

## 지반함몰 저감을 위한 하수관로 뒤택움재 개발 및 현장적용성 평가

### Development and Application of Backfill Material for Reducing Ground Subsidence

이대영<sup>1</sup>, 김동민<sup>2\*</sup>, 유용선<sup>3</sup>, 한진규<sup>3</sup>

Dae-Young Lee<sup>1</sup>, Dong-Min Kim<sup>2\*</sup>, Yong-Sun Ryu<sup>3</sup>, Jin-Gyu Han<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsansseo-gu, Goyang, 411-712, Republic of Korea

<sup>2</sup>Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsansseo-gu, Goyang, 411-712, Republic of Korea

<sup>3</sup>Chemius Korea Co., Ltd., 152., Ohyang-gil, Gonjam-eup, Gwangju-si, Gyeonggi-do, 464-944, Republic of Korea

#### ABSTRACT

In this study, sewer backfill material was developed to prevent sewer damage and ground subsidence. Laboratory test was performed in the field of CA replacement ratio, accelerator type and replacement ratio and W/M. The compression strength of backfill material was 0.55~0.64MPa below in W/M 70% and 0.20MPa over W/B 80%. Ice block was used to simulate the ground cavity and subsidence caused by sewer damage in application study. The existing sand compaction and the new backfill material was comparative estimated in field. The ground settlement of cross section was 23.4cm and that of longitudinal section was 27cm in sand compaction section, but the ground had not sunk in backfill material section.

#### 요 지

본 연구에서는 하수관로 손상을 예방하고 다짐불량으로 인한 지반침하를 방지할 수 있는 하수관로 뒤택움재를 개발하였다. CA 치환율, 촉진제 종류 및 치환율, 물-재료비 등에 대한 실내실험을 수행하였는데, 재령 4시간 압축강도는 W/M 70% 이하에서 0.55~0.64MPa, W/B 80% 이상에서는 0.20MPa로 나타나 국외 유동화토의 압축강도 기준인 0.13MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 현장 시험시공에서는 얼음블록을 이용하여 인위적으로 지중에 공동을 생성시키고 하수관로 변형을 유도하였다. 기존의 모래다짐 방법과 개발 뒤택움재의 성능을 비교 평가하였는데, 모래다짐 구간의 횡단면 발생 침하량은 최대 23.4cm, 종단면은 최대 27cm 발생하였으나, 뒤택움재 시공 구간에서는 횡단면에서 최대 0.01cm가 발생하였고, 종단면은 시간이 경과하여도 침하량의 변화가 나타나지 않았다.

**Keywords** : Sewer, Backfill Material, Plasticity, Cavity, Subsidence

## 1. 서론

최근 도심지에서 싱크홀(sinkhole)을 비롯한 지반침하 및 도로함몰 등이 빈번하게 발생되고 있으며, 이로 인한 국민 불안감 확산과 사회경제적인 손실이 증가하고 있는

상황이다. 지반함몰 현상을 발생시키는 가장 큰 요소 중 하나는 지하공동의 형성이다. 지하공동이 형성되는 원인은 크게 자연적 원인과 인위적 원인으로 구분할 수 있다. 자연적 발생은 지하수와 석회석의 화학적 반응으로 인해 석회석이 용해되어 공동이 형성됨에 따라 상부 지반이 함몰 또는 붕괴되는 것이다(Thiansky, 1999). 인위적 원인은 크게 세 가지로 구분할 수 있는데 첫 번째는 지하수 추출에 의한 지반함몰, 두 번째는 지하수위 변화에 따른 지반침하, 세 번째는 노후된 하수관에 의한 지반침하를 꼽을

Received 22 Nov. 2015, Revised 21 Dec. 2015, Accepted 23 Dec. 2015

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0482; Fax: +82-31-910-0561

E-mail address: dmkim@kict.re.kr (D. Kim)

수 있다. 최근 도심지에서 발생하는 지반침하 및 함몰은 하수관로의 손상이나 부적절한 뒤채움재 및 다짐불량으로 인해 발생되고 있다. 서울시의 경우 2010년 이후 발생한 도로 함몰 3,205건 중 노후 하수관이 원인인 것은 2,714건으로 약 84%에 달하는 것으로 나타났고, 2013년 기준 총 연장 10,392km에 이르는 하수도관 중 20년 이상된 노후 관로가 약 73.3%에 이르러 노후 하수관에 대한 긴급복구가 요구되고 있는 상황이다(Seoul city, 2014). 또한, 일본의 경우에는 연간 약 2,000건의 함몰사고가 발생하는 것으로 보고되고 있다(Cho, 2005).

상·하수도관 등 관로 매설공사의 되메우기 방법은 저면에 모래를 깔고 관을 설치하는 방법을 사용하고 있으나, 지중 매설관이 중첩되어 있어 관 접속부위 및 관하부의 틈새를 다짐하는데 어려움이 있다(Ryu et al., 2015). 또한, 관로 다짐 작업시 현장다짐에너지에 의해 발생하는 추가 하중은 구조물에 토압증가 효과를 유발하는 문제가 있다(Duncan & Seed, 1986).

