

지중 연성관의 거동특성 분석

Analysis of Behavior for Underground Flexible Pipes

김 경열¹⁾, Kyoung-Yul Kim, 상 현규²⁾, Hyun-Kyu Sang, 이 대수³⁾, Dae-Soo Lee

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

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

³⁾한전 전력연구원 책임연구원, P.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 paper, stress and strain of flexible pipes with various depth are calculated using traditional formula and FEM analysis. The results show that theoretical values are more conservative in strain whereas FEM analysis gives larger stress. Considering the strain criteria - 3.5 %, maximum, flexible pipes can be buried at the range of 50cm to 5m in depth without additional soil improvement.

Key words : underground flexible pipes, strain criteria, traditional formula

1. 서론

산업사회의 발달로 도시화가 촉진되고 그에 따라 도시의 인구집중으로 도심 밀집현상이 일어나 빌딩이 초고층화 될 뿐만 아니라, 신규 택지개발 등 신도시 건설이 활발해지면서 도시의 쾌적한 공간활용이 많이 요구되어지고 있다.

따라서, 전력공급신뢰도 향상과 도시미관 저해요인 해소 등 환경개선 측면에서 가공배전선로를 철거하고 대신 지중배전선로로 전력을 공급하는 이른바 지중화 사업이 진행되고 있다. 최근에는 기존의 도심지 중심으로부터 벗어나 신도시 및 신규공단 등 점차 다양한 지역으로 활발히 확대되고 있다. 더불어 사회환경 및 생활환경이 변화함에 따라 전력의존도는 계속 높아지고 그럴수록 공급신뢰도 향상은 가일층 요구되지만, 전력공급여건은 더더욱 어려운 상황으로 전개되고 있는 입장이다. 지방자치시대의 활성화 및 주민의 권리의식 팽배는 지중화를 추진하는데 해당 지역의 원활한 협조를 기대하기 어렵게 만들고, 이와 같은 사회환경의 변화에 따른 환경친화설비 구축에 대한 경제적 부담도 가중되고 있다.

하지만, 우리나라 가공선로에 대한 지중화 건설비용은 5~7배나 소요되고 있어 전력사업이 경쟁시대로 변모하고 있는 현 상황에서 공사비의 절감없이는 지중화 사업의 추진이 곤란할 것으로 예상된다. 특히 외국에 비하여 지중연성관의 매설기준(d=120cm)이 깊기 때문에 굴착공사비가 과다하게 소요되고 있는 실정이므로, 매설깊이를 줄여보고자 하는 노력(천층매설방안)이 시도되고 있다.

이에, 본 연구에서는 고전이론과 수치해석을 통해 지중 연성관의 침하특성, 토압특성, 변형률 특성 등에 대한 평가를 수행하여 관의 천층매설(d=100cm 및 그 이하)에 대한 안정성을 검토하고자 한다.

2. 연성관(Flexible Pipe)이론

관이 하중에 의해 직경의 약 2%정도의 처짐이 생겼을 때 갈라지는 현상 등의 구조적인 문제가 없는 경우 이를 연성(Flexible)관으로 정의한다.

매설된 합성수지관은 이 연성관의 이론을 적용하여 그 거동을 해석하여야 한다. 연성관의 지지강도의 원천은 관의 유연성으로부터 나오는 것으로 토압하에서 관이 수직방향의 변형을 일으키면 그것에 의해 관측면에 수동토압을 발생시키고, 관의 상부에 활모양으로 둘러싸고 있는 토압에 의해 생긴 수직하중에 의한 주된 처짐은 감소하게 되어 매설관의 유효강도는 매우 높아진다.

연성관을 설계할 때 보통 다음 두가지 사항을 고려하는데 첫 번째는 관의 변형의 한계이고, 두 번째는 관벽에 가해지는 압축하중이다. 일반적으로는 압축하중에 따라서 적절한 관두께를 선택하여 관의 변형한계에 대한 적합여부를 검토하는 방법이 추천되고 있다. 보통 국부변형은 직경이 매우 큰 관을 제외하고는 고려하지 않는다. 왜냐하면, 사용되고 있는 관에서 과도한 처짐에 의해 파괴가 진행되지 않는 한 국부변형에 의한 파괴는 없기 때문이다.

