융착식 PE관의 내진설계 및 내진성능평가

Seismic Design and Performance Evaluation of Fusion-Type Polyethylene Pipeline

박동순*

Park, DongSoon*

Abstract

It is known that buried polyethylene (PE) pipes exhibit good seismic performance owing to their flexibility and ductility. The use of PE pipes as buried pipelines is gradually increasing, but currently, there are no seismic design or seismic performance evaluation procedures for domestic PE pipes in Korea. In this study, a seismic design and performance evaluation procedure for a domestic fusion-type PE pipe was developed based on the response displacement method, which is relatively easy to apply. The procedure was based on a method of examining whether the sum of the axial strain induced by both normal and seismic loading was within the allowable strain of the PE pipe. While calculating the axial strain of the ground, a coefficient was introduced to account for the heterogeneity of the ground. A seismic review method for ground deformation, i.e., ground liquefaction, was also introduced. The proposed procedure will provide a useful technical basis for evaluating the seismic design and performance of buried PE pipes in future studies.

Key words : Pipeline, PE Pipe, Seismic Design, Seismic Performance Evaluation, Seismic Safety

요 지

매설 PE관은 관 자체의 유연성과 연성적인 재료적 특성으로 인해 내진관으로서 양호한 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 매설관으로서 PE관의 사용성은 점차 증가하고 있으나, 국내에서는 그간 PE관의 내진설계 또는 내진성능평가 절차가 마련되어 있지 않았다. 본 연구에서는 실무자들이 비교적 간편하게 적용할 수 있도록 국내 융착식 PE관의 내진설계 및 성능평가 절차를 응답변위법 기반으로 제시하였다. 융착식 PE관의 응답변위법 해석 절차는 상시하중에 의한 변형률과 지진 시 관체의 변형률을 더하여 축방향 변형률의 합계가 허용 변형률 이내인지를 검토하는 방법을 기본으로 한다. 지반의 축방향 변형률 산정 시 지반의 불균질성을 고려할 수 있는 계수를 도입하였다. 또한 지반 액상화 등 지반 변형에 대한 내진 검토 방법도 함께 소개하였다. 각 단계별 구체적인 계산 방식을 함께 제시하였다. 향후 매설 PE관의 내진설계와 내진성능평가를 위해 본 절차는 유용한 기술적 근간을 제시할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 관로, PE관, 내진설계, 내진성능평가, 지진 안전성

1. 서 론

Polyethylene (PE)관은 재료적인 안정성과 연성이 탁월한 특성으로 인해 수도, 가스, 통신, 전력 등 다양한 분야에서 활용되고 있거나 점차 활용성이 높아지고 있는 추세이다. 특히 국내 가스배관에서 차지하는 시장점유율은 약 52%로

추산되고 있다(Gasnews, 2009). 이에 반해 수도용 PE관은 송수관의 경우 2%, 배수관의 경우 12%에 이르고 있으나, 점진적으로 증가추세에 있다(Water Journal, 2013). 일부 융착식 접합이 불가한 경우 또는 물이 많은 환경을 제외하고, 이러한 현대식 PE관의 대부분은 융착식 접합방식을 적용하고 있는 것으로 판단된다. PE관은 일반적으로 항복 후 파단에

*교신저자, 정회원, K-water연구원 책임연구원(Tel: +82-42-870-7611, Fax: +82-42-870-7619, E-mail: fulgent@kwater.or.kr)
Corresponding Author, Member, Principal Researcher, K-water Research Institute

이르기까지의 연신율이 수백 %에 이를 정도로 가요성을 갖는 우수한 특성으로 인해 지진동 및 영구 지반변형에 저항력이 우수한 것으로 알려져 있다.

이러한 PE관은 주로 지중에 매설되어 2010-2011 뉴질랜드 Christchurch 지진(M6.3), 2011 일본 Tohoku 지진(M9.0) 등의 사례에서 관의 유연성과 연성적 재료 특성으로 인해 대단히 우수한 내진성능을 보여왔다. 강진 이후 조사된 PE관의 내진성능은 초기 PE관 연결부에 사용된 압축 커플러를 제외한 용착식 접합 등 일체형 방식으로 시공된 PE관의 경우 연결부 균열 및 탈락 손상이 발생하지 않았으며 기존에 사용되고 있던 관들을 대체하기에 매우 만족스러운 성능을 나타내었다(Miyajima, 2014; Wakamatsu et al., 2016).

일본에서는 1995년 Kobe 지진 이후 PE관을 본격적으로 시공하였는데, 일본 Tohoku 지진(2011, M9.0) 당시 PE관의 전체적인 손상 발생 비율이 상당히 낮은 것으로 나타났다. 관의 시공성, 경제성, 내진성능 등이 타 관종에 비해 매우 뛰어나 점 등이 많아 일본 정부에서는 직경 600 mm 관은 100년 주기로, 직경 50~300 mm 관의 경우 50년 주기로 맞대기 용접과 전기 용착 방식의 PE관 시공 계획을 세워 운용하고 있다(JWRC, 2013).

뉴질랜드 Christchurch 지진(2010-2011, M6.2-7.1)은 광범위한 액상화를 유발하였으며, 그 결과 지중 상수 관로에 심각한 타격을 입혔다(Cubrinovski et al., 2011). 뉴질랜드 Christchurch 지역의 지진 시 관로 피해 및 복구 사례에 있어 특기할만한 사항은 2010년 지진 시 일부지역에서 피해를 입은 상수관을 HDPE 관으로 교체하였다는 점이며, 2011년 지진 시에 교체한 HDPE관은 손상을 입지 않았던 것으로 파악되었다는 점이다(O'Rourke et al., 2014).

PE관의 내진성능 연구에 따르면 지진 규모 및 관종에 따른 16 km 구간에서의 손상 횟수는 지진 규모 M9.0인 경우 철근콘크리트관 약 75회, 덕타일 주철관 약 50회, 강관 약 45회, 연화비닐관 약 30회, HDPE관의 경우 약 25회로 가장 낮은 손상이 발생하는 것으로 나타났다(Haas, 2012).

또한, PE관은 지진 발생 시 액상화, 산사태 등과 같은 높은 지반 변형률이 발생하는 영구지반변형의 경우에도 다른 재료들의 관에 비해 뛰어난 허용 변형률과 구조적 안정성을 보여 우수한 내진성능을 나타냈다.

그러나 PE관의 사용빈도가 증가하고 있는 여건에도 불구하고, 국내에는 아직 PE관에 대한 내진설계 또는 내진성능평가 절차가 마련되지 않은 상황이다. 이러한 배경으로 인해 본 연구에서는 관련 연구자료들(JWWA, 2009a, 2009b)을 검토하고 개정된 국가 내진설계기준 공통적용사항을 반영하여, 국내 실정에 맞는 PE관의 응답변위법 기반 내진설계 및 내진성능평가 요령을 제안하고자 하였다(EESK, 2017).