최근 뒤채움재 및 다짐으로 인한 문제점들을 해결하기 위해 유동성 뒤채움재가 사용되고 있는데, 미국 콘크리트 학회(ACI Committee 229, 1994)에서는 모래, 시멘트, 플라이애시(fly ash), 물, 혼화제로 구성된 유동성 채움재를 저장도 강도조절 재료(CLSM, Controlled Low Strength Materials)라고 명칭하고 이에 대한 규정을 제시하였다. 일본에서는 건설 발생토에 물과 고화재를 혼합하여 슬러리 상태로 처리한 것을 유동화 처리토라 명칭하고 사용하고 있다(Chae et al., 2014). CLSM은 시공시 장소의 제약이 적으며 다짐이 필요 없기 때문에 비용절감, 작업자의 안정성 증진, 시공의 단순화로 인한 인력감소 등의 장점이 있으며, 재활용 재료를 첨가함으로써 친환경재료로도 사용이 가능하다(Ryu et al., 2015). 또한, 배합비에 따라 강도 조절이 가능하며 기존의 다짐 등에 의한 강도 조절에 비해 재료의 강도가 전체적으로 균일한 특징을 가지고 있다.

유동성 충전재는 주로 모래, 시멘트, 플라이애시와 물을 적절히 혼합하면 초기에는 물과 플라이애시의 영향으로

충분한 유동성(Flowability)을 갖게 되며, 시간이 지나면서 시멘트 성분의 양생으로 원하는 강도까지 강도를 증진시킬 수 있다(Cho et al., 2007). 최근에는 석탄회를 대규모로 활용하기 위해 시멘트와 물에 석탄회를 주성분으로 하여 유동성 충전재로 사용하기 위해 연구가 진행 중에 있다(Kong et al., 2010; Lee et al., 2007; Seo et al., 2010; Won & Lee, 2001).

본 연구에서는 하수관로 손상을 예방하고 다짐불량으로 인한 지반침하를 방지하기 위해 하수관로 뒤채움재를 개발하였다. 실내실험을 통해 뒤채움재의 최적배합을 도출하였고, 현장 적용성 평가를 통해 기존의 모래다짐과 개발된 뒤채움재의 성능을 비교 평가하였다.

## 2. 뒤채움재 최적배합 설계

### 2.1 실내실험 수행

유동성 및 가소성 뒤채움재의 최적배합 도출을 위해 실내시험을 수행하였다. 시멘트계 재료는 물과 반응하여 새로운 광물을 형성하는 수화과정을 거쳐 굳게 된다. CLSM도 시멘트의 수화반응과 수화 과정에서 발생하는 다량의 소석회 및 비정질 실리카인 플라이애시 간의 포졸란 반응에 의해 적정 강도의 경화체를 얻게 된다. 그러나 시멘트의 수화반응 중 강도발현에 주로 기여하는 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S 등의 칼슘실리케이트 광물은 수화에 수 일에서 수 주의 시간이 걸리게 된다. 따라서 본 연구에서는 비정질 칼슘실리케이트계 광물을 결합재의 주원료로 이용하여 경화 시간을 단축하고, 장기적인 강도증진을 억제하고자 하였다.

Table 1은 실내실험에서 사용한 국내산 플라이애시 및 칼슘알루미네이트계 바인더의 물리 화학적 특성을 나타낸 것이다. 가소제는 국내 J社 제품을 사용하였고 촉진제는 모두 시약으로 사용하였다.

실내실험은 3단계에 걸쳐 진행되었다. 1단계에서는 플라이애시와 CA(Calcium Aluminate) 바인더의 최적 혼입

Table 1. Physicochemical characteristics of FA and CA binder

	Chemical composition (%)									Physical characteristics	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
FA	58.42	18.42	7.89	47.40	7.38	1.80	0.05	0.28	2.41	3426	2.36
CA	13.48	35.17	1.49	51.64	8.40	1.94	0.06	0.14	-	6593	3.00



Fig. 1. Flow test



Fig. 2. Turbidity test

Table 2. Test mix set of step 1

CA substitution (%)	W/M (%)	Weight (g)				
		W	FA	CA	Additive	Plasticizer
5	55	550	950	50	10	10
10		550	900	100	10	6
15		550	850	150	10	5
20		550	800	200	10	4

율을 결정하고자 하였으며, 2단계에서는 적정 촉진제의 종류와 사용량을 결정하였고, 3단계에서는 최적의 물성을 얻을 수 있는 물-재료비를 도출하고자 하였다.

현재 유동성 뒤채움재에 대한 국내 규정은 없으나 일본 동경전력(Tokyo Electric Power Company R&D Center, 1996)과 미국 콘크리트 학회(ACI Committee 229, 1994)의 기준을 살펴보면 유동성, 일축압축강도, 블리딩율 및 침하에 대한 규정을 정하고 있다. 특히 일본의 경우 뒤채움 이후 빠른 공사 준공을 위하여 1~4시간의 일축압축강도 기준을 정하고 있으며, 또한 28일 강도의 상한값을 규정하여 재굴착 시의 편의성을 포함하고 있다(Chae et al., 2014).

실내실험에서는 각 단계별 뒤채움재의 테이블 플로우(flow)와 4시간, 7일, 28일의 압축강도를 측정하였다. 4시간 이내에 경화 되지 않은 시료는 이후 재령의 압축강도를 측정하지 않았으며, 4시간 이내에 경화가 된 시료에 대해서만 장기강도의 역제를 확인 하고자 1단계와 2단계에서는 7일 강도만을, 3단계에서는 7일과 28일 압축강도를 측정하였다. 속경성 및 조기강도 기준은 일본 동경전력 유동화토 기준에 따라 재령 4시간 일축압축강도 0.13MPa을 기준으로 하였다.

