



# 지중매설 폴리에틸렌 관의 장기거동 예측

## Prediction of Long-Term behavior of polyethylene pipe buried underground

이재호·김빈·윤수현·김응호\*

Jae-Ho Lee·Bin Kim·Soo-Hyun Yoon·Eung-Ho Kim\*

홍익대학교 토목공학과

Department of Civil Engineering, Hongik University

### ABSTRACT

Most of existing buried pipes are composed of reinforced concrete. Reinforced concrete pipes have many problems such as aging, corrosion, leaking, etc. The polyethylene (PE) pipes have advantages to solve these problems. The plastic pipes buried underground are classified into a flexible pipe. National standard that has limited the long-term vertical deformation of the pipe to 5% for flexible pipes including PE pipe. This study presents a prediction for the long-term behavior of the polyethylene pipe based on ASTM D 5365. This prediction method is presented to estimate by using the statistical method from the initial deflection measurement data. We predict the behavior of long-term performance on the double-wall pipe and multi-wall pipe. As a result, it was found that the PE pipe will be sound enough more than 50 years if the compaction of soil around the pipe is more than 95% of the standard soil compaction density.

**Key words:** Buried pipe, Flexible pipe, Long-Term Behavior, Polyethylene pipe

**주제어:** 지중매설관, 연성관, 장기거동, PE관

## 1. 서 론

기존 하수관로의 대부분을 차지하고 있는 철근콘크리트관은 노후화와 황화수소 등에 의한 부식 및 수밀성 미확보가 문제점으로 제기되고 있다(Kim, 2011; Park et al., 2012).

철근콘크리트관은 취성재료이기 때문에 지하철 및 상재하중에 의한 진동 등이 발생할 수 있는 곳에 매설할 경우 진동에 의해 균열이 발생할 수 있기 때문에 지속적인 유지관리가 필요하며, 콘크리트의 보강재로 사용하고 있는 강재의 부식 등으로 관의 장기적인 내구성을 확보하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 플라스틱 재질로 구성된 하수관을 적용하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우 PE 연성관의

관변형에 대한 수치해석적 시뮬레이션을 통한 장기 관변형에 대한 예측이 이루어지고 있다(Yu, et al. 2015). 플라스틱 재질의 하수관은 지중에 매설할 경우 지반과 유기적으로 거동하는 연성관으로써 제품의 품질과 시공에 대한 신뢰성이 동시에 확보되어야 구조적인 안전성을 기대할 수 있다(Park et al., 2012).

이미 기술선진국에서는 연성관은 관의 구조적 거동을 고려하여 관변형을 예측하고, 관변형을 제한하는 연구가 활발히 진행되어 제품의 품질과 시공에 대한 신뢰성을 확보한 상태이다.

지중매설 연성관의 변형을 예측하기 위해 Spangler (1930)는 연성관의 강성, 되메움 토의 지반반력계수, 기초조건 등 지중매설된 상태의 연성관에 대한 하중 및 경계 조건을 대부분 포함하고 있는 Iowa Formula를 최초로 제안하였다. 이 식은 약 5~6%까지 정확한 관변형을 예측할 수 있다(Javanmard, 1993; Smith and

Received 7 October 2016, revised 20 January 2017, accepted 24 January 2017

\*Corresponding author: Eung-Ho Kim (E-mail: kimeh@hongik.ac.kr)

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

Watkins, 2004; Kim, 2011).

Iowa Formula는 실험으로부터 관변형이 약 20%에서 파괴가 발생하였을 때 여기에 안전율 4를 적용하여 관의 변형을 5% 이내로 제한한 것이다. 또한, 장기변형에도 관의 안전성을 고려하기 위한 것이며, 관의 접합부 누수의 영향도 고려된 것이다(Jeyapalan and Boldon, 1986).

