

# 저회/석고 활용 긴급복구 유동성 채움재의 개발 및 현장적용 사례

## Development and Field Application of Fluid Filler for Emergency Recovery using Bottom ash and Gypsum



**이소연 So-Yeon Lee**  
동양대학교 대학원 박사과정  
E-mail :  
prettysdb@nate.com



**임대성 Dae-Sung Lim**  
삼림엔지니어링 부사장  
E-mail :  
limmj113@hanmail.net



**정혁상 Hyuk-Sang Jung**  
동양대학교 교수  
E-mail :  
yoricom@dyu.ac.kr



**공진영 Jin-Young Kong**  
한국건설기술연구원 수석연구원  
E-mail :  
kgy2013@kict.re.kr



**권순협 Soon-Hyeop Kwon**  
(주)코카스엔텍 대표  
E-mail :  
ecotrade@ert.bizmeka.com

### 1. 서론

2014년 석촌 지하차도 지반함몰 발생을 포함하여 크고 작은 지반함몰이 국내에서 빈번하게 발생하고 있다. 지반함몰은 2011년 573건에서 2015년 1,036건으로 증가하는 추세를 보이고 있으며, 2010년 이후 규모 2×2m 이상의 큰 지반함몰이 21건 발생한 것으로 보고되고 있다. 이러한 지반함몰의 약 90%가 서울 등 도심지에서 발생하였으며 지속적으로 발생하는 지반함몰로 인해 국민들의 불안감은 더욱 커지고 있다.

우리나라의 석회암 지반은 북한의 평남지방사와 남한의 정선, 제천, 태백 등의 옥천지방사에 집중적으로 분포되어 있다. 이러한 석회암 지반에서의 싱크홀은 지하수에 의해 탄산칼슘이 녹아 그 자리에 빈 공동이 생겨 무너져 내리는 현상을 말하는데 도심지와 같이 석회암 지반이 존재하지 않는 경우 싱크홀과 같은 자연적인 발생이 아닌 인위적으로 발생한다고 볼 수 있다. 대표적인 발생 원인으로서는 하수관 손상, 매설관의 하부 공간 유입, 매립재의 공간 유입, 구조물 및 공사장 배면 유입 등이 있다. 이처럼, 도심지에서의 지반함몰은 관의 노후화, 굴착공사 등의 분명한 원인으로 발생하기 때문에 사전에 발생 원인을 최소화시키고 복구하는 것이 중요하다.

지반함몰의 발생을 최소화하고, 국민들의 안전을 지키기 위하여 서울시는 '서울시 도로함몰 특별대책'을 발표하였고, 국회에서는 '지하안전 관리에 관한 특별법'을 통과시켰다. 또한 2014년 석촌 지하차도 지반함몰 발생 이후 '도심지 지반함몰 저감 및 예방'을 위한 지반함몰 대책연구들이 진행되고 있고, 특히 지반함몰 복구에 대한 대책공법으로 선제적 예방공법과 긴급복구 공법 등이 있는데 특히 유동성 채움재(CLSM, Controlled Low Strength Materials)에 대한

연구가 활발히 이루어지고 있다. CLSM이란 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용한 공법으로 미국 콘크리트학회(ACI Committee 229, 1994)에서는 모래, 혼화제, 시멘트, 플라이 애시, 물로 구성된 저강도 유동성 채움재로 정의한다. 유동성 채움재는 자기수평성과 자기다짐성, 유동성과 강도가 조절 가능하다는 장점이 있지만, 유동성 채움재는 경화시간이 길어 도로와 같이 즉시복구가 필요한 구간에는 적용이 어려운 단점을 가지고 있다.

따라서 본고에서는 기존 유동성 채움재 공법의 문제점을 개선하고자 저회와 석고를 활용한 긴급복구용 유동성채움재를 개발하고자 하였다. 저회의 비중은 모래보다 낮아 경량성을 보이며 이를 사용 할 경우 하중을 감소시키는데 도움이 될 것으로 보인다. 또한 저회와 석고는 산업부산물로 매립처리 되는 재료이기 때문에 경제적으로 유리할 것으로 판단된다. 더불어 본 연구는 운영 중인 도로에 초점을 두었으며 공동이 발생할 경우 긴급복구를 통한 조기 사용재개가 가능해 시공성과 안정성을 바탕으로 국민들의 사회적인 불안감을 해소하는

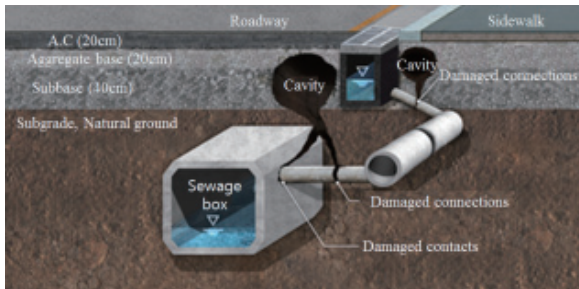
효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 지반함몰의 발생원인 및 대응방향

