

지진파 입사방향에 따른 매설관 종방향 응답특성 규명

Effect of Incident Direction of Earthquake Motion on Seismic Response of Buried Pipeline

곽 형 주¹⁾ · 박 두 희[†] · 이 장 근²⁾ · 강 재 모²⁾

Hyungjoo Kwak · Duhee Park · Janguen Lee · Jaemo Kang

Received: July 22nd, 2015; Revised: July 28th, 2015; Accepted: August 17th, 2015

ABSTRACT : In this paper, a 3D shell-spring model that can perform time history analysis of buried pipelines is used to evaluate the effect of the incident direction of the earthquake motion. When applying harmonic motions, it is shown that the period of vibration has pronounced influence on the response of buried pipelines. With decrease in the period, the curvature of the pipeline and corresponding response are shown to increase. To evaluate the effect of the incident angle, the motions are applied in the direction of the pipeline, horizontal, and vertical planes. When the motion is applied parallel to the direction of the pipeline, it only induces bending strains and therefore, the response is the lowest. Under motions subjected in horizontal and vertical planes at an angle of 45° from the longitudinal axis of the buried pipeline, the axial deformation is shown to contribute greatly to the response of the pipelines. When imposing two-components simultaneously, the calculated response is similar to the case where only single-component is imposed. It is because one component only induces bending strain, resulting in very small increase in the response. The trend of the response is shown to be quite similar for recorded motions. Therefore, it is concluded that use of a single-component is sufficient for estimation of the longitudinal response of buried pipelines.

Keywords : 3D shell-spring model, Buried pipeline, Soil-structure interaction, Axial strain, Bending strain

요 지 : 이 연구에서는 사실적인 매설관의 종방향 지진 응답특성을 규명하기 위하여 3차원 시간 이력해석이 가능한 셸-스프링 수치모델을 구축하였으며 지진파 입사방향, 2방향 재하의 영향을 평가하였다. 조화운동을 적용한 결과, 이의 주기는 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 주기가 감소할수록 매설관의 곡률이 증가하며 응답이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 입사방향의 영향을 평가하기 위하여 매설관 축 방향, 수평평면, 그리고 수직평면으로 운동을 재하 하였다. 매설관 축 방향으로 하중을 재하할 경우 휨 변형만을 유발하므로 응답이 매우 작게 계산되었다. 수평 및 수직평면에서 매설관 축 방향과 45°로 재하 하는 경우 축방향 변위가 응답에 지배적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 2방향 재하 시, 휨 변형만을 유발하는 요소의 영향이 극히 작으므로 1방향으로만 재하 하는 경우와 결과가 유사하게 계산되었다. 계측기록을 재하 하는 경우에도 응답은 유사하게 계산되었고 1방향 및 2방향 해석의 결과는 크게 다르지 않은 것으로 나타났다. 결과적으로 매설관의 종방향 지진 응답은 축 방향 변위를 유발하는 1방향 재하만으로도 충분히 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 3차원 셸-스프링 모델, 매설관, 지반-구조물 상호작용, 축 변형률, 휨 변형률

1. 서 론

가스, 수도 등을 이송하는 매설관은 사람들의 생활에 필수적인 서비스를 제공하며, 지진과 같은 자연재해에 의해 손상이 되었을 시 사람들의 생활에 직접적인 피해를 입힌다. 지진 시 매설관의 응답은 지상 구조물과는 다른 응답 특성을 나타내는데, Datta(1999)는 이를 다음과 같이 구분하여 설명하였다. (1) 매설관 주변의 지반에 의해 관성력이 작용한다. (2) 지상 구조물의 경우 지반운동을 따른다고 가정되지만, 매설관의 경우 흙과 매설관 사이의 상대 변위는 각 절

점에서 유발되는 응력에 의해 좌우된다. (3) 지상 구조물은 지반운동에 대하여 대체로 일관적인 응답을 나타내는 반면, 매설관의 경우 넓은 지역에 걸쳐 설치되므로 각 지점에 따라 다른 지반 물성을 가진다. 이로 인하여 각 지점마다 지진파의 특성이 바뀌어 다른 응답을 나타낸다. (4) 지상 구조물은 일반적으로 그 자체에만 피해가 국한되지만 매설관의 특정 부분에서 발생한 피해는 다른 부분에도 영향을 미친다.

매설관에 미치는 주요 지진 피해로는 지진파 전파 효과를 포함한 지반진동으로 인한 일시적 지반 변형(Transient ground deformation)과 단층, 액상화 그리고 산사태 등으로 인한 영

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

† Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (Corresponding Author : dpark@hanyang.ac.kr)

2) Korea Institute of Construction Technology

구 지반 변형(Permanent ground deformation)이 있다(ALA, 2001). 일반적으로 지진파 전파 효과에 의한 일시적 지반 변형은 영구 지반 변형에 비해 크기는 작지만, 넓은 범위에 영향을 미치므로 매설관에 더욱 중대한 영향을 미친다(Toprak et al., 2008). 지진에 대한 배관 설계의 가장 큰 목적은 파괴에 의한 잠재적인 피해를 방지하는 데 있다. 특히 연속관의 경우, 용접부에서의 응력과 변형률의 집중으로 인해 파괴가 일어날 가능성이 있으며 큰 변형률은 단면의 변형과 좌굴을 일으킬 수 있다(Gantes & Melissianos, 2013).

매설관의 지진 응답을 분석하기 위한 많은 연구들이 수행되었다. 매설관이나 터널과 같이 종방향으로 긴 구조물들은 위치에 따른 지진파가 도달하는 시간차와 지진파의 위상 변화에 의하여 영향을 받는다. 또한 구조물과 지반의 강성 차이로 인한 상호작용이 발생한다. 이와 같은 현상을 모사하기 위하여 다수의 모델이 제시되었다. 가장 간단한 모델은 지반과 매설관의 상호작용을 고려하지 않는다. Newmark & Rosenblueth(1971)는 지반과 파이프 사이의 상호작용과 관성력을 무시하였으며, 각 지점마다 시간차를 주어 지진 하중을 적용하였다. 이를 통해 자유장 지반의 변형률과 곡률을 제시하였다. Hindy & Novak(1979)은 입사각을 변수로 하여, P파와 S파에 대한 자유장에서의 변형률과 곡률을 제시하였다.

