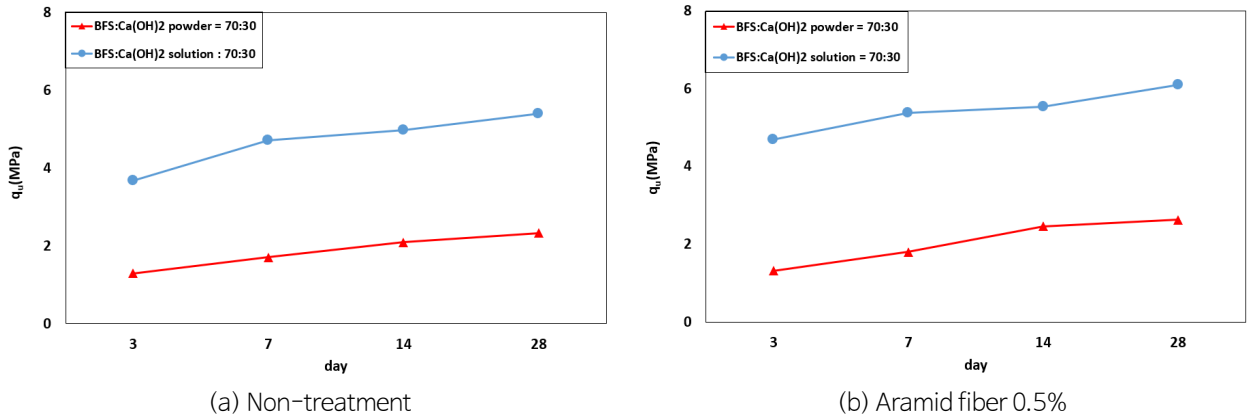


Fig. 6. Analysis on uniaxial compression strength by injection type of Ca(OH)₂.

EDX 분석결과

본 연구를 통해 혼합된 시료의 일부를 채취하여 EDX 분석을 하였다.

시험결과는 일축압축강도 측정 후 파쇄된 시료에서 채취하여 EDX 분석을 수행하였고 채취위치에 따라 결과 값이 상이하므로 1개의 일축압축강도 시험 대상체에서 3개소에서 채취하여 평균값을 사용하였다.

EDX 분석 결과, 본 배합비의 주요 구성요소는 O(산소)와 C(탄소), Ca(칼슘), Si(규소)로 나타났다. 또한, 함유율 10% 미만 중에 Al(알루미늄), Mg(마그네슘), Na(나트륨) 등의 원소는 시멘트와 고로슬래그 미분말에서 나타나는 원소임을 확인하였다.

Tables 3~6에서 보는바와 같이 고로슬래그 미분말의 양이 증가함에 따라 Si 및 Ca가 증가한 것으로 나타났는데 이는 시멘트와 고로슬래그 미분말이 유사한 광물로 구성되어 있으므로 비표면적이 큰 고로슬래그 미분말 함유량이 증가함에 따라 Si 및 Ca가 증가한 것으로 판단된다.

Table 3. EDX analysis result for OPC:BFS (100:0%)

Sample	Graph	An element containing	
		Mineral	An element containing (%)
OPC:BFS (100:0)		O	54.26
		C	17.26
		Ca	14.37
		Si	13.40

Table 4. EDX analysis result for BFS:Ca(OH)₂ (0:10%)

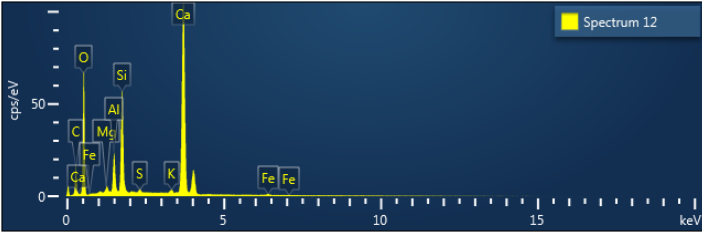
Sample	Graph	An element containing	
		Mineral	An element containing (%)
BFS:Ca(OH) ₂ (90:10)		O	48.48
		C	14.22
		Ca	25.32
		Si	7.45

Table 5. EDX analysis result for BFS:Ca(OH)₂ (80:20%)

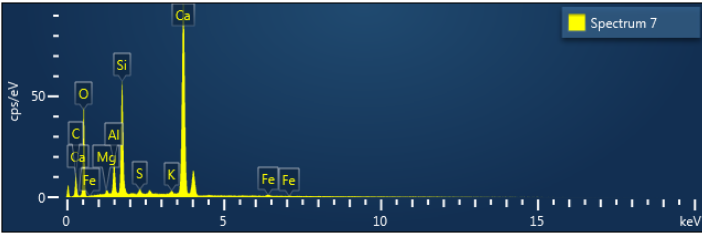
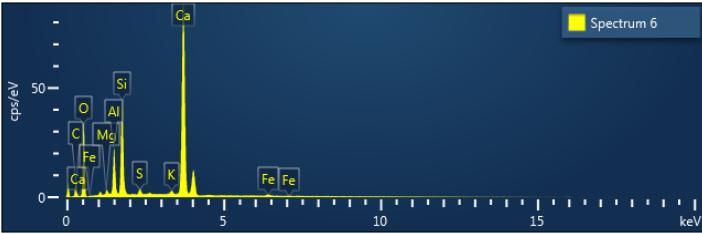
Sample	Graph	An element containing	
		Mineral	An element containing (%)
BFS:Ca(OH) ₂ (80:20)		O	43.18
		C	14.30
		Ca	28.78
		Si	9.10

