

지반변형률에 의한 매설관의 지진과 거동 해석

Analysis of Buried Pipelines Using Ground Strain Input from Seismic Waves

김문겸* 조우연** 어준*** 이강원****
Kim, Moon Kyum Cho, Woo Yeon Eo, Jun Lee, Kangwon

국문요약

지진과 전파로 인한 매설관에 작용하는 지진하중은 지진특성 및 지반조건에 따른 지반변형률로부터 산정되어야 한다. 그러나, 기존에 사용되고 있는 경험적인 방법에 의해 계산된 지반변형률 모형은 지진 및 지반의 지역적 특수성을 고려할 수 없는 문제점을 내포하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 지진특성 및 지반조건을 반영할 수 있는 수정된 지반변형률모형을 제안하고, 개발된 모형을 매설관로의 지진해석에 지진하중으로 적용하였다. 여기서, 지반변형률을 예측하기 위한 지진파 전파속도는 지반조건을 고려할 수 있도록 파 에너지 분포에 근거한 분산곡선을 제안하여 산정하였다. 이러한 과정을 통해 얻어진 지반변형률 산정방법의 타당성을 파악하기 위해 예측한 지반변형률과 과거 지진으로부터 실측된 지반변형률을 비교하였다. 타당성이 입증된 지반변형률 모형을 매설관의 하중으로 적용하여 지진해석을 실시하였으며, 계산결과는 범용 유한요소해석을 통한 동해석 및 응답변위법에 의한 결과와 비교하였다. 이를 통해 지반변형률 모형을 적용한 매설관 지진해석의 타당성을 검증하였다. 또한, 지진 및 지반환경이 다른 다양한 관의 특성을 반영하기 위해 지진, 지반 및 관의 영향인자에 대한 매개변수 해석이 실시되었으며, 이로써 본 연구의 활용성을 검토하였다.

주요어 : 매설관, 지진파 전파, 지반변형률 모형, 탄성지반 위의 보 이론, 분산곡선, 지진해석

ABSTRACT

In this study, a modified ground strain model is developed to apply an equivalent earthquake load to the seismic analysis of buried pipelines. The ground strain can be obtained using the ratio of a maximum ground velocity to a wave propagation velocity. To reflect soil conditions and seismic characteristics, the wave propagation velocity is evaluated by a proposed dispersion curve based on a wave energy distribution. In order to verify the developed ground strain model, the results of this study are compared with the observed ground strains of earthquake data. The buried pipelines are modeled using the beam theory and the equivalent earthquake loading producing from the modified ground strain model is applied on it. The results of the analyses are compared with those of a dynamic analysis and a response displacement method. Finally, various parametric studies considering different soil conditions, properties of pipelines and seismic loads are performed.

Key words : buried pipelines, wave propagation velocity, ground strain model, beam theory, dispersion curve, seismic analysis

1. 서 론

매설관로는 기능상의 특징으로 인하여 단일

구조물의 형태로 존재하지 않고 광범위한 지역에 분포된 관망체계의 형태를 갖는다. 이러한 특성으로 인해 지진파 전파에 의한 매설관로의 거동특성은 크게 두 가지 측면으로 요약될 수 있다. 첫째는 선상구조물 형태로 인한 특징으로서 지진파가 진행함에 따라 파의 위상은 변화하게 되고, 이러한 위상의 변화는 지반의 상대운동으로 나타나며 선상구조물의 지점별로 서로 다른

* 정회원 · 연세대학교 토목공학과, 교수

** 연세대학교 토목공학과, 박사과정

*** 대림산업(주) 기술연구소 연구개발부, 사원

**** 한국가스공사 연구개발원, 선임연구원

본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시기
그 결과를 게재하겠습니다.

운동 양상을 보인다. 일반 구조물에서는 이런 상이한 지반의 운동이 해석 시 크게 영향을 미치지 않지만, 매설관로는 이러한 지반의 운동에 직접적으로 영향을 받게 된다. 두 번째는 관로가 지중에 매설되어 있으므로 관로 주변을 둘러싸고 있는 지반의 구속과 감쇠효과로 인해 매설관로의 거동해석시 관성력에 의한 영향은 매우 미약하다. 이는 기존의 실험적인 연구⁽¹⁾와 해석적인 연구⁽²⁾에서 확인된 바 있다. 따라서 매설관로의 거동은 구조물의 관성력이 아니라 전파되는 지진파의 위상차(phase difference)로 인한 변형이 지배적 인자로 알려져 있다. 따라서 지진파에 의한 매설관로의 거동해석은 지진하중을 정적하중의 형태로 환산하여 해석하는 연구가 다양하게 시도되었다.

