

차량하중을 받는 지중연성관의 거동특성

Behavior of Underground Flexible Pipes Subject to Vehicle Load

이 대 수^{*1} Lee, Dae-Soo
상 현 규^{*2} Sang, Hyun-Kyu
김 경 열^{*3} Kim, Kyoung-Yul

Abstract

Underground flexible pipes for electric cables are subject to external loads and surrounding soil pressure. Particularly, strain of flexible pipes is of great concern in terms of safety and maintenance for electric cables. In this paper, stress and strain of flexible pipes with various depth are compared using traditional formula, FEM analysis and model soil box test. The results show that theoretical values are more conservative in strain in comparison with model soil box test and FEM analysis. Considering the strain criteria - maximum 3.5%, flexible pipes can be buried at the depth of 40cm without additional soil improvement. From the result of this study, deformation formula compatible with the field condition was proposed.

요 지

본 연구에서는 지중배전선로를 건설함에 있어 전력케이블용 보호관으로 사용되고 있는 PE파형관의 매설깊이별 작용압력-변형률 특성을 분석하기 위해 전산해석 및 실내 모형토조실험을 수행하였으며, 더불어 고전이론에 의한 해석과 비교 분석하여 지중연성관이 어느 매설깊이에서 안전하고 그 때의 거동특성이 어떤 양상을 보이는지 규명하였다. 실내 모형토조실험에 사용된 토조는 현장조건을 정확히 모사하기 위해 대규모로 제작(350×220×300cm)하였으며, 토조의 크기는 전산해석값을 이용하여 벽체에 의한 응력의 반발이 없도록 치수를 결정하였다. 가압장치로는 최대 25ton까지 압력을 가할 수 있는 Actuator시스템을 이용하였다. 각 해석방법에 적용된 매설형태는 A-1급 도로포장 아래에 PE파형관이 묻히고, 임계하중으로 DB-24차량이 매설관 상단 중앙에 정차했을 때 관이 받는 작용압력-변형률 특성을 분석하였다. 해석결과, KS-C8455에 명시되어 있는 지중연성관의 허용변형률 기준인 3.5%에 만족하는 매설깊이는 약 40cm 이상인 것으로 판명되었고, 실내 모형토조실험 결과값에 대한 회귀분석을 통해 우리나라 지중배전선로의 현장조건에 잘 적용될 수 있는 지중연성관의 매설깊이에 따른 변형률 상관공식을 제안하였다.

Keywords : Numerical analysis, Soil box test, Stress-strain diagram, Underground flexible pipe

*1 정회원, 한전 전력연구원 책임연구원 (Member, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute, dslee@kepri.re.kr)

*2 정회원, 한전 전력연구원 위촉연구원 (Member, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute)

*3 정회원, 한전 전력연구원 선임보연구원 (Member, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute)

1. 서론

전력공급신뢰도 향상과 도시미관 저해요인 해소 등 환경개선 측면에서 가공배전선로를 철거하고 대신 지중배전선로로 전력을 공급하는 이른바 지중화 사업이 진행되고 있는데, 최근에는 그 영역이 기존의 도심지 중심으로부터 벗어나 신도시 및 신규공단 등 점차 다양한 지역으로 활발히 확대되고 있다. 그러나, 우리나라 가공선로의 건설비용에 대한 지중선로의 건설비용이 5~7 배나 소요되고 있어 전력사업이 경쟁시대로 변모하고 있는 현 상황에서 공사비의 절감없이는 지중화 사업의 추진이 곤란할 것으로 예상된다. 특히 외국에 비하여 지중연성관의 매설기준이 깊기 때문에 굴착공사비가 과다하게 소요되고 있는 실정이므로 지중에 연성관을 매설할 때 과연 어느 깊이까지 안전하고 그 때의 거동 특성이 어떤 양상을 보이는지 규명하여 보다 합리적인 지중연성관 매설기준과 시공방안을 제시하여 지중화 사업의 경제성을 확보해야 할 필요성이 대두되고 있다.

국내의 경우 지중배전관로에 대한 작용압력-변형률 특성을 실규모 실험으로 규명한 경우는 매우 드물어, 차량하중하에서의 거동특성이 불명확한 실정이다. 따라서, 배전관로의 공사실무자들은 배전관로의 변형률 산정시 Spangler의 Iowa공식에 안전율을 임의로 가미하여 사용하는 바, 설계의 적정성 여부가 늘 논란이 되어 왔다. 일본에서는 전력회사의 수요에 맞추어 실규모 실증 시험과 관련연구가 시도되었으나, 차량하중 및 관자재의 상이성 등으로 말미암아 연구결과를 국내에 직접 적용하기에는 상당한 무리가 따를 것으로 보인다.

지금까지의 연구결과를 살펴보면 지중연성관의 변형은 토압과 윤압에 의해 변형을 일으키는 것으로 밝혀졌다. 또한, 지중연성관을 다단 매설하였을 경우 차량하중으로 인한 관의 변형과 작용압력(토압+윤압)은 상단 중앙관에서 가장 크게 나타나는 것으로 보고되고 있다(片岡哲之, 1988; 이시용, 1993; 이인환 외, 1986).

본 연구에서는 지금까지의 연구결과를 기초로 하여 고전이론, 전산해석 및 열 영향이 반영된 실내 모형토조 실험을 통해 차량하중하에서의 지중 연성관의 작용압력-변형률 특성과 안전도 등에 대한 평가를 수행하였다. 안전도 판단기준은 해석에 사용된 PE과형관이 연성과 피를 보이는 연성관이고, 연성관 특성상 하중재하시 관의 변형이 안전도 판단의 기준이 되기 때문에 KS C8455에 명시되어 있는 관의 허용변형률 3.5%를 안전

도 판단기준으로 채택하였다(김동수, 1990).

