Journal of the Korean Geo-Environmental Society
25(10): 5~10. (October 2024) https://journal.kges.or.kr

ISSN 1598-0820 (Print)
ISSN 2714-1233 (Online)
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2024.25.10.5

지중매설 폴리에틸렌관의 다짐도에 따른 관변형 연구

A Study on the Ring Deflection According to Compaction of Buried Polyethylene Pipes

백 승 철[1] · 김 승 욱[2] · 최 병 한[3] · 김 선 희†

Seungcheol Baek · Seungwook Kim · Byounghan Choi · Sunhee Kim

Received: 13th August 2024; Revised: 21st August, 2024; Accepted: 9th September, 2024

ABSTRACT : Flexible pipes have the property of resisting external loads by utilizing the rigidity of the pipe and the surrounding ground, and have recently been in the spotlight because they are lighter in weight and have excellent durability compared to concrete pipes. In this study, the behavior characteristics of buried polyethylene pipe, a representative flexible pipe, were examined. Double-walled and multi-walled polyethylene pipes were used, and the structural behavior of the polyethylene pipe was evaluated based on a 5% deflection of the pipe diameter suggested in the design standards for flexible pipes. For the polyethylene pipe, the material properties of the pipe were identified through a ring stiffness test, and the behavior characteristics in the ground were reviewed through the simulation experiment of the buried polyethylene pipes. In addition, a finite element analysis model was developed based on the results of underground burial simulation experiments, and the behavior characteristics of polyethylene pipes according to backfill conditions were evaluated using the developed finite element analysis model and design equation. As a result of the study, it was confirmed that the capacity of the pipes and the compaction of the backfill are the main factors that determine the structural performance of the buried polyethylene pipe.

Keywords : Polyethylene pipe, Flexible pipe, Simulation test, Structural analysis, Backfill

요 지 : 연성관은 관의 강성과 주변 지반의 강성을 이용하여 외부하중에 저항하는 특성을 가지고 있으며, 기존의 콘크리트 관에 비해 중량이 가볍고, 내구성이 우수하기 때문에 최근 각광받고 있다. 이 연구에서는 대표적인 연성관인 폴리에틸렌 관을 대상으로 지중에서의 거동 특성을 검토하였다. 폴리에틸렌 관은 이중벽관과 다중벽관을 사용하였으며, 폴리에틸렌 관의 구조적 거동은 연성관의 설계기준에서 제시하고 있는 관 직경의 5% 변형을 기준으로 평가하였다. 폴리에틸렌 관은 원강성시험을 통해 관의 재료적 특성을 파악하고, 지중매설 모사실험을 통해 지중에서의 거동 특성을 검토하였다. 또한 지중매설 모사실험 결과를 토대로 유한요소해석모델을 개발하였으며, 개발한 유한요소해석모델과 설계식을 사용하여 지반조건에 따른 폴리에틸렌 관의 거동 특성을 평가하였다. 연구 결과 지중매설 폴리에틸렌 관은 관 자체의 성능과 주변 지반의 다짐 정도가 구조적 성능을 결정하는 주요 인자임을 확인하였다.

주요어 : 폴리에틸렌 관, 연성관, 모사실험, 구조해석, 되메움토

1. 서 론

기존의 하수관거 대부분을 차지하고 있던 철근콘크리트관은 노후화와 부식 및 수밀성 미확보가 문제점으로 제기되었으며, 이후 철근콘크리트관의 사용이 급격히 감소하고 있다. 또한 철근콘크리트관은 취성 파괴되는 특성이 있기 때문에 지하철 및 상재하중에 의한 진동 등이 발생할 수 있는 곳에 매설할 경우 진동에 의한 균열이 발생할 수 있다. 따라서 지속적인 유지관리가 필요하지만, 철근의 부식 등에 의한 장기 내구성 확보는 매우 어려운 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 플라스틱 재질의 하수관을 적용하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 플라스틱 재질의 하수관은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 지중에 매설할 경우 지반과 유기적으로 거동(Soil-Structure Interaction Behavior)하기 때문에, 관의 자체 강성으로 하중에 저항하는 철근콘크리트관과 같은 강성관(rigid pipe)과 대비되는 연성관(flexible pipe)으로 분류하고 있으며, 연성관을 구성하는 재료의 성능뿐만 아니라 되메움토의 성질 및 다짐도 또한 구조적 성능 발현에 매우 중요하다.

