

지중 매설관 곡선부의 해석 및 안전성 평가

Analytical Evaluation on the Structural Safety of Horizontally Curved Parts of Buried Pipe

전진수* · 김성남** · 한택희*** · 강영종****

Jeon, Jin-Su · Kim, Sung-Nam · Han, Taek Hee · Kang, Young Jong

Abstract

Recently, it has been reported that buried pipes' crack is concentrated on curved parts. In this study, 3D-Finite element analysis is performed for Analytical Evaluation on the Structural Safety of Horizontally Curved Parts of Buried Pipe. The constructed pipe cracked in curved parts of pipe is analyzed and all kinds of loads affected to buried pipes are considered. Displacement, stresses and buckling analysis are performed. The stress analysis shows that stress in curved parts is larger than stresses in straight parts and exceeds allowable stress in some parts. So, stress analysis on curved parts is needed for safety for buried pipe.

Key words : Pipe, Curved Parts, Stress Analysis

요 지

본 연구에서는 최근 발생하는 지중 매설관의 파손이 곡선부에 집중되고 있는 현실적인 문제를 통해 지중 매설관의 곡선부에 대해 보다 합리적인 해석 방법을 제시하고, 곡선부를 갖는 지중 매설관의 안전성 평가에 관한 연구를 수행하였다. 실제 시공 및 균열이 발생한 사례를 바탕으로 대상 모델을 선정하고 지중 매설관에 작용 가능한 하중 조합을 고려하였다. 3차원 유한요소해석을 통해 변형량과 응력 그리고 좌굴에 대한 구조해석을 수행하였으며 이를 통해 직선부에 비해 곡선부에 응력이 집중되며 지중 매설관의 안전성을 저해 하고 있음을 볼 수 있었다. 이러한 결과를 통해 곡선부를 갖는 지중 매설관의 경우 곡선 연결부에 대한 정밀한 응력 해석을 통한 안전성 평가가 이루어져야 한다고 판단된다.

핵심용어 : 관로, 곡선부, 응력해석

1. 서 론

상하수도를 위한 지중 매설관의 균열은 지하수의 오염을 유발하거나 누수, 결절 등으로 인한 급배수체계의 기능저하 및 여러가지의 수리학적 문제를 야기시키고 교체에 따른 경제적 비용을 가중시킨다. 또한 교체 작업은 관거설치 지역이 주로 도로 교통망과 일치하여 공사비용은 물론 교체공사로 인한 교통혼잡을 야기시키기 때문에 경제적 손실 또한 막대하다. 기존의 지중 매설관의 설계는 관의 내구성이 시공의 형태와 질, 흙-관의 상호작용, 관의 재질 등의 복잡한 요인으로 인하여 정확한 설계방법이 제시되어 있지 못하고 있다. 또한 도로의 확장공사 등으로 인한 성토로 인해 이전에 설계 되어진 하중 이상이 관에 가해지는 경우가 자주 보고 되고 있기 때문에 그 영향에 대한 고려도 필요한 실정이다. 특히 지중 매설관의 곡선부에는 직선부에 비해 상대적으로 큰 하중이 작용하므로 그에 따른 고려가 필요 하다. 지중매설관은

Marston-Spangler 이론에 의해서 설계되고 있다. 이 이론은 흙의 상대적 침하, 관의 돌출비, 등침하면의 위치에 기초를 두고 관에 미치는 수직하중을 구하는 것으로서 1913년에 Marston과 Talbot에 의해서 발표된 이후 Spangler에 의해 확장되었으며 현재까지 큰 변동없이 설계에 이용되고 있다. 그러나 이 이론은 많은 가정을 포함하고 있을 뿐만 아니라 흙과 관의 상호작용에 의해 관에 미치는 응력 상태를 파악할 수 없으며 수직하중에 영향을 끼치는 요인들은 충분히 반영할 수 없는 결점이 있다. 관에 작용하는 수직하중, 주변 흙과의 수직접촉응력, 전단응력 및 관의 변형은 관과 흙의 재료특성, 성토두께, 관의 돌출비 및 트렌치 형태 등의 여러 요인에 의해서 영향을 받는다. 이러한 요인들이 관의 거동에 끼치는 영향을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용하는 연구도 많이 이루어졌다. 1974년 Anand는 흙과 관의 탄성계수의 변화와 상대하중이 응력에 미치는 영향을 연구하였으며 Marston-Spangler 이론에 포함시킨 가정을 평가하고 또 관에

*고려대학교 건축·사회환경공학과, 공학석사 (E-mail: chins@korea.ac.kr)

**정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정

***정회원 · Visiting Research Scholar (객원연구원), Dept. of Civil. Engrg., Auburn University, 공학박사

****정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 정교수, 공학박사

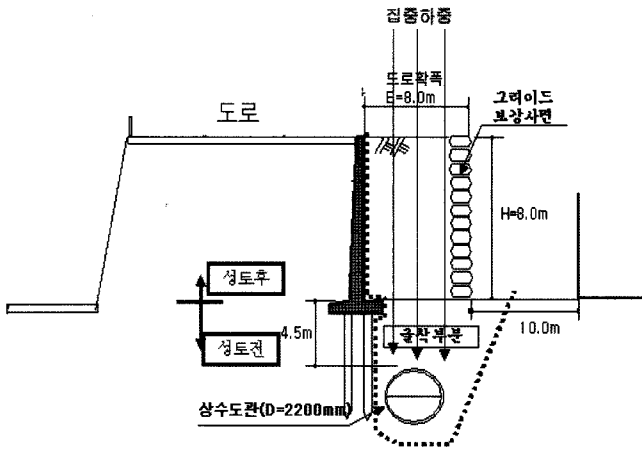


그림 1. 상수도관로 매설심도 및 성토구간

작용하는 수직접촉응력을 나타내는 근사식을 제시하였다. 지중 매설관의 곡선부에 대해서는 수압의 집중에 대해 상수도 설계기준(2004)에서 보호 콘크리트공을 설치 하여 보강하도록 되어 있으나 곡선부의 구조물거동에 대한 연구 및 설계방법은 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 연구를 바탕으로 실제 시공된 지중 매설관 곡선부의 파손이 된 사례를 (그림 1). 3차원 범용 유한요소해석 프로그램의 결과를 이용하여 안전성 평가 연구를 수행하였다.