연성관의 적합성 판정에 이용되는 방법은 편평 시험이며, 편평 시험(압축 시험)은 관자재의 압축변형에 관한 시험이다. KS C8455에 의하면 관상시료를 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.

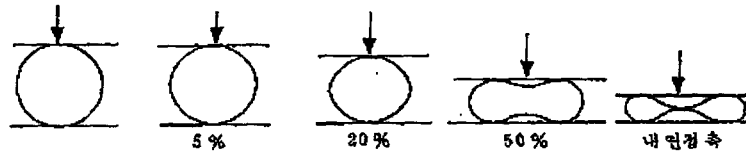


그림 1. 연성관의 압축 변형 형상

편평 시험 결과 3.5%변형시까지 관은 탄성 거동을 보이다가 3.5%를 초과하게 되면 관은 소성상태로 들어가고, 관에 가해진 압력으로 인한 변형이 관에 누적되어 파괴상태에 이르게 된다. 따라서, 관의 강도를 시험하기 위한 편평시험 기준은 변형을 3.5% 이내로 하는 것이 합리적이고, KS C8455에서도 연성관의 허용압축강도를 갈라짐 또는 깨어짐이 생기지 않고, 시료 바깥지름 변형률이 3.5%이하이어야 한다고 규정하고 있다.

3. 고전이론에 의한 해석

기존 연구결과에 의하면 토압에는 수직공식, 윤압에는 확산공식이 실내 시험 및 현장시험치와 잘 맞는 결과를 보여주고 있어서 이 두 공식이 추천되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수직공식 및 확산공식을 이용해서 관이 받는 응력을 해석하고, 관의 변형량은 Spangler의 IOWA공식을 이용해 거동특성을 이론적으로 분석했다.

3.1 토압 (수직 공식)

포장층의 단위중량은 $2.3 t/m^3$, 두께는 80cm로 가정하고 되메움재인 모래의 단위중량은 $1.8 t/m^3$ 로 보고 다짐도 85%시의 단위중량을 $1.615 t/m^3$ 로 가정하여 다음식에 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)

3.2 운압 (확산 공식)

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

여기서, $p_2 = 9600 \text{ kg}$ (DB24 후륜하중)

$a = 20 \text{ cm}$ (접지폭)

$b = 50 \text{ cm}$ (접지길이)

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

$h \leq 0.6\text{m} \rightarrow im = 0.2$

$h \leq 0.9\text{m} \rightarrow im = 0.1$

$h \geq 1.0\text{m} \rightarrow im = 0$

$\alpha = 45^\circ$ (분산각), $h = \text{토퍼}$ (cm)

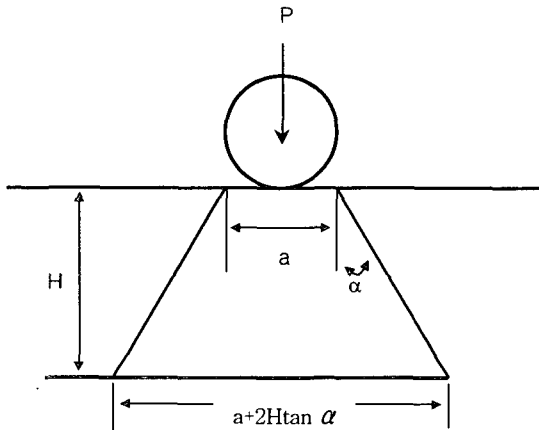


그림 2.1. 확산 공식 적용도 (측면)

