

Prediction of Short-term Behavior of Buried Polyethylene Pipe

지중매설 폴리에틸렌 관의 단기거동 예측

Joonseok Park · Young-Geun Lee · Sunhee Kim · Jung-Hwan Park · Eung-Ho Kim*

박준석 · 이영근 · 김선희 · 박정환 · 김응호*

홍익대학교 토목공학과

Abstract : Flexible pipes take advantage of their ability to move, or deflect, under loads without structural damage. Common types of flexible pipes are manufactured from polyethylene (PE), polyvinyl chloride (PVC), steel, glass fiber reinforced thermosetting polymer plastic (GFRP), and aluminum. In this paper, we present the result of an investigation pertaining to the short-term behavior of buried polyethylene pipe. The mechanical properties of the polyethylene pipe produced in the domestic manufacturer are determined and the results are reported in this paper. In addition, vertical ring deflection is measured by the laboratory model test and the finite element analysis (FEA) is also conducted to simulate the short-term behavior of polyethylene pipe buried underground. Based on results from soil-pipe interaction finite element analyses of polyethylene pipe is used to predict the vertical ring deflection and maximum bending strain of polyethylene pipe.

Key words : Polyethylene pipe, Vertical ring deflection, Short-term behavior, laboratory model test, Maximum Bending strain, Finite element analysis

주제어: 폴리에틸렌 관, 수직 관변형, 단기거동, 실내모형실험, 최대 휨 변형률, 유한요소해석

1. 서 론

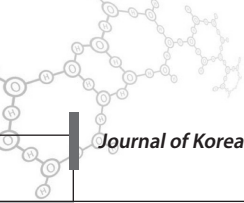
우리나라는 본격적인 하수도 정비가 선진국에 비해 늦은 1970년대 이후 시작되었고, 하수도 사업의 중심이 기존 도시지역을 대상으로 하수처리 시설 설치에 주력하였다. 1990년대 이후부터 하수처리장 건설에 대한 정부의 집중투자로 인해 하수처리율은 급격히 증가하였으나 상대적으로 하수관거에 대한 투자가 미미한 관계로 이에 대한 문제점이 노출되기 시작하였다. 이러한 상황에서

기존 하수관거의 대부분을 차지하고 있던 철근 콘크리트관의 노후화와 황화수소(H_2S) 및 황산(H_2SO_4) 등에 의한 부식 및 수밀성 미확보가 문제점으로 제기되었으며, 이러한 문제점을 해결하기 위해 플라스틱 재질로 구성된 하수관을 적용하기 위한 노력이 활발히 진행되어 왔다.

플라스틱 재질의 국내 하수관은 대부분 소구경을 사용하였으나 관 재질 및 관 제조에 대한 기술의 발달로 근래 대구경까지 다양하게 사용되고 있다. 이러한 플라스틱 계열의 하수관은 지중매설 시 지반과 유기적으로 거동하는 연성관으로써 제품의 품질과 시공에 대한 신뢰성이 동시에 확보되어야 구조적인 안전성을 기대할 수 있다. 그러나

* Received 13 November 2012, revised 7 December 2012, accepted 12 December 2012.

* Corresponding author: Tel.: +82-2-320-1618, Fax: +82-2-3141-0774, E-mail: kimeh@hongik.ac.kr



기술선진국들에 비해 아직까지 제품 및 시공기술 등에 대한 연구가 부족한 실정이다. 특히, 국내의 관련 설계기준 및 제품규격 등은 기술선진국들에 의해 개발된 기준 및 규격을 단순히 참조하여 규정한 것으로 보이며, 독자적인 개발 배경 및 근거를 구체적으로 제시하고 있지 않고 있다 (박 등, 2012).

이 논문에서는 먼저 폴리에틸렌 관의 역학적 성질을 조사하고, 이를 바탕으로 관의 강성(pipe stiffness, PS)을 조사하였으며, 지중에 매설된 경우의 단기거동을 파악하기 위해 실내모형실험과 유한요소해석을 수행하여 결과를 비교분석하였다. 또한, 유한요소해석에 의해 지중매설된 폴리에틸렌 관이 관변형 5 %가 발생할 때의 최대 휨 변형률(maximum bending strain, ϵ)이 Watkins (2000) 등이 제안한 변형률 식(strain formula)에 대한 초과 여부를 검토하였다.

