

차량하중을 받는 지중연성관의 거동특성 II - 실증실험을 중심으로 -

Behavior of Underground Flexible Pipes Subject to Vehicle Load (II) - Based on Field Tests -

이 대 수*¹ Lee, Dae-Soo

상 현 규*² Sang, Hyun-Kyu

김 경 열*³ Kim, Kyoung-Yul

홍 성 연*⁴ Hong, Sung-Yun

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 installation depth are compared using traditional formula, FEM analysis, model soil box test and field test. From the findings of various analyses, considering the strain criteria - maximum 3.5 %, it is suggested that flexible pipes can be buried at the depth of 80cm without additional soil improvement.

요 지

본 연구에서는 지중배전선로를 건설함에 있어 전력케이블용 보호관으로 사용되고 있는 PE파형관의 매설깊이별 작용압력-변형률 특성을 분석하기 위해 고전이론식, 전산해석, 실내 모형토조실험 및 현장실증실험을 수행하였으며, 이들 해석의 비교 분석을 통해 지중매설관의 거동에 영향을 미치는 주요인자를 밝혀내고, 더불어 현장시공시에 지중매설관의 안정성을 확보할 수 있는 매설깊이를 분석하였다. 각 해석방법에 적용된 매설형태는 A-1급 도로포장 아래 매설깊이 80cm, 100cm, 120cm지점에 PE파형관이 묻히고, 외부하중으로 DB-24차량의 후륜하중 9.6ton이 매설관 상단 중앙에 정착했을 때 관이 받는 작용압력-변형률 특성을 분석하였다. 여러 가지 해석결과, KS-C8455에 명시되어 있는 지중연성관의 허용변형률 기준인 3.5%에 만족하는 매설깊이는 약 80cm 이상인 것으로 판명되었다. 특히, 현장 실증 실험결과, 지중매설관의 거동에 영향을 주는 주요인자인 토압, 윤압 외에 다짐에너지가 관의 변형에 상당한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌고, 관에 발생하는 변형량의 약 90% 이상이 다짐에너지라는 인자에 의해 발생하는 것으로 계속 되었다.

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

1. 서 론

지중에 묻는 매설관은 그 형태와 재질이 사회적 요구와 기술의 발달로 인해 나날이 발전을 거듭해 왔으며,

사용분야 또한 다양해지고 있다. 그러나, 이런 매설관의 설계에 사용되는 이론은 수십년 전에 개발된 식들을 그대로 이용하고 있어 갈수록 다양해지고 급변하는 지중매설 시공여건을 고려한 해석을 하기에는 무리가

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

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

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

*4 정회원, 한전 전력연구원 일반연구원 (M.T.S, Korea Electric Power Research Institute)

따르는게 현 실정이다. 특히 국내에서의 연구수행은 극히 미미한 실정이나, 최근 들어 사회 환경개선차원에서 매설관을 사용하는 분야가 늘어남에 따라 이에 대한 안정성을 평가하는 연구가 점차 늘어나고 있는 추세이다.

그 동안 국내에서 수행한 매설관에 대한 연구들을 살펴보면, 「지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술용역」(이이환 외, 1986), 「PE과형관의 구조적 안정 검토」(김동수, 1990), 「과형강관의 시험시공 및 현장계측에 관한 연구」(김진만, 2000), 「지반침하가 매설관의 건전성에 미치는 영향」(오규환, 2001), 「차량하중을 받는 지중연성관의 거동특성」(이대수 외, 2002) 등이 대표적이며, 일본에서는 전력중앙연구소(CRIEPI) 주관으로 「차량하 매설방호관의 천층매설 검토연구」(片岡哲之, 1988)가 수행되었다. 그러나, 최근 들어 연구하고 있는 관재들은 주로 강성관과 직관에 국한된 연구가 대부분을 차지하고 있기에 지중배전관(지하 전력선용 보호관)과 관계가 깊은 지중연성관(PE과형관)에 대한 연구는 더욱 더 필요한 실정이다.

현재까지 검토된 선행 연구내용 중 지중배전케이블을 보호하는 연성관에 대한 연구로는 일본 전력중앙연구소(CRIEPI)에서 수행한 연구(片岡哲之, 1988)와 (주)한국전력기술(KOPEC)에서 수행한 연구(이이환, 1986)가 있다. 두 연구소에서 수행한 연구내용의 두드러진 차이점을 살펴보면, KOPEC의 경우는 지중 연성관의 거동을 토압과 윤압, 관자재의 강성 및 되메움재료의 밀도에 근거해서 분석한 기본적인 연구에 국한하였으며, CRIEPI의 경우는 지중매설관 내부의 전력케이블에서 발생하는 열(60℃)이 관재에 미치는 영향까지 해석을 실시하였다. 그러나, 이러한 연구결과들을 국내의 배전관로공사의 설계에 그대로 적용하기에는 연성관의 거동에 미치는 영향인자에 대한 부족과 관재의 상이성 등으로 말미암아 상당한 무리가 따를 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지금까지의 연구결과를 기초로 하여 고전이론식, 전산해석, 열 영향이 반영된 실내 모형 토조실험 및 현장 시공여건을 그대로 반영한 현장 실증실험을 통해 차량 하중하에서의 지중 연성관의 작용압력-

변형을 특성과 안전도 등에 대한 평가를 수행하였다.

