

굴착잔토를 재활용한 지중 전력케이블 유동성 뒷채움재 이용시 지중연성관의 거동특성

Behavior of Flexible Pipes with the Accelerated Flowable Backfill Materials Using Surplus Soil for Underground Power Utilities

오 기 대[†] · 김 대 홍¹⁾ · 이 대 수²⁾ · 김 경 열³⁾ · 홍 성 연⁴⁾

Oh, Gidae · Kim, Daehong · Lee, Daesu · Kim, Kyoungyul · Hong, Sungyun

ABSTRACT : In the case of underground power utilities pipe such as circular pipe, the most difficult problem is low compaction efficiency of the bottom of pipe inducing the failure of utilities. To overcome this problem, various studies have been performed and one of these is CLSM (controlled low strength materials) accelerated flow ability. CLSM has already been stage of commercial use in the foreign countries led by power company. In this study, we estimated the behavior of flexible pipe with flowable backfill materials and sand to compare on the DB24 load. The results showed that the deformation of flexible pipe is affected by types of backfill materials. CLSM shows better behavior characteristics than compacting sand. But numerical and analytical results that performed to compare to the field test results showed big gap with the field results.

Keywords : CLSM, Backfill Materials, Surplus Soil, Flexible Pipe

요 지 : 지중전력선과 같은 원형 지하매설관의 경우 관의 하단부 다짐효율이 낮아 파손등과 같은 구조적 문제점에 항상 노출되어 있다. 이러한 문제점들 때문에 다양한 방법들이 강구되어 왔으며 그중 하나가 유동성이 뛰어난 저강도 콘크리트의 개발이다. 외국에서는 이미 오래전부터 연구개발을 진행하여 전력회사를 중심으로 이미 실용화 단계에 와있다. 따라서 본 연구에서는 개발된 지중 전력케이블 유동성 뒷채움재의 거동특성을 확인하기 위해서 개발된 유동성 뒷채움재와 일반모래를 이용하여 DB-24차량하중에 대해서 매설관의 거동을 평가하기 위해서 실증실험을 수행하고 그 결과를 수치해석 및 이론식과 비교분석하였다. 그 결과 매설관의 변형은 뒷채움재의 종류에 영향을 받는 것으로 나타났다. 유동성 뒷채움재가 모래다짐 보다 관로에 미치는 토압 및 변형 특성이 우수한 것으로 확인되었다. 하지만, 실증실험 결과와 비교검토를 위해서 수행한 수치해석 및 이론식 값들이 실증실험값과 차이나향후 유동성 뒷채움재에 맞는 해석방법 개발이 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 유동성 저강도 뒷채움재, 뒷채움재, 굴착잔토, 연성관

1. 서 론

최근 기존의 도심을 벗어나 새로운 신도시 및 공업단지 가 수도권권을 중심으로 많이 생기면서 도시미관 및 신뢰도향상 등의 이유로 전력, 통신, 상하수도 등 다양한 선로들이 지중에 매설되고 있다. 이런 지중관로들은 많은 장점들이 있는 반면, 시공시 건전성을 확보하지 못할 경우, 집중강우와 같은 외부적인 요인들에 의해서 위험에 쉽게 노출되어 엄청난 피해가 발생할 수도 있다. 특히 전력선과 같은 라이프라인의 경우에는 도시전체 정전과 같은 엄청난 재앙을 가져올 수 있어 되메움재의 적절한 시공이 무엇보다 중요하다. 지중전력선은 주로 PE파형관을 이용하여 시공하게 되

는데, 전력선의 특성상 여러 다발을 사용하여 시공하기 때문에 뒷채움재로 주로 사용하는 모래의 경우 몰다짐과 같은 방법을 사용하더라도 파형관 사이 및 원형관 저부를 다짐하기는 쉽지 않아, 다짐이 쉽고 자기 강도를 발현하여 관을 보호할 수 있는 새로운 재료 개발의 필요성이 요구된다. 이러한 문제점을 해결하는 방법중의 하나가 저강도 유동성 뒷채움재(CLSM : controlled low-strength material)의 활용이다. 이는 유동성 뒷채움재가 자기 수평성(시공성), 자기강도 발현성 및 유지보수를 위한 재 굴착이 가능한 저강도 발현 등의 장점을 가지고 있기 때문이다.

지중전력구조물 유동성 뒷채움 재료로서 유동성 뒷채움재를 사용할 경우에는 유동성 및 일축압축강도가 가장 중요

† 정회원, 한전 전력연구원 일반 연구원(E-mail : 05100160@kepeco.co.kr)

1) 비회원, 한전 전력연구원 책임 연구원

2) 비회원, 한전 전력연구원 수석 연구원

3) 비회원, 한전 전력연구원 선임 연구원

4) 비회원, 한전 전력연구원 일반 연구원

하다. 유동성은 시공시 작업시간 및 작업품질에 관계되고, 일축압축강도는 전력선의 안정성, 빠른 교통소통(조기강도 발현) 및 유지관리를 위한 재굴착성(낮은 장기강도 유지)을 나타내는 지표다. 이와 관련하여 국내외에서 많은 연구가 진행되고 있는데, 국외에서는 미국, 대만, 일본 등에서 플라야쉬 및 폐주물사, 시멘트 및 혼화제를 차별적으로 혼합하여 시공목적에 맞는 유동성 뒷채움재에 대한 연구(Jakardhanam 등, 1992; Tarun 등, 2001; Wayne, 1994)가 진행중이고, 국내에서는 지중매설과 옹벽(조재운 등, 2000; 박재현 등, 2004; 이관호 등, 2006) 등의 뒷채움재료에 대해서 연구가 진행되었다.