각 해석별 장단점은 고전이론식은 간편하지만 다양한 지반조건과 전선관에서 발생하는 열 특성을 반영할 수 없다는 단점이 있고, 전산해석은 간편하고 다양한 현장조건을 반영할 수 있지만 열 특성을 반영할 수 없다는 단점이 있으며, 실내토조실험은 다양한 조건과 열 특성을 반영할 수 있지만 시간이 많이 걸린다는 단점을 가지고 있다.

각 해석에 사용된 매설형태는 현행 도로밑 허용매설 깊이(지표면에서 관상단까지의 깊이) 기준인 120cm를 기준으로 더 얇은 매설깊이, 즉 천층매설에 대한 안정성을 평가하였고, 관 위에 포장되는 도로는 A-1급 아스팔트 포장도로를 적용하였다. 해석 및 실험에 사용된 지중연성관은 현재 배전용 관으로 널리 사용되고 있는 내경 175mm PE과형관을 사용하였고, 되메움재는 모래를 사용해서 다짐도 85%로 되메움하는 조건을 적용하였다.

2. 고전 이론에 의한 해석

지중연성관의 변형에 영향을 주는 인자로는 토압과 윤압을 들 수 있는데 토압과 윤압을 계산하는 공식은 여러 가지가 있지만, 국외 및 국내에서 그 동안 수행되었던 선행 연구결과에 의하면 토압에는 수직공식, 윤압에는 확산공식, 그리고 두 하중인자에 의한 매설관의 변형량 계산에는 Spangler의 Iowa공식이 지중연성관 해석에 적절하다고 보고되었다(片岡哲之, 1988; 이시용, 1993; 이인환 외, 1986). 이 식들을 해석에 사용하면 간편하게 지중연성관의 변형량을 계산해 낼 수 있지만, 관 내부의 전력케이블에서 발생하는 열(약 65°C)이 관에 미치는 영향을 해석할 수 없다는 단점이 있다.

2.1 토압 (수직 공식)

그림 1에서와 같이 아스팔트 포장층의 단위중량은 $2.3t/m^3$, 두께는 80cm로 계산하고, 되메움재인 모래의 최대단위중량을 $1.8t/m^3$ 로 보고 다짐도 85%시의 단위중량을 $1.615t/m^3$ 로 가정하여 다음 식에 적용하였다.

$$p_1 = \gamma_t \cdot h \quad (1)$$

여기서, p_1 = 연직토압 (kg/cm^2),
 γ_t = 단위중량(kg/cm^3),
 h = 토피 (cm)

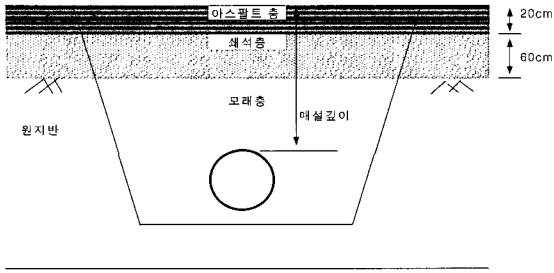


그림 1. 포장 단면도

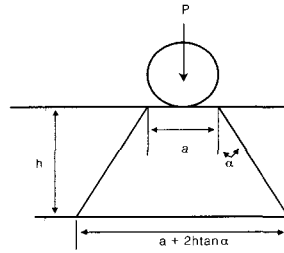


그림 2. 확산 공식 적용도 (측면)

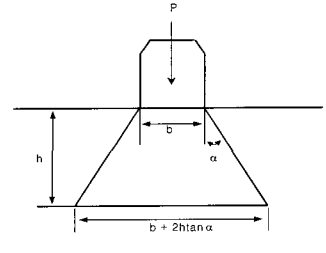


그림 3. 확산 공식 적용도 (정면)

2.2 윤압 (확산 공식)

$$p_2 = \frac{P(1+im)}{(a+2htan\alpha)(b+2htan\alpha)} \quad (2)$$

여기서, p_2 = 윤압 (kg/cm²)

P = 9600kg (DB-24 후륜하중)

a = 20cm (집지길이)

b = 50cm (집지폭)

$h \leq 0.3m \rightarrow im$ (충격계수) = 0.3,

$h \leq 0.6m \rightarrow im$ = 0.2

$h \leq 0.9m \rightarrow im$ = 0.1

$h \geq 1.0m \rightarrow im$ = 0

α = 45° (분산각), h = 토피 (cm)

2.3 매설관의 변형량 (Spangler의 Iowa공식)

$$\Delta x = D_1 \times \frac{K \cdot W_c \cdot r^3}{EI + 0.061 E' \cdot r^3} \quad (3)$$

여기서,

Δx = 관의 변형량(cm),

D_1 = 1.5(변형지체계수),

K = 0.108(지지각에 따른 계수),

r = 11.5cm (관의 반경),

D = 23cm (관의 외경), d = 17.5cm(관의 내경),

W_c = (토압+윤압)× D (연직하중, kg/cm)

E = 7000 kg/cm²(관의 탄성계수)

I = $\frac{t^3}{12}$ = 0.003573(관의 단면2차 모멘트)

t = 0.35cm(관의 두께)

E' = 70kg/cm²(흙의 반력계수)

2.4 해석결과 및 분석

그림 4~5는 지중배전공사에 많이 사용되고 있는 내경 175mm, 외경 230mm, 두께 3.5mm의 PE파형관을 다짐도 85%의 모래로 되메움하고, 그 위에 A-1급 포장도로를 시공했을 때, 매설깊이 0~2m 사이에서의 관이 받는 압력과 변형률을 고전이론식에 의해 계산한 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 보듯 토압은 매설깊이가 깊어질수록 증가하고 윤압은 감소하는 경향을 보이며, 이 두 힘의 합력은 100~120cm 깊이에서 최소값을 나타내고 있다. 변형률은 매설깊이 40cm까지 급격한 감소를 보이다가 이후 점차 완만해지는 경향을 보이고 있다.