본 연구에서는 현장 시공시 바이브레이터(vibrator) 등에 의해 외력이 가해졌을 때는 유동성을 가지지만, 외력이

없을 때는 유동성이 사라지는 가소성(假塑性)을 측정하기 위하여 기존 CLSM 시험에 적용되는 ASTM D 6103 플로우 시험이 아닌 타격 플로우 시험을 진행하였다. 시료를 상부 지름 70mm, 하부 지름 100mm, 높이 50mm의 틀에 채운 후 틀을 들어 올려 외력이 없는 상태에서 초기 플로우를 측정하고, 25회 타격 후 플로우를 측정하여 외력이 주어졌을 때의 유동성을 측정하였다.

뒤채움재의 수중불분리성은 혼합한 시료 50g을 500ml의 수중에 투입 후 상등액을 취하여 탁도를 측정하였으며, 침하량은  $\phi 100 \times 200$ mm 실린더 몰드에 혼합한 자료를 채운 후 경화시까지의 침하량을 측정하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 플로우 시험과 탁도 시험 모습을 나타낸 것이다.

## 2.2 실내실험 결과

### 2.2.1 CA 치환율

Table 2는 1단계 실험배합을 나타낸 것이고, Table 3은 실험배합의 테이블 플로우 결과를 나타낸 것이다. 1단계 실험배합은 모두가 4시간 이내에 경화되지 않아 압축강도를 측정하지 않았다. 플로우 실험 결과 다소 차이는 있었으나 타격 등 외력을 주지 않은 정치 상태에서는 대부분 유동성을 나타내지 않았으며, 테이블의 타격을 통해 외력이 작용할 경우 모든 배합이 유동성을 갖는 것으로 나타났

Table 3. Table flow and 4 hr. compressive strength result of step 1

CA substitution (%)	Table flow (mm)		4hr Compressive Strength (MPa)
	Steady	Vibrated	
5	102	225	Not hardened.
10	102	210	
15	102	205	
20	107	245	

Table 4. Test mix set of step 2

Accelerator		W/M (%)	Weight (g)					
No.	Dosage (%)		W	FA	CA	Additive	Plasticizer	Accelerator
-	0	55	550	900	100	10	10	0
Acc. 1	0.5						10	5
	1.0						10	10
Acc. 2	0.5						10	5
	1.0						4	10
Acc. 3	0.5						20	5
	1.0						20	10

Table 5. Table flow and 4 hr. compressive strength result of step 2

Accelerator		Table Flow		4hr. Compressive Strength (MPa)
No.	Dosage (%)	Steady	Vibrated	
-	0	115	exceeded 250	Not hardened
Acc. 1	0.5	114	225	Not hardened
	1.0	170	exceeded 250	Not hardened
Acc. 2	0.5	100	140	Not hardened
	1.0	100	192	0.66
Acc. 3	0.5	110	225	Not hardened
	1.0	Plasticizer is not working		Not hardened

다. 그리고 CA 치환율이 증가함에 따라 가소성 확보에 필요한 가소제의 양은 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 CA 주성분인 C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>이 유동성에 관여하는 자유수와 급격하게 반응하여 자유수의 양을 감소시켜 결합재에 흡착하여 응집시키고, 물 분자와 수소 결합을 통해 일시적으로 자유수의 작용을 억제시킨 것으로 판단된다. 그러나 가소제에 의한 응결 지연 현상으로 모든 배합에서 목표로 하는 4시간 강도 0.13MPa를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

### 2.2.2 촉진제 종류

Table 4는 2단계 실험배합을 나타낸 것이고, Table 5는 테이블 플로우 및 재령 4시간 압축강도 결과를 나타낸 것이다. 촉진제(Accelerator) 1을 0.5% 배합한 경우 플레인(plain) 배합과 동일한 가소제량을 사용하면 정치시 테이블

플 플로우 값은 플레인 배합과 동일하게 나타났다. 그리고 촉진제 1을 1.0% 배합한 경우에는 정치시 테이블 플로우 값이 플레인 배합에 비해 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 촉진제 1의 배합율에 관계없이 4시간 이내에 경화가 되지 않는 것으로 나타났다.

촉진제 2를 0.5% 배합한 경우 플레인 배합과 동일한 가소제량을 사용하면 정치시 테이블 플로우 값은 플레인 배합보다 작게 나타났다. 그리고 촉진제 2를 1.0% 배합한 경우에는 가소제량을 대폭 감소시켜도 정치시 테이블 플로우가 플레인 배합에 비해 작게 나타났으며, 4시간 이내에 강도를 발현되는 것으로 나타났다. 따라서 가소성을 가지면서도 4시간 이내에 경화하여 신속한 시공을 위해서는 촉진제 2를 1% 정도 첨가하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

촉진제 3의 경우에는 0.5% 배합시 플레인 배합과 동일

한 테이블 플로우를 만족시키기 위해서는 가소제의 사용량을 2배로 증가시켜야 하는 것으로 나타났다. 그리고 촉진제 3을 1.0% 배합한 경우에는 가소제를 2배로 사용하여도 유동성이 상실되지 않는 것으로 나타났으며, 촉진제 3의 첨가율에 관계없이 4시간 이내에 경화가 되지 않는 것으로 나타났다.

### 2.2.3 촉진제 치환율

Table 6은 3단계 실험배합을 나타낸 것이고, Table 7은 테이블 플로우 및 재령 4시간, 7일의 압축강도 결과를 나타낸 것이다. CA 사용량에 관계없이 촉진제 2의 치환율이 증가할수록 테이블 플로우의 정착시 조건을 만족하는데 사용되는 가소제량은 감소하는 것으로 나타났는데, 촉진

제 2가 결합재의 반응을 향상시킨 것으로 판단된다. 또한, CA를 10% 치환하고 촉진제 2를 최소 0.6% 이상 첨가한 배합에서 재령 4시간 이내에 경화가 되는 것으로 나타났다.