이 연구에서는 지중매설 모사실험을 통해 비압력관으로 활용되는 하수관거용 플라스틱 관 중 하나인 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 이중벽관과 다중벽관의 관변형을 지중모사

1) Professor, Andong National University
2) R&D Team Director, Asin C&T
3) Principal Researcher, KRC Rural Research Institute
† Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Gachon University (Corresponding Author : shkim6145@gachon.ac.kr)

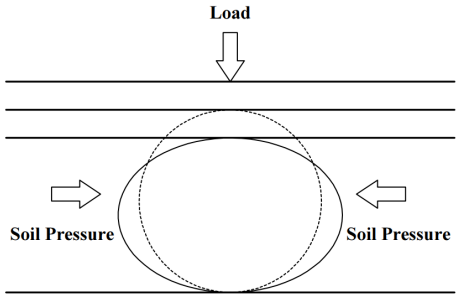


Fig. 1. Load carrying mechanism of flexible pipe (Choi et al., 2012; Lee et al., 2020)

실험을 통해 측정하고, 유한요소해석 결과와 비교·검토하였다. 또한, 유한요소해석모델을 통해 다짐도에 따른 지중매설 폴리에틸렌관의 관변형을 검토하였다.

2. 지중매설 폴리에틸렌관의 설계

ASTM D 2412(2021)에서 제안하고 있는 지중매설된 연성관의 설계는 관변형을 기준으로 검토하고 있으나, 관변형은 Eq. (1)과 같이 구할 수 있다. 또한, Eq. (1)을 통해 구한 관변형은 전체 관 지름의 5%로 제한하고 있으며, 관에 발생하는 휨모멘트 및 휨응력에 대한 검토는 언급하고 있지 않다.

$$\Delta y = \frac{D_e K W_c}{0.149PS + 0.061E_s} \quad (1)$$

Eq. (1)은 Iowa Formula라고도 하며, Δy는 수직방향 관변형을 나타내며, D_e는 변형지연계수, K는 받침각(bedding angle) 계수, E_s은 매립토의 지반반력계수, PS는 관의 강성(Pipe Stiffness), W_e는 단위길이당 연직토압을 나타낸다(Smith & Watkins, 2004; Park et al., 2012). 또한 Eq. (1)에서 PS는 Eq. (2)와 같이 구한다(ASTM D 2412, 2021).

$$PS = \frac{F}{L \times \Delta y} \quad (2)$$

Eq. (2)에서, F는 관변형 5%가 발생하는 선하중, L은 시험편의 폭을 의미한다.

3. 폴리에틸렌관의 원강성시험

3.1 시험 방법

ASTM D 2412(2021)에서, Eq. (2)의 관의 강성(PS)은 원강성시험을 통해 결정하도록 규정되어 있다. 즉, 원강성시험은 편평시험이라고도 하며, 관변형 5%일 때의 하중과 변위를 통해 관의 강성을 직접적으로 구할 수 있다.

이 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 직경 300mm의 PE관을 대상으로 원강성시험을 수행하였다. 원강성시험에 사용한 시편은 이중벽관과 다중벽관으로 구분되며, 시험체의 구분 및 치수는 Table 1에 나타내었다.

원강성시험은 1,000kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)에 시편을 위치시킨 후 압축하중을 재하하였고, 관내경의 최소 30%의 관변형이 발생할 때까지 수행하였다. 관의 상하부 변위는 와이어 게이지(wire gauge)를 이용하여 측정하였으며, 하중은 KS M ISO 9969(2021)에서 관의 직경별로 제시하고 있는 것과 같이 10±2mm/min의 속도로 재하하였다. 원강성시험 과정은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Classification and specification of ring stiffness test specimens (Park et al., 2012; Seo et al., 2017)

Classification	No. of Specimen	Length (L, mm)	Thickness (t, mm)	Inner Diameter (D, mm)
Double Wall Pipe	PE-DP-1	300	19	300
	PE-DP-2			
	PE-DP-3			
	PE-DP-4			
	PE-DP-5			
Multi Wall Pipe	PE-MP-1	300	20	300
	PE-MP-2			
	PE-MP-3			
	PE-MP-4			
	PE-MP-5			