Table 6. EDX analysis result for BFS:Ca(OH)₂ (70:30%)

Sample	Graph	An element containing	
		Mineral	An element containing (%)
BFS:Ca(OH) ₂ (70:30)		O	11.01
		C	42.14
		Ca	31.58
		Si	8.77

결론

본 연구에서는 재활용 자원인 섬유 파쇄제의 아라미드섬유, 탄소섬유 및 고로슬래그 미분말, 시멘트 혼합으로 지반환경에 대한 문제를 개선하고 우수한 압축강도를 지닌 보강그라우트재를 개발하고자 하였다. 또한, 상기 배합재료의 배합비를 통해 그라우트재의 내구성 확인을 위한 샌드질 일축압축강도(3, 7, 14, 28일) 시험을 통해 역학적인 기초 성능을 평가하고, EDX 분석을 수행하여 개발하고자 하는 그라우트재의 화학적 특성을 평가하고자 하였다. 또한 기존의 연구와 비교하여 알칼리자극제인 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 보통포틀랜드시멘트(OPC)에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

- (1) 섬유의 따른 일축압축강도 분석결과, 동일한 조건에서 알칼리 자극제 함유량증가함에 따라 OPC 100%의 공시체가 가장 낮은 강도를 보였고, 탄소섬유가 함유된 공시체의 경우 가장 높은 강도를 확인할 수 있었다. BFS:Ca(OH)₂의 치환율이 10~30%까지 증가함에 따라 강도가 증가되는 경향은 확인할 수 있었으나, OPC 100%일 때보다는 낮게 측정되었다. 이는 미분말형태의 수산화 칼슘이 강도변화에 영향을 미칠 수 있지만 OPC 100%와 수산화칼슘 용

액형태의 주입방법보다는 효과적이지 않다고 판단할 수 있다.

- (2) 알칼리 자극제($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 함유량에 따른 일축압축강도 분석결과, 재령 28일 기준으로 무처리된 샌드겔 공시체의 경우 OPC 100%의 경우가 가장높게 측정 되었고, 알칼리 자극제 함유량이 20, 30, 10%일 때의 순으로 강도가 높아 짐을 확인할 수 있었다. 아라미드, 탄소섬유도 마찬가지로 OPC 100%의 경우가 가장 높게 측정되었고 알칼리 자극제 함유량 20, 30, 10% 순으로 강도가 측정되었다. 기존 연구에서 수산화칼슘용액의 형태로 주입했을 경우 일정한 치환율에 따라 강도가 증가하였으나, 미분말의 형태로 주입할 경우 20% 치환율 조건에서 가장 높은 강도를 확인할 수 있다.
- (3) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 주입 형태에 따른 일축압축강도 분석결과, 수산화칼슘 미분말보다 수산화칼슘 용액이 모든 재령일에서 약 2.0배 이상 높은 강도를 보였다. 또한 아라미드 섬유가 혼합된 경우 3.0배 이상 강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 보강섬유의 가교작용이 일축압축강도 증대에 영향을 미치는 것을 말하며, 고로슬래그의 강도를 증대시켜주는 알칼리 자극제의 경우, 그 주입형태가 미분말 형태보다는 용액형태로 혼합되었을때가 더 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.
- (4) EDX 분석결과, 배합비의 주요 구성요소는 O(산소), C(탄소), Ca(칼슘), SI(규소)로 측정되었고, 알칼리자극제 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 의 함유량이 10%씩 증가할수록 Ca가 증가한 것으로 측정되었다. 이는 그라우트재의 배합비에서 알칼리자극제의 함유량이 늘어날수록 증가한 것으로 판단된다.

사사

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (NRF-NRF-2018R1D1A1B07046212).

References

- ACI Committee 440, 2017, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-17), American Concrete Institute, 110.
- ASTM D3039, 2007, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, American Society for Testing Materials (ASTM International), 13.
- Banthia, N., Sappakittipakorn, M., 2007, Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366-1372.
- Bernal, S.A., Mejia de, G.R., Provis, J.L., 2012, Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends, *Construction Building Materials*, 33, 99-108.
- Bramshuber, W., 2006, Textile reinforced concrete, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC, RILEM Publications, Bagneux, France.
- Cho, W.J., Kim, H.S., Ann, K.I., 2020, A study on the hydration characteristics and fundamental properties of ternary blended cement using ferronickel slag, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8(1), 39-48 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.J., Lee, T.H., Park, B.J., Rho, K.G., Choi, S.M., 2019, Experimental study of seismic performance improvement of pilotis RC column strengthened with FRP, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 10(1), 17-25 (in Korean with English abstract).

