

Strain Characteristics of Underground Flexible Pipes Subject to Cyclic Vehicle Load

¹⁾, Kyoung-Yul Kim, ²⁾, Sung-Yun Hong, ³⁾, Dae-Hong Kim, ⁴⁾, Dae-Soo Lee

- 1) , M.T.S, Korea Electric Power Research Institute(patric@kepri.re.kr)
2) , M.T.S, Korea Electric Power Research Institute
3) , P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute
4) , P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

SYNOPSIS : In this paper, in order to examine cyclic behavior characteristics and safety of underground flexible pipes for electric cables subject to cyclic vehicle load, FEM analysis and cyclic soil box test were carried out. As results of the test, it was revealed that the vertical displacement of the test was larger than that of FEM analysis because thermal effect arising from power cables made reduction of rigidity of the pipe so that large deformation of the pipe induced by the heat occurred. Moreover, it was shown that the final vertical displacement under about 0.4 million times of the cyclic load test was not satisfied with elastic allowable displacement of the pipe, and long term stability of the pipe was not stable since behavior characteristics of the pipe exists plastic strain range pasted elastic strain range.

Key words : Underground flexible pipe, Cyclic soil box test, FEM analysis

1. 서 론

지중에 묻히는 매설관은 그 형태와 규모면에서 시대의 환경적 변화와 사회적 요구에 의해 나날이 발전을 거듭해 왔고, 이용분야 또한 다양해지고 있는 실정이다. 그러나 이와 관련한 연구는 지난 수십년동안 Spangler(1948), Marston(1930), Watkins(1993) 등 몇몇 연구자들에 의해 수행되었을 뿐이며, 특히 국내에서의 연구수행은 극히 미미한 실정이었다. 다행스럽게도 최근 들어 사회 환경개선차원에서 매설관을 사용하는 분야가 늘어남에 따라 이에 대한 안정성을 평가하는 연구가 점차 늘어나고 있는 추세이다. 그동안 국내에서 수행되었던 매설관에 대한 연구들을 살펴보면, 이이환 등(1986)은 지중관자체 적정규격 제정을 위한 연구를 통해 PE과형관의 장단점을 제시하였으며, 김동수(1990)는 PE과형관의 구조적 안정성을 고전 이론을 통해 정적하중에 따른 관재의 안정성을 분석하였다. 또한 김진만(2000)은 과형강관의 설계기준 및 시공지침에 관한 보고를 통해 과형강관의 거동특성을 해석하였으며, 오규환(2001)은 지반침하가 매설관의 건전성에 미치는 영향 등을 검토한 바 있다. 일본에서는 중앙전력연구소(CRIEPI)주관으로 차량하 매설방호관의 천층매설 검토연구(片岡哲之, 1988)가 수행되었으나, 연구된 관재들은 주로 강성관과 직관에 국한된 연구가 대부분을 차지하고 있기에 지중배전관과와 관계가 깊은 지중연성관(PE과형관)에 대한 연구는 더욱 더 필요한 실정이다.

본 연구에서는 포장도로 하부에 매설된 지중연성관이 일일 수천번 이상 진행되는 차량의 반복하중에 의해 발생하는 거동특성을 분석하였다. 연구방법으로는 유한요소법을 이용한 전산해석과 실내 대형 토조실

험을 이용한 반복하중 실험을 실시하였고 그 결과의 비교를 통해 A-1급 포장도로에 묻힌 지중연성관의 장기 안정성을 규명하였다.

2. 전산해석 및 실내 토조실험에 적용한 연구 조건

A-1급(도로폭 20m이상 및 이에 준하는 아스팔트 포장등급) 포장도로 하부 1000mm깊이¹⁾에 매설된 지중연성관이 일일 수천번 이상 진행되는 차량하중으로 인해 발생하는 관재의 거동특성과 안전성을 파악하기 위하여 전산해석과 실내 대형 토조반복실험을 수행하였다. 해석에 적용된 관재의 배열은 지반과 관재와의 단순한 거동특성을 규명하기 위하여 1단 1열의 단일관 배열을 실시하였다.

