

기계식 이음 PE관의 응답변위법 기반 내진성능평가 요령

박동순^{1*}

Seismic Performance Evaluation of Mechanically Jointed PE Pipeline by Response Displacement Method

DongSoon Park^{1*}

Abstract: The seismic performance of buried PE pipes is reported to be favorable due to their exceptional elongation capacity at break. Although a seismic performance evaluation procedure based on the response displacement method has been summarized in Korea for fusion-bonded PE pipes, there is currently no procedure available for mechanically jointed PE pipes. This article aims to present a seismic performance evaluation procedure based on the response displacement method specifically designed for mechanically jointed PE pipes in Korea. When employing the mechanical joining method for PE pipes, it is recommended to adhere to the evaluation procedure established for segment-type pipes. This involves assessing the stress induced by the pipe, the expansion and contraction strain of the joint, and the bending angle of the pipe joint. Furthermore, the coefficient of inhomogeneity of the soil, which is necessary for estimating the axial strain of the ground, is introduced. Additionally, a computation method for determining lateral displacement and reconsolidation settlement in soil susceptible to liquefaction is proposed. As a result of the sensitivity analysis considering the typical soil condition in Korea, the mechanically jointed PE pipe with a certain quality was shown to have good structural seismic safety when soil liquefaction was not considered. This procedure serves as a valuable tool for seismic design and evaluating the seismic performance of mechanically jointed buried PE pipes, which are primarily utilized for connecting small-diameter pipes.

Keywords: PE pipe, Pipeline, Seismic design, Seismic performance evaluation, Response displacement method, Earthquake

1. 서 론

최근 Türkiye에서 2023년 2월 6일 발생한 규모 7.8의 대지진으로 다른 사회기반시설들과 함께 상하수도 관로도 상당한 피해를 입었으며, 상당 수 피해가 관로 이음부 탈락으로 발생하였다(GEER, 2023). 일본에서는 2022년 3월 16일, USGS 기준 규모 7.3의 Fukushima 지진이 혼슈(Honshu) 동편 해역에서 발생하여 수도관로가 파손되는 등 전형적인 매설관의 누수 피해가 발생하였다. 국내에서도 제주도에서 규모 4.6의 지진이 2021년 12월 14일 발생하는 등 매설 관로 급수체계에 대한 경각심이 커지고 있다. 2017년 11월 15일 발생한 규모 5.4의 포항 지진 당시에는 지반 액상화 현상이 발견되었으며(Naik et al., 2020), 매설관로와 건물, 교량 등에 다양한 피해가 발생한 바 있다(Kim, 2022).

매설 관로의 유형 중에서 PE관은 내진성이 우수한 재료로

알려져 있다. PE관의 내진성은 재료적 특성에 기인하며 특히 파단시 신장율이 600%를 넘는 연성적 성능이 우수하다. 일반적으로 지반 진동에 의한 매설 관의 저항성은 강성에 관계되며, 유연한 관 재료일수록 매우 낮은 변형률을 나타낸다. Lamborn and Petroff(2011)의 실험 결과에 따르면 영구 변형 없이 6% 축 방향 변형률 하에서 PE관을 10시간 동안 노출시킨 후 하중을 제거한 결과, PE관의 변형률은 1%로 급감함으로서 결과적으로 비변형 상태로 돌아가는 것을 확인하였다.

O'Rourke et al.(2014)은 HDPE관의 높은 성능 수준을 강도와 연성의 조합으로 평가하였으며, 손상 없이 높은 수준의 인장 변형률을 유지할 수 있는 것을 확인하였다. 또한, PE관의 높은 수준의 허용 변형률과 응력 감소는 배수 시스템과 다른 중요한 라이프라인에 대해 효과적이면서 비용 측면에서 효율적인 내진 대책이라는 것을 확인하였다.

PE관은 지진 발생 시 액상화, 산사태 등과 같은 높은 지반 변형률이 발생하는 영구지반변형의 경우에도 다른 재료들의 관에 비해 뛰어난 허용 변형률과 구조적 안전성을 보여 우수한 내진성능을 나타냈다(Cubrinovski et al., 2014; POLITEC, 2016b; Wakamatsu et al., 2016). PE관 탄성계수는 금속관 탄성계수보다 100배 이상 작아 같은 변형에 대해 현저하게 낮은 응

¹정회원, K-water연구원 수석연구원, 교신저자

*Corresponding author: fulgent@kwater.or.kr

K-water Research Institute, 125, Yuseong-dearo 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34045, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

력을 발생시킨다. PE관의 탄성계수는 변형률과 시간에 따라 달라지며, 낮은 유효탄성계수는 긴 시간 동안 낮은 변형률을 유발하며, 연결부에서 발생하는 힘을 감소시키는 역할을 한다.

일본의 경우 2001년 소방청 고시 제19호로 소방용 설비 등의 배관에 플라스틱 배관을 도입하는 것을 정부지침으로 하달하는 등, PE관은 강진 시 우수한 내진성능 구현사례를 바탕으로 내진관으로서의 보급이 높아지고 있는 추세이다. PE관의 사례 및 연구활동은 수도 관로·시설의 내진화에 대한 관심이 높아지는 가운데 2004년 6월에 일본 후생노동성에서 발표한 「수도 비전」과 일본수도협회가 2005년 1월에 제정한 「수도 사업 가이드 라인」에서 수도용 PE관을 공식적으로 내진관으로 정한다는 인증이 촉매제가 되어, 2006년 4월에는 배수용 폴리에틸렌 파이프 시스템 협회(통칭 POLITEC)를 출범하기에 이르렀다. 상당한 기술적 자료들이 이 협회를 통하여 발간되고 있다.

다만 HDPE 관로에 기계식 이음(mechanical coupling)이 있는 경우 내진성에 대해서 의문이 있을 수 있다. 부품에 대해서도 POLITEC 표준에서 이탈방지 성능을 확인하기 위한 "인발저지 능력시험"을 규정하고 있으며, 인장 시 관체가 먼저 항복됨을 확인한 바 있다. 용착식 이음과 동등의 피팅(fitting) 부성능을 갖고 있기 때문에 기계 부품에 대해서도 내진 관로에 상당한 성능을 갖고 있다고 판단되고 있다. 이 경우 설계와 시공의 품질관리가 중요한 관건이 될 수 있다.

