한국지반신소재학회논문집 제18권 3호 2019년 9월 pp. 101 ~ 112
J. Korean Geosynthetics Society Vol.18 No.3 September 2019 pp. 101 ~ 112

DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2019.18.3.101
ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

보강섬유와 고로슬래그 미분말 함유량에 따른 차수그라우트재 개발

Development of Reinforcement Grout Materials Using Reinforcing Fiber and Blast Furnace Slag Powder

서 혁[1], 김대현[2]*

Hyeok Seo[1], Daehyeon Kim[2]*

[1]*Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*

[2]*Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chosun Univ., 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*

ABSTRACT

The grouting method is utilized to reinforce and waterproof poor grounds, enhance the bearing capacity of geo-structures damaged from differential settlement. The purpose of this research is to improve the compressive strength and degree of grout using reinforcing fibers and blast furnace slag powder. In this regard, this study has conducted uniaxial compression tests for the specimens with high ratios (higher than 50%) of blast furnace slag powder. The carbon fiber content was increased by 0, 0.5, and 1.0% to coMpare its compressive strength with that of aramid fiber. The uniaxial compressive strength increased with the increase of fiber content and the bridging activity by fiber in cement tended to increase uniaxial compressive strength. Based on the results, it was confirmed that the aramid fiber has a gel time of 14 seconds and the uniaxial compressive strength is more than 3 Mpa coMpared to carbon fiber.

요 지

그라우팅 공법은 연약지반의 보강과 방수, 부등침하로 손상된 구조물의 지지력을 향상시킨다. 본 연구는 보강섬유와 고로슬래그 미분말을 이용하여 그라우트재의 압축강도와 차수를 향상시키는데 있다. 이와 관련하여 본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 비율이 높은(50% 이상) 시료에 대해 일축압축시험을 수행하였다. Mpa또한 탄소섬유와 아라미드 섬유를 비교하기 위하여 0, 0.5, 1.0%로 증가시켜 실험하였다. 탄소섬유 및 아라미드 섬유 함유량이 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하였고 이는 그라우트재 내에 섬유에 의한 가교작용이 일축압축강도를 증가시키는 경향을 확인하였다. 또한 아라미드 섬유로 보강된 그라우트재에서 탄소섬유로 보강된 그라우트재 보다 일축압축강도가 약 10%이상 증가된 것을 확인하였다.

Keywords **:** Blast furance slag, Aramid fiber, Carbon fiber, Uniaxial compressive strength, Gel-time

1. 서 론

그라우팅공법은 토목분야에서 주로 불안정한 사면의 보강이 목적이나 매립지역, 제방 또는 댐 등의 차수를 필요로 하는 곳, 구조물의 보수·보강, 연약지반 보강의 수단으로 개발되었다. 최근에는 지하철, 도로 및 공항, 단지조성, 고속철도, 항만, 발전소 등 수많은 대규모 국가 산업시설물 건설공사에서 사용되고 있다.

하지만 공사가 진행되는 동안 연약한 지반에 대한 안전대책 소홀로 비롯되는 인적 물적사고가 끊임없이 일어나고 있으며, 구조물이 완성된 후 발생되는 균열이나 기울어짐, 누수 등의 원인도 연약한 지반의 부등침하가 직접적인 원인인 경우가 많다. 이와 같이 그라우팅 공법은 연약지반의 보강 및 차수, 저수지와 댐 시공 등 지하수위저하 또는 상승과 진동으로 인하여 침하 및 부등침하에 피해를 받는

Received *9 Jun. 2019,* ***Revised*** *24 Sep. 2019,* ***Accepted*** *25 Sep. 2019*

****Corresponding author***
Tel: +82-62-030-7607; Fax: +82-62-220-2687
E-mail address: dkimgeo@chosun.ac.kr (D. H. Kim)

건물의 원상복구 및 지지력증대를 위해 사용되고 있다.

그라우팅공법과 같은 지반개량공법의 고결제로는 시멘트를 보편적으로 사용하고 있으나 시멘트 재료는 환경적인 문제를 일으킬 수 있다. 특히 시멘트 등의 물질은 취성재료로써 인장, 수평력에 취약한 특성을 가지고 있다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 시멘트의 양을 줄이고 고로슬래그 미분말을 대체함으로써 지반환경에 대한 문제를 개선, 보강섬유인 아라미드 섬유와 탄소섬유를 이용하여 인장, 수평력을 증대시키고 내진성능도 향상시킬 수 있는 차수그라우트재를 개발하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 개발하고자 하는 그라우트재의 현장 적용성을 위한 최적의 Gel-time 및 배합비를 규명하고자 실내실험을 수행하였고, 고로슬래그 미분말과 아라미드 섬유 배합을 통해 차수평가를 위한 투수시험과 주입재만이 경화한 고결물의 강도인 호모겔의 일축압축강도를 측정하였다.

최근 국내에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있으며, 사용하는 시멘트의 일정 비율에 대해 고로슬래그 미분말을 치환하는 형태의 연구가 진행되고 있다. Kim et al(2013), Jeong et al(2015)등은 국내의 고로슬래그 미분말에 관한 연구는 단순한 순환골재로의 활용이 연구의 주를 이루었다. 많은 연구자들이 경제성 측면에서 강점을 지닌 골재를 재활용하여 환경친화적인 모르타르의 개발에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

또한 건설현장에서의 시공성과 물리적 특징을 분석하기 위해 고로슬래그 미분말의 치환률과 분말도에 연구의 초점이 맞춰져 있는 경우가 많다(Jo, 2013; Jang and Ji, 2013). Han et al.(2009), Kim et al.(2014)은 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. Choi(2013)는 고로슬래그 미분말과 알칼리 활성화제를 첨가하여 흙을 고결시키는 연구에 대하여 진행하였으며, 수산화칼슘, 수산화나트륨을 이용한 화학적 알칼리 활성화제와 굴패각, 미생물 알칼리 활성화제를 이용하여 일축압축강도 비교시험을 하였다. 그 결과, 고로슬래그와 미생물 알칼리 활성제를 이용하였을 때 내구성 및 경제성이 높은 친환경 고결제로 현장 적용 가능성이 있다고 하였다. Kim(2017)은 고로슬래그 미분말을 20%, 40%를 치환하였고, 탄소섬유를 사용하여 차수그라우트재를 개발하고자 하였다. 호모겔 일축압축강도 시험결과, 고로슬래그 미분말의 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 감소하는 경향을 나타내었고, 탄소섬유의 함유에 따라 공시체의 일축압축강도는 증가하였다.