2.1 포장 등급

실험에 사용된 포장등급은 한국전력 지중배전 설계편람(조성수, 1999)에 기술되어 있는 포장등급별 단면으로써 지중배전 공사현장에서 배전관로를 포설한 후 도로를 재포장할 경우에 사용되는 포장단면이다(그림 1).

2.2 반복 하중

실제 차량주행에 따른 반복하중의 크기는 선행연구결과(이시용, 1993) 후륜하중(접지압 : $9.6\text{kg}/\text{cm}^2$)이 $50\text{km}/\text{h}$ 의 속도로 주행시 A-1급 아스팔트 포장층(200mm) 직하에서는 약 92%의 하중저감이 발생하여 약 $0.77\text{kg}/\text{cm}^2$ 이 작용하고, 매설깊이 100cm직하부근에서는 $0.25\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도가 작용한다고 보고되고 있는 것을 볼 때, 도로표층에서의 차량주행에 따른 작용하중 또한 접지압인 $9.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 보다는 적을 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서는 차량주행($50\text{km}/\text{h}$)에 따른 도로 포장층에서 실제 반복하중의 크기를 측정하는 데에 어려움이 있어 도로교 표준시방서(건교부, 1996)상의 DB하중에 대한 등급별 수치(표 1)중 최대하중인 교량등급 1등급의 DB-24 후륜하중 9.6ton을 실험하중으로 선택하였다.

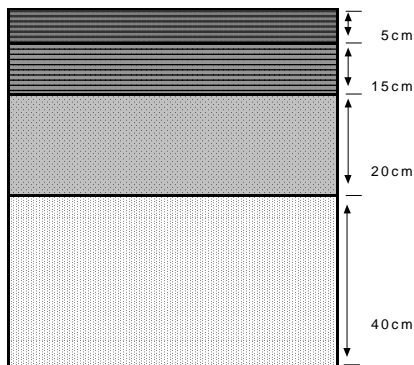


그림 1. A-1급 포장도로 단면도

표 1. 차량 하중

교량 등급	하중	총중량 (t)	전륜하중 (kgf)	후륜하중 (kgf)
1 등급	DB-24	43.2	2,400	9,600
2 등급	DB-18	32.4	1,800	7,200
3 등급	DB-13.5	24.3	1,350	5,400

3. 차량 반복하중 작용시 관재의 거동분석을 위한 전산해석

본 연구에 사용된 2차원 유한요소해석 프로그램(AFIMEX)은 지반변형해석(선형, 비선형, 탄소성)과 반복해석 및 압밀해석까지도 가능한 상용 프로그램이다.

1) 도로표면에서 최상단 매설관의 상부까지 깊이

3.1 입력 자료

지중연성관의 물성치를 나타내는 기본적인 요소로는 관의 전단탄성계수, 단면 2차모멘트, 감쇄비, 포아송비 등을 들 수 있으며 이들 요소는 전산해석시 보(beam)의 성질을 나타내는데 쓰인다(표 2). 해석에 사용된 지중연성관의 형상과 일반적인 규격을 표 3과 사진 1에 나타내었다. 또한, 도로단면의 물성치들은 A-1급 포장단면 아래에 시공되고 있는 대표적인 재료값들을 입력물성값으로 사용하였으며(표 4), 되메우기 재료로는 지중배전공사에서 사용되고 있는 모래 또는 양질의 토사에 대한 다짐도 85%값을 입력하였다. 한편, 해석에 사용된 최대하중은 9.6ton, 하중 지속시간은 20초, 최대주파수는 1.0Hz로 상하 수직방향 점가진(하중)법을 이용하여 해석을 실시하였으며 해석에 사용된 하중시간이력을 그림 2에 나타내었다.