Fig. 2. Ring stiffness test for the PE pipe

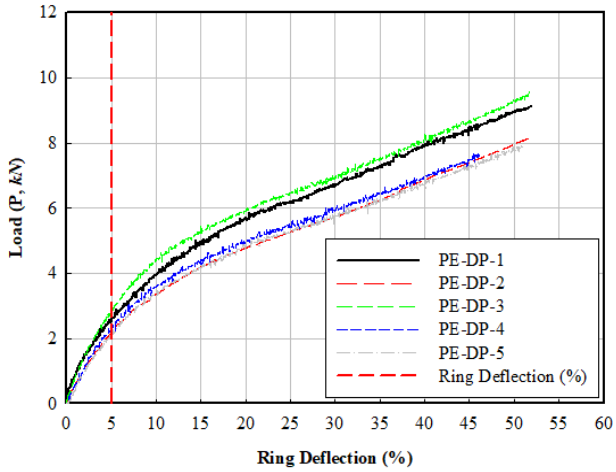
3.2 시험 결과

시험 결과, 모든 PE관 시편은 수직방향으로 직경이 감소하며, 포아송 효과로 인해 수평방향으로 직경이 증가하는 거동을 나타내었다. 또한 하중을 제거하면 일정량의 변위가 복원되는 현상을 나타내었으며, 하중을 지속적으로 재하하여도

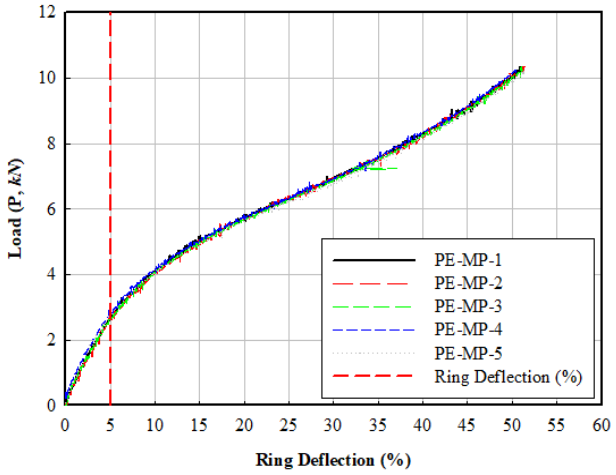
재료의 파괴가 발생하지 않았다. PE관의 원강성시험으로 인한 변위 형상은 Fig. 3에 나타내었으며, 각 시험체의 관변형 5%일 때 하중과 관변형의 관계는 Fig. 4에 나타내었다.

PE관의 관강성은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 관변형 약 7% 까지는 선형에 가까운 거동을 나타내었으며, Eq. (2)를 통해 구한 관강성은 Table 2에 정리하였다.

Fig. 3. Deformed shape of the PE pipe



(a) Double wall PE pipe



(b) Multi wall PE pipe

Fig. 4. Load-deflection relationship of the PE pipe

Table 2. Test results of ring stiffness

Classification	No. of Specimen	PS (kN/m^2)
Double Wall Pipe	PE-DP-1	177.33
	PE-DP-2	146.00
	PE-DP-3	194.00
	PE-DP-4	155.33
	PE-DP-5	142.67
	Average	159.33
Multi Wall Pipe	PE-MP-1	177.33
	PE-MP-2	173.33
	PE-MP-3	172.67
	PE-MP-4	186.67
	PE-MP-5	183.33
	Average	178.00

4. 지중매설 모사실험

4.1 실험 개요

이 연구에서는 지중매설 PE 관의 구조적 거동 특성을 파악하기 위한 모사실험을 수행하였다. 지중매설 모사실험에 사용한 되메움토는 실험과정의 편의 및 일정한 지반반력계수 확보를 위해 점착력이 없는 건조된 사질토를 사용하였다.

지중매설 모사실험에 사용한 토조는 강재로 제작하였으며, 모든 구성품을 결합하였을 때 길이 800mm, 폭 750mm, 높이 500mm로 제작하였다. 또한 1개의 바닥판, 폭과 보강량이 다른 2종류의 벽체 각각 2개, 각 벽체를 조립하기 위한 접합 앵글, 하중을 분포 재하시키기 위한 가력체로 구성되어 있으며, 각 구성품은 직경 22mm의 볼트로 접합하였으며, 제작한 토조의 형상은 Fig. 5에 나타내었다.

