

지중 연성관의 거동특성 분석 (II)

Analysis of Behavior Characteristics of Underground Flexible Pipe (II)

이 대수¹⁾, Dae-Soo Lee, 상 현규²⁾, Hyun-Kyu Sang, 김 경열³⁾, Kyoung-Yul Kim

¹⁾한전 전력연구원 책임연구원, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

²⁾한전 전력연구원 연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

³⁾한전 전력연구원 연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

SYNOPSIS : 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 study, the actual size tests were carried out to investigate strain-deformation relation for underground flexible pipes subject to vehicle loads with various depths and degree of compaction.

Key words : underground flexible pipes, actual size test

1. 서론

지중에 묻히는 매설관은 그 형태와 재질이 사회적 요구와 기술의 발달로 인해 나날이 발전을 거듭해 왔으며, 사용되어지는 분야 또한 다양해지고 있다. 그러나, 이런 매설관의 설계에 사용되고 있는 이론은 수십년 전에 활동했던 공학자들에 의해 개발되어진 식들을 그대로 이용하고 있어 갈수록 다양해지고 급변하는 지중매설 시공여건을 고려한 해석을 하기에는 무리가 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 수행되었던 매설관에 대한 연구들을 살펴보면, 「지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술용역」(이이환, 1986), 「PE과형관의 구조적 안정 검토」(김동수, 1990), 「과형강관의 시험시공 및 현장계측에 관한 연구」(김진만, 2000), 「지반침하가 매설관의 건전성에 미치는 영향」(오규환, 2001) 등이 대표적이며, 일본에서는 전력중앙연구소(CRIEPI) 주관으로 「차량하 매설방호관의 천층매설 검토 연구」(片岡哲之, 1988)가 수행되었다. 그러나, 최근 들어 연구되고 있는 관재들은 주로 강성관과 직관에 국한된 연구가 대부분을 차지하고 있기에 지중배전관로(지하 전력선용 보호관)와 관계가 깊은 지중 연성관(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°C)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 지중 연성관의 거동특성을 분석하기 위해 매설깊이와 되메움 재료의 다짐도를 해석의

변수로 주고, 현행 지중전력선 보호용 관로공사 시방서에 준한 시공을 실규모로 시행한 후 작용압력(토압+윤압)과 변형률을 계측하여 PE과형관의 안전성을 평가하였다.

2. 지중 연성관 이론

지중에 묻히는 매설관의 종류에는 관재의 강성에 따라 취성파괴(ductile failure) 양상을 보이는 강성관과 연성파괴(brittle 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 원인은 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 매우 높아지게 한다. 이 수동토압을 증가시키기 위해서는 되메움 재료를 충분히 다짐하여 수직하중에 의한 관측면의 약간의 변형으로도 저항압이 발생하여 그림 2.1과 같이 안정성을 확보하는 것이다. 그러나, 되메움 재료의 선정을 잘못하거나 다짐이 불충분한 경우에는 관측면으로의 큰 변형후에야 비로소 저항토압이 일어나게 되어 그림 2.2와 같이 측면 변형이 상당히 커지고, 탄성 한계를 넘으면 파괴되어 버린다(그림 2.3). 이와 같이 연성관의 역학적 특성을 무시한 시공이 이루어지면 의외의 사고의 원인 되기도 하기 때문에 설계자도 시공자도 모두 이를 충분히 이해해야만 한다.