이러한 배경에는 국내에서 현재 적용중이거나 개정 진행 중인 매설관로의 내진설계 또는 내진성능평가를 위한 내진 해석 방법의 기술적 근간이 주로 응답변위법에 기반하고

있다는 점에 있다. 이러한 PE관의 내진해석 절차는 형태에 따라 연속관(용착식 PE관)과 분절관(기계식 이음 PE관)에 대해 각각 응답변위법 기반의 내진해석 절차를 제시하는 것이 바람직하다. 다만, 본 논문의 목적이 실제 내진 검토를 수행하는 엔지니어들의 실무 확장성을 고려하고 있어, 지면 관계상 용착식 PE관의 내진 해석 절차만을 제시하였다. 기존 타 관종의 응답변위법 절차는 일본수도협회에서 풍부한 경험적 사례를 바탕으로 발간한 일본수도시설 내진공법 지침(JWWA, 2009a, 2009b)을 주로 참조한 바 있으며, 본 PE관의 경우에도 기존 타 관종 해석절차와의 일관성을 유지하기 위해 동일선상의 가이드라인을 마련하였다(EESK, 2017).

2. PE관 공학적 특성과 물성

국내에서 상하수도관 및 가스관에 두루 쓰이는 PE 제품은 ISO 국제 표준 및 KS 규격으로 정의되어 있는 제원과 물성을 만족해야 하기 때문에 제조사 별로 다양한 제품이 생산되고 있지만, 기본적으로는 사실상 동일한 화학적 구성과 물성을 갖고 있다. PE관의 제원과 물성을 구성하는 ISO 국제 표준은 PE 수도관에 대해 ISO 4427-1과 4427-2를 참조하며, PE 가스관에 대해 ISO 4437을 참조하도록 되어 있다. KS 규격은 사실상 ISO 규격과 동일하다(ISO 4427-1, 2007; ISO 4427-2, 2007; ISO 4437, 2007).

PE관은 재료의 연성적 특성에서 우수한 성능을 보인다. 일반적으로 파단시 신장율은 600%를 넘는 것으로 알려져 있다. PE관에 하중이 가해질 때 거동을 이해함에 있어 몇가지 개념정립이 필요한데, 예를 들어, 전형적인 PE관의 인장 시 응력-변형률 곡선 변화는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Stress-strain Curve of PE Pipe (JWWA, 2009a)

다양한 조사에 기초하여 전형적인 PE 수도관의 공학적 물성은 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

Table 1. Mechanical Properties of PE Pipe

Item	PE Water Pipe
Nominal Outer Diameter (d _n)	16~2,000 mm (ISO)
MRS (Minimum Required Strength after 50 Years)	PE100 10 MPa, PE80 8 MPa (ISO)
50 Year Guaranteed Design Stress	PE100 8 MPa, PE80 6.4 MPa
Density (g/cm ³)	HDPE 0.941-0.959 (PPI, 2017)
Poisson's Ratio	0.4 (P Corp.), 0.45 (PE100+)
Elongation at Break	≥ 350% (ISO) > 600% (PE100+) ~ 750% (I Corp.)
Elongation at Yield	~ 8% (I Corp.) ~ 10% (M Corp.)
Elastic Modulus (50 Years) (MPa)	200 (PE100+)
Allowable Compressive Strength	PE4710 HDPE 7.93 MPa (PE100+ Association)
Coefficient of Linear Expansion (cm/cm · °C)	1.3×10 ⁻⁴ (PE100+), 1.9×10 ⁻⁴ (K Corp.), 1.1×10 ⁻⁴ (P, F Corp.)

3. 응답변위법 기반 융착식 PE관 내진설계 및 성능평가 절차 개발

3.1 개요

본 연구에서는 국내에 적용가능한 융착식 PE관의 내진설계 및 내진성능평가 방법을 응답변위법 기반으로 개발, 제시하였다. PE관의 내진설계 방법은 국내의 설계 지진력 또는 평가 지진력에 대하여 소정의 내진성능을 확인하는 과정으로 정리될 수 있다. 이러한 과정에는 관로 자체의 구조적 내진성 검토와 함께 관로 주변 지반의 지반 액상화에 대한 검토를 필요로 한다.

지중에 매설되는 PE관 관체의 간편한 내진검토 방법으로는 응답변위법 기반의 해석 방법을 적용할 수 있다. 본 PE관의 내진설계 절차는 지반분류와 설계진도 등의 산정에 있어 국가 공통적용사항(MOIS, 2017)을 따른다. 특히 수도용 PE관의 내진설계 요령 정립을 위해서는 현재 KDS 57 17 00 (2019) 상수도 내진설계 개정 기준(안)을 충족하는 PE관의 세부 내진설계 기준 마련을 도모하고자 하였다.

3.2 내진설계 공통적용 사항

국가적으로 통일된 내진설계기준 공통적용사항은 행정안전부(구. 국민안전처) 주관으로 2017년 제정되었다(MOIS, 2017).

국가 공통적용 사항(2017.03)에서 지반의 분류를 개선하게 된 것은 기존 방법의 근간을 이루는 미국 서부해안 지반 조건에 적합한 기반암이 깊은 기준에 비하여 국내 지반의 일반적 기반암 깊이가 보통 30 m 이내로서 단주기적 특성을 갖는 데에 있다. 따라서 지반 분류의 기준을 미국과 같이 상부 지반 30 m를 사용하는 것은 경우에 따라 과소, 또는 과대설계를 유발할 수 있어 설계스펙트럼의 개선이 필요하게 되었다. 결과적으로 국내 지반 특성을 연구한 성과를 활용하여 기반암 깊이(H)와 토층 평균 전단파속도($V_{s,soil}$)를 기준으로 지반을 분류하도록 하였다.

3.3 PE관 내진설계 요령 개발 방향

매설관로의 내진설계 및 내진성능평가는 기본적으로 관체의 변형률이나 응력을 검토하는 응답변위법 기반 정적 해석(예. JWWA, 2009a)을 이용하거나, 보다 직관적이고 필요시 보수보강 공법 선정이 용이한 최대지반속도(Peak Ground Velocity, PGV)와 영구지반변형(Permanent Ground Deformation, PGD) 기반의 Chart 평가법(예. American Lifelines Alliance, 2005) 해석을 수행할 수 있으며, 관로의 중요도가 높은 경우에는 보다 상세한 유한요소해석이나 유한차분해석 기반의 동적 해석을 수행할 수 있다. 따라서 설계자 또는 평가자는 공학적 판단에 따라 매설관로에 대한 내진해석 방법을 선택하여 수행할 수 있으며, 본 연구에서는 지면상의 제약으로 응답변위법 기반의 관체 내진해석 방법을 제시하였다. 단, 지반 조건이 보다 복잡하고 지반-구조물 상호작용이 중요한 경우에는 시간이력해석 기반의 동적 해석방법을 적용가능하다.