용착식 이음을 수행하기 어려운 이음부가 존재하는 경우, 플랜지 배관 등 기계식 이음을 적용하여야 하는데, 이러한 이음부가 양호한 품질기준을 따라 시공되면, 변형률 증가 시 이음부의 항복이 관체의 항복시점보다 늦게 발생하기 때문에 여전히 연신율에 의한 강한 내진성을 가질 수 있다. 상대적으로 작은 관경의 라이프라인 내진성 확보를 위해서는 PE관 이음방식에 대한 양호한 품질관리가 중요하다.

해외 강진 발생 및 PE관 성능 연구 조사 결과, PE관은 내진성능 뿐만 아니라, 사용 연한, 중량, 내화학 및 내염분성, 침전물, 소음, 내마모 및 내부식성, 시공성 및 가격 등 많은 면에서 우수한 성능이 많은 것으로 나타났다(EESK, 2017). 또한, 해외 여러나라(미국, 일본, 뉴질랜드, 영국 등)를 중심으로 신규 라이프라인 시공 시 PE관을 적용하는 정책을 마련하여 시행하고 있으며 전 세계적으로 내진성능을 확보한 PE관 시장이 성장하고 있음을 알 수 있었다(EESK, 2017).

일반적으로 PE관은 많은 경우 용착식 이음을 적용하기 때문에 강관과 같이 연속성을 갖는 일체화 된 연속관 개념으로 보는 것이 타당하나, PE관의 이음 방식에 따라 지진 시 연속관 또는 분절관에 준할지를 결정하므로 이음방식 이해는 중요하다. 내진해석 시 PE관 이음은 상대적으로 일체화된 열용용 방식의 맞대기 용착(Butt fusion), 전기(전자)식 용착(Electro

fusion), 소켓 용착(Socket fusion)은 연속관으로서, 기계식 볼팅 체결에 의한 이음 관은 분절관 형태로 분류할 수 있다.

이 중 기계식 이음 또는 조임식 이음, 플랜지 이음은 주로 110 mm 이하 관경의 배관의 이음에 사용하고 있는 방법이다. 전기의 공급이 불가능한 현장 또는 물이 있는 현장 등 열용착 이음이 어려운 경우, 긴급유지보수에 주로 적용되고 있다.

연속관 형태의 일체화된 국내 PE관에 대한 응답변위법 기반의 내진설계 또는 내진성능평가 절차는 최근 국내외 PE관의 사례 및 물성, 해외 연구 및 경험적 사례를 바탕으로 최근 제시한 바 있다(Park, 2020). 그러나 분절관(기계식 이음) 형태의 PE관의 내진설계 또는 내진성능평가 절차는 여전히 마련되지 않은 상황이다.

본 고에서는 관련 연구자료들(JWWA, 2009a; JWWA, 2009b)을 검토하고 개정된 국가 내진설계기준 공통적용사항을 반영하여, 국내 실정에 맞는 기계식 이음 PE관의 응답변위법 기반 내진설계 및 내진성능평가 요령을 제안하고자 하였다(EESK, 2017). 또한 지반 액상화에 의한 변형을 고려한 평가 절차도 함께 제시하였다. 본 논문의 목적이 매설 PE관의 내진해석을 수행하는 실무 엔지니어들의 실무 확장성을 고려하고 있어, 응답변위법 해석 절차는 일본수도협회에서 경험적 사례를 바탕으로 발간한 지침(JWWA, 2009a)을 참조하여 요령 형태로 제시하였다(EESK, 2017).

2. 응답변위법 기반 기계식 이음 PE관 내진성능평가 절차

2.1 개요

본 연구에서는 국내에 적용가능한 기계식 이음 PE관의 내진성능평가 방법을 응답변위법 기반으로 제시하고자 하였다. 기계식 이음 PE관의 내진 계산은 관로 이음부 자체의 구조적 내진성 검토와 함께 관로 주변 지반의 지반 액상화에 대한 검토를 필요로 한다.

본 기계식 이음 PE관의 내진설계 절차는 지반분류와 설계진도 산정에 있어 KDS 17 10 00을 따른다(KDS, 2018). 수도용 PE관은 KDS 57 17 00 상수도 내진설계 개정 기준(안)을 만족하는 PE관의 세부 내진설계 기준을 추종한다(KDS, 2019).

일부 PE관의 경우에는 매설환경 상 용착식 이음이 어려운 경우가 발생하며, 이 경우에는 기존의 기계식으로 이음부를 볼팅 체결하는 이음 방식을 취한다. 따라서 이러한 이음식 매설 PE관에서는 지진 시 거동이 관체 용력과 이음부의 변형률에 의해 지배받게 되며, 이에 대한 해석이 필요하다. 따라서 이음식 PE관의 검토는 탄성영역에서의 검토로서 다음의 네 가지 기준에 대한 만족 여부를 검토한다.

- 관체 발생 응력 ≤ 허용응력
- 이음부의 신축변형량 ≤ 허용 신축변형량
- 지진 시 이음부의 휨 각도 ≤ 허용 휨 각도
- 액상화 가능 지반은 액상화에 의한 변형율 ≤ 허용 변형율

기계식 이음 PE관의 내진성 검토를 위해서 고려할 사항으로는 관체 발생 응력과 이음부의 신축량과 휨 각도는 허용치 이하가 되어야 하며, 검토 시에는 지진에 의한 응답과 상시 하중에 의한 응답을 합산하여 검토하는 것으로 한다. 여기서 상시하중은 내압에 의한 것과 자동차 하중에 의한 것을 고려하되, 이음부 신축량 계산시에는 이 외에 온도변화와 부등침하에 의한 변형을 추가로 고려한다.

기계식 이음 PE관의 경우 사실상 허용응력과 허용 신축량이 기능수행수준 및 붕괴방지수준에서 동일하므로 붕괴방지 수준만을 고려하여 해석을 수행한다.

Fig. 1은 제안한 기계식 이음 PE관의 내진성능평가 절차 흐름도이다.