이론식의 계산결과에 의하면 KS C8455에 명시되어

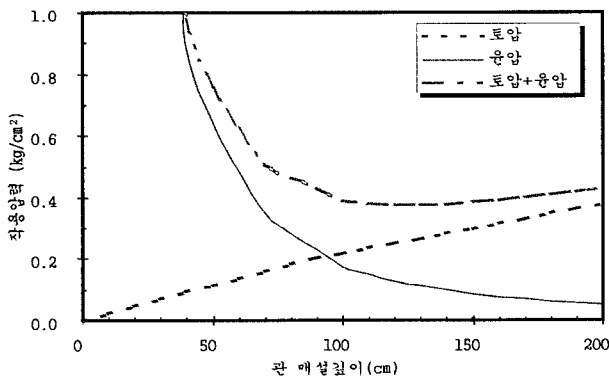


그림 4. 매설깊이별 토압-윤압

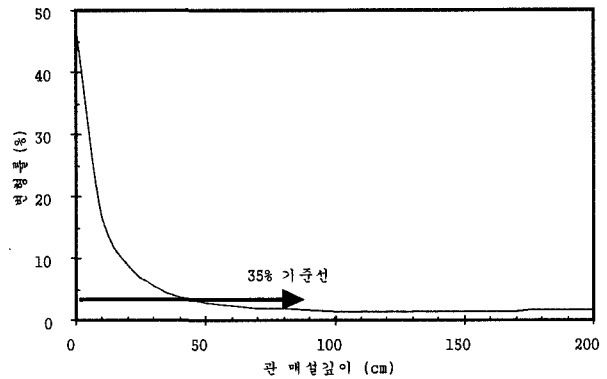


그림 5. 매설깊이별 변형률

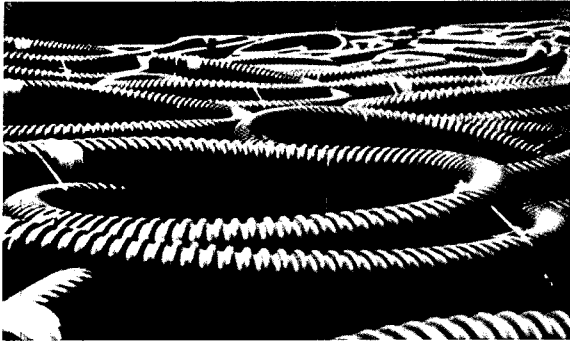


그림 6. PE파형관

있는 관의 허용 변형률 기준인 3.5%값에 만족하는 매설 깊이는 약 44cm 이상인 것으로 계산되었다.

3. 전산 해석

복잡한 관매설 조건을 전산해석상에서 재현하기 위해 2차원 FEM 프로그램인 AFIMEX를 이용하여 이론식 및 실내실험 조건과 같은 단일관 시공에 대해 관의 역학적 거동을 분석하였다.

본 해석에 사용된 2차원 AFIMEX프로그램은 지반변형해석(선형, 비선형, 탄소성)과 진동해석 및 압밀해석까지도 가능한 범용해석 상용 프로그램이다.

3.1 입력 자료

3.1.1 관 물성치

지중 연성관의 형상은 그림 6과 같으며 일반적인 규격과 물성치는 표 1 및 2와 같다. 전산해석에 사용되는 관의 물성치는 탄성계수, 단면2차모멘트, 단면적 등을 들 수 있으며 이들 요소는 보(beam)의 성질을 나타내는데 주로 쓰인다.

표 1. PE파형관 규격 (한전 구매시방서 기준)

외 경 (mm)	230
내 경 (mm)	175
최소두께 (mm)	3.5 이상
인장응력 (kg/cm ²)	225 이상
압축 하중 (kg)	273 이상

표 2. 관 물성치

탄성계수 (t/m ²)	단면2차 모멘트 (m ⁴)	단면적 (m ²)	단위중량 (t/m ²)
70,000	4×10 ⁻⁹	0.0035	0.95

표 3. 포장도로 입력 물성치

구 분	표 층	중간층	기 층	보조기층	모 래	원지반
층두께 (m)	0.05	0.15	0.2	0.4		
탄성계수 (t/m ²)	210,000	190,000	30,000	20,000	2,000	1250
포아손비	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.45
점착력 (t/m ²)	1	0.1	0.1	0.1	0	5.0
내부 마찰각 (deg)	35	35	35	35	35	25
단위중량 (t/m ³)	2.3	2.3	2.3	2.2	1.615	1.8

3.1.2 도로 물성치

전산해석에 사용된 도로단면의 물성치들은 현재 주요 간선도로(폭20m 이상) 및 이에 준하는 도로의 아스팔트 포장단면(A-1급) 아래에 시공되고 있는 대표적 재료값들을 입력물성값으로 사용하였다(표 3). 원지반은 조밀한 점토질 흙을 대상으로 추정하였으며, 도로포장재 및 원지반은 다짐조건을 고려하지 않았고, 되메우기 재료로는 지중배전 설계편람(조성수, 1999)에 기술되어 있는 모래 또는 양질의 토사에 대한 다짐도 85%값을 입력하였다.