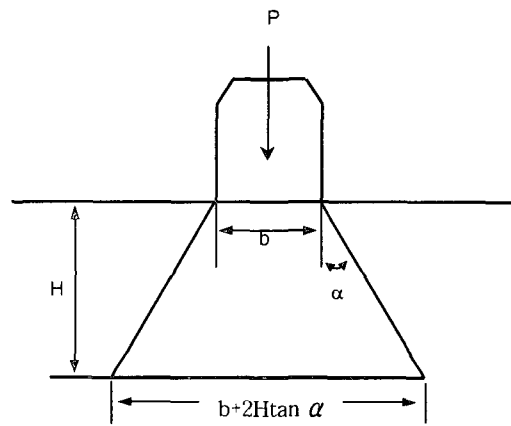


그림 2.2. 확산 공식 적용도 (정면)

3.3 매설관의 변형량 (Spangler's IOWA 공식)

$$\Delta x = D_1 \times \frac{K \cdot W_c \cdot r^3}{EI + 0.061 E' \cdot r^3} = 0.03779 \times W_c \quad (3)$$

여기서 $D_1 = 1.5$ (변형지체계수)

$K = 0.108$ (지지각에 따른 계수)

$r = 11.5 \text{ cm}$ (관의 반경)

$D = 23 \text{ cm}$ (관의 외경), $d = 17.5 \text{ cm}$ (관의 내경)

$W_c = (\text{토압} + \text{운압}) \times D$ (연직하중, kgf/cm)

$E = 7000 \text{ kgf/cm}^2$ (관의 탄성계수)

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

$t = 0.35 \text{ cm}$ (관의 두께)

$E' = 70 \text{ kg/cm}^2$ (흙의 반력계수)

3.4 해석결과 및 분석

다음 그림들은 지중배전공사에 많이 사용되고 있는 내경 175mm, 외경 230mm, 두께 3.5mm의 PE파형관을 다짐도 85%의 모래로 되메움하고, 그 위에 A-1급 포장도로를 시공했을 때 관이 받는 수직압력과 수직변형율을 이론식에 의해 계산한 것을 나타낸 것이다.

그림 3과 그림 4는 매설깊이 0~200cm사이에서의 연성관이 받는 응력과 변형율을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 토압은 매설깊이가 깊어질수록 증가하고 윤압은 감소하는 경향을 보이며, 이 두 힘의 합력은 100~120cm 깊이에서 최소값을 나타내고 있다. 변형율은 50cm까지 급격히 감소하다가 이후 점차 완만해지는 경향을 보이고 있다.

매설깊이 200cm까지 이론식에 의한 계산결과, KS C8455에 명시되어있는 관의 허용 변형율 기준인 3.5%값에 만족하는 매설깊이는 약 50cm이상으로 판명되어, 천층매설깊이 100cm에서 매설관의 변형율은 기준값을 만족하고 있음을 보여주고 있다.

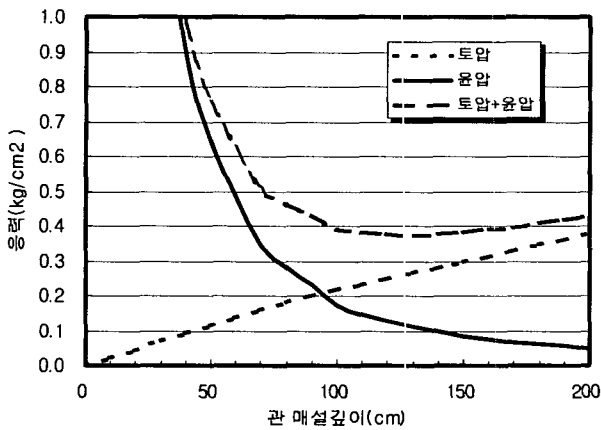


그림 3. 매설깊이별 수직응력

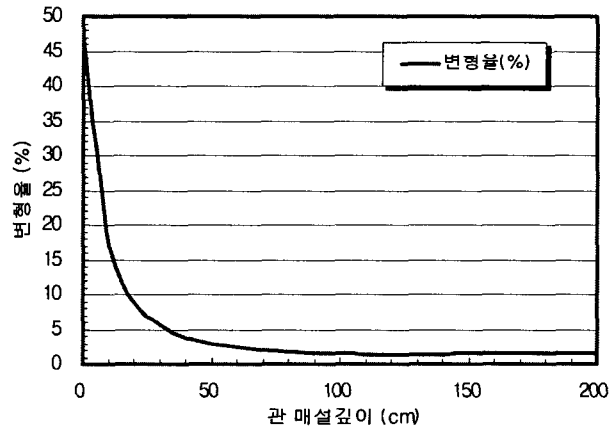


그림 4. 매설깊이별 수직변형율

4. 수치 해석

본 단면의 복잡한 관매설 조건을 수치해석상에서 재현하기 위해 2차원 FEM 프로그램인 AFIMEX을 이용하여 연성관을 2단 3열 배열했을 때의 관의 역학적 거동을 분석하였다.