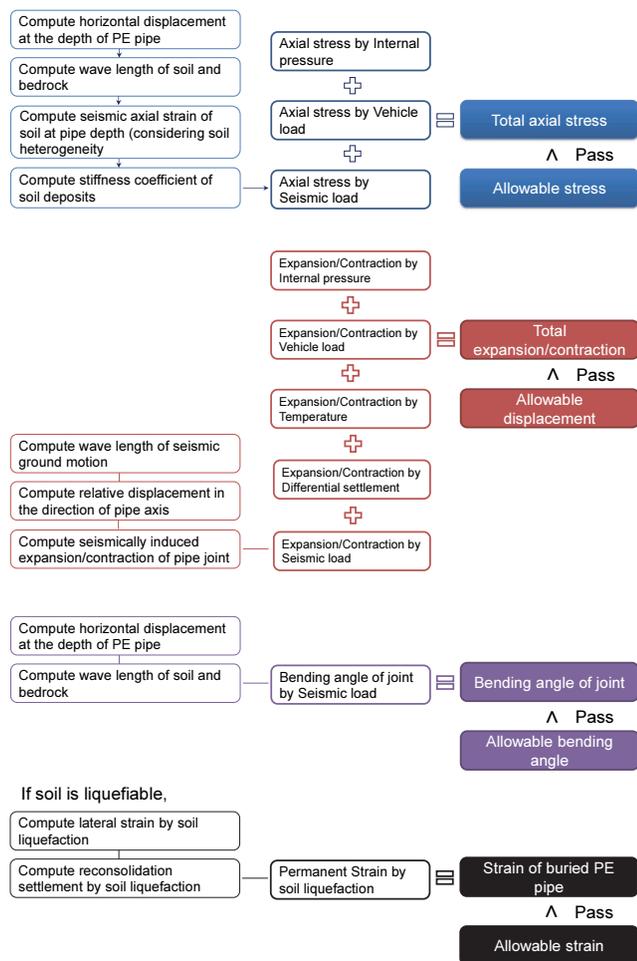


Fig. 1 Process flowchart for response displacement method based seismic performance evaluation of mechanically jointed PE pipe

2.2 내진설계 공통적용 사항

국가적으로 통일된 내진설계기준 공통적용사항이 내진설계 또는 내진평가 지진력 산정과 국내 지반 분류를 위해서 행정안전부(구. 국민안전처) 주관으로 2017년 제정되었다(KDS, 2018). 본 기계식 이음 PE관의 내진성능평가를 위한 지진력 산정과 지반 분류는 내진설계기준 공통적용사항을 따르는 것으로 한다(KDS, 2018).

2.3 기계식 이음 PE관 응답변위법 해석 절차

2.3.1 기계식 이음 PE관의 응력 검토

기계식 이음으로 체결된 PE관의 응력 검토는 상시하중에 의한 응력과 지진하중에 의한 응력을 나누어 계산한다. 상시하중의 범주에는 내압, 자동차 하중 등이 해당한다. 절차는 다음 식과 같다.

(1) 내압에 의한 축방향 응력(σ_i)

$$\sigma_i = E \epsilon_i \quad (1)$$

여기서, σ_i : 내압에 의한 축방향 응력(KPa)

ϵ_i : 내압에 의한 축방향 변형률(Park, 2020)

E : PE관 탄성계수(KPa)

(2) 자동차 하중에 의한 축방향 응력(σ_o)

$$\sigma_o = E \epsilon_o \quad (2)$$

여기서, σ_o : 자동차에 의한 관 축방향 응력

ϵ_o : 자동차에 의한 축방향 변형률(Park, 2020)

2.3.2 지진하중에 의한 응력

(1) 지진동에 의한 축방향 응력

① 표층지반 고유주기 계산

지반의 고유주기를 아래와 같이 구한다.

$$T_G = 4 \sum_{i=0}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (3)$$

여기서, T_G : 지반 고유주기(sec)

H_i : i번째의 지층 두께(m)

V_{si} : i번째 지층 평균 전단파속도(m/s)

② 지반 수평변위 계산

관 축 위치 지반 수평변위는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cos \frac{\pi z}{2H_s} \quad (4)$$

$$H_s = \sum_{i=1}^{n_s} H_i \quad (5)$$

여기서, S_v : 표층지반(기반암 상부토층) 고유주기에 해당되는 기반암 설계 속도응답스펙트럼(m/s)

T_G : 지표층 지반 고유주기(sec)

H_s : 지표층 지반 두께(m)

H_i : 지표층 지반 i 번째 토층 두께(m)

V_{si} : 지표층 지반 i 번째 토층 평균 전단파속도(m/s)

n_s : 지표층 지반을 이루는 토층 개수

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

③ 지진 시 파장 계산

파장 L 은 표층지반이 1차모드로 진동한다고 가정할 때 고유주기내에 표층지반을 전파하는 파의 파장과 기반암을 전파하는 전단파 파장의 조화평균으로 구할 수 있다.

$$L = \frac{2L_1L_2}{L_1+L_2} \quad (6)$$

$$L_1 = T_G \cdot V_{SS} \quad (7)$$

$$L_2 = T_G \cdot V_{SR} \quad (8)$$

여기서, L : 지진동 파장(m)

T_G : 표층지반 고유주기(sec)

V_{SR} : 기반면 전단 탄성파속도(m/s)

V_{SS} : 표층지반 전단 탄성파속도

$$\left(V_{SS} = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{V_i}} \right) \text{ (m/s)} \quad (9)$$

④ 지반의 축방향 변형률(ϵ_G) 계산

지반의 축방향 변형률(ϵ_G)은 앞서 계산한 관측위치 지반 수평 변위 진폭(U_h)과 지진동의 파장(L) 산정 값을 사용한다. 지진파의 변위진폭(U_h)은 관로 매설 심도에서 45° 경사로 입사하는 전단파의 변위 진폭으로 가정하며, 지진동 파장(L)도 45° 경사로 입사하는 전단파의 파장으로 가정한다(after JWWA, 2009a).

그런데 지반의 축방향 변형률 규모는 지반의 지층 성상에 상당한 영향을 받는다. 동일한 관로가 매설되어 있다 하더라도 지반의 불균질성이 높은 곳에서는 지진동으로 인한 매설 관로 피해가 상대적으로 크기 때문에, 지반의 불균질성이 지반 변형률 증폭에 미치는 영향을 반영하는 것이 필요하다. 따라서 지반의 축방향 변형률을 계산할 때 경험적인 부지 불균질 계수(η)를 도입한다(Park, 2020).

우선 균질 지반에 대한 지반의 축방향 변형률(ϵ_{G0})을 다음과 같이 구한다.

$$\epsilon_{G0} = \frac{\pi U_h}{L} \quad (10)$$

여기서, ϵ_{G0} : 균질지반 축방향 지반 변형률

U_h : 관측 위치 지반 수평변위 진폭(m)

L : 관측에 45°로 입사하는 지진동 파장(m)

지반 불균질 계수(η)는 다음과 같다.