3.1.3 하중

원지반 굴착 후 관로포설을 끝마치고 되메우기와 함께 도로를 포장한 상태에서의 관의 거동 특성을 분석하기 위해 적용한 차량하중은 DB-24 차량하중을 기준으로 삼았으며, 뒷축 한 바퀴에 걸리는 후륜하중은 최대 9.6ton, 접지면적 0.1m²(0.5m×0.2m), 하중의 작용조건은 strip load로 하였다(그림 7).

3.2 해석 조건 및 방법

전산해석에 적용된 단면은 차량 접지폭의 여섯배인 3.0m정도로 좌우경계를 취했으며 관로는 보(beam)로 모델화하였다. 좌, 우측의 경계는 수평방향 이동을 고정시키는 연직로울러로, 하단은 좌, 우방향 모두를 고정시

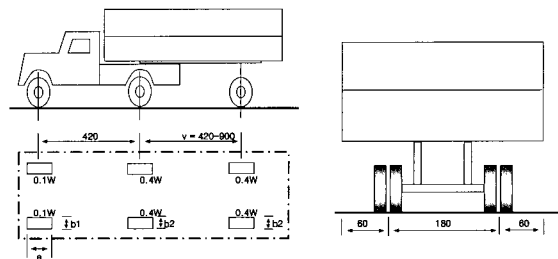


그림 7. DB-24 차량

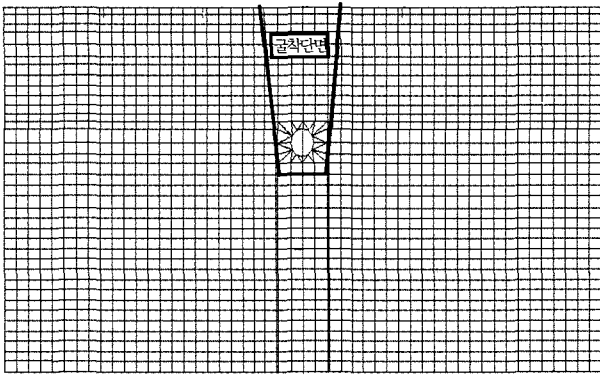


그림 8. 모델도 (매설깊이 100cm)

키는 고정단으로 조건을 주었다.

지반모델은 선형탄성모델을, 격자는 사각형격자를 주로 사용하였으며 시공순서별 거동을 해석하기 위하여 총 4단계의 단계별 해석(초기상태, 굴착, 관로포설 및 도로포장, 차량하중 재하)을 실시하였다.

해석 매설깊이는 20~120cm까지 매 10cm 깊이로 해석을 실시하였고, 매설관의 작용압력과 연직변형률값을 비교대상으로 취했다(그림 8).

3.3 전산해석 결과 및 분석

그림 9~10의 전산해석 결과를 살펴보면, 작용압력

은 매설깊이 110cm정도까지 감소하다가 다시 토압의 영향으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 연직변형률은 매설깊이가 깊어짐에 따라 감소하다 매설깊이 120cm에서 최소값을 보여주고 있다.

한편, 고전이론식 해석 결과와 비교하면, 작용압력은 매설깊이 20cm 구간을 제외한 전 구역에서 전산해석이 이론식보다 큰 경향을 보여주고 있으며, 연직변형률의 경우는 전산해석이 이론식보다 작은 경향을 나타내고 있다. 매설깊이 60~120cm 구간의 값은 전산해석과 이론식이 대개 비슷한 값을 보이는 반면 20~60cm 구간에서 이론식은 급격히 변형률이 증가하는데 비해 전산해석값은 완만한 증가를 보여 두 값 사이에 편차가 심해지는 것을 알 수 있다.

그림 11~12는 해석사례 중 매설깊이 100cm에서의 변형도를 나타낸 것이다. 그림 12의 확대된 변형도를 보면 도로 위에 차량하중이 가해질 때 관은 전체적으로 아래로 침하하면서 연직방향으로 찌그러지는 형상을 보이고 있는데 이는 이론식에 의해 계산된 변형은 관하단 지반을 강성으로 보고 관자체의 변형만을 계산한데 비해 전산해석은 실제적인 거동양상인 상대 변위를 측정함으로써 변형률값이 이론식보다 적게 나온 것으로 판단된다. 아울러 도로표층 중앙점의 침하량은 1.1cm로 나타났다.