국내에서도 이미 지중매설 폴리에틸렌 관의 단기거동에 대한 연구에서 인장강도시험과 편평시험, 실내 모형실험으로 단기거동에 대한 성능이 확인된 바 있다(Park et al., 2012). 그러나 구조적 안전성을 위해서는 장기거동특성을 추가적으로 확인해야 한다.

국내 하수관거공사 표준시방서(2010)에서는 설계시 연성관의 장기허용관변형을 5% 이내로 규정하고 있기 때문에 설계단계에서 시공 후 관 내외부 요인에 의한 관의 장기변형을 고려해야 한다. 또한, 하수관로 정밀조사 매뉴얼(2015)에서는 연성관의 내부결함 및 양호도 평가를 수행할 때, 관 변형이 직경의 7.5% 미만일 발생했을 때 최고등급(C등급)을 받을 수 있다.

국의 표준 중 미국의 경우는 PPI CPPA Standard Specification, PPI Structural Design Method for Corrugated PE Pipe Deflection, ASTM F 894에서는 흙의 최적함수비(Optimum Moisture Content: OMC) 상태에서 표준다짐밀도의 94% 이상 다짐을 했을 경우에는 최대허용관변형을 7.5%로 제안하고 있다. 그리고 독일의 ATV-DVWK-A 127(2000)에서는 장기변형률이 6%를 초과하지 않도록 제안하고 있으며 스칸디나비아(Janson, 1999)에서는 단기변형률이 8%, 장기변형률이 15%를 초과하지 않도록 권고하고 있다(Kuliczowska and Zwierzchowska, 2016).

이 연구에서는 폴리에틸렌관의 단기거동을 실험을 통해 확인하고 장기거동을 ASTM D 5365 (ANNEX)와 하수관거 관변형 기준 마련 연구(Kim, 2011)에서 제안하고 있는 시간경과에 따른 관변형을 예측하여 폴리에틸렌관의 구조적 성능을 확인하였다.

## 2. 연구방법

연성관의 장기거동을 예측하기 위해 현장매설실험을 통해 폴리에틸렌관의 단기거동을 측정하였다.

### 2.1 폴리에틸렌의 역학적 특성

이 연구에서 다루는 폴리에틸렌의 역학적 특성을

확인하기 위하여 인장강도시험을 수행하였다. 인장강도시험은 KS M ISO 6259(열가소성 플라스틱 관의 인장성 측정방법, 2008)에서 제시하고 있는 방법을 사용하였다. Fig. 1과 같이 시편을 제작하였으며 하중은 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 변위제어 방식으로  $5 \pm 0.5 \text{ mm/min}$ 의 속도로 재하 하였다. 인장강도시험에 사용된 폴리에틸렌관의 Poisson's ratio는 0.45이다. 인장강도시험 결과는 Table 1과 같다.