각 해석에 공통적으로 적용된 해석 조건은 현재 배전공사용 관으로 널리 사용되고 있는 내경 175mm PE과형관을 사용해서 현행 도로밀 허용매설깊이 기준인 120cm와 이보다 천층매설인 매설깊이 80cm와 100cm에 관을 묻고, 모래를 이용해서 다짐도 85%로 되메움한 다음에, 그 위에 A-1급 아스팔트 포장도로를 시공하고 DB-24의 후륜하중인 9.6ton이 정재하되었을 때의 조건을 적용하였다. 세부적으로 고전이론식 및 전산해석은 위의 조건으로 해석하고, 실내 토조실험은 열 영향의 유무에 따른 조건을 추가하였고, 현장 실증실험은 열을 준 상태에서 다짐도의 변화 즉, 다짐도85% 이상의 표준다짐과 다짐도 80%이하의 빈다짐 조건을 해석의 변수로 사용하여 분석을 수행하였다.

2. 지중 연성관 이론

지중에 묻히는 매설관의 종류에는 관재의 강성에 따라 취성파괴(brittle failure) 양상을 보이는 강성관과 연성파괴(ductile failure)의 형태를 보이는 연성관으로 나뉘어지며, 하중 재하시 전자는 파열(rupture)에 의해, 후자는 변형(deflection)에 의해 관재의 기능을 상실하는 특성을 갖고 있다.

본 연구에 사용될 PE과형관은 연성관의 이론을 적용하여 그 거동을 해석하여야 한다. 연성관의 지지강도의 원천은 관의 유연성으로부터 나오는 것으로 토압하에서 관이 수직방향의 변형을 일으키면 그것에 의해 관측면에서는 수동토압이 발생되고, 관의 상부에 활모양으로 둘러싸고 있는 토압에 의해 생긴 수직하중에 의한 주된 처짐을 감소시켜 매설관의 유효강도를 높인다. 이 수동토압을 증가시키기 위해서는 되메움 재료를 충분히 다짐하여야 하며, 그러므로 인해, 수직하중에 의한 변형에 저항압이 발생하여 그림 1과 같이 안정성을 확보하게 되는 것이다. 그러나, 되메움 재료의 선정이 잘못하거나 다짐이 불충분한 경우에는 관측면으로 큰 변

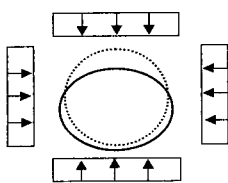


그림 1. 양호한 되메움

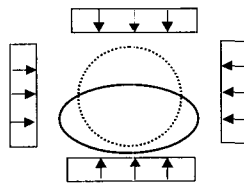


그림 2. 불충분한 다짐

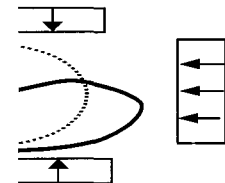


그림 3. 시공불량에 의한 파괴

형이 생긴후에야 비로소 저항토압이 일어나게 되어 그림 2와 같이 측면 변형이 상당히 커지고, 탄성 한계를 넘으면 파괴되어 버린다(그림 3). 이와 같이 연성관의 역학적 특성을 무시한 시공이 이루어지면 의외의 사고의 원인이 되기도 하기 때문에 설계자도 시공자도 모두 이를 충분히 이해해야만 한다.

연성관의 적합성 판정에 이용되는 방법은 편평 시험(압축 시험)이며, 편평 시험은 관소재의 압축변형에 관한 시험이다. KS C8455에 의하면 관시료를 200mm의 길이로 절단하여 시험편을 2장의 평판사이에 끼우고, 관축에 대해 직각의 방향으로 약 20mm/min의 속도로 시험편이 갈라지지 않고 내면이 접촉할 때까지 가압하여 최대하중을 구하는 것이다.

매설관의 안정성을 판단하기 위한 변형률 기준은 KS C8455에 연성관의 적합성 판정기준을 외부하중 작용시 갈라짐 또는 깨어짐이 생기지 않고, 시료 바깥지름에 대한 변형률이 3.5%이하이어야 한다고 규정하고 있다.

3. 해석

해석에 사용된 지중연성관은 지중배전 관로에 일반적으로 사용되고 있는 PE파형관(그림 4, 표 1)을 사용하였으며, 관 주위를 채우는 되메움재는 지중배전설계편람(조성수, 1999)에 기술되어 있는 강모래를 사용하였다. 아스팔트 포장은 주요간선도로에 적용되는 A-1급 포장도로를 시공하는 조건을 적용하였고(그림 5), 차량