하지만, 굴착공사시 폐기물로 분류되는 굴착잔토의 재활용을 향상 및 지중전력선과 같이 다발로 매설되는 관로를 되메울 수 있는 고유동성 재료에 대한 연구는 이루어지지 못하였다. 이에 선행연구에서는 현 국내 토질조건을 고려하여 굴착 잔토를 재활용하기 위하여 17종의 대상 시료와 6종류의 고결재료를 사용하여 배합비 설계기준을 수립하였다(한국전력공사, 2006). 이에 본 연구에서는 유동화 뒷채움재를 적용하는 도로하부의 지중매설관이 받는 토압 및 변형거동 특성을 파악하고자 유동성 뒷채움재와 모래로 뒷채움한 구간들에 A-1급 아스팔트 포장도로를 시공하고 DB-24의 후륜하중인 94.1kN을 정재하하는 실증실험을 수행하고, 그 결과를 수치해석 및 이론식들과 비교 검토하여 유동성 뒷채움재의 응력 및 변형특성을 파악하고자 한다.

2. 고전이론식에 의한 해석

도로하부에 매설된 지중연성관의 변형에 영향을 주는 요인은 토압 및 윤압이고, 국내외의 선행연구에서 토압은 Prism Load 공식, 윤압은 확산공식, 그리고 두 하중에 의한 매설관의 변형량 계산에는 Iowa 공식이 지중연성관의 해석에 합리적인 것으로 알려졌다(이이환 등, 1986; 이대수 등, 2002)

2.1 토압(Prism Load)

지하에 매설되는 관로에 작용되는 수직토압은 설치 방식 및 관의 재료에 따라서 강성, 연성으로 구분하여 약간씩 다른 방법으로 토압을 산정하게 된다. 연성관(PE파형관, PVC 등)의 경우 매설관에 작용하는 토압은 매설관과 흙의 상대적인 강성에 의해서 변화하게 된다. Marston의 토압이론은 관이 강성일때와 연성일때를 고려하여 간편한 토압식을 제시하였지만, 이는 강성관과 연성관에 작용하는 토압으로 실제 연성관의 토압의 최대, 최소치의 값을 나타낸 것으로 실

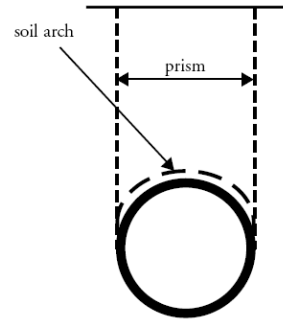


그림 1. 지중관로의 연성관의 Prism Load 작용도

제 연성관에 작용하는 토압보다는 과소한 값을 제시하고 있다(Moser, 2001). 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같이 보다 실제 설계하중과 유사한 토압을 제시하는 Prism Load 공식을 이용하여 토압을 산정한다.

$$q = \gamma \cdot h$$

여기서, q = 연직토압 (kN/m^2)

γ = 단위중량(kN/m^3)

h = 토피(m)

2.2 윤압(확산공식)

$$p = \frac{P(1 + im)}{(a + 2h \tan \alpha)(b + 2h \tan \alpha)}$$

여기서, p = 윤압(kN/m^2)

$P = 94.1 \text{ kN}$ (DB-24 후륜하중)

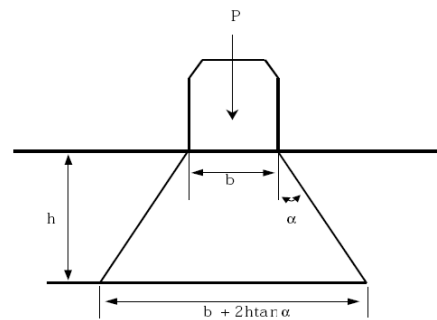
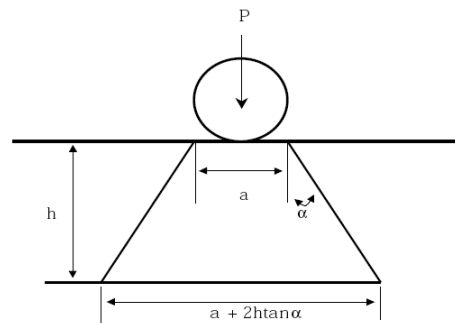


그림 2. 확산공식 적용도(상 : 측면, 하 : 정면)

- a = 0.2m (접지길이)
- b = 0.5m (접지폭)
- h ≤ 0.3, 0.6, 0.9, 1.0m → im(충격계수) = 0.3, 0.2, 0.1, 0
- α = 45°(분산각)
- h = 토피(m)