### 2.2.4 물-재료비

Table 8은 뒤채움재 특성 파악을 위한 실험배합을 나타낸 것이며, Table 9는 테이블 플로우 및 재령별 압축강도 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3은 가소성을 나타내는 테이블 플로우 결과를 나타낸 것인데 W/M 100% 까지는 외력이 없는 경우 유동성을 전혀 나타내지 않다가 외력이 가해지면 유동성이 증가하였고, 특히 W/M 70% 이상에서 급격한 증가를 나타내었다.

Fig. 4는 뒤채움재의 압축강도 결과를 나타낸 것이다.

Table 6. Test mix set of step 3

CA substitution (%)	Acc. 2 Dosage (%)	W/M (%)	weight (%)					
			W	FA	CA	Additive	Acc. 2	Plasticizer
5	0.0	55	550	950	50	10	0	10
	0.2						2	8
	0.4						4	12
	0.6						6	4
	0.8						8	4
	1.0						10	4
10	0.0	55	550	900	100	10	0	8
	0.2						2	7
	0.4						4	6
	0.6						6	5
	0.8						8	4
	1.0						10	3

Table 7. Table flow and compressive strength result of step 3

CA substitution (%)	Acc. 2 Dosage (%)	Plasticizer	Table flow (mm)		Compressive strength (MPa)					
			Steady	Vibrated	4 hr	7 day	28 day			
5	0.0	10	105	183	Not hardened in 4 hr.					
	0.2	8	105	178						
	0.4	12	105	180						
	0.6	4	107	222						
	0.8	4	107	218						
	1.0	4	108	193						
10	0.0	8	110	230	Not hardened in 4 hr.					
	0.2	7	107	175						
	0.4	6	106	178						
	0.6	5	105	180				0.53	0.65	
	0.8	4	105	182				0.54	0.66	
	1.0	3	105	203				0.57	0.70	

Table 8. Test mix set of backfill material

W/M (%)	Weight (g)					
	W	FA	CA	Additive	Acc. 2	Plasticizer
55	550	900	100	8	5	4.0
60	600					4.5
65	650					5.0
70	700					5.5
80	800					6.0
90	900					7.0
100	1000					8.0

Table 9. Table flow and compressive strength result of backfill material

W/M (%)	Table flow (mm)		Compressive strength (MPa)			Subsidence (mm)	Turbidity (NTU)
	Steady	Vibrated	4 hr	7 day	28 day		
55	100	183	0.56	0.73	0.86	0	13.1
60	100	178	0.64	0.66	0.83	0	13.5
65	100	180	0.56	0.58	0.65	0	13.6
70	100	222	0.55	0.56	0.58	0	13.5
80	100	220	0.20	0.23	0.27	0	13.5
90	100	235	0.20	0.23	0.27	0	13.8
100	100	exceeded 250	0.20	0.24	0.24	0	14.2
110	105	exceeded 250	0.18	0.20	0.20	2	23.5

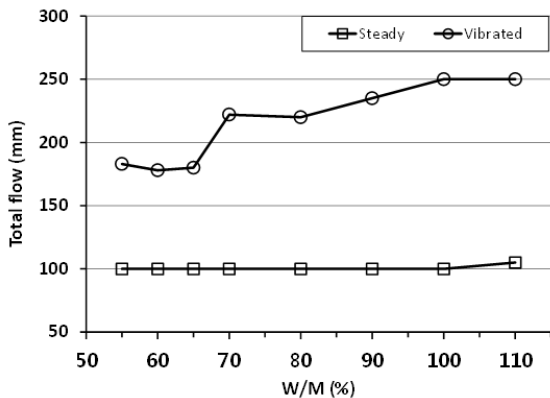


Fig. 3. Table flow test result of backfill material

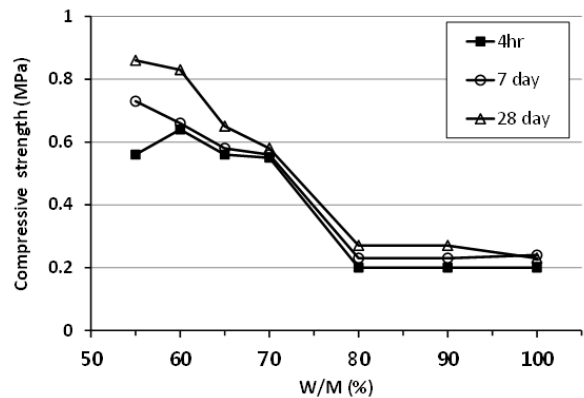


Fig. 4. Compressive strength of backfill material

재령 4시간 압축강도는 W/M 70% 이하에서 0.55~0.64MPa 범위로 나타났고, W/B 80% 이상에서는 0.20MPa 정도로 나타나 일본 동경전력 유동화토 기준인 재령 4시간 압축강도 0.13MPa 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 재령 7일 압축강도는 W/M 70% 이하에서 0.55~0.73MPa 범위로 나타났고, W/M 80% 이상에서는 0.20~0.24MPa 정도로 나타났다.