표 2. 관의 입력물성치

전단탄성계수 (t/m ²)	단면2차모멘트(m ⁴)	단면적 (m ²)	감쇄비	포아송비
25,000	3.5×10 ⁻⁹	0.0035	0.05	0.40

표 3. PE과형관 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 4. 포장도로 입력 물성치

구 분	표 층	중간층	기층	보조기층	모래	원 지반
층두께(m)	0.05	0.15	0.2	0.4		
전단강성(t/m ²)	80,769	73,077	10,714	7,143	833	431
포아송비	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.45
감쇠정수	0.05	0.05	0.03	0.03	0.01	0.02



사진 1. PE과형관

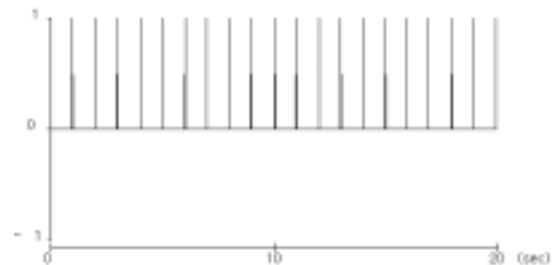


그림 2. 하중-시간이력 곡선

3.2 해석 조건

실제 토조반복실험과 동일한 해석을 실시하기 위하여 해석단면은 차량 접지폭의 6배인 3.0m정도로 응력의 영향범위를 고려하여 좌우경계를 취했으며 지중관로는 보(beam)로 모델링하였다. 좌, 우측의 경계조건은 그림 3과 같으며, 지반모델은 선형탄성모델을, 격자는 사각형격자를 주로 사용하였다. 해석에 따른 관재의 안정성 판단기준은 KSC 8455에 제시되어 있는 관재의 외경기준 3.5%변형율을 이용하였으며 반복하중에 의해 관재에서 발생하는 수직변형율을 산출하여 관로의 안정성을 판정하는데 이용하였다.

3.3 전산해석 결과 및 분석

반복하중에 의한 매설관재의 거동특성을 분석하고자 전산해석을 실시한 결과, 연성관의 최대 수직변형

량은 9.94mm, 수직변형율은 4.32%로 나타났다(표 5). 이때 관재의 직상부에서 작용하는 수직압력(토압+윤압)은 1.97kg/cm²으로 해석되었다(표 6). 표 5에서 보는 바와 같이 관로의 침하량은 관 상부에서 29.36mm가 발생하고 관하부에서 19.42 mm가 발생하여 관로의 상하부간 최종 수직변위량은 9.94mm가 된다. 이 값은 연성관의 허용변형량 값인 8.05mm보다 1.89mm정도 변형이 더 발생한 것으로서 허용변형량을 만족하지 못하는 것으로 나타나 반복하중(접지압:9.6kg/cm²)이 관재의 장기안정성에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

표 5. 전산해석 결과 (수직변형율)

관로 수직변위량 (mm)			수직변형율 (%)
上	下	上-下	
29.36	19.42	9.94	4.32 %

표 6. 전산해석 결과 (수직압력)

수직압력 (kg/cm ²)	
관 上	관 下
1.97	1.93



사진 2. 실내 토조실험 장치

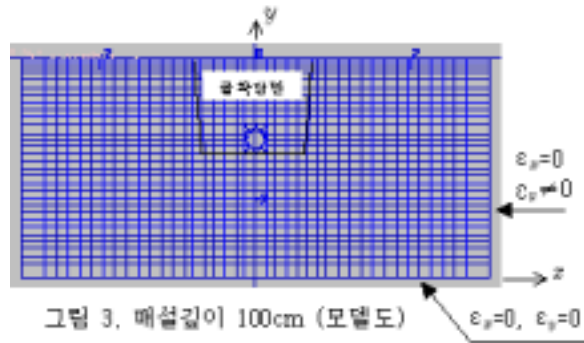


그림 3. 배설깊이 100cm (모델도)