2.3 매설관의 변형량(Spangler의 Iowa공식)

토압 및 윤압에 의한 지중 매설관의 직경변형은 아래의 Iowa의 방정식을 이용하여 평가한다.

$$\Delta X = \frac{D_1 K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3}$$

여기서, ΔX = 관로 직경의 변화(m)

D1 = 1.5(변형지체계수)

K = 0.108(지지각에 따른 계수)

r = 0.115m(관 반경)

D = 0.23m(관 외경)

Wc = (토압+윤압)×D(연직하중, kN/m)

E = 686465.5kN/m²(관의 탄성계수)

I = $\frac{t^3}{12}$ (관의 2차 모멘트)

t = 0.0035m(관의 두께)

E' = 6864.6kN/m²(흙의 반력계수)

3. 실증실험

3.1 지하매설용 뒤채움재

3.1.1 현장발생토

본 연구에서는 국내 표토층의 70 - 80%를 차지하고 있는 화강풍화토 중 세립분 함량이 10%인 사질토(SW-SM)를 초기 대상 시료로 하고 13mm 이하의 크기를 갖는 쇄석골재와

표 1. 현장실험 대상 지반의 물성치

분 류		현장발생토	일반모래
No. 200체 통과량(%)	F200	7.231	1.62
균등계수	C _u	3.655	40
곡률계수	C _c	0.846	0.16
비중	G _s	2.600	2.64
통일분류(USCS)		SP-SM	SW

점토의 함유량을 변화시켜가며 총 17 종류의 혼합토를 제작하였다. 그 중 한국전력공사 유동성 뒤채움재 품질기준(표 3)에 부합하는 혼합토(사질토에 자갈 2.53%, 그리고 세립분 7.231%가 함유)를 본 연구의 대상으로 선정하였다(표 1).

3.1.2 뒤채움재

본 연구에 사용된 뒤채움재료는 일반모래와 유동성 뒤채움재를 사용하였다. 일반모래는 현행 지중선로공사에 사용하는 재료로 상기 표 1과 같은 물성치를 나타내는 시료를 사용하였으며, 유동성 뒤채움재는 아래 표 2에 나타난 배합비와 같이 11.21%인 현장 함수비를 고려하여 현장발생토 67.4%, 고화재 8.8%, 물 23.9%를 혼합하여 사용하였다. 표 3은 유동성 뒤채움재의 품질기준(한국전력, 2006) 및 실증 실험시 현장에서 수행한 시험결과를 나타낸 것으로 지중전력선용 초급결성 유동성 뒤채움재의 요구품질인 유동성, 조기강도발현, 열 저항성 등 모든 재료의 물리적 특성을 만족하는 것으로 확인되었다.

3.2 매설관재 규격

현재 지중전력관로 공사에서는 PE 파형관과 합성수지관(PVC) 둘 다 사용되고 있지만, 지하매설물로 인하여 굴곡개소가 많은 지역과 연약지반 등의 원인으로 부등침하의 우려가 있는 지역 등에는 PE 파형관을 사용하고, PVC관은 교량 등 특수개소, 지하공간이 협소하여 파형관 시공이 어려운 개소에만 적용하므로 본 실험은 적용범위가 넓은 한전 구매시방서 기준(표 4)에서 제시하고 있는 PE 파형관을 이용하였다.

표 2. 현장배합비, 유동성 및 일축압축강도(한국전력공사, 2006)

구 분	함수비 (%)	FLOW (mm)	1m ³ 당 배합량(kN)			강도 (kN/m ²)
			고화재	현장토	물	
시방배합	0	215	1.6	11.2	4.9	33.3(1시간) 149.0(4시간)
현장배합	11.21	295	1.6	12.5	4.4	79.4(1시간) 199.0(4시간)

표 3. slurry 뒤채움재의 품질 시험결과 (한국전력공사, 2006)

항 목	품질시험결과	목 표
특징	현장잔토 사용	
유동성	280mm	195 ± 10mm 이상
일축압축강도	- 1시간 : 74.5kN/m ²	- 1시간 : 39.2kN/m ² 이상
	- 4시간 : 160kN/m ²	- 4시간 : 147.1kN/m ² 이상
	- 28일 : 441kN/m ²	- 28일 : 686.5kN/m ² 이하
열 저항성	73°C cm / W(시공후 7일)	85°C cm / W 이하
블리딩	(2 ± 0.2) %	3% 이하
침하	1.04mm	3mm/30cm 이하

표 4. PE 파형관 규격(한전 구매시방서 기준)

외 경(mm)	230
내 경(mm)	175
최수두께(mm)	3.5 이상
인장응력(MPa)	22.1 이상
압축하중(kN)	2.7 이상

3.3 실험계획

본 연구에서는 두 종류의 뒷채움재(유동성 뒷채움재와 모래)를 이용하여 한전시방기준(다짐도 85%)에 만족하는 모래표준다짐과 유동성 뒷채움재를 이용한 무다짐 구간을 나누어 실증실험을 수행하였다. 아스팔트 포장은 주요간선 도로에 적용되는 A-1급 포장도로를 시공하였으며, 차량하