사실적으로 매설관의 응답을 예측하기 위해서는 지반과 구조물 사이의 상호작용을 고려해야 한다. 매설관에 대한 지진해석은 일반적으로 연속체 해석이 사용되지 않는다. 종방향 길이가 긴 구조물이기에 이를 3차원 요소로 모델링하여 해석하기가 어려우며 공간적으로 변이하는 지반운동을 모사하기 어렵기 때문이다. 따라서 대부분의 연구는 매설관을 빔 또는 쉘로 모사하고, 지반을 스프링으로 모사하는 해석 방법을 사용한다. 가장 간단한 해석은 매설관을 보(Beam)로 모사하여 지반을 탄성 또는 탄소성 스프링으로 모델링한다(Hindy & Novak, 1980; Nelson & Weidlinger, 1979; Wang & Cheng, 1979; Hindy & Novak, 1979). 위의 연구들은 매설관을 빔으로 모사하였지만, 이는 좌굴과 균열을 모사하거나 큰 직경을 가진 파이프의 해석을 수행하는 데 어려움이 있다. 이를 개선하기 위해 원통형 쉘 모델이 제안되었다(Luco & De Barros, 1994; Wong et al., 1986). 이는 길이 방향에 대한 좌굴과 균열을 모사하는 데 적합하지만 완전한 지반과 배관 사이의 상호작용을 구현하기 어렵다. Gantes & Melissianos (2013)는 빔 모델과 쉘 모델 사용 시의 결과를 비교 및 분석을 하였다. 쉘 모델은 단면의 일그러짐과 국부적인 좌굴을 예측하는데 적절하지만, 모델이 복잡하며 많은 해석 시간이 요구된다. 이러한 점을 개선하고자 Gantes & Bouckovalas (2013)는 단층 주변 지역에 위치한 배관에는 쉘 모델을 적용

하였고, 응력과 변형률이 작은 나머지 지역에 배관에는 보 모델을 적용하였다.

Lee et al.(2009)은 프레임 해석 프로그램 Zeus NL(Elnashai et al., 2011)을 사용하여 직선배관 및 경사배관을 대상으로 지반조건, 매설 깊이, 그리고 단일 지진파 및 복합지진파에 따른 영향을 규명하였다. 매설관은 비탄성 요소로 모델링하였으며 원형강 단면을 사용하였고 지반과 배관의 상호작용을 모사하기 위해서 탄소성 스프링을 사용한 비선형 Winkler Foundation 모델을 적용하였다. 탄소성 스프링의 하중-변위 곡선으로는 ALA(2001)의 식을 사용하였으며 모멘트-회전 관계식은 선형 탄성곡선으로 설정하였다. 입력지진파는 Northridge, Kobe 그리고 Eurocode 8에서 제시한 475년 재현주기 인공 지진파를 사용하였으며, 가속도-시간 이력을 점점에 입력하여 지진 응답해석을 수행하였다. 지반조건 변화는 배관의 횡 방향에 대해 변형률과 변위 응답에 크게 영향을 미치며, 연약점토 지반에서 응답이 커지는 것을 확인하였다. 또한 매설 깊이가 깊어질수록 횡 방향의 변위 응답이 감소하는 것으로 분석되었다. Joshi et al.(2011)은 역단층에 의한 매설관의 거동을 분석하였으며 단층 각도, 지반의 물성, 매설 깊이, 파이프의 마찰에 따른 영향을 규명하였다. 파이프와 지반은 각각 빔과 스프링으로 모사하였으며, 스프링 계수는 ALA(2001)의 관계식을 사용하였다. 역단층에 의한 영구 지반 변위는 스프링에 변위를 입력하여 모사하였다. 매설 깊이가 깊어지고, 파이프의 마찰계수가 커질수록 파이프의 변형은 증가하는 것으로 나타났다.

최근 들어 매설관과 지반을 연속체로 모사하는 보다 진보된 해석이 수행되고 있다. Saberi et al.(2011)과 Saberi et al.(2013)은 유한요소 해석프로그램 ABAQUS를 사용하여 지진파의 전파 각도와 매설관의 곡관부 각도($90 \sim 180^\circ$)에 따른 매설관의 축 방향 변형률을 계산하였다. 위 연구에서는 점토와 사질토를 대상으로 파이프의 매설 깊이, 직경 등을 변수로 고려하여 지진파 전파효과에 의한 영향을 분석하였다. 지반과 매설관의 상호작용을 모사하기 위하여 ALA(2001)의 관계식을 적용하였으며, 입력지진파는 Chichi 및 Northridge를 적용하였다. Saberi et al.(2013)은 파이프의 곡관부에는 곡관의 중심부를 기준으로 직경의 15배 길이까지는 쉘 모델, 그 외의 부분에는 빔 모델을 적용하였다. 이는 곡관 부분에 변형이 집중되어 정밀한 해석이 요구되기 때문이다. 지진파를 매설관에 수직으로 재하 하였을 때 곡관부의 각도가 135° 인 경우 가장 큰 변형률이 발생하였으며 파이프의 상대 변위는 곡관부의 각도가 180° 인 경우 최대로 발생하였다. 최종적으로 수치해석 결과의 회귀분석을 통해 적용한 지진파를 대상으로 지반 물성에 따른 축 변형률의 해석 식을 제시하였다. 이 결과는 2차원 등가정적 해석을 수행하여 도출

한 회귀식(Mclaughlin & O'Rourke, 2009)과의 비교를 통해 검증하였다. Xie et al.(2011)은 정단층에 대한 매설관의 거동을 모사하였으며 수치해석 결과와 원심모형 실험결과를 비교하였다. 수치해석에서 지반은 탄소성 스프링과 연속체 요소로 모사하였다.