4. 실내 토조 실험

4.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 실내 토조의 크기는 3,000×2,200×3,000 mm이며, 차량 반복하중을 모사하기 위한 장치로는 가력능력 25ton의 Actuator를 이용하였다(사진 2). 실험에 사용된 반복하중의 크기는 전산해석시와 동일한 DB-24차량하중의 후륜하중 9.6ton을 사용하였으며, 최대주파수는 1.0Hz로 관재의 직상부 도로표층에서 상하 수직반복을 가하는 것으로 반복실험을 실시하였다. 실험에 사용된 관재의 배열은 전산해석과 동일한 단일관(1단 1열)으로 하였다. 이때 배전케이블에서 발생하는 열(65℃)이 관재의 강성에 미치는 효과를 고려하기 위하여 연성관내부에 Heat cable을 제작하여 관로내부에 포설한 후 실험을 수행하였다. 이 점이 전산해석과 다른점으로써 전산해석에서는 열효과를 고려하지 못하는 한계가 있다.

4.2 실험 방법

실내 토조실험 수행시 실험의 성공을 좌우하는 가장 중요한 변수는 현장 상황과 거의 유사한 도로포장층(다짐도 95%)을 포설하는 일이다. 본 실험에서는 토조내부에 포설될 아스팔트 포장층의 다짐도 기준 95%를 맞추기 위해 옥외에 직접 A-1급 포장층 도로를 포설하고 6ton 반복롤러를 이용하여 아스팔트 포장층의 다짐도를 95%이상 다져 경화를 시킨 후, 실내 토조에 맞는 크기(3.3×2.0×3.0m)로 절개하여 채석포설이 완료된 토조내부에 이동 포설하였다. 실내 반복 토조실험의 수행을 위한 실험 방법은 다음과 같다.

- (1) 반복실험을 위해 제작된 토조내부에 모래를 30cm씩 포설하고 반복다짐기(90kg)를 이용하여 85%다짐도로 모래를 채운다.
- (2) 180cm길이의 지중연성관 내부에 그림 4에서 보는 바와 같이 LVDT(50mm)를 설치하고 관로 직상단에 토압계(500kPa)를 설치한다.
- (3) 배전케이블의 열효과를 고려하기 위하여 Heat cable(65℃)을 연성관 내부에 포설한후 2일이상 방치하여 실험을 실시한다(사진 3).
- (4) 연성관을 토조내부에 포설한 후, 모래로 되메움하고 도로 포장용 쇄석(보조기층, 기층)을 포설한다. 이때 다짐도는 노상의 다짐도 기준인 95%에 맞게 다짐을 수행한다.
- (5) 쇄석포설 종료후, 아스팔트 포장층 20cm를 포설한다.
- (6) 재하판은 DB24를 기준으로 차량 후륜의 접지폭과 같은 500×200mm(t=30mm)의 강판을 이용하며, 도로 표층의 편칭방지와 차량의 타이어 연성효과를 고려하기 위해 3mm의 고무판 2장을 재하판 하부에 부착후 실험을 실시한다(사진 3).
- (7) 최대주파수 1.0 Hz로 Actuator를 이용하여 9.6ton을 연속적으로 재하시킨다.
- (8) 데이터의 취득은 실험데이터가 방대한 관계로 1초에 4번의 값을 취득하는 것으로 설정한다.