이처럼 고로슬래그 미분말을 사용한 연구는 콘크리트에서 순환골재의 대체자원으로 사용하는 연구가 지배적이었으나, 최근 고로슬래그 미분말을 고치환하는 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 하지만 현재 연구자들에 의한 결과가 각각 다르게 나타나고 있어 고로슬래그 미분말을 다량치환한 시멘트에 대한 연구는 지속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 한편 토목 구조물에 첨가제와 혼화제로 섬유를 활용한 보강공법 또한 국내·외로 연구가 이루어지고 있다.

콘크리트는 압축강도가 크고 내화성과 내구성이 우수하며 경제성, 시공성의 편리함 등으로 인하여 건축 및 토목구조물에 가장 많이 사용되는 구조재료 중 하나이지만, 콘크리트는 건조함에 따라 인장응력이 작용하여 건조 수축이 크고, 상대적으로 인장강도가 작으며, 취성파괴가 일어나는 단점을 가지고 있다. Yang(2017)은 아라미드 섬유를 0.0, 0.5, 1.0, 1.5%를 활용하여 호모겔의 일축압축강도 특성을 확인하였다. 시험결과, 아라미드 섬유의 함유율이 높을수록, 아라미드 섬유를 분산시키는 표면유제처리율이 높을수록 일축압축강도가 증가함을 확인하였다.

Shah(1971)는 시멘트에 강섬유를 혼합하여 인장강도와 휨강도를 측정하였다. 그 결과 휨강도는 20배가 증가하고 인장강도는 2배가 증가한 것을 확인할 수 있었다.

이처럼 섬유를 보강한 재료는 내충격성능, 균열제어성능, 휨・인장성능, 전단성능, 압축성능 등에서 우수한 특성을 가지고 있어 시멘트의 단점을 보완하고 구조물의 유지보수 및 보강에 있어 높은 활용가능성을 지니고 있다.

따라서 본 연구에서는 보강섬유인 아라미드 섬유와 탄소섬유를 시멘트의 무게대비 0.5%와 1.0%를 사용하여 차수그라우트 재료를 개발하고자 각 배합비에 맞는 투수시험을 수행하였고, 각 섬유에 따른 일축압축강도시험을 통하여 그라우트재의 강도기준에 맞게 평가하고자 하였다.

2. 그라우팅 공법

2.1 그라우팅 공법 개요

그라우팅공법의 목적은 현탁액상의 시멘트 물질을 일정 압력상태에서 지반 내에 주입하여 지반의 성질을 개선

하는 것이다. 액상 주입재는 주입 후 시간경과에 따라 양생되면서 강도와 강성이 증가한다. 주입재 구성물질의 다양한 성질에 따라 양생에 따른 강도와 강성의 발현정도가 다르게 나타나며, 소정의 목적에 따라 다른 성질의 시멘트 주입재를 사용한다.

주입에 의한 지반의 성질개선 범위는 크게 4가지로 정리할 수 있으며, 이는 지반의 차수, 투수능의 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 극명하게 차이가 난다.

2.2 보강섬유(슈퍼섬유)

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

슈퍼섬유의 경우 강도 20g/d이상, 탄성률 50g/d이상을 동시에 만족하여야하며 g/denier는 섬유에서 사용하는 실의 굵기를 나타내는 단위로 1g/denier는 9,000m인 실의 무게가 1g으로 정의된다.

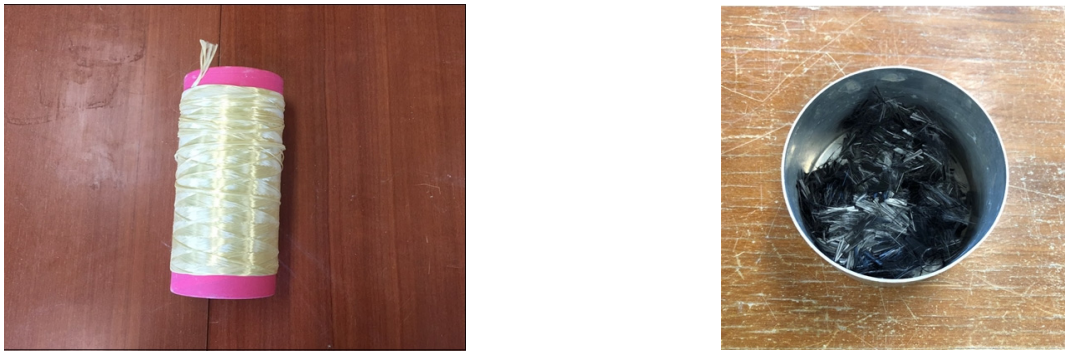
2.2.1 아라미드섬유

아라미드 섬유는 1965년에 유리섬유의 강도와 석면의 내열성을 갖는 섬유를 목표로 개발에 성공한 방향족 고분자를 원료로 한 합성섬유이며, 지방족 폴리아미드(aliphatic polyamide)의 Nylon과 대별되는 대표적인 용어이다. 아라미드의 종류로써 크게 결합된 방향족환의 결합단위에 의해서 파라계 아라미드와와 메타계 아라미드로 구분된다. 메타계는 고온에 내열성이 우수하고, 파라계 아라미드는 고탄성 및 고강도의 특징을 갖는다. 특히, 파라계 아라미드는 탄성율이 500～1,000g/denier 정도로 탄성율이 좋으며, 인장강도 또한, 20g/denier 이상을 가지고 있다. 또한, 분해온도가 400°C이상, -160°C이하에서도 섬유의 특성을 유지할 수 있어 내한·내열성 및 우수한 내구성을 가지고 있다. 아라미드 섬유는 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 산업분야에서 사용이 확대되고 있는 고부가가치 소재이다(Yang, 2017).