$\eta = 1.0$ 균질 지반

$\eta = 1.4$ 다소 층 두께 변화가 심한 층적층 및 보통 구릉지

$\eta = 2.0$ 계곡이나 하천과 같이 상당히 불균질한 층적층 지반 및 절성토 사면

지반의 불균질성을 고려한 지반 축방향 변형률(ϵ_G)은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\epsilon_G = \eta \frac{\pi U_h}{L} \quad (11)$$

지반의 축방향 변형률(ϵ_G)은 위 간이식으로 산정가능하지만, 지반이 비교적 균질하거나 분명한 다층지반인 경우에는 1D 지반응답해석으로 지반변위를 산정한 다음에 상기 식으로 구해도 된다. 지반 조건의 변화를 상당히 고려해야 할 경우에는 2D, 3D FEM 모델을 활용하여 지반 변위와 전단변형률을 구하는 것도 바람직하다.

⑤ 지반 강성계수

지반 강성계수는 관로의 축방향 강성계수(K_1)와 관측 직교방향 강성계수(K_2)로 구분하며, 다음 식으로 구할 수 있다.

$$K_1 = 1.5 \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (12)$$

$$K_2 = 3.0 \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (13)$$

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(9.8m/s²)

⑥ 지진 시 축방향 응력(σ_x)

지진 시 축방향 응력(σ_x)은 매설관로의 축 응력(σ_L)과 휨 응력(σ_B)의 합성응력으로 산정하며, 지반의 축방향 변형률(ϵ_G)을 기반으로 하는 각각의 응력 계산값에 응력 보정계수(ξ)(매설관로를 신축이음부가 없는 연속체로 가정하였을 때 응력에 대한 신축이음부가 있는 경우의 응력을 보정하는 계수)를 곱하여 구한다.

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_L'^2 + \sigma_B'^2} \quad (14)$$

$$\sigma_L' = \xi_1 \cdot \sigma_L \quad (15)$$

$$\sigma_B' = \xi_2 \cdot \sigma_B \quad (16)$$

$$\epsilon_G = \eta \frac{\pi U_h}{L} \quad (17)$$

$$\sigma_L = E\epsilon_L = E\alpha_1\epsilon_G = \alpha_1 \cdot \frac{\pi U_h}{L} \cdot E \quad (18)$$

$$\sigma_B = E\epsilon_B = \alpha_2 \cdot \frac{2\pi^2 D U_h}{L^2} \cdot E \quad (19)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L'}\right)^2} \quad (20)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 L}\right)^4} \quad (21)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}} \quad (22)$$

$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{K_2}{EI}} \quad (23)$$

$$L' = \sqrt{2} \cdot L \quad (24)$$

여기서, σ_x : 관 축방향 합성응력(KPa)

σ_L, σ_B : 응력보정 전 축 응력, 휨 응력(KPa)

σ_L', σ_B' : 응력보정 후 축 응력, 휨 응력(KPa)

$\sigma_L'(x), \sigma_B'(x)$: 신축이음부에서 관축방향 거리 x (m) 지점의 축 응력과 휨 응력(KPa)

ξ_1, ξ_2 : 축 응력, 휨 응력에 대한 보정계수(Chart에서 구함), 매설관로를 연속으로 가정하였을 때 응력에 대한 관로 신축이음부가 있는 경우의 응력 보정계수

α_1, α_2 : 관축방향 및 관축 직교방향의 지반변위 전달계수

U_h : 관축 위치의 지반의 수평 변위 진폭(m)

L : 지진동의 파장(m)

D : 외경(m)

E : 탄성계수(KPa)

K_1 : 축방향 변위에 관한 지반 강성계수

K_2 : 축 직각 방향 변위에 관한 지반 강성계수

A : 단면적(m²)

I : 단면 2차 모멘트(m⁴)

l : 관의 길이(m)

$\nu = l/L$

$\nu' = l/L'$

L' : 관 축방향 파장(m),

위 식에서 축 응력과 휨 응력에 대한 응력보정계수, ξ_1, ξ_2 는 매설관로를 연속관으로 가정하였을 때의 응력에 대한 관로 신축이음부가 있는 경우의 응력 보정계수를 의미한다. 응력보정계수의 산정은 EESK(2017)의 다소 복잡한 아래 식들을 이용하거나, 보다 간소화된 아래 그래프, Fig. 2, Fig. 3에서 값을 취할 수도 있다.

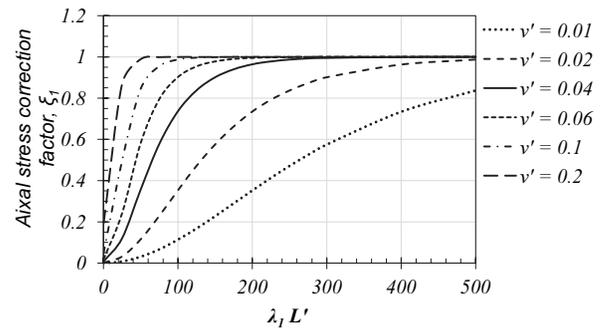


Fig. 2 Correction coefficient for axial stress

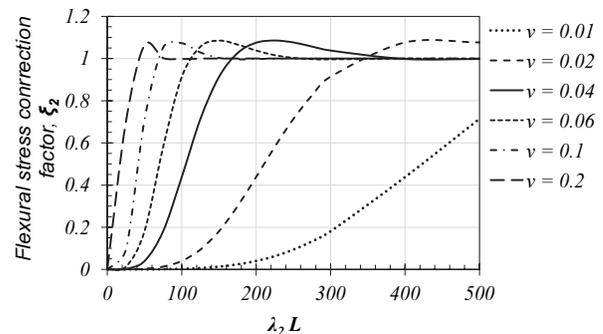


Fig. 3 Correction coefficient for flexural stress

⑦ 관체 응력에 의한 내진안전성 조사
상시하중에 의해 발생한 응력과 지진 시 발생응력을 합산하고 이 값이 허용응력 이하인지 조사한다.

2.3.3 기계식 이음 PE관의 이음부 축방향 신축량 검토

기계식 이음으로 체결된 PE관은 지진 시 응력에 대한 검토 외에 이음부의 축방향 신축량에 대한 검토도 필요하다.