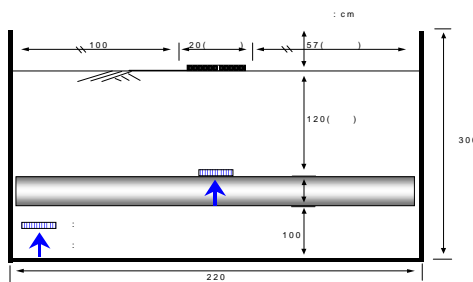


그림 4. 토조내 계측기 설치

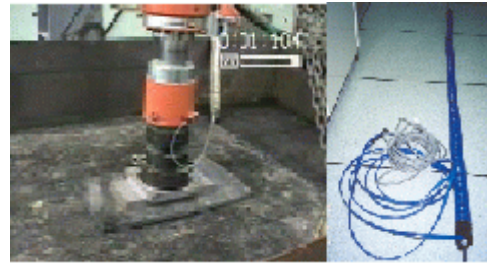


사진 3. 고무판 및 열선 제작

4.3 실험 결과 및 분석

실내 토조실험에 사용된 반복하중의 재하시간 및 횟수는 118시간동안 약 420,000번을 재하하였으며, 관재의 수직변위가 예상치인 허용변형량을 초과하였을 때 실험을 종료하였다. 그 결과 나타난 시간에 따른 수직변위곡선과 관 직상부에서의 수직압력곡선을 그림 5와 그림 6에 도시하였다. 반복하중 재하에 따른 관재의 수직변형은 반복하중 재하 시작 후 0.8초가 지나면서 순간 최대수직변위 3.35mm가 발생하였고, 실험종료시까지 발생한 관재의 최종변위는 13.80mm로 나타났다. 순간 최대 수직변위 3.35mm는 최종변위 13.80mm의 24%에 해당하는 변형량으로써 하중 재하시작 직후에 최대변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 관로의 변위양상은 하중재하 초기에 가파른 변형곡선을 보이다 시간이 지남에 따라 일정한 수치로 완만하게 수렴해 가는 것으로 나타났다(그림 5).

실험 시작 16시간(재하횟수:57,600)후에 연성관의 수직변형량이 8.10mm로 측정되어, 허용변형량인 8.05 mm를 초과하였는데, 이는 A-1급 포장도로에 외부하중이 가해질 경우 지반은 탄성거동의 형태가 아닌 소성거동의 형태로 거동하여 관재에 변형을 유발시키는 것으로 판단된다. 실험에 사용된 차량의 반복하중은 정적하중의 크기와 같은 값(DB24_후륜 9.6ton)을 사용하였으나, 실제 차량의 주행에 따른 반복하중의 크기는 후륜하중 9.6ton보다는 작을 것으로 예상되기 때문에 실험결과 나타난 하중재하 16시간후의 수직변형량 8.10mm와 최종 변위 13.80mm는 실제 도로 표층에서 발생하는 반복하중의 크기로 실험을 수행할 경우 더 많은 경과시간에서 더 작은 값이 나타날 것으로 예상된다.

한편, 그림 6의 시간에 따른 압력곡선에서는 관재에 작용하는 순간 최대수직압력 역시 하중 재하 시작 후 0.8초가 지나가면서 0.1kg/cm²가 발생하는 것으로 나타났다. 관재가 받는 작용압력의 양상은 재하시간 초기에 급격한 압력의 증가를 보이다 시간이 경과하면서 작용압력의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 여기서 하중재하 30시간후의 작용압력이 0.3kg/cm²이고 118시간(재하횟수 : 420,000회)후의 작용압력이

0.28kg/cm²으로 나타난 것을 볼 때, 반복하중에 의해 관상부의 작용압력은 시간이 지나면서 그다지 커지지 않고 일정한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 도로 표층에 가해진 반복하중(접지압:9.6kg/cm²)은 도로의 포장층을 지나 관 상부에 전달될 때에 약 97%의 작용압력 저감효과가 발생하여 실제 반복하중의 3%정도인 0.28kg/cm²의 작용압력만이 전해지는 것으로 나타났다.