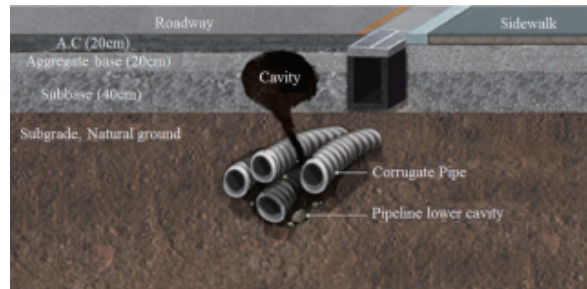
### 2.1 지반함몰의 정의 및 발생원인

지반함몰이란 지하 구조물이 여러 주변 환경에 의하여 지반을 유지하고 있던 지반이 파괴되어 수직으로 내려앉는 현상으로 정의된다(Ministry of Land, 2015).

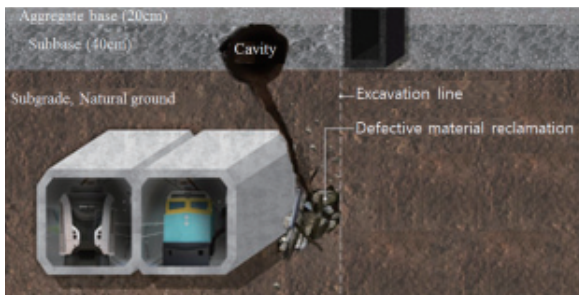
국내 도심지에서 주로 발생하는 지반함몰의 원인은 하수관 손상, 매설관의 하부 공간 유입, 불량자재 매립, 구조물 등의 배면 유입 등으로 구분할 수 있다. 이를 자세히 살펴보면 첫 번째는 <그림 1> (1)에 나타낸바와 같이 하수관의 노후화로 인한 관의 손상, 연결부 탈락 등으로 지하수와 토사가 유실되어 관 주변의 공동을 중심으로 지반함몰이 발생하게 된다. 두 번째는 매설관의 하부 공간 유입으로서 지하철 공사와 지하구



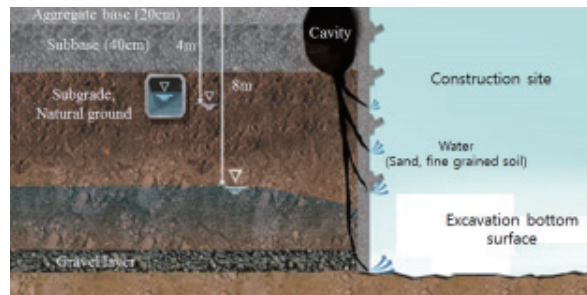
(1) 하수관 손상



(2) 매설관의 하부 공간 유입



(3) 불량 매립재의 공간 유입



(4) 구조물 및 공사장 배면 유입

그림 1. 지반함몰의 인위적인 원인 (Choi et al, 2015)

조물 시공으로 인해 매설관 하부에서 발생하며 지반 내에 관을 매설할 때 관로 하부의 다짐이 부족하여 빈공간이 내려앉는 현상이 발생할 수 있다(<그림 1> (2) 참조). 세 번째는 불량 자재 매립의 경우 지하구조물 시공 후 되메우기 시 불량 폐자재가 매립되어 지하수 유입 시 투수가 유리한 이질층으로 투수되어 상대적으로 빈 공간이 만들어져 지반함몰이 발생되고 마지막으로 공사장 배면 유입은 지하수위 아래로 굴착하는 경우 차수가 미흡해 지하수가 유입되어 구조물 벽체 배면에 공동이 발생하며 이와 같은 현상을 <그림 1>에 자세히 나타내었다(Choi et al, 2015).

## 2.2 지반함몰의 대책방안

국내에서 지반함몰 대책방안으로 재래식 복구공법이 많이 사용되고 있다. 재래식 복구공법은 지반함몰이 발생한 구간에 토사를 채우는 공법으로서 신속한 조치가 가능하지만 다짐효율이 일정하지 않으며 관로하부의 경우 다짐이 불가능하여 지반함몰 복구 후 추가적인 침하나 손상이 발생할 수 있다는 단점이 있다(Han et al, 2017).