일반적으로 주철관이나 PVC 관 등 물과 접하는 부위 또는 별도의 이음부가 있는 관은 관내 수압이 불균등하게 걸리는 불평형력이 발생하여 피팅이 이탈하려는 힘이 작용하게 된다. 이러한 관은 별도의 검토를 하고 이탈방지 피팅등의 처리를 한다. 그러나 PE관의 경우에는 일체형 구조로서 불평형력에 의한 이탈 검토는 불필요하다. 기계식 이음 이음방식인 경우에도 이음부의 변형능력보다 관체의 변형능력이 크도록 양호한 체결이 되어 있다면 이러한 관의 이탈검토는 불필요할 수 있다. 그러나 변형능력의 상당부분을 기계식 이음부에 두는 특수한 경우에, 아래 절차에 의한 이음부 신축량 검토를 수행할 수 있다.

① 내압에 의한 이음부 신축량(e_i)

$$e_i = \frac{l \cdot \sigma_i}{E} \quad (25)$$

$$(\sigma_i = E \epsilon_i, \quad \epsilon_i = \frac{e_i}{l}; \quad \sigma_i = E \frac{e_i}{l})$$

여기서, e_i : 내압에 의한 이음부 신축량(m)
 σ_i : 내압에 의한 관체 발생 응력(KPa)
 l : 관 길이 (m)
 E : 탄성계수(KPa)

② 자동차 하중에 의한 이음부 신축량(e_o)

$$e_o = \frac{l \cdot \sigma_o}{E} \quad (26)$$

$$(\sigma_o = E \epsilon_o, \quad \epsilon_o = \frac{e_o}{l}; \quad \sigma_o = E \frac{e_o}{l})$$

여기서, e_o : 자동차 하중에 의한 이음부 신축량(m)
 σ_o : 자동차 하중에 의한 관체 발생 응력(KPa)

③ 온도변화에 의한 이음부 신축량(e_t)

$$e_t = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \quad (27)$$

여기서, e_t : 온도변화에 의한 이음부 신축량(m)

α : 선팽창계수

ΔT : 온도변화(°C)

④ 부등침하에 의한 이음부 신축량(e_d)

연약지반 구간(L) 중앙부에서 δ 의 부등침하가 발생하였다면, l 구간에서 늘어난 길이 $\Delta l = \sqrt{l^2 + \delta^2} - l$ 로 구할 수 있다(after JWWA, 2009a). Δl 은 l 구간에 속한 각각의 이음부에 분산되나, 보수성을 위해 한군데의 이음부에 집중되었다고 가정한다. 따라서 부등침하에 의한 이음부 신축량(e_d)은,

$$e_d = \Delta l \quad (28)$$

⑤ 지진시의 이음부 신축량($|u_j|$)

지진 시 이음부의 관축방향 신축량은 아래와 같이 계산한다. 이음부에서 발생하는 관 축 직교방향의 상대변위는 매우 작은 것이 일반적이므로, 관 축방향의 이음부 신축량만을 평가한다.

$$|u_j| = u_o \cdot \bar{u}_j \quad (29)$$

$$u_o = a_1 \cdot U_a \quad (30)$$

$$U_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_h \quad (31)$$

$$\bar{u}_j = \frac{2 \gamma_1 |\cosh \beta_1 - \cos \gamma_1|}{\beta_1 \cdot \sinh \beta_1} \quad (32)$$

$$a_1 = \frac{1}{1 + (\gamma_1 / \beta_1)^2} \quad (33)$$

$$\beta_1 = \lambda_1 l = \sqrt{\frac{K_1}{EA}} \cdot l \quad (34)$$

$$\gamma_1 = \frac{2\pi l}{L'} \quad (35)$$

$$L' = \sqrt{2} \cdot L \quad (36)$$

여기서, $|u_j|$: 관 축방향 이음부 신축량(m)

u_o : 무한 연속보의 경우 관 축방향 상대변위량(m)

U_h : 관로 매설깊이에서 45° 경사로 입사하는
전단파의 변위 진폭(m)

U_a : 관축방향 지반의 수평 변위 진폭(m)

l : 이음부 간격(m)

K_1 : 매설관로의 관 축방향 단위 길이당 지반의
강성계수(Pa)

L : 지진동의 파장(m)

L' : 관축방향 파장(m)

⑥ 이음부의 신축량에 의한 내진 안전성 조사
 상시하중, 온도변화, 부등침하, 지진동에 의한 총 이음부 신축량이 이음부 설계 최대 신축량보다 작으면 내진성능을 확보하는 것으로 판단한다.

2.3.4 기계식 이음 PE관의 이음부 휨 각도 검토

지진동에 의한 이음부의 휨 각도 검토는 아래 식에 의해 계산한다.

$$\theta = \frac{4\pi^2 l U_h}{L^2} \quad (37)$$

여기서, θ : 이음부의 휨 각도(radian)
 l : 이음부간의 길이, 즉 관 길이(m)
 U_h : 지표면에서 관 위치 심도에 따른 지반의 수평변위 진폭(m)
 L : 지진동의 파장(m)

계산된 지진 시 이음부의 휨 각도를 설계 허용 휨 각도와 비교하여 휨 각도에 대한 안전성을 검토한다. 허용 휨 각도는 관경과 관 이음 구조에 따라 달라지므로 제조사의 이음부 신축 관련 허용기준을 참조하여야 한다.

3. 지반변형 내진 검토

일본이나 뉴질랜드의 비교적 최근 지진 사례에서 매설관로의 사고사례로 알 수 있듯이(Cubrinovski et al., 2011; 2014; Japan Water Research Center, 2013), 매설관의 내진성은 관 자체의 구조적 안전성 외에 지반의 변형에 대한 안전성이 매우 중요하다. PE관로가 느슨하게 포화된 사질토 지반, 특히 경사진 지반에 매설되어 있는 경우에는 관 자체의 내진 안전성과 함께 지반 액상화(Soil Liquefaction)로 인한 측방유동 등 영구 변형에 대한 검토가 필요하다. 액상화 지반에 매설된 PE관로의 경우, 관로 자체의 지진동 시 일시적인 변형률보다는 액상화로 인한 측방유동 또는 재압밀 침하 영구지반변형에 지배적인 영향을 받으므로 이에 대한 검토는 매우 중요하다.