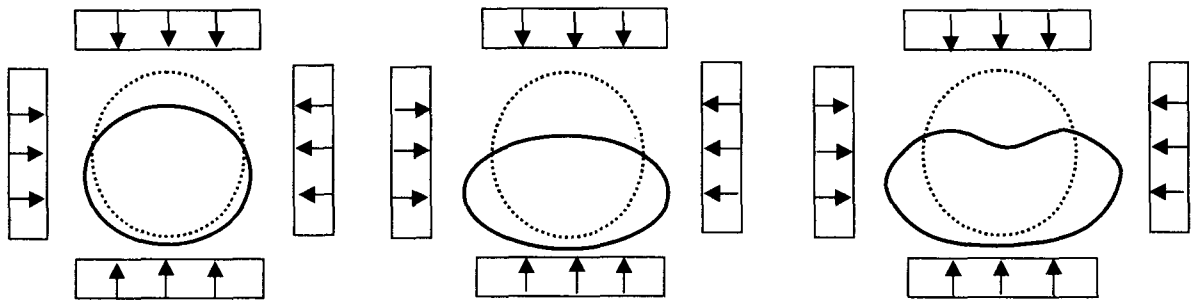


그림 2.1 양호한 되메움

그림 2.2 불충분한 다짐

그림 2.3 시공불량에 의한 파괴

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

본 연구에서 수행한 편평 시험 결과, PE과형관은 3.5%변형시까지 탄성 거동을 보이다가 3.5%를 초과하게 되면 관은 소성상태로 들어가고, 관에 가해진 압력으로 인한 변형이 관에 누적되어 파괴상태에 이르게 된다. 따라서, 관의 안정성을 판단하기 위한 변형률 기준은 3.5% 이내로 하는 것이 합리적이라 판단되며, KS C8455에서도 연성관의 적합성 판정기준을 외부하중 작용시 갈라짐 또는 깨어짐이 생기지 않고, 시료 바깥지름에 대한 변형률이 3.5%이하이어야 한다고 규정하고 있다.

3. 현장 실증 실험

3.1 실험 목적

현재 지중배전관로 공사에 주로 사용되고 있는 PE파형관의 매설깊이별 다짐도별 작용압력-변형률 특성을 분석하고자 본 실험을 수행하게 되었다. 특히, 도로밑에 관이 묻히는 경우 포장도로의 시공 중에 관이 받는 압력과 변형률 특성을 알아보고 관의 변형량에 가장 큰 영향을 주는 인자가 무엇인지 분석하여 지중연성관의 거동특성을 규명하였다.

3.2 실험 계획

실험에 사용된 지중연성관은 지중배전 관로에 일반적으로 사용되고 있는 PE파형관(표 3.1)을 사용하였으며, 관의 매설깊이는 현행 도로밑 허용매설깊이인 120cm와 선행 연구(김경열,2001)로 수행된 실내토조 실험결과에서 한계매설깊이로 예상한 80cm의 두가지 경우를 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 계근하여 실험에 사용하였다(그림 3.1).

표 3.1 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

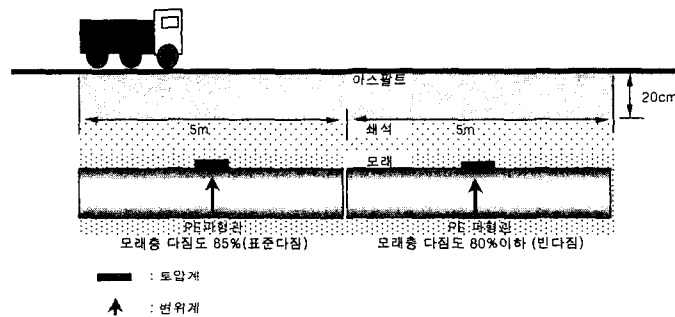


그림 3.1 실험 계획도

3.3 실험 방법

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

1) 부지정리

실험에 사용될 부지를 깊이 1.5m까지 굴착한 다음, 30cm씩 층다짐을 실시하여 다짐도 90%이상의 부지정리를 실시한다.

2) 굴착

매설깊이 80cm, 120cm에 대해 지중배전설계편람에 기술되어 있는 규격대로 매설단면을 굴착한다(그림 3.2~3.3).

3) 관 포설

PE과형관을 2단 3열의 배열로 매설단면에 시공한다(그림 3.2~3.3).