2. 폴리에틸렌 관의 역학적 성질

2.1 인장강도시험

폴리에틸렌의 인장강도시험은 KS M 3006 (플라스틱의 인장성 측정 방법)에서 제시하고 있는 방법을 참고하여(폭 6 ± 0.4 mm, 두께 1 ~ 3 mm) 수행하였다. 인장시험시편 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 인장강도시편 제작용 몰드를 이용하여 제작하였으며, 제작한 시편의 치수는 Table 1에 정리하였다.



Fig. 1. Tensile Test Specimen

Table 1. Dimension of Tensile Test Specimen

구분	폭(mm)	두께(mm)	단면적(mm ²)
PE-1	5.40	2.20	11.88
PE-2	5.40	2.35	12.69
PE-3	5.45	2.15	11.72
PE-4	5.31	2.38	12.64
PE-5	5.35	2.41	12.89

폴리에틸렌 인장강도시험은 한국프라스틱공업협동조합연합회(KFPIC)에서 수행하였으며, 시험에 적용된 하중은 UTM (Universal Testing Machine)을 사용하여 변위제어방식으로 5 ± 0.5 mm/min의 속도로 재하하였다. 폴리에틸렌 인장강도시험은 Fig. 2에 나타내었다.

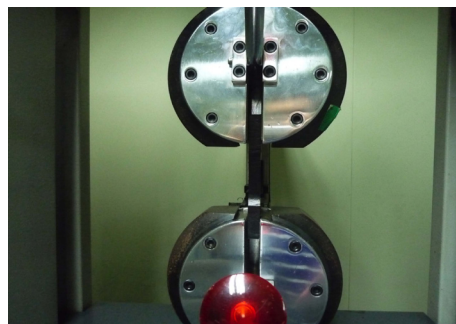


Fig. 2. Tensile Test

모든 시편의 인장시험 결과에서 응력-변위 관계는 재료가 파괴될 때까지 선형으로 나타났으며, 각 시편별 인장시험 결과를 표로 정리하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Result of Tensile Test

구분	탄성계수 E (GPa)	최대강도 σ_{\max} (MPa)
PE-1	2.19	19.8
PE-2	2.31	20.9
PE-3	2.23	20.2
PE-4	2.30	20.9
PE-5	2.20	20.3
평균	2.25	20.4

2.2 편평시험

폴리에틸렌 관은 대표적인 연성관으로 분류되며, 연성관은 지중매설시 지반과 상호작용하기 때문에 관의 강성은 설계시 중요한 변수가 된다. 관의 강성은 관의 치수 및 역학적 성질에 따른 변수로서 국내외 연성관 관련 설계규준에서는 관의 강성을 편평시험을 통해 결정하도록 제안하고 있다. 관강성 측정은 편평시험으로부터 관의 강성을 간접적으로 도출하는 방법으로 관 변형 5 %일 때 하중이다.

이 논문에서는 폴리에틸렌 관의 강성을 관련 시험 규격(ASTM D 2412)을 참고하여 편평시험을 통해 확인하였다. 폴리에틸렌 관의 편평시험은 폴리에틸렌 이중벽관(PE-DP)과 다중벽관(PE-MP)에 대해 수행하였으며, 편평시험에 사용된 시편 치수는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Dimension of Parallel Plate Loading Test

구분		길이 (mm)	내경 (mm)	두께 (mm)
이중벽	PE-DP-1	300	300	16
	PE-DP-2			
	PE-DP-3			
	PE-DP-4			
	PE-DP-5			
다중벽	PE-DP-1	300	300	20
	PE-DP-2			
	PE-DP-3			
	PE-DP-4			
	PE-DP-5			