2. 지중 강관의 안전성 평가

지중강관의 파괴형상은 크게 다짐밀도와 연성관 아니면 강성관이나에 따라 크게 4가지로 분류할 수 있다. 먼저 다짐밀도가 낮은 강성관의 파괴형상은 강관에 크랙이 발생하거나 소성힌지가 발생하였을 때 구조물의 기능을 상실한다고 본다. 다짐밀도가 높은 강성관의 파괴형상은 찌그러짐(crushing)이 발생하였을 때 구조물의 기능을 상실한다고 본다. 이때 강성관에 작용하는 하중은 강관에 모멘트를 크게 발생시키는데, 이 부분에서 응력이 가장 크게 발생하여 항복응력을 초과하므로 찌그러짐이 발생한다. 다짐밀도가 낮은 연성관의 파괴형상은 강관 정점부의 수직 처짐에 의해 나타난다. 마지막으로 다짐밀도가 높은 연성관의 파괴형상은 좌굴에 의해 나타나는데, 이는 하중이 등분포로 작용하므로 모멘트는 거의 발생하지 않고 축력만이 강관에 작용하기 때문이다.

2.1 Eperical Method of Deflection Control

1941년 Spangler는 강관이 토피하중에 의해 대략 20%정도 가량 강관 직경이 감소할 때 구조물이 파괴한다고 보고 상대적으로 작은 직경을 가진 원형강관의 실험값을 근거로 식을 추정하였다. 파괴시 가로방향으로 늘어나는 것에 부합하여 강관의 높이가 짧아짐을 관측하였다. 여기서 뒷채움재, 베딩, 작용하중, 시공불량 등의 불확실성을 보정하기 위하여 안전계수를 4로 취하고, 가로방향의 증가량을 Δx , 강관 지름이 D 라고 하면 Δx 값이 0.05D가 될 때 구조물이 제 기능을 상실한다고 판단하였다. 그 공식은 다음 (1)과 같다.

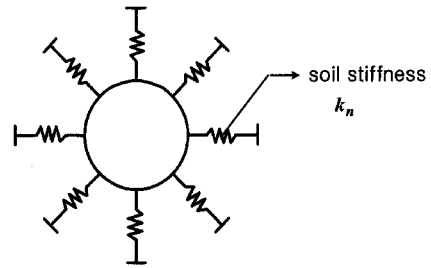


그림 2. Winkler model

$$\Delta x = \frac{D_1 D_2 W_c R^3}{EI + 0.061 E' R^3} \quad (1)$$

Δx : 변형량(in), D_1 : 베딩계수, D_2 : 변형계수, W_c : 강관의 단위길이당 작용하는 수직하중, E : 강관의 탄성계수, E' : 지반의 탄성계수, R : 강관의 반경, I : 단위길이당 작용하는 강관의 단면2차 모멘트

2.2 Stability Analysis of Elastically Supported Pipes (Winkler Model)

Booy(1957)는 좌굴을 발생시키는 압축력이 강관에 작용하는 경우 좌굴 모드가 어떻게 나타나는가를 가장 먼저 연구하였다. 이러한 좌굴거동을 알아내기 위해서 강관은 등분포 하중을 받고 있다고 가정하였고, 인장과 압축에 동시에 저항하는 탄성스프링을 사용하여 이상화시켰다.

$$f_e = \frac{2\sqrt{EIk_n}}{A} \quad (2)$$

k_n : 지반반력계수 ($k_n = \frac{E'}{R}$)

A : 단위길이당 단면적

R : 관의 반경

E : 관의탄성계수

E' : 지반탄성계수: 지반과 강관의 접촉면에서의 강성을 의미하며 접촉면에서의 압력을 지반의 변형률로 나눈 값

Howard는 실험에 의해 나온 변위값을 사용하여 각각의 다른 지반에 대하여 E' 값을 제안하였다. 본 연구에서는 지반 탄성계수(E') 13.8 MPa를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이는 현재 AASHTO 시방서에서 뒷 채움재의 다짐밀도를 85% 이상이어야 한다는 규정이 있기 때문이다. 와 지반의 경계 조건으로써, 지반을 탄성스프링으로 묘사하였으며 관

표 1. Howard가 제안한 실험치

Soil Type	E' in MPa for Proctor density		
	<85%	85-95%	>95%
Fine-grained soils, CL, ML, ML-CL with <25% coarse-grained particles	1.4	2.8	6.9
Fine-grained soils, CL, ML, ML-CL with >25% coarse-grained particles	2.8	6.9	13.8
Coarse-grained soils with fixes, GM, GC, SW, SC	2.8	6.9	13.8
Coarse-grained soils with few or no fixes, GM, GC, SW, SC	6.9	13.8	20.7

의 재질은 주철인 경우와 일반 강재인 경우 두 가지에 대해 해석을 수행하였다.

3. 유한요소해석

본 연구에서는 지중 매설관의 안전성을 검토하기 위해, 정적해석(static analysis)과 좌굴해석(buckling analysis)을 수행하였다. 정적해석 시 작용하중으로써 연직토압 및 횡토압, 공사 중 성토에 의한 연직토압의 증가, 관로의 자중 및 관로 내 상수의 자중, 상수에 의해 관내부에서 발생하는 압력, 성토면 위의 차량하중을 고려하였으며, 각 하중 조합에 따른 해석을 수행하였다. 좌굴 해석 시에는 연직토압에 의한 등분포하중 및 관로 면에 수직하게 작용하는(surface normal) 완전한 등분포 하중에 대한 좌굴 안정성을 검토하였다. 또한 관로와 지반의 경계 조건으로써, 지반을 탄성스프링으로 모사하였으며 관의 재질은 주철인 경우와 일반 강재인 경우 두 가지에 대해 모두 해석을 수행하였다.

3.1 해석모델의 검증

3.1.1 좌굴계수의 검증

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 LUSAS 13.8을 이용하여 해석을 실시하였으며 유한요소해석에 사용한 Element는 Semiloop Curved Thin Shell 8절점 요소(QSL8)를 사용하였다. 해석모델의 제원은 직경은 1000 mm, 관의 두께는 20 mm인 원형관을 사용하였으며 탄성계수(E)는 원주방향의 탄성계수인 16,264.980 MPa을 사용하였다. 아치에 대한 좌굴식은 (3)과 같다.

$$q_{cr} = \frac{kEI}{R^3} \quad (3)$$

다음은 요소, 재료의 물성치, 하중조건 및 경계조건은 모두 동일하게 하고 원형관의 두께(t)를 변화하며 두께/직경비(t/D)에 따른 좌굴강도를 산정하였다. 여기서, k 는 좌굴계수(buckling coefficient)를 나타낸다. 좌굴계수는 Rajasekaran and Padmanabhan(1989)은 2.77, Timoshenko and Gere(1961)는 3.0 마지막으로 Papangelis and Trahair(1987)는 4.0을