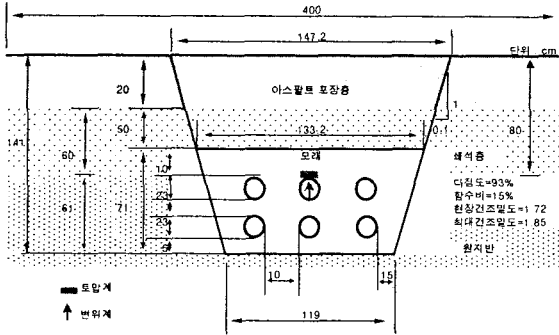


그림 3.2 매설깊이 80cm 굴착 단면도

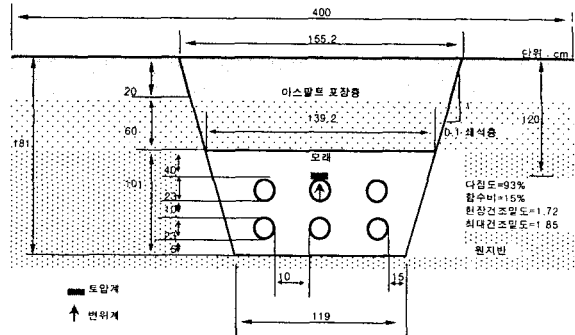


그림 3.3 매설깊이 120cm 굴착 단면도

4) 센서 설치

관의 변형을 측정하기 위해 변위계를 변형이 가장 크게 발생하는 상단 가운데 관에 설치하고, 관의 작용압력(토압+윤압)을 계측하기 위해 변위계가 설치된 관 상부에 토압계를 위치시킨다. 또한, 배전 케이블에서 발생하는 60°C 상당의 열이 PE과형관에 미치는 영향을 알아보기 위해 자체 제작한 열선을 관 안쪽에 설치한다. 이때 열선의 발생온도, 관내내부의 온도 및 관재 표면의 온도측정을 위해 온도측정케이블(Thermal couple)도 함께 포설한다(그림 3.4).



그림 3.4 변위계, 열선 케이블 및 관내 설치

5) 모래 및 쇄석 되매움

매설깊이 80cm의 경우에는 관 위로 모래 10cm, 쇄석 50cm, 아스팔트 포장 20cm와 매설깊이 120cm의 경우에는 관 위로 모래 40cm, 쇄석 60cm, 아스팔트 포장 20cm를 시공한다. 표준다짐구간의 모래는 진동 다짐기(90kg)를 이용해 다짐을 실시하여 다짐도 85%이상이 되게 하며, 빈다짐구간은 다짐없이 흩어뿌리기를 실시한다. 쇄석층은 공히 5ton롤러를 이용하여 다짐을 실시한다(그림 3.5~3.6).

6) A-1급 포장 시공

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

7) 양생

아스팔트 포장층의 양생을 위해 최소 3일 이상의 양생기간을 둔다.

8) 재하실험

아스팔트 도로포장이 완료되고 일정한 양생기간이 지난 뒤, 차량하중 DB-24를 이용하여 실험을 실시한다. 윤하중의 재하방법은 정재하 방법을 이용한다. 우선 정하중 재하는 DB-24차량의 후륜하중

9.6ton을 매설관로 상단의 도로 표층 정중앙에 오도록 하여 정차시킨다. 차량하중의 정확성을 기하기 위하여 실험전 후륜하중 9.6톤을 계근소에서 정확하게 계근한 뒤 실험을 수행한다. 정재하의 종료는 재하 시작후 관재의 변형률이 일정한 값에 수렴할 때 재하를 중지하며, 하중 제하후 관재의 회복량을 계측하여 관재의 장기 안정성을 평가한다(그림 3.7).

9) 데이터 취득

데이터 로거를 이용하여 각 센서의 측정값을 정리한다.



그림 3.5 모래 되메움



그림 3.6 아스팔트 포장

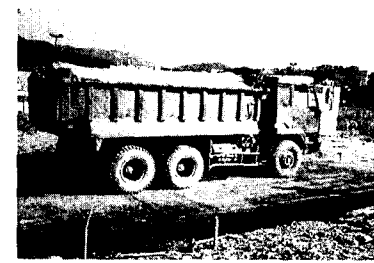


그림 3.7 재하 실험

3.4 실험 결과

3.4.1 매설깊이 80cm

그림 3.8~3.9는 매설깊이 80cm에서 표준다짐과 빈다짐으로 되메움하고 A-1급 아스팔트 포장을 시공한 후 차량하중(DB-24)을 재하했을 때의 관의 변형량과 작용압력의 변화를 나타낸 것이다.

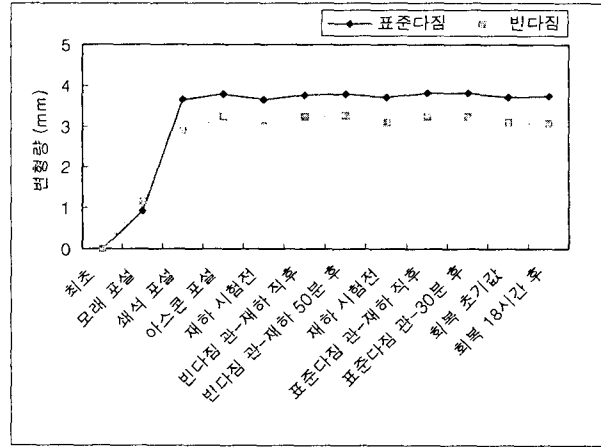


그림 3.8 관의 수직 변형량 (매설깊이 80cm)