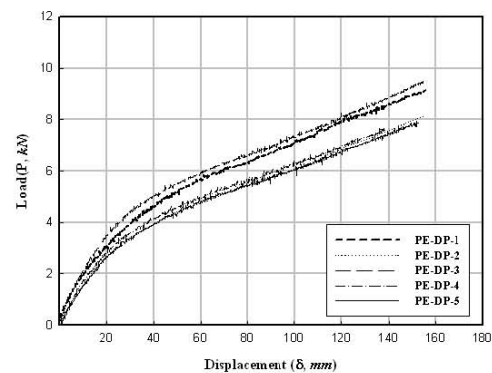
폴리에틸렌 관의 편평시험은 980 kN 용량의 UTM에 시편을 위치시킨 후 하중을 재하하였고, 관변형이 관 내경의 30 %가 될 때까지 수행하였다. 관의 상하부 변위는 wire gage를 사용하여 측정하였으며, 하중은 10 ± 2 mm/min의 속도로 재하하였다. 관중에 따른 편평시험은 Fig. 3에 나타내었다.

편평시험 결과 폴리에틸렌 이중벽관과 다중벽관 모든 시편에서 수직방향으로 감소하는 변위

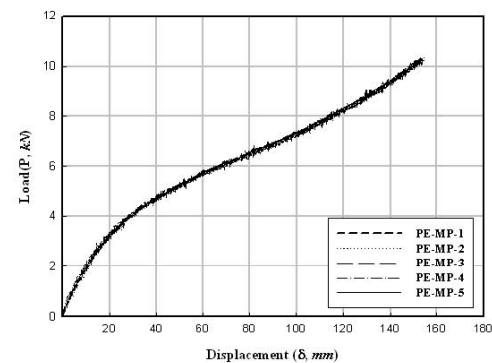


Fig. 3. The Parallel Plate Loading Test

가 발생하였으며, 하중을 제거하면 일정량의 변위가 복원되는 현상을 보였고, 하중을 지속적으로 재하하더라도 직접적인 파괴형상은 나타나지 않았다. 시험 결과로부터 얻은 하중-변위 관계는 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 관의 강성(PS)을 조사하기 위해 관변형 5 %일 때의 하중을 Table 4에 정리하였다. 폴리에틸렌관의 편평시험 결과



(a) Double-wall



(b) Multi-wall

Fig. 4. Load and Deflection Relationship

Table 4. Result of Pipe Stiffness Test

구분	관변형 5 %일 때의 하중 (kN)	PS(kN/m ²)
PE-DP-1	2.66	177.33
PE-DP-2	2.19	146.00
PE-DP-3	2.91	194.00
PE-DP-4	2.33	155.33
PE-DP-5	2.14	142.67
평균	2.39	159.33
PE-MP-1	2.66	177.33
PE-MP-2	2.60	173.33
PE-MP-3	2.59	172.67
PE-MP-4	2.80	186.67
PE-MP-5	2.75	183.33
평균	2.67	178.00

로부터 구한 하중과 변위 관계에서 관변형 7 %까지는 선형에 가까운 거동을 보이고 있음을 확인하였으며, 이 시험결과는 수치해석을 통한 폴리에틸렌 관의 구조적 거동분석의 기초자료로 활용하였다.

2.3 유한요소해석

폴리에틸렌 관의 편평시험에 대한 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 GT-STRUDL (Ver. 31)로 수행하였다. 유한요소해석 모델은 길이와 관경이 300 mm이며 두께는 편평시험에서 측정한 각 시험시편의 두께의 평균을 적용하여 Fig. 5와 같이 실제 시편의 치수와 같도록 모델링하였다. 유한요소해석 모델의 탄성계수는 인장강도시험으로부터 구한 탄성계수 2.25 GPa를 적용하였다. 유한요소해석 모델에 적용한 치수 및 역학적 성질은 Table 5에 정리하였다.

유한요소해석 모델의 경계조건은 관의 하단부를 힌지로 가정하고, 하중은 관 상단에 위치한 하중가압 강재 판에 관 단면의 수직방향으로 재하하였다. 하중은 점차적으로 증가시켜 관의 모델에서 내경 5 %의 관변형을 일으켰을 때의 하중을 구하고 시험 결과와 비교하였다.