응답변위법이란 지진 시에 생기는 지반변위를 구조물에 강제적으로 부가하여 구조물의 응력이나 변형률을 산정하는 유사정적인 해석방법이다. 정적 해석에서 매설 PE관과 같은 지중구조물의 경우에는 지진 시 구조물의 거동이 일반적으로 지진동에 따른 주변 지반의 응답변위와 전단응력의 영향을 크게 받는다. 매설관로와 같이 내공부를 포함한 단위 체적중량이 주변 지반의 단위체적중량과 비교하여 가벼운 경우에는 주변 지반에 발생하는 변위, 변형 등에 구조물의 지진시 거동이 좌우되므로 응답변위법을 적용하는 것이 적절하다. 즉 PE관은 주위가 지반에 둘러싸여 있으므로 발산감쇠가 크고 관성력에 의해 PE관이 지반 속에서 자유롭게 진동하지 않고 지반의 진도에 추종한 움직임을 보인다. 따라서 구조물에 생기는 관성력에 의한 영향보다도 주변지반의 상대변위에 의해 강제적으로 생겨나게 된다. 응답변위법은 특별히 지하구조물의 내진계산을 위하여 고안된 유사정적 해석법의 일종으로 동적인 지반운동을 정적으로 변환하는 점은 진도법과 같으나, 관성력이 아니라 변위를 강제적으로 적용한다는 점에서 차이가 있다. 응답변위법에 이용하는 지반변위 진폭 설정을 위해서는 지반의 종류와 표층지반의 고유주기 등을 적절히 산정하여야 한다(Fig. 2).

Fig. 2. Conceptual Diagram of Response Displacement Method in Buried Pipeline

PE관은 일반적으로 일체형 거동을 보이는 용착식 접합, 즉 Butt Fusion, Electro Fusion, 소켓식 접합 방식의 PE관은 연속관으로, 기계식 이음식 체결 방식의 PE관은 분절관으로 분류할 수 있다. 여기서 연속관이라 함은 관로의 변형능력의 대부분을 관체재료에 의존하는 관중을 말하며, 분절관은 관로의 변형능력의 대부분을 이음부에 의존하는 구조를 말한다. 따라서 PE관의 응답변위법에 의한 내진해석 절차 마련 시 용착식 접합방식을 쓰는 대부분의 PE관은 연속관 개념에 기초하였다.

응답변위법 절차가 연속관과 분절관으로 나뉘는 이유는 지진시 취약부가 다르기 때문이다. 분절관의 경우 지진으로 인한 관 자체의 변형이 허용 변형률을 넘어 이음부가 탈락하거나 응력 증가로 인하여 관이 파손된다. 따라서 내진 평가를 위해서는 관체 발생응력, 이음부의 신축량에 대하여 검토가 필요하다. 연속관의 경우 이음부가 용착되어 관과 일체로 작용한다고 가정할 수 있기 때문에 지반의 변형으로 인한 관 자체의 축방향 변형에 의해 파손이 발생된다. 따라서 내진성능평가를 위해서는 관로의 축방향 변형률에 대한 검토가 필요하다.

일반적으로 기존 PE관의 관로시설에 대해서 내진성능평가를 수행할 경우, 우선순위 선정을 위해 내진성능 예비평가를 수행하게 되며, 그 결과 내진성능 평가가 필요한 상수도 시설물 관로에 대해서는 내진성능 상세평가를 수행하게 된다. 응답변위법 기반으로 내진해석을 수행할 경우에 기본 원칙은 다음과 같다.

국가 내진설계 공통적용 사항(MOIS, 2017)에서 손상제어 수준을 각 수준별로 정의하고 있음을 감안하여 본 연구에서는 종래의 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대한 각각의 용착식 PE관 응답변위법 절차를 수록하였다.

기본개념은 PE관 부재가 보유하고 있는 공급역량(Capacity)과 지진에 대해 각 구성부재에 요구되는 소요역량(Demand)을 비교하여 평가한다. 용착식 PE 연속관의 경우는 이음부가 용착되어 관이 일체화되어 있다고 가정할 수 있으므로, 지반의 변형으로 인한 관 자체의 축방향 변형에 의해 파손이 발생하게 되어, 내진성능평가를 위해서는 관로의 축방향 변형률에 대한 검토를 하면 된다. 참고로 기계식 이음부 체결 방식의 PE관은 분절관의 거동으로서 지진 시 파괴는

관 자체의 변형이 허용 변형률을 넘어 이음부가 탈락하거나 응력 증가로 인해 관이 파손되므로, 내진성능 평가를 위해서는 관체 발생 응력과 이음부의 신축량에 대한 검토를 하면 된다.

따라서 PE관 매설관로의 내진 안전성 검토 기준은 Table 2와 같이 정리될 수 있다.

Table 2. Seismic Safety Criteria of Buried Pipe

Type of Pipe	Operation Level Earthquake (OLE)	Collapse Level Earthquake (CLE)
Continuous Pipe (Unsegmented Pipe)	(Elastic analysis) Mobilized stress of pipe $\leq$ Yield stress Mobilized strain of pipe $\leq$ Allowable strain	(Plastic analysis) Mobilized strain of pipe $\leq$ Allowable strain
Segmented Pipe (Jointed Pipe)	(Elastic analysis) Mobilized stress of pipe $\leq$ Allowable stress Expansion of joint $\leq$ Maximum design expansion	(Elastic analysis) Mobilized stress of pipe $\leq$ Allowable stress Expansion of joint $\leq$ Maximum design expansion

PE관 내진해석을 위한 설계 성능수준의 결정, 설계(또는 평가) 지진계수, 지반의 분류, 설계응답스펙트럼 등의 결정은 전술한 내진설계 공통적용 사항을 따르는 것으로 한다.

PE 매설관로의 내진해석은 원칙적으로 응답변위법을 이용하되, 기능수행수준에서는 관과 지반의 미끌림(활동)을 고려하지 않으며, 붕괴방지수준 지진에 대해서는 관과 지반의 미끌림(활동)을 고려할 수도 있다. 그러나 PE관의 경우는 현재까지 재질의 특성상 매설된 관로가 동적인 하중을 받을 때 주변의 지반과 순응하여 거동하는 것으로 알려져 있으므로 현재 내진설계 요령에서는 별도의 미끌림을 허용하지 않는 것으로 한다. 이 분야는 향후 연구가 필요한 사항이라 볼 수 있다.