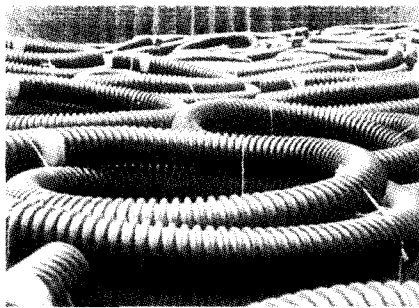


그림 4. PE파형관

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

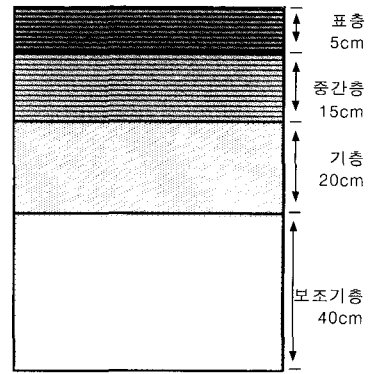


그림 5. A-1급 포장 단면도

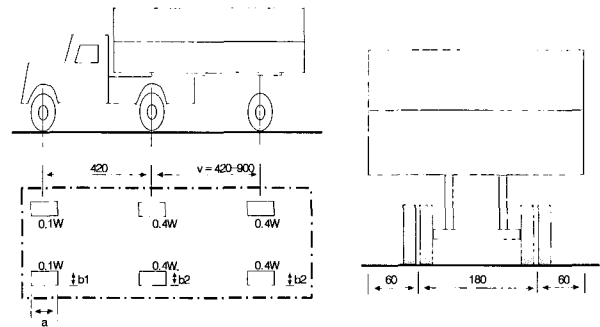


그림 6. DB-24 차량

하중은 DB-24 후륜하중인 9.6ton이 관로 상단 도로표층에 가해지는 조건을 적용하였다(그림 6).

3.1 고전이론식에 의한 해석

지중연성관의 변형에 영향을 주는 인자로는 토압과 윤압을 들 수 있는데 토압과 윤압을 계산하는 공식은 여러 가지가 있지만, 국외 및 국내에서 그동안 수행되었던 선행 연구결과에 의하면 토압에는 수직공식, 윤압에는 확산 공식, 그리고 두 하중인자에 의한 매설관의 변형량 계산에는 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℃)이 관에 미치는 영향과 다짐장비가 관의 변형에 미치는 효과를 해석할 수 없다는 단점이 있다.

3.1.1 토압(수직 공식)

그림 7에서와 같이 아스팔트 포장층의 단위중량은 2.3t/m³, 두께는 80cm로 계산하고, 되메움재인 모래의 최대단위중량을 1.8t/m³로 보고 다짐도 85%시의 단위중

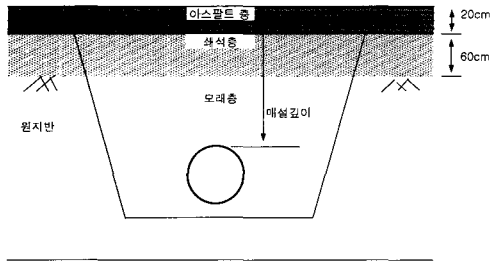


그림 7. 포장 단면도

량을 $1.615t/m^3$ 로 가정하여 다음 식에 적용하였다.

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

여기서, $p_1 =$ 연직토압 (kg/cm^2),

$\gamma_t =$ 단위중량 (kg/cm^3), $h =$ 토피 (cm)

3.1.2 윤압(확산 공식)

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

여기서,

$p_2 =$ 윤압 (kg/cm^2),

$P = 9600kg$ (DB-24 후륜하중)

$a = 20cm$ (접지길이), $b = 50cm$ (접지폭)

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

$h \leq 0.6m \rightarrow im = 0.2$, $h \leq 0.9m \rightarrow im = 0.1$

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

$\alpha = 45^\circ$ (분산각), $h =$ 토피 (cm)

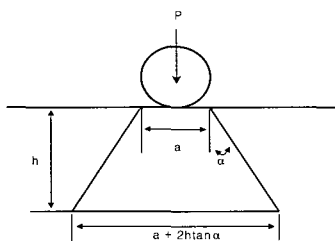


그림 8. 확산 공식 적용도 (측면)

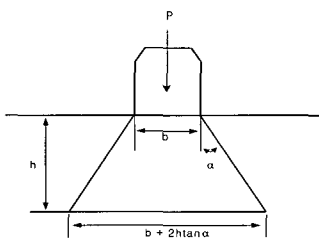


그림 9. 확산 공식 적용도 (정면)

3.1.3 매설관의 변형량(Spangler의 Iowa 공식)

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

여기서,

$\Delta x =$ 관의 변형량 (cm)

$D_1 = 1.5$ (변형지체계수),

$K = 0.108$ (지지각에 따른 계수),

$r = 11.5cm$ (관 반경), $D = 23cm$ (관 외경),

$d = 17.5cm$ (관 내경),

$W_c =$ (토압+윤압) $\times D$ (연직하중, kg/cm)

$E = 7000 kg/cm^2$ (관의 탄성계수)

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

$t = 0.35cm$ (관의 두께)

$E' = 70 kg/cm^2$ (흙의 반력계수)

3.2 실내 토조 실험

실내 실험에 사용된 토조의 크기는 전산해석값을 이용하여 벽체에 의한 응력의 반발이 없도록 치수를 결정 하였으며, A-1급 포장도로를 기준으로 다양한 매설깊이 (80, 100, 120cm)에 대해 실험을 실시하였다. 또한 배전 케이블에서 발생되는 열에 의한 PE파형관의 재료특성을 분석하기 위해 열 고려 여부에 따라 각각에 대해 3회 이상의 실험을 수행하여 평균한 값(변형량, 작용압력)을 대표값으로 취했다.