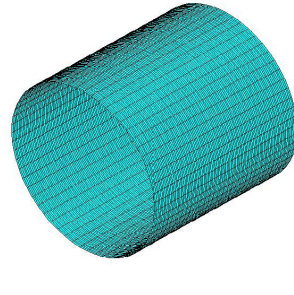


Table 5. Dimension and Mechanical Properties

구분	두께 (mm)	탄성계수 (GPa)	포아송비
이중벽	16	2.25	0.3
다중벽	20		

Fig. 5. Finite Element Model

유한요소해석 결과 관의 변형과 응력분포 형태는 실제 거동과 매우 유사하게 나타났으며, 5 % 관변형에 해당하는 하중은 편평시험 결과와 약 7 % 이내의 오차를 보였다. 따라서 유한요소해석과 편평시험 결과는 매우 유사함을 확인하였다. 5 % 관변형이 발생한 유한요소해석 모델의 형상은 Fig. 6에 나타내었으며, 편평시험과 유한요소해석의 결과 비교는 Table 6에 정리하였다.

Table 6. Comparison of Test Result and FEM Result

구분	관변형 (%)	① 시험 결과 (kN)	② 해석 결과 (kN)	차 (%) ((①-②)/①) × 100
이중벽	5	2.39	2.56	-7.11
다중벽		2.67	2.87	-7.49

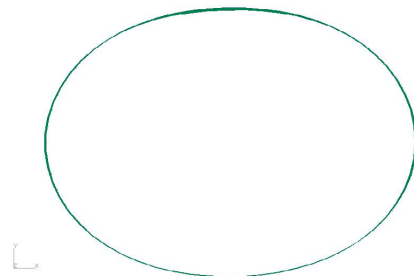


Fig. 6. Result of FEM

3. 지중매설 폴리에틸렌 관의 설계 (ASTM D 2412)

ASTM D 2412 (2010)에서 제안하고 있는 지중매설된 연성관에 대한 설계는 연성관에 대한 변형을 식 (1)에 나타낸 바와 같이 계산하고, 이 변형을 5 %로 제한하고 있으며, 관에 발생하는 휨모멘트 및 휨응력의 검토에 대해서는 언급하고 있지 않다.

$$\Delta y = \frac{D_e K W_e}{0.149 PS + 0.061 E'} \quad (1)$$

여기서, Δx 는 수평방향 관변형을 나타내며, D_e 는 변형지연계수, K 는 받침각계수, E' 은 매립토의 지반반력계수, PS 는 관의 강성(Pipe Stiffness, PS), W_e 는 단위길이당 연직토압을 나타내고 있다(Javanmard, 1993; Smith and Watkins, 2004).

식 (1)에서 관의 강성(PS)은 일반적으로 편평 시험(Parallel Plate Loading Test)에 의해 결정된다(김 등, 2011).

지중매설된 연성관의 변형을 예측하는 식 (1)은 Iowa Formula라고도 하며, 연성관의 강성, 되메움 흙의 지반반력계수, 기초조건 등 지중매설된 상태의 연성관에 대한 하중 및 경계 조건을 대부분 포함하고 있어 지중매설상태에서 연성관에 대한 거동을 명확히 표현하고 있다. 이 식은 Spangler에 의해 최초로 제안되었고, Watkins에 의해 수정되었으며, 지중매설된 파형강관에 대한 실험결과와 탄성이론에 기초하고 있다.

Iowa Formula는 약 5 ~ 6 %까지 정확한 관변형을 예측하는 것으로 연구, 보고되고 있다(Javanmard, 1993; Smith, et al., 2004). 또한, 파형강관에 대한 실험적 연구로부터 관변형이 약 20 %에서 파괴(관정에서 곡률반전이 발생함)가 발생하였을 때 여기에 안전율 4를 적용하여 허용관변형을 5 %이내로 제한하고 있으며, 이 안전율 4를 적용하는 데는 장기변형에 대한 관의 안전성을 고려하기 위한 것이며, 관의 접합부 누수의 영향도 고려된 것이다(Jeyapalan, et

al., 1986; Watkins, 2000).

4. 지중매설 폴리에틸렌 관의 구조적 거동

폴리에틸렌 관이 지중에 매설될 경우의 단기적 거동을 파악하기 위해서는 실내모형실험은 필수적이다.