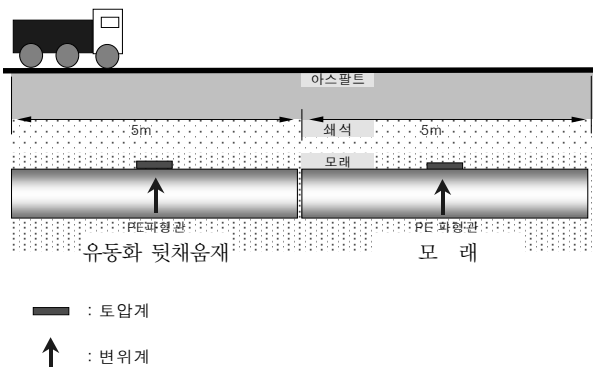


그림 3. 실증실험(좌측 : 유동성 뒷채움재 구간, 우측 : 모래구간)

중은 DB-24 후륜하중인 94.1kN이 되도록 트럭을 계근하여 실험에 사용하였다(그림 3).

3.4 실험 방법

현장 실험에 사용된 부지는 한국전력공사 실증실험장을 이용하였고, 실험순서는 다음과 같다.

(1) 굴착 및 관 포설

관 포설을 위한 굴착은 한전 지중배전 설계편람(조성수, 1999)의 규격에 따라 매설 단면을 굴착하고, PE파형관을 3단 4열로 배열하여 시공한다.

(2) 계측기 설치

관에 작용하는 토압 및 변위가 가장 클 것으로 예상되는 그림 4의 점 A에서 관의 작용압력(토압+윤압)을 계측하기 위해서 토압계를 관의 상부에 위치시키고, 관 내부에는 변위측정용 LVDT를 설치하였다.

(3) 유동성 뒷채움재 타설 및 모래 포설

표준다짐구간의 모래는 진동 다짐기를 이용하여 다짐을 실시하고, 유동성 뒷채움재 구간은 다짐없이 펌프카를 이용하여 타설한다. 본 유동성 뒷채움재는 급결성 및 신속 시공을 위해서 고유동성 특성을 나타내기 때문에 시공초기 부력으로 인한 관로의 변형 가능성이 크므로 한국전력의 관로

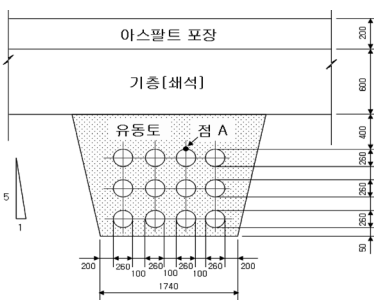


그림 4. 관로 시공(좌측 : 실험단면도, 가운데 : 관로굴착, 우측 : 유동성 뒷채움재 부력지지용 앵커)

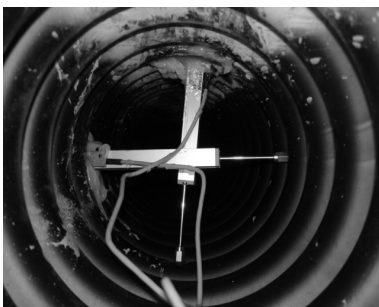


그림 5. 계측기 설치 및 유동성 뒷채움재 타설(좌측 : LVDT 설치, 가운데 : 토압계 설치, 우측 : 타설)

최소곡률반경 기준인 관로 내경의 30배 혹은 6m을 만족하고자 실증시험전 4차레의 부력실험을 통해서 최적 관로 간격재 간격(1.8m)을 산정하여 설치하였다(한국전력, 2006).

(4) A-1급 포장 시공

보조기층 40cm, 기층 20cm, 중간층 15cm, 표층 5cm의 A-1급 포장을 실시한다.

(5) 재하실험

아스팔트 도로포장이 완료되고 양생 후, 설계하중 DB-24에 준하는 트럭하중을 이용하여 실험을 실시한다. 윤택하중의 재하방법은 정재하 방법을 이용한다. 우선 정하중 재하는 DB-24차량의 후륜하중 94.1kN을 매설관로 상단의 도로 표층 정중앙에 오도록 하여 정차시킨다. 차량하중의 정확성을 기하기 위하여 실험전 후륜하중 94.1kN을 계근소에서 정확하게 계근한 뒤 실험을 수행한다. 정재하의 종료는 재하 시작 후 관재의 변형률이 일정한 값에 수렴할 때 재하를 중지하며, 하중 제하 후 관재의 회복량을 계측하여 관재의 안정성을 평가한다.

(6) 데이터 취득

데이터 로거를 이용하여 각 센서의 측정값을 정리한다.

(7) 시험완료 후 관로의 길이방향 수직 및 수평변위 측정
 하중재하시험 완료 후 타설시 관로의 처짐 및 전력선 도

통시험을 수행한다. 유동성 뒷채움은 타설시 부력에 의해서 관로의 처짐이 발생할 수 있으므로 그림 7과 같이 시공완료 후 굴착하면서 관로의 처짐측정 및 전력선 도통가능여부를 확인한다.

