

유동성 채움재 타설로 굴착부를 충진한 매립관의 변형특성 연구

The Study of Deformation Characteristics into Landfill and Underground Pipe using CLSM

남 승 혁¹⁾ · 채 휘 영²⁾ · 천 병 식[†]

Nam, Seunghyeok · Chae, Hwiyoung · Chun, Byungsik

ABSTRACT : In the case of the existing method of underground pipe construction, the difficulty of the bedding compaction of pipe causes reducing the compaction efficiency and the stability of the underground facilities and conclusively damaging the structures. One of the methods to solve these problem is using the flowable fills as a backfill material. Therefore, in this study, numerical analysis of the underground pipe was performed in order to evaluate the behavior of pipe according to backfill mixtures. To estimate the deformation characteristic of the underground pipe, the displacement of the main part of the pipe, ground settlement and vertical earth pressures were measured in different backfill mixtures and maintaining the other conditions constantly. As a result of numerical analysis, using the flowable fills as the backfill material is better than using sand in reducing the ground settlement, the pipe deformation and the vertical earth pressure aspect.

Keywords : CLSM, Backfill material, Underground pipe, Deformation characteristics

요 지 : 기존 지하 매설관 시공법의 경우 관의 하단부 다짐이 어렵고, 다짐효율이 좋지 않아 지하 매설물의 안정성을 저감시키고 이로 인한 파손이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나가 유동성 채움재를 이용하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 지하 매설관 시공 시 뒤채움재의 종류에 따른 매설관의 거동을 파악하기 위하여 지하 매설관에 대한 수치해석을 수행하였고, 동일한 조건에서 뒤채움재의 종류에 따른 관의 주요 부분의 변위, 지표침하, 수직토압을 비교·검토하여 지하 매설관의 변형특성을 예측하였다. 수치해석을 시행한 결과 뒤채움재로 유동성 채움재를 사용하는 것이 일반모래를 사용하는 것에 비해 지표침하 및 관변형량이 작아지고 수직토압 또한 감소한다는 것을 알 수 있었다.

주요어 : CLSM, 뒤채움재, 매설관, 변형특성

1. 서 론

주로 농업용수관, 상·하수도관 등이 고작이었던 과거와는 달리 최근에는 전력관, 도시가스관, 각종통신선로 및 송유관 등으로 사용범위가 확대되고 있다. 또한 이를 위한 굴착과 되메움이 수차례 반복 수행되어지고 있고, 매설관의 크기와 규모도 커짐에 따라서 건물이나 교량을 설계할 경우만큼 매설관의 설계에 있어서도 정확성이 요구되고 있다. 하지만 기존 시공법 특히 원형 지하 매설관의 경우 관의 하단부 다짐이 어렵고, 다짐효율이 좋지 않아 지하매설물의 안정성을 저감시키고 이로 인한 파손이 발생한다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나가 유동성 채움재(Controlled Low Strength Material : CLSM)을 이용하는 것이다. CLSM은 다짐이 필요하지 않은 자기수평성(시공성), 자원의 재활용을 통한 경제성, 그리고 자기강도발현성 및 미래의 재굴착성 등이 좋다는 장점을 가지고 있다.

이런 유동성 채움재에 관한 연구는 현재 미국에서는 플라이애쉬 및 폐주물사와 시멘트를 사용한 유동화 저장도 콘크리트에 대한 연구(Junardhanam 등, 1992; ACI 229R-94, 1994)가 진행 중이며 실용화 단계에 있다. 일본의 경우 건설성 주관하에 1992년부터 5년에 걸쳐 급결용 유동화 처리 흙의 이용기술에 관한 연구를 수행하였으며, 1997년 민간 기업의 인원들로 구성된 유동화처리 공법 연구 기구를 설립하여 현재까지 지속적으로 연구 활동을 수행하고 있다. 국내의 경우 최근 콘크리트 구조물 타설 시 액상화 공법인 고유동 콘크리트의 적용 사례와 옹벽 뒤채움재 급결 유동화 콘크리트의 연구사례(원종필 등, 1998), 플라이애쉬와 폐주물사를 사용한 저장도 콘크리트에 대한 연구사례가 있고, 플라이애쉬와 폐주물사의 재활용률을 높이고 적은 양의 시멘트 및 혼화재를 혼합하여 지중매설물, 옹벽 등의 뒷채움 재료로 사용하기 위한 연구가 진행 중이다(조재운 등, 2000; 박재현 등, 2004; 이관호 등, 2006).