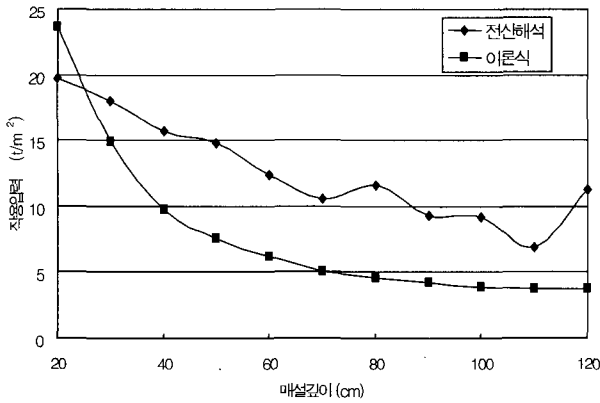


그림 9. 매설깊이별 작용압력

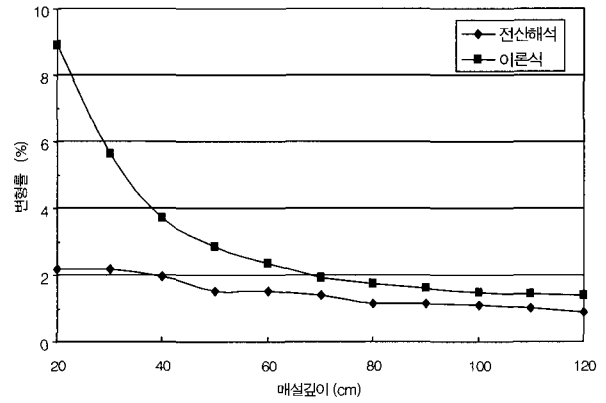


그림 10. 매설깊이별 연직변형

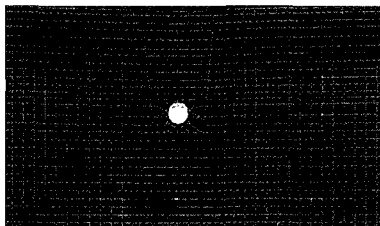


그림 11. 변형도

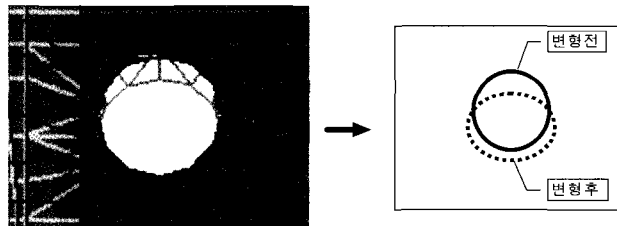


그림 12. 확대된 변형도

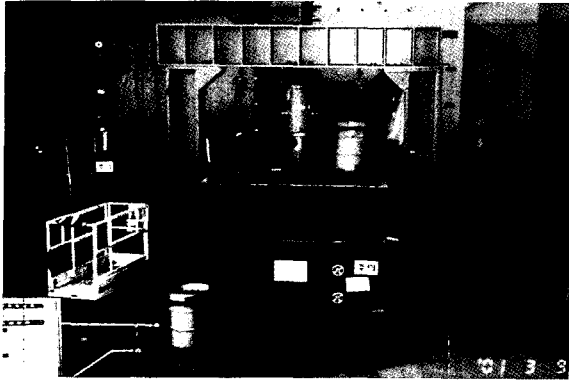


그림 13. 토조 및 가진기 전경

4. 실내 토조 실험

실내 실험에 사용된 토조의 크기는 전산해석값을 이용하여 벽체에 의한 응력의 반발이 없도록 치수를 결정하였으며, A-1급 포장도로를 기준으로 다양한 매설깊이 (20, 30, 40, 50, 80, 100, 120cm)에 대해 실험을 실시하였고, 시험에 사용된 관은 배전공사에 일반적으로 사용되고 있는 내경 175mm PE파형관을 사용하였다. 또한 배전케이블에서 발생하는 열에 의한 지중연성관의 재료특성을 분석하기 위해 열 고려 여부에 따라 각각에 대해 3회 이상의 실험을 수행하여 평균한 값을 대표값

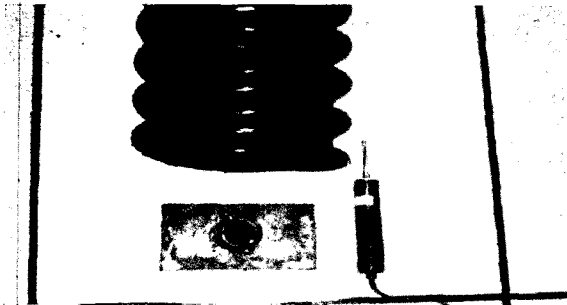


그림 14. 변위계 설치 전

으로 취했다.

4.1 실내 토조실험 장치

실내에서 실제 현장상황과 유사한 형태의 조건을 주기 위해 그림 13과 같이 350×220×300cm크기의 토조를 강판으로 제작하여 국도 및 주요 간선도로에 시공하는 포장단면인 A-1급 포장도로를 기준으로 매설깊이별(20, 30, 40, 50, 80, 100, 120cm) 작용압력-변형률 측정실험을 실시하였다.

4.2 실험 방법

실내 토조실험은 아래와 같은 순서로 실험을 실시하였다.

- (1) 토조내부에 30cm씩 모래를 채우고 다짐도 85% 로 층다짐을 실시한 다음, 매설깊이별로 PE파형관을 설치한다.
- (2) 관의 변형을 측정하기 위해 변위계(Range:50mm)를 설치지그를 이용하여 관의 내벽에 연직으로 설치하고, 토압계(Range:500kPa)를 관의 외측 상단에 설치한다(그림 14~17).