4. 수치해석

4.1 뒷채움재의 해석 모델링

본 수치해석은 실증실험과 동일한 조건으로 유동성 뒷채움재와 모래로 뒷채움된 지중매설관로의 변형특성을 DB-24 차량하중 정재하에 대해서 검토하였다. 해석은 실제 시공순서와 동일하게 원지반굴착, PE과형관 설치, 뒷채움 및 차량하중 정재하(DB-24 차량하중을 기준으로 접지압은 960kN/m²) 순으로 상용 유한요소 해석프로그램인 PLAXIS 2D를 사용하여 단계별로 해석을 수행하였다. 그리고 해석경계로 수평영향거리의 굴착 깊이의 2배, 수직영향거리는 하부로 2D만큼 충분히 확보하기 위해서 해석영역에 대한 경계조건으로 측면은 수직방향만의 변위를 허용하였고, 하단은 수직, 수평의 변위를 고정시키는 고정단으로 경계조건을 결정하였다(그림 8).

4.2 구성모델과 매개변수

본 연구에서 적용된 PE관 및 지반물성치는 표 5 및 6과 같다. 도로단면의 물성값들은 A-1급 도로포장아래 시공되고 있는 대표적 재료값들을 입력물성값으로 사용하였다. 뒷



그림 6. 시공장면(좌측 : 아스팔트 포장, 가운데 : 재하차량, 우측 : 하중재하)

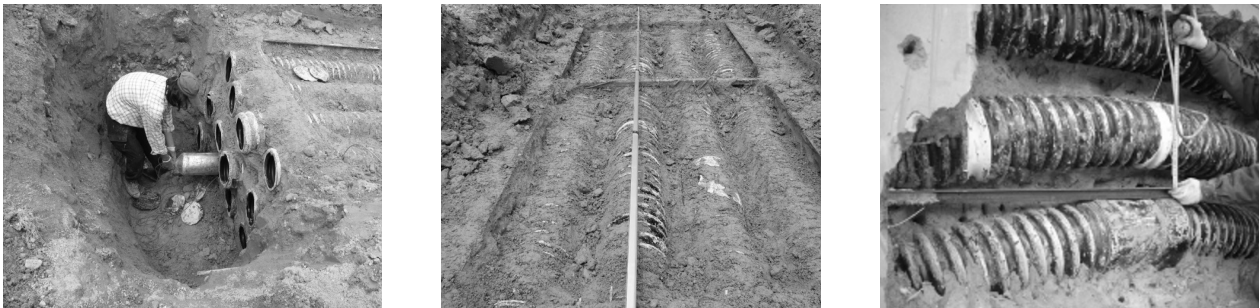


그림 7. 굴착(좌측 : 도통시험, 가운데 :수평변위 측정, 우측 : 수직변위 측정)

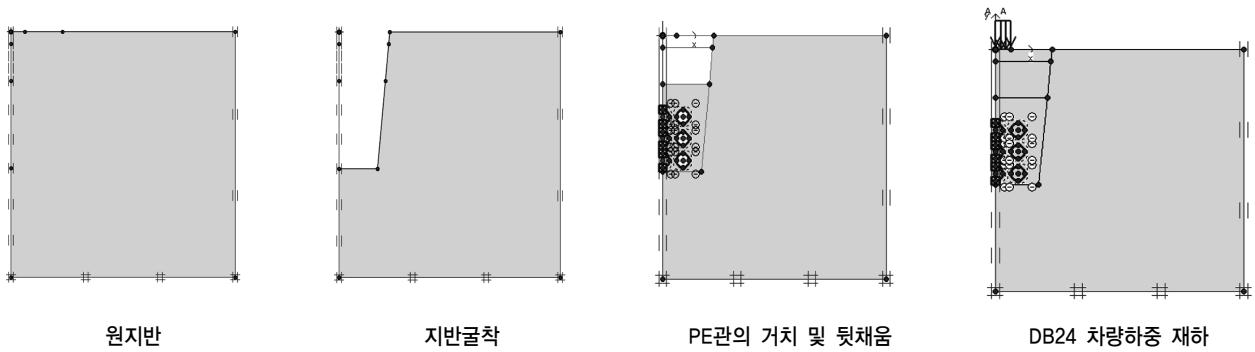


그림 8. 2-D FEM 단계별 해석과정

표 5. 관 물성치

중량 (kN/m)	축강성 (EA)(kN)	휨강성(EI) (kN·m ²)	포아송비	내경(mm)	외경(mm)
0.037	15173.9	102.04	0.4	200	360

표 6. 해석 적용 지반의 물성치

구분	아스팔트	쇄석	원토	모래	유동화 되메움재
습윤단위중량(kN/m ³)	23	22.5	19	20	18.3
탄성계수(kN/m ²)	2×10 ⁶	2.5×10 ⁵	2×10 ⁴	2×10 ⁴	2.83×10 ⁴
포아송비	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
점착력(kN/m ²)	10	1	15	5	101
내부마찰각(degree)	35	35	35	35	-

채움재의 점착력은 일축압축강도의 1/2인 비배수 전단강도를, 탄성계수는 일축압축강도 시험으로 구한 초기 탄성계수를 사용하였으며 습윤 단위중량은 제작한 몰드의 부피와 무게를 측정하여 산정하였다. 이때 원지반, 급결성 유동화 뒷채움재, 아스팔트, 모래, 쇄석층은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며 매설관은 탄성체로 모델링하였다.