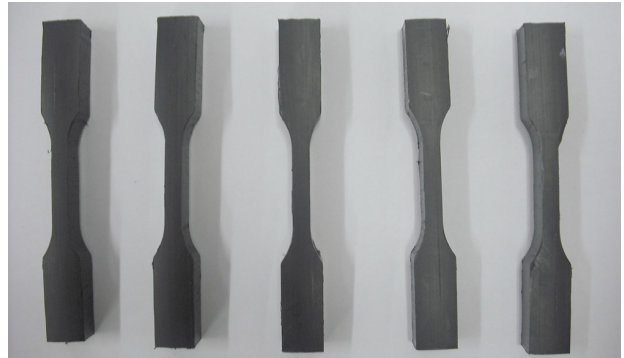


Fig. 1. Polyethylene specimen

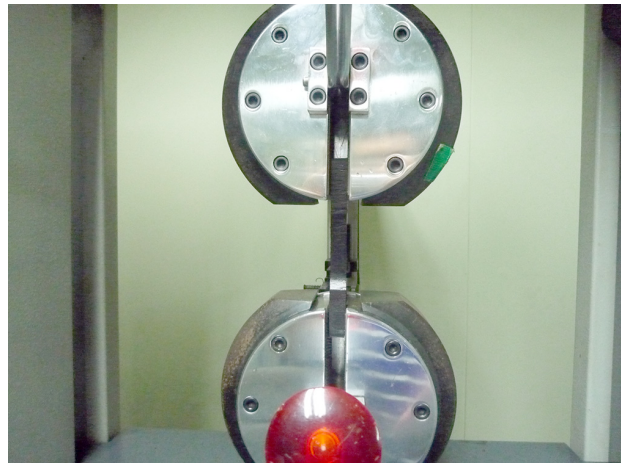


Fig. 2. Tensile test

Table 1. The results of tensile test

	Modulus of Elasticity (MPa)	Tensile Strength (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 현장매설실험

현장매설 실험에 사용한 폴리에틸렌관은 이중벽관과 다중벽관 두 종을 매설하였다. 현장매설에 사용한 폴리에틸렌관의 관경은 600mm, 관 연장은 12m 이다.

현장매설 실험의 모식도는 Fig. 3과 같으며, Fig. 4는 PE관의 현장매설 전경이다. 관의 시공은 최적함수비(OMC)에서 다짐하여 얻을 수 있는 흙의 최대 밀도의 95% 다짐을 하기 위하여 1톤 진동롤러를 이용 현지부분까지 다짐을 한 후, 100kN 롤러를 이용하여 30cm씩 층다짐을 하였다. 관 주변 토사의 다짐 상태가 관의 장기변형에 어떤 영향을 주는지 조사하기 위해 굴토를 하지 않고 30cm의 모래기초, 180° 모래 덮개 및 양질토로 복토하되 OMC 다짐 95% 이상과 80% 이하의 다짐으로 현장매설을 실시하였다.

관의 다짐과 관련하여, 단면도의 좌측은 80% 다짐을 우측은 95% 이하의 다짐을 하였고, 관거의 매립은 KS 시험기준에 부합되는 PE 다중벽관, PE 이중벽관 순으로 시공하였다. 시공후 관매설 상단에 비주기적으로 차량(DB-24, 37.5tonf)을 활용하여 활하중을 가했다.

관중별 변형량을 측정하기 위하여 현장 매설전에 관의 좌우 입구(0m, 12m 지점), 입구로부터 일정한 위치(3m, 9m 지점)에서 관의 내경을 측정하였고 관에

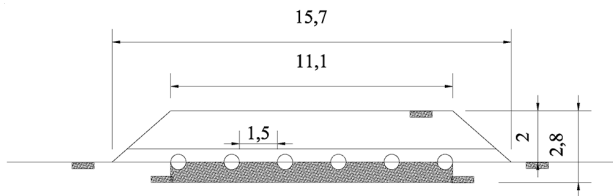


Fig. 3. Testbed (unit: m)



Fig. 4. PE pipe testbed site

측정지점을 표시하여 지속적인 측정을 실시하였다. 즉, 매립 직후( $t = 0\text{day}$ ), 일주일( $t = 7\text{day}$ ), 이후에는 15일 단위로 측정하였고, 6개월이 지난 이후로는 30일 단위로 변화를 측정하였다(283일, 총 16회 측정). 측정 결과는 각 다짐률에 대한 관변형은 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 PE 이중벽관과 PE 다중벽관의 다짐률이 95% 이상일 때 관변형 5% 이하로 나타났으며, 다짐률이 불량한 80%일 때에는 관변형 5%를 초과하는 값을 나타냈다.

현장매설실험으로 얻어진 데이터의 적합도를 확인하기 위해서 KS M ISO 10928(2004)에서 제시한 방법을 적용하였다. 총 16회 측정 데이터 중에서 매립 전 및 직후 2개의 데이터를 제외하고 14개의 데이터를 사용하여 상관 계수  $r$  및  $r^2$ 을 확인하였다. 그 결과  $r = 0.8974$ ,  $r^2 = 0.8054$  으로 나타났으며, 장기거동 예측을 위한 회귀 분석법에 적용할 수 있음을 확인하였다.