2.2.2 탄소섬유

탄소섬유는 탄소원소의 질량 함유율이 90% 이상으로 이루어진 섬유장의 탄소재료를 의미한다. 원료에 따라 PAN계 탄소섬유야 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 산업분야의 재료용, 스포츠 레저 분야 등 광범위한 용도로 쓰이고 있다. Pitch계 탄소섬유는 핏치 프리커서(콜타르 또는 석유 중질유분을 원료로 얻어지는 핏치섬유)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.

Fig. 1은 실험에 사용된 섬유의 사진이다.



(a) Aramid fiber　　(b) Carbon fiber

Fig. 1. Experimental fiber

Table 1. Mixing ratio of grout materials of measurement gel-time using carbon fiber

A Liquid		B Liquid			
SS (g)	W (g)	OPC (g)	B (g)	W (ml)	C (g)
31.25 (50%)	31.25 (50%)	28.00 (100%)	0.00 (0%)	53.75	0%
		19.60 (70%)	8.40 (30%)		0.14 (0.5%)
		11.20 (40%)	16.80 (60%)		0.28 (1.0%)

Table 2. Mixing ratio of grout materials of measurement gel-time using aramid fiber

A Liquid		B Liquid				
SS (g)	W (g)	OPC (g)	B (g)	W (ml)	O (%)	C (g)
31.25 (50%)	31.25 (50%)	28.00 (100%)	0.00 (0%)	53.75	0.7	0%
		19.60 (70%)	8.40 (30%)		1.2	0.14 (0.5%)
		11.20 (40%)	16.80 (60%)			0.28 (1.0%)

2.3 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말은 잠재수경성을 가지고 있고, 그 자체의 경화성질은 미약하지만 포틀랜드시멘트와 혼합할 경우 수산화칼슘이나 황산염의 작용에 의해 경화가 촉진되어 포틀랜드시멘트에서 얻을 수 없는 특성을 얻을 수 있다.

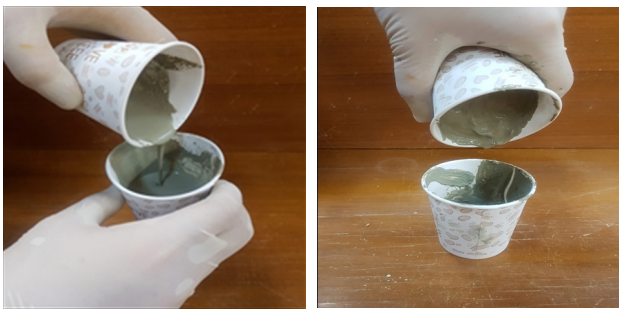
$Ca(OH)_2$나 Na(OH)와 같은 자극제를 첨가하게 되면 pH=12 정도의 알칼리성에 의해 피막이 파괴되어 Si^{4+} 및 Al^{3+} 이온 특히, Al 이온이 용출되기 때문에 $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ 유리의 수화반응은 진행된다.

수화발열 속도의 저감 및 콘크리트의 온도상승 억제 효과, 장기 강도의 향상, 수밀성의 향상, 염화물 이온 침투 억제에 의한 철근 부식 억제 효과, 황산염 등에 의한 화학저항성의 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, 고로슬래그미분말의 뛰어난 특성을 더욱 효율적으로 사용할 필요가 있으며, 고로슬래그미분말의 규격화 및 콘크리트용 혼화재로서의 활용이 요구되고 있다.

3. 실내시험

3.1 그라우트재의 Gel-time 측정을 위한 배합비

본 실험에서는 Fig. 2와 같이 주입재 배합비를 중량비로 계산하여 A액과 B액을 각각 200ml 종이컵에 62.5ml씩 채운 후 연속적으로 좌, 우로 혼합시켜 종이컵에서 유동성이 정지되는 시간을 3회 측정하여 평균값으로 나타내었다.



(a) Mix (b) Gei-time test

Fig. 2. Gel-time test of grout materials

탄소섬유는 아라미드섬유에 비해 친수성이 낮아 물속에서 뭉침현상이 발생하지 않아 추가적으로 표면유제처리를 하지않고 겔타임을 측정하였다.

SS(Sodium silicate)는 규산소다이며, W(Water)는 물을 나타내었다. 또한 OPC(Ordinary portland cement)는 시멘트, B(Blast furance slag powder)는 고로슬래그 미분말, A(Aramid fiber)는 아라미드 섬유, O(Oiling agent)는 표면유제처리, C(Carbon fiber)는 탄소섬유를 나타내었다.

Tables 1, 2는 Gel-time 측정을 위한 그라우트재의 배합비이다.

3.2 그라우트재의 일축압축강도 시험

3.2.1 호모겔 일축압축강도 측정을 위한 배합비

본 연구에서 측정하고자하는 호모겔 공시체는 흙시료를 사용하지 않고 주입재료만의 순순한 일축압축강도를 측정하여 주입재료의 타당성을 확인하기 위한 실험으로,

Table 3. Mixing ratio of grout materials of unconfined compression strength measurement using carbon fiber

A liquid		B liquid				C
SS (g)	W (g)	OPC (g)	B (g)	$Ca(OH)_2$ (ml)	W (ml)	C (g)
125 (50%)	125 (50%)	110 (100%)	0 (0%)	0	220	0%
		77 (70%)	33 (30%)	33	187	0.55 (0.5%)
		44 (40%)	66 (60%)	66	154	1.1 (1%)

Table 4. Mixing ratio of grout materials of unconfined compression strength measurement using aramid fiber

A liquid		B liquid				C	
SS (g)	W (g)	OPC (g)	B (g)	$Ca(OH)_2$ (ml)	W (ml)	O (g)	C (g)
125 (50%)	125 (50%)	110 (100%)	0 (0%)	0	220	0.7	0%
		77 (70%)	33 (30%)	33	187	1.2	0.55 (0.5%)
		44 (40%)	66 (60%)	66	154		1.1 (1%)

시멘트와 고로슬래그 미분말, 탄소섬유, 아라미드 섬유의 배합비를 통한 강도효과를 확인하고자 하였다.