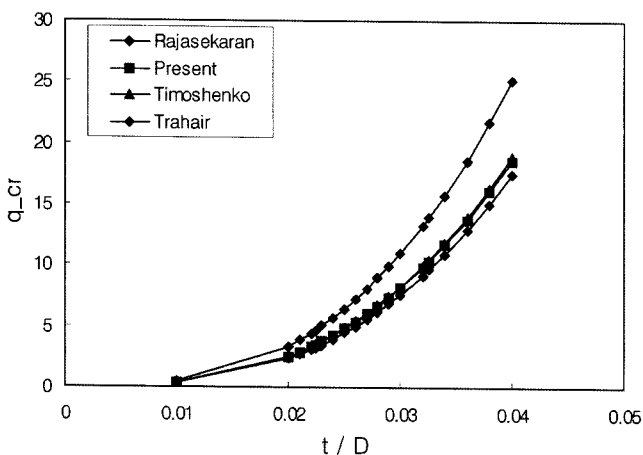


그림 3. 좌굴계수 비교

표 2. 원주방향 수렴도

Element 수	Eigen value	Error ratio(%)
5	2.5479	2.1039
8	2.507	0.4649
10	2.5009	0.2204
16	2.4962	0.0321
32	2.4954	0
54	2.4954	0

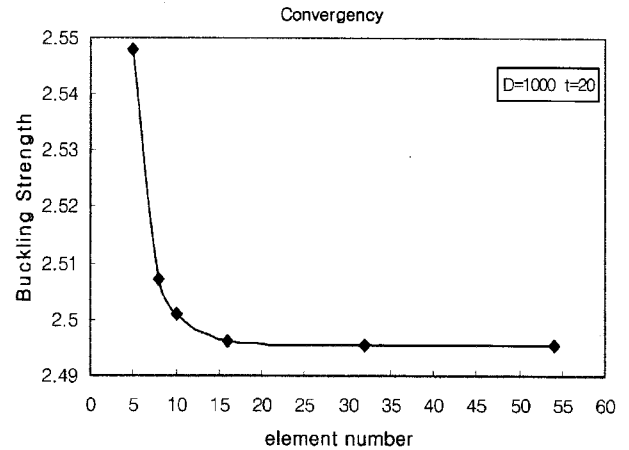


그림 4. 원주방향 수렴도

제시하였다. 유한요소해석을 통해서 얻은 좌굴계수의 값은 범으로 모델링을 하는 경우에는 2.99로 Timoshenko and Gere와 유사한 값이 산출되었다. 이 결과를 이론적인 값과 비교해볼 때, k 의 값이 2.25에서 4사이의 값을 가지므로 합리적인 값으로 판단된다.

3.1.2 수렴도 검증

관은 곡선으로 이루어져 있기 때문에 곡선의 거동을 충분히 표현하기 위해서는 충분한 자유도를 갖도록 많은 요소를 사용하여야 한다. 원형관의 해석모델은 $D=1,000$ mm, $t=20$ mm인 모델을 사용하였다. 표 2와 그림 4의 결과를 보면 원주방향으로는 element 수를 5개부터 128개까지 나누어서 좌굴 해석을 수행한 결과 element가 32개 이상이면 수렴하는 것으로 나타났다. 이후 모든 해석시 원주방향으로 64개 이상의 요소를 갖도록 해석 모델을 구성하였다.

3.1.3 관로의 경계조건

해석 모델의 경계조건은 그림 5와 그림 6에 제시하였으며 관로의 길이가 무한히 길다고 가정하고 길이방향의 변위가 생기지 않게 하기 위해서 길이방향인 Z 방향변위를 구속하였다.

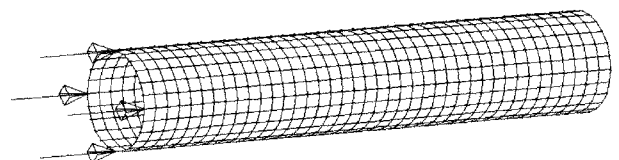


그림 5. 길이방향 경계조건

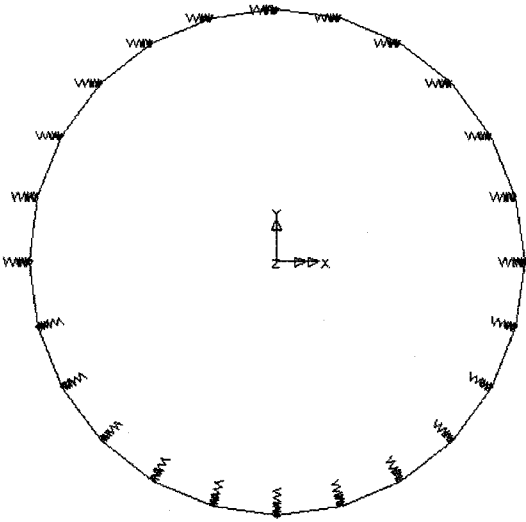


그림 6. 원주방향 경계조건

관로를 지중에 매설시 관로 거동 해석을 위해 Winkler의 탄성스프링 모델을 이용하여 지반을 탄성 스프링으로 모사하였으나, 지반의 특성상 압축력에만 저항하는 일방향 스프링으로 작용하므로, 하중 조건에 따른 관로의 변형 형상을 검토하여 경계조건을 조정함으로써 비선형 스프링을 모사하였다. 스프링의 강성값으로 사용되는 지반반력계수는 Howard의 연구결과에 의한 지반탄성계수값을 적용하였다.