지금까지의 지중매설된 관의 단기적 거동조사는 현재 관 변형만을 고려하고 있다. 하지만 Watkins (2000) 등에 의하면 연성관의 경우, 관에 작용하는 변형률에 대한 제한을 식 (1)과 같이 제안하고 있다. 이러한 이유는 변형률은 곧 처짐과 밀접한 관계를 이루고 있으며 일반적으로 관 시공시 관변형에 제한을 두어 변형률을 제어하기 때문이다(Moser, 1998).

$$\epsilon = D_f \frac{t}{D} \frac{\Delta y}{D} \quad (2)$$

식 (2)에서 ϵ 은 관의 원주방향 최대 휨 변형을 나타내며, D_f 는 다짐에 따른 형상계수(잘된다짐=3)를 나타낸다.

이 논문에서는 강재로 제작된 토조를 이용하여 실내모형실험을 수행하여 실험결과를 유한요소 해석과 ASTM D 2412, AWWA M 45 등에서 적용하고 있는 이론식과 비교하여 지중에 매설된 폴리에틸렌 관의 단기 거동을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

4.1 실내모형실험

실내모형실험에 사용한 되메움토는 실험 과정의 편의 및 양호한 지반반력계수를 확보하기 위하여 사질토를 사용하였다. 사질토는 점착력이 없기 때문에 포아송 효과(poisson effect)로 인해 일축압축력에 대하여 크게 팽창한다. 따라서 이 실험에 사용된 토조는 사질토의 팽창을 구속하기 위해 충분한 양의 보강판을 벽체에 부착하였다. 제작한 토조의 각 부품과 결합된 형태는 Fig. 7에 나타내었다.



Fig. 7. Test Set-up

폴리에틸렌 관의 실내모형실험은 연성관의 매설 후 관의 거동을 예측하기 위한 실험으로서 하수도시설기준에서 권장하고 있는 360° 다짐을 하여 하중 변화에 따른 관의 거동을 조사하였다.

실험 시편은 직경 300 mm인 PE 이중벽관, 다중벽관으로서 관중별로 각각 3회씩 실험을 실시하여 하중의 변화에 따른 관의 변형을 측정하였다. 실험방법은 Fig. 8에 나타난 것과 같이 800 mm × 500 mm × 750 mm의 제원으로 제작한 토조에 표준사를 200 mm 높이의 기초를 포설하고 그 위에 폴리에틸렌 관을 위치시켰다. 위치시킨 관은 기초와 동일한 재질의 표준사를 이용하여 250 mm의 토피고로 매설하였으며, 하중은 1000 kN 용량의 UTM (universal testing machine)을 이용하여 재하하였고, 변위계(LVDT, linear variable differential transformer)를 관 내부에 위치시켜 관변형을 측정하였다. 하중은 변위제어방식으로 10 mm/min의 속도로 재하하였으며, 변위계로부터 측정되는 데이터와 하중은 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장 되도록 하였다. 지중매설 실내모형실험을 Fig. 9에 나타내었다.

실내모형실험 결과, 폴리에틸렌 이중벽관의 관변형 5 %일 때 평균하중은 19.4 kn이고, PE 다중벽관은 24.03 kn으로 나타났으며, 관의 강성이 증가함에 따라 지중에 매설된 관의 하중저항능이 증가하는 것을 확인하였다.