위와 같이 매설관에 대한 다양한 연구가 수행되었지만, 지진파의 입사방향과 입사각의 영향은 아직 면밀하게 분석되지 않았다. 또한 3차원 해석에서는 3방향 지진 가속도 시간 이력을 입력하중으로 적용하였으나 이에 대한 영향이 평가되지 않았다. 본 연구에서는 지진파의 입사방향과 각도, 그리고 2방향 지진파 재하에 따른 매설관의 응답을 분석하였다. 매설관과 지반은 각각 쉘과 3차원 탄소성 스프링으로 모사하였으며, 이에 다양한 조화운동과 계층 지진기록을 적용하였다. 최종적으로 매설관의 응답에 영향을 바탕으로 지진 시 매설관에 대한 최적의 해석 방법을 제시하였다.

2. 매설관 수치 모델

본 연구에서는 프레임 해석 프로그램인 Zeus NL(Elnashai et al., 2011)을 사용하여 매설관의 3차원 지진 응답해석을 수행하였다. 매설관은 속이 비어있는 원형강 단면을 사용하였으며 지반과 매설관의 상호작용을 모사하기 위하여, 지반을

탄소성 스프링으로 모사하였다(Lee et al., 2009). 매설관의 절점은 3방향 스프링을 연결하였으며 스프링의 강성과 강도는 ALA(2001)에 제시된 식을 사용하였다. Fig. 1은 방향별 스프링의 변위-하중 곡선을 나타낸다. 축 방향, 횡 방향, 그리고 수직 방향 스프링의 최대 저항력과 탄성거동 범위는 Table 1에 정리하였다. T_u , P_u , Q_u , Q_d 는 각각 단위 길이당 축 방향, 횡 방향, 연직 상향 방향 그리고 연직 하향 방향의 최대 지반 스프링 힘을 나타낸다. α 는 지반 부착계수, D 는 매설관의 직경, c 는 지반의 점착력, H 는 지표면과 매설관의 중심 사이의 거리, K_o 는 정지 토압 계수, δ 는 매설관과 지반 사이의 마찰각, $\bar{\gamma}$ 는 흙의 유효단위중량, N_{ch} 는 점토의 수평 지지력 계수, N_{cv} 는 점토의 연직 상향계수, N_{qh} 는 사질토의 수평 지지력 계수, N_{qv} 는 사질토의 연직 상향계수, N_c , N_q , 그리고 N_γ 는 지지력 계수를 나타낸다. 스프링의 강성은 최대 저항력에 탄성 변위를 나누어서 계산한다. 축 방향 및 횡 방향 스프링은 대칭 탄소성 곡선, 수직 방향 스프링은 비대칭 탄소성 곡선이 사용된다.

Zeus NL(Elnashai et al., 2011)으로는 가속도를 절점에 재하 하는 동적해석과 변위-시간 이력을 적용하는 정적 시간 이력 해석(Static time history analysis)이 모두 가능하다. 지중 매설관은 지반으로 둘러싸여 있어서 자유 진동하지 않고 지반운동에 순응하며 안이 비어 있어 매우 작은 관성력이 작용하므로 일반적으로 정적으로 응답을 평가한다. 가속도-

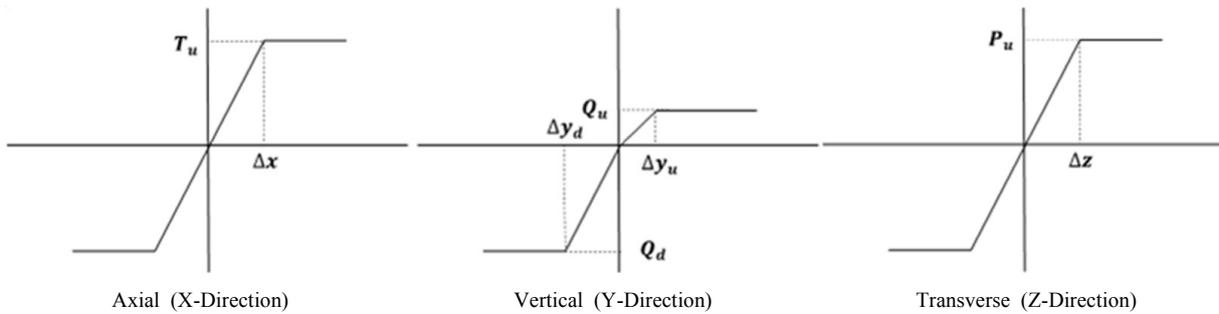


Fig. 1. The force-displacement relationship of soil springs (ALA, 2001)

Table 1. The force-displacement relationship of soil springs (ALA, 2001)

Direction	Clay		Sand	
	Max. Resistance (N/mm)	Max. elastic deformation (mm)	Max. Resistance (N/mm)	Max. elastic deformation (mm)
Axial	$t_u = \pi D \alpha S_u$	$x_u = 8 \sim 10$	$t_u = \frac{\pi}{2} D \gamma H (1 + K_o) \tan k \phi$	$x_u = 3 \sim 5$
Transverse (Horizontal)	$p_u = S_u N_{ch} D$	$y_u = 0.04 \left(H + \frac{D}{2} \right)$	$p_u = \gamma H N_q D + \frac{1}{2} \gamma D^2 N_\gamma$	$y_u = 0.04 \left(H + \frac{D}{2} \right)$
Transverse (Vertical) Upward	$q_u = S_u N_{cv} D$	$z_u = (0.01 \sim 0.015) H$	$q_u = \gamma H N_q D$	$z_u = (0.1 \sim 0.2) H$
Transverse (Vertical) Downward	$q_u = S_u N_c D$	$z_u = (0.10 \sim 0.015) D$	$q_u = \gamma H N_q D + \frac{1}{2} \gamma D^2 N_\gamma$	$z_u = (0.1 \sim 0.15) D$

시간 이력을 스프링에 적용할 경우, 관성력이 작용하여 매설관이 실제 지반보다 크게 변형할 수 있으며 또한 스프링에 댐퍼를 연결해주어야 하므로 해석 시 추가적인 불확실성이 발생한다. 반면 정적 시간 이력 해석의 경우, 정적 해석의 간편함은 보존하되 매설관의 3차원적 운동을 모사할 수 있는 큰 장점이 있다. 시간 이력 해석은 파장이 극히 짧아서 매설관에서의 동적 증폭이 발생하는 경우에는 적절하지 않을 수 있다. 하지만 매설관의 매우 작은 직경과 이에 비하여 상대적으로 크기가 큰 터널에서도 동적 증폭이 크지 않은 점을 감안하면 최적의 해석방법인 것으로 판단되어 사용되었다.