Fig. 5는 수중에 굳지 않은 뒤채움재를 넣은 후 상등액의 탁도를 측정한 결과를 나타낸 것인데, W/M이 100%까지는 거의 변화가 없었으나 100%를 넘어가면서 탁도가

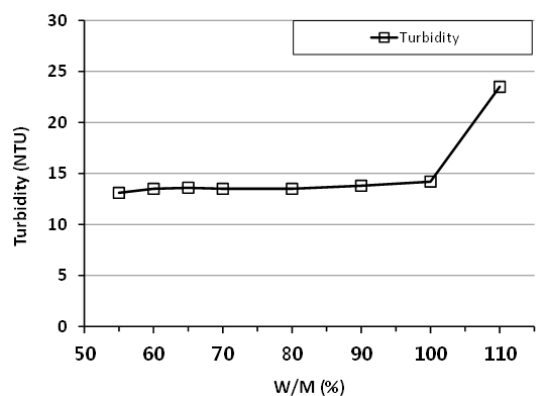


Fig. 5. Turbidity test result of backfill material

Table 10. Optimum mix design for sewer backfill material

Weight (%)				
FA	CA	Additive	Acc. 2	Plasticizer
90	10	CA×8%	CA×5%	CA×8%

증가하는 것으로 나타났다. 또한, W/M을 100% 까지 증가시켜도 가소제 첨가량을 적절히 조정할 경우 요구 성능을 만족시키면서 경제성 또한 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 10은 실내실험을 통해 도출된 뒤채움재의 최적 배합을 나타낸 것이다. 본 연구를 통해 조기강도 발현을 위한 속경성, 재료유실 방지를 하는 가소성, 좁은 공간에도 쉬운 보수가 가능한 유동성, 수중시공을 위한 수중불분리성 등을 갖춘 하수관로 뒤채움재 배합을 얻을 수 있었다.

### 3. 현장 적용성 평가

#### 3.1 시험시공 수행

실내실험을 통해 도출된 하수관로 뒤채움재의 현장 적용성 평가를 위해 실제 규격의 하수관로를 이용하여 시험시공을 수행하였다. 시험시공에서는 하수관로 시공시 일반적으로 적용되고 있는 모래다짐 방법과 비교하여 본 연구에서 개발된 뒤채움재의 성능을 평가하고자 하였다.

기존 모래다짐 방법과 비교하여 뒤채움재 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 하수관로에 변형이 발생했을 경우 나타나는 지반침하를 측정하는 방법이 가장 효과적

일 것으로 판단된다. 그러나 지중에 매설되어 시공시 적정 다짐이 이루어지는 하수관로 공사에서 단기간에 관로에 변형이 발생되어 그 영향이 지표면까지 나타나는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 하수관로의 변형을 단기간에 유발시킬 수 있는 시험법을 적용할 필요가 있다.

본 연구에서는 얼음블록을 이용하여 인위적으로 하수관로에 공동을 생성시켜 변형을 유발시킬 수 있는 시험 방법을 국내 최초로 고안하였다. 하수관로 매설시 관로 하부에 적정크기의 얼음블록을 두고 매설 및 다짐을 할 경우 시간이 경과함에 따라 얼음블록이 녹게 되고, 얼음블록이 위치했던 공간은 인위적인 공동으로 생성된다. 따라서 현장 적용성 평가에서는 모래다짐 및 개발 뒤채움재를 시공한 하수관로 하부에 얼음블록을 이용하여 인위적인 공동을 생성시켜 관로의 변형을 유도하고, 이로 인해 지표면에 나타나는 침하 정도를 비교 평가하였다.

Fig. 6은 시험시공 현장의 위치와 전경을 나타낸 것이다. 시험시공은 남양주 진접읍 ○○리에 위치한 야지에서 수행되었다. 대상 현장의 지층은 매립층, 퇴적층이 지하 3m 정도까지 위치하고 있었다.

Table 11은 시험시공을 진행한 하수관로 물량을 나타낸 것이고, Fig. 7은 시험시공 상세 도면을 나타낸 것이다. 실



Fig. 6. Location and view of field test site

Table 11. Construction plan of sewer pipe

Division	Diameter	Length	Quantity	Depth	Foundation	Note
1st line	450 mm	2.5 m	3	1.0 m	sand compaction	Connecting 1st and 2nd line with manhole
2nd line	450 mm	2.5 m	3	1.0 m	backfill material	