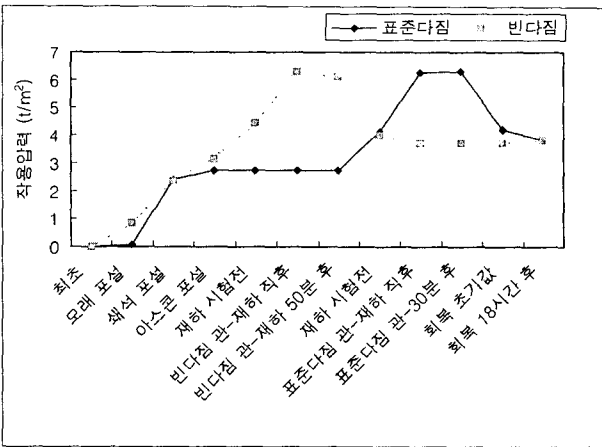


그림 3.9 관의 수직 작용압력 (매설깊이 80cm)

표준다짐구간에서 발생된 관의 총 변형량은 3.84mm로써 이 값은 관로 포설이 시작된 직후부터 하중 재하 시험까지 발생된 매설관의 총 변형량이다. 관재에 발생된 총 변형량 중 하중재하 직전인 도로포장 완료시까지의 변형량은 3.77mm로 관재에 발생된 총 변형량의 98%를 차지하고 있다. 포장이 완료된 후 3일간의 양생기간이 경과한 뒤 하중을 재하하였고, 그로 인해 발생된 순 변형량은 0.14mm로 나타났으며, 이는 총 변형량의 3.6%를 차지하고 있다. 또, 관재에 발생된 변형량 중 도로포장 후 양생기간동안 약 0.07mm의 변형회복현상이 발생한 것으로 나타났다. 특히, 도로 포장 시공후에 나타난 변형량의 75%

가 쇠석층(기층, 보조기층)시공중에 나타난 것으로 계측되었으며 하중 재하시험후 관의 회복량을 최대 18시간까지 계측한 결과 0.1mm정도가 회복되는 것으로 나타났다. 이는 총변형량의 2.6%가 회복한 것이며 재하시험에 의해 발생한 순 변형량 0.14mm중 0.04mm만이 재하시험에 의해 관에 누적되었음을 알 수 있다. 관에 작용하는 압력은 도로시공중에는 약 2.74t/m²이 발생하였으며, DB-24 후륜하중인 9.6ton이 재하 되었을 경우에는 관에 약 6.3t/m²이 작용하여 최대값을 보였다.

빈다짐구간(다짐도 78.3%)에서 발생한 관의 총 변형량은 3.27mm이다. 관재에 발생한 총 변형량 중 하중재하 직전인 도로포장 완료시까지의 변형량은 3.22mm로 관재에 발생한 총 변형량의 98%를 차지하고 있다. 포장이 완료된 후 3일간의 양생기간이 경과한 뒤 하중을 재하하였으며 그로 인해 발생한 순 변형량은 0.25mm로 나타났다. 이는 총 변형량의 7.6%를 차지하고 있다. 관재에 발생한 변형량 중 도로포장 후 양생기간동안 약 0.20mm의 변형회복현상이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 도로 포장 시공후에 나타난 변형량의 56%가 쇠석층(기층, 보조기층)시공중에 나타난 것으로 계측되었으며 하중 재하시험후 관의 회복량을 최대 18시간까지 계측한 결과 0.21mm정도가 회복되는 것으로 나타났다. 이는 총변형량의 6.0%가 회복한 것이며 재하시험에 의해 발생한 순 변형량 0.25mm중 0.04mm만이 재하시험에 의해 관에 누적되었음을 알 수 있다. 관에 작용하는 압력은 도로시공중에는 약 3.13t/m²이 발생하였으며, DB-24 후륜하중인 9.6ton이 재하 되었을 경우에는 관에 약 6.11t/m²이 작용하여 최대값을 보였다.

3.4.2 매설깊이 120cm

그림 3.10~3.11은 매설깊이 120cm에서 표준다짐과 빈다짐으로 되메움하고 A-1급 아스팔트 포장을 시공한 후 차량하중(DB-24)을 재하했을 때의 관의 변형량과 작용압력의 변화를 나타낸 것이다.