Fig. 2에 매설관에 지진 하중이 입사하는 모식도를 나타내었다. 기존의 연구에서 P파는 매설관의 응답에 큰 영향을 미치지 않는다는 것이 규명되었기에(Anastasopoulos et al.,

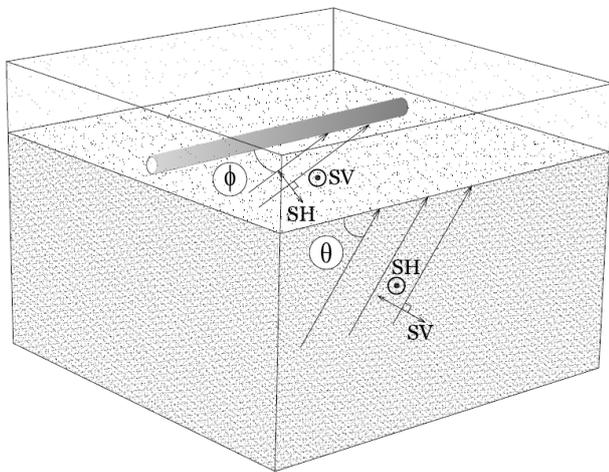


Fig. 2. Incidence angle

2007) 본 연구에서는 P파의 영향은 고려하지 않았으며, S파만을 모사하였다. 해석 시 SH파와 SV파를 모두 사용하였다. 입사방향과 각도의 영향을 평가하기 위해서 다음과 같이 3가지 해석을 수행하였다.

- 1) LM : 수평평면에서 매설관의 축 방향으로 입사
- 2) HM : 수평평면에서 매설관의 축 방향으로부터 45°로 입사
- 3) VM : 수직평면에서 매설관의 축 방향으로부터 45°로 입사

각 해석 사례별로 지진 하중을 1방향(SH 및 SV) 그리고 2방향(SH와 SV 동시 재하)으로 재하 하였다. LM의 경우 SH와 SV파는 휨 변형만을 유발한다. HM의 경우 SH파는 축 변형과 휨 변형을 모두 유발하는 반면 SV파는 휨 변형만을 유발한다. VM의 경우 SH파는 휨 변형만을 유발하며 SV파는 축 변형과 휨 변형을 동시 유발한다. 매설관은 연속 관에 한정하여 해석을 수행하였으며, 국내에서 널리 사용되고 있는 API-5L x65, x80(API, 2000)을 채택하였다. 이의 매설위치 및 물성은 Table 2에 정리하였다. 또한 지반은 점성토로 가정하였으며 이의 물성은 Table 3에 정리하였다. 이에 따라 계산된 각 방향의 스프링 계수와 이에 대응되는 변위를 Table 4에 정리하였다.

해석에는 다양한 조화운동과 7쌍의 계측 지진기록이 사용되었다. 이에 대한 세부정보는 Table 5에 정리하였다. 이격거리가 30km이며 지진 규모가 6.3~6.8인 지진 계측기록을 총 4쌍 선정하였고 이격거리가 15~25km이며 지진 규모가 5.7~6.2인 지진기록을 2쌍, 이격거리가 5~15km이고 지진규모가 4.9~5.2인 지진기록은 1쌍 선정하였다. 선정된 지

Table 2. Material properties of buried pipeline

Pipe type	Diameter (m)	Thickness (mm)	Buried depth (m)	Elastic modulus E (GPa)	Yield strength (MPa)	Poisson ratio (ν)
Steel API-5L X65	0.762	17.5	1.5	200	445	0.3
Steel API-5L X80	1.219	20	1.5	200	625	0.3

Table 3. Soil properties

Soil type	Specific weight (kg/m ³)	Undrained shear strength s_u (kPa)	Average shear wave velocity (m/s)
Medium clay	18	50	200

Table 4. Stiffness of soil springs

Pipe type	Axial direction		Transverse-horizontal direction		Transverse-vertical direction			
	Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)	Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)	Upward		Downward	
					Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)	Stiffness (N/mm/mm)	Disp. (mm)
Steel API-5L X65	31.0	9	2.6	90.5	0.7	282.2	1.5	152.4
Steel API-5L X80	34.8	9	12.23.2	108.8	2.7	316.4	1.5	243.8

Table 5. Recorded motions

Earthquake	Year	Station name	Magnitude	R _{rup} (km)	Vs30 (m/sec)
Big bear	1992	San bernardino	6.46	33.79	326
Chuetsu-oki (Japan)	2007	Sanjo	6.80	27.15	246
Imperial valley	1979	Victoria	6.53	31.92	242
Imperial valley	1979	Holtville post office	5.01	10.58	203
Northridge	1994	LA - S. Vermont Ave	6.69	32.27	302
Westmorland	1981	Niland fire station	5.90	15.29	212
Whittier narrows	1987	Brea - S Flower Av.	5.99	23.49	323

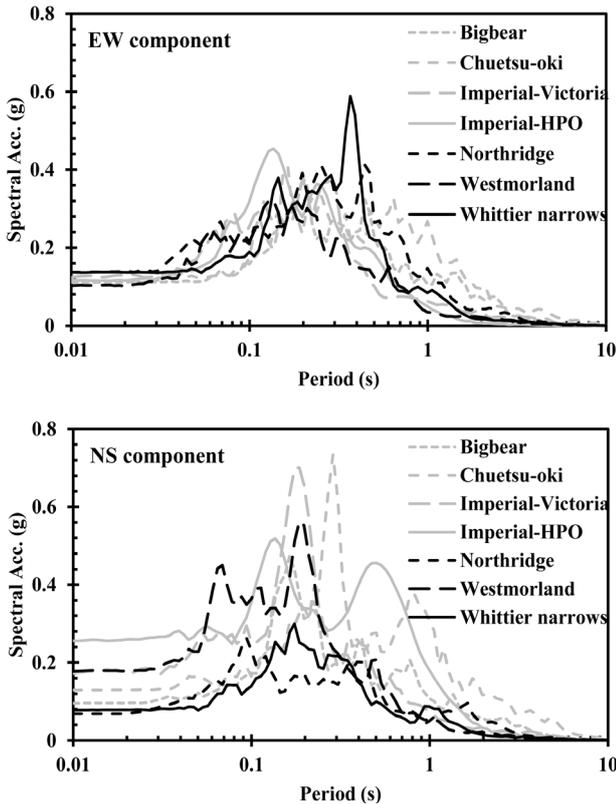


Fig. 3. Response spectra of recorded motions

진파의 가속도-시간 이력을 적분을 통해 변위-시간 이력을 생성하여 입력값으로 사용하였으며 이들에 대한 응답스펙트럼은 Fig. 3에 도시하였다.