3.2 정적해석

3.2.1 하중조건 및 해석모델

정적해석시 작용하중으로써 상수도 설계기준(2004)에 제시된 하중인 연직토압 및 횡토압, 공사 중 성토에 의한 연직토압의 증가, 관로의 자중 및 관로 내 상수의 자중, 상수에 의해 관 내부에서 발생하는 압력, 성토면 위의 차량하중을 고려하였으며, 실제 상황을 모사하도록 하중을 조합하여 해석을 수행하였다. 각 하중 조합은 표 3과 같다. 실제의 하중 조건은 성토 이전에는 Load Case 6과 같으며, 성토 이후에는 Load Case 8과 같다. 하지만 상수에 의한 내압은 외부하중을 경감하는 역할을 하기 때문에 성토 전후에 Load Case 6과 Load

표 3. 하중 케이스별 하중 조합

하중 케이스	고려 하중
Load Case 1	성토전 연직토압, 횡토압, 상수관로의 자중
Load Case 2	관로 내 상수의 자중
Load Case 3	관로 내 상수에 의한 내압
Load Case 4	성토에 따른 연직 토압, 성토면 위의 차량하중
Load Case 5	성토전 연직토압, 횡토압, 관로의 자중, 관로 내 상수의 자중(LC1+LC2)
Load Case 6	성토전 연직토압, 횡토압, 관로의 자중, 관로 내 상수의 자중, 상수관로 내 상수에 의한 내압(LC3+LC5)
Load Case 7	성토전 연직토압, 횡토압, 관로의 자중, 관로 내 상수의 자중, 성토에 따른 연직 토압, 성토면 위의 차량하중(LC4+LC5)
Load Case 8	성토전 연직토압, 횡토압, 관로의 자중, 관로 내 상수의 자중, 성토에 따른 연직 토압, 성토면 위의 차량하중, 관로 내 상수에 의한 내압(LC3+LC7)

표 4. 재료 물성치

항 목	주철관(cast iron)	일반강관(mild steel)
탄성계수	125 GPa	209 GPa
포아송 비	0.25	0.3
단위질량	7100 kg/m ³	7800 kg/m ³
허용응력	120 MPa	140 MPa

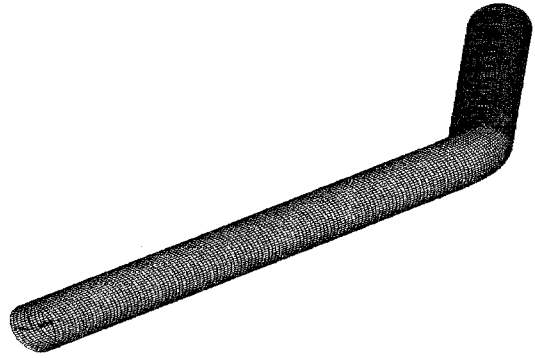


그림 7. 해석 모델

Case 8과 같은 경우보다 Load Case 7의 경우가 더 불리한 조건이므로, 이에 대해서도 해석을 수행하였다. 또한 해석 대상 관로의 재질은 현재 사용되어지고 있는 주철관(cast iron)인 경우와 일반강관(mild steel)의 경우에 대해 모두 해석을 수행하였다. 각각의 재료에 대한 물성치는 표 4와 같다. 전체 해석 모델은 실제 시공된 곡선관(2,200 mm, 22.5°)을 2개를 사용하였으며 총 45°의 각을 가지며, 그 중심각은 135°이다. 또한 곡선관에 의해 연결된 양쪽 직선관은 하중에 의한 영향을 충분히 고려하기 위하여 각각 20m까지 모델링하였다. 그림 7은 해석 모델의 형상이다.

3.2.2. 성토전 연직토압 및 횡토압

그림 8과 같이 지중에 매설된 관로는 연직토압과 횡토압을 받으며, 각각의 토압은 심도에 비례한다. 해석모델이 되는 관로는 직경 2,200 mm를 갖고 4.5 m의 지중에 매설되어 있으며, 토압은 4.5~6.7 m까지 선형적으로 증가한다.

또한 곡선 연결부에 의해 꺾인 관의 일부는 기존의 도로 밑을 통과하게 되어, 12.5~14.7 m에 해당하는 토압을 받게 된다.

성토 전의 기존 지반의 종류를 매립층이라고 할 때, 횡토압은 심도에 따라 0.058~0.086 MPa의 하중으로 선형적으로 작용하고 4.5 m의 심도로 매설된 관의 연직토압은 0.12

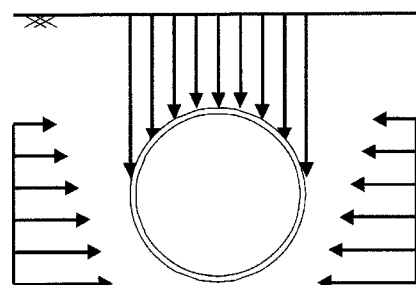


그림 8 연직토압과 횡토압

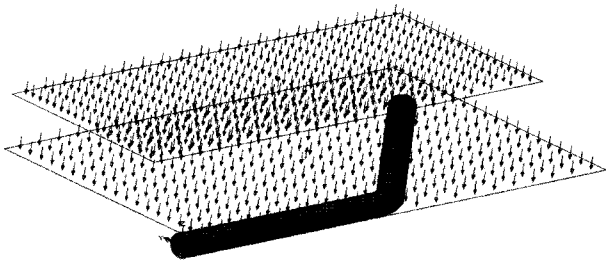


그림 9. 연속 토압의 적용

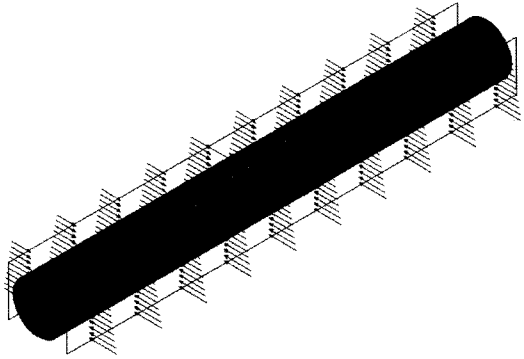


그림 10. 횡토압의 적용(직선부)

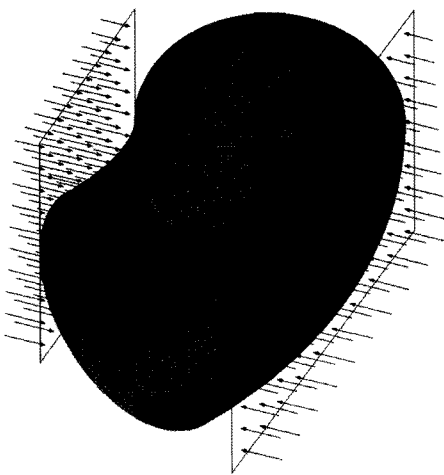


그림 11. 횡토압의 적용(곡선부)

9 MPa가 작용하며, 4차선 도로 아래의 관로는 0.207MPa의 연속토압을 추가로 받게 된다. 다음의 그림 9~11에서 산정된 하중의 재하 방법을 제시하였다.

3.2.3. 자중 및 내압

관로의 자중은 관로의 단위질량(Cast Iron: 7100 kg/m³, Mild Steel: 7100 kg/m³)에 중력가속도(9.81 m/sec²)가 중력방향으로 작용하며, 상수의 자중은 관로 내의 부피와 같은 물의 무게가 중력의 방향으로 작용한다. 상수도관 관내의 수압은 서울시 동부상수도사업소의 제공 자료에 따라, 0.637 MPa (6.5 kgf/cm²)을 적용 하였다.