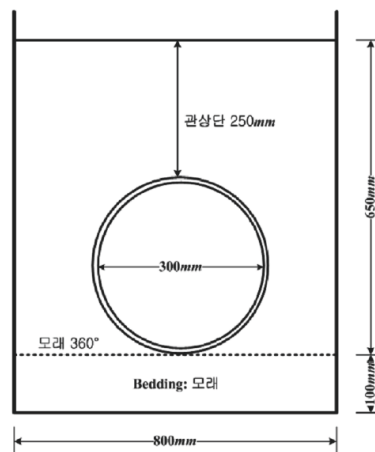


Fig. 8. Laboratory Test Method



Fig. 9. Laboratory Test

4.2 유한요소해석

실내모형실험은 지중에 매설한 폴리에틸렌 관의 구조적 거동을 파악하기 위해 수행하였다. 그러나 이러한 실험적 연구는 많은 시간과 비용 등이 발생하고 현장조건에 따라 실험을 수행할 수 없는 경우도 발생한다. 그러나 유한요소해석(finite element method)이나 설계식(Iowa Formula) 등의 이론적 해석은 관변형을 예측하기 위한 시간적 경제적 제약이 적고 다양한 관중 및 지반조건을 쉽게 고려할 수 있기 때문에 여러 실험적 분석 방법에 비하여 연성관의 구조적 거동을 효과적으로 파악할 수 있다. 이 논문에서는 지중매설된 폴리에틸렌 관의 구조적 거동을 파악하기 위해 유한요소해석과 이론식 (1)을 이용한 해석을 수행하여 관변형을 예측하였고, 예측한 결과를 지중매설 모

사실험의 결과와 비교분석하였다. 이 논문에서 사용된 유한요소해석 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 ANSYS Ver. 11을 사용하였다.

이 프로그램은 AUTO CAD 기능과 호환하고 보, 평면응력, 3차원 고체해석, 정적해석 및 동적해석 등을 수행할 수 있는 기능을 가지고 있어 AUTO CAD로 3차원(3D) 모델링을 하여 유한요소해석프로그램인 ANSYS로 전환시켜 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석을 수행하기 위한 기초조건은 지중매설 모사실험에 사용된 모래를 기초(중간다짐, $E' = 2.75MPa$)로 적용하였고, 재료의 역학적 성질은 각 재료에 대한 인장실험을 수행하여 적용하였다.

관의 모델링은 AUTO CAD를 사용하였으며, 관을 길이방향으로 300 mm, 관경은 300 mm로 실제 시험편의 치수와 같도록 모델링하여 Fig. 10과 같이 ANSYS 프로그램으로 변환하였다. 각 시험편의 치수 및 재료적 성질을 Table 7에 정리하여 나타내었다.

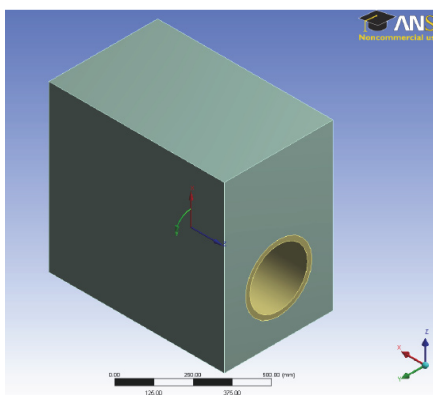


Fig. 10. Finite Element Model of Short-term Behavior Test

Table 7. Dimension and Mechanical Properties of Short-term Behavior Test

구분	두께(mm)	탄성계수 (GPa)	포아송비
이중벽	16	2.25	0.3
다중벽	20		
모래	-	2.75	0.2

4.3 결과 및 비교

해석 결과 5 % 관변형이 발생할 때 폴리에틸렌 관에 작용하는 하중은 지중매설 실내모형실험과 유사하게 나타났다. 따라서, 이 논문에서 제시한 유한요소해석 모델을 이용하여 지중매설된 폴리에틸렌 관의 구조적 거동을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 유한요소해석 모델의 관변형은 Fig. 11에 나타내었으며, 유한요소해석과 이론식에 의한 해석 결과는 지중매설 실내모형실험 결과의 평균과 비교하여 Table 8에 정리하였다. Table 8에 나타낸 것과 같이 유한요소해석과 이론식을 이용한 해석 결과는 실험 결과와 매우 유사하게 나타났다. Watkins (2000)가 제안한 최대 힘 변형률을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

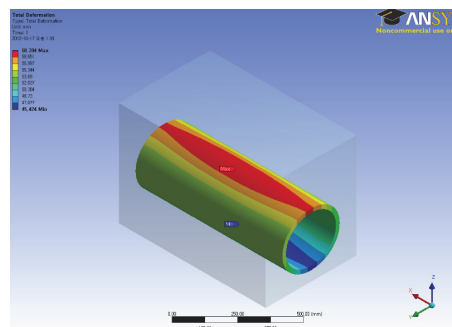


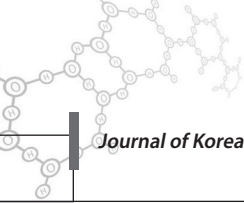
Fig. 11. Ring Deflection of FEM

Table 8. Comparison of Results

관종	5 % 관변형이 발생할 때 하중 (kN)		5 % 관변형이 발생할 때 변위 (mm/mm)		
	실험결과	유한요소 해석	Iowa Formula	유한요소 해석	Strain Formula
이중벽관	19.40	18.20	19.05	0.0077	0.0080
다중벽관	24.03	26.50	23.86	0.0100	0.0130