본 연구에서 제시하고 있는 절차를 기존 매설관의 절차와 비교하면 다음과 같다. PE관 외에 기존 일반적인 관중(예, 강관, 덕타일주철관)에 대한 내진설계와 내진성능평가는 KDS 57 17 00 (2019) 및 ME (1999)에서 제시한 응답변위법 기반의 절차를 주로 따르고 있다. 매설관을 크게 분절관과 연속관으로 구분하게 된다. 덕타일주철관과 같은 분절관의 경우, 관체 발생응력과 이음부의 신축량이 허용치 이하가 되도록 하는 개념에 기초하는 방식이다. 강관과 같은 연속관의 경우, 관로의 축방향 변형률에 대한 검토를 수행하게 된다. 본 논문에서 용착식 PE관의 경우에는 기존 국가 기준으로 정립되어 있는 연속관의 내진설계 및 내진성능평가 절차를 준용하는 것을 기본 원칙으로 하되, 관의 물리 역학적 특성을 고려한 물성들을 제시한 점과, 2017년 제정된 내진설계기준 공통적용사항(MOIS, 2017)에 따른 지반분류와 입력

지반운동을 적용한 점, 허용 변형률을 새롭게 정의한 점, 축방향 변형률 계산 시 지반의 불균질성을 고려한 계수를 도입한 점, 지반과의 미끄럼 고려를 논의한 점, 그리고 지반변형에 대한 내진 검토 방법을 제안한 점 등에 있어 차이를 보인다. 따라서 본 절차에서 제시하고 있는 수식들과 방법은 기존 연속관의 내진설계와 내진성능평가 절차에서 제시된 흐름을 따르되, 상기 차이점들에 대해 국내 지반분류 체계와 조건들을 고려하여 제시하였음을 밝혀둔다.

3.4 PE관의 내진설계 허용 기준

PE관의 내진설계 요령을 마련함에 있어, 안전성을 검토하기 위한 허용 기준을 선정해야 한다. 허용기준은 다양한 실험적, 사례적, 이론적 연구가 병행되어야 하겠으나, 현재 국내에서 PE관에 대한 충분한 연구자료가 많지 않은 이유로, 기존의 국내 재료적 물성 자료들과 국외의 실험 및 경험에 기초한 연구자료들을 종합하여 다음과 같이 제시하고자 한다.

3.4.1 허용 변형률

허용변형률은 용착식 접합방식을 사용하는 일체형 구조 PE관의 내진설계에 있어 가장 핵심적인 검토항목이다. 허용 변형률과 다른 허용값에 대한 실험적 성과는 일본수도협회의 PE관 및 피팅에 관한 조사보고서(1998.09) 중 “PE관의 내진성에 대해”에 게재되어 있는 실험 자료를 참고할 수 있다(POLITEC, 2016a, 2016b).

이 시험결과로부터 PE관의 항복점 변형률은 약 8%, 연화현상 개시 변형률은 약 15% 정도로 판단되나, 최근 일본수도협회에서 발간한 수도시설내진공법 지침·해설(JWWA, 2009a)에서는 안전을 개념을 도입하여 이보다 훨씬 보수적으로 응답 변위법에 의한 내진검토 시에서는 허용 변형률 3%를, 축방 유동 등 지반변형에 대한 내진 검토 시에는 허용 변형률을 6%로 설정하고 있다. 미국 등의 실험적 연구 사례도 유사한 성과들이 보고되고 있으며, 국내 PE관 제조사의 기본적인 물성 자료들로 판단할 때, 이러한 값들은 기술적으로 합리적인 수준인 것으로 판단된다. 다만, 금번 PE관의 내진설계 요령을 마련함에 있어서 기능수행수준과 붕괴방지수준에 대해 허용 변형률을 각기 항복점 변형률과 변형률연화 개시 변형률로 그 수준을 달리 적용하므로, 개념적으로 변형률연화 개시 변형률은 소정의 안전율을 도입하여 아래와 같이 보수적인 값을 제시하고자 한다(Table 3).

Table 3. Allowable Strain of PE Pipe for Seismic Design

Approach	Allowable Strain
Response Displacement Method	3% (Yield strain, OLE)
	8% (Strain at initiation of strain softening, CLE)
Seismic Review for Ground Deformation	6%

3.5 용착식 PE관 응답변위법 해석 절차

응답변위법에 의한 내진 해석을 수행함에 있어 고려할 사항들로서, 관로의 축방향 변형률이 허용치 이하가 되어야 하며, 내진 안전성은 지진동에 의한 변형률을 상시 하중에 의한 변형률과 합하여 조사함을 원칙으로 한다. 여기서 상시 하중은 내압, 자동차 하중, 온도변화, 부등침하 등을 고려한다. 기능수행수준에서는 변형률 외에 관체 발생 응력이 허용 응력 이내인지를 필요시 추가적으로 검토할 수 있으며, 이 경우에는 이음식 PE관에서 소개하는 해석 절차를 따른다.

3.5.1 상시하중에 의한 변형률

3.5.1.1 내압에 의한 축방향 변형률

지중 매설 PE관의 축방향 변화가 구속된 경우 관의 내압에 의한 축방향 변형률은 Eqs. (1), (2)로 계산된다.

$$\epsilon_i = \nu \frac{P \cdot (D-t)}{2tE} \quad (1)$$

여기서, ϵ_i : 내압에 의한 축방향 변형률

ν : PE의 포아송비

P : 내압(KPa)

D : PE관의 외경(m)

t : 관 두께(m)

E : PE관의 탄성계수(KPa)

3.5.1.2 차량 하중에 의한 축방향 변형률

$$\epsilon_o = \frac{0.322 W_m}{ZE} \cdot \sqrt{\frac{EI}{K_v D}} \quad (2)$$

여기서, ϵ_o : 자동차에 의한 관 축방향 변형률

W_m : 자동차 하중(kN/m)

D : 관의 외경(m)

K_v : 연직방향 지반반력계수(kN/m³)

E : 관의 탄성계수(KPa)

I : 관 단면2차모멘트(m⁴), $I = \pi(D^4 - (D-2t)^4)/64$

Z : 관의 단면계수(m³), $Z = I / (D/2)$

$$\text{차량하중 } W_m = \frac{2 P_m D}{C \cdot (a + 2 h \tan \theta)} \cdot (1 + i) \quad (\text{kN/m})$$

여기서, P_m : 차량 후륜 1륜당 하중(kN/륜)

a : 접지 폭(m)

h : 흙 두께(m)

θ : 하중 분포 각(일반적으로 45°)