계산된 최대 변형률은 ALA(2005)와 ASCE(1984)에서 제시한 허용 변형률로 표준화시켜 나타내었다. Eq. (1)은 가스 배관의 버클링 시작점을 나타내며, 지진파 전파에 의한 허용변형률은 이의 50~100% 값을 적용한다. 본 연구에서는 보수적인 기준을 적용하여 Eq. (1)의 50% 값을 사용하였다.

$$\epsilon_{cr-c} = 0.175 \frac{t}{R} \quad (1)$$

여기서 R 은 매설관의 반지름, t 는 매설관의 두께를 나타

낸다. Table 2에 따라 계산된 허용 변형률은 API 5L x65의 경우 약 0.004이며, API 5L x80의 경우 약 0.003으로 계산되었다.

3. 해석 결과

본 논문에서는 전 절에서 설명된 수치해석 모델과 단순 조화파 및 계측 지진기록을 적용하여 정적 시간 이력해석을 수행하였으며 매설관의 응답을 계산하였다. 아래에는 해석 결과에 대한 분석 결과를 기술하였다.

3.1 조화운동을 적용한 해석

본 절에서는 단순 조화파를 SH파 및 SV파의 형태로 재하여 수행한 해석 결과를 도시하였다. 단순 조화파의 주기를 변수로 고려하였으며 입사방향, 각도 그리고 2방향 재하에 따른 영향을 분석하였다. 수행된 해석 사례는 Table 6에 정리하였다. HM, VM, LM 조건에 대한 해석을 모두 수행하였다. 지진파는 SH파와 SV파를 각각 1방향으로도 재하하였으며, SH 및 SV파를 동시 재하 하는 2방향 해석도 수행하였다.

계산된 변형률은 허용변형률로 정규화하였으며 결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 정리하였다. Fig. 4는 휨 변형만을 유발하는 1방향 재하의 결과를 나타낸다. 도시된 해석은 LM(1SH)과 LM(1SV), HM(1SV), 그리고 VM(1SH)이다. 정규화된 휨 변형률은 입사방향에 무관하게 유사한 것을 확인할 수 있다. LM의 경우 주기가 0.25s인 경우 정규화된 변형률이 최대 0.005(API 5L x65), 0.011(API 5L x80)까지 발생하는 것을 확인할 수 있다. 동일한 조건이지만 SV파를 재하 한 해석 결과를 비교한 결과, SH에 비하여 다소 작게 계산된 것을 확인할 수 있다. 이는 수평 스프링의 강성이 수직 스프링의 그것에 비하여 크기 때문인 것으로 판단된다. 단, 이는 수직 및 수평 방향 최대변위가 동일하다고 가정하였을 경우의 결과이며 이는 SH파로 인한 응답보다 크다는 것을 의미

Table 6. Analytical models of buried pipelines for displacement static time history analysis using harmonic motion

Incidence angle	Model	Model description
$\varnothing = 45^\circ$ $\theta = 0^\circ$	HM (1SH)	SH wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
	HM (1SV)	SV wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
	HM (2)	SH+SV wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
$\varnothing = 0^\circ$ $\theta = 45^\circ$	VM (1SH)	SH wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
	VM (1SV)	SV wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
	VM (2)	SH+SV wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
$\varnothing = 0^\circ$ $\theta = 0^\circ$	LM (1SH)	SH wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
	LM (1SV)	SV wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$
	LM (2)	SH+SV wave, $T_m = 0.25, 0.5, 1, 2, 3s$

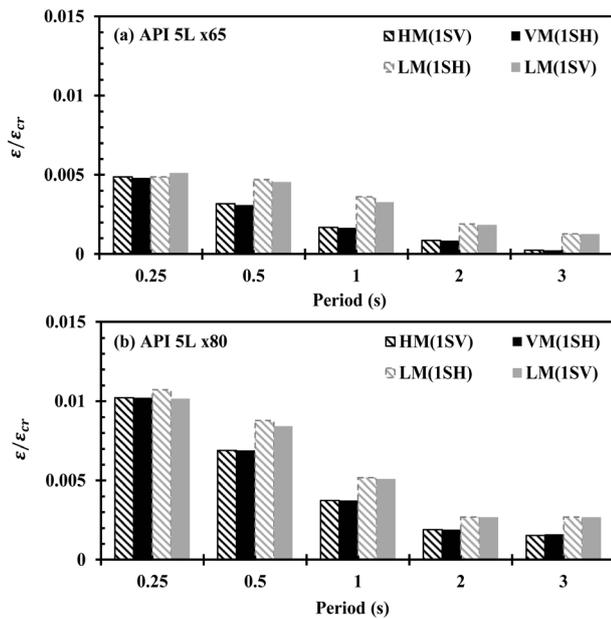


Fig. 4. Calculated normalized bending strain under various harmonic motions

하는 것은 아니다. 하지만 SH파와 SV파를 적용한 결과의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 다음에는 45°의 각도로 수평 방향으로 입사하는 HM(1SV)에 대한 해석 결과를 비교하였다. 입사파가 SV일 경우, 축 방향 변형은 유발되지 않으며 수직 방향 휨 변형을 유발한다. 이와 같은 경우에는 LM에 SV가 입사하는 사례와 변형 모드는 동일하며 도달 시간차만 상이하게 된다. 해석 결과 HM(1SV)는 LM(1SV)에 비하여 작게 계산되었다. 이는 LM이 HM에 비해 도달 시간차가 더 크기 때문이다. 계산된 결과는 조화운동의 주기에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 주기가 작을수록 휨 변형이 크게 증가하기 때문이다.