현재 국내에서는 KDS 17 10 00: 2018(내진설계 일반)에 액상화 발생 가능성을 중심으로 한 평가 방법을 간단히 언급하고 있으나, 액상화로 유발되는 지반의 변형량 산정에 대해서는 언급하고 있지 않다. KDS 57 17 00: 2019(상수도 내진 설계)에서도 상수도 시설의 내진성능목표에 대해 지반의 액상화에도 불구하고 급수기능 유지가 가능하여야 한다고 기술되어 있으나 구체적인 방법론은 제시되지 않았다.

따라서 매설 PE관의 지반 액상화로 인한 변형 검토 방법을

제시하고자 한다. 지반 액상화의 결과로 유발되는 영구 지반 변위 산정은 관련 연구 자료나 관련 가이드라인(Park, 2014)을 참조하는 것이 바람직하다. 다만 본 내진 해석 절차에서는 편의성을 고려하여 간단한 지반변형 검토 방법을 제시하고자 한다. 국내 환경에서는 지반 액상화로 인한 측방유동 변위 등의 사례 데이터가 거의 없는 실정이므로 본 절차는 해외의 지침이나 해석서를 참조하였다(JWWA, 2009a; Idriss and Boulanger, 2008).

지반 액상화로 인해 매설 PE관로가 지반 변형에 노출되어 있는 경우, 관체 내진 해석과 함께 다음 식을 통한 지반 변형 내진 검토를 할 수 있다.

$$\epsilon_p = \alpha \cdot \epsilon_g \quad (38)$$

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

지반변형에 대한 PE관 내진검토 허용 변형률은 6%를 적용할 수 있다. 매설 PE관의 경우 다양한 조건의 지반변형에 대해 대체로 넉넉한 허용 변형률을 가지므로 측방유동 시에도 많은 경우 내진성을 확보할 수 있다. 액상화가 발생하면 측방유동(lateral spreading)에 의한 지반의 변형과 함께, 액상화 후 재압밀에 의한 침하가 발생할 수 있다.

우선 측방유동 변위 산정을 위해서는 전단 변형률이 주어진 지반 조건에서 얼마만큼까지 발생할 수 있는지에 대한 정보가 필요하다. 즉 액상화 시 측방유동에 의한 변위는 최대 전단 변형율을 깊이에 대해 적분함으로써 계산될 수 있다. Zhang et al.(2004)은 잠재적인 최대 변위량을 표현하는 항으로서 “측방 변위지수(lateral displacement index; LDI)”를 제시한 바 있으며, LDI 값의 계산은 다음과 같다.

$$LDI = \int_0^{z_{max}} \gamma_{max} \cdot dz = \sum \gamma_{max,i} \times h_i \quad (39)$$

여기서 z_{max} : 최대 액상화 지반 심도
 $\gamma_{max,i}$: i번째 층에서의 최대 전단 변형율
 h_i : i번째 층의 두께

액상화 후 재압밀 침하량, 즉 연직 변위는 두 가지 주요한 방법으로 발생할 수 있다: (1) 액상화된 지반의 재압밀에 의해 유발된 침하와 (2) 측방유동과 관련된 지반의 전단 변형에 의해 유발된 연직 변위가 그것이다. 여기서는 재압밀에 의해 유

발된 침하만을 다룬다. 그러나 축방유동 지역에서는 지반의 전단 변형에 의해 유발되는 연직 변위 효과가 상당히 지배적 일 것으로 인식되어야만 한다.

액상화 후 재압밀에 의한 체적 변형율은 대부분 실내실험 연구로부터 유도된 관계식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다(Idriss and Boulanger, 2008).

$$\epsilon_v = 0.114 \times e^{-0.354 \sqrt{(N_1)_{60CS}} \times \min(1.0, \frac{\gamma_{max}}{0.08})} \quad (40)$$

여기서, ϵ_v : 체적 변형율

$(N_1)_{60CS}$: 깨끗한 모래로 정규화된 SPT N 값

일차원적 재압밀(횡방향 유동 변위가 없는 경우)에 대한 지표면 침하량(S_{V-1D})은 연직 변형율을 체적 변형율까지 적분해줌으로서(1D 재압밀에 적절하게) 계산할 수 있으며, 수치 해석적으로는 연직 변형율을 깊이에 대해 적분함으로써 얻어진다(Idriss and Boulanger, 2008).

$$S_{V-1D} = \int_0^{Z_{max}} \epsilon_v dz = \sum \epsilon_{v,i} \times h_i \quad (41)$$

4. 분석 및 토의

제시한 기계식 이음 PE관의 응답변위법 기반 내진성능평가 절차는 KDS 17 10 00: 2018(내진설계 일반)과 KDS 57 17 00: 2019(상수도 내진 설계)를 만족하면서 실무 적용성을 극대화하도록 구체화하였다. 종래의 응답변위법 기반 매설관로의 내진설계 절차(Ministry of Environment, 1999) 및 기존 용착식 PE관의 내진성능평가 절차(Park, 2020)와 유사한 과정을 취하지만, 다음 측면에서 차별성과 독창성을 갖는다.

- ① 변형율에 대한 검토를 이음부의 신축량으로 수행
- ② 변형율 검토 외에 관체의 응력 검토를 별도로 추가
- ③ 신규로 지진 시 이음부의 휨 각도에 대한 검토를 추가
- ④ 매설 PE관의 지반 액상화에 의한 변형량 산정 방법 제시

보다 구체적으로 관체 응력 검토 시 종래 방식에 비해 대상 부지의 불균질성을 고려한 계수를 도입하였고, 지반의 강성계수 산정 시 표층지반 두께와 관경에 대한 보정계수를 도입하였으며, 신축성 이음부가 있는 이음관의 응력보정계수도 도입하였다.

제시한 절차를 바탕으로 국내의 일반적인 지반 조건과 설계지반운동 수준 및 PE관의 보편적인 재료적 특성을 고려하

여 내진성능에 관한 민감도 분석을 수행하였다. 주요 분석 조건으로 기계식 이음 HDPE 관으로서 관경 11 cm, 관 두께 6 mm, 관 길이 6 m, 포아송비 0.4, 탄성계수 200 MPa의 통상적인 관로를 토끼고 1.2 m인 지반, 지진 I구역에 매설하였을 때로 가정하고, 붕괴방지수준 유효수평지반가속도를 0.154 g로 설정하였다.