1) 학생회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

이에 본 연구에서는 지하 매설관 시공 시 뒤채움재의 종류에 따른 지하 매설관의 거동을 파악하기 위하여 원형의 지하 매설관에 대한 수치해석을 수행하였고, 동일한 조건에서 뒤채움재의 종류에 따른 관의 주요 부분의 변위, 지표침하, 연직토압을 비교·검토하여 지하 매설관의 변형특성을 예측하는데 그 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 CLSM의 특징

유동성 채움재는 저장도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 것으로 유동성 채움재, 강도조절 채움재, 다짐조절 채움재, 유동성 플라이애쉬 등으로 불린다. 유동성 채움재는 기존의 모래 혹은 토사 뒤채움재에 비하여 자기수평능력(self-leveling), 자기다짐(self-compacted), 유동성(flowability), 인위적인 강도조절, 시공 후 재굴착의 용이성, 채움재 품질의 균일성(uniformity), 시공과정의 단순화 등 많은 장점을 가지고 있다. 또한, 충분한 양생이 이루어진 후에는 모래 혹은 토사로 뒤채움 시보다 동결융해, 침식, 수축, 외부 하중에 의한 침하 등에서 훨씬 적응성이 뛰어나다.

ACI Committee 116R에서는 유동성 채움재를 재령 28일 압축강도가 1,200psi(84kgf/cm²) 이하를 갖는 재료로 정의하고 있다. 그러나 향후 재굴착이 예상되는 경우에는 압축강도가 150psi(10.5kgf/cm²) 이하가 되어야 한다(Amon, 1990).

2.2 매설관에 작용하는 토압

매설관에 작용하는 토압의 산출방법은 매설유형 및 상재 하중에 따라 여러 가지 식이 제안되고 있으며, 그 크기도 상당한 차가 있다. Janssen, Spangler, Marston 등의 제안식이 있으나, 이 중에 Marston-Spangler 식이 가장 많이 사용되고 있다(천병식, 1998).

2.2.1 Silo 토압이론

Silo 토압이론은 Janssen(1985)에 의하여 제안된 이론으로서 시멘트 및 곡물의 저장을 위한 사일로 벽면에 작용하는 수평 및 연직압력은 저장물질의 함수비 및 단위용적당 중량에 따른 저장물질의 내부마찰각, 벽면마찰각 등을 이용해 산출한다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 AB와 CD의 벽체로 되어 있는 사일로의 표면으로부터 깊이 h 에서 dh 의 두께를 가지는 얇은 층의 윗면에 작용하는 연직토압을 q , 이 층의 아랫면에 작용하는 압력을 $q+dq$, 벽면에 대한 토압계수를 k 라고 하면, 수평압력의 크기는 $kqdh$ 이고 벽면에

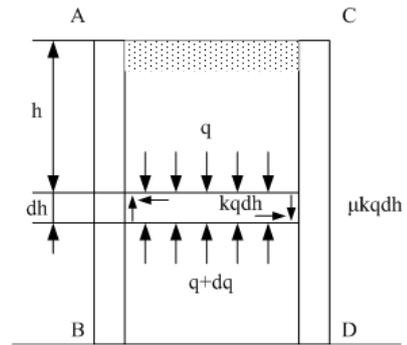


그림 1. Silo 토압이론

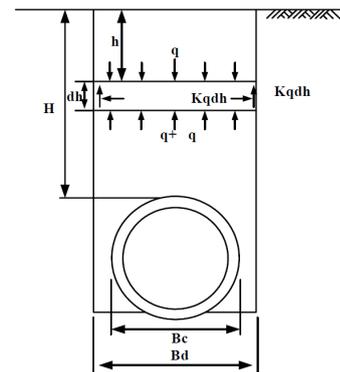


그림 2. 매설관에 작용하는 토압(Spangler, 1948)