3.2.1 실내 토조실험 장치

실내에서 실제 현장상황과 유사한 형태의 조건을 주기 위해 그림 10과 같이 $350 \times 220 \times 300cm$ 크기의 토조를 강판으로 제작하여 도로 폭 20m 이상 또는 이에 준

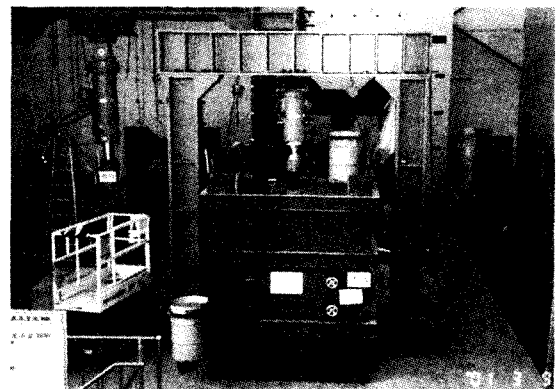


그림 10. 토조 및 가진기 전경

하는 도로단면인 A-1급 포장도로를 기준으로 매설깊이별(80, 100, 120cm) 작용압력-변형을 측정실험을 실시하였다.

3.2.2 실험 방법

실내 토조실험은 아래와 같은 순서로 실험을 실시하였다.

- (1) 토조내부에 30cm씩 모래를 채우고 다짐도 85%로 층다짐을 실시한 다음, 매설깊이별로 PE과형관을 설치한다.
- (2) 관의 변형을 측정하기 위해 변위계를 관의 내벽에 설치하고, 토압계를 관의 외측 상단에 설치한다 (그림 11~12).
- (3) 매설깊이별 작용압력-변형을 관계를 알아보기 위해 매설깊이를 달리하여 실험을 수행한다. 다짐도는 공히 85%로 한다.
- (4) 재하판은 DB-24를 기준으로 차량 후륜의 접지폭과 같은 50×20cm(두께3cm)의 강판을 이용한다.
- (5) 토조에 직접 아스팔트층을 포설하지 않고, 실규모 재하실험을 통해 예측된 아스팔트층 직하에서의 저감된 차량하중을 가진기로 정적재하한다.
- (6) 가진기는 최대 25ton까지 하중을 가할 수 있고, 컴퓨터로 하중을 통제할 수 있는 Actuator시스템을 이용하였다.

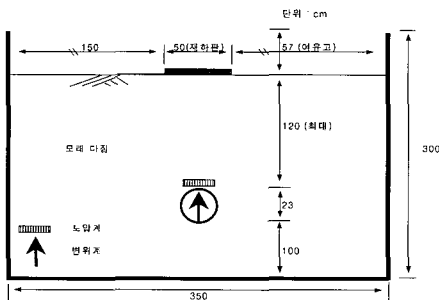


그림 11. 토조 정면도

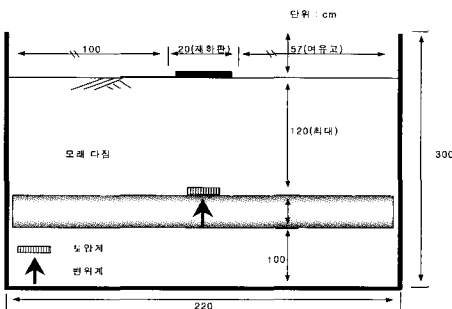


그림 12. 토조 측면도

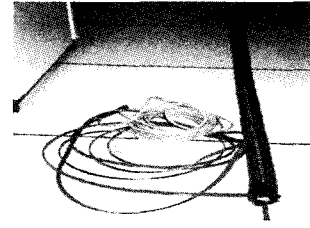


그림 13. Heat Cable

- (7) 다짐에 사용된 다짐장비는 현장에서 많이 사용되고 있는 진동 다짐기(중량 90kg)를 이용한다.
- (8) 전력 케이블의 온도영향 고려:
선형연구결과(片岡哲之, 1988)에 의하면 관로의 재료특성(강성, 안정성)은 케이블에서 발생하는 열(65℃) 영향을 받는 것으로 보고 되었다. 따라서, 케이블에서 발생하는 열이 매설관의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 13과 같은 Heat cable를 제작하여 관 내부에 설치한 뒤 충분한 열이 발생되도록 2일정도 열을 가한 후 실험을 실시하였다.

3.3 현장 실증 실험

3.3.1 실험 계획

관의 매설깊이는 현행 도로밀 허용매설깊이인 120cm와 이보다 천층매설인 80cm와 100cm를 실험에 적용하였고, 되메움 모래의 시공은 지중배전설계편람(조성수, 1999)에 나와있는 다짐도 85%이상의 표준다짐 및 비교를 위하여 다짐도 80%이하의 빈다짐 상태의 두 가지로 관의 거동을 측정하였다. 아스팔트 포장은 주요간선도로에 적용되는 A-1급 포장도로를 시공하였으며, 차량하중은 DB-24 후륜하중인 9.6ton이 되도록 트럭을 제공하여 실험에 사용하였다(그림 14).

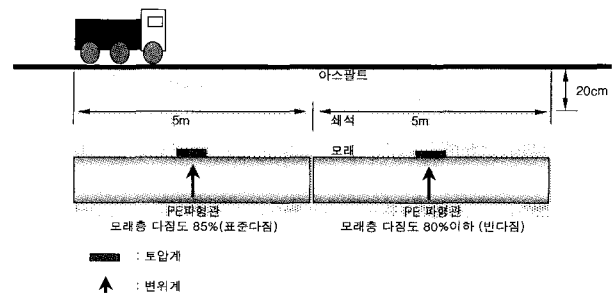


그림 14. 실험 계획도

3.3.2 실험 방법

현장 실험에 사용된 부지는 한국전력공사 전력연구원내 동쪽에 위치한 실증실험장을 이용하였으며 실험 순서는 다음과 같다.