시간이 지남에 따라 관재에서 발생하는 수직변형량은 조금씩 증가를 하고 있지만 관재 직상부에서 발생하는 작용압력은 시간이 지나도 일정한 크기로 유지되고 있는 것으로 나타났는데, 이런 현상이 발생하는 원인은 관재의 변형이 탄성영역(허용변위:8.05 mm)을 지나 소성영역으로 가고 있기 때문에 일정한 하중하에서도 변형이 증가하는 크리프 변형(creep strain)이 원인인 것으로 판단된다.

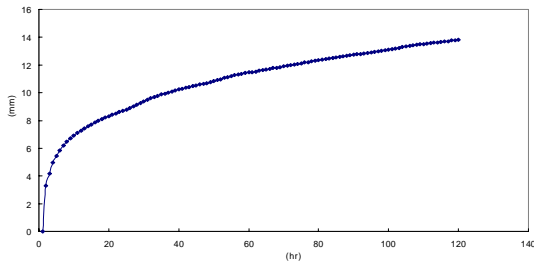


그림 5. 시간-수직변위 곡선

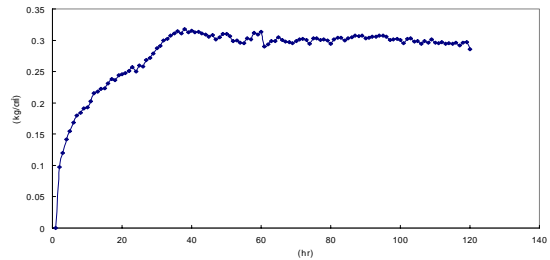


그림 6. 시간-수직압력 곡선

5. 해석결과 비교

그림 7에서 보는 바와 같이 지중연성관에 발생한 최대 수직변형량의 크기는 실내 토조 실험결과(13.80 mm)가 전산해석 결과(9.94mm)보다 약 1.4배정도 더 크게 발생하는 것으로 해석되었다. 이와 같이 전산해석의 결과가 실내 토조실험의 결과와 차이를 보이는 이유는 지중연성관 내부에 포설되는 케이블에서 발생하는 열효과(65℃)의 고려 유무와 해석수법에 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 그중 변형에 가장 큰 영향을 준 요인은 지중연성관 내부에 Heat cable을 설치한 것이 연성관의 강성을 떨어뜨려 더 큰 변형을 발생시킨 것으로 판단되며, 이는 선행연구(片岡哲之,1988)결과에서도 열효과가 관재의 강성을 저하시킨다는 보고와 잘 일치하고 있다. 이처럼 현장에서 발생하는 케이블의 열효과를 고려한 실내 토조실험과는 반대로 전산해석에서는 열효과를 고려하지 않았기에 실내 토조 실험결과보다 적은 수직변형이 발생된 것으로 판단된다.

또한, 지중연성관에 작용하는 수직압력의 경우(그림 7)는 전산해석 결과(1.97kg/cm²)가 실내 반복실험 결과(0.28kg/cm²)보다 크게 발생하는 것으로 해석되었다. 실내 반복실험의 결과가 이처럼 작은 값을 보이는 가장 주된 이유는 상부에서 전달되는 작용압력이 관재 직상부에서 연성관의 변형으로 소산되면서 그 값이 작아지기 때문인데 관재 내부에 포설되어 있는 Heat cable의 열효과에 의해 관재의 강성이 줄어들어 변형이 더 크게 발생하는 것이 작용압력을 작게 만드는 원인인 것으로 판단된다.