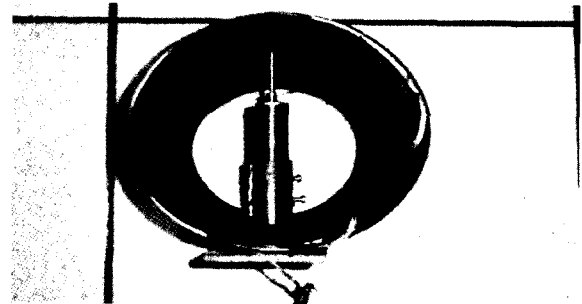


그림 15. 변위계 설치 후

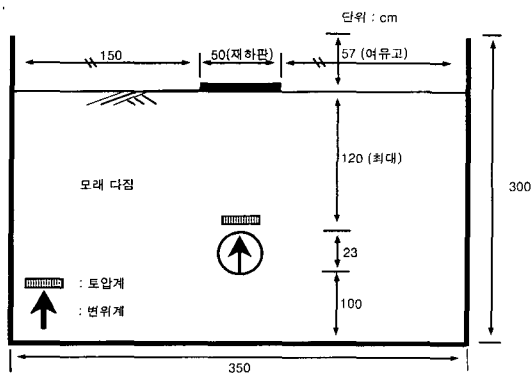


그림 16. 토조 정면도

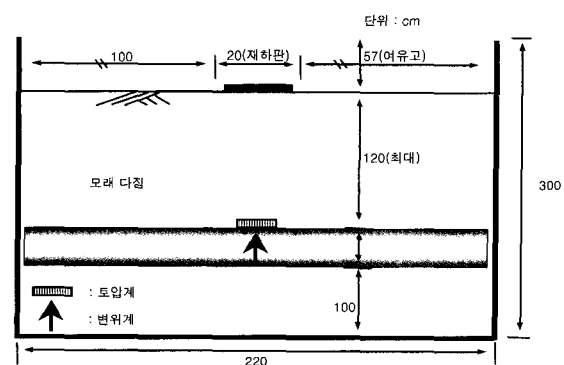


그림 17. 토조 측면도

- (3) 매설깊이별 작용압력-변형률 관계를 알아보기 위해 매설깊이를 달리하여 실험을 수행한다. 다짐도는 공히 85%로 한다.
- (4) 재하판은 DB-24를 기준으로 차량 후륜의 접지 폭과 같은 50×20cm(두께 3cm)의 강판을 이용한다.
- (5) 토조에 직접 아스팔트층을 포설하지 않고, 실규모 재하실험을 통해 계측된 아스팔트층 직하에서의 저감된 차량하중을 가진기로 정적재하한다.
- (6) 가진기는 최대 25ton까지 하중을 가할 수 있고, 컴퓨터로 하중을 통제할 수 있는 Actuator 시스템을 이용하였다.
- (7) 다짐에 사용된 다짐장비는 현장에서 많이 사용하고 있는 vibration plate 다짐기(중량 90kg)를 이용한다.
- (8) 계측에 사용된 데이터 로거는 TDS-601로 최대 1000 채널까지 연속 계측할 수 있는 장비이다.
- (9) 전력 케이블의 온도영향 고려 :
선형연구결과(片岡哲之, 1988)에 의하면 관로의 재료 특성(강성, 안정성)은 케이블에서 발생하는 열(65℃) 영향을 받는 것으로 보고되었다. 따라서, 케이블에서 발생하는 열이 매설관의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 18과 같은 Heat cable를 제작하여 관 내부에 설치한 뒤 충분한 열이 발생되도록 2일정도 열을 가한 후 실험을 실시하였다.

4.3 실내 토조 실험 결과

실내 토조실험을 통해 A-1급 포장도로 밑에 묻힌 PE 파형관이 외부하중(DB-24)을 받을 때, 열(65℃)의 유무에 따라 관상부에서의 작용압력(토압+윤압)과 최대 연직변형률을 측정하였으며 그 결과를 그림 19~20에 나

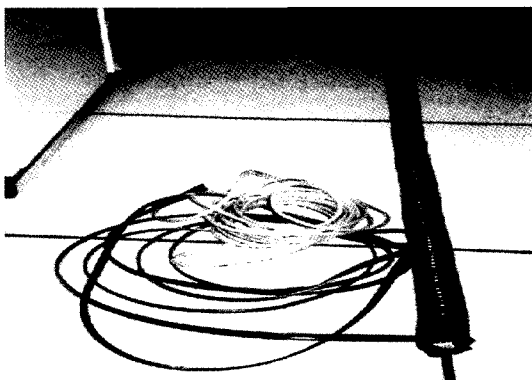


그림 18. Heat cable

타내었다.

관 상부에서 측정된 매설깊이별 작용압력(토압+윤압)의 크기는 그림 19에서 보는 바와 같이 표층에 가까울수록 큰 값을 보이다가 매설 깊이가 깊어질수록 포물선형태로 감소하는 경향을 보여 주고 있으며, 매설깊이 120cm에서 최소값을 보여 주고 있다.

매설관의 안정성을 판단하는 연직변형률의 경우는 케이블에서 발생하는 열의 유무에 따라서 매설 깊이별로 약간의 차이가 있음이 확인되었다. Thermal couple를 이용해 온도를 계측한 결과 열선에서 65℃의 열을 발생시킬 때 관내 공기 온도는 약 30~40℃, 흡과 접하는 관 외측 표면의 온도는 약 25~30℃로 나타났다. 그림 20에서 보는 바와 같이 지중연성관의 안정성이 유지될 수 있는 한계매설깊이는 케이블에서 발생하는 열을 무시하였을 경우에는 약 32cm, 케이블의 열을 고려하였을 경우에는 약 40cm이상에서 허용변형률 3.5%를 만족하는 것으로 판명되었다. 이는 지중연성관 내에 배전케이블 포설이 끝난 뒤 22.4kV의 전기를 통전하였을 때 발생하는 열이 토압, 윤압과 더불어 관로의 안정성에 영향을 주는 또 하나의 요인으로 작용하고 있음을 보여주는 것이다. 또한, 관상부에 작용하는 최대압력은 매설깊이 40cm일 때 31.5t/m²으로 측정되었다. 이는 차량접지압인 96t/m²가 하부지반으로 전달되면서 급격히 압력이 소산되어 관상부에서는 상당히 작은 압력만이 작용함을 알 수 있다.