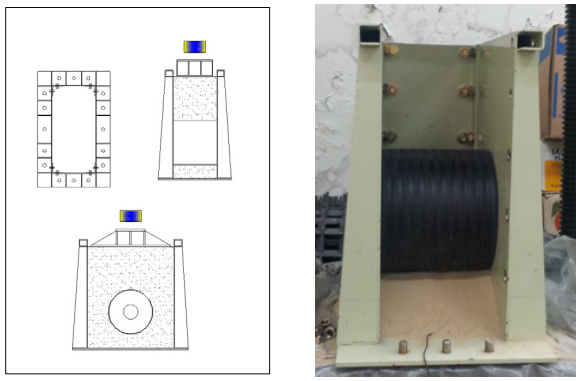


Fig. 5. Model chamber

4.2 실험 방법

PE관의 지중매설 모사실험은 하수도 설계기준(KDS 61 00 00)에서 연성관의 경우 360° 모래다짐을 권장하고 있다.

이 연구에서는 PE관의 지중매설 모사실험을 KDS 61 00 00에 따라 360° 모래다짐을 수행하였다.

실험체는 직경 300mm, 길이 300mm인 PE 이중벽관과 PE 다중벽관을 대상으로 관종별 각각 3회씩 실시하였으며, 하중의 변화에 따르는 관변형을 측정하였다.

토조 내 PE관 설치 방법은 100mm 높이로 사질토를 포설하고, PE관을 위치시킨 후, 관상단으로부터 250mm의 토피고를 확보할 수 있도록 PE관을 매설하였다. 이 때 토피고로 인한 관의 상부하중은 약 0.4kN이다. 지중매설 모사실험의 실험체 설치 방법은 Fig. 6에 나타내었다.

하중은 1,000kN 용량의 UTM을 사용하여 10mm/min의 속도로 재하하였다. 또한, 변위계를 관 내부에 위치시켜 관변형을 측정하였다. 지중매설 모사실험 과정은 Fig. 7에 나타내었다.

[Unit: mm]

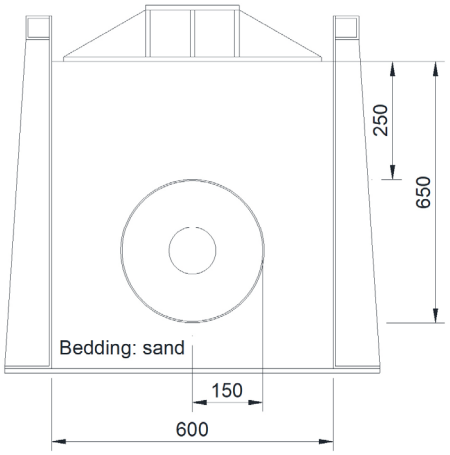


Fig. 6. Specimen installation

Fig. 7. The simulation test for the buried pipes

4.3 실험 결과

PE관의 지중매설 모사실험 결과, 관변형 5%일 때의 평균 하중은 PE 이중벽관의 경우 97.51kN, PE 다중벽관의 경우 166.31kN으로 나타났으며, 관의 강성이 증가함에 따라 지중에 매설된 관의 하중저항성능은 증가하는 것으로 나타났다. 실험 결과는 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Results of the simulation test for the buried pipes

Classification		Max.	5% (15mm) Pipe Deflection		
		Max. Load (kN)	Load (kN)	Aver. (kN)	PS (kN/m^2)
Double Wall Pipe	DP-1	171.14	98.78	97.51	6,456.21
	DP-2	176.77	94.33		6,923.30
	DP-3	162.37	99.41		6,309.74
Multi Wall Pipe	MP-1	267.79	202.55	166.31	12,466.23
	MP-2	193.98	146.73		10,232.21
	MP-3	244.17	149.66		9,754.90

5. 유한요소해석

5.1 해석 개요 및 조건

이 연구에서는 지중매설 모사실험의 결과와 유사한 결과를 도출할 수 있는 해석모델을 제안하고, 다짐도에 따른 PE관의 구조적 거동을 검토하기 위한 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석은 지중매설 모사실험에 사용한 PE 이중벽관과 PE 다중벽관을 실험과 동일한 조건으로 범용유한요소해석 프로그램인 GTSTRUDL을 이용하여 수행하였다. 모델링에 사용한 요소는 SBHQ6라는 판요소이며, 원주방향으로 48등분하여 실제 부재 치수를 갖도록 모델링하였다. 또한 해석모델의 경계조건은 관 단면 중립축 아래를 수직탄성지지(종방향 스프링)로 가정하고, 관 전단면은 지반반력계수 약 40MPa를 적용한 수평탄성지지(횡방향 스프링)로 가정하였다. 또한 관의 최하단은 해석모델의 평형관계 성립을 위해 단순지지로 가정하였다. 유한요소해석모델은 Fig. 8에 나타내었다.