4.1 입력자료

4.1.1 PE파형관의 물성치

관의 특성을 나타낼 수 있는 기본적인 요소로는 탄성계수, 단면2차모멘트, 단면적, 단위중량, 포아송비 등을 들 수 있으며 이들 요소는 보(beam)의 성질을 나타내는데 주로 쓰인다.

표 1. PE 파형관 물성치

탄성계수 (t/m^2)	단면2차모멘트 (m^4)	단면적 (m^2)	단위중량 (t/m^2)	비 고
70,000	4×10^{-9}	0.0035	0.95	

4.1.2 도로단면의 물성치

본 연구에 사용된 도로단면의 물성값들은 현재 주요 간선도로 및 이에 준하는 도로의 아스팔트 포장 단면(A-1급)아래에 시공되고 있는 재료값들을 입력 물성값으로 사용하였다(표 2). 원지반은 조밀한 점토질 흙(Dense Clay)을 대상으로 추정하였다. 되메우기 재료로는 지중배전 설계편람에 기술되어 있는 모래 또는 양질의 토사에 대한 다짐도 85%값을 입력하였다.

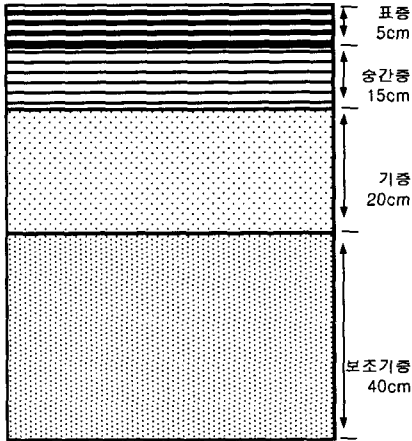


표 2. 포장도로 층별 물성치

구분	표층	중간층	기층	보조기층	모래	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
내부마찰각(deg)	35	35	35	35	35	25
단위중량(t/m ³)	2.3	2.3	2.3	2.2	1.615	1.8

그림 7. A-1급 포장도로 단면도

4.1.3 하중

도로굴착 후 관로포설을 끝마치고 되메우기와 함께 도로를 재포장한 상태에서의 관의 거동 특성을 분석하기 위해 적용한 차량하중은 DB-24 차량하중을 기준으로 삼았으며, 뒷축 한바퀴에 걸리는 후륜하중은 최대 9.6 ton, 접지면적 0.1m²(0.5×0.2)로 산정하였다. 이때의 접지압은 96t/m²이다.

4.2 해석방법

수치해석에 적용된 단면은 차량 접지폭의 6B인 3.0m정도로 좌우경계를 취했으며 관로는 보(beam)로 모델화하였다. 좌, 우측의 경계는 수평방향 이동을 고정시키는 연직로울러로, 하단은 좌, 우방향 모두를 고정시키는 고정단으로 조건을 주었다.

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

4.3 해석결과 및 분석

그림 8은 지중에 연성관을 2단 3열 배열하고 관상단까지 천층매설깊이 100cm일 때 유한요소해석에 이용된 모델도이다. 그림 9는 해석 후 지중에서 관의 변형형상을 보여주는 변형도이다. 그림 9에서 보듯이 지중에서 관이 압력을 받을 때 가장 큰 압력과 변형값을 갖는 곳은 상단 가운데 관이며, 이때에 관은 전체적으로 침하하면서 연직방향으로 최대변형율이 나타남을 알 수 있다.