이러한 단점의 대책 방안으로 유동성 채움재와 그라우팅 공법이 있다. 유동성 채움재는 기존 모래를 채우는 공법과 비교하였을 때 자기다짐성을 가지고 유동성이 좋으며 강도조절이 가능하다는 특징이 있어 지반함몰 대책공법으로서 활용되고 있다. 그러나 국내에서는 모래의 공급이 줄어들고 있어 모래의 대체재로서 현장발생토와 석탄회, 슬래그 같은 부산물을 많이 사용하고 있다. 이에 대한 연구동향은 [표 1]에 나타내었다. 이 중에서 국내에서 주로 활용되고 있는 석탄회의 연구동향을 살펴보면 Won(2001)은 모래의 대체재로 플라이애시를 사용한 유동화 채움재를 연구하였고 실내시험을 통하여 현장에서 사용이 가능하다는 결론을 도출하였다. 또한 Kong(2010)은 모래대신 석탄회와 시멘트, 물을 혼합한 저강도 고 유동성 채움재를 개발하여 매년 증가하는 석탄회를 사용하여 환경적인 문제를 해결할 수 있을 것이라는 연구를 하였다. 그 밖에 슬래그와 폐주물사, 페타이어 등의 재료는 혼화재로 재사용이 되고 있어 유동성 채움재에 대한 연구들은 미비하였다. 또한 국내에서 개발된 유동성 채움재의 경우 강도발전까지 충분한 양생기간이 필요하여 긴급복구에 적용하기에 어려움이 있다.

[표 1] 유동성 채움재의 연구동향

	Materials	Purpose	Title
Coal Ash	(Fly ash)	Flowable Fill	Optimization of Flowable Fill with High Volume Fly Ash Content (Won & Shin, 1999)
	(Fly ash + pond ash)	Flowable Fill	Characteristics of Unconfined Compressive Strength and Flow in Controlled Low Strength Materials Made with Coal Ash (Kong et al, 2010)
		Flowable Fill, Foundation filler	Dynamic Characteristics of Liquidity Filling Materials Mixed with Reclaimed Ash (Chae et al, 2014)
	(Fly ash + Bottom ash)	Flowable Fill, Buried Material	A Study on Self-Hardening Characteristics of Coal Ash by Mixing Ratio of Fly Ash and Bottom Ash (Shin et al, 2010)
	(Bottom ash)	Flowable Fill	Properties of Controlled Low-Strength Material Containing Bottom Ash (Won & Lee, 2001)
	Slag	Flowable Fill	Characterization of Flowable Fill with Ferro-Nickel Slag Dust (Lee, 2017)
	Waste Foundry Sand powder	Flowable Fill	A Study on the Flowable Backfill with Waste Foundry Sand for Retaining Wall (Cho et al, 2000)
	Water Soluble Polymer	Flowable Fill	Mechanical Property Enhancement of Water Soluble Polymer Pouch for Ground Reinforcement (Jung et al, 2017)

그라우팅공법은 소규모 공동의 긴급복구가 가능하다. 최근 국내에서 지반함몰 긴급복구 공법으로 현장발생토를 활용한 그라우팅공법이 몇 차례 적용된 바 있다. 현장발생토 그라우팅공법은 현장발생토와 칼슘설포알루미네이트, 석회와 석고 등이 배합되어 다짐작업 없이 타설하는 공법이다. Lee & Chung(2017)은 현장발생토 그라우팅공법으로 충분한 강도 발현이 가능하지만 혼화재 주입 시 압력으로 인하여 관로에 유입되는 문제점이 있고 현장에 따라 발생토의 공학적 특성이 달라 일반적인 긴급복구공법으로 적용하기는 시간이 소요된다고 하였다.

### 3. 유동성 채움재의 재료적 특성

#### 3.1 석탄회

석탄회는 발전소에서 석탄을 연소할 때 발생하는 부산물로서 발생위치에 따라 비회(Fly Ash)와 저회(Bottom Ash) 등으로 구분된다. 이 중 비회는 집진기에 포집되는 부산물이며 전체 석탄회의 약 80%가 발생하고 콘크리트의 혼화재나 성토용 골재, 시멘트의 원료로 활용되고 있다. 저회의 경우 보일러 하부에 낙하된 부산물로서 석탄회의 약 20%를 차지하는데 대부분 매립되고 있는 상황이다. 2010년부터 8년간 국내 석탄회의 발생 현황을 살펴보면 약 900만 톤 정도가 발생하는

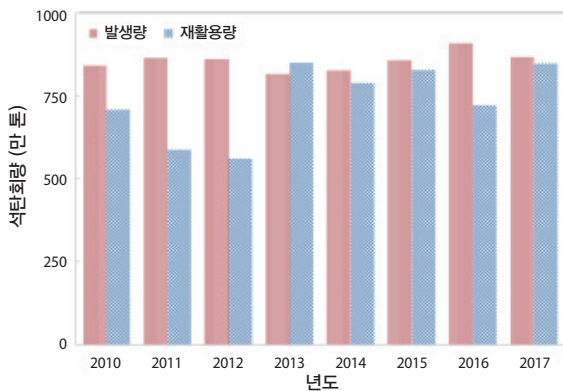


그림 2. 최근 석탄회 발생량 및 재활용량

것으로 조사되었고 재활용량은 최소 559.5만 톤(2012년)에서 최대 849.1만 톤(2013년)이 재활용 되는 것으로 조사되었다(〈그림 2〉 참조). 발생량에 대한 추이는 특별한 경향을 보이지 않으나 석탄회의 재활용량은 점차 늘어나는 것으로 파악된다.