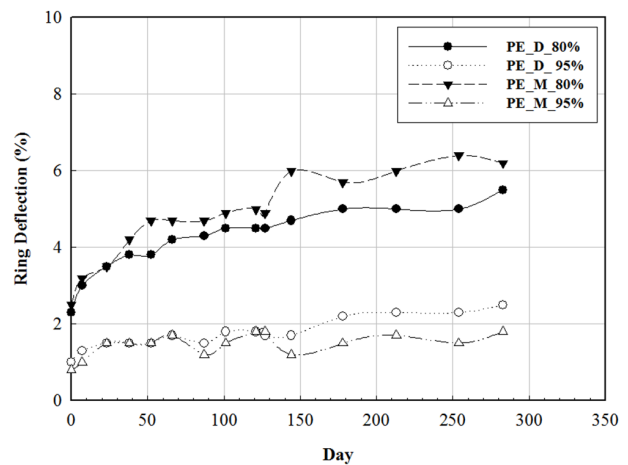


Fig. 5. Ring deflection vs Day

## 2.3 현장매설 실험결과

현장매설실험은 283일 동안 수행한 결과 관중별로 95% 다짐이 80% 다짐의 경우보다 시간에 따른 관 변형이 작은 경향을 보였다. 또한 관 내면의 수직과 수평 변형을 측정하였으며 수직방향의 변형량이 수평 방향의 변형량과 일치하지 않았다. 이는 다짐의 정도가 낮더라도 관에 가해지는 하중을 주변의 지반에 전달하는 효과가 있었다는 것과 주변의 지반이 관의 변형에 어느 정도 저항하기 때문인 것으로 판단된다.

현장매설실험을 통해 연성관으로 분류되는 폴리에틸렌관은 시공단계에서의 다짐이 95% 이상일 때 구조적 안전성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

### 3. 장기거동 예측

#### 3.1 장기관변형 예측법

연성관의 장기관변형은 초기 계측데이터를 통계적인 방법으로 장기거동을 추정하는 방법을 ASTM D 5365, KS M ISO 10928(2004)에서 제안하고 있다. 이 추정 방법은 시간 경과에 따른 관의 변형을 회귀분석을 통해 장기처짐을 도출하는 방법이고, 식 (1)과 같다.

$$\log \% strain = a + b (\log t) \quad (1)$$

$$a = \overline{\log \delta} - \overline{\log t} b \quad (2)$$

$$b = \frac{\overline{\log \delta_i} - \overline{\log \delta}}{\overline{\log t_i} - \overline{\log t}} \quad (3)$$

여기서,

$\delta_i$  = 계측한 단기관변형(%)

$t_i$  = 계측 시간(hour)

$\overline{\log \delta}$  = 계측한 단기관변형의 log 값에 대한 평균

$\overline{\log t}$  = 계측시간의 log 값에 대한 평균

식 (1)에서 a, b는 매개변수이며 식 (2)와 식 (3)으로 표현할 수 있다. 식 (2)와 식 (3)에서  $\overline{\log \delta}$ 와 같이 표시된 바(bar)는 log값에 대한 평균을 의미한다.