서의 마찰력은 벽면의 마찰계수 μ 를 곱한 $\mu kqdh$ 이 된다. 벽체에 작용하는 연직토압은 식 (1)과 같다.

$$W_c = \frac{B\gamma}{2\mu k} \left(1 - e^{-\frac{2\mu k h}{B}} \right) \quad (1)$$

여기서, W_c : 매설관의 단위길이당 작용하는 연직토압 (t/m)

γ_t : 흙의 단위체적중량 (t/m³)

B_d : 관 상단에서의 굴착폭 (m)

K : 토압계수 = $\tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$

μ : 흙의 마찰계수

ϕ : 흙의 내부마찰각

H : 지표면에서 관 상단까지의 거리 (m)

2.2.2 Marston - Spangler 토압이론

지하 매설관에 작용하는 수직토압은 암거의 설치조건에 따라 그 변화가 상당히 크기 때문에 설계자들은 일반적으로 터널식, 제방식 암거 등으로 구분하여 각각 다른 방법으로 수직하중을 산정하게 된다. 이들은 모두 지하 매설관 상단에 작용하는 전체 사하중에 근거를 둔 것으로, 그림 2와 같은 단위길이의 도랑형 매설관의 한 단면에 굴착면에서 지표

면하깊이에 위치한 두께의 뒤채움재 수평요소의 상하방향 힘의 평형을 고려하면 식 (2)와 같은 관계식을 구할 수 있다 (Marston, 1930).

$$qB_d + dqB_d + 2\mu Kqdh = qB_d + \gamma B_d dh \quad (2)$$

여기서, qB_d : 요소의 상부에 작용하는 하향 연직력

$qB_d + dqB_d$: 요소의 저면에 작용하는 상향 연직력

2.2.3 뒤채움에 의한 매설관 주위의 토압분포

강성관은 자체의 강도 때문에 외부하중에 의한 변형이 작다. 따라서 수평방향의 팽창정도가 작고, 수평방향의 수동토압 유발은 거의 없다. 또한, 지반의 아칭효과 등에 의해 관에 작용하는 수평토압이 미소하고 일반 구조검토에서는 관내 유체의 중량을 고려하여 수평방향 토압을 고려하지 않으나 강성관에서는 그림 3에서와 같이 관의 상부에 작용하는 연직토압과 기초에 의한 연직반력 그리고 수평토압을 고려한다.

그림에서 α 는 유효 지지각으로 기초의 반력이 발현될 수 있는 폭을 정의한다. 일반적으로 콘크리트 기초인 경우에는

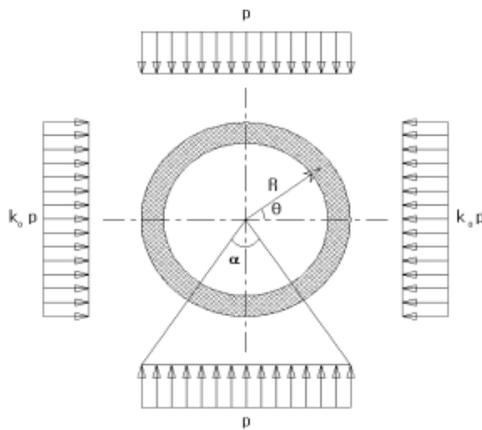


그림 3. 강성관 주변의 토압분포(Bolton, 1986)