(1) 부지정리

실험에 사용될 부지를 깊이 2m까지 굴착한 다음, 30cm씩 층다짐을 실시하여 다짐도 90%이상의 부지정리를 실시한다.

(2) 굴착

매설깊이 80cm, 100cm 및 120cm에 대해 지중배전 설계편람에 기술되어 있는 규격대로 매설단면을 굴착한다(그림 15~17).

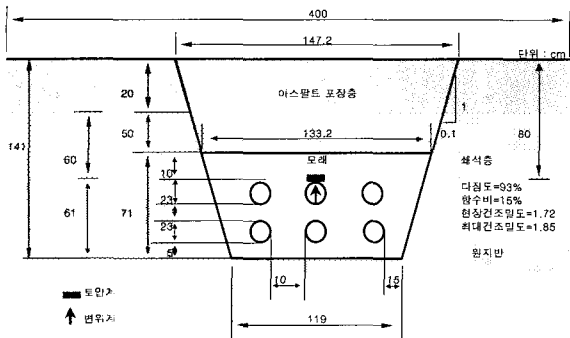


그림 15. 매설깊이 80cm 굴착 단면도

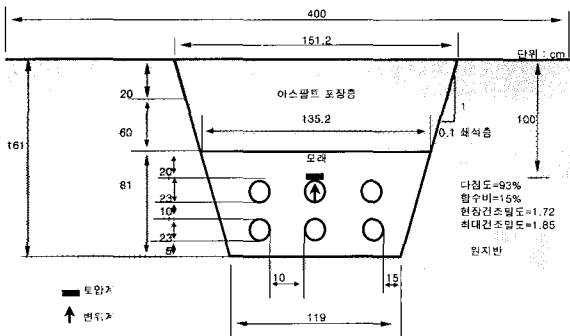


그림 16. 매설깊이 100cm 굴착 단면도

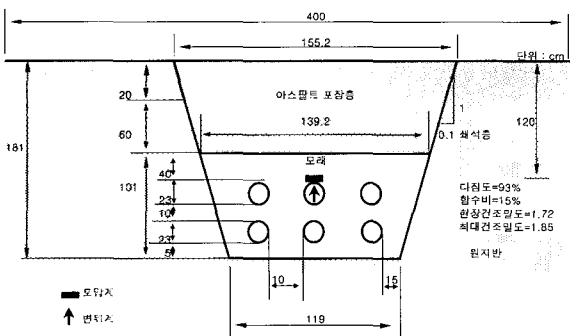


그림 17. 매설깊이 120cm 굴착 단면도

(3) 관 포설

PE과형관을 2단 3열의 배열로 매설단면에 시공한다(그림 15~17).

(4) 센서 설치

관의 변형을 측정하기 위해 변위계를 변형이 가장 크게 발생하는 상단 가운데 관에 설치하고(그림 18~19), 관의 작용압력(토압+윤압)을 계측하기 위해 변위계가 설치된 관 상부에 토압계를 위치시킨다. 또한, 배전 케이블에서 발생하는 60℃ 상당의 열이 PE과형관에 미치는 영향을 알아보기 위해 자체 제작한 Heat cable을 관 안쪽에 설치한다. 이때 Heat cable의 발생온도, 관내내부의 온도 및 관재 표면의 온도측정을 위해 온도측정케이블(Thermo couple)도 함께 포설한다(그림 20).

(5) 모래 되메움

표준다짐구간의 모래는 진동 다짐기(90kg)를 이용해 다짐을 실시하여 다짐도 85% 이상이 되게 하며, 빈다짐구간은 다짐없이 흩어뿌리기를 실시한다(그림 21).

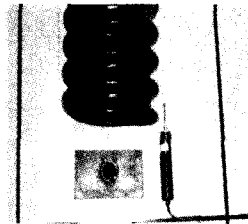


그림 18. 변위계 설치 전

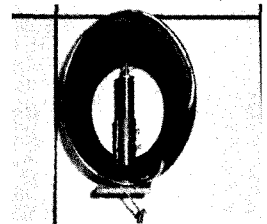


그림 19. 변위계 설치 후



그림 20. Heat cable 및 관내 설치



그림 21. 모래 되메움

(6) A-1급 포장 시공

보조기층 40cm, 기층 20cm, 중간층 15cm, 표층 5cm의 A-1급 포장을 실시한다(그림 22).

(7) 양생

아스팔트 포장층의 양생을 위해 최소 3일 이상의 양생기간을 둔다.

(8) 재하실험

아스팔트 도로포장이 완료되고 일정한 양생기간이 지난 뒤, 설계하중 DB-24에 준하는 트럭하중을 이용하여 실험을 실시한다. 운하중의 재하 방법은 정재하 방법을 이용한다. 우선 정하중 재하는 DB-24차량의 후륜하중 9.6ton을 매설관로 상단의 도로 표층 정중앙에 오도록 하여 정착시킨다. 차량하중의 정확성을 기하기 위하여 실험 전 후륜하중 9.6톤을 계근소에서 정확하게 계근한 뒤 실험을 수행한다. 정재하의 종료는 재하시작후 관재의 변형률이 일정한 값에 수렴할 때 재하를 중지하며, 하중 제거후 관재의 회복량을 계측하여 관재의 안정성을 평가한다(그림 23).