Fig. 5에는 축 변형과 휨 변형이 동시에 발생하는 1방향 (HM(1SH), VM(1SV)), 비교를 위한 LM(1SH), 그리고 2방향 해석에 대한 결과를 도시하였다. 먼저 1방향 해석 결과를 비교하였다. 수평 방향으로 매설관 축 방향과 45°로 입사

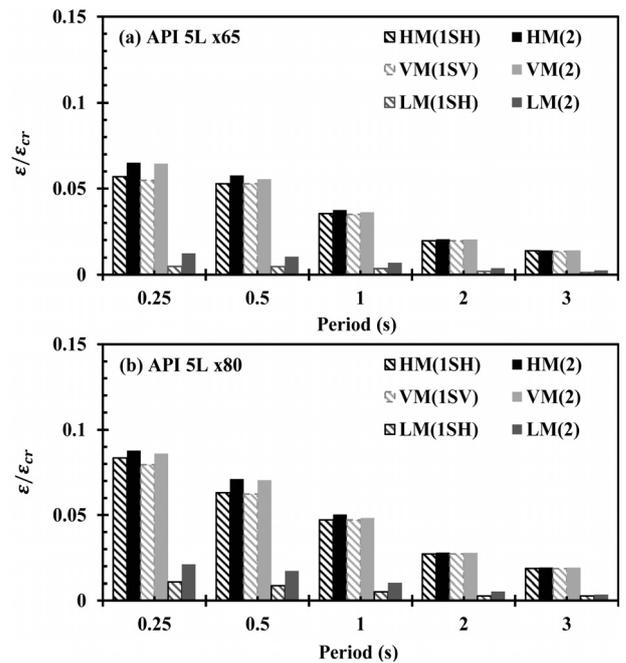


Fig. 5. Calculated normalized combined axial and bending strain under various harmonic motions

하는 HM(1SH) 경우에는 정규화된 변형률이 휨 변형만 발생하는 LM(1SH)에 비하여 약 10배 이상 큰 것으로 나타났다. 조화운동에 따라서 차이가 나기는 하지만 주기가 작은 경우에도 휨 변형은 축 변형에 비하여 매우 작은 것으로 나타났다. 마찬가지로 축 방향과 휨 방향 변형을 유발하는 VM(1SV)는 HM(1SH)와 해석 결과가 유사한 것으로 나타났다. 즉 축 변형 및 휨 변형이 동시에 발생하는 해석에서도 입사 방향은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었으며 해석 시 축 방향 변형이 중요한 것을 확인하였다.

나아가 1방향과 2방향 지진해석의 차이점을 분석하였으며 해석 결과는 Fig. 5에 비교하였다. 비교 결과, 매설관에 45°의 각도로 수평 방향 및 수직 방향으로 2방향 입사하는 HM와 VM의 경우에는 1방향 지진해석과 비교해서 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 차이가 크지 않으며 20%

내외인 것으로 나타났다. 또한 주기가 짧아질수록 1방향 지진해석과 차이가 점차 크게 발생하였다. 이는 주기가 짧아질수록 휨 변형을 일으키는 요소의 영향이 커지기 때문으로 판단된다. 반면 매설관에 종방향으로 입사하는 LM의 경우, 2방향 지진해석의 결과가 1방향 지진해석의 그것에 비해 약 2배가량 크게 계산되었다. 2방향 요소 모두 휨 변형을 일으키므로, 이는 휨 변형을 일으키는 요소가 추가됨에 따라 위와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다.

또한 매설관의 종류에 따라 변형률의 크기 차이만 있을 뿐 같은 경향성을 나타내었다. API 5L x80이 API 5L x65보다 변형률이 다소 작게 계산되었지만, 이를 정규화된 변형률로 표현하였을 시 약 1.2~1.7배로 더 크게 계산되었다. 이는 API 5L x80에 대한 허용 변형률이 더 작기 때문으로서, 같은 규모의 지진 하중이 작용할 시 이에 더 취약하다는 것을 의미한다.

결과 적으로, 1방향 해석 결과와 2방향 해석 결과의 차이가 크지 않은 것을 감안할 경우 대부분의 내진설계에서는 1방향 해석이며 축 변형과 휨 변형을 모두 고려하는 HM(1SH) 또는 VM(1SV)으로 충분할 것으로 판단된다.

3.2 계측 지진기록을 적용한 해석

본 절에서는 선정된 계측 지진기록(Table 5)을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 사례는 Table 7에 정리하였다. 전 절에서 LM의 결과가 작은 것으로 확인되었으므로 HM와 VM에 대한 해석만을 수행하였다. 해석은 1방향 및 2방향에

대해서 모두 수행하였으며 결과는 Fig. 6에 정리하였다. 지진기록은 조화운동과는 다르게 요소(방향)별로 진폭의 크기가 다른 것을 확인할 수 있다. 두 개의 요소 중에서 진폭이 큰 요소를 1, 그리고 작은 요소를 2로 명하였다. 1방향 해석에서는 2개의 기록 중에서 큰 요소를 적용하였다. 2방향 해석에서는 큰 요소 동시 재하(1&1), 큰 요소를 축 방향 변형을 유발하도록 재하(HM의 경우 SH, VM의 경우 SV), 작은 요소를 축 변형을 유발하도록 적용(HM에는 SV, VM에는 SH), 그리고 마지막으로 작은 요소를 동시 재하(2&2) 하는 해석을 수행하였다. HM 조건에서 SH파와 SV파를 각각 1방향으로 재하 하였으며, 해석 결과는 적용한 2종류의 매설관 모두 조화 운동을 재하 한 사례와 같은 경향성을 나타내었다. 휨 변형만을 일으키는 SV파는 축 변형을 추가적으로 일으키는 SH파에 비해 변형률이 현저히 작게 나타났다. SH파는 SV파에 비해 변형률이 약 10배 이상 큰 것으로 계산되었다. 이는 축 변형률이 휨 변형률에 비해 매설관에 현저히 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 VM 조건에서도 동일한 경향성이 분석되었다.