3.2.4 성토후의 연속토압 및 차량하중

성토된 층은 매립토층으로 가정하여 연속토압으로 0.205 MPa

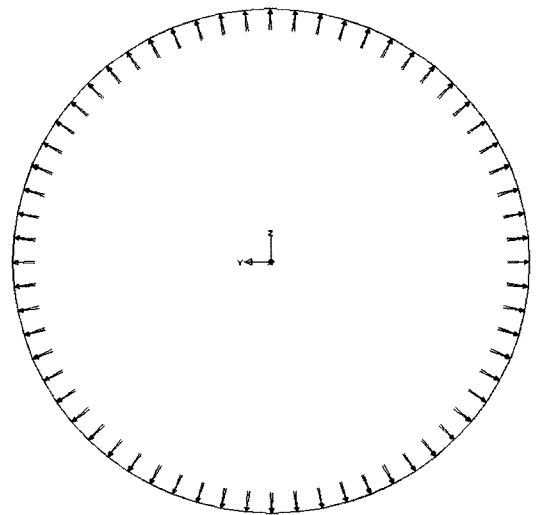


그림 12. 관로 내의 수압

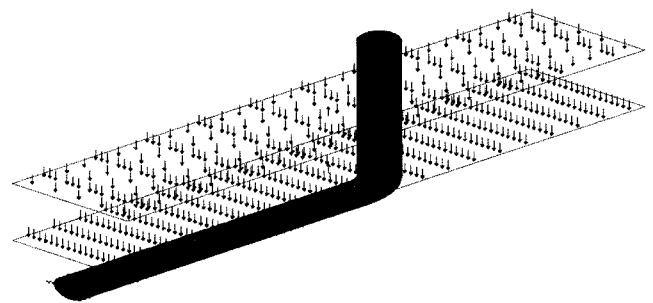


그림 13. 성토후의 추가하중(성토층+차량하중)

을 적용하였으며, 성토층 아래에 등분포된다. 성토면 위의 차량하중은 가장 큰 경우를 고려하여 DL-24 하중을 적용하여 0.012 MPa를 등분포하게 작용시켰고 이를 그림 13과 같이 구조물에 재하하였다.

3.3 정적해석 결과

3.3.1. 변형량에 의한 안전성 평가 - 주철관 (Cast Iron)

그림 14와 그림 15는 각각 성토 후 내압을 적용하지 않은 경우(Load Case 7)와 내압을 적용한 경우(Load Case 8)의 상수도관 변형 형상을 나타낸다. 내압을 적용하지 않은 경우(Load Case 7)의 최대변위는 98.9 mm, 내압을 적용한 경우(Load Case 8)의 최대변위는 98.3 mm로서, 앞에서 제시한 Spangler의 식을 적용할 때 직경에 대한 변형량의 비는 각각 4.495%와 4.468%로서 5%의 기준치를 초과하지 않기 때문에 변위를 기준으로 판단할 때 성토 이후에도 안전하다고 판단할 수 있다.

3.3.2. 허용응력에 의한 안전성 평가 - 주철관 (Cast Iron)

표 5는 하중 조건에 따른 최대응력이며 성토 후의 Load Case 8에서 최대응력이 발생 힘을 보여준다. 그림 16은 이 경우의 주응력 분포이다. 그림 16의 직선부의 응력 분포 양상은 전체적으로 균일하지만 곡선부의 응력 분포 양상은 직선부와 달리 응력집중이 발생되며 이 응력이 전체 관로 최대 응력임을 보여준다. 그림 17은 관로 곡선부의 확대도이며 응

SCALE 10.1112E-01
 EYE X=0.1051E-45 Y=0.1215E-45 Z=0.1217E-45
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+WP+ADD
 MAX DISP 0.9993E01 AT NODE 50347



그림 14. 성토후 관로의 변형형상(Load Case 7)

LC1+WBFB+WP+ADD
 STRESS
 CONTOURS OF NE
 0
 0.21733E3
 1.24347E0
 1.8852E8
 2.48693E8
 3.10867E8
 3.7304E0
 4.36213E8
 4.97387E8
 5.5956E8
 6.21733E8
 6.83907E8
 7.4608E8
 8.08253E8
 8.70427E8
 9.326E8
 Max 0.1004E+08 at Node 3063
 Min 0.9697E+05 at Node 977

SCALE 10.1113E-01
 EYE X=0.1051E-45 Y=0.1215E-45 Z=0.1217E-45
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+WP+ADD
 MAX DISP 0.9993E01 AT NODE 50347
 TYPE STRESS
 CONTOUR COMPONENT =NE
 NUMBER OF CONTOURS = 16
 INTERVAL = 0.6217E+08
 MAX 0.1004E+08 AT NODE 3063
 MIN 0.9697E+05 AT NODE 977

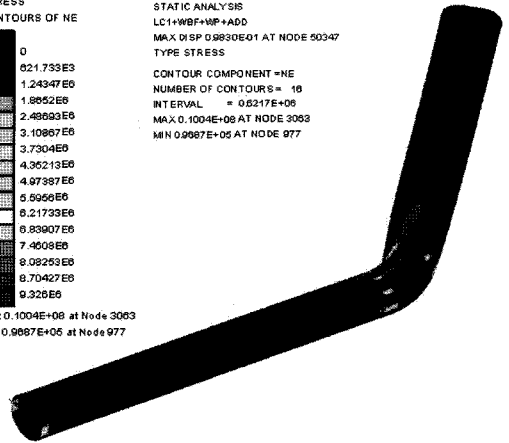


그림 16. 관로의 응력분포(Load Case 8)

SCALE 10.1112E-01
 EYE X=0.1051E-45 Y=0.1215E-45 Z=0.1217E-45
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+WP+ADD
 MAX DISP 0.9993E01 AT NODE 50347

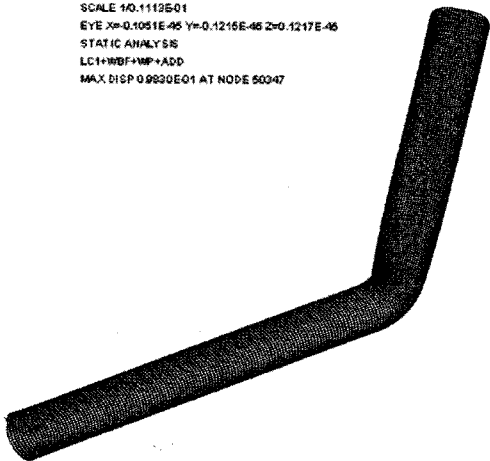


그림 15. 성토후 관로의 변형형상(Load Case 8)