식 (1)에 식 (2)와 식 (3)을 대입하여 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$d = 10^{a + b \times \log_{10} t} \quad (4)$$

여기서,  $d$  = 수직방향 관변형(strain(%))

$a, b$  = 관변형에 대한 매개변수

$t$  = 시공후 경과된 시간(hour)

**Table 2.** Prediction of ring deflection (PE double-wall pipe)

Soil compaction rate Period of time(Year)	95%	80%
20	4.22	11.17
30	4.57	12.22
50	4.89	13.69

**Table 3.** Prediction of ring deflection (PE multi-wall pipe)

Soil compaction rate Period of time(Year)	95%	80%
20	3.19	14.94
30	3.42	16.61
50	3.74	18.97

시간경과에 따른 PE 이중벽관과 PE 다중벽관의 장기관변형을 예측하기 위해 식 (4)에 현장매설실험에서 측정된 관변형 데이터를 대입하였으며, 이중벽관은 Table 2, 다중벽관은 Table 3에 다짐률별 50년까지의 장기관변형을 추정, 계산한 값을 정리하여 나타내었다.

#### 3.2 관변형 제한

지중매설 연성관은 시공 후 30일 이내에 측정된 관변형이 3%를 넘지 않는다면 50년 후에도 관변형은 5%를 넘지 않는 것으로 연구, 보고된 바 있다(Kim, 2011).

이러한 현상은 양질의 시공조건(다짐률 95% 이상)에서는 장기적으로 시공 초기단계 관변형의 1.5배를 넘지 않는다는 것을 알 수 있으며, 관 주변 되메움 토사의 다짐도가 95% 이상이어야 한다. 표준다짐 약 90% 이상의 경우 시공일수를 고려하여 Monod-type 관변형 제한식을 제안하였으며 실험결과와 비교하여 타당성이 검증된 바 있다. 식 (5)는 다짐률 90% 이상일 때 관변형 5%에 수렴하는 Monod-type의 관변형 제한식이다.

$$\mu(T) = \frac{5T}{20 + T} \quad (5)$$

여기서,  $\mu$  : 시간경과에 따른 관변형(%)

$T$  : 매설 후 시간(day)

Monod-type 식과 장기거동 예측식을 적용하여 관종과 되메움토의 다짐률을 달리하여 폴리에틸렌 이중벽관과 다중벽관의 장기거동을 식 (1)과 식 (5)로 예측하여 Fig. 6에 나타내었다.

다짐률이 95% 이상일 경우 50년 후의 관변형은 모두 5% 이내로 확인되었으며, 허용관변형 5%는 구조적 측면에서 볼 때 매우 큰 안전율(FS=4)을 확보하고 있는 것으로 관의 유지관리시 개보수 기준 등을 여러 관련 설계규격에서 7.5%로 제한하고 있는 것으로부터 판단해 보면 지중매설된 PE관은 구조적 안전성 및

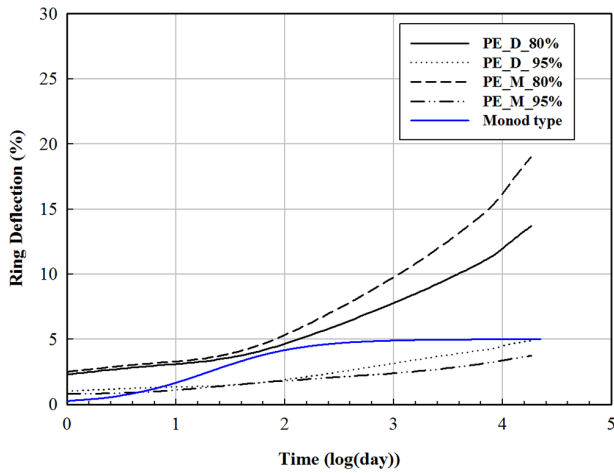


Fig. 6. Ring deflection

장기내구성을 충분히 확보하고 있다고 판단된다. 그러나 다짐률이 80% 이하일 경우의 관변형은 약 14~19%를 나타내었다. 다짐률이 80% 이하의 불량다짐일 경우 ASTM D 5365에서 제안한 식은 하수관거 관변형 기준 마련 연구(Kim, 2011)에서 제안한 Monod type 보다 큰 관변형이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 50년 이상의 장기거동을 고려하여 PE관을 시공하기 위해서는 주변 토사의 다짐률을 95% 이상으로 제한하여야 한다.