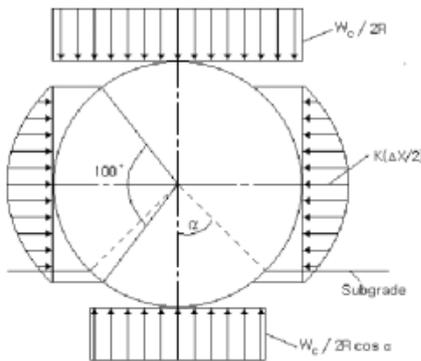


그림 4. 연성관 주변의 토압분포(Spangler, 1948)

실제 시공 지지각을 유효지지각과 동일하게 간주하고 있으나, 모래 및 원지반 기초인 경우에는 유효 지지각을 시공지 지지각보다 작게 고려한다.

연성관의 경우 Spangler는 그림 4와 같이 파형강관에 대한 현장시험으로부터 연성관에 작용하는 응력분포를 수직 토압은 관에 작용하는 Marston 이론에 의해 결정할 수 있으며 관의 폭에 걸쳐 균등하게 분포한다고 가정하였다. 또한, 수직반력은 관의 상부에 작용하는 연직토압과 거의 같으며 기초폭에 걸쳐 균등하게 분포하고 수평토압은 관의 중간부분에서 100°에 걸쳐 포물선 모양으로 분포한다고 가정하였다.

2.3 토압에 의한 관의 변형

2.3.1 관의 정부에 선하중이 작용하는 경우

매설된 관의 압축거동은 외압의 종류에 따라 달라지게 되는데, 연직토압에 비하여 수평토압의 크기가 작기 때문에 관은 타원형태로 변형된다. 이때 관의 편평지지력 강도가 큰 것은 작은 변형을 강도가 작은 것은 큰 변형을 일으킨다. 관의 연직방향의 처짐은 식 (3)으로 표시하고, 수평방향의 팽창은 식 (4)로 표시한다.

$$\delta_v = -0.149 \frac{r^3}{EI} W \quad (3)$$

$$\delta_v = -0.136 \frac{r^3}{EI} W \quad (4)$$

여기서, W : 관길이 1cm에 작용되는 선하중 (kg/cm)

r : 관두께 중심반경 ($\frac{D-t}{2}$, cm)

t : 관두께 (cm)

D : 외경 (cm)

E : 굽힘탄성계수 (kg/cm^2)

I : 단면2차모멘트

EI : 강성계수

2.3.2 Spangler's Iowa 변형공식

관의 변형은 관 상부의 하중과 관의 탄성계수의 비를 이용하여 구할 수 있으나, 관의 탄성계수는 흙과 관에 상호복합적으로 하중이 작용하므로 흙의 강성과 관의 강성을 함께 고려해야 한다. 연성관의 수평변형은 Iowa의 변형공식인 식 (5)에 의해서 구한다.

$$\Delta X = \frac{\gamma_B \gamma_T W_c R^4}{EI + 0.061 k R^3} \quad (5)$$

여기서, ΔX : 압거의 수평방향 변위 혹은 압거 직경의 변화 (cm)

γ_B : 베딩계수(일반적으로 연성압거의 경우, 설치시 베딩계수($\gamma_B = 0.1$))

γ_T : 시간에 따른 흙의 체적변화를 반영한 체집지체계수 ($\gamma_T = 1.5$)

W_c : 단위 길이당 압거 하중 (kgf/cm)

R : 압거 평균 반경 (cm)

E : 압거 재료의 탄성계수 (kgf/cm²)

I : 압거의 관성모멘트

k : 압거양단의 수동저항계수 (kgf/cm³)

최신의 지반해석 시스템이다. 특히, 복잡한 실무해석 및 설계업무에서 신뢰성이 높은 결과를 제공한다는 장점이 있다.

재료모델링에 있어 원지반은 Mohr-Coulomb의 파괴규준과 비관련 유동법칙을 따르는 탄소성 재료로 모델링하였으며, 팽창각 ψ 는 Bolton(1986)이 제안한 바와 같이 내부마찰각 ϕ 와 한계상태 마찰각 $\phi_{cu} = 33^\circ$ 간에 식 (6)과 같은 관계가 있는 것으로 가정하였다.

$$\phi = \phi_{cu} + 0.8\psi \quad (6)$$

한편, 매설관은 허용응력 범위내에서 선형탄성적 거동을 가정하여 본 해석에서는 선형 탄성모델을 선택하여 적용하였다.