SCALE 10.1510E-02
 EYE X=0.1051E-45 Y=0.1215E-45 Z=0.1217E-45
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+WP+ADD
 MAX DISP 0.8148E01 AT NODE 3
 TYPE STRESS
 CONTOUR COMPONENT =NE
 NUMBER OF CONTOURS = 16
 INTERVAL = 0.7883E+08
 MAX 0.1275E+08 AT NODE 3093
 MIN 0.1800E+08 AT NODE 55201

LC1+WBFB+WP+ADD
 STRESS
 CONTOURS OF NE
 0
 7883207
 1.57664E8
 2.36496E8
 3.15328E8
 3.94160E8
 4.72992E8
 5.51824E8
 6.30656E8
 7.09488E8
 7.88320E8
 8.67152E8
 9.45984E8
 10.24816E8
 11.03648E8
 11.82480E8
 Max 0.1275E+08 at Node 3093
 Min 0.1800E+08 at Node 55201

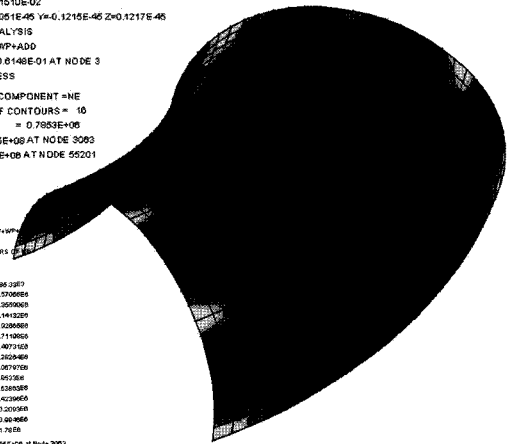


그림 17. 곡선부의 응력분포(Load Case 8)

표 5. 하중 조건별 최대응력

하중 조건		최대응력	주철의 허용응력 120 MPa
성토 전	Load Case 5	49.19 MPa	
	Load Case 6	53.92 MPa	
성토 후	Load Case 7	123.90 MPa	
	Load Case 8	127.50 MPa	

력 분포를 통해 직선부와 곡선부가 만나는 부분에서 응력 집중이 발생하며 곡선부의 응력 분포 양상이 일부분에서는 직선부의 일정한 패턴과는 다른 패턴을 보이고 있음을 보여 준다. 각 하중 조건별로 발생하는 최대응력은 성토 이전에는 주철의 허용응력 120 MPa를 넘지 않아 안전하나, 성토 이후에는 주철의 허용응력을 넘어서 안전성에 문제가 발생할 가능성이 높다고 판단된다.

3.3.3 변형량에 의한 안전성 평가 - 강관(Mild Steel)

3.3.1절 에서와 같은 방법으로 해석을 검토 한 결과 Load Case 7의 최대변위는 91.68 mm, Load Case 8의 최대변위는 91.5 mm로써, Spangler의 식을 적용할 때 직경에 대한

변형량의 비는 각각 4.167%와 4.159%로써 5%의 기준치를 넘지 않기 때문에 성토 이후에도 안전한 것으로 판단할 수 있다. 그림 18과 19는 성토 후 관로의 변형형상을 보여준다.

3.3.4 허용응력에 의한 안전성 평가 - 강관(Mild Steel)

표 6은 하중 조건 별 강관의 최대 응력이며 강관일 때 역시 주철관과 마찬가지로 성토 후 Load Case 8에서 최대응력이 발생한다. 그림 20은 이 경우의 주응력 분포이다. 그림 20의 곡선부의 응력 분포 양상은 청색으로 짙게 퍼진 직선부가 일정한 응력을 보이고 있는 것과 달리 적색으로 열게 집중된 부분에서 응력집중이 발생된다. 3.3.2 절의 결과와 동일하게 이 응력이 전체 관로 최대 응력이다. 그림 17은 관로 곡선부의 확대도이며 응력 분포를 통해 직선부와 곡선부가 만나는 부분에서 응력 집중이 발생함을 보인다. 표 6에 제시된 성토 이전의 하중에 대해서는 허용응력을 초과 하지 않지만 성토 후의 하중에는 강관의 허용응력을 초과 하고 있다. 이는 강관의 안전성에 문제가 발생할 가능성이 높음을 보여 준다.

SCALE 10.1114E-01
 EYE X=0.1200E-07 Y=-0.9905E-08 Z=0.1559E-07
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+ADD
 MAX DISP 0.9108E-01 AT NODE 50347

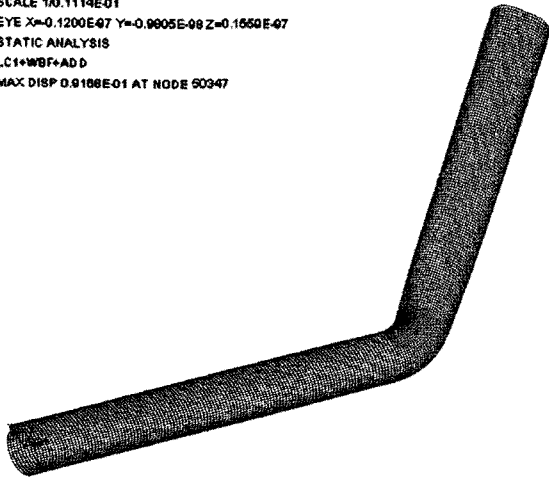


그림 18. 성토 후 관로의 변형형상(Load Case 7)

SCALE 10.1114E-01
 EYE X=0.1200E-07 Y=-0.9905E-08 Z=0.1559E-07
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+ADD
 MAX DISP 0.9151E-01 AT NODE 50347
 TYPE STRESS
 CONTOUR COMPONENT = NE
 NUMBER OF CONTOURS = 15
 INTERVAL = 0.2507E+00
 MAX: 0.4225E+08 AT NODE 3083
 MIN: 0.3485E+05 AT NODE 20451

LC1+WBFB+ADD
 STRESS
 CONTOURS OF NE

0
763.053E3
1.52731E6
2.29090E6
3.05449E6
3.81808E6
4.58167E6
5.34526E6
6.10885E6
6.87244E6
7.63603E6
8.40062E6
9.16421E6
9.92780E6
10.69139E6
11.45498E6