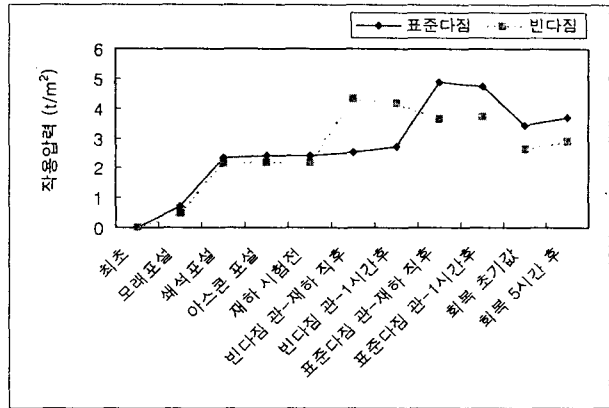
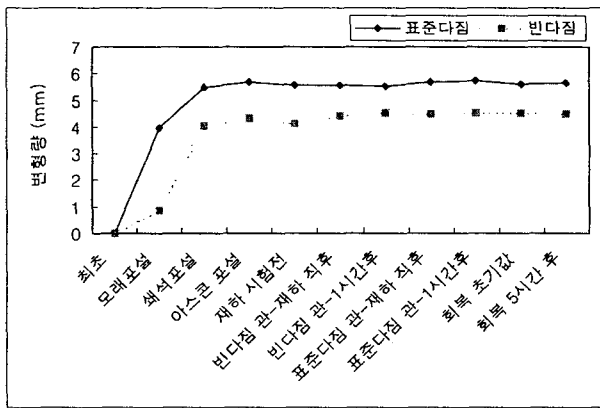


그림 3.10 관의 수직 변형량 (매설깊이 120cm) 그림 3.11 관의 수직 작용압력 (매설깊이 120cm)

표준다짐구간에서 발생한 관의 총 변형량은 5.74mm이다. 관재에 발생한 총 변형량 중 하중재하 직전인 도로포장 완료시까지의 변형량은 5.69mm로 관재에 발생한 총 변형량의 99%를 차지하고 있다. 포장이 완료된 후 3일간의 양생기간이 경과한 뒤 하중을 재하하였으며 그로 인해 발생한 순 변형량은 0.20mm로 나타났다. 이는 총 변형량의 3.5%를 차지하고 있다. 관재에 발생한 변형량 중 도로포장 후 양생기간동안 약 0.15mm의 변형회복현상이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 도로 포장 시공후에 나타난 변형량의 69%가 되메움재인 모래포설중에 나타난 것으로 계측되었으며, 변형량의 95%가 쇠석층(기층, 보조기층)시공중에 나타난 것으로 계측되었다. 하중 재하시험후의 관의 회복량을 최대 5시간까지 계측한 결과 0.11mm정도가 회복되는 것으로 나타났다. 이는 총변형량의 2%가 회복한 것이며 재하시험에 의해 발생한 순 변형량 0.20mm중 0.09mm만이 재하시험에 의해 관에 누적되었음을 알 수 있다. 관에 작용하는 압력은 도로시공중에는 약 2.41t/m²이 발생하였으며, DB-24 후륜하중인 9.6ton이 재하 되었을 경우에는 관에 약 4.77t/m²이 작용하여 최대값을 보였다.

빈다짐구간(69.0%)에서 발생한 관의 총 변형량은 4.52mm이다. 관재에 발생한 총 변형량 중 하중재하 직전인 도로포장 완료시까지의 변형량은 4.33mm로 관재에 발생한 총 변형량의 96.0%를 차지하고 있다. 포장이 완료된 후 3일간의 양생기간이 경과한 뒤 하중을 재하하였으며 그로 인해 발생한 순 변형량은 0.40mm로 나타났다. 이는 총 변형량의 9.0%를 차지하고 있다. 관재에 발생한 변형량 중 도로포장 후 양생기간동안 약 0.21mm의 변형회복현상이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 도로 포장 시공후에 나타난 변형량의 74%가 쇄석층(기층, 보조기층)시공중에 나타난 것으로 계측되었으며 하중 재하시험후의 관의 회복량을 최대 5시간까지 계측한 결과 0.02mm정도가 회복되는 것으로 나타났다. 이는 총변형량의 0.4%가 회복한 것이며 재하시험에 의해 발생한 순 변형량 0.40mm중 0.38mm만이 재하시험에 의해 관에 누적되었음을 알 수 있다. 관에 작용하는 압력은 도로시공중에는 약 2.21t/m²이 발생하였으며, DB-24 후륜 하중인 9.6ton이 재하 되었을 경우에는 관에 약 4.16t/m²이 작용하여 최대값을 보였다