본 연구에서는 여러 가변조건 중에서 뒤채움재의 종류(일반모래, 방식사, 유동성 채움재)를 변화시키는 3가지 사례에 대해서 수치해석을 실시하였다. 수치해석에 사용된 뒤채움재 모델링에 있어서는 탄소성모델(Mohr-Coulomb)을 적용하였다. 뒤채움재로 사용한 유동성재료의 배합비는 표 1과 같고, 실험재료의 기본물성치(c, ϕ)는 표 2와 같다. 또한, 실험재료의 양생일별 일축압축강도는 표 3에 나타나 있다. 해석에 사용한 매설관은 파형강관을 모델링 하였으며

3. 수치해석

본 연구에서 수치해석에는 마이다스아이티사의 MIDAS GTS 프로그램을 사용하였는데, 이 프로그램은 DIANA의 우수한 비선형해석기능을 기반으로 고급해석기능이 탑재된

표 1. 실험재료의 배합비(박재현, 2004)

재 료	시료(%)	플라이애쉬(%)	물(%)	시멘트(%)
방식사	45.71	28.97	23.81	1.50
유동성 채움재	54.02	19.89	22.84	3.24

표 2. 실험재료의 기본물성치(c, ϕ)(박재현, 2004)

재 료	1일 양생		7일 양생	
	c (kN/m ²)	ϕ (degree)	c (kN/m ²)	ϕ (degree)
방식사	25	13.97	73	27.33
유동성 채움재	50	11.61	95	12.61

표 3. 실험재료의 일축압축강도(박재현, 2004)

재 료	1일 양생(kN/m ²)	7일 양생(kN/m ²)
방식사	178	433
유동성 채움재	124	243

표 4. 수치해석단면의 물성치(박재현, 2004)

구 분	탄성계수 E (kN/m ²)	내부마찰각 ϕ (degree)	점착력 c (kN/m ²)	단위중량 γ (kN/m ³)	포아송비 ν
원지반	35,400	33	15	19	0.33
매설관	$1.8 \times E10$	-	-	23	0.2
뒤채움재	일반모래	10,000	30	15	0.3
	방식사	30,260	27.33	73	0.3
	유동성 채움재	17,370	13	95	0.3

이와 뒤채움재의 물성치는 박재현(2004)의 논문을 참고하여 선정하였다.

표 4는 수치해석에 사용한 원지반, 매설관, 뒤채움재의 물성치를 나타낸 표이다. 원지반의 경우 박재현(2004)의 논문을 참고하여 선정하였으며, 매설관의 경우 일반적으로 적용되는 물성치를 적용하였다.

현장에서 시공하는 과정을 순차적으로 모사하기 위하여 모델링을 초기 단계(원지반), 시공 1단계(트렌치굴착), 시공 2단계(매설관 및 뒤채움재 매설), 그리고 시공 3단계(차량하중 재하)로 하였다. 여기서 차량하중은 96kN/m^2 을 재하하였다.

4. 결과 및 분석

유동성 채움재로 타설한 매립지반의 침하와 매설관 주요 부분의 변형특성을 수치해석적으로 연구한 결과는 그림 5

와 같다. 지표침하 및 관의 변위는 DB-24 하중을 주기 전에는 일반모래, 방식사, 유동성 채움재 모두 비슷하게 나타났으나 차량하중을 가한 후에는 그 재료에 따라 상당한 차이를 보였다.