SS는 규산소다이며, W는 물을 나타내었다. 또한 OPC는 시멘트, B는 고로슬래그 미분말, $Ca(OH)_2$는 수산화칼슘, A는 아라미드 섬유, O는 표면유제처리, C는 탄소섬유를 나타내었다.

수산화칼슘은 고로슬래그 미분말을 덮고 있는 피막을 제거하여 수화열을 발생시켜 강도증진 효과에 영향을 미치므로 호모겔 일축압축강도 측정시 배합하였다.

Tables 3, 4는 호모겔의 일축압축강도 측정을 위한 주입재의 배합비를 나타낸 것이다.

(a) Water curing (b) Unconfined compression test

Fig. 3. Unconfined compression test of grout materials

3.2.2 호모겔 공시체 제작

본 연구에서 사용된 몰드의 크기는 5cm(D)와 10cm(H)의 원형 몰드로서 직경 대 높이의 비율이 1 : 2로 제작하였다. 실험 몰드는 주철로 제작하였으며, 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위하여 용기 안쪽에 윤활제를 얇게 도포하였다.

준비된 몰드에 주입재를 넣고, 3시간 후 탈형하여 수중양생을 통해 공시체를 재령하였다. 완성된 공시체의 크기는 5cm(D)와 10cm(H)로 주입재에 따른 일축압축강도를 분석하기 위해 3일, 7일, 14일, 28일까지 재령 하였으며, Fig. 3(b)와 같이 일축압축시험시 각각의 공시체마다 각각 다른 파괴형상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 투수시험

본 연구에서는 포화투수시험을 수행하였다. 투수시험은 모든 형태의 흙에 폭 넓게 사용되고 있으며, 유출되는 물의 양 Q와 측정시간 t를 측정하여 투수계수를 구한다.

투수시험시 탄소섬유 및 아라미드 섬유는 그라우트재 강도증진의 목적으로 사용하였으며, 아라미드 섬유가 차수성에 미치는 역할이 미미하여 투수시험시 제외하였다. 고로슬래그 미분말과 시멘트를 이용한 차수 그라우팅 공법은 시멘트와 약액으로 사용하는 LW그라우팅공법과 고로슬래그 미분말 입자가 흙 입자 사이에 침투되어 차수의

Table 5. Mixing ratio of grout materials for permeability test

A liquid		B liquid				Sand
SS (ml)	W (ml)	OPC (g)	B (g)	$Ca(OH)_2$ (ml)	W (ml)	SP (g)
175	175	100 (100%)	0 (0%)	0	200	900
		70 (70%)	30 (30%)	30	170	
		40 (40%)	60 (60%)	60	140	

(a) Mixing A+B liquid (b) Permeability test

Fig. 4. Permeability test

효과를 나타내는 공법이다.

주입재 제조는 A액의 규산소다3호의 함량을 물 대비 175$m\ell$(50%)로 고정하였으며, B액으로 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 30g(30%), 60g(60%)을 첨가하였으며, 각각의 배합비를 표준사 900g에 교반하여 100mm(D) × 120mm(H)의 모형토조에서 Fig. 4와 같이 투수시험을 진행하였다.

시료의 하단에 철망과 거름종이를 설치하여 시료가 빠져나가지 못하게 하였고, 배합 후 수중양생을 실시하여 20±2°C로 일정 온도를 맞춰 7일 양생 후 투수시험을 수행하였다.

투수시험을 위한 시료 배합비는 Table 5에 나타내었다. SS는 규산소다이며, W는 물을 나타내었다. 또한 OPC는 시멘트, B는 고로슬래그 미분말, $Ca(OH)_2$는 수산화칼슘을 나타내었다.

4. 시험결과

4.1 배합비에 따른 Gel-time 분석

Fig. 5에서 시멘트는 “OPC”로 표기하였으며, 고로슬래그 미분말은 “B”로 표기하였으며, 표면유제처리는 “O”, 아라미드섬유는 “A”, 탄소섬유는 “C”로 표기하였고, 숫자 표현은 배합비의 %를 나타내었다.

4.1.1 아라미드섬유 함유량에 따른 Gel-time 분석

Fig. 5(a), (b)는 OPC:B의 배합비가 100:0, 70:30, 40:60%일 때 무처리의 경우 3회 측정 후 평균 157, 215, 303초로 가장 늦은 Gel-time을 가지고 있으며, O가 0.7wt%, A가 0.5wt%일 때 131, 184, 270초, O가 0.7wt%, A가 1.0wt%일 때 101, 167, 245초로 나타났다.

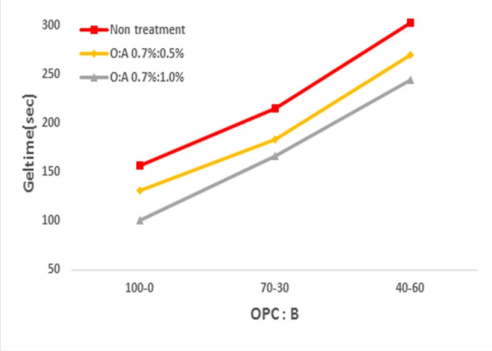
OPC:B의 배합비 중 고로슬래그 미분말의 함량이 30% 증가할수록 Gel-time은 약 50초 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 Gel-time이 증가한 것으로 나타났다. 또한 O:A의 배합비 중 아라미드 섬유의 함량이 0.5% 증가할수록 Gel-time은 약 25초 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 아라미드 섬유가 친수성으로 배합수를 흡수하여 Gel-time을 감소시키는 것으로 판단된다.