우선 지반조건 따른 표층 두께(10~100 m)와 토사층 평균 전단파 속도 분포(10~300 m/s)를 국내 지반조건을 고려하여 다양하게 변화시켜 지진에 의한 관체 응력과 신축량, 휨 각도의 변화를 분석하였다. 결과 분석에 사용한 관체의 허용기준 조건은 허용응력 8,000 kPa, 이음부 항복 변형율 3%, 이음부 휨 각도 4°였다.

Fig. 4는 표층 두께와 전단파 속도에 따른 해당 조건 관체의 축응력 민감도 분석 결과이다. 결과적으로 지진으로 유발되는 기계식 이음 PE관의 관체 응력, 신축량, 휨 각도는 모두 층분한 허용치 이내에 있음을 알 수 있었다. 지진으로 인한 관체의 축방향 응력은 대부분 1,000 kPa 이내였고, 축방향 변형율은 미미하였다. 이는 응답변위법의 원리상 관 축 위치 지반의 수평변위가 주로 수 cm 수준으로 상대적으로 작은데 비해, 기반암과 표층 지반의 전단파 속도(V_s) 분포로부터 계산되는 지진 시 과장이 수백 m 수준으로 매우 길기 때문에 변형율과 응력이 작게 산정되는 것이다.

Fig. 4에서 동일한 토사층 두께일 때 관체에 지진으로 발생하는 축응력은 표층 전단파 속도가 커질수록 대체로 급격히 감소하였으며, 전단파 속도가 낮을수록 축응력 변화의 경향성이 일정하지 않음을 알 수 있다. 표층 전단파 속도가 100 m/s 이상이면, 토층 두께에 크게 관계없이 관체 축응력은 주어진 물성과 평가 지진력 하에서 주로 150 kPa 이하로 나타났다. 동일한 표층 전단파 속도 조건인 경우, 비교적 낮은 전단파 속도일 때 토층 두께가 증가할수록 지진시 관체 축응력은 감소하는 경향을 보인다.

평가지진력으로 채택한 최대지반가속도(PGA; Peak Ground Acceleration) 0.154 g는 국내 지반 환경에서 기계식 이음 매설

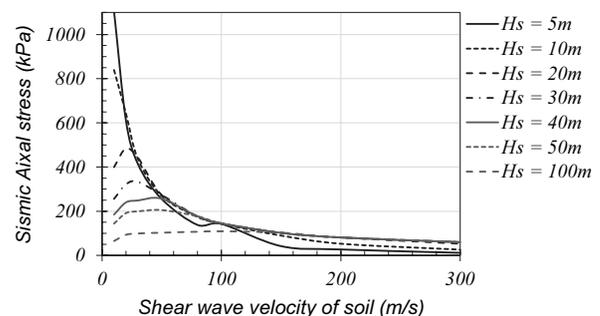


Fig. 4 Seismically induced axial stress of PE pipe depending on soil condition

PE 관로의 응력이나 변형율에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 EESK(2017)의 연구에서 국내 14개 지반의 전단파 속도 주상도를 적용하였을 때 매설 관로에 대한 지반응답해석 결과와 일치한다. 이 연구에서 산정된 최대지반속도(PGV; Peak Ground Velocity) 중간값은 14.9 cm/s 였으며, American Lifelines Alliance(2005)의 간편법에서 제시하는 별도 내진 보강이 필요없는 수준인 PGV 25.4 cm/s 미만으로 나타났다.

즉 관이 매설되어 있기 때문에 지반에 노출된 구조물에 비해 지진 시 상대적인 구조적 안전성을 갖는다. 오히려 지진에 의한 응력이나 변형율 보다는 상대적으로 관체 내압과 차량 하중에 의한 응력과 변형율의 영향이 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다. 이는 기계식 이음 PE관의 품질이 확보되는 경우, 관체 자체는 구조적 내진 안전성을 대체로 확보할 것임을 시사한다. 여기서 실제 PE관의 자체가 내진성을 확보하는 품질 기준을 만족하는지는 별개의 사안이며, 이에 대한 별도 시험 절차가 향후 필요할 것이다.

그러나 지진시 기계식 PE관 자체의 구조적 안전성과 별개로 주변 지반의 액상화에 의한 변형이 수반될 경우 관로의 변형도 지반 변형에 순응하게 되므로, 오히려 내진성능평가에 지배적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 액상화에 취약한 지반인 경우, 상기 제시한 별도의 지반 액상화로 유발되는 변형량을 검토하는 것이 중요하다.

5. 결론

본 논문에서는 주로 작은 관경의 기계식 이음 PE관의 국내 내진설계 및 내진성능평가 절차가 부재함에 따라 국내외 최근 연구성과들을 반영하여, 실무에 적용가능한 수준의 응답 변위법 기반 국내 기계식 이음 PE관 내진해석 절차를 제시하고자 하였다. 본 내진성 검토 절차는 국내외 다양한 검토 방법을 참고하였으며, 주로 국내 내진설계 공통적용사항(KDS, 2018), 상수도 내진설계 개정 기준(KDS 57 17 00, 2019), 일본 수도협회(JWWA, 2009a, 2009b) 등을 종합적으로 고려하여 마련되었다.

본 기계식 이음 PE관의 내진 해석 절차는 2017년 내진설계 국가 공통적용기준을 준수하는 PE관의 등급, 위험도, 지반 분류, 내진설계 표준응답스펙트럼 등의 절차를 추종한다. PE관 이음 형태에 따라 분절관 평가법으로서 기계식 이음 PE관에 대하여 응답변위법 기반으로 관체 발생응력과 이음부 신축변형률 평가, 이음부 휨 각도 평가 절차를 제시하였다. 이음부 신축변형률 평가 과정에서 국내 지반의 축방향 변형률 산정 시 지반의 불균질성을 고려할 수 있는 계수를 도입하였다. 관체의 내진설계 방법과 별개로 액상화가 우려되는 지반의 매설 PE관

주변 지반 변형에 대한 변형률 간단 검토 절차도 제시하였다.

제시한 국내 이음식 PE관의 내진설계 및 내진성능평가 절차는 주로 110 mm 이하 관경의 기계식 이음(Mechanical coupling) 또는 조임식 이음, 플랜지 이음에 적용가능하다.