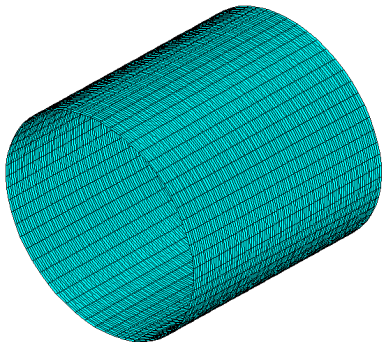


Fig. 8. FE analysis model for PE pipe

5.2 해석 결과

해석결과 PE관은 수직과 수평방향이 모두 탄성지지된 관 하부는 원형의 형상을 비교적 유지하였으나, 수평방향으로만 지지된 관 상부는 수직방향 관변형이 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 지중매설된 PE관은 관 상부의 관변형이 하부에 비해 크게 나타날 것으로 판단된다.

또한 5% 관변형에 대한 유한요소해석 결과는 실험결과에 비해 약 4% 작게 나타났으며, 지중매설된 PE관의 연성거동 및 지반과의 상호작용을 유사하게 반영하고 있는 것으로 나타났다.

유한요소해석모델의 관변형 형상은 Fig. 9에 나타내었으며, 5% 관변형이 발생했을 경우의 실험결과와 해석결과를 비교하여 Table 4에 정리하였다.

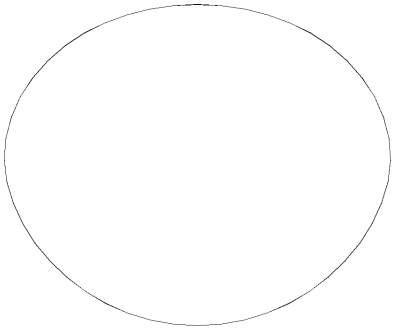


Fig. 9. Deformed shape of FE analysis model

Table 4. Comparison between test and FE analysis results

Classification	Load at the 5% Pipe Deflection (kN)		A/B
	Test (A)	FE Analysis (B)	
Double Wall Pipe	97.51	93.23	1.046
Multi Wall Pipe	166.31	159.13	1.045

6. 지중매설 PE관의 다짐 영향

6.1 Iowa Formula에 의한 검토

실험조건에 대하여 Eq. (2)를 통해 구한 다짐도에 따른 PE 이중벽관과 PE 다중벽관의 관변형은 Fig. 10에 나타내었다. Iowa Formula는 원강성시험을 통해 구한 각 관종의 원강성, 지중매설 모사실험에서 각 관종의 5% 관변형에 도달한 하중, 360° 다짐의 조건에 대하여 검토하였다.

Fig. 10에 나타낸 것과 같이, PE관의 관변형은 다짐도에 반비례하는 경향을 나타내었으며, PE 이중벽관은 지반반력계수 29.10MPa, PE 다중벽관은 49.77MPa에서 5%의 관변형에 도달하는 것으로 나타났다. 즉, 적용하는 PE관의 원강성이 클수록 관변형은 작게 발생하지만, 지반조건 또한 지중매설 PE관의 구조적 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

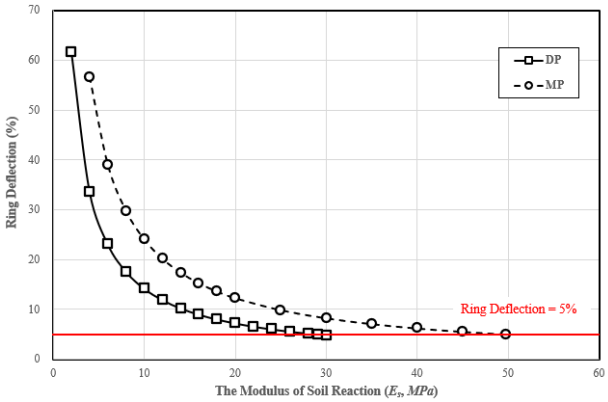


Fig. 10. Relationship between the modulus of soil reaction and ring deflection of the PE pipe using Iowa formula

6.2 유한요소해석에 의한 검토

Fig. 8에 나타낸 유한요소해석 모델을 적용하여 PE관의 되매움토의 다짐도에 따른 PE관의 구조적 거동을 검토하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 다짐은 관의 극한 변형과 거동에 영향을 준다. ASTM D 2321에서 제시하고 있는 최소 다짐밀도는 입도가 양호한 조립토의 경우 표준다짐밀도로 85%에 준해야 한다. 이 연구에서는 유한요소해석을 통해 다짐도별로 95%에서 80%로 5%씩 감소시키며, 5% 관변형 도달 시의 하중을 검토하였다.