석탄회의 재료적 특성을 살펴보면 비회의 입경은 0.3~1.0 mm로 실리카 계열의 구형입자 형태를 보이고 실리카 성분은 소석회와 반응하여 경화하는 포졸란 특성을 지니고 있다. 또한 워커빌리티가 좋고 장기강도를 증진시키며 내구성이 좋아 혼화재나 골재로서 사용되어진다. 반면 저회는 입경이 25mm 이하로 입자가 크지만 다공질의 형상을 띄며 비중은 1.9~2.3의 범위를 보인다. 또한 저회는 통일분류법에 의하면 SP, SW, SP-SW 등의 모래로 분류되지만 공학적으로 토사보다 가볍고 내구성을 증진시키는데 영향을 준다.

#### 3.2 석고

석고는 천연 석고와 산업과정 중 발생하는 부산물인 화학 석고로 구분된다. 먼저, 천연 석고는 바닷물에 용해되어 있던 석회류와 황산염이 반응하여 생성되는 물질로 국내에서는 천연 석고의 공급이 원활하지 않아 화학 석고를 사용하는 것이 일반적이다. 또한 화학 석고는 일정한 제조공정을 통하여 생성되는 물질로 공정에 따라서 무수 석고, 반수 석고, 이수 석고로 나뉜다. 화학 석고의 생성과정을 살펴보면 이수 석고를 약 160℃의 열을 가하면 결정이 깨지며 반수 석고가 생성되고 그 후에 열을 더 가하면 결정을 갖지 않은 무수 석고가 된다. 화학 석고는 산업부산물로서 연간 400만 톤 이상 발생하며, 시멘트응결지연제, 석고보드로 재활용되고 있다.

석고는 통일분류법에 따라 실트로 분류되며 황산칼슘을 주성분으로 하는 황산염 광물로 화학성분은  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  염기성을 띤다. 석고가 물과 결합 시  $C_3A$ 와 반응하여 발열반응을 일으켜 물을 증발시키고 빨리 경화되는 특징이 있는데 이는 초기강도 발현에 영향을 준다.

## 4. 저회와 석고를 재활용한 긴급복구용 유동성 채움재 개발

### 4.1 개요

지반함몰 대책공법으로 유동성 채움재에 대한 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있으나 도로에 공동이 확인되어 긴급복구가 필요한 경우의 대책공법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 긴급복구 대책공법으로서 저회와 석고를 활용한 유동성 채움재의 가능성을 제시하고자 한다. 우선 대책공법의 재료로 저회를 사용하고 적용했는데 이는 부산물을 재활용함으로써 채움재 구입비용을 줄이기 때문에 경제적이고, 부산물의 매립을 줄여 환경적인 문제에도 효과가 있을 것으로 기대할 수 있다. 공학적 측면에서 저회의 비중은 모래보다 낮아 경량성을 보이며 이를 매립재로 사용 할 경우 하중을 감소시켜 재 침하를 예방하는데 도움이 될 것으로 보인다. 또한 석고를 사용함으로써 초기강도를 빠르게 발현시켜 긴급복구가 가능하게 하였다.

이러한 특성을 이용하여 저회와 석고를 활용한 긴급복구용 유동성 채움재를 개발하였다. 이에 유동성 채움재를 긴급복구 대책공법으로 적용하고자 실내시험을 통하여 목표성능에 대한 적합여부를 판단하였다. 실내시험으로는 일축압축강도시험을 통하여 유동성 채움재의 초기와 장기강도를 측정하였고, 유동성을 확인할 수 있는 플로우 시험과 환경적 안정성을 평가할 수 있는 pH시험 그리고 긴급복구에 대한 적합성을 판단하기 위한 초기응결시험을 수행하였다.

### 4.2 목표성능 도출

본 연구에서는 긴급복구 대책공법으로서 저회와 석고를 활용한 유동성 채움재의 적용 가능성을 제시하고자 한다. 이에 따라 배합재료의 특성을 분석하고 유동성 채움재 설계기준에 의거하여 목표성능을 도출하였다. 긴급복구에 최적화를 위한 설계기준으로 유동성과 pH, 초기와 장기강도 등을 설정하였다. 첫 번째로 유동성을 판단하기 위한 흐름치 값(Flow)은 미