(9) 데이터 취득

데이터 로거를 이용하여 각 센서의 측정값을 정리한다. 계측에 사용된 데이터 로거는 TDS-601로 최대 1000채널까지 연속 계측할 수 있는 장비이다.

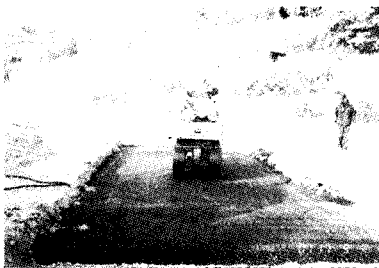


그림 22. 아스팔트 포장

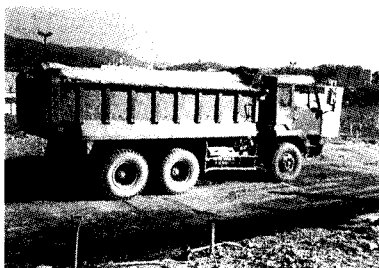


그림 23. 하중재하

3.4 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.

3.4.1 입력 자료

전산해석에 사용되는 관의 물성치는 탄성계수, 단면 2차모멘트, 단면적 등을 들 수 있으며 이들 요소는 보 (beam)의 성질을 나타내는데 주로 쓰인다(표 2).

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.

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 2차원 해석의 특성상 strip load로 하였다.

표 2. 관 물성치

탄성계수 (t/m ²)	단면2차 모멘트(m ⁴)	단면적 (m ²)	단위중량 (t/m ³)
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
포아슨비	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

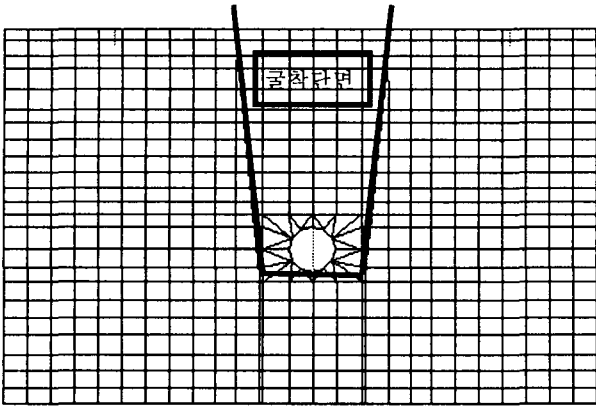


그림 24. 모델도 (매설깊이 100cm)

3.4.2 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 연직로올러로, 하단은 좌, 우방향 모두를 고정시키는 고정단으로 조건을 주었다(그림 24).

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

해석 매설깊이는 80, 100 및 120cm이고, 매설관의 작용압력과 연직변형률값을 비교대상으로 취했다.

4. 결과 분석 및 비교

그림 25는 매설깊이별 각해석의 변형량 변화를 나타낸 것이다. 각 해석별 변형량의 대소를 비교해 보면 대체적으로 현장실험 > 이론식 > 전산해석 > 토조실험 순으로 큰 변형량 해석값을 보이고 있다. 주목할 점은

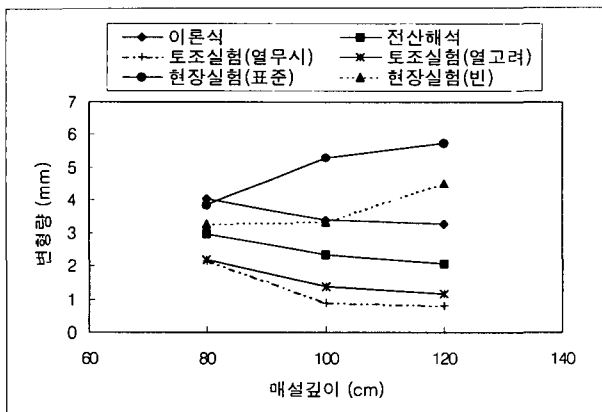


그림 25. 매설깊이별 각 해석의 변형량 변화

현장실험값이 해석값 중에서 가장 큰 변형량값을 보이고 있고, 또한, 다른 해석값들의 경향과는 다르게 매설깊이가 깊어질수록 더 큰 변형량을 보이고 있다는 것이다.

이런 현상이 나타나는 주된 이유는 현장실험에서는 윤압, 토압에 의한 거동뿐만 아니라 각 공정별(모래 되메움, 쇄석층 포설, 아스팔트층 포설)로 소요의 다짐도를 얻기 위해 사용하는 다짐기계의 다짐에너지로 인한 변형이 관에 누적되기 때문인 것으로 판단된다.