응답변위법 기반 기계식 이음 PE관의 내진성능평가 절차를 활용하여 국내 지반 특성(표층 두께 및 전단파 속도)을 고려한 민감도 분석을 수행하였고, 매설 관로는 품질이 확보되는 한 대체로 구조적 내진 안전성을 확보하는 것으로 판단된다. 다만 액상화에 취약한 지반인 경우, 매설 관로 주변 지반에 대한 액상화로 인한 변형률 분석이 중요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국 PE관 공업협동조합과 (사)한국지진공학회의 재정적 지원으로 수행되었습니다. 이 논문의 지진 시 물인프라 관련 데이터와 내용 일부는 2023 K-water 연구원의 연구 과제, “수자원 인프라 안전 디지털 정보화 혁신기술 연구”의 일환으로 작성되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. American Lifelines Alliance (2005), Seismic guidelines for water pipelines, FEMA, National Institute of Building Sciences.
2. Cubrinovski, M., Hughes, M., Bradley, B., McCahon, I., McDonald, Y., Cameron, R., Christison, M., Henderson, B., Orense, R., and O'Rourke, T. (2011), Liquefaction impacts on pipe networks, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
3. Cubrinovski, M., Hughes, M., Bradley, B. A., Noonan, J., Hopkins, R., McNeill, S., and English, G. (2014), Performance of horizontal infrastructure in Christchurch city through the 2010-2011 Canterbury earthquake sequence, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
4. EESK (2017), Development of seismic design and performance evaluation guideline of PE pipeline, Research Report, September 2017, Earthquake Engineering Society of Korea.
5. GEER (2023), February 6, 2023 Türkiye earthquakes: Report on geoscience and engineering impacts, GEER Association Report 082, Earthquake Engineering Research Institute, LFE Program, May 6, 2023.
6. Haas, K. (2012), Lifecycle cost and performance of plastic pipelines in modern water infrastructure, Research Report 2012-11, University of California, Davis, USA.
7. Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008), Soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute.
8. ISO (2007a), Buried polyethylene (PE) pipes for the supply of gaseous fuels - Metric series - Specifications, ISO International Standard, Geneva, Switzerland.
9. ISO (2007b), Plastics piping systems - Polyethylene (PE) pipes and fittings for water supply - Part 1: General, ISO International Standard, Geneva, Switzerland.

10. ISO (2007c), Plastics piping systems - Polyethylene (PE) pipes and fittings for water supply - Part 2: Pipes, ISO International Standard, Geneva, Switzerland.
11. Japan Water Research Center (2013), Research activities on earthquake proofing of drinking water facilities, Toranomon Minato-ku, Tokyo.
12. JWWA (2009a), Commentary on the guideline for earthquake-resistant construction methods for water supply facilities, Japan Water Works Association. (水道施設耐震工法 指針 解説 (2009), 日本水道協会., 일본.)
13. JWWA (2009b), Polyethylene pipes for water distribution, Polyethylene pipe fittings for water distribution, Japan Water Works Association.
14. KDS (2018), Seismic design general, KDS 17 10 00, Korea Design Standard.
15. KDS (2019), Seismic design of water supply facilities, KDS 57 17 00, Korea Design Standard.
16. Kim, B., Ji, Y., Kim, M., Lee, Y. J., Kang, H., Yun, N. R., and Lee, J. (2022), Building damage caused by the 2017 M5. 4 Pohang, South Korea, earthquake, and effects of ground conditions, *Journal of Earthquake Engineering*, 26(6), 3054-3072.
17. Lamborn, M., and Petroff, L. (2011), A laboratory method for determining the safe pull stress for directionally drilled high density polyethylene pipe, *Pipelines 2011: A Sound Conduit for Sharing Solutions*, 892-902.
18. Ministry of Environment (1999), Research to establish seismic design standards for waterworks facilities, Ministry of Environment.
19. Miyajima, M. (2014), Performance of earthquake resistant drinking water pipeline during the 2011 Tohoku earthquake in Japan, 10th National Conference in Earthquake Engineering, Anchorage.
20. Naik, S. P., Gwon, O., Park, K., and Kim, Y. S. (2020), Land damage mapping and liquefaction potential analysis of soils from the epicentral region of 2017 Pohang Mw 5.4 earthquake, South Korea, *Sustainability*, 12(3), 1234.
21. O'Rourke, T. D., Jeon, S.-S., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., van Ballegooy, S., and Bouziou, D. (2014), Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ, *Earthquake Spectra*, EERI, 30(1), 183-204.
22. Park, D. S. (2020), Seismic design and performance evaluation of fusion-type polyethylene pipeline, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 20(5), 297-307 (in Korean).
23. POLITEC (2016a), PTC Designing manual for polyethylene pipes and pipe fittings for water distribution, Polyethylene Piping System Integrated Technology and Engineering Center (POLITEC).
24. POLITEC (2016b), Technical data on seismic performance of polyethylene pipes for water distribution, Polyethylene Piping System Integrated Technology and Engineering Center (POLITEC).
25. PPI (2017), Handbook of polyethylene (PE) pipe, Plastics Pipe Institute (PPI).
26. 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*, 10(10), 461-470.
27. Zhang, G., Robertson, P. K., and Brachman, R. (2004). Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 861-871.

Received : 05/14/2023
 Revised : 07/11/2023
 Accepted : 07/20/2023

요 지 : 지진 시 매설 PE관은 파단시 신장율이 우수하여 상대적으로 우수한 내진성능을 보이는 것으로 보고되고 있다. 국내 용착식 PE관의 응답변위법 기반 내진성능평가 절차를 제안한 바 있으나, 기계식 이음 PE관에 대한 절차는 부재한 실정이다. 이에 본 연구에서는 기계식 이음 PE관의 응답변위법 기반 내진성능평가 절차를 제시하였다. 기계식 이음 PE관의 경우 분절관의 평가 절차를 따르며, 관체 발생응력, 이음부 신축변형을 및 이음부 휨 각도 평가를 수행하도록 제안하였다. 또한 지반의 축방향 변형을 산정에 필요한 지반의 불균질성 계수를 도입하였다. 지반 액상화 우려가 있는 지반에 대한 축방 변위 및 재압밀 침하량 계산 방법도 함께 제안하였다. 국내 지반 환경을 고려한 민감도 해석 결과, 일정 품질이 확보된 기계식 이음 PE관은 지반 액상화를 고려하지 않을 때, 양호한 구조적 지진 안전성을 보였다. 본 절차는 주로 소규모 관경의 배관 접합에 사용하는 기계식 접합 매설 PE관의 내진설계 및 내진성능평가에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : PE관, 관로, 내진설계, 내진성능평가, 응답변위법, 지진