국과 일본의 유동성 채움재 설계기준을 적용하여 200mm 이상으로 하였다. 두 번째로 pH에 대한 설계기준은 환경보전상 문제가 발생하지 않도록 [폐기물 재활용 용도 및 방법에 관한 규정]에 의거하여 6.0 ~ 12.4의 범위를 만족하도록 하였다. 세 번째로 장기강도에 대한 목표성능은 국내 유동성 채움재에 대한 연구동향을 살펴보았을 때 재굴착 가능성 판단 여부를 재령 28일 기준으로 하였으며 이때 약 0.7 ~ 1.5 MPa의 강도를 발현하도록 하였다(Won, 2001, Kong, 2010). 이를 기준으로 본 연구의 장기 강도는 재굴착이 용이하며 뒤채움 시 강도가 발현되도록 0.8 ~ 1.5 MPa의 범위를 설정하였다. 마지막으로 초기강도의 목표성능은 서울시의 지반함몰 등급관리체계에 의거하여 도출하였다. 서울시는 도로함몰 지역에 대한 포장 두께와 공동의 두께를 통해 긴급복구, 우선복구, 일반복구, 관찰대상 4개 등급으로 구분하였으며, 본 연구는 긴급복구에 대한 복구공법으로 포장 두께가 10 cm 미만, 공동 토파가 20 cm 미만일 경우에 사용되도록 제작되었다. 이러한 경우 공동 탐사 시 공동 확인 후 4시간 이내에 복구가 필요하다(Seoul Metropolitan Government, 2016). 이를 기준으로 도심지 지반함몰 시 긴급복구를 위한 초기강도는 타설 후 4시간을 기준으로 초기 교통량 재개가 가능한 지지력강도 약 0.025 MPa (약 15 ton 장비의 접지압)과 초기강도는 재령 1일 강도는 0.15 MPa 이상을 목표로 산정하였다.

### 4.3 실내시험

#### (1) 플로우 시험

유동성 채움재의 유동성을 확보하기 위하여 KS F 2594에 의거하여 플로우 시험을 실시하였다. 앞서 도출한 유동성 채움재의 플로우 값의 목표치는 200mm 이상이기 때문에 이에 적합한 유동성 확보를 위하여 30%의 함수비에서부터 함수비를 점차 증가시켜 목표성능을 만족시키는 함수비를 도출하였다. 시험결과 저회의 비율이 70%일 경우 44 ~ 47%의 함수비 범위에서 플로우 값의 목표치를 만족하였고, 저회의 비율이 60%의 경우 40 ~ 44%, 저회의 비율이 50%의 경우 35 ~ 38%의 함수비 범위에서 플로우 값의 목표치를 만족하였

다. 즉 저회의 비율이 높을수록 큰 함수비가 필요하다는 것을 알 수 있다.

### (2) pH시험

pH시험은 산업부산물로 인한 환경문제를 최소화하고 환경적 안정성을 평가하기 위한 시험으로 KS M 0011에 의거하여 실시하였다. 시험결과 저회가 약 산성을 띠기 때문에 비율이 커질수록 pH값이 적게 나오고, 알칼리성을 띠는 석고의 비율이 커질수록 pH값이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 그러나 모든 배합비는 안정성 기준인 6.0~ 12.4의 범위 안에 포함되므로 환경적 안정성은 확보하고 있는 것으로 확인되며 재령시간에 따른 변화는 적은 것으로 보인다.

### (3) 초기응결시험

초기응결은 긴급복구에 있어 가장 중요한 인자로 긴급복구는 4시간 이내 이루어져야 하며, 최소한의 강도를 확보해야 한다. 재료의 배합 후 응결시간을 측정하기 위해 KS L ISO 9597에 의거하여 비이카 침을 이용한 응결시험을 실시하였다. 시험결과 배합비의 종결시간은 모두 4시간 이내로 확인되었고, 석고의 비율이 커질수록 응결시간이 점점 줄어들었다. 이는 석고의 재료적 특성에 인한 결과로 보이며 시멘트의 재료적 특성에 따른 응결시간은 그 차이가 미미하였다.

### (4) 일축압축시험

긴급복구 대책공법으로 가장 중요한 공학적 특성인 초기강도와 재굴착 여부를 판단하기 위한 장기강도를 측정하고자 KS F 2314에 의거하여 일축압축강도시험을 수행하였다. 본 실험은 긴급복구 시(4hr) 초기 교통량 재개가 가능한 지지력 강도인 0.025 MPa(약 15 ton 장비의 접지압)과 초기강도(1 day) 0.15 MPa, 재굴착을 판단하기 위한 장기강도(28 day) 0.8 ~ 1.5 MPa 을 기준으로 수행하였다. 모든 배합비는 배합 4시간 후 압축강도가 0.027 ~ 0.2 MPa의 값으로 초기 지지력 강도 기준인 0.025 MPa을 만족하는 것으로 보인다. 시험 결과 석고의 함량이 증가할수록 초기강도는 커지고, 시멘트의 비율이 커질수록 장기강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 장

기강도의 경우 저회의 비율이 커질수록 감소하는 경향을 보였고, 시멘트의 비율이 4% 이상일 경우 목표 강도보다 높은 값이 측정되어 적용이 어려울 것으로 판단되었다.

이상의 실내실험을 종합한 결과, 최적 배합비는 저회와 석고가 50 : 48, 시멘트비율이 2%로 나타났다.

## 5. 저회와 석고를 활용한 긴급복구용 유동성 채움재 현장검증

### 5.1 개요

현장검증은 긴급복구용 유동성 채움재의 적용성을 검증하기 위한 목적으로 현장실험조건과 운영 중인 도로를 구분하여 실시하였다. 현장검증에 사용된 배합비는 실내시험을 통한 최적 배합비로 수행하였다.