C : 차량 점유 폭(약 2.75 m)

i : 충격계수(Table 4에 의함)

Table 4. Coefficient of Impact

Overburden (h in m)	Coefficient of impact (i)
$h \leq 1.5$	0.5
$1.5 < h < 6.5$	$0.65h \sim 0.1h$
$h \geq 6.5$	0

Fig. 3. Simplified Vehicle Load Distribution (after JWWA, 2009a)

3.5.1.3 온도변화에 의한 축방향 변형률

온도변화에 의한 PE관의 신축은 매설관인 경우 흙과의 마찰에 의해 신축 변형이 구속되기 때문에 큰 문제가 없는 편이다. 융착식 PE관의 온도변화에 의한 축방향 변형률은 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_t = \alpha \Delta t \quad (3)$$

여기서, ϵ_t : 온도변화에 의한 축방향 변형률

α : PE의 선팽창계수(약 1.3×10^{-4})

Δt : 온도변화($^{\circ}\text{C}$)

3.5.1.4 부등침하에 의한 축방향 변형률

성토 지반침하를 부등침하에 의한 관의 축방향 변형률 계산에 고려한다. PE관을 탄성지반위에 놓인 들보로 간주하여 최대 휨 모멘트(M)를 M_1 과 M_2 중 큰 값으로 선택한다(M_1 과 M_2 의 단위는 $\text{kN}\cdot\text{m}$).

$$M_1 = \frac{W_d}{2\beta^2} e^{-\beta L/2} \sin \frac{\beta L}{2} \quad (4)$$

$$M_2 = \frac{e^{\pi/4} W_d}{4\sqrt{2}\beta^2} [e^{-\pi/2} + e^{-\beta L} (\sin \beta L - \cos \beta L)] \quad (5)$$

$$= 0.3877 \frac{W_d}{\beta^2} [0.2079 + e^{-\beta L} (\sin \beta L - \cos \beta L)]$$

여기서, L : 연약지반 구간(m)

W_d : 연직토 하중, $W_d = \gamma(h + h'')D$ (kN/m)

γ : 흙의 단위중량(kN/m^3)

h : 흙 두께(m)

h'' : 성토고(m)

E : PE관의 탄성계수(KPa)

I : PE관의 단면2차모멘트(m^4)

K_2 : 축 직교방향 변위에 따른 지반의 강성계수(KPa)

$$\beta_2 = \sqrt[4]{\frac{K_2}{4EI}} \quad (6)$$

이후 최대 발생 변형률을 계산한다.

$$\epsilon = \frac{M}{EI} \frac{D}{2} \quad (7)$$

Fig. 4. Differential Settlement (Axial Strain) (after JWWA, 2009a)

3.5.2 기능수행수준 지진에 의한 융착식 PE관 응답변위법 해석

3.5.2.1 표층지반의 고유주기 계산

지반의 내진해석에서 가장 중요한 물성치인 전단파속도는 주로 탄성파탐사 또는 PS 검층 등으로 실측하는 것이 바람직하다. 그러나 실측치가 없는 경우에는 표준관입시험 N치로부터의 추정식을 이용할 수도 있다. 지반 고유주기(T_G)는 본래 미소변형을 영역에 따른 지반의 특성치이므로 가능하면 전단변형률 10^{-6} 수준의 전단파속도를 이용하는 것이 좋다. 지반의 고유주기는 Eqs. (8)~(10)으로 구한다.

$$T_G = 4 \sum_{i=0}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (8)$$

여기서, T_G : 지반의 고유주기(sec)

H_i : i번째의 지층 두께(m)

V_{si} : i번째 지층의 평균 전단파속도(m/s)

3.5.2.2 관 축 위치 지반의 수평변위 계산

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cos \frac{\pi z}{2H_s} \quad (9)$$

$$H_s = \sum_{i=1}^{n_s} H_i \quad (10)$$

여기서, S_v : 표층지반(기반암 상부토층)의 고유주기에 해당되는 기반암 설계 속도응답스펙트럼(m/s)
 T_G : 지표층 지반의 고유주기(sec)
 H_s : 지표층 지반의 두께(m)
 H_i : 지표층 지반의 i 번째 토층 두께(m)
 V_{si} : 지표층 지반의 i 번째 토층의 평균 전단파속도(m/s)
 n_s : 지표층 지반을 이루는 토층의 개수

관측위치 지반의 수평변위 진폭을 산정할 때 토층(표층)의 물성치 차이가 큰 경우, 깊이에 따른 지반의 변위 진폭은 지반응답해석으로 구하는 것이 좋다.

3.5.2.3 지진 시 파장 계산

파장 L 은 표층지반이 1차 전단모드로 진동한다고 가정할 때 고유주기내에 표층지반을 전파하는 전단파의 파장과 기반암을 전파하는 전단파의 파장의 조화평균으로 구할 수 있다.

$$L = \frac{2L_1L_2}{L_1 + L_2} \quad (11)$$

$$L_1 = T_G \cdot V_{SS} \quad (12)$$

$$L_2 = T_G \cdot V_{SR} \quad (13)$$

여기서, L : 지진동의 파장(m)
 T_G : 표층지반의 고유주기(sec)
 V_{SR} : 기반면의 전단 탄성파속도(m/s)
 V_{SS} : 표층지반의 전단탄성과 속도

$$(V_{SS} = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{V_i}}) \text{ (m/s)} \quad (14)$$

3.5.2.4 지반의 축방향 변형률(ϵ_G) 산정

일반적으로 매설 PE관의 지진 시 거동은 지반 변형에 순응하기 때문에 PE관의 변형률을 산정하기 전에 중요한 항목이 지반의 축방향 변형률(ϵ_G)을 계산하는 것이다. 지반의 축방향 변형률(ϵ_G)은 앞서 산정한 관측위치 지반의 수평변위 진폭(U_h)과 지진동의 파장(L)으로 구할 수 있다.

지진파의 변위진폭(U_h)은 유도식의 가정 상 관로 매설깊이에서 45° 경사로 입사하는 전단파의 변위진폭으로 정의되며, 지진동의 파장(L) 역시 45° 경사로 입사하는 전단파의 파장을 의미한다.

여기서 주의할 점은 이러한 지반의 축방향 변형률 크기가 부지 지층 구성과 기하학적 형상에 상당한 영향을 받는다는

사실이다. 즉 해외의 강진 시 피해사례로부터 지반의 불균질성이 높은 곳에서 관로의 피해가 집중되는 것이 명확하기 때문에, 이러한 부지의 불균질성이 지반 변형률의 증폭에 미치는 영향을 반영하기 위해 경험적인 부지 불균질 계수(η)를 도입한다.