이러한 연구 중 하나로서 O'Rourke 등⁽³⁾은 지반운동의 시간이력에 따른 매설관의 거동 해석을 수행하였으나 지진파에 의해 매설관에 작용하는 하중에 관한 근거를 제시할 수 없는 문제점이 있다. 최근에는 Mavridis 와 Pitalakis⁽⁴⁾ 과 Shakib 등⁽⁵⁾이 지반과 매설관의 상호작용의 영향을, 실제 지진 기록을 바탕으로 한 지반변위와 속도의 시간이력 곡선을 사용하여 해석하였다. 그러나, 이 연구에서는 다양한 지진파 지반특성을 고려한 해석이 될 수 없을 뿐만 아니라 복잡한 관망체계로의 확대해석에도 비효율적인 것으로 판단된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 파 전파 이론에 근거한 Rayleigh파의 분산곡선을 제안함으로써 지진파의 유형 및 지반특성으로부터 산출된 전파속도를 이용하여 지반변형률을 도출하였으며 이를 매설관의 해석모형에 적용한 지진해석을 실시하였다.

2. 지반변형률 산정

지진파가 진앙으로부터 전파되어감에 따라 거리차가 큰 매설관의 임의의 두 지점에서는 위상차로 인한 지반운동을 하게 되어 지반의 상대변위에 따른 축방향 지반변형률이 발생하

게 된다. 이러한 지반변형률은 파의 1차원 운동 이론으로부터, 수평방향 지반의 변위를 u 라고 하면 그 거동은 그 위치와 시간의 함수이며, 파형이 변하지 않는다면 변위벡터는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$u = f(x - Ct) \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, x 는 파 전파방향의 좌표이고 C 는 파 전파속도이다. 식 (1)을 각각 시간과 거리에 따라 미분하면 식 (2a)와 (2b)로 표시된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = f(x - Ct), \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f''(x - Ct) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -Cf'(x - Ct), \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 f''(x - Ct) \quad (2b)$$

식 (2a)와 (2b)에서 다음과 같은 식 (3)을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{C} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{V}{C}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{a}{C^2} \quad (3)$$

식 (3)에 나타난 바와 같이 지진 발생시 파 전파에 의해 발생하는 지반변형은 파 전파속도에 반비례하고 지반속도에 비례하므로 지반에서의 최대 축방향 변형률 $(\epsilon_g)_{\max}$ 은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$(\epsilon_g)_{\max} = \frac{V_{\max}}{C} \quad (4)$$

여기서 V_{\max} 는 축방향 최대 지반속도이고, C 는 매설관 길이 방향의 지진파 전파속도이다. 따라서 지진파 전파에 의해 발생하는 지반변형률을 예측하기 위해서는 최대 지반속도와 지진파 전파속도를 산정하는 것이 선행되어야 한다.

지진파 전파에 의해 발생한 최대 지반속도는 일반적으로 실제 지진기록으로부터 구하거나, 또는 Newmark⁽⁶⁾에 의해 제안된 값을 사용하여

기지의 최대 지반가속도로부터 최대 지반속도를 구할 수 있으나, 지진이 발생한 지역의 지진 규모와 지반조건에 따라 그 사용이 제한된다. 따라서 본 연구에서는 일본에서 발생한 총 350개의 지진기록을 바탕으로 Kamiyama 등⁽⁷⁾이 제안한 식 (5)와 같은 지진규모, 진원깊이, 지반조건 등을 반영할 수 있는 경험식을 사용하여 최대 지반속도를 산정하였다.

$$V_{\max}(M, D) = 2.879 \times 10^{0.153M} \times AMP, \quad (D \leq 10^{0.014 + 0.218M}) \quad (5a)$$

$$V_{\max}(M, D) = 3.036 \times 10^{0.511M} \times D^{-1.64} \times AMP, \quad (D > 10^{0.014 + 0.218M}) \quad (5b)$$