다음으로 45°로 2방향 재하했을 때의 HM와 VM 조건에 대한 결과를 분석하였다. 당연한 결과이지만 HM 조건에서 계측 지진기록의 요소 중 변위 진폭이 큰 1개 요소를 2방향으로 모두 재하 시켰을 경우(1&1), 가장 큰 변형률이 나타났다. 보다 사실적인 HM(1&2)과 HM(2&1)의 해석 결과는 1&1에 비하여 작게 계산되었다. 지진기록별로 차이가 있지만, HM(1&1)과 HM(1&2)은 유사한 것으로 나타났다. 즉 매설

Table 7. Analytical models of buried pipelines for displacement static time history analysis using recorded motion

Incidence angle	Model	Model description
$\varnothing = 45^\circ$ $\theta = 0^\circ$	HM (1SH)	SH wave, Large horizontal component
	HM (1SV)	SV wave, Large horizontal component
	HM (1&1)	SH wave : Large horizontal component SV wave : Large horizontal component
	HM (1&2)	SH wave : Large horizontal component SV wave : Small horizontal component
	HM (2&1)	SH wave : Small horizontal component SV wave : Large horizontal component
	HM (2&2)	SH wave : Small horizontal component SV wave : Small horizontal component
$\varnothing = 0^\circ$ $\theta = 45^\circ$	VM (1SH)	SH wave, Large horizontal component
	VM (1SV)	SV wave, Large horizontal component
	VM (1&1)	SV wave : Large horizontal component SH wave : Large horizontal component
	VM (1&2)	SV wave : Large horizontal component SH wave : Small horizontal component
	VM (2&1)	SV wave : Small horizontal component SH wave : Large horizontal component
	VM (2&2)	SV wave : Small horizontal component SH wave : Small horizontal component

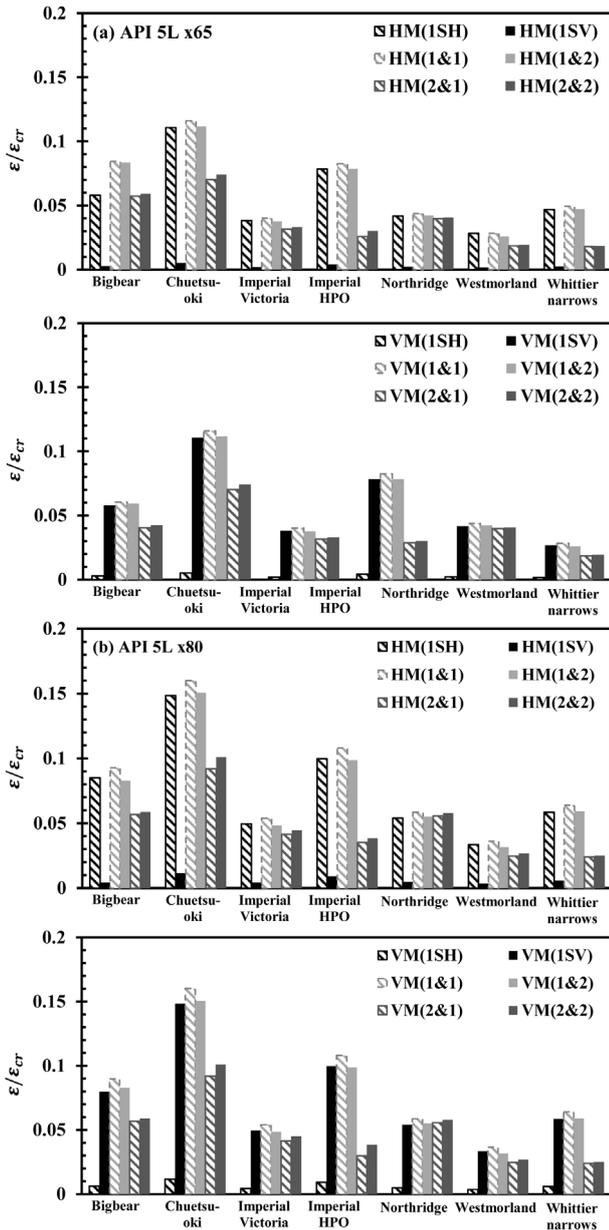


Fig. 6. Calculated normalized combined axial and bending strain under various recorded motions

관의 응답은 축 방향 변형을 유발하는 요소에 지배받는 것을 다시 한 번 확인하였다. VM 조건에서도 HM 조건과 같이 변위 진폭이 큰 요소를 2방향으로 모두 재하 하였을 경우 가장 큰 변형률이 나타났다. 이는 SH와 SV파를 각각 변위 진폭이 작은 요소와 변위 진폭이 큰 요소를 재하 하였을 경우와 큰 차이를 보이지 않았다.

최종적으로 1방향과 2방향 지진해석 결과를 비교하였다. HM 조건에서 SH파로 1방향 재하 한 경우와 SH와 SV파로 각각 변위 진폭이 큰 요소와 작은 요소를 2방향 재하 한 경우를 비교하였다. 이 둘의 계산된 변형률은 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있다. 이는 단순 조화파를 재하 한 결과와 유사하게 SV파의 형태로 입사한 지진파 요소는 매설

관의 변형에 상대적으로 작은 영향을 미치는 휨 변형만을 일으키기 때문으로 판단된다. 또한 VM 조건에서도 같은 경향이 나타났다. SV파로 1방향 재하 한 경우와 SH와 SV파로 각각 변위 진폭이 작은 요소와 큰 요소로 2방향 재하 한 경우 큰 변형률 차이를 보이지 않았다.

또한 관중에 따른 변형률 차이는 조화 운동을 적용한 해석 결과와 유사하게 계산되었다. 같은 지진 하중이 작용하였을 시 API 5L x80이 API 5L x65에 비해 변형률이 더 작게 발생하였으나, 정규화된 허용 변형률은 약 1.3~1.5배 크게 계산되었다.