먼저 현장실험조건에선 인위적인 지반함몰을 구축하고 긴급복구용 유동성 채움재를 타설하여 초기강도의 성능을 확인하였으며 일축압축강도를 측정하고 분석하기 위하여 동적 콘관입시험을 수행하였다. 현장실험장소인 테스트베드의 위치는 교통량이 적고, 안전상 문제가 없는 장소로 선정하였으며 테스트베드의 부지는 일반적인 하수관거의 매설심도에 의거하여 1.2m (깊이) × 2.0m (폭) × 7.0m (길이)로 구축하였다(그림 3). 다음으로 운영 중인 도로에서의 현장검증은 급속 시공 여부와 시공의 편의성을 검토하기 위하여 실시하였다. 운영 중인 도로에서의 성능검증은 GPR탐사를 통하여 개소를

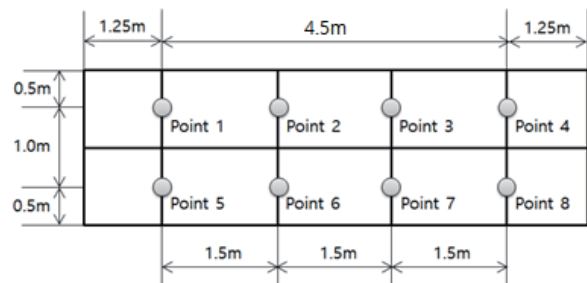


그림 3. 테스트베드 설계 및 계측 위치



(1) GPR탐사



(2) 굴착



(3) 긴급복구용 유동성 채움재 혼합



(4) 관 매설 및 채움재 타설



(5) 현장 검증



(6) 복구 완료

그림 4. 현장검증시험

과약하고 지반의 안정성 확보까지의 시공성을 검증하여 긴급 복구 대책공법으로서의 가능성 여부를 확인하였다.

## 5.2 조기강도 성능검증평가

조기강도 평가는 테스트베드에서 실시하였으며 도로의 안정성을 평가하기 위하여 일축압축강도를 측정하였다. 긴급복구용 유동성 채움재의 공학적 성질을 나타내는 일축압축강도를 분석하기 위하여 동적 콘 관입시험을 실시하였다(그림 4) 참조). 이 때 콘 관입 깊이에 따른 조기강도 및 최대 압축강도를 산출하기 위해 경험적 모델인 Chapman-Richards 모델을 이용하였으며 식 (1)을 통해 최대 압축강도를 도출하였다.

$$(식 1) \quad y = a(1 - e^{-bx})$$

여기서, a는 최대 증가량이며, b는 변화율(속도)

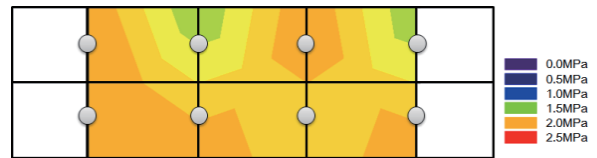
현장시험 부지에 긴급복구용 유동성 채움재 타설 후 일축 압축강도를 측정한 결과 긴급복구를 위한 4시간 경과 시 측정 지점에서 강도의 범위는 0.3 ~ 0.65 MPa를 보였으며, 조기강



(a) 4시간 경과 시 압축강도



(b) 6시간 경과 시 압축강도



(c) 7일 경과 시 압축강도

그림 5. 시간경과에 따른 압축강도

도의 범위는 0.4 ~ 1.05 MPa, 7일 재령의 강도 범위는 1.0 ~ 1.6 MPa로 측정되었다(그림 5).

현장시험 결과 실내 일축압축강도와 비교했을 경우 1MPa

의 강도에 도달하는 시간은 8.53시간과 21.65시간으로 현장에서 2.53배 더 경과하는 것으로 나타났으며 차량통행 가능강도의 경우 미국(일축압축강도 0.35~2.0 MPa)과 일본(교통량 해소시 : 0.13 MPa 이상)을 기준으로 초기강도의 범위는 최소 기준에 만족하여 긴급복구 시 적용이 가능할 것으로 판단된다(〈그림 6〉 참조). 그러나 재굴착 여부를 판단하기 위한 검증은 필요할 것으로 보인다.