그림 10은 해석종료 후 지중에서의 수직변위량을 나타낸 변위도이고, 그림 11은 지중에 분포되는 수

직응력을 나타낸 응력도이다. 그림에서 보면 하중이 상정된 도로 최상단은 약 1.0cm 정도의 침하량을 보여주고 있으며 관중양 상단부위에서는 1.27kg/cm² 정도의 수직응력을 받는 것으로 나타났다.

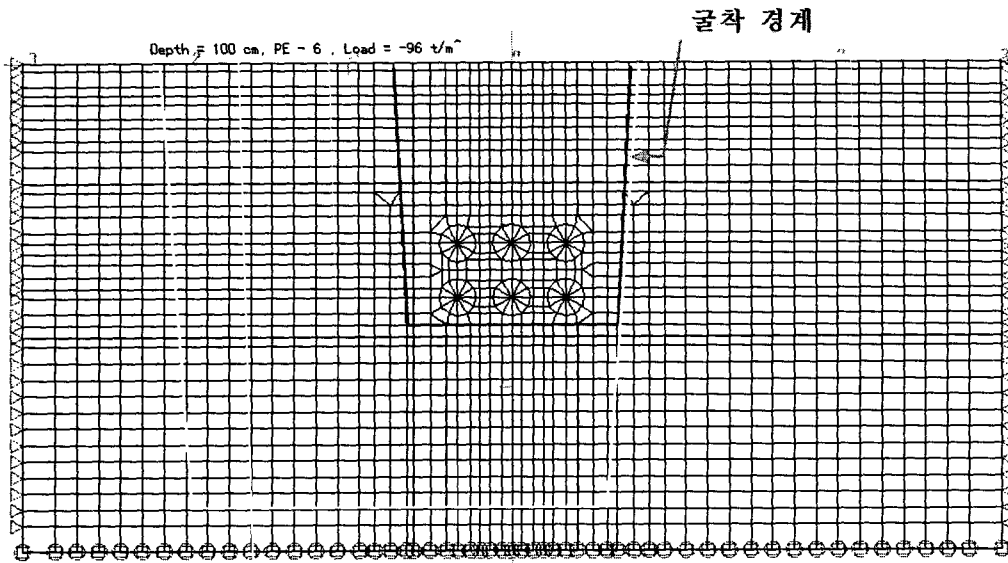


그림 8. 수치해석 모델도

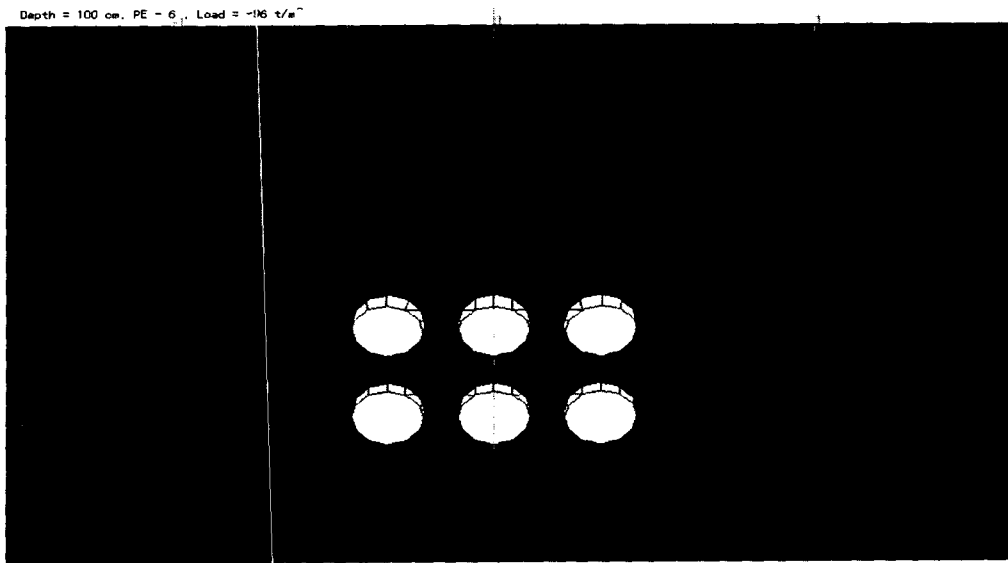


그림 9. 변형도

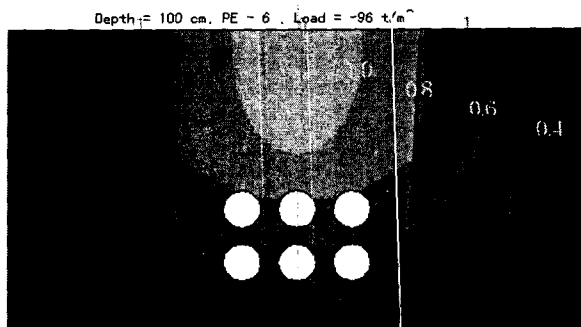


그림 10. 수직변위도 (cm)

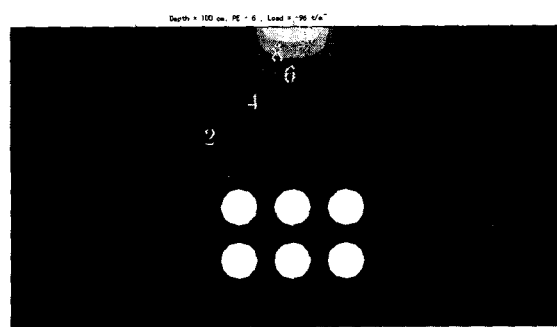


그림 11. 수직응력도 (kg/cm²)

5. 이론치와 수치해석 결과 비교

표 3에 수치해석과 이론값에 의한 매설깊이별 관의 거동 특성을 비교하였다. 해석결과에 의하면 매설 깊이가 100cm에서 관의 수직변형율은 허용변형율 3.5%에 크게 밑도는 결과를 나타내고 있으며, 수직응력 또한 본 연구에 사용된 매설관의 일반적인 압축 허용응력값 25kg/cm²를 크게 밑도는 결과를 나타내는 것으로 볼 때 두 방법 모두 허용치에 만족하는 결과를 보여주고 있다.

표 3. 수치해석값과 이론값의 비교

관 매설깊이 (cm)	수치해석			이론식		
	응력(kg/cm ²)	변형량 (cm)	변형율 (%)	응력(kg/cm ²)	변형량 (cm)	변형율 (%)
20	1.51	0.35	1.51	2.36	2.05	8.91