5. 결과 분석

5.1 하중재하시 관로에 작용하는 토압특성 검토

그림 9는 실증실험시 뒷채움재의 종류에 따라서 지중관

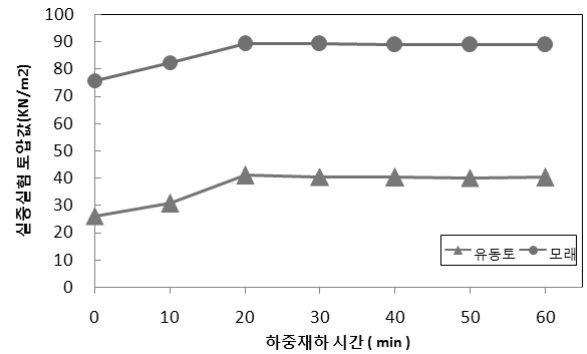


그림 9. 하중재하 단계별 토압 비교(실증실험)

로에 설치된 토압계를 이용하여 측정한 연직토압을 나타낸 것으로, 모래 구간은 차량하중 재하 전후 75.7~89.2kN/m², 유동성 뒷채움재 구간은 26.2~40.8kN/m²의 범위 값이 측정되었다. 뒷채움 재료별 토압을 비교한 결과, 차량하중 재하 전 토압은 유동성 뒷채움재내 PE파형관이 받는 토압이 모래 구간에 비해 약 34.5% 수준인 것으로 나타났고, 차량하중 재하 후 토압변화량은 유동성 뒷채움재와 모래가 모두 약 13.5~14.7kN/m²로 유사하게 나타났다. 이는 모래구간의 경우는 관로 상부에 모래를 포설시 수행하는 기계다짐으로 인한 다짐에너지가 관로에 누적되어 높은 초기 토압을 나타냈으나, 유동성 뒷채움재의 경우는 자기강도발현 및 유동 특성이 우수하여 다짐작업을 생략함으로써 낮은 초기 토압을 나타낸 것으로 판단된다. 하중재하 시간에 따른 토압 변화거동은 재하 후 초기에 약 13.5~14.7kN/m² 증가하고 약 20분 이후부터 일정한 값을 나타냈다.

표 7. 관로에 가해지는 수직토압 비교

하중단계	이론 값(Prism Load)(kN/m ²)		수치해석값(kN/m ²)		실증실험값(kN/m ²)	
	모래	유동성 뒷채움재	모래	유동성 뒷채움재	모래	유동성 뒷채움재
차량하중 재하 전 토압	26.1	25.4	11.0	9.8	75.7	26.2
차량하중 재하 후 토압	38.6	37.9	32.4	27.4	89.2	40.9
토압변화량	12.5	12.5	21.4	19.6	13.5	14.7

표 7은 지하매설관에 작용하는 토압을 고전이론, 수치해석 및 실증실험 세 가지 방법으로 산정하고 그 결과를 비교하였다. 이론 토압값은 Prism Load 및 차량 확산공식을 사용하여 산정하였고, 수치해석은 2D 유한요소해석법을 사용하였다. 차량하중 재하전 토압은 모래의 경우 이론 및 수치해석의 토압값이 실증실험값에 대해서 약 14~34%로 작게 나타났고, 유동성 뒷채움재의 경우 이론과 실증실험 값은 25.4, 26.2kN/m²으로 유사하게 나타난 반면, 수치해석 값은 9.8kN/m²로 실증실험 값에 비해서 약 37%로 작은 값을 나타냈다. 차량하중 재하시 토압변화량은 이론과 실증값의 경우 뒷채움재의 종류에 상관없이 12.5~14.7kN/m² 정도로 비교적 유사한 결과를 보였으나, 수치해석의 경우 19.6~21.4kN/m²으로 실증실험값에 비해서 약 30~70% 큰 값을 나타냈다.

5.2 하중 재하시 관로의 변형 특성 검토

그림 10은 실증실험시 지중매설관로의 수직, 수평변형을 차량하중 재하부터 시간에 따른 계측 값을 나타낸다. 차량하중 재하 후 유동성 뒷채움재의 경우 모래 구간에 비해 수직변형량은 약 14.3% 수준으로 나타났으며, 수평변형량은 약 75.0% 수준인 것으로 나타났다. 이는 유동성 뒷채움재가 고화되어 관로주위의 강성을 증가시켜(박재헌 등, 2004) 모래에 비해서 상대적으로 관로의 변형이 작게 나타난 것으로 판단되고, 수직변형에 비해서 수평변형이 큰 것은 관로주변에 발생하는 수동토압 상승 및 아칭효과(Mower, 2001)에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 모래의 경우는 하중재하 후 시간의 경과에 따라서 관로의 변형값이 수렴하지 않고 계속 증가하는 경향이 유동성 뒷채움재에 비해서 크게 나타났다.