위의 해석 결과를 요약하면 조화 운동을 재하 한 해석 결과와 유사한 경향을 보였다. 따라서 매설관의 45° 각도로 2방향 재하 시 휨 변형을 일으키는 요소는 전체 변형에 상대적으로 작은 영향을 미치므로, 계측 지진기록의 2개 요소 중 변위 진폭이 큰 요소를 축 변형과 휨 변형을 동시에 일으키는 파의 형태로 1방향 재하 하여 해석하여도 충분할 것으로 판단된다. 또한 입사방향에 따른 영향은 미비하므로, 수평 방향 혹은 수직 방향 중 한 방향으로만 해석하여도 충분할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 매설관의 3차원 수치모델을 구축하여 지진 하중의 입사방향의 영향을 규명하였다. 해석에는 2종류의 매설관에 대하여 다양한 주기의 조화운동과 계측기록이 사용되었다. 본 연구에서 도출한 결과는 다음과 같다.

- (1) 조화 운동을 이용하여 입사방향과 주기의 영향을 평가 하였다. 조화운동은 매설관 축방향(LM), 수평평면과 수직평면에서 매설관과 45°(각각 HM과 VM)로 재하 하였다. 사례별로 계산된 매설관의 축 방향 변형과 휨 변형을 비교하였다. 축 변형과 휨 변형 모두 주기의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 주기가 감소할수록 매설관의 곡률이 증가하며 응답이 증가하는 것으로 나타났다. 휨 변형은 축 변형에 비하여 크기가 매우 작은 것으로 나타났다. 1방향과 2방향 재하의 결과를 비교한 결과, 응답에 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 휨 변형만을 유발하는 요소는 응답에 미치는 영향이 극히 작기 때문에 2방향 재하 시에도 결과가 유사하게 계산된 것이다.
- (2) 다양한 이격 거리, 평균 주기 그리고 규모를 갖는 7쌍의 계측 지진 기록을 선정하여 해석을 수행하였다. 조화운동을 적용한 사례와 같이 입사 방향의 영향은 미비하였으며, 수평 방향으로 매설관에 45°의 각도로 입사하는 SH

파와 수직 방향으로 45°의 각도로 입사하는 SV파가 가장 큰 변형을 유발하였다. 또한 2방향 재하 시 1방향 재하 한 경우와 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 매설관의 지진 응답해석 수행 시 가장 큰 변위 진폭을 갖는 계측 지진기록의 요소를 수직 방향으로 입사할 경우 SV파, 수평 방향으로 입사할 경우 SH파의 형태로 매설관에 45°로 1방향 재하 하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. ALA (2001), Guidelines for the design of buried steel pipe, pp. 1~76.
2. ALA (2005), Seismic guidelines for water pipelines, pp. 1~256.
3. Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Drosos, V., Kourkoulis, R., Georgarakos, T. and Gazetas, G. (2007), Nonlinear response of deep immersed tunnel to strong seismic shaking, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 9, pp. 1067~1090.
4. API (2000), Specification for line pipe, API specification 5L, Vol. 42, pp. 1~155.
5. ASCE (1984), Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems: ASCE, pp. 1~473.
6. Datta, T. K. (1999), Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 192, No. 2-3, pp. 271~284.
7. Elnashai, A. S., Papanikolaou, V. K. and Lee, D. H. (2011), Zeus NL-a system for inelastic analysis of structures, pp. 1~147.
8. Gantes, C. J. and Bouckovalas, G. (2013), Seismic verification of the high pressure natural gas pipeline Komotini-Alexandroupoulis-Kipi in areas of active fault crossings, *Structural Engineering International*, Vol. 23, No. 2, pp. 204~208.
10. Gantes, C. J. and Melissianos, V. (2013), Numerical analysis of buried steel pipeline, 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, Epoka University, Tirana, Albania, pp. 1~11.
11. Hindy, A. and Novak, M. (1979), Earthquake response of underground pipelines, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 7, No. 5, pp. 451~476.
12. Hindy, A. and Novak, M. (1980), Pipeline response to random ground motion, *Journal of the Engineering Mechanics Division-Asce*, Vol. 106, No. 2, pp. 339~360.
13. Joshi, S., Prashant, A., Deb, A. and Jain, S. K. (2011), Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 7, pp. 930~940.
14. Lee, D. H., Kim, B. H., Lee, H. and Kong, J. S. (2009), Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations, *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 5, pp. 1011~1023.
15. Luco, J. and De Barros, F. (1994), Seismic response of a cylindrical shell embedded in a layered viscoelastic half-space. I: Formulation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 23, No. 5, pp. 553~567.
16. Mclaughlin, P. and O'Rourke, M. (2009), Strain in pipe elbows due to wave propagation hazard, *Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, ASCE, pp. 1~11.
17. Nelson, I. and Weidlinger, P. (1979), Dynamic Seismic Analysis of Long Segmented Lifelines, *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme*, Vol. 101, No. 1, pp. 10~20.
18. Newmark, N. M. and Rosenblueth, E. (1971), *Fundamentals of earthquake engineering*, pp. 1~640.
19. Saberi, M., Behnamfar, F. and Vafaeian, M. (2013), A semi-analytical model for estimating seismic behavior of buried steel pipes at bend point under propagating waves, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 1373~1402.
20. Saberi, M., Halabian, A. M. and Vafaian, M. (2011), Numerical analysis of buried steel pipelines under earthquake excitations, 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, pp. 3260~3267.
21. Toprak, S., Koc, A., Cetin, O. and Nacaroglu, E. (2008), Assessment of buried pipeline response to earthquake loading by using GIS, *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering*. Beijing, China, pp. 1~8.
22. Wang, L. R. L. and Cheng, K. M. (1979), Seismic response behavior of buried pipelines, *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme*, Vol. 101, No. 1, pp. 21~30.
23. Wong, K., Datta, S. and Shah, A. (1986), Three-dimensional motion of buried pipeline. I: Analysis, *Journal of engineering mechanics*, Vol. 112, No. 12, pp. 1319~1337.
24. Xie, X., Symans, M. D., O'Rourke, M. J., Abdoun, T. H., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C. and Stewart, H. E. (2011), Numerical modeling of buried HDPE Pipelines subjected to strike-slip faulting, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 1273~1296.