3.5 결과 분석

그림 3.12는 도로시공에 의한 관의 변형률을 나타낸 것이다. 관의 변형률을 보면 표준다짐구간의 관이 빈다짐구간의 관보다 변형률이 더 크게 나오는데 이는 빈다짐구간의 되메움 모래는 흩어뿌리기를 하고 다지지 않은 반면, 표준다짐구간의 되메움 모래는 소정의 밀도를 맞추기 위해 진동 다짐기로 수회 왕복하여 다짐으로 인해 다짐에너지가 관재에 축적되어 관재의 변형률이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 매설깊이가 깊어지면서 관재의 변형률이 더 커지는데 이는 관 상부의 되메움 모래층이 두꺼워 지면서 상대적으로 더 많은 다짐층수에 더 많은 다짐에너지가 가해지기 때문에 관재의 변형률이 증가한 것으로 판단된다.

그림 3.13은 차량하중 재하실험만에 의해 발생한 관의 변형률을 나타낸 것이다. 변형률은 표준다짐구간보다 빈다짐구간이 더 크게 나오는데, 이는 표준다짐구간에선 충분한 다짐이 이루어졌기 때문에 연직 하중에 의한 관 측면의 약간의 변형으로도 저항압(수동토압)이 발생하여 관재의 변형을 억제하는 효과를 발휘하는 반면, 빈다짐 구간과 같이 다짐이 불충분한 경우에는 측면으로의 큰 변형이 일어난 후에야 비로소 저항토압이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 3.14~3.15는 도로시공과 차량하중 재하실험에 의해 발생한 총 변형률과 작용압력을 나타낸 것이다. 총 변형률의 양상은 도로시공 때의 변형률 양상(그림 3.12)과 비슷한데, 이는 변형률에 영향을 미치는 인자 중에서 다짐에너지(도로시공)가 수동토압(재하시험)의 영향보다 더 크게 작용한다는 것을 보여주고 있다. 그리고, 이 때 발생한 변형률은 KS C8455에 명시되어 있는 PE파형관의 허용변형률 기준 3.5%에 모두 만족하는 결과값을 나타내고 있어 매설깊이가 80cm아래에 묻힌 PE파형관은 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 관에 작용하는 압력은 매설깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 표준다짐구간에 미치는 압력이 빈다짐구간의 작용압력보다 더 큰 것으로 계측되었다.

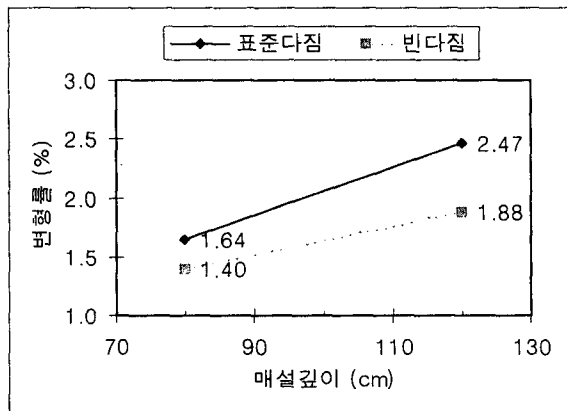


그림 3.12 관의 수직 변형률 (도로시공)

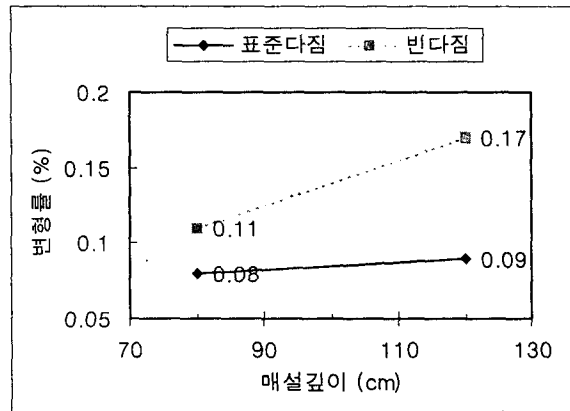


그림 3.13 관의 수직 변형률 (차량하중)