여기서, V_{\max} 는 최대 지반속도로서 단위는 cm/s 이고, M 은 일본기상청(JMA) 진도이며, D 는 진원깊이로 km 단위를 사용한다. 또한, 식 (5)에서 AMP 는 지반조건에 따른 증가계수로서 표준관입시험치(N치)로부터 구한다.⁽⁷⁾

지진파 전파에 의한 매설관이 위치한 지점의 지반운동은 지진규모, 진원깊이와 진앙거리의 비에 따라 체적파 또는 표면파에 의해 지배적인 영향을 받으므로 지진파의 전파속도는 지진특성과 지반특성에 적합하게 산정되어야 한다. 즉, 지진파 전파에 의한 지반변형률을 예측하기 위해서는 우선 대상 지반의 운동에 지배적인 영향을 미치는 파의 유형을 구분해야 한다. 일반적으로 식 (6)을 기준으로 하면 대상 구조물이 표면파에 의하고 그 외의 경우는 체적파의 영향을 주로 받는다고 판단할 수 있다.⁽⁸⁾

$$R/D > 1.5, \quad M > 6.0 \quad (6a)$$

$$R/D > 6.0, \quad 6.0 > M \geq 5.0 \quad (6b)$$

여기서, R 은 진앙거리, D 는 진원깊이이다. 일반적으로 매설관은 매설깊이가 깊지 않으므로 그 거동이 표면파에 의해 지배를 받는다. 이에 대해 Tamura 등⁽⁹⁾은 진앙거리가 증가함에 따른 지반변형률의 감소는 지반의 최대 가속도의 감

소보다 훨씬 작다는 사실을 밝혀 냈다. 이러한 현상은 지반변형률이 체적파보다 저주파의 표면파에 의해 지배적인 영향을 받는다는 것을 나타내며 Hanks⁽¹⁰⁾에 의해 관측된 지반변위에서도 같은 결과를 보인다.

지반변형률에 대한 유효전파 속도는 실제 지반에서 주파수 또는 파장의 함수로 표현되는 표면파를 모형화하여 도출해 낼 수 있다. 표면파 중 Love 파는 면외(anti-plane) 거동을 하게 되며 이는 관의 휨 변형을 발생시키게 된다. 지진파에 의한 관의 휨변형은 상대적으로 작다고 알려져 있으므로 휨에 대한 영향은 무시하는 것이 일반적이다.⁽³⁾ 따라서, 지진파 전파에 의해 발생하는 지반운동은 Rayleigh 파에 지배된다고 볼 수 있다. 면내(in-plane) 거동을 하는 Rayleigh 파에 의한 지반운동의 변위는 수직성분과 수평성분이 있다. 그러나, 수직성분 역시 매설관의 휨 변형을 발생시키므로 고려하지 않고, 오직 Rayleigh파의 수평성분이 매설관의 축방향 거동에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

이러한 Rayleigh 파의 전파속도를 산출하기 위해 균질, 탄성매체로서의 반무한체를 고려하면 식 (7)과 같은 Rayleigh파의 특성방정식으로부터 Rayleigh파의 전파속도(C_R)는 전단파 속도(V_s)와 포아송비(ν)의 항으로 식 (8)와 같이 표현할 수 있다.

$$\left(2 - \frac{C_R^2}{V_s^2}\right)^2 - 4\left(1 - \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{C_R^2}{V_s^2}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{C_R^2}{V_s^2}\right)^{1/2} = 0 \quad (7)$$

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} V_s \quad (8)$$

그러나, 실제 지반조건으로서 다층 조건의 반무한 지반의 경우 Rayleigh파의 전파속도는 매질이 상이한 층에서 변형되기 때문에 주파수 또는 파장에 따라 변화하는 분산특성을 갖게 된다. 이러한 경우 Rayleigh파의 전파속도는 각 경계면에서 변위와 응력의 경계조건을 파악하기가 곤란하므로 이론적으로 계산하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 다층 지반에