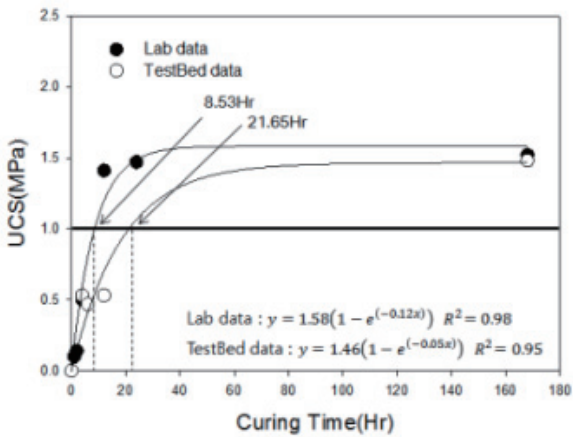


그림 6. 실내 및 테스트베드의 일축압축강도 변화

### 5.3 급속시공 성능검증평가

급속시공에 대한 성능검증은 실제 운영 중인 도로에서 실시하였으며, 공동발생부터 긴급복구 완료까지 전 과정에 대한 시공성을 검증하였다. 우선 GPR탐사로 지반함몰이 추정되는 개소를 굴착하여 공동을 확인하고, 긴급복구용 유동성 채움재 타설 후 1시간 이내 인력을 지지할 수 있는지 확인하였다.

탐사결과 운영 중인 도로에 크기가 0.8m (길이) × 0.5m (폭) × 0.6m (깊이)인 공동이 확인되었고 길이와 폭, 깊이 1m의 크기로 굴착하였다. 그 후 긴급복구용 유동성 채움재 혼합과 타설, 아스콘 표층의 포설과 다짐을 실시하였고 타설 완료 후 1시간 내에 인력이 올라설 수 있는 지지력을 확인하였다(〈그림 7〉). 급속시공검증 결과 굴착 후 복구까지 3시간 소요되었으며 긴급복구가 이루어져야 하는 시간 내에 복구가 가능한 것으로 검증되었다.

### 5.4 재침하 여부 다짐도 검증

재침하 여부를 위한 다짐도 측정은 테스트베드에서 실시하



그림 7. 유동성 채움재의 긴급복구 성능 검증



였으며, 동적 콘 관입 시험기를 이용하여 긴급복구용 유동성 채움재 타설 이후의 강도특성을 파악하였다. 타설 후 1시간 경과 시 평균 다짐도는 평균 71.56% (63.48%~79.58%)로 조사되었으며, 타설 후 2시간이 경과 시 평균 90.6% (89.95%~91.98%)의 다짐도를 나타내어 관리기준인 90%를 만족하는 것으로 조사되었다. 또한 7일 후 다짐도는 95%를 초과하여 긴급복구용 유동성 채움재 타설 후 재침하에 대한 영향이 미미할 것으로 판단된다. 이는 <그림 8>에 자세히 나타내었다.

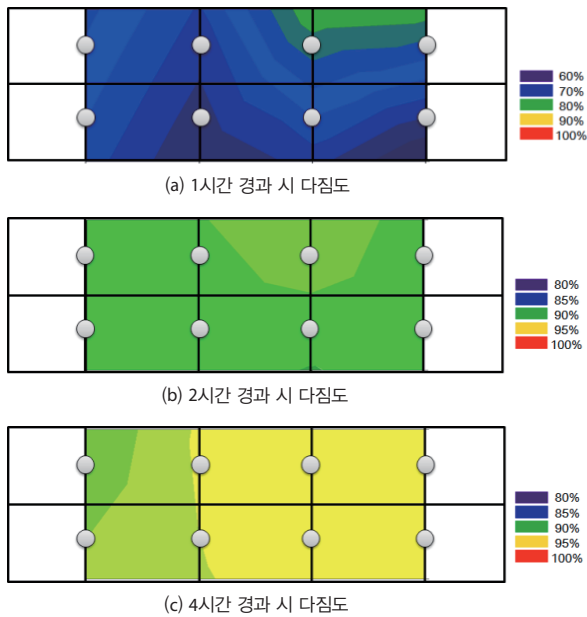


그림 8. 시간경과에 따른 다짐도

## 6. 결론

본 연구에서는 도심지 지반함몰 긴급복구에 대응하고자 산업부산물인 저회와 석고를 활용한 유동성 채움재 개발에 대한 내용을 다루었다. 본 연구에서 개발한 유동성 채움재는 기존 재래식 복구공법과 기존 유동성 채움재의 문제점을 해결하고, 운영 중인 도로에 긴급복구가 가능하도록 조기강도와 급속시공을 중점으로 설계하였다.

이를 검증하기 위해 실내시험을 통해 목표 강도를 만족하는 저회와 석고가 50 : 48, 시멘트 비율이 2%의 최적 배합비를 도출하였고, 현장시험평가를 통해 긴급복구용 유동성 채움재의 현장 적용성을 판단하였다.

현장 적용 결과 압축강도는 타설 4시간 후 약 0.53 MPa으로 미국과 일본의 통행가능 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 재침하 측정 결과 타설 후 2시간 경과 시 다짐도가 평균 90.6%로 관리기준을 만족하고 재침하에 대한 영향은 미미할 것으로 판단된다. 이러한 현장 적용 결과 본 연구에서 개발한 유동성 채움재가 긴급복구용으로 적합하다고 보인다.