표 7. 각 해석결과 비교(매설깊이 100cm)

구 분	전산해석	실내 실험	안정성 기준
최대수직변형량(mm)	9.94	13.80	8.05 이하
최대수직압력(kg/cm ²)	1.97	0.28	-
도로 표층침하량(mm)	29.5	77.9	-

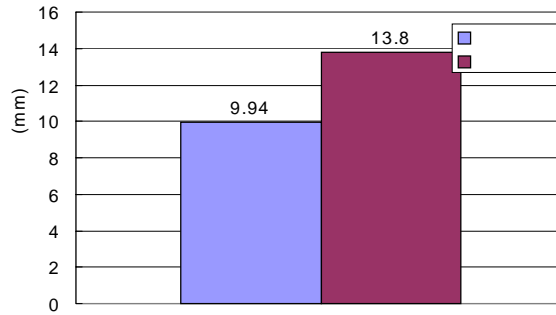


그림 7. 수직변형량 비교

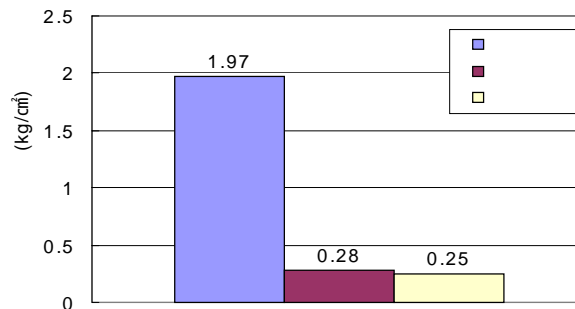


그림 8. 수직압력 비교

6. 결 론

본 연구에서는 A-1급 포장도로 하부에 매설된 지중연성관(PE과형관)이 외부로부터 반복하중을 받았을 경우 발생하는 관재의 거동특성과 그때의 안정성을 규명하고자 전산해석과 실내 대형토조 반복 실험을 수행하였으며, 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지중연성관에 발생한 최대 수직변형량의 크기는 실내 토조 실험결과(13.80 mm)가 전산해석 결과(9.94mm)보다 약 1.4배정도 더 크게 발생하였으며, 이는 토조 실험시 관재 내부에 포설한 열선케이블이 관재의 강성을 떨어뜨려 변형을 더 유발시킨 것으로 판단된다.
- (2) 지중연성관에 작용하는 수직압력의 경우는 전산해석 결과(1.97kg/cm²)가 실내 반복실험 결과(0.28kg/cm²)보다 크게 작용하는 것으로 나타났는데, 실내 반복실험 결과값이 작은 이유는 상부에서 전달되는 작용압력이 관재의 직상부에서 연성관의 변형으로 소산되면서 그 값이 작아진 것으로 판단된다.
- (3) 실험에 사용된 차량의 반복하중은 정적하중의 크기와 같은 값(DB24_후륜 9.6ton)을 사용하였으나, 실제 차량의 주행에 따른 반복하중의 크기는 후륜하중 9.6ton보다는 작을 것으로 예상되기 때문에 실험 결과 나타난 최종 변위 13.80mm는 실제 도로 표층에서 발생하는 반복하중의 크기로 실험을 수행할 경우 더 많은 경과시간에서 더 작은 값이 나타날 것으로 예상되며 추가 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. 건교부(1996), "도로교표준시방서", pp37-39
2. 김동수(1990), "PE과형관의 구조적 안정 검토", 전기통신연구논문, pp49-57
3. 오규환(2001), "지반침하가 매설배관의 건전성에 미치는 영향", 한국가스공사주관 제2회 배관손상 및 건전성진단 워크숍
4. 이시용(1993), "관로 포설공법의 개선연구", 한국통신 가입자망연구소, pp36-40
5. 이이환 외 13인(1986), "지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술용역", 한국전력기술주식회사, pp109-152
6. 조성수(1999), "지중배전 설계편람", 한국전력공사 전력연구원. pp36-70
7. 片岡哲之(1988), "配電地中化における車道下埋設ケ - ブル防護管の淺層埋設の検討", CRIEPI, pp37-40
8. Marston(1930), "The Theory of External Loads on Closed Conduits", Bulletin No. 96, Iowa ENG.
9. Spangler(1948), "Underground Conduits", Transaction ASCE, VOL 113.
10. Watkins(1993), "Structural Mechanics of Buried Pipes", Utah UNI, UT 84322