30	1.73	0.39	1.71	1.49	1.29	5.62
40	1.65	0.32	1.37	0.98	0.85	3.70
50	1.74	0.29	1.26	0.76	0.66	2.85
60	1.70	0.27	1.16	0.62	0.54	2.35
70	1.52	0.29	1.27	0.51	0.44	1.92
80	1.30	0.30	1.29	0.46	0.40	1.75
90	1.16	0.25	1.07	0.43	0.37	1.62
100	1.27	0.23	1.02	0.39	0.34	1.48
110	0.75	0.21	0.90	0.38	0.33	1.44
120	1.18	0.21	0.90	0.38	0.33	1.42

그림 12, 13의 이론식에 의한 해석결과를 보면, 수직응력은 매설깊이 120cm정도 까지 급격히 감소하다가 다시 토압의 영향으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 수직변형율은 매설깊이가 깊어짐에 따라 급격히 감소하다 매설깊이 120cm에서 최소값을 보여주고 있다.

또한 전산해석 결과를 보면, 수직응력은 매설깊이 110cm정도 까지 감소하다가 다시 토압의 영향으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 수직변형율은 매설깊이가 깊어짐에 따라 감소하다 매설깊이 110cm에서 최소값을 보여주고 있다.

한편, 각 해석별 수직응력의 경우는 유한요소해석결과 값이 이론식값보다 큰 경향을 보여주고 있으며, 수직변형율의 경우는 이론식값이 유한요소해석결과 값보다 큰 값을 보여주고 있다.