또한 긴급복구용 유동성 채움재 개발은 저회와 화학 석고를 사용함으로써 부산물의 매립량을 감소시켜 환경적인 문제를 줄이고, 시공성과 안정성을 바탕으로 지반함몰에 대한 사회적 불안감을 해소하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 향후 저회와 석고를 이용한 긴급복구용 유동성 채움재의 적용에 있어 환경적 안정성 평가와 현장에서의 장기강도 검증이 필요한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. ACI Committee 229, 1994, Controlled Low Strength Materials (CLSM), American Concrete Institute, 229R-2, pp. 1-12
2. Chae D.H., Kim K.O., Shin H.Y., Cho W.J. (2014), "Dynamic Characteristics of Liquidity Filling Materials Mixed with Reclaimed Ash", Korean Geo-Environmental Society, Vol.15, No.4, April 2014, pp. 5~11
3. Choi Y.W., Choi H., Kim J.M. (2015), "The Mechanism of subsurface cavities and countermeasure of cave-in" Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol19 no.4, 2016, pp.44-47
4. Cho J.Y., Lee K.H., Lee I.M. (2000), "A Study on the Flowable Backfill with Waste Foundry Sand for Retaining Wall", Korean Geotechnical Society Vol 16, No.4, August 2000, pp.17~30
5. Deepika, Chukka & Chakravarthi, V.K (2012), "Evaluation of Properties of Soil Subgrade Using Dynamic Cone Penetration Index-A Case Study", International Journal of Engineering Research and Development, Vol.4, Issue 4, October 2012, pp.07-15

6. Han J.G., Ryu Y.S., Kim D.W., Park J.J., Hong G.G. (2017), "A Study on Expansion and Strength Characteristics of Material for Emergency Restoration in Ground Cavity", Korean Geosynthetics Society Vol.16 No.2 June, 2017 pp.131~138
7. Kim H.J. (2018), "A Study on Property of Lightweight Foamed Mortar with Foam Agent and Plaster", master's thesis, ChungWoon University
8. Kong J.Y., Kang H.N., Chun B.S. (2010), "Characteristics of Unconfined Compressive Strength and Flow in Controlled Low Strength Materials Made with Coal Ash", Korean Geotechnical Society Vol 26, No.1, January 2010, pp.75~83
9. Kwon H.D. (2008), "A Study on Application of Bottom Ash with Grouting Improvement and Waterproof Grouting", Ph.D. Thesis, University of Seoul
10. Lee K.H. (2017), "Characterization of Flowable Fill with Ferro-Nickel Slag Dust", Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.18, No.5, pp. 16~21
11. Lee J.B, Chung D.S. (2017), "A Case Study on Soil-Remix for Soil Improvemnt and Settlement Decrease", KGS Spring National Conference 2017, March 2017, Seoul, Korea
12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015, "Ground settlement safety management manual"
13. Seoul Metropolitan Government, "The Road Subsidence Conditions and Safety Improvement Plans in Seoul", 2016
14. Shin W.G., Lim D.S., Chun B.S. (2010), "A Study on Self-Hardening Characteristics of Coal Ash by Mixing Ratio of Fly Ash and Bottom Ash", Korean Geotechnical Society Vol 11, No.6, June 2010, pp.85~91
15. Won, J.P. (1999), "Optimization of Flowable Fill with High Volume Fly Ash Content", Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 41, No.3, pp.81~90
16. Won, J.P., Lee Y.S. (2001), "Properties of Controlled Low-Strength Material Containing Bottom Ash", Korea Concrete Institute, Vol.13, No.3, pp.294~300, June 2001

담당 편집위원 : 고경택(한국건설기술연구원)

## ● 학회지 원고모집 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학회, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 회원 여러분의 많은 원고 투고 부탁드립니다.

### 1. 원고 종류

논단, 특집기사, 기술기사, 공사기사, 해외 기술정보 및 번역기사(뉴스), 현장탐방(국내외 연구소 및 국제학술대회 참가), 우리 회사소개, 신기술 또는 신제품 소개 등

### 2. 원고 분량

글씨크기 11 pt, 줄 간격 160 %

- 1) 특집기사, 기술 및 공사기사 : A4용지 10매 이내
- 2) 해외 정보소개, 현장탐방 및 우리회사 소개기사 : A4용지 8매 내외

### 3. 원고 작성

- 1) 원고의 모든 내용(사진, 그림 등 기타 부속물 포함)은 한글 작성이 원칙임. 단, 의미 전달이 모호할 우려가 있는 경우에는 그 원어를 괄호 안에 표기함.
- 2) 제목의 작성 : 제목은 가급적 10자 이내로 정하며 영문 제목도 동시에 표기함.
- 3) 저자의 소개 : 성명, 소속, 직위, 전공분야/관심분야, 연락처, e-mail 주소, 저자 사진(컬러)
- 4) 제출 마감일 : 발행일 30일 전까지(발행일 : 3, 6, 9, 12월)

### 4. 제출할 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 과장(E-mail : rcr@rcr.or.kr)