4.1 지표침하 및 관의 수직변위

표 5에서 보이는 바와 같이 방식사의 경우 차량하중 전에는 지표침하와 관변위가 0.28mm , 차량하중 후에는 지표침하가 2.94mm , 관변위가 0.98mm 로 나타났지만, 유동성 채움재의 경우 차량하중 전에는 지표침하와 관변위가 0.31mm , 차량하중 후에는 지표침하가 4.57mm , 관변위가 1.03mm 로 나타났다. 이는 파형강관 시공 시에 유동성 채움재를 뒤채움재로 이용하면 CLSM이 굳어져 강성화 되고, 파형강관과의 일체화를 통한 파형강관의 단면강도를 증진시켜준 효과로 해석할 수 있다.

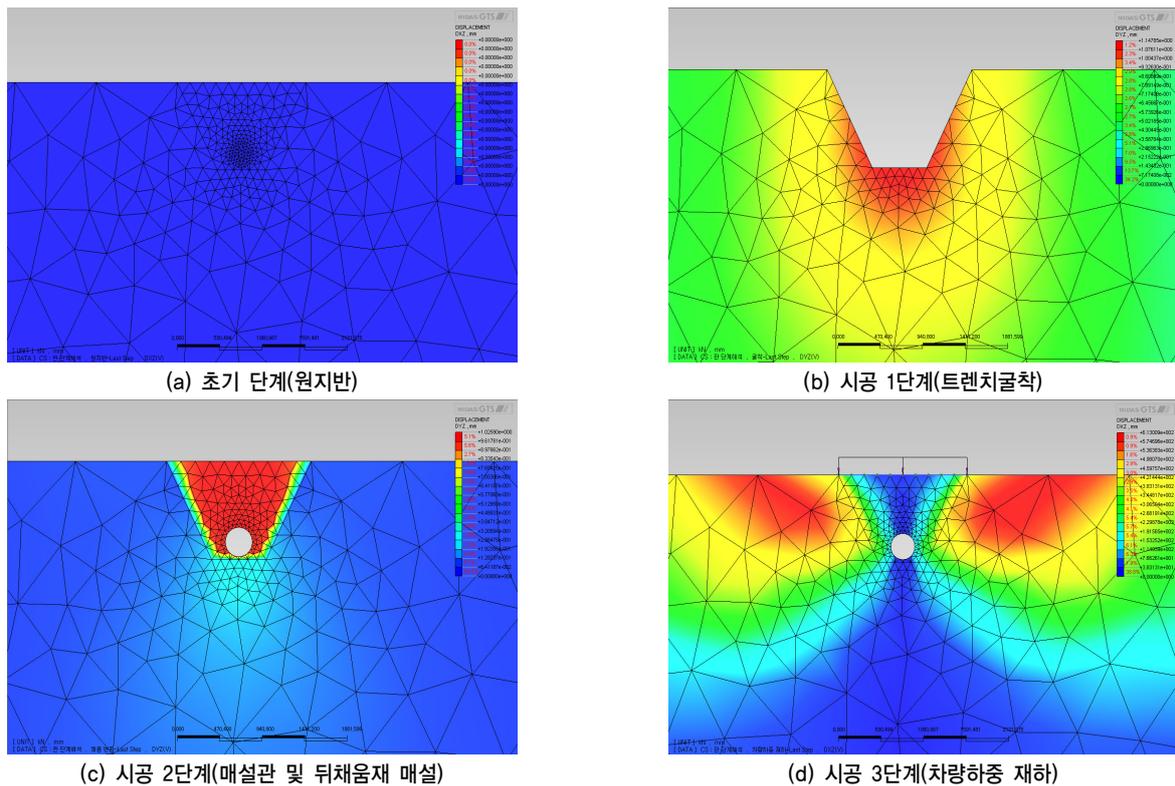


그림 5. 수치해석 결과

표 5. 지표침하 및 관의 수직변위

재 료	차량하중 전		차량하중 후	
	지표침하(mm)	수직변위(mm)	지표침하(mm)	수직변위(mm)
일반모래	0.29	0.29	8.05	1.12
방식사	0.28	0.28	2.94	0.98
유동성 채움재	0.31	0.31	4.57	1.03