대한 Rayleigh파의 분산곡선은 그림 1에서와 같은 반무한 층 위에 균질한 층이 있는 지반에 대한 정규화된 분산곡선으로부터 그림 1과 같이 근사적인 방법으로 다층에 대한 분산곡선을 제안한다. 그림 1의 (a)는 전단파 속도(V_s)가 1.0인 균질한 반무한 층에서의 Rayleigh파에 대한 전파속도를 나타내며 그림 1의 (b)는 전단파 속도(V_s)가 2.0인 반무한 층 위에 전단파 속도가 1.0이고 두께가 1인 균질한 층으로 구성된 지반에 대한 분산곡선을 나타낸다. 일반적으로 그림 2에서와 같이 Rayleigh파는 깊이가 증가함에 따라 진폭이 지수함수적인 감소를 보이며, 지표면 아래로 한 파장이내에서 파 에너지의 대부분이 존재하므로 상층 지반의 두께(H)보다 더 짧은 파장에서 전파속도(C_R)는 상층 지반에서의 전파속도와 같다. 이에 반해 $30H$ 이상의 긴 파장에서 전파속도는 에너지의 대부분이 반무한 층에 존재하므로 반무한 층에서의 전파속도의 영향을 지배적으로 받게 된다. 또한, 파장이 $H \sim 30H$ 인 천이영역에서 전파속도는 두 층 모

두에 영향을 받는다. 따라서 그림 1(b)에서 주어진 바와 같은 지반에 대한 분산곡선은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C_{ph} &= 0.875 V_H & \lambda \geq 30H \\
 &= \frac{0.875 V_H - \alpha_v V_L}{\log 30} (\log \lambda - \log H) \\
 &\quad + \alpha_v V_L & H \leq \lambda \leq 30H \\
 &= \alpha_v V_L & \lambda \leq H
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 α_v 는 균질 반무한 층에서 Rayleigh파의 전파속도에 대한 전단파속도의 비이고, V_H 는 반무한 층에서의 전단파속도, V_L 은 표층에서의 전단파속도이다. 식 (9)에서 사용한 경계값은 Mooney 등⁽¹¹⁾에 의해 제안된 값을 사용하였다. 우선 식 (9)를 통해 얻어진 분산곡선의 타당성을 검토하기 위해서 Shinozuka 등⁽²⁾에 의한 분산곡선과 비교를 수행하였다. 분산곡선 산정에 사용한 지반 단면의 물성은 표 1과 같고 이에

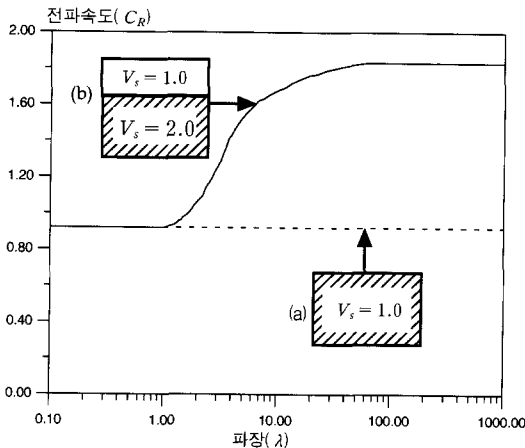


그림 1 Rayleigh파의 분산곡선

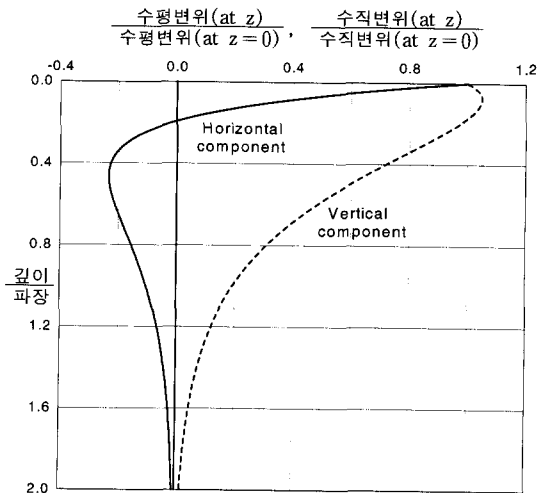


그림 2 깊이별 Rayleigh파의 에너지 분포곡선

표 1 분산곡선 산정에 사용한 지반특성치

지반 종류	지 반 물 성			
	두께 (m)	단위중량 (kgf/cm^3)	전단파 속도 (m/s)	압축파 속도 (m/s)
표층	30	1.50×10^{-3}	150	780
반무한층	∞	2.65×10^{-3}	692	1695