Max: 0.4225E+08 at Node 3083
 Min: 0.3485E+05 at Node 20451

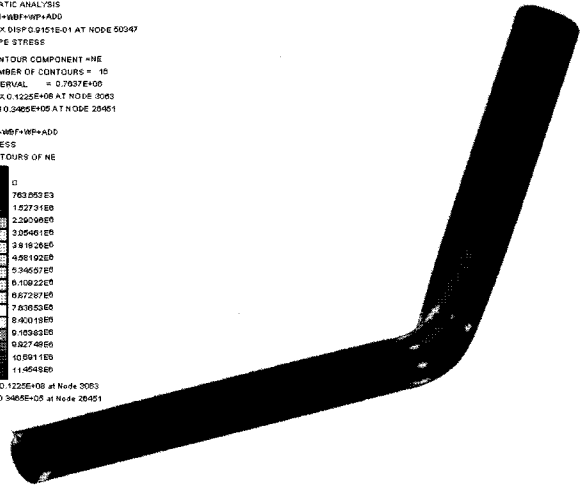


그림 20. 관로의 응력분포(Load Case 8)

SCALE 10.1114E-01
 EYE X=0.1200E-07 Y=-0.9905E-08 Z=0.1559E-07
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+ADD
 MAX DISP 0.9151E-01 AT NODE 50347

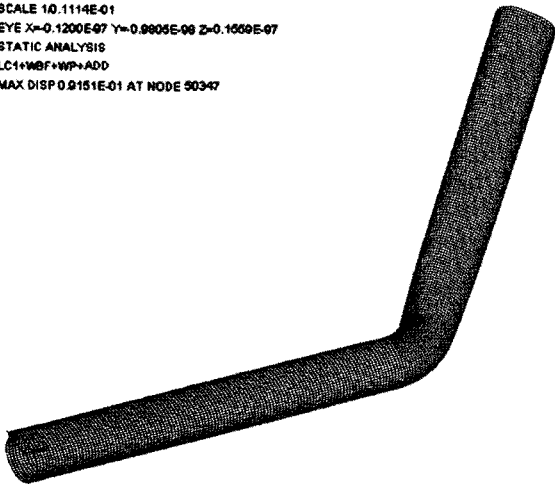


그림 19. 성토 후 관로의 변형형상(Load Case 8)

SCALE 10.1587E-02
 EYE X=0.1200E-07 Y=-0.9905E-08 Z=0.1559E-07
 STATIC ANALYSIS
 LC1+WBFB+ADD
 MAX DISP 0.5624E-01 AT NODE 3988
 TYPE STRESS
 CONTOUR COMPONENT = NE
 NUMBER OF CONTOURS = 16
 INTERVAL = 0.9577E+06
 MAX: 0.1548E+08 AT NODE 3083
 MIN: 0.1835E+06 AT NODE 51468

LC1+WBFB+ADD
 STRESS
 CONTOURS OF NE

0
967.729E3
1.93546E6
2.87518E6
3.81490E6
4.75462E6
5.69434E6
6.63406E6
7.57378E6
8.51350E6
9.45322E6
10.39294E6
11.33266E6
12.27238E6
13.21210E6
14.15182E6
15.09154E6

Max: 0.1548E+08 at Node 3083
 Min: 0.1835E+06 at Node 51468

그림 21. 곡선부의 응력분포(Load Case 8)

표 6. 하중 조건별 최대응력

하중 조건		최대응력	강관의 허용응력 140 MPa
성토 전	Load Case 5	61.39 MPa	
	Load Case 6	64.86 MPa	
성토 후	Load Case 7	152.40 MPa	
	Load Case 8	154.90 MPa	

3.4 좌굴에 대한 안전성 평가

좌굴 해석 시에는 연직도압에 의한 등분포하중(Load Case 9) 및 관로 면에 수직하게 작용하는(surface normal) 완전한 등분포하중(Load Case 10)에 대한 좌굴 안정성을 검토하였다. 그림 22는 연직도압에 의한 등분포하중이 작용하는 경우를 나타내며, 그림 23은 면에 수직하게 작용하는 완전한 등분포하중이 작용하는 경우를 나타낸다.

3.4.1 관로가 주철(Cast Iron)인 경우

관로가 주철관(Cast Iron)인 경우 좌굴강도는 Load Case 9의 경우는 3.130 MPa, Load Case 10의 경우에는 3.635 MPa로 산출되었으며, Load Case 9의 경우가 Load Case 10의 경우보다 더 불리한 조건임을 알 수 있다. 연직으로 작용하

는 외부하중은 성토 이전에는 해석 대상 부분에 0.129 MPa가 작용하며, 4차선 도로 아래의 관로는 0.207 MPa가 작용한다. 성토 이후에는 해석 대상 부분에 0.337 MPa (0.337 MPa = 0.129 MPa + 0.205 MPa + 0.002 MPa)가 작용하여 성토 이전, 이후 모두 좌굴에 대해 안전함을 알 수 있다.

3.4.2 관로가 강관(Mild Steel)인 경우

관로가 강관(Mild Steel)인 경우 좌굴강도는 Load Case 9의 경우 4.080 MPa, Load Case 10의 경우에는 4.695 MPa로 산출되었으며, 주철인 경우와 동일하게 Load Case 9의 경우가 Load Case 10의 경우보다 더 불리한 조건임을 알 수 있다. 외부하중 조건은 3.4.1 결과 동일하게 성토 이전에는 0.129 MPa가 작용하며, 성토 이후에는 0.337 MPa가 작용한다. 이 결과를 통해 성토 이전, 이후 모두 좌굴에 대해 안전함을 알 수 있다. 그림 24와 그림 25는 가장 불리한 하중 조합인 Load Case 9에서의 주철관과 강관에 대한 좌굴 변형 형상이다.