그림 26은 현장실험중에서 매설깊이 120cm에 대해 공정진행에 따른 변형량 변화 추이를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보면, 초기 공정인 모래 되메움에서 표준다짐은 빈다짐보다 더 큰 변형량을 유발시키는데 이는 빈다짐은 관 주위에 모래를 흠어뿌리기 하는 반면 표준다짐은 진동다짐기를 이용하기 때문에 관재에 가해지는 압력이 증가하여 관의 변형을 촉진시키는 것이다. 두 번째 공정인 쇄석포설공정에선 역으로 빈다짐 구간의 변형이 급격히 증가하는데 이는 표준다짐에서는 관재 주위에 모래가 밀실하게 다져져서 관 측면에 수동토압을 형성하여 관재의 변형을 억제하는 반면, 빈다짐에선 관 주위의 모래가 다져지지 않았기 때문에 쇄석포설시

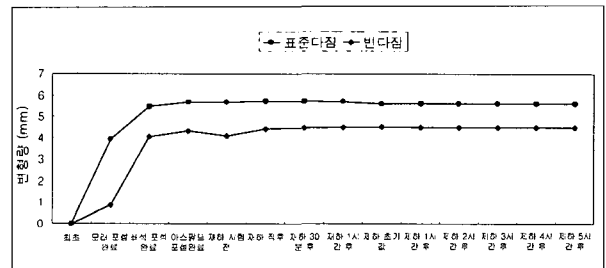


그림 26. 공정별 변형량 변화 - 매설깊이 120cm

표 4. 공정별 변형량-작용압력 변화

공정명	매설깊이 120cm PE파형관 (A-1급 포장)			
	표준다짐 (85%)		빈다짐 (69%)	
	변형량 (mm)	압력 (t/m ²)	변형량 (mm)	압력 (t/m ²)
최초	0.00	0.00	0.00	0.00
모래 포설완료	3.94	0.71	0.85	0.48
쇄석 포설완료	5.49	2.36	4.06	2.18
아스팔트 포설완료	5.69	2.41	4.33	2.21
재하 시험전	5.70	4.90	4.12	3.58
재하 직후	5.74	4.77	4.42	4.33
재하 30분 후	5.74	4.75	4.49	4.23
재하 1시간 후	5.72	4.75	4.52	4.16
재하 초기값	5.62	3.43	4.53	2.63
재하 1시간 후	5.64	3.58	4.52	2.76
재하 2시간 후	5.64	3.63	4.52	2.78
재하 3시간 후	5.63	3.63	4.50	2.83
재하 4시간 후	5.64	3.66	4.50	2.83
재하 5시간 후	5.63	3.71	4.50	2.91

에 운용되는 롤러다짐기의 압력이 관재에 가해져서 매설관의 변형이 증가하는 것으로 판단된다. 그리고, 이 두 공정이 매설관 최대변형량의 약 90%를 유발시키고 있다. 또한, 하중 제하후의 변형 회복은 0.4~1.6% 정도로 극히 미비한 것으로 나타났고, 누적된 변형의 대부분은 관재에 남아있는 것으로 계측되었다(표 4).

결국, 현장시험값이 다른 해석값보다 큰 이유는 다짐장비에 의한 변형량 변화분이 추가되었기 때문이고, 매설깊이가 깊어질수록 변형량이 증가하는 것은 다짐두께가 증가함으로 인해 다짐장비의 운용횟수가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 27은 각 해석별 매설깊이 변화에 따른 매설관에 작용하는 압력의 변화를 나타낸 것이다. 전산해석값을 제외하면 작용압력은 비슷한 값을 나타내고 있고, 매설깊이가 깊어질수록 작용압력은 감소하는 경향을 보이고 있다. 현장시험값이 대체적으로 다른 해석값에 비해 약간 큰 값을 보이는데 변형량과 연계해 생각해 보면 다짐장비운용에 의한 작용압력이 추가되었기 때문에 매설관의 변형을 더 많이 유발시킨 것으로 판단된다. 또한 열의 유무에 따른 작용압력의 크기는 대체적으로 열을 고려했을 때가 열을 무시했을 때보다 작은 값을 보이는데 이는 케이블에서 발생하는 열이 매설관의 강성을 약화시키고 이로 인해 매설관이 받던 응력을 변형으로 소산시키면서 일어나는 현상으로 보여진다.

그림 28은 각 해석별 매설깊이 변화에 따른 매설관의 변형을 변화를 나타낸 것이다. KS-C8455에 명시되어 있는 관의 허용변형률 기준 3.5%를 기준으로 모든 해석값이 3.5%이하의 변형률을 보임으로써 관재는 매설깊이 80cm아래에 묻힐 경우 안정성이 확보되는 것으로 판명되었다. 아울러, 선행 논문(이대수 외, 2002)에서 매설가능깊이를 40cm로 제한하였는데, 실제 현장시공 여건상 매설관의 상부에 포설되는 A-1급 아스팔트 포장도로 시공시에 도로로써의 기능을 손상시키지 않게 하기 위해 포장두께 80cm를 유지시키는 조건으로 매설관을 시공한다고 보았을 때 해석결과와 같이 지중 매설관의 허용매설깊이를 80cm로 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

주목할 점은 현장시험에 의한 변형률값이 다른 해석값에 비해 보수적인 결과를 나타내었고, 매설깊이가 깊어질수록 변형률이 커지는 상이한 결과를 나타내었다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 앞에서 분석한 바와 같이 다짐장비의 운용에 기인하고 있고, 이러한 다짐장비