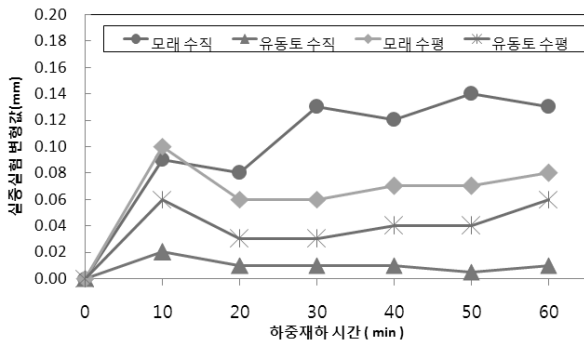


그림 10. 하중재하 후 변형값 비교(실증실험)

표 8. 차량하중 재하시 관로의 변형량 비교

	이론값(Iowa공식)(mm)		수치해석값(mm)		실증실험값(mm)	
	모래	유동성 뒷채움재	모래	유동토	모래	유동성 뒷채움재
관변형량	1.08	1.05	0.04	0.024	0.14	0.021

이는 유동성 뒷채움재의 경우 자기 수평성이 뛰어나 균질한 뒷채움이 가능한 반면 모래의 경우 다짐시 관로 사이 및 하부 다짐이 곤란하여 균질한 다짐이 이루어지지 못한 때문으로 판단된다.

표 8은 지하매설관의 변형량을 이론식, 수치해석 및 실증실험 방법을 이용하여 산정한 결과를 나타내고 있다. 이론식은 prism load와 확산공식으로 구한 토압을 Iowa공식을 이용하여 관의 변형량을 산정하였다. 검토결과 차량하중 재하 후 관의 변형량은 모래의 경우는 이론값이 실증실험값보다 약 7.7배 크게 나타났으며, 유동성 뒷채움재의 경우는 이론값이 실증실험값보다 약 52.9배 크게 나타났다. 이는 이론값이 실제 관로 주위에 발생하는 아칭효과 및 측방수동토압에 의한 강성증가 효과 등을 고려하지 못할 뿐만 아니라, 유동성 뒷채움재의 경우 양생과정에서 콘크리트와 같이 고결화작용이 발생함에 따라서 일반적인 흙의 거동과 달리 훨씬 보수적인 결과를 나타내기 때문이다. 반면, 수치해석을 수행한 결과, 모래와 유동성 뒷채움재 구간의 관로 변형은 각각 0.04, 0.024mm으로 모래의 경우는 실증실험 값에 비해서 약 28.5% 수준으로 작게 나타났고, 유동성 뒷채움재의 경우는 유사한 결과를 나타냈다.

5.3 유동성 뒷채움재 부력에 의한 관로 처짐 검토

그림 11과 같이 지중전력관로는 일반관로와 달리 관로 시공 후 전력선이 도통해야하므로 관로자체의 파괴 외에도 파형관의 길이방향의 굴곡정도에 대한 기준을 만족하는 것이 매우 중요한데, 순차적으로 층다짐을 수행하는 모래에 비해서 배치플랜트를 이용하여 일괄 타설하는 유동성 뒷채움재의 경우가 부력에 의한 변형 가능성이 크므로 부력방지를 위한 검토가 중요하다.

그림 12는 실증실험시 유동성 뒷채움재를 타설 중 부력에 의해서 두 번째 단에 수평으로 배치된 4개의 관로에 대한 처짐정도를 길이별로 나타낸 것으로 간격재의 이격 거리가 180cm로 간격재의 중간지점인 90cm 지점에서 최대 변위가 발생하였다. 파형관들의 변형을 파형관 길이방향으로 측정된 결과 처짐이 약 7~10mm로 유사한 결과를 나타냈고, 이 수치는 한전 관로최소곡률반경 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 2기의 앵커(인발 지지력 : 23.5kN)를 설치하여 관로에 발생하는 최대부력 10.4kN을 억제하고,



그림 11. 부력에 의한 관로 변형(좌측 : 관로변형 정면 도통시험, 우측 : 관로변형 측면)

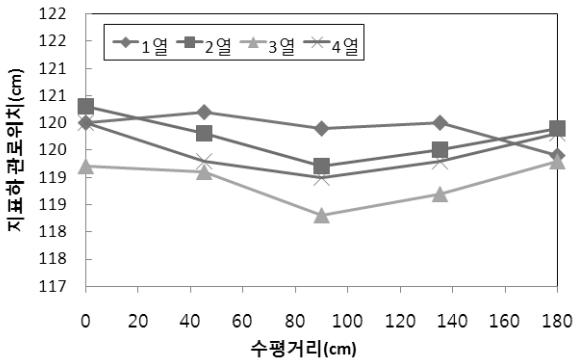


그림 12. 시공시 부력에 의한 관로 변형 (실증실험)

관로최소곡률 반경 기준을 만족하도록 4차례의 토조실험을 통해서 산정된 간격재의 최적 이격거리 1.8m를 적용한 때문이다(한국전력, 2006).