- Choi, Y.S., 2016, An experimental study on the engineering properties of self-healing eco-friendly grout material, Doctor Thesis, Myongji University, 1-110.
- Gao, J., Sun, W., Morino, K., 1997, Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 307-313.
- Guerrieri, M., Sanjayan, J.G., 2009, Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures, *Fire and Materials*, 34(4), 163-175.
- Han, C.G., Kim, S.H., 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*, 4(3), 62-68 (in Korean with English abstract).
- Hur, J.H., Kim, J.H., Park, W.G.I., Kim, K.H., 2013, Seismic performance of seismic retrofitted column by various type of FRP, *Journal of the Korean Society for Railway*, 2013(5), 1378-1383.
- Hyeon, H.J., 2017, An experimental study on the properties of the cementless lightweight aerated concrete with blast furnace slag, Master Thesis, Konkuk University, 1-46.
- Jang, H.O., Ji, N.O., 2013, An experimental study on the mixing of normal strength and high fluidity concrete using ground granulated blast furnace slag, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 29(6), 81-88 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, S.I., 2015, Effects of replacement ratio and fineness of GGBFS on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength high-volume GGBFS blended cement pastes, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(2), 115-125 (in Korean with English abstract).
- Jo, S.G., 2013, An experimental study on the workability and engineering properties of concrete using ground granulated blast furnace slag, *The Society of Convergence Knowledge Transactions*, 1(1), 43-50 (in Korean with English abstract).
- Kang, S.T., Choi, J.I., Koh, K.T., Lee, K.S., Lee, B.Y., 2016, Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete, *Composite Structures*, 145, 37-42.
- Kim, H.C., 2017, A Study on the development of a grouting material containing blast furnace slag and carbon fiber, Doctor Thesis, Chosun University, 1-102.
- Kim, J.H., Han, M.C., Han, C.G., 2014, Strength development of the concrete incorporating blast furnace slag and recycled aggregate as alkali activator, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2(2), 107-114 (in Korean with English abstract).
- Kim, W.K., 2012, Current states and prospect of utilization of blast furnace slag, *Korean Institute of Architecture*, 56(8), 14-17.
- Kim, Y.H., Han, C.G., Lee, H.J., 2013, Effect of recycled fine aggregate powder and OPC on the strength gain properties of mortar using blast furnace slag powder and natural aggregates, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 29(3), 81-88 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.W., 2010, Containing aramid fiber reinforced concrete research, Master Thesis, Kyungpook National University, 1-45.
- Lee, C.H., Eo, S.H., 2020, Compressive strength and durability evaluation by freezing and thawing test of repaired reinforced concrete columns, *Journal of the Korea Contents Association*, 20(12), 529-536 (in Korean with English abstract).
- Marjanović, N., Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Nikolic, V., Petrovic, R., 2015, Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends, *Ceramic International*, 41(1), 1421-1435.
- Mechtcherine, V., 2013, Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 41, 365-373.
- Nam, J.S., Ryu, J.C., Kim, K.Y., Kim, H.S., Jeon, J.K., 2014, Improvement of the strength properties and impact resistance of the cement composite materials by the use of surface modification of the aramid fibers, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(1), 100-108 (in Korean with English abstract).

- Nath, S.K., Kumar, S., 2013, Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer, *Construction Building Materials*, 38, 924-930.
- Oh, J.E., Monteiro, P.J.M., Jun, S.S., Choi, S., Clark, S.M., 2010, The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash based geopolymers, *Cement Concrete Research*, 40(2), 189-196.
- Park, K.H., 2015, Evaluation of applicability of environment friendly biogrouting methods in loose frictional soils, Doctor Thesis, Chosun University, 1-167.
- Park, T.B., 2017, Physio-chemical characteristics of slag based zero-cement grout, Master Thesis, Myongji University, 1-45.
- Romualdi, J.P., Batson, G.B., 1963, Mechanics of crack arrest in concrete, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 89(3), 147-168.
- Seo, H., Park, K.H., Kim, C.J., Kim, H.C., Kim, D.H., 2019, Development of reinforcement grout materials using blast furnace slag powder and aramid fiber, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, 18(1), 67-77 (in Korean with English abstract).
- Seo, M.G., Park, S.J., 2010, Manufacturing method of carbon fibers and their application fields, *Polymer Science and Technology*, 21(2), 130-140.
- Shah, S.P., 1984, Fiber reinforced concrete, *Handbook of Structural Concrete*, 1, 1-14.
- Shah, S.P., Rangan, B.V., 1971, Fiber reinforced concrete properties, *ACI Journal*, 68(2), 126-135.
- Yang, Y.H., 2017, Evaluation of reinforcement effect of grouting using aramid fiber, Master Thesis, Chosun University, 1-65.
- Yoo, S.J., Yuan, T.F., Hong, S.H., Yoon, Y.S., 2020, Evaluation of structural performance of concrete beams strengthened with carbon fiber sheets and no-slump concrete, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 20(4), 185-193 (in Korean with English abstract).