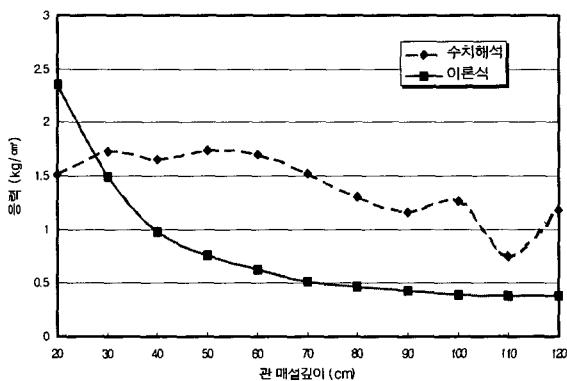


그림 12. 수직응력 비교

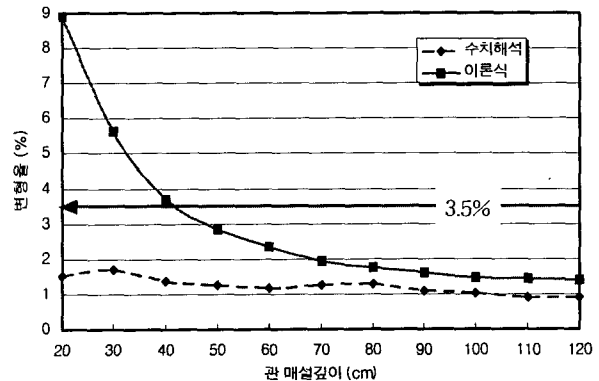


그림 13. 수직변형율 비교

6. 결론

본 연구에서는 고전이론식과 유한요소해석을 이용하여 지중에 묻힌 연성관이 상재하중(토압+윤압)에 의해 받는 영향을 고찰하였으며, 수직변위량 및 수직응력에 관한 결과를 토대로 현 매설기준(120cm)보다 얇게 천층매설(100cm 및 그 이하)하였을 경우에 대한 거동특성을 분석하였다. 본 검토에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이론식에 의한 해석결과, A-1급 포장도로밑에 매설된 연성관 상단의 수직응력은 매설깊이 120cm정도 까지 급격히 감소하다가 다시 토압의 영향으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 수직변형율은 매설깊이가 깊어짐에 따라 급격히 감소하다 매설깊이 120cm에서 최소값을 보여주고 있다.
- 2) 유한요소해석 결과, A-1급 포장도로밑에 매설된 연성관 상단의 수직응력은 매설깊이 110cm정도 까지 감소하다가 다시 토압의 영향으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 수직변형율은 매설깊이가 깊어짐에 따라 감소하다 매설깊이 110cm에서 최소값을 보여주고 있다.
- 3) 각 해석별 수직응력의 경우는 유한요소해석결과 값이 이론식값보다 큰 경향을 보여주고 있으며, 수직변형율의 경우는 이론식값이 유한요소해석결과 값보다 큰 값을 보여주고 있다.
- 4) 이론식 해석결과와 수치해석결과를 종합적으로 비교 분석해 볼 때, 천층매설깊이(100cm)에서의 관의 수직변형율은 허용변형율 3.5%를 만족하고 있고, 관의 수직응력 또한 압축허용응력 25kg/cm²를 만족하고 있으므로 안전하다고 판단되어지며, 향후 실증실험을 통한 검증작업이 수행될 예정이다.

참고 문헌

1. 김진만(2000), “파형강관의 시험시공 및 현장계측 연구”, 2000 한국토목학회 학술발표회 논문집.
2. 유충식(1999), “지표하중에 대한 연성 지하매설관의 하중응답특성”, 1999 한국토목학회 학술발표회 논문집.
3. 이시용(1993), “관로 포설공법의 개선연구”, 한국통신 가입자망연구소.
4. 이이환 외 13인(1986), “지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술용역”, 한국전력기술주식회사.
5. 조성수(1999), “지중배전 설계편람”, 한국전력공사 전력연구원.
6. 조천환(1992), “우리나라 대표적 노상토의 회복탄성 특성“, 1992 한국지반공학회 학술발표회 논문집.
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”, 電力中央研究所