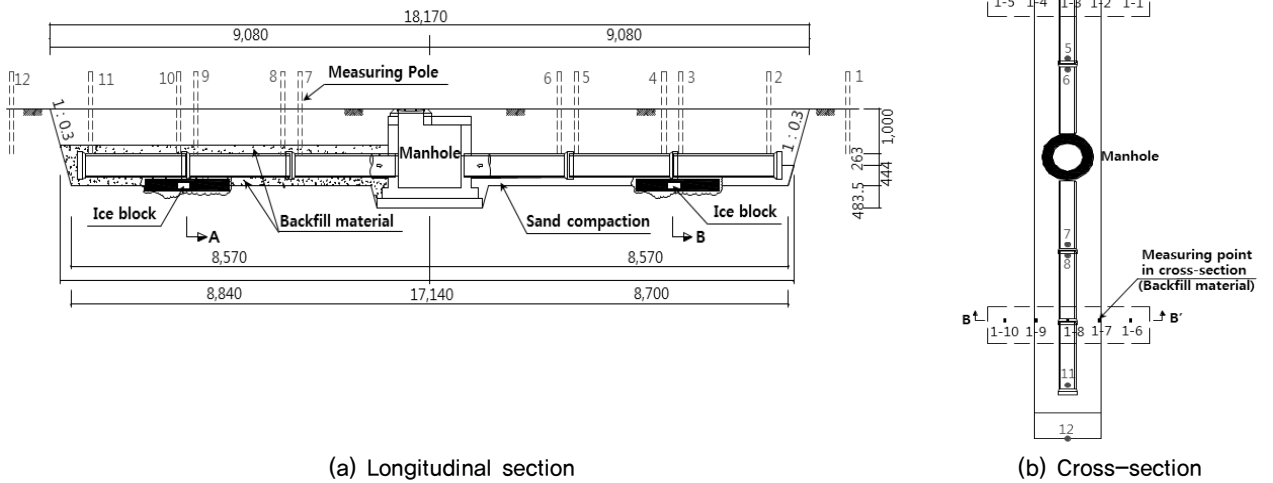


Fig. 7. Detail drawing of field test

제 도심지 하수관 공사에 사용되고 있는 직경 450mm 흙관을 사용하였고, 모래다짐 방법을 적용하는 구간과 개발 뒤채움재를 적용하는 구간을 나누어 시공하였다.

매설심도는 동일하게 1.0m로 하였고, 지중에 공동 발생 시 하수관로의 변형을 최대한 유도하기 위해 얼음블록은 시공되는 하수관로 6개의 양 옆에서부터 첫 번째 및 두 번째 관로의 연결부위 아래 설치하였다. 매설되는 얼음블록의 전체 크기는 3.5×1.0×0.25m 로서 관로 연결부위에 최대한 영향을 주기 위해 넓고 긴 형태로 매설하였다. 그리고 지반침하를 측정하기 위해 모래다짐 구간 및 개발 뒤채움재 적용 구간의 종단면과 횡단면에 계측 파이프(pipe)를 설치하였다.

Fig. 8은 현장 시험시공 과정을 나타낸 것이다. 얼음블록을 이용하여 인위적으로 지중에 공동을 발생시키는 것과 동시에, Fig. 8(j)와 같이 지상에는 하중을 재하 하여 하수관로 변형 현상을 효과적으로 나타내고자 하였다.

### 3.2 시험시공 결과

지중에 매설된 얼음블록이 녹는 속도를 정확히 유추하기는 어렵기 때문에 지반침하 측정은 시공 후 3, 5, 7, 10, 12일에 걸쳐 실시하였다. Fig. 9는 모래다짐 구간의 횡단면 측정위치를 나타낸 것이고, Fig. 10은 모래다짐 구간의 지표면 침하 결과를 나타낸 것이다. 측정 지점별 침하량은 얼음블록 매설 위치의 하수관로 중심선에서 최대 침하가

발생되었고, 중심선에서 멀어지면서 침하량이 작게 나타났다. 측정 3일째 이미 최대 침하량은 15cm 이상 발생하였고, 측정 5일째 최대 침하량은 23.4cm로 측정되었다. 이후 침하량은 변화가 거의 없었는데, 하수관로 하부에 매설된 얼음블록의 두께가 0.25m로서 얼음블록이 녹은 후 생성된 공동의 높이와 유사하게 지반침하가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 시공 후 12일째 모래다짐 구간을 실제 촬영한 모습인데, 지표면에 균열이 발생하였고 상재 하중으로 올려놓은 포대 아래에 침하가 상당히 발생된 것을 시각적으로도 확인이 가능하였다.

Fig. 12는 뒤채움재 시공 구간의 횡단면 측정위치를 나타낸 것이고, Fig. 13은 지표면 침하 결과를 나타낸 것이다. 모래다짐 구간과 동일하게 얼음블록이 매설된 위치임에도 시공 후 시간이 경과하여도 지반침하는 측정되지 않았고, 측정 12일째 최대 침하량은 0.01cm로 측정되었다. Fig. 14는 시공 후 12일째 뒤채움재 시공 구간을 실제 촬영한 모습인데 모래다짐 구간과는 상이하게 시공 직후의 지표면 상태와 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

뒤채움재 시공 구간은 Fig. 12에서 알 수 있듯이 하수관로 상하부 약 0.88m 두께에만 뒤채움재가 시공되었고, 지표면까지 약 0.8m 높이는 모래다짐 구간과 동일하게 현장토를 이용하여 다짐을 실시하였다. 다짐 횡수 및 시간도 두 구간을 최대한 동일하게 맞추었기 때문에 지반침하 발





(a) Bed excavation



(b) Laying a ice block at the bottom



(c) Laying a sand at the bottom



(d) Laying a sewer (sand compaction)



(e) Laying a sand at the top (sand compaction)



(f) Laying a backfill material at the bottom



(g) Laying a sewer (backfill material)



(h) Installing settlement gage



(i) Laying a backfill material at the top



(j) Loading on the ground



(k) Construction completion

Fig. 8. Field test process

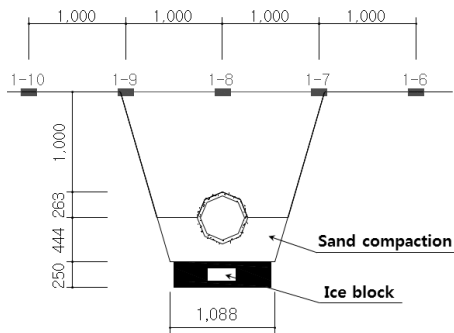


Fig. 9. Measuring point in cross-section (sand compaction)

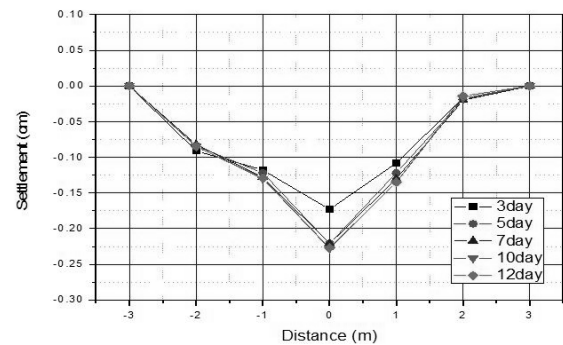


Fig. 10. Result of settlement in cross-section (sand compaction)