4.1.2 표면유제처리율에 따른 아라미드섬유의 Gel-time 분석

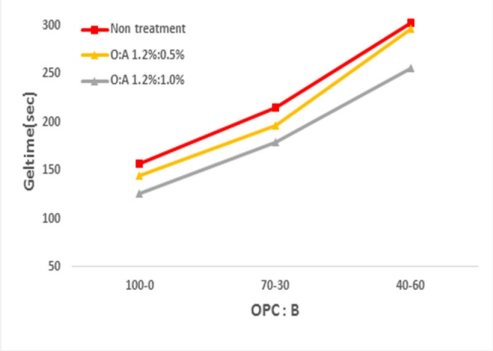
Fig. 5(c)는 O:A의 배합비 중 표면유제처리의 함량이 0.5% 증가할수록 Gel-time은 약 10~15초 증가하는 경향을 나타내었으며, Fig 5(d)는 O:A의 배합비 중 표면유제처리의 함량이 0.5% 증가할수록 Gel-time은 약 20초 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 아라미드 섬유 자체는 친수성으로 물을 흡수하는 특징을 가지는데 표면유제처리를 통하여 아라미드 섬유가 배합수를 흡수하는 양을 줄여 Gel-time이 증가하는 것으로 판단된다.

4.1.3 탄소섬유 함유량에 따른 Gel-time 분석

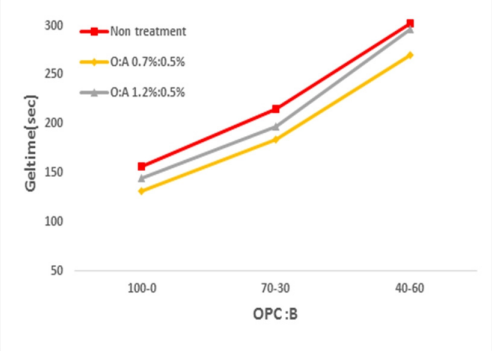
Fig. 5(e)는 탄소섬유의 함량에 0.5% 증가할수록 10~17초 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 아라미드 섬유와



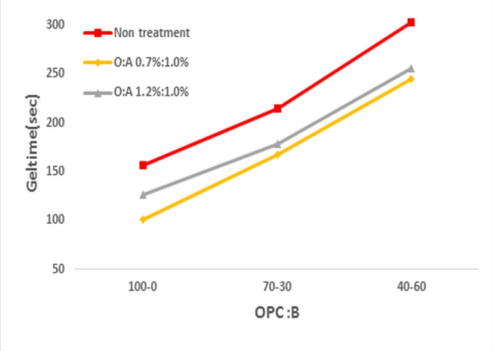
(a) Analysis of gel time according to 0.7% surface oil treatment of aramid fiber



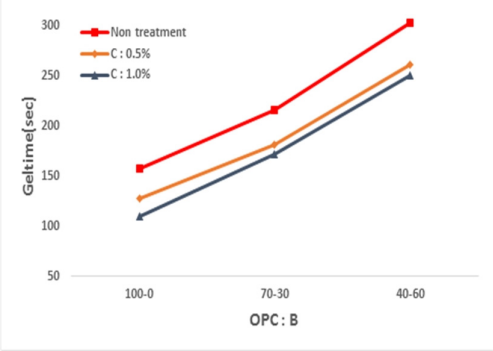
(b) Analysis of gel time according to 1.2% surface oil treatment of aramid fiber



(c) Gel-time analysis of 0.5% aramide fiber content



(d) Gel-time analysis of 1.0% aramide fiber content



(e) Gel-time analysis according to carbon fiber content

Fig. 5. Analysis of gel-time by fiber content

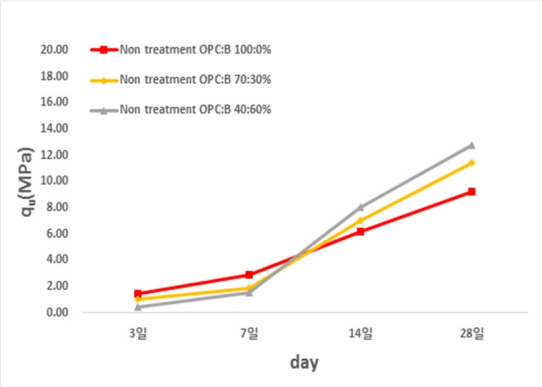
마찬가지로 탄소섬유 섬유자체가 배합수를 흡수하여 Gel-time을 감소시키는 것으로 판단되며, 탄소섬유는 아라미드섬유보다 친수성이 적기 때문에 표면유제처리를 따로 하지 않아 아라미드섬유에 비해 흡수율이 높은 것으로 판단된다.

4.2 호모겔 일축압축강도 시험 결과 분석

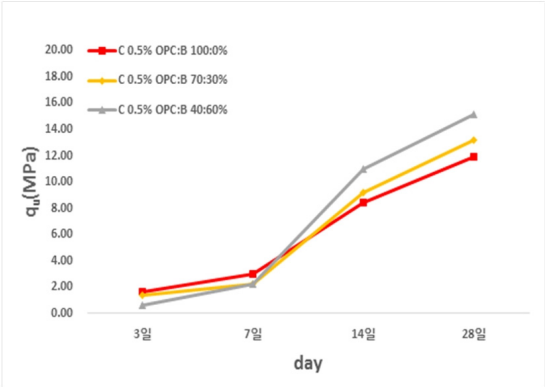
4.2.1 OPC : B 배합비에 따른 일축압축강도 시험 결과

Fig. 6(a)는 무처리에서 OPC:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 OPC:B 100:0%의 경우 1.44Mpa로 가장 높게 나타났으며, OPC:B가 40:60%일 때 0.45Mpa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 OPC:B 100:0%의 경우 9.22Mpa로 가장 낮게 나타났으며, OPC:B가 40:60%일 때 14.8Mpa로 가장 높게 나타났다.