먼저 균질한 지반을 가정했을 때 지반의 축방향 변형률(ϵ_{G0})은 Eq. (15)와 같이 산정한다.

$$\epsilon_{G0} = \frac{\pi U_h}{L} \quad (15)$$

여기서, ϵ_{G0} : 균질지반 축방향 지반 변형률

U_h : 관 축 위치 지반 수평변위 진폭(m)

L : 관축에 45° 각도로 입사하는 지진동의 파장(m)

지반의 불균질성을 고려한 지반 불균질 계수(η)는 다음과 같다.

$\eta = 1.0$ 균질한 지반

$\eta = 1.4$ 다소 층 두께 변화가 심한 충적층 지반, 보통 구릉지

$\eta = 2.0$ 하천, 계곡 등 상당히 불균질한 충적층 지반이나 절성토 사면

지반의 불균질성을 고려한 지반의 축방향 변형률(ϵ_G)은 Eq. (16)과 같이 산정한다.

$$\epsilon_G = \eta \frac{\pi U_h}{L} \quad (16)$$

Fig. 5. Assumption of the Wavelength of Seismic Waves (after JWWA, 2009a)

참고적으로 지반의 축방향 변형률(ϵ_G)은 위 간이식으로

산정할 수도 있고, 지반이 비교적 균질하거나 명확한 다층지반인 경우에는 1차원 지반응답해석으로 지반변위를 산정한 후 이 식으로 구해도 된다. 또는 지반 조건의 변화를 고려해야 할 경우에는 2D, 3D FEM 모델을 이용하여 지반 변위와 전단변형률을 구하는 것이 바람직하다.

3.5.2.5 지반의 강성계수

지반의 강성계수는 관로의 축방향 강성계수(K_1)와 관측 직교방향 강성계수(K_2)로 분류되며, 개념적으로는 전단탄성계수에 표층지반 두께(H_s)와 관경(D)과 관련되는 할증계수(C_1, C_2)를 곱한 값으로 산정한다. 종래의 할증계수값은 관측방향에 대해 1.5 (C_1), 관측 직교방향에 대해 3.0 (C_2)을 적용하였으며, 현재에도 이용 가능한 경험적 수치이다. 그러나 최근 선형 유한요소해석(FEM)에 의해 매설관로의 관측 및 관측 직교방향 단위길이 당 지반의 강성계수에 대한 정수를 구한 결과를 반영하여 아래와 같이 표층지반 두께와 관경의 함수로 계수를 구할 수도 있다(Eqs. (17)~(20)).

$$K_1 = C_1 \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (17)$$

$$K_2 = C_2 \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (18)$$

$$C_1 = 1.3 H_s^{-0.4} D^{0.25} \quad (19)$$

$$C_2 = 2.3 H_s^{-0.4} D^{0.25} \quad (20)$$

여기서, K_1 : 축방향 변위에 대한 지반 강성계수
 K_2 : 축 직교방향 변위에 대한 지반 강성계수
 γ : 흙의 단위중량(kN/m³)
 V_s : 관로위치별 표층지반 전단파속도(m/s)
 g : 중력가속도(9.8 m/s²)
 H_s : 표층지반 두께(m)
 D : 관경(m)

3.5.2.6 관체 변형률 계산

매설 PE관의 관체 변형률을 계산할 때에는 원칙적으로 상시하중 시 변형률과 같이 축방향 변형률을 산정하는 것이 개념적으로 바르다. 그러나 지진동에 의한 관체 변형률은 축 변형률(ϵ_L)과 더불어 상대적으로 작은 값을 보이지만 휨 변형률(ϵ_B)이 동시에 작용하게 되므로 합성 변형률(ϵ_x)을 결과적으로 고려하도록 한다. 이때, 합성 변형률의 계산식($\epsilon_x = \sqrt{\epsilon_L^2 + \epsilon_B^2}$)에서, 축 변형률 항에 대해서는 관로의 중요도에 따라 ϵ_L 항에 1.0 ~ 3.12 사이의 상수값을 곱할 수 있다. 여기서, α_1 과 α_2 는 각각 관 축방향 지반변위 전달계수와 관 축 직교방향 지반변위 전달계수로서, λ_1 과 λ_2 , 그리

고 L' 를 이용한 아래 식으로 계산하거나, 만약 이러한 정보가 불충분할 경우에는 매설 PE관은 지반과의 미끌림을 고려하지 않기 때문에 α_1 을 1.0으로 가정하고, 관의 가요성에 따라 축 직교방향 역시 지반과 같은 거동을 보이는 것으로 가정하여 α_2 를 1.0으로 계산할 수도 있다. 일체형 구조를 가진 PE관의 내진해석은 따라서 관 자체에 유연성이 있기 때문에 지진동 시 지반 변형에 관의 거동이 추종하는 것으로 가정할 수 있다(Eqs. (21)~(29)).

$$\epsilon_L = \alpha_1 \epsilon_G \quad (21)$$

$$\epsilon_B = \alpha_2 \frac{2\pi D}{L} \epsilon_G \quad (22)$$

$$\epsilon_x = \sqrt{\epsilon_L^2 + \epsilon_B^2} \quad (23)$$

$$\epsilon_G = \eta \frac{\pi U_h}{L} \quad (24)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L'} \right)^2} \quad (25)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 L} \right)^4} \quad (26)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}} \quad (27)$$

$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{K_2}{EI}} \quad (28)$$

$$L' = \sqrt{2} \cdot L \quad (29)$$

여기서, ϵ_L : 매설 관로의 축 변형률
 ϵ_B : 매설 관로의 휨 변형률
 ϵ_G : 축방향 지반 변형률
 ϵ_x : 축 변형률과 휨 변형률의 합성 변형률
 α_1 : 관 축방향 지반변위 전달계수
 α_2 : 관 축 직교방향 지반변위 전달계수
 U_h : 관 축 위치 지반의 수평변위 진폭(m)
 L : 지진동의 파장(m)
 D : 관의 외경(m)
 E : 관 탄성계수(KPa)
 K_1 : 축방향 변위에 관한 지반의 강성계수
 K_2 : 축 직교방향 변위에 관한 지반 강성계수
 A : 관 단면적(m²)
 I : 관의 단면2차모멘트(m⁴)
 L' : 관축방향 파장(m), 응답변위법에 이용하는

관측방향 지반 변형률은 지반변위와 파장에서 구하는 것을 원칙으로 하게 된다. 여기서 기본적으로 가정하는 지진파동은 관측에 대해 45°로 입사하는 정현파를 가정하고 있으며, 따라서 기본적으로 L 은 45° 경사로 입사하는 전단파의 파장이 되며, 관측방향 지진파의 파장은 따라서 $\sqrt{2}L$ 이 된다.