Fig. 11. Ground settlement in sand compaction area

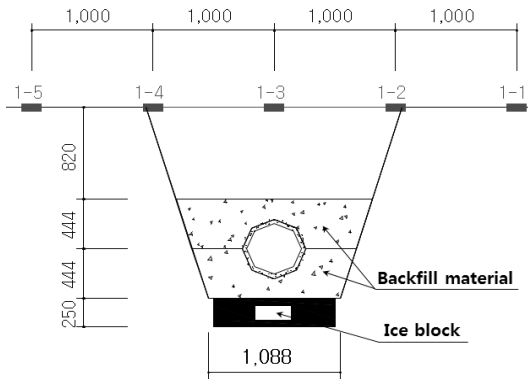


Fig. 12. Measuring point in cross-section (backfill material)

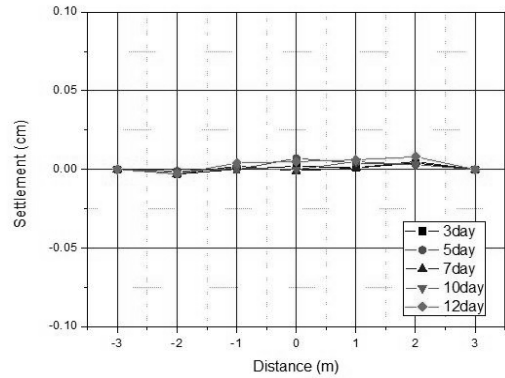


Fig. 13. Result of settlement in cross-section (backfill material)



Fig. 14. Ground settlement in backfill material area

생 결과의 차이는 모래 및 개발 뒤채움재의 차이라고 밖에 말할 수 없다고 판단된다.

Fig. 15는 시험시공 구간의 종단면에 대한 지반침하 측정 결과를 나타낸 것인데, 종단면 측정은 Fig. 7(a)의 중심부에 시공된 맨홀을 중심으로 좌우 여섯 지점에서 측정되었다. 모래다짐 구간의 경우 최대 27cm 까지 지표 침하가 발생하였으나, 뒤채움재 시공 구간의 경우 시간이 경과하여도 지표 침하량의 변화가 거의 없었다. 측정 지점별 침하량은 횡단면 측정 결과와 유사하게 얼음블록이 매설된 위치에서 최대 침하량이 발생하였고, 매설 위치에서 멀어지면서 침하량이 작아지는 것을 알 수 있었다. 이러한 횡단면 및 종단면 침하 발생 형상을 살펴보면 최근 국내 도심지에서 빈번하게 발생되고 있는 싱크홀(sinkhole)과 거

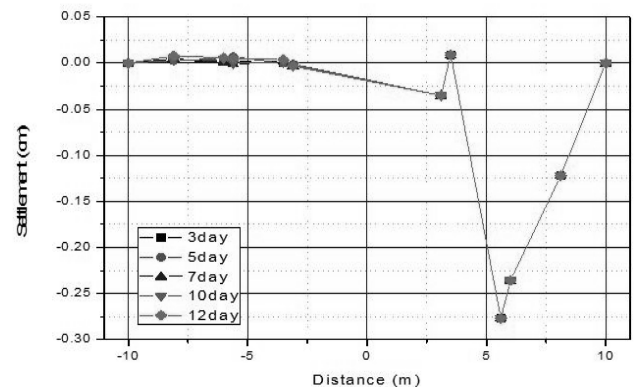
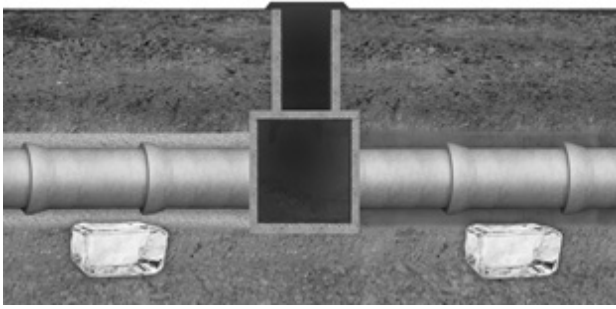


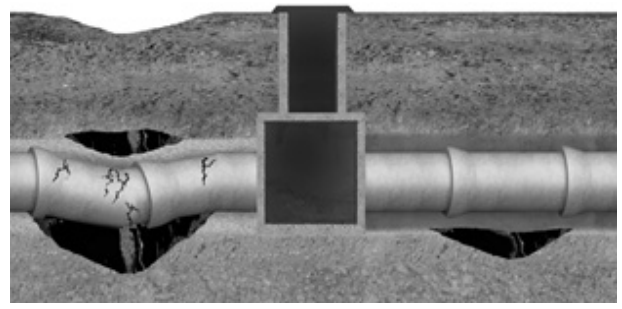
Fig. 15. Result of longitudinal section settlement in field test area

의 흡사한 형상을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 개발 뒤채움재의 현장 적용성 평가 결과를 모