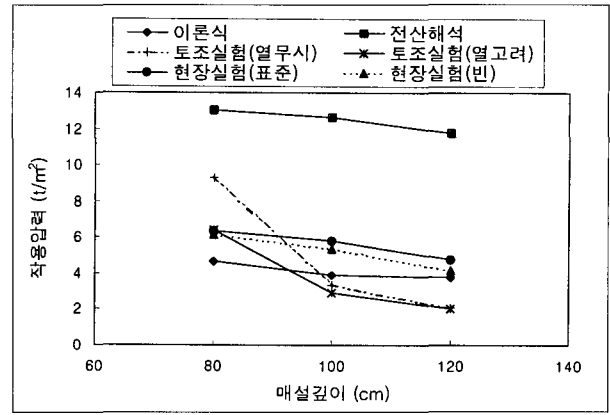


그림 27. 매설깊이별 각 해석의 작용압력 변화

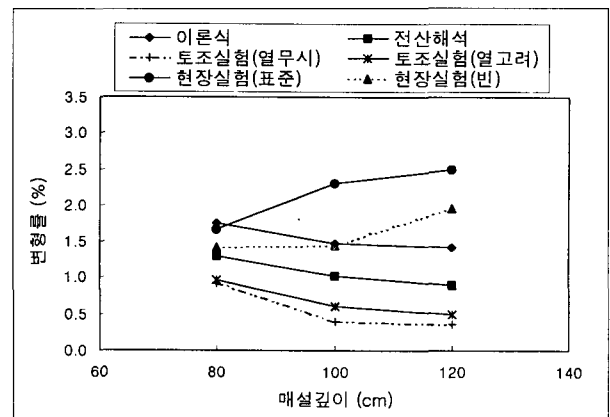


그림 28. 매설깊이별 각 해석의 변형률 변화

운용에 따른 거동특성을 다른 해석에서는 해석조건으로 사용하기가 곤란하고, 해석결과에도 반영되지 못했기 때문에 현장실증시험이 매설관의 거동해석에 가장 정확도가 높을 것으로 판단된다.

5. 결론

이론식, 실내토조시험, 전산해석 및 현장실증시험을 통해 A-1급 포장도로 아래에 매설되는 지중연성관의 작용압력-변형률 관계를 분석하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 매설깊이에 따른 각 해석별 변형량의 대소를 비교해 보면, 현장실증시험 > 이론식 > 전산해석 > 토조시험 순으로 나타나고 있다.
- (2) 변형률 해석 중 현장시험 결과값이 가장 큰 이유는 윤압, 토압에 의한 변형 뿐만 아니라 각 공정별로 소요의 다짐도를 얻기 위해 사용한 다짐기계의 영향으로 매설관의 변형량이 크게 나타난 것으로 판단된다.

- (3) 다른 해석과는 다르게 현장시험의 변형량 변화는 매설깊이가 깊어질수록 증가하는데 이것은 다짐두께가 증가함으로 인해 다짐장비의 운용횟수가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 이론식, 전산해석, 토조시험 등 기존의 고전이론을 적용해서 매설관의 변형을 해석할 때는 토압 및 윤압만이 매설관에 영향을 주는 인자였으나, 현장실증시험을 분석한 결과, 토압, 윤압 뿐만 아니라 다짐에너지도 매설관에 영향을 주며, 오히려 다짐에너지가 관 변형량의 90%이상을 차지하는 중요한 인자인 것으로 분석되었다. 따라서, 해석인자가 실제 현장조건과 유사한 현장시험값이 매설관 거동해석에 가장 정도가 높을 것으로 판단된다.
- (5) 모든 해석에서 매설깊이 80cm 아래에선 매설관의 허용변형률 3.5%(KS C8455)에 만족하는 결과값을 보이므로 지중전력선 보호용 PE파형관은 매설깊이 80cm 아래에선 안전성을 확보하는 것으로 판명되었다.
- (6) 위 결과들을 종합해 볼때, 향후 다짐에너지와 다짐유발(compaction-induced)토압의 관계를 고려한 연구도 필요하다고 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 건교부(1996), “도로교 표준시방서”.
2. 김동수(1990), “PE파형관의 구조적 안정 검토”, 전기통신연구논문.
3. 김진만(2000), “파형강관의 시험시공 및 현장계측 연구”, 한국토목학회 2000 학술발표회 논문집, pp.605-608.
4. 오규환(2001), “지반침하가 매설배관의 건전성에 미치는 영향”, 한국가스공사 건전성 진단워크숍.
5. 이대수, 상현규, 김경열(2002), “차량하중을 받는 지중연성관의 거동특성”, 한국지반공학회 논문집, 제18권 4호. pp.65-73.
6. 이시용(1993), “관로 포설공법의 개선연구”, 한국통신 가입자망연구소.
7. 이이환 외 13인(1986), “지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술용역”, 한국전력기술주식회사.
8. 정성교(1991), “뒤틀림 다짐에 의한 횡방향 토압”, 대한토목학회 논문집 11(2), pp.51-64.
9. 정성교(1989), “매설관의 설계하중 결정에 관한 연구”, 대한토질공학회 논문집 5(2), pp.19-32.
10. 조성수(1999), “지중배전 설계편람”, 한국전력공사 전력연구원.
11. 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 淺層埋設の 検討”, 電力中央研究所.

(접수일자 2002. 12. 30, 심사완료일 2003. 10. 7)