4.2 매설관 주요부위의 변형량

표 6의 결과로 보아 방식사를 이용한 유동성 채움재의 특성이 지표침하와 관의 변형을 최소화할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 관의 주요절점에 대한 관의 변형량을 비교·검토하여 본 결과 관의 천단부에서 가장 큰 변형량이 나타났으며, 관의 저부로 내려갈수록 그 변형량이 작아짐을 알 수 있었다. 이는 뒤채움재의 종류에 따라 관의 주요부위에서의 변형특성이 유동성 채움재의 강도특성과 상당한 관계가 있다고 할 수 있다. 즉, 시간에 따른 양생과정을 거치면서 뒤채움재의 강도가 발현되고, 자기강도 발현 특징에 의해 유동성 채움재(CLSM)가 하나의 암반(rock mass)과 같은 거동효과를 나타낸 것으로 판단된다.

4.3 지하 매설관에 작용하는 수직토압

표 7은 차량하중 재하 전·후의 지하 매설관에서 작용하는 수직토압을 나타낸 표로서 Marston의 이론값과 수치해석의 결과값을 비교하였다. 일반적으로 관거의 수직토압은 관거 주변 아칭효과의 발생 형태 및 크기, 영향정도에 따라 그 크기가 결정된다. 본 연구에서 방식사의 경우 이론값은 차량하중 전 3.1kN/m², 차량하중 후 44.5kN/m²로, 해석값은 차량하중 전 4.5kN/m², 차량하중 후 46.0kN/m²로 나타났다. 또한 유동성 채움재의 경우 이론값은 차량하중 전 3.6kN/m², 차량하중 후 46.5kN/m²로, 해석값은 차량하중 전 5.8kN/m², 차량하중 후 48.4kN/m²로 나타났다. 이와 같이 Marston의 이론값과 실제 수치해석 결과값을 비교·분석해 본 결과 그 값에는 차이가 있었지만 유동성 채움재가 시간이 흐름에 따라 양생되어가면서 강도가 발현되고, 강도가 발현된 후에는 토압이 감소한 것을 알 수 있었다.

표 6. 관자체의 주요부위 변형량

재 료	천단부		측벽부		하단부	
	하중 전(mm)	하중 후(mm)	하중 전(mm)	하중 후(mm)	하중 전(mm)	하중 후(mm)
일반모래	0.29	1.12	0.27	1.05	0.21	1.01
방식사	0.28	0.98	0.25	0.95	0.23	0.90
유동성 채움재	0.31	1.03	0.28	0.99	0.26	0.94

표 7. 지하 매설관에 작용하는 수직토압

재 료	차량하중 전		차량하중 후	
	Marston(kN/m ²)	해석값(kN/m ²)	Marston(kN/m ²)	해석값(kN/m ²)
일반모래	4.0	7.4	47.7	50.8
방식사	3.1	4.5	44.5	46.0
유동성 채움재	3.6	5.8	46.5	48.4