(a) After the construction is over



(b) After the cavity is created

Fig. 16. Outline diagram of field test result

식으로 나타낸 것이다. 하수관로 하부에 매설한 얼음블록이 녹으면서 공동이 생성된 후 모래다짐 구간에서는 상재하중을 지지하지 못하여 하수관로까지 영향을 주어 하부 지지층이 없는 관로가 파손된 것으로 판단된다. 반면, 개발 뒤채움재 시공 구간에서는 상재하중을 뒤채움재가 지지함과 동시에, 관로 하부에 공동이 생성되었음에도 불구하고 하수관로까지 뒤채움재가 지지하여 파손을 방지하고 지반침하를 예방할 수 있었던 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 하수관로 손상을 방지하고 다짐 불량으로 인한 지반침하를 예방할 수 있는 하수관로 뒤채움재를 개발하였다. 그리고 현장 시험시공을 통해 기존 모래다짐 방법과 비교하여 개발 뒤채움재의 적용성 평가를 실시하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 하수관로 뒤채움재 개발을 위해 CA 치환율, 촉진제 종류 및 치환율, 물-재료비 등에 대한 실내실험을 수행하여 조기강도 발현을 위한 속경성, 재료유실 방지를 하는 가소성, 좁은 공간에도 쉬운 보수가 가능한 유동성, 수중시공을 위한 수중불분리성 등을 갖춘 하수관로 뒤채움재의 최적배합을 얻을 수 있었다.
- (2) 개발 뒤채움재의 재령 4시간 압축강도는 W/M 70% 이하에서 0.55~0.64MPa, W/B 80% 이상에서는 0.20MPa 정도로 나타나 국외 유동화토의 압축강도 기준인 0.13MPa를 만족하는 것으로 나타났으며, W/M을 100% 까지 증가시켜도 가소제 첨가량을 적절히 조정할 경우 요구 성능을 만족시키면서 경제성 또한 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

- (3) 기존의 하수관로 모래다짐 방법과 개발 뒤채움재의 성능을 비교하기 위해 현장 시험시공을 실시하였는데, 하수관로 매설시 관로 하부에 얼음블록을 매설하여 인위적으로 공동을 생성시켜 하수관로 변형을 유도하였고, 이로 인해 지표면에 나타나는 침하 정도를 비교 평가하였다.
- (4) 모래다짐 구간의 횡단면 발생 침하량은 최대 23.4cm, 종단면은 최대 27cm가 발생하였으나, 개발 뒤채움재 시공 구간에서는 횡단면에서 최대 0.01cm가 발생하였고, 종단면은 시간이 경과하여도 침하량의 변화가 거의 없었다. 특히, 모래다짐 구간의 횡단면 및 종단면 침하 발생 형상은 싱크홀(sinkhole)과 거의 흡사한 형상을 나타내었다.
- (5) 하수관로 하부에 매설한 얼음블록이 녹으면서 공동이 생성된 후 모래다짐 구간에서는 상재하중을 지지하지 못하여 하수관로까지 영향을 주어 하부 지지층이 없는 관로가 파손되었으나, 개발 뒤채움재 시공 구간에서는 상재하중을 뒤채움재가 지지함과 동시에 관로 하부에 지지층이 없는 하수관로까지 지지하여 파손을 방지하고 지반침하를 예방할 수 있었던 것으로 판단된다.

#### Acknowledgement

This research was supported by Grant No. 201400 0150022 from the Environment Industry Technology Development Program of the Ministry of Environment. The financial support is gratefully acknowledged.

## References

1. ACI Committee 229 (1994), *CLSM, ACI R-94*.
2. Chae, D. H., Kim, K. O., Shin, H. Y. and Cho, W. J. (2014), "Dynamic Characteristics of Liquidity Filling Materials Mixed with Reclaimed Ash", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.4, pp.5-11.
3. Cho, D. H. (2005), "Application of liquefied stabilization method using in-situ soil", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.53, No.10, pp.119-125.
4. Cho, D. H., Han, S. J., Kim, J. Y. and Kim, S. S. (2007), "A experimented study on the estimation of optimum mixing ratio and the behavior for backfill by the flowable material using surplus soil", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.3, pp.175-184.
5. Duncan, J. M. and Seed, R. B. (1986), "Compaction-induced Earth Pressures under K0-conditions", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.1, pp.1-21.
6. Kong, J. Y., Kang, H. N. and Chun, B. S. (2010), "Unconfined compressive strength and flow in controlled low strength materials made with coal ash", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.26, No.1, pp.75-83.
7. Lee, K. H., Kim, J. D., Hyun, S. C., Song, Y. S. and Lee, B. S. (2007), "Deformation behavior of underground pipe with controlled low strength materials with marine dredged soil", *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol.7, No.5, pp.129-137.
8. Ryu, Y. S., Han, J. G., Chae, W. R., Koo, J. S. and Lee, D. Y. (2015), "Development of Rapid Hardening Backfill Material for Reducing Ground Subsidence", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.3, pp.13-20.
9. Seo, D. W., Kim, H. Y., Kim, K. M. and Chun, B. S. (2010), "Characteristics of plasticizer lightweight foamed concrete according to changes of mixing ratio", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.11, No.4, pp.33-42.
10. Seoul city (2014), *Investigation of cause for road sinkage in Seoul city*, Seoul, Korea.
11. Thiansky, A. B. (1999), *Sinkholes, West-Central Florida*, U.S. Geological Survey, Tempa, Florida, pp.121-140.
12. Tokyo Electric Power Company R&D Center (1996), *Backfilling Method Using Slurry Material*, Tokyo, Japan, pp.152-174.
13. Won, J. P. and Lee, Y. S. (2001), "Properties of controlled lowstrength material containing bottom ash", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.13, No.3, pp.294-300.