3.5.2.7 내진 안정성 평가

측방향 변형률의 합계 $\leq$ 허용 변형률(항복점) 이면 안정

기능수행수준에서 매설 PE관의 응답변위법 기반 내진 안전성 평가는 상기 변형률에 대한 검토로서 수행하게 되지만, 응력에 대한 별도의 검토도 필요할 수 있다. 따라서 지진 시 응력에 대한 검토는 이후의 분절관 내진 안전성 평가에서 기술한 절차에 따라 수행할 수 있다.

여기서 PE관의 허용 변형률은 관의 용도 및 화학적 성분, 구조 등에 따라 달라질 수 있으나, 현재까지 명확한 공인된 합의가 이루어진 것은 아니다. 다만, 일본수도협회(JWWA, 2009a) 등의 사례를 참조하여 기능수행수준 하에서 상시하중과 지진하중을 고려한 매설 PE관의 허용(항복점) 변형률은 3%로 정한다.

3.5.3 붕괴방지수준의 지진에 의한 용착식 PE관 응답변위법 해석

3.5.3.1 표층지반의 고유주기 계산

기능수행수준의 계산 절차와 동일하다.

3.5.3.2 관 축 위치 지반의 수평변위 계산

기능수행수준의 계산 절차와 동일하다.

3.5.3.3 지진동의 파장 계산(L)

기능수행수준의 계산 절차와 동일하다. PE관의 경우 붕괴방지수준에서 관 재료의 특성상, 관과 지반의 미끌림은 현실적으로 발생하기 어려운 것으로 가정할 수 있으므로, 미끌림을 고려한 파장과 비교과정은 생략할 수 있다.

3.5.3.4 지반의 측방향 변형률(ϵ_G) 산정

기능수행수준의 계산 절차와 동일하다.

3.5.3.5 지반의 강성계수

기능수행수준의 계산 절차와 동일하다.

3.5.3.6 관 측방향 변형률 및 합성변형률을 계산

기능수행수준의 계산 절차와 동일하다.

참고로 현재까지는 매설 PE관의 지진 시 미끌림에 관한 주목할 만한 연구가 미진하고 관 체의 특성상 주변 지반의

거동에 순응하여 거동할 것으로 판단되는바 향후 충분히 성숙한 연구결과가 도출되기 전까지는 관측방향 지반변위 전달계수(α_1)는 1.0 또는 1.0에 가까운 값을 적용하도록 한다. 관측직교방향 지반변위 전달계수(α_2) 역시 PE관의 관의 가요성이 크므로 지반과 같은 거동을 나타낼 경우가 지배적이므로 상기 계산식을 이용하거나 1.0으로 가정할 수 있다.

3.5.3.7 내진 안정성 평가

측방향 변형률의 합계 $\leq$ 허용변형률(연화 개시 변형률) 이면 안정

PE관의 붕괴방지수준에서의 허용변형률은 개념적으로 강관과 같이 국부 좌굴개시 변형률로 정의되는 것이 타당하나, 좌굴이 국부적으로 시작되는 통상적인 PE관의 변형률 수준을 객관적으로 정량화하기는 어려운 실정이다. 일반적으로 ISO 4427-2에서 규정하고 있는 PE관의 파단시 신장율(elongation at break)은 350% 이상이며, 국내 제조사들의 파단 신장율은 실제 600% 이상인 것으로 알려져 있다. 따라서 파단시까지 상당한 가요성을 가진 PE관은 재료적 특성으로 인해 대단히 큰 허용변형률을 갖는 것이 확실하나, 보다 보수적으로 기능수행수준에서의 허용변형률은 일본수도협회(JWWA, 2009a) 등의 자료를 참고로 3% 수준으로 생각할 수 있으며, 붕괴방지수준에서의 허용변형률은 미국 PE관 제조사에서 제시하고 있는 항복점 변형률이 8~10% 수준으로 파악되었고, 일본에서 PE관의 내진성능평가 관련으로 수행한 인장 및 압축시험에서 항복점 변형률이 7~11%, 인장 시험 시 변형률 연화현상 발생 시점이 약 15% 이었던 점을 보수적으로 고려하여 약 8% 정도로 제시하고자 한다.

참고적으로 붕괴방지수준에서 매설 PE관의 응답변위법 기반 내진 안전성 평가는 상기 변형률에 대한 검토로만 수행하고 응력에 대한 검토는 생략한다.

4. 지반변형에 대한 내진 검토

경사진 지반내에 PE관로가 매설되어 있는 경우에는 관 자체의 내진 안전성과 함께 지반 액상화(Soil Liquefaction)로 인한 측방유동 등 영구 변형에 대한 내진 검토가 필요하다. 지반 액상화로 인한 영구 지반변위 산정 방법은 별도 연구자료나 가이드라인(Park, 2014)을 참조하는 것이 바람직하다. 단, 본 응답변위법에 의한 내진 검토 절차에서는 간략히 지반변형에 대한 내진 검토 방법을 제시하고자 한다. 국내에 이러한 측방유동 변위 등이 지진 시에 관찰된 사례가 거의 없으므로, 본 절차는 일본수도협회의 수도시설 내진공법 지침·해설(JWWA, 2009a)을 참고로 한다.

PE관로가 측방유동 등 지반 변형에 종속되어 있는 경우, 상기 관체에 대한 안전성 검토와 함께 아래 식을 통한 지반 변형에 대한 내진 검토를 수행한다(Eq. (30)).

$$\epsilon_p = \alpha \cdot \epsilon_g \quad (30)$$

여기서, ϵ_p : 지반변형을 고려한 매설관로의 변형률
 α : 지반변위 전달계수(PE관의 경우 관이 지반변형에 순응하므로 1.0 적용)
 ϵ_g : 측방유동 등에 의한 지반의 변형률

PE관의 지반변형에 대한 내진검토 허용 변형률은 6%를 적용한다. 참고로 일본수도협회(JWWA, 2009a)에서 강진시 경험적으로 관찰된 다양한 조건에서의 측방유동에 의한 설계 지반 변형률은 아래 표와 같다. PE관의 경우 이러한 다양한 조건의 지반 변형에 대해 충분히 큰 허용 변형률을 가지므로 대체로 PE관은 측방유동 시에 내진성을 확보할 것으로 판단된다(Table 5).