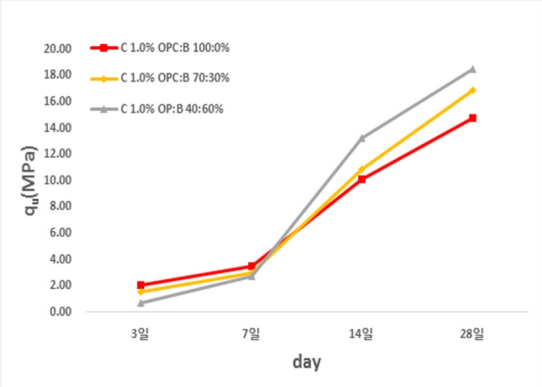
Fig. 6(b)는 C:0.5%이고 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 OPC:B가 100:0%의 경우 1.60Mpa로 가장 높게 나타났으며, OPC:B가 40:60%일 때 0.60Mpa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 OPC:B 100:0%의 경우 9.99Mpa



(a) Results of uniaxial compressive experiment test from non-treatment



(b) Results of uniaxial compressive experiment test from carbon fiber 0.5%



(c) Results of uniaxial compressive experiment test from carbon fiber 1.0%

Fig. 6. Analysis of uniaxial compressive strength by OPC:B mixing ratio

로 가장 낮게 나타났으며, OPC:B가 40:60%일 때 13.48Mpa로 가장 높게 나타났다.

Fig. 6(c)는 O:A가 1.2:1.0%에서 OPC:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 OPC:B 100:0%의 경우 2.10Mpa로 가장 높게 나타났으며, OPC:B가 40:60%일 때 0.72Mpa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 OPC:B 100:0%의 경우 13.20 Mpa로 가장 낮게 나타났으며, OPC:B가 40:60%일 때 15.02Mpa로 가장 높게 나타났다.

고로슬래그 미분말의 표면을 둘러싸고 있는 박막을 수산화칼슘 이온으로 제거하여 장기 수화열을 높일 수 있었고 이로 인해 기존 선행연구와는 달리 고로슬래그 미분말의 함유량에 따라 장기 강도를 증진시킬 수 있었다.

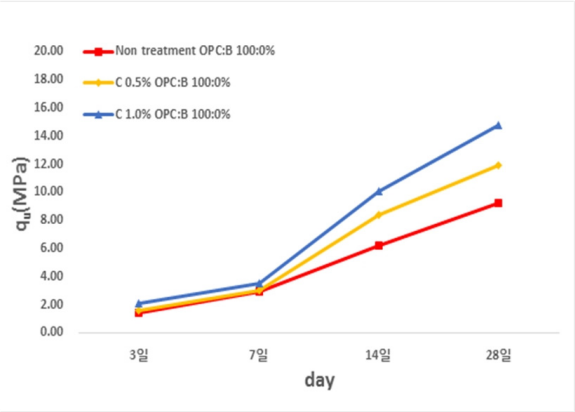
4.2.2 탄소섬유 혼입률에 따른 일축압축강도 시험 결과

Fig. 7(a)는 탄소 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 OPC:B 100:%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 1.44Mpa로 가장 낮게 나타났으며, C:1.0%일 때 2.10Mpa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 9.22Mpa로 가장 낮게 나타났으며, C:1.0%일 때 13.20Mpa로 가장 높게 나타났다.

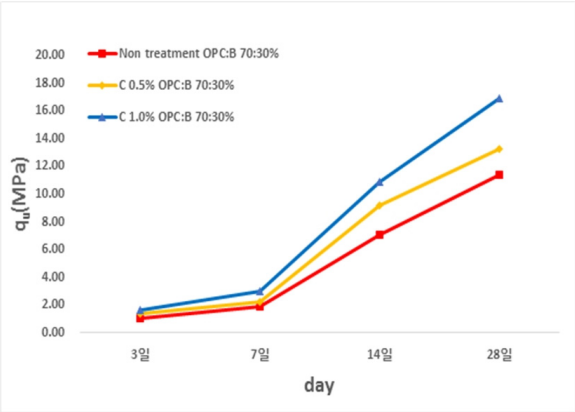
Fig. 7(b)는 탄소 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 OPC:B 70:30%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 1.04Mpa로 가장 낮게 나타났으며, C:1.0%일 때 1.60Mpa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 11.40Mpa로 가장 낮게 나타났으며, C:1.0%일 때 13.98Mpa로 가장 높게 나타났다.

Fig. 7(c)는 탄소 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 OPC:B 40:60%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 0.45Mpa로 가장 낮게 나타났으며, C:1.0%일 때 0.72Mpa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 13.28Mpa로 가장 낮게 나타났으며, C:1.0%일 때 15.02Mpa로 가장 높게 나타났다.

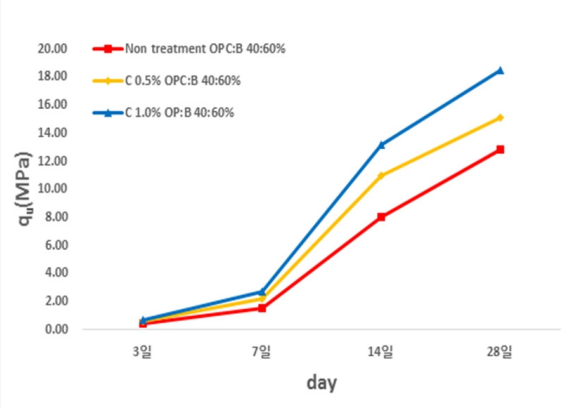
본 연구에서는 탄소섬유의 양이 0.5% 증가할수록 3, 7, 14, 28일 모두 일축압축강도가 높은 것으로 나타났는데 이는 시멘트와 섬유간의 부착성이 좋기 때문에 축하중에



(a) Results of uniaxial compressive experiment test from OPC:B = 100:0



(b) Results of uniaxial compressive experiment test from OPC:B = 70:30



(c) Results of uniaxial compressive experiment test from OPC:B = 40:60

Fig. 7. Analysis of uniaxial compressive strength by carbon fiber ratio

의한 응력을 공시체 내부에서 저항하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2.3 각 섬유와 OPC:B 배합비에 따른 일축압축강도 시험 결과

아라미드 섬유를 활용한 호모겔의 일축압축강도에 대한 선행연구는 Shah(1971)에서 진행하였으며, 아라미드 섬유의 양이 증가할수록, 표면유제처리 비율이 높아질수록 높은 일축압축강도를 확인한바 있다.