5. 결론

이 논문에서는 지중매설된 폴리에틸렌 관 (Polyethylene pipe)의 단기 거동특성을 조사하기 위해 관련 기준 및 국내외 문헌을 조사하여 설계방법을 조사하였고, 폴리에틸렌 관의 구



조적 거동특성 평가, 실내모형실험 및 유한요소 해석결과분석 등의 연구를 수행하였으며 연구결과 는 다음과 같다.

폴리에틸렌관의 대표 관종인 이중벽관과 다중 벽관의 역학적 성질을 구하기 위해 인장강도실험(KS M 3006)과 편평시험(ASTM D 2412)을 수행하였다. 인장강도실험을 통해서 폴리에틸렌의 탄성계수는 2.25GPa 로 조사되었고, 관경이 300 mm 인 폴리에틸렌 관의 편평시험 결과 관 내경의 7 %까지는 선형에 가까운 거동을 보였다. 인장강도시험을 통해 구한 탄성계수로 관의 강성을 예측하기 위한 유한요소해석을 수행한 결과 편평시험결과와 약 7 % 이내로 유사함을 나타내었다. 이 결과 편평시험을 수행하지 않아도 관의 강성을 유한요소해석을 이용하여 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

지중매설 연성관의 지중상태를 고려한 구조적 거동을 조사하기 위해 실내모형실험을 수행하여 폴리에틸렌 관의 단기거동을 조사하였다. 또한, 유한요소해석과 설계식(Iowa Formula)을 이용하여 관변형이 5 %가 발생할 때의 하중을 구하여 비교한 결과 실내모형실험결과와 매우 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있었고, 이에 따른 발생한 최대 휨 변형률은 Watkins (2000)가 제안한 변형률 식에 비해 작게 나타남을 알 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 폴리에틸렌 관의 지중매설 설계시 유한요소해석으로 최대 휨 변형률을 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- ANSYS (2008), *Release 11.0 Documentation for ANSYS*, Pennsylvania.
- ASTM D 2412 (2010), Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading, American Society for Testing and Materials.
- AWWA (2005), *Fiberglass Pipe Design*, 2th Ed, Manual No. M45, American Water Works Association.
- Javanmard, M. (1993), Soil-Structure Interaction of Fully and Partially Buried Flexible Pipes, *Ph.D. Thesis*, The University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.
- Jeyapalan, K. K. and Boldon, B. A. (1986), Performance and Selection of Rigid and Flexible Pipes, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 5, Paper No. 20900.
- Kim, S. H., Park, J. S., Yoon, S. J., Kim, E. H. (2011) Prediction of Structural Behavior of Flexible Sewer Pipe Buried Underground, *Korea Society on Water Environment, Korea Water Congress 2011*, (E-12), pp. 273-274.
- KS M 3006 (2003), Determination of Tensile Properties of Plastics, Korean Agency for Technology and Standards.
- Moser, A. P., *Buried Pipe Design* (2001), McGraw-Hill Companies, Inc., NewYork.
- Park, J. S., Kim, S. H., Kim, E. H. (2012) Pipe Stiffness Prediction of Buried Flexible Pipes, *Korea Society of Water and Wastewater, Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 26(1), pp. 13-20.
- Smith, G. and Watkins, R. (2004), The Iowa Formula: It's Use and Misuse When Designing Flexible Pipe, *Proceeding of Pipelines International Conference*, American Society of Civil Engineers, ASCE, pp. 1-7.
- Watkins, R. K. and Anderson, L. R. (2000), *Structural Mechanics of Buried Pipes*, CRC Press LLC., New York.