이 실험결과를 바탕으로 지중에 묻힌 PE파형관이 외부하중(DB-24)을 받을 때 케이블에서 발생하는 열의 유무에 따라서 연직변형률을 계산할 수 있는 실험식을 매설깊이의 누승함수로 도출하였다(표 4). 이 식들은 매설깊이 120cm이하의 PE파형관 매설공사시 실무자들이 지중연성관의 변형률 및 안정성을 판단할 수 있는 유용

표 4. 연직변형률 산정식

구분	열효과 무시	열효과 고려
변형률 산정식	$Y = 717.79 X^{-1.5746}$ (R ² : 96.9%)	$Y = 2008.6 X^{-1.7456}$ (R ² : 99.7%)
비고	X : 매설깊이 (cm), Y : 연직변형률(%) ◆ 적용기준 ▶ 상부포장층 : A-1급 아스팔트포장 ▶ 상재하중 : DB-24 후륜하중 9.6ton ▶ 되메움재 : 모래(다짐도 85%) ▶ 지중관 : PE파형관 ▶ 열효과를 고려한 식을 우선 사용 (전선관의 경우) ▶ 매설깊이는 지표면에서 관상부까지의 깊이임	

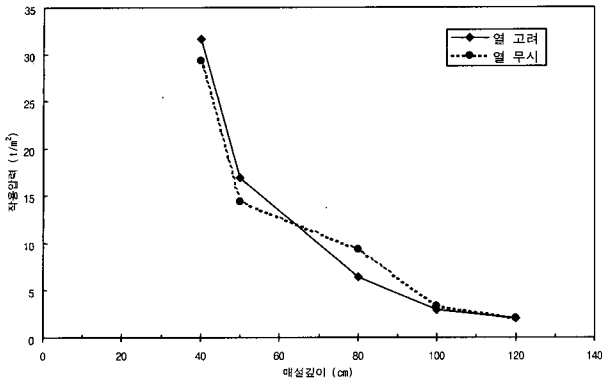


그림 19. 매설깊이별 작용압력

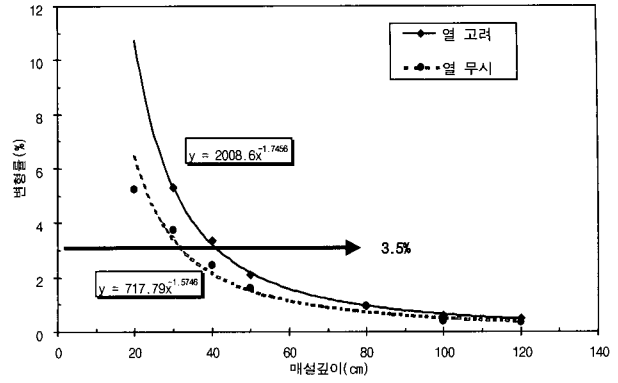


그림 20. 매설깊이별 변형률

한 자료로 활용되리라 기대된다.

참고로 현장의 시공여건을 감안하여 되메우기가 성실히 수행되지 않았을 경우(다짐도 75~80%)를 반영한 토조실험결과, PE파형관의 연직변형률은 설계기준(다짐도 85%이상)대로 시공했을 때에 비해 약 2.3~2.8배 증가하는 것으로 실험결과가 나타났고, 이는 되메우기 모래의 다짐도가 관의 안정성에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 각 해석결과의 비교

표 5는 KS C8455의 허용변형률 3.5%를 기준으로 각 해석별 한계 매설깊이를 나타낸 것이다. 한계매설깊이는 20~44cm의 범위 내에 있는데, 이는 현행 전선관(지중연성관)의 매설기준인 120cm를 고려할 때 매우 안전측의 결과를 나타내고 있다.

그림 21은 매설깊이별로 각 해석방법의 변형률을 비교한 것이다. 각 해석결과를 비교 분석해 보면 크게 두 구간으로 나누어 그 특성을 비교할 수 있는데, 우선 매설깊이 20~50cm 구간을 보면 이론값과 실내실험(열고려)값이 비교적 근사한 값을 보이는 반면 전산해석값은 변형률을 과소평가해서 신뢰도가 떨어지는 것으로 판단된다. 특히, 표 5에서 나타낸 각 해석별 한계 매설깊이가 이 구간에 분포하고 있는데 전선관의 특성인 열발산을 고려한 실내실험결과(열고려)가 가장 신뢰도가 높을 것으로 판단된다. 매설깊이 50~120cm 구간은 실내실험값과 이론값이 최대 1%의 변형률 차이를 나타내고 있어 이론값이 실내실험값에 비해 안전측 해석을 하는 것으로 판단된다.

전체적인 경향을 살펴보면 매설깊이가 깊어질수록 변형률은 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히, 이론값이

표 5. 각 해석결과 비교 (3.5% 허용변형률 기준)

구 분	이론식	실내실험 (열 고려)	실내실험 (열 무시)	전산해석
한계 매설깊이 (cm)	44	40	32	20

모든 구간에서 다른 값보다 크게 해석되었는데, 이는 다른 해석은 작용압력에 의해 관 자체가 변형을 일으키면서 관하단 지반이 같이 침하하여 상대적으로 작은 변형률을 보이는 반면, 이론값은 관하단 지반을 강성으로 보고 침하를 고려하지 않았기 때문에 관 변형률이 과대 평가되는 것으로 판단된다.