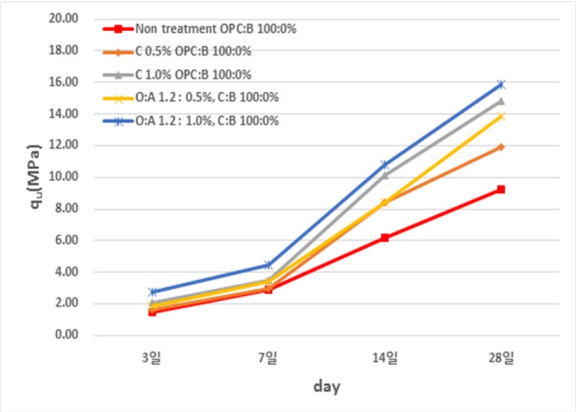
본 연구에서도 아라미드 섬유와 탄소섬유의 양이 0.5% 증가할수록 3, 7, 14, 28일 모두 일축압축강도가 높은 것으로 나타났는데 이는 시멘트와 섬유간의 부착성이 좋기 때문에 축하중에 의한 응력을 공시체 내부에서 저항하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 아라미드섬유의 경우 표면유제처리 비율이 0.5% 증가할수록 3, 7, 14, 28일 모두 일축압축강도가 높은 것으로 나타났는데 이는 표면유제처리를 통해서 아라미드 섬유의 유동성이 우수해짐에 따라 분산능력이 높아져 아라미드 섬유가 공시체에 골고루 배합됨에 따라 일축압축강도가 증가된 것으로 판단된다.

OPC : B가 40 : 60%일 때, 무처리의 경우 28강도에서 12.80Mpa로 가장 높게 나타났으며 섬유의 양이 1.0% 증가할수록 탄소섬유는 28일강도에서 18.50Mpa, 아라미드 섬유는 28일 강도에서 21.68Mpa로 무처리일때보다 5.7Mpa, 8.88Mpa 증가함을 확인할 수 있었다.

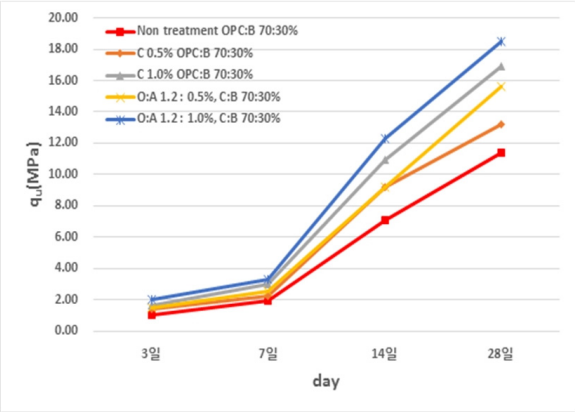
또한 아라미드 섬유로 보강된 그라우트 재료와 탄소섬유로 보강된 그라우트 재료의 강도분석 결과, 아라미드 섬유로 보강된 그라우트 재료에서 약 10%이상 압축강도가 증가한 결과를 확인하였다. 이는 탄소섬유에 비해 아라미드 섬유의 흡수율이 더 크므로 W/C감소에 탄소섬유보다 강도증진이 더 이루어진 것으로 판단된다.

4.3 투수시험 결과 분석

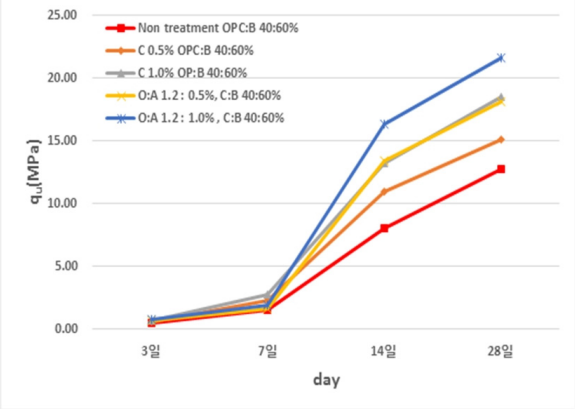
Fig. 9는 본 연구결과와 기존 개발공법에 대한 차수효과



(a) Results of uniaxial compressive experiment test from OPC:B = 100:0%



(b) Results of uniaxial compressive experiment test from OPC:B = 70:30%



(c) Results of uniaxial compressive experiment test from OPC:B = 40:60%

Fig. 8. Analysis of uniaxial compressive strength by fiber content

Table 6. Uniaxial compressive strength test result of homo-gel

Classification		Uniaxial Compressive Strength(Mpa)			
Carbon fiber	OPC : B	3day	7day	14day	28day
Non-treatment	100 : 0%	1.44	2.90	6.19	9.22
	70 : 30%	1.04	1.91	7.05	11.40
	40 : 60%	0.45	1.51	8.00	12.80
Carbon fiber 1.0%	100 : 0%	2.10	3.50	10.10	14.80
	70 : 30%	1.60	3.00	10.90	16.88
	40 : 60%	0.72	2.75	13.20	18.50
Aramid fiber 1.0%	100 : 0%	2.72	4.48	10.79	15.89
	70 : 30%	2.03	3.33	12.28	18.49
	40 : 60%	0.81	1.92	16.32	21.68

를 비교하였다.