5. 결 론

본 연구는 유동성 채움재로 타설한 매립지반에 매설한 매설관의 거동을 파악하기 위하여 MIDAS GTS 프로그램을 이용하여 유한요소해석을 하였다. 같은 조건에서 뒤채움재의 종류에 따른 차량하중 재하 전·후의 지표침하 뿐만 아니라 관의 수직·수평변위로부터 유동성 채움재를 이용한 지하 매설관 특히, 관의 천단·하부에서의 변위와 주요절점 변위를 비교하였다. 또한, 차량하중 재하 전·후의 지하 매설관에서 작용하는 수직토압을 통하여 Marston의 이론값과 수치해석의 결과값을 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 뒤채움재로 유동성 채움재를 사용한 경우 일반모래를 사용했을 경우보다 관의 수직변위 및 지표면변위가 감소되는 것으로 나타났다. 이는 유동성 채움재의 특징 중에서 자기강도발현이 되면서 파형강관 주변의 유동성 채움재가 굳어져 강성화되고, 이로 인한 파형강관과의 일체화가 진행되어 단면강도를 증진시켜준 효과로 판단된다.
- (2) 수치해석을 통한 관 주요부위 변형량을 비교해 본 결과 관의 천단부에서 가장 큰 변형량이 나타났고 관의 하부로 내려갈수록 그 변형량이 작아지는 것을 알 수 있었다. 또한, 뒤채움재로 유동성 채움재를 사용할 경우가 일반모래를 사용한 경우보다 주요절점에서의 변형량이 작게 나왔으며 방식사를 사용한 경우의 변형량이 가장 작게 나타났다. 이는 뒤채움재의 종류에 따라 관의 주요부위에서의 변형특성이 유동성 채움재의 강도특성과 상당한 관계가 있다고 할 수 있고, 시간에 따른 양생과정을 거치면서 뒤채움재의 강도가 발현되고, 자기강도 발현 특징에 의해 유동성 채움재(CLSM)가 하나의 암반

과 같은 거동특성을 나타낸 것으로 판단된다.

- (3) 일반적으로 관거의 수직토압은 관거 주변 아칭효과의 발생 형태 및 크기, 영향정도에 따라 그 크기가 결정된다. 지하 매설관의 주요부위에 작용하는 수직토압을 비교·분석해 본 결과 Marston의 이론값과 실제 수치해석 결과 값에는 차이가 있었지만 유동성 채움재가 시간이 흐름에 따라 양생되어가면서 강도가 발현되고, 강도가 발현된 후에는 하나의 압반과 같은 거동특성을 가져 토압이 감소한 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 박재현(2004), *유동성 채움재를 이용한 지하 매설관의 변형특성 연구*, 석사학위 논문, 경성대학교, pp. 7~18.
2. 박재현, 이관호, 조재운, 김석남(2004), *현장발생토 CLSM을 이용한 지하 매설관의 변형특성*, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 20, No. 3, pp. 129~139.
3. 원종필, 신유길(1998), 다량의 플라이애쉬를 함유한 고유동 시멘트 복합체의 물리·역학적 특성, *농자원개발논문집*, 건국대학교부설 농업자원개발연구소, Vol. 20, pp. 47~53.
4. 이관호, 박재현(2006), 파형강관을 이용한 지하매설물용 뒤채움재 설계 및 시공성 평가, *한국도로학회 논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 63~74.
5. 조재운, 이관호, 이인모(2000), 유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽 뒤채움재 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 16, No. 4, pp. 17~30.
6. 천병식(1998), *지반공학 이론과 실재*, 도서출판 구미서관, pp. 285~295.
7. ACI Committee 229R-94.(1994), Controlled Low-strength Materials(CLSM), *Concrete Int.*, Vol. 16, No. 7, pp. 55~64.
8. Amon, J. A.(1990), Controlled Low-strength Material, *The Constr. Specifier*, December, pp. 98~101.
9. Bolton, M.D.(1986), The Strength and Diatancy of Sands, *Geotechnique*, Vol. 36, No.1, pp. 65~78.
10. Marston, A.(1930), The Theory of External Loads on Closed Conduits, *Iowa Engineering Experimental Station, Ames, IA*, Bulletin No. 96, pp. 5~8.
11. Janssen, H.A.(1985), Versuche Uber Getreidruck in Silozeuen, *Z. Ver. Deut Ingr.* Vol. 39, p. 1045. (partial English Translation in Proceeding of the Institute of Civil Engineers, London, England, p. 553.).
12. Junardhanam, R., F. Burns and R. D. Peindl.(1992), Mix Design for Flowable Fly-Ash Backfill Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 252~263.
13. Spangler. M.G.(1948), Underground Conduits - An Appraisal of Modern Research, *Transactions of ASCE*, Paper No. 2337, Vol. 113, pp. 316~345.

(접수일: 2011. 4. 11 심사일: 2011. 7. 5 심사완료일: 2011. 8. 23)