해석 결과, 5% 관변형에 도달하는 하중은 이중벽관에서 최대 약 8.93%, 다중벽관에서 최대 약 7.90% 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 다짐도가 불량할수록 PE관의 하중저항 성능은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 다짐도 감소에 따른 PE관의 5% 관변형에 해당하는 하중은 Table 5에 정리하였다.

Table 5. FE analysis results according to the compaction

Classification		Compaction (%)			
		95	90	85	80
Double Wall Pipe	Load (5% Deflection, kN)	93.23	90.39	87.94	84.90
	Comparison with 95% compaction (%)	-	3.05	5.67	8.93
Multi Wall Pipe	Load (5% Deflection, kN)	159.13	154.78	151.25	146.55
	Comparison with 95% compaction (%)	-	2.74	4.95	7.90

7. 결 론

이 연구에서는 연성관 중 하나인 PE관을 대상으로 원강성시험, 지중매설 모사실험, 유한요소해석 및 설계식(Iowa Formula)을 통해 지반조건에 따른 지중매설 PE관의 구조적 거동 특성을 검토하였다. 이 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) PE관의 원강성 시험결과, PE관은 재료파괴 없이 수직방향의 관변형이 발생하고, 하중을 제거하면 복원하는 특성이 있으며, 이중벽관보다 다중벽관에서 큰 원강성을 나타내었다.

(2) 지중매설 모사실험 결과, 관변형 5% 도달 시 이중벽관의 하중은 97.51kN, 다중벽관의 하중은 166.31kN으로 나타났으며, 다짐도에 의해 차이는 있으나 비교적 일정한 결과를 나타내었다.

(3) 유한요소해석의 관변형 5% 도달 시 하중은 지중매설 모사실험의 결과를 비교할 때, 약 4% 작은 하중에서 관변형 5%에 도달하였으며, 관 상부에 수직방향 변위가 하부에 비해 크게 발생하는 것으로 나타났다.

(4) Iowa Formula를 통해 지반조건이 관변형이 미치는 영향을 분석한 결과, PE관은 이중벽관의 경우 지반반력계수 29.10MPa, 다중벽관은 49.77MPa일 때 실험과 유사한 결과가 나타났으며, PE관의 구조적 성능을 확보하기 위해서는 되메움토의 높은 다짐도를 요구하는 것으로 나타났다.

(5) 유한요소해석 결과, 다짐도가 95%에서 80%로 감소하는 동안 PE 이중벽관은 8.93%, 다중벽관은 7.90%의 구조적 성능이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 지중매설 PE 관의 구조적 성능은 되메움토의 다짐도가 매우 중요한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발사업 “월류대비 농업용 저수지 긴급 방류장치 및 시스템 개발” 과제의 지원을 받아 연구되었음(322079-3).

References

1. ASTM D 2412 (2021), Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading, American Society for Testing and Materials.
2. Choi, J. W., Joo, H. J. and Yoon, S. J. (2012), Characteristics of short-term soil-pipe interaction behavior of GRP pipes, Proceedings of Korean Society for Advanced Composite Structure congress, pp. 17~18 (In Korean).
3. KDS 61 00 00, Sewer design standard, Ministry of Environment.
4. KS M ISO 9969 (2021), Thermoplastics pipes—Determination of ring stiffness, Korean standards association.
5. Lee, D. H., Choi, J. W. and Kim, S. H. (2020), Short-term behavior of buried glass fiber reinforced polymer plastic pipes, Journal of Korean Society for Advanced Composite Structure, Vol. 11, No. 6, pp. 9~16 (In Korean).
6. Park, J. S., Lee, Y. G., Kim, S. H., Park, J. H. and Kim, E. H. (2012), Prediction of short-term behavior of buried polyethylene pipe, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol. 26, No. 6, pp. 907~914 (In Korean).
7. 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.
8. Seo, J. H., Lee, J. H., Yoo, J. H. and Kim, E. H. (2017), Structural behavior and design of polyethylene pipe buried underground, Journal of Korean Society for Advanced Composite Structure, Vol. 8, No. 3, pp. 37~45 (In Korean).