Shah(1971)는 미세립 시멘트, 마이크로 시멘트를 이용한 투수시험을 시험한 결과 각각 $5.0\times10^{-5}cm/s$, $8.0\times10^{-5}cm/s$로 나타나 OPC:B가 70:30%와 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 약 2.0배 이상 투수계수가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고로슬래그 미분말이 입자간의 사이를 채움으로서 차수효과를 나타내는 것으로 판단된다. 실제현장에서 그라우팅 차수를 평가할 때 특정한 기준은 없으나, 일반적으로 투수계수

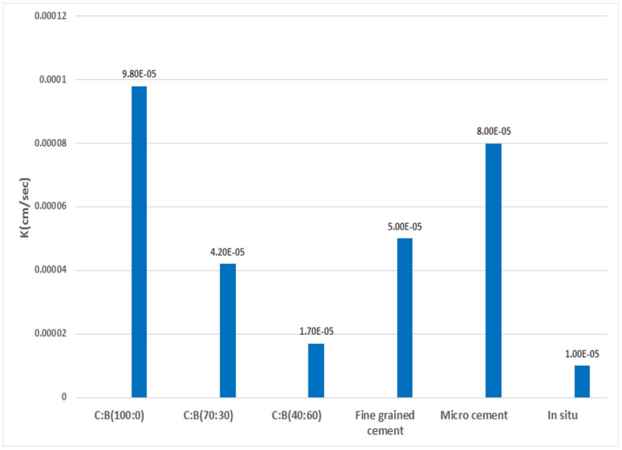


Fig. 9. Results of permeability test

가 약 $1.0\times10^{-5}cm/s$ 이하일 경우 차수가 되었다고 판단한다. 하지만 본 연구에서 사용한 그라우트의 경우 OPC:B가 40:60%일 때 최고 $1.7\times10^{-5}cm/s$로 현장차수 조건에 미달하는 것으로 나타났으나 이는 실내실험의 한계, 주입이 아닌 교반을 통한 실험결과이므로 추후 현장조건과 동일한 주입조건으로 평가해야 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 재활용 자원인 섬유 파쇄제의 아라미드 섬유, 탄소섬유 및 고로슬래그 미분말, 시멘트 혼합으로 지반환경에 대한 문제를 개선하고, 우수한 압축강도, 차수성을 지닌 그라우트재를 개발하고자 하였다. 상기 배합재료의 배합비를 통해 그라우트재의 Gel-time 실험과 내구성 확인을 위한 호모겔 일축압축강도(3, 7, 14, 28일) 시험을 수행하여 개발하고자 하는 그라우트재의 역학적인 기초 성능을 평가하였다.

(1) Gel-time 측정결과, 아라미드 섬유가 0.5% 증가할수록 Gel-time은 약 20~25초 감소하였고, 표면유제처리 비율이 0.5% 증가할수록 Gel-time은 약 10~20초 증가하였다. 탄소섬유의 경우 0.5% 증가할수록 Gel-time은 약 11~17초 감소하였다. 또한 고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 Gel-time은 약 40~50초 증가하였다. 이는 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 Gel-time 이 증가하는 경향이 나타났으며, 친수성인 아라미드 섬유 및 탄소섬유의 양이 증가할수록 배합수를 흡수하여 Gel-time이 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 호모겔 일축압축강도를 측정한 결과, 3일 강도에서는 OPC:B 100:0%에서 가장 높게 나타났으며, 28일 강도에서는 OPC:B 40:60%에서 가장 높게 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말이 잠재수경성으로서 초기강도 보다는 장기강도에 더욱 효과적인 것을 알 수 있다. 또한 아라미드 섬유 1% 첨가 시 일축압축강도는 약 1.6배, 탄소섬유 1% 첨가시 일축압축강도는 약 1.4배 정도 증가되었는데, 이는 각 섬유가 그라우트재내에서 보강재 역할을 하여 내구성이 증가된 것으로 판단된다.

(3) 투수시험결과, 고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 약 2.0배 이상의 투수계수가 감소하는 것을 확인하였는데, 이는 고로슬래그 미분말이 흙 입자사이에 침투되어 차수효과가 높게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 현장차수의 조건인 $1.0\times10^{-5}cm/s$를 만족하지 못하여, 향후 현장조건과 동일한 주입조건으로 주입실험을 통하여 평가해야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 섬유를 이용한 그라우트재의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 추후 고로슬래그 미분말 및 아라미드 섬유, 탄소섬유를 이용한 환경성 평가 및 고로슬래그 미분말과 시멘트 사이의 공학적인 매커니즘 규명 등이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구내용을 초석으로 추후 폐천막, 헌 옷 등을 재활용자원을 활용하여 경제성과 일반폐기물의 재활용률을 높이고자 한다.

Acknowledgement

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

References

1. Choi, S. G. (2013), Development of environment-friendly sand cementation using blast furnace slag and calcite precipitation, Kyungpook National University, Doctor Thesis.
2. 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*, 7, pp.62-68.
3. Jang, H. O. and Ji, N. O. (2013), An Experimental Study on

the Mixing of Strength and High Fluidity Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 29(6), pp.81-88.
4. Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Choi, Y. C., Jung, S. H. and 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), pp.115-125.
5. Jo, S. G. (2013), An Experimental Study on the Workability and Engineering Properties of Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of The Society of Convergence Knowledge*, 1(1), pp.43-50.
6. Kim, H. C. (2017), A Study on the development of a grouting material containing blast furnace slag and carbon fiber, Chosun University, Ph. D. Thesis.
7. Kim, J. H., Han, M. C. and 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), pp.107-114.
8. Kim, Y. H., Han, C. G. and 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*, 29(3), pp.81-88.
9. Shah, S. P. and Rangan, B. V. (1971), Fiber Reinforced Concrete Prorerties, ACI Materials Journal, 68(2), pp.126-137.
10. Yang, Y. H. (2017), Evaluation of Reinforcement Effect of Grouting using Aramid Fiber, Chosun University, Master Thesis.