그림 22는 차량하중 재하시 관상단에서의 작용압력(토압+윤압)을 매설깊이에 따라 나타낸 것인데 모든 해석값들이 대체적으로 매설깊이가 증가할수록 작용압력은 감소하는 경향을 보이고 있고, 차량접지압 96t/m²은 지반하부로 전달되면서 소산되어 관상부에서는 차량접지압의 최소 2%에서 최대 36%의 값만이 작용하는 것으로 나타났다. 특히, 매설깊이 100~120cm구간은 이론값과 실내실험값이 비교적 근사한 값을 보이는 반면 20~100cm 구간에서는 실내실험값이 이론값에 비해 최대 33%까지 큰 값을 보이고 있다. 이를 변형률과 비교해 보면 실내실험값이 이론값에 비해 큰 작용압력을 나타내는데 반해 관의 변형률은 더 적은 것으로 계측되었다. 이는 이론값은 PE파형관의 재료적 특성만 반영하고 형상에 의한 강도 보강 특성을 반영하지 못하여 관의 강성을 과소평가한 것으로 판단된다.

6. 결 론

지금까지 이론식, 전산해석 및 실내토조실험을 통해 A-1급 포장도로 아래에 매설되는 지중연성관의 작용압

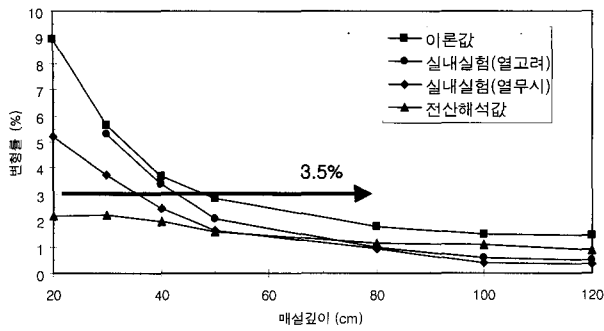


그림 21. 매설깊이별 변형률 비교

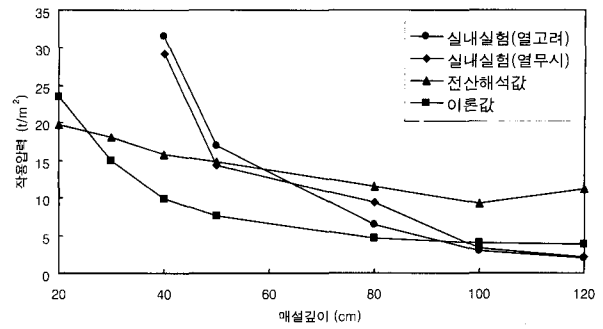


그림 22. 매설깊이별 작용압력 비교

력-변형률 관계와 한계매설깊이를 분석하였는데 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 케이블에서 발생하는 열(65℃)의 유무에 따라 지중연성관의 안정성이 유지되는 매설깊이는 열을 무시하였을 경우 약 32cm, 열을 고려하였을 경우 약 40cm 이상에서 허용변형률 3.5%를 만족하는 것으로 나타났다.
- (2) 지중연성관 상단의 작용압력분포는 표층부에 가까울수록 큰 값을 보이다가 매설심도가 깊어질수록 포물선 형태로 감소하는 경향을 보여주고 있다.
- (3) 전력케이블에서 발생하는 열에 의해 지중연성관의 변형이 더 심해지는 것을 알 수 있으며, 열이 발생되지 않을 때와 비교해 0.1~1.6%정도 더 큰 변형률을 보이는 것으로 측정되었다.
- (4) 기존의 고전이론식은 현장실무자들이 많이 사용하고 있으나, 열 영향을 반영하지 않는 식으로서 전력케이블용 방호관으로 사용되고 있는 PE과형관(지중연성관)의 변형률 산정에는 한계가 있으므로, 더 정확한 변형률을 산출할 수 있는 공식을 토조실험을 통해 매설깊이의 누승함수로 제안하였다.
- (5) 되메우기한 모래의 다짐도가 충분하지 못할 경우 (75%~80%), 설계기준(다짐도 85%이상)대로 시공했을 경우에 비해 관의 변형량이 약 2.3~2.8배로 증

가하는 것으로 보아 되메우기용 모래의 다짐도가 관의 안정성에 매우 중요하게 작용하는 것으로 판단된다.

- (6) 관의 허용변형률 3.5%를 기준으로 보았을 때 각 해석에 따른 허용 매설깊이는 이론식(44cm)>실내실험(열고려:40cm)>실내실험(열무시:32cm)>전산해석(20cm)으로 크게 나타났다.
- (7) 향후 실규모 현장실험을 통해 여러 해석값에 대한 최종보완을 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 연구과제인 “지중배전공사의 경제적 시공을 위한 신기술 개발”의 일부분으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동수(1990), “PE과형관의 구조적 안정 검토”, 전기통신연구논문.
2. 이시용(1993), “관로 포설공법의 개선연구”, 한국통신 가입자망 연구소.
3. 이이환 외 13인(1986), 지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술 용역, 한국전력기술주식회사.
4. 조성수(1999), 지중배전 설계편람, 한국전력공사 전력연구원.
5. 片岡哲之(1988), “配電地中化における 車道下埋設ケーブル防護管の 浅層埋設の 検討”, 電力中央研究所.

(접수일자 2002. 1. 11, 심사완료일 2002. 6. 20)