Fig. 6에서 시간경과에 따른 관변형을 변화 경향을 확인하기 위해 경과일수를 log scale로 나타내었다. 즉, 수평축의 수치 4는 log scale 이므로 약 10,000일(27.4년)의 시간경과를 의미하며, 이 연구에서는 약 50년 후까지 장기관변형을 예측한 것이다. 두 가지 예측방법에 의해 예측한 결과를 비교한 곡선은 약 50년 후까지 매우 유사한 거동을 보이는 것으로 확인되었으며, 관변형은 시간이 경과함에 따라 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

현장매설실험은 되메움토의 다짐도, 관중, 경과일수 등을 변수로 실험을 수행하였으며, 되메움 토사의 다짐률이 95% 이상 만족시킬 경우 이 연구에서 다룬 폴리에틸렌 관의 관변형은 5%를 초과하지 않는 것으로 확인되었다.

또한, 장기관변형 예측법으로 관변형을 추정한 결과, 다짐률이 80% 이하일 경우의 관변형은 약 14~

19%로 나타났다. 다짐률이 95% 이상일 경우 50년 후의 관변형은 모두 5% 이내로 확인되었으며, 허용관변형 5%는 구조적 측면에서 볼 때 매우 큰 안전율(FS=4)을 확보하고 있는 것으로 관의 유지관리시 개 보수 기준 등을 여러 관련 설계규격에서 7.5%로 제한하고 있는 것으로부터 판단해 보면 지중매설된 폴리에틸렌 관은 구조적 안전성 및 장기내구성을 충분히 확보하고 있다고 판단된다.

#### 사 사

이 논문은 2016학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

#### References

ASTM D 2412, (2010). Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading.

ASTM D 5365, (2006). Standard Test Method for Long-term Ring-bending strain of "Fiberglass," Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin Pipe.

ASTM F 894, (2013). Standard Specification for Polyethylene (PE) Large Diameter Profile Wall Sewer and Drain Pipe.

ATV-DVWK-A 127, (2000). Standards For The Structural Calculation Of Drains And Sewers

CPPA Standard Specifications, Standard Test Methods and Codes for PE Piping Systems.

Emilia Kuliczowska and Agata Zwierzchowska, (2016). A qualitative analysis of early defects present in PVC-U sewers but not observed in rigid pipes, TUST, 56, 202-210.

Janson, L. E. (1999). Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal, Swen Axelsson AB/Faldts Grafiska AB. Stockholm.

Jey K. Jeyapalan and B. A. Boldon, (1986). Performance and selection of rigid and flexible Pipes, ASCE, 112, 507-524.

Kim. E. H., KECO, (2011). Research for the Sewer Pipe Deformation.

KS M ISO 6259, (2008). Thermoplastics pipes-Determination of tensile properties.

KS M ISO 10928, (2004). Plastics piping systems-Glass-reinforced thermosetting plastics(GRP) pipes and fittings-Methods for regression analysis and their use.

Mehran Javanmard, (1994). Soil-structure interaction of fully and partially buried flexible pipes, PhD Thesis, University

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

- of New Brunswick, Canada.
- KWWA, (2010), Standard specification of sewer pipe construction.
- Moser, A. P. (2001). Buried Pipe Design, McGraw-Hill Companies, Inc.
- 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, KSWW, 905.
- Smith. G. and Watkins. R. K., (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.
- Soonyu Yu, Youngho Park, Sangil Hyun, and Kyoohong Park, (2015). Numerical simulations on shapes and materials and deterioration model of flexible sewer systems, Desalination and Water Treatment.
- Watkins, R. K. and Anderson, L. R., (2000). *Structural Mechanics of Buried Pipes*, CRC Press LLC, Florida.
- Watkins, R. K. (1987). Structural Design of Buried Corrugated Polyethylene Pipes, Soil-structure interaction, Washinton, D.C..