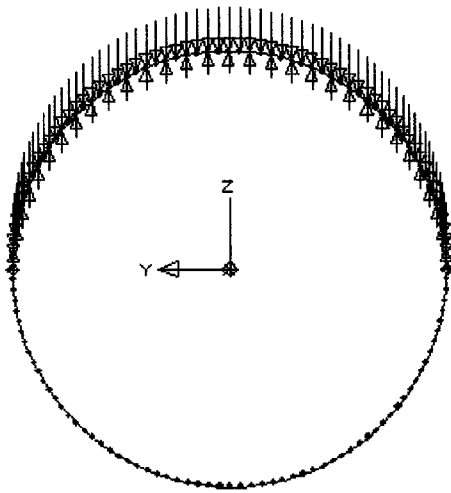


그림 22. 연직 토압하중(Load Case 9)

```
SCALE 1.0 2.957E-02
EYE X=0.0000E+00 Y=0.0000E+00 Z=0.0000E+00
EIGENVALUE ANALYSIS
LOAD DUMP ID = 1
EIGENVECTOR = 1
RESULTS FILE ID = 0
EIGENVALUE = 0.4080E+06
NATURAL FREQUENCY = 101.7
ERROR NORM = 0.3484E-04
MAX DISP 1.004 AT NODE 233
```

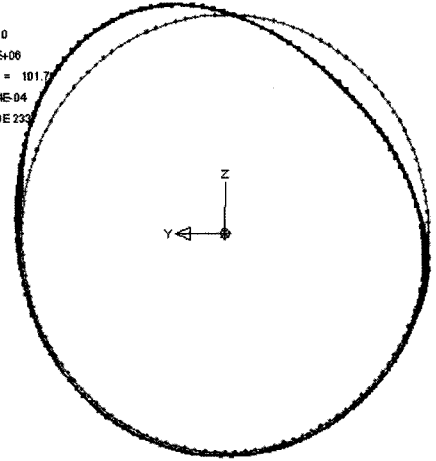


그림 25. 강관 좌굴 변형 형상(Load Case 9)

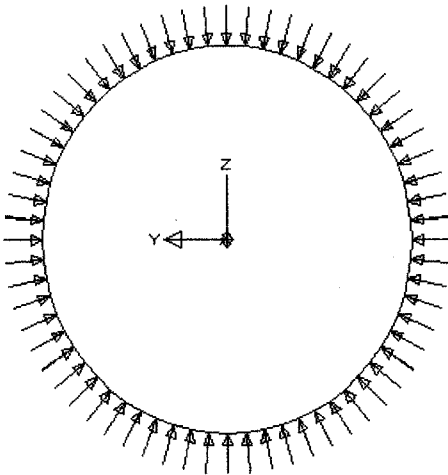


그림 23. 면에 수직하 하중(Load Case 10)

```
SCALE 1.0 2.698E-02
EYE X=0.0000E+00 Y=0.0000E+00 Z=0.0000E+00
EIGENVALUE ANALYSIS
LOAD DUMP ID = 1
EIGENVECTOR = 1
RESULTS FILE ID = 0
EIGENVALUE = 0.3130E+06
NATURAL FREQUENCY = 89.04
ERROR NORM = 0.6749E-09
MAX DISP 1.005 AT NODE 2342
```

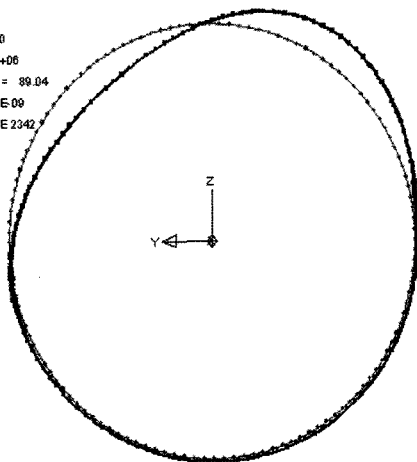


그림 24. 주철관 좌굴 변형 형상(Load Case 9)

4. 결 론

관로에 용접 결함이나 기타 취약부분이 없다는 전제하에, 여러 가지 하중 조건을 고려한 유한요소해석을 이용하여, 관

로의 재질이 주철인 경우와 일반 강재인 경우 두 가지에 대해, 성토 전후에 따라 변형량에 의한 안전성 평가, 응력 증가에 따른 안전성 평가, 좌굴안전성 평가를 수행하였다. 변형량, 좌굴에 대한 안전성 평가 결과에 의하면 관로가 주철관 이든 일반강관이든 모두 기준치 이하의 값을 보여서 안전한 것으로 나타났다. 그러나 허용응력에 대한 안전성 평가를 한 결과 곡선부의 경우 성토 후의 응력은 허용응력을 초과한 결과를 일부 나타내었으며, 그 외의 경우에는 모두 허용응력보다 작은 응력 값을 나타내었다. 그러나 직선부의 경우는 관로의 재질에 관계 없이 안전한 것으로 나타났다. 지중 구조물의 분기점이나 연결부에는 곡선화되는 경우가 많기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 곡선 연결부에 대해서는 콘크리트 공으로 보강하는 방법이 설계 기준이 제시되어 있지만 보강 방법에 앞서 본 연구와 같은 곡선부에 집중되는 응력 해석을 통해 곡선부를 갖는 지중 매설 관의 안전성에 대한 검토가 필요 하다.

감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D정책·인프라사업, “성능중심의 건설기준 표준화” 과제(06~11) 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

- 강병희 (1998). 성토 하에 매설된 관의 거동. 한국지반공학회는문집, 한국지반공학회, Vol. 4, No. 1.
- 김태욱 (1993). 지중매설관로의 거동특성 해석을 위한 관·지반 상호 작용력의 산정. 한국지진공학회는문집, 한국지진공학회, Vol. 7, No. 3.
- 정형식 (1993). 지반-구조물 상호작용 관점으로 분석한 매설관의 거동에 관한 연구. 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 대한토목학회.
- 한국 상하수도협회 (2004). 상수도 시설 기준.
- Amaster K. Howard (1977). Modulus of Soil Reaction Values for Buried Flexible Pipe. ASCE, Vol. 103, No. GT1.

- John P. Papangelis (1987). Flexural-Torsional Buckling of Arches. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 113, No. 4, pp. 889-906.
- Marston, A. and Amderson, A.O. (1913). the Theory of loads on pipes in Ditches and Tests of cement and clay drain Tile and Sewer pipe. *Iowa Engineering Experiment station Bulletin*, Iowa state college Ames, Iowa, No. 31, pp. 181.
- Moore, I. D., Selig, E. T., and Haggag, A. (1988). *Elastic Buckling Strength of Buried Flexible Culverts*. Pre-prints TRB Session 143, Washington, D.C..
- Spangler, M. G. (1941). *The Structural Design of Flexible Pipe Culvert*. Bull. 153, Iowa State College Engineering Experimental Station, Iowa.
- S. P. Timoshenko and James M. Gere (1961). *Theory of Elastic Stability, 2nd Ed.*, McGraw-Hill, Inc..
- Sundaramoorthy Rajasekaran (1989). Flexural-Torsional Buckling of Arches. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 1, pp. 243-245.

◎ 논문접수일 : 2007년 12월 03일
 ◎ 심사의뢰일 : 2007년 12월 03일
 ◎ 심사완료일 : 2008년 01월 09일