6. 결 론

본 연구는 선행 개발된 지하전력구조물 유동성 뒷채움재를 적용한 지중관로의 변형특성을 검토하기 위해서 A-1급 포장도로를 시공하여 실증실험을 수행하였다. 동일한 조건에서 뒷채움재 종류(모래, 유동성 뒷채움재)에 따른 관로에 작용하는 토압 및 변형특성을 실증실험, 이론 및 유한요소 해석법 등을 이용하여 비교 검토 하였으며, 그 결과를 요약 하면 다음과 같다.

- (1) 유동성 뒷채움재와 모래를 뒷채움재로 사용한 경우의 지중관로에 가해지는 토압은 유동성 뒷채움재가 모래에 비해서 약 34.8% 수준으로 작은 것으로 나타났다. 이는 유동성 뒷채움재의 경우 무다짐으로 균질하게 뒷채움이 가능하여 시공시 기계다짐에너지 누적에 의해서 관로에 작용하는 토압이 상승하는 모래구간에 비해서 시공중 관로의 파손등 위험을 줄일 수 있는 것으로 판단된다.
- (2) 실증실험결과 뒷채움재의 종류에 따라서 관로의 변형은 유동성 뒷채움재의 경우 모래 구간에 비해 수직변형량은 약 14.3% 수준으로 나타났으며, 수평변형량은 약

75.0% 수준인 것으로 나타났다. 이는 유동성 뒷채움재가 고화되어 관로주위의 강성을 상대적으로 증가시켜 모래보다 작은 관로변형을 나타낸 것으로 판단된다. 이는 지중전력선의 안정성이 관로의 변형정도로 평가하는 것을 감안할 때 관로의 안정성 측면에서 유동성 뒷채움재가 모래보다 우수함을 나타내는 결과로 판단된다.

- (3) 하중재하시 관로에 가해지는 토압 및 관로의 변형을 범용으로 사용하는 이론식 및 2-D 유한요소해석법으로 해석하여 실증실험결과와 비교한 결과 시공중 토압 및 관로의 변형 등에서 큰 차이를 보였다. 이는 기존의 이론식이나 수치해석이 시공방법 및 새로운 재료의 특성을 제대로 반영하지 못한 때문으로 유동성 뒷채움재의 경우 고화 작용으로 인해서 강성이 증가하여 일반 토사와는 다른 역학적 거동을 나타내는데 반해 기존의 해석방법은 이를 고려하지 못한 때문으로 판단된다.
- (4) 유동성 뒷채움재 타설시 관로의 길이방향 처짐정도를 실증실험을 통해서 확인한 결과 1.8m 간격에서 최대 처짐 10mm로 관로의 최소곡률반경 기준을 만족하였다. 지중전력선은 일반관로와 달리 관로 시공 후 전력선이 도통해야하므로 관로자체의 파괴 외에도 파형관의 길이방향의 굴곡정도에 대한 기준을 만족하는 것이 필수인데, 유동성 뒷채움재의 경우 시공중 발생하는 부력 때문에 처짐 가능성이 크므로 이에 대한 세심한 검토가 중요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업인 “굴착 잔토를 재활용한 급결성 콘크리트 개발”과제로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박재현, 이관호, 조재운, 김석남 (2004), 현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형특성, *한국지반공학회논문집*, Vol. 20, No. 3, pp. 129~139.
2. 이관호, 박재현 (2006), 파형강관을 이용한 지하매설물용 뒤채움재 설계 및 시공성 평가, *한국도로학회 논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 63~74.
3. 이대수, 상현규, 김경열 (2002), 차량하중을 받는 지중연성관의 거동특성, *한국지반공학회논문집*, Vol. 18, No. 4, pp. 65~73.
4. 이이환 외 13명 (1986), *지중관자체 적정규격 제정을 위한 기술용역*, 한국전력기술주식회사, KOPEC/86P-001, pp. 111~

- 174.
5. 조성수 (1999), *지중배전 설계편람*, TM.96EJ30.I1999.102, 한국전력공사 전력연구원, pp. 142~154.
 6. 조재운, 이관호, 이인모 (2000), 유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒤택움재 연구, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 16, No. 4, pp. 17~30.
 7. 천선호, 정상섭, 이대수, 김대홍 (2006), 굴착 잔토를 재활용한 지중전력구조물 뒤택움재의 역학적 특성, *대한토목공학회 논문집*, Vol. 26, No. 5, pp. 303~312.
 8. 한국전력공사 전력연구원 (2006), *지중전력구조물 뒤택움용 급결콘크리트 개발*, 산자부과제 최종보고서, pp. 28~71.
 9. Jakardhanam, R., Burns, F. and Peindl, R. D. (1992), Mix Design for Flowable Fly-ash Backfill Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 252~262.
 10. Moser, A.P. (2001), *Buried Pipe Design 2nd Edition*, McGraw-Hill, New York, pp. 9~29.
 11. Tarun, R. K., Shiw, S. S. and Bruce, W. R. (2001), Performance and Leaching Assessment of Flowable Slurry, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 127, No. 4, pp 359~368.
 12. Wayne, S.A. (1994), Controlled Low Strength Materials (CLSM), *ACI 229R-94*, pp. 2~3.

(접수일: 2009. 6. 11 심사일: 2009. 7. 8 심사완료일: 2009. 10. 14)