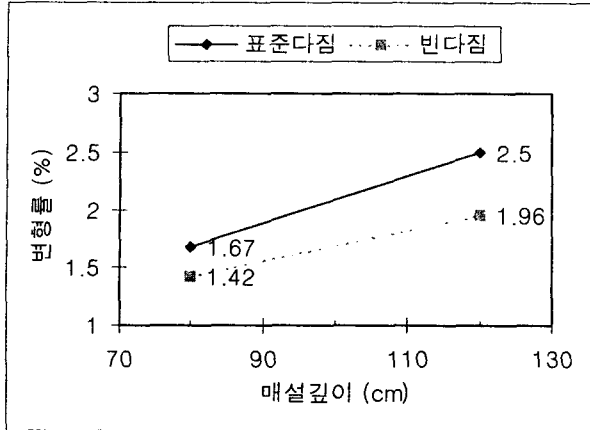


그림 3.14 관의 수직 변형률 (총거동)

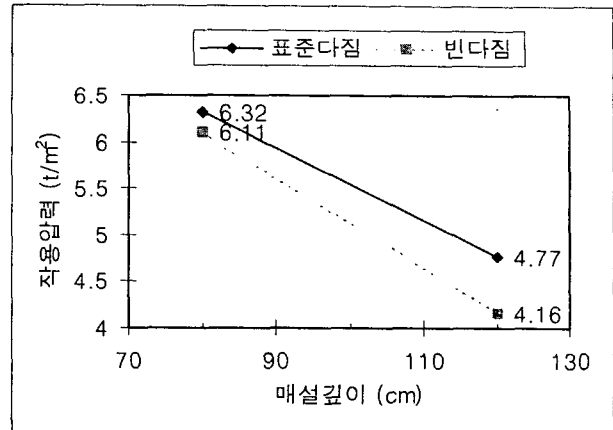


그림 3.15 관의 수직 작용압력 (총거동)

4. 결론

본 연구에서는 지중 연성관의 거동특성을 분석하기 위해 매설깊이와 되메움 재료의 다짐도를 해석의 변수로 주고, 현행 지중전력선 보호용 관로공사 시방서에 준한 시공을 실규모로 시행한 후 작용압력(토압+윤압)과 변형률을 계측하여 PE과형관의 안전성을 평가하였는데, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 도로시공에서 차량하중재하까지 지중연성관에 발생된 총변형량은 매설깊이 80cm에서 표준다짐시 3.84mm, 빈다짐시 3.27mm이고, 매설깊이 120cm에선 표준다짐시 5.74mm, 빈다짐시 4.52mm이다. 이 중 최대값은 매설깊이 120cm에서 표준다짐시의 값 5.74mm로써 변형률로 환산하면 약 2.5%인데, KS C8455에 명시되어 있는 연성관의 허용 변형률 기준 3.5%에 만족하므로 PE과형관은 매설깊이 80~120cm에서 차량하중(DB-24) 재하시 안전하다.
- 2) 표준다짐과 빈다짐시 차량하중에 의한 관의 변형을 분석해 보면, 다짐도의 증가는 관재의 변형을 다소 억제하는 역할을 하는 것으로 계측되었다.
- 3) 지중연성관의 변형에 가장 큰 영향을 주는 인자는 다짐 및 아스팔트 포장시 발생하는 다짐에너지로써 총 변형량의 약 98% 이상을 차지하고 있으며, 차량하중(DB-24)재하시에 발생한 변형량보다 훨씬 큰 값을 보이는 것으로 계측되었다.

참고 문헌

1. 김경열(2001), "지중연성관의 변형률 산정식 개발", 한국토목학회 2001 가을 학술발표회 논문집
2. 김동수(1990), "PE과형관의 구조적 안정 검토", 전기통신연구논문지.
3. 김진만(2000), "과형강관의 시험시공 및 현장계측 연구", 한국토목학회 2000 학술발표회 논문집.
4. 상현규(2001), "지중연성관의 거동특성 분석", 한국지반공학학회 2001 봄 학술발표회 논문집.
5. 오규환(2001), "지반침하가 매설배관의 건전성에 미치는 영향", 한국가스공사주관 제2회 배관손상 및 건전성진단 워크숍.
6. 이시용(1993), "관로포설공법의 개선연구", 한국통신 가입자망연구소.
7. 이이환 외 13인(1986), "지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술용역", 한국전력기술주식회사.
8. 조성수(1999), "지중배전 설계편람", 한국전력공사 전력연구원.
9. 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.