Table 5. Ground Strain by Lateral Spreading (JWWA, 2009a)

① Tensile strain of the ground in the area near the shore	1.2 ~ 2.0%
② Tensile strain of soil in inland landfills and river basins	1.0 ~ 1.5%
③ Compressive strain at landfill and river basin	1.0 ~ 1.5%
④ Strain of sloped liquefied ground	by computation ($\leq 2\%$)
⑤ Ground strain of sloped artificial landfill	1.0 ~ 1.7%

5. 결 론

PE관의 밀도와 강도는 타 관종에 비해 낮은 편이지만, 파단시 신장율(연신율)은 수백%로서 상당한 연성을 보유하고 있으며 이러한 재료적 특성은 강진 시 내진 저항성을 높여주는 요소가 된다. 일반적으로 PE관은 Butt Fusion 또는 Electro Fusion 방식의 열용융 용착식 접합방식을 적용하므로 매설관의 일체화로 인해 우수한 내진성을 보유한 것으로 평가된다. 특별히 뉴질랜드와 일본에서는 기존 관의 지진 시 피해 복구 또는 향후 오래된 관로의 내진화를 위한 대체 관종으로서 PE관을 선택하는 사례가 많았다. 이러한 해외 강진 시 사례에서 PE관은 탁월한 내진성능을 보여주는 것으로 조사되었으며, 상대적으로 가장 높은 수준의 지진 저항성을 보이는 관종임을 확인하였다.

본 논문에서는 매설 PE관의 국내 내진설계 및 내진성능평가 절차가 부재함에 따라 국내외 최근 연구성과들을 반영하여, 실무에 적용가능한 수준의 용착식 PE관 내진설계 및 성능평가가 요령을 제시하고자 하였다.

우선 9.12 경주 지진 이후로 개정된 내진설계 공통적용기준(2017)을 준수하는 지반종류와 내진설계 표준응답스펙

트럼 등을 분류하도록 하였다. PE관 접합 형태에 따라, 연속관 평가법(용착식 PE관의 경우 측방향 변형률 평가)과 분절관 평가법(기계식 PE관 접합방식의 경우 관체 발생능력, 이음부 신축변형률 평가)을 구분할 수 있으며, 본 논문에서는 용착식 PE관에서의 기능수행수준과 붕괴방지수준을 만족하는 내진설계 또는 내진성능평가 방법을 응답변위법 기반으로 제안하였다. 내진해석에 적용가능한 PE관의 공학적 물성과 허용변형률에 대하여 합리적으로 제안하였다. 용착식 PE관의 응답변위법 해석 절차로서, 상시하중에 의한 변형률과 더불어 지진하중에 의한 변형률 계산을 위해 표층지반의 고유주기, 관 축 위치 지반의 수평변위, 지진 시 파장을 계산하여 지반의 측방향 변형률을 산정하도록 식들을 제시하였다. 지반의 측방향 변형률은 지반의 불균질성을 고려할 수 있도록 계수를 도입하였으며, 지반의 강성계수와 함께 관체의 변형률을 결론적으로 계산할 수 있도록 하였다. 이를 허용 변형률과 비교하여 내진 안전성을 평가하도록 하였다. 관체의 내진평가법과 별개로, 지반 액상화 등 지반변형에 대한 PE관로의 내진 검토 절차도 제시하였다.

본 논문을 통하여 국내에 부재하였던 용착식 PE관의 신규 내진설계 및 내진성능평가 요령을 최초 제시함으로써, 사용성이 점차 증가하고 있는 PE관의 내진설계 및 성능평가의 기반을 마련하는데에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국 PE관 공업협동조합과 (사)한국지진공학회의 재정적 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- American Lifelines Alliance. (2005). *Seismic guidelines for water pipelines*. Federal Emergency Management Agency (FEMA), National Institute of Building Sciences.
- Cubrinovski, M., Hughes, M., Bradley, B., McCahon, I., McDonald, Y., Simpsom, H., et al. (2011). *Liquefaction impacts on pipe networks*. Research Report 2011-04, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Earthquake Engineering Society of Korea (EESK). (2017). *Development of seismic design and performance evaluation guideline of PE pipeline*. EESK.
- Gasnews. (2009). *How far is the range of use of PE gas pipes possible?* (May 7, 2009).
- Haas, K. (2012). *Lifecycle cost and performance of plastic pipelines in modern water infrastructure* (January

- 11, 2012). University of California, Davis, USA.
- ISO 4427-1. (2007). *Plastics piping systems - Polyethylene (PE) pipes and fittings for water supply - Part 1: General*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 4427-2. (2007). *Plastics piping systems - Polyethylene (PE) pipes and fittings for water supply - Part 2: Pipes*. ISO International Standard, Geneva, Switzerland.
- ISO 4437. (2007). *Buried polyethylene (PE) pipes for the supply of gaseous fuels - Metric series - Specifications*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Japan Water Research Center (JWRC). (2013). *Research activities on earthquake proofing of drinking water facilities*. Toranomon Minato-ku, Tokyo.
- Japan Water Works Association (JWWA). (2009a). *Commentary on the guideline for earthquake-resistant construction methods for water supply facilities*. (日本水道協会. (2009). 水道施設 耐震工法 指針 解説.)
- Japan Water Works Association (JWWA). (2009b). *Polyethylene pipes for water distribution, Polyethylene pipe fittings for water distribution*.
- KDS 57 17 00. (2019). *Seismic design of water supply facilities*. Korea Design Standard.
- Ministry of Environment (ME). (1999). *Research to establish seismic design standards for waterworks facilities*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017). *Seismic design criteria common application*.
- Miyajima, M. (2014). Performance of earthquake resistant drinking water pipeline during the 2011 Tohoku earthquake in Japan. *Proceedings of 10th National Conference in Earthquake Engineering*, Anchorage, AK, USA.
- O'Rourke, T.D., Jeon, S.-S., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., van Ballegooy, S., Bouziou, D. (2014). *Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ. Earthquake Spectra*, Vol. 30, No. 1, pp. 183-204.
- Park, D.S. (2014). SPT based liquefaction triggering analysis procedure. *Geotechnical Engineering*, Korean Geotechnical Society, Vol. 30, No. 6, pp. 28-42.
- Plastics Pipe Institute (PPI). (2017). *Handbook of polyethylene (PE) pipe*.
- Polyethylene Piping System Integrated Technology and Engineering Center (POLITEC). (2016a). *PTC Designing manual for polyethylene pipes and pipe fittings for water distribution*. POLITEC, Japan.
- Polyethylene Piping System Integrated Technology and Engineering Center (POLITEC). (2016b). *Technical data on seismic performance of polyethylene pipes for water distribution*. POLITEC, Japan.
- Wakamatsu, K., Nagata, S., Maruyama, Y., and Ozawa, K. (2016). Sendai water pipeline response to the 2011 Tohoku earthquake. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 10, pp. 461-470.
- Water Journal. (2013). *Special Report: Excellent technology for producing and managing clean tap water IV* (October 4, 2013).

Received	July 17, 2020
Revised	July 20, 2020
Accepted	August 4, 2020