다른 분산곡선은 그림 3와 같다. 그림 3에서 보는 바와 같이 두 분산곡선의 경계값과 파장에 따라 전파속도가 증가하는 경향이 잘 일치함을 알 수 있다. 두 번째로 지반변형률 산정과정의 타당성을 검토하기 위해 예측된 지반변형률과 표 2에 주어진 지반특성치를 갖는 일본 동경대학교 내 Chiba 부지에서 1983년에서 1988년까지 발생한 지진으로부터 관측한 지반변형률과 비교를 실시하였다. 그 결과는 그림 4에 주어진 바와 같이 실선상의 관측값은 지반변형률의 예측값과 동일함을 의미하며, 점선상의 값은 두 값의 차이가 2배일 때를 의미한다. 그림 4에서 예측된 지반변형률과 관측된 지반변형률은 비교적 잘 일치함을 알 수 있었고 지반변형률 산출 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

3. 매설관의 해석모형

매설관의 해석모형은 그림 5와 같이 연속적인 축방향과 횡방향 지반 스프링으로 둘러싸인

관 세그먼트로 모형화 할 수 있다.⁽¹³⁾ 관 세그먼트는 n_s 로, 각 관 세그먼트당 요소의 수는 n_e 로 표시되며 각 요소는 단부에 두 개의 절점을 가지는 보 요소로 이산화 된다. 관 세그먼트의 길이가 L 이라면 각 요소의 길이는 $l=L/n_e$ 로 표시되고 관 세그먼트 사이에 있는 연결부는 축방향과 회전 스프링으로 구성되며 전체 모형의 길이는 $L_{pm} = n_s \times L$ 이다. 지진파 파장이 일반적으로 매설관로 모형의 길이 L_{pm} 보다 훨씬 크므로 지진파 전파로 인해 발생한 지반변형률로부터 매설관의 축방향을 따라 발생하는 수평 지반변위 $u_g(x)$ 는 선형함수로 가정한다. 따라서 수평 지반변위 $u_g(x)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_g(x) = \pm \epsilon_g \cdot (x - L_{pm}/2) \quad (10)$$

여기서 ϵ_g 는 수평 지반변형률이다. 식 (10)에서 (+)는 인장 수평 지반변형률을, (-)는 압축 수평 지반변형률을 의미한다. 식 (10)에 의해서 산

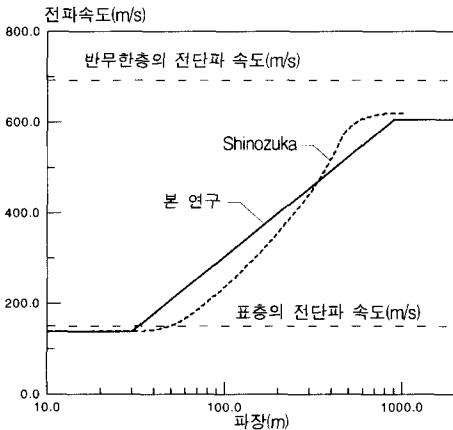


그림 3 Rayleigh파 분산곡선의 비교

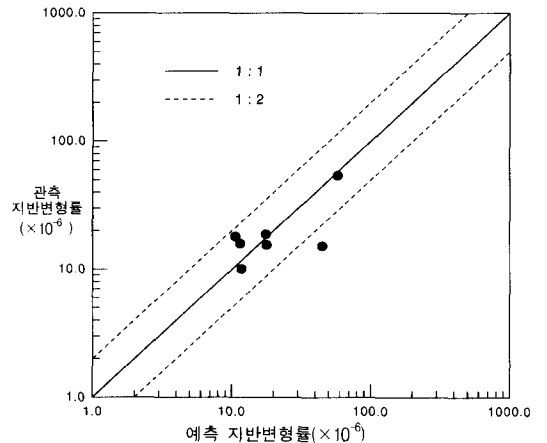


그림 4 관측지반변형률과 예측지반변형률 비교

표 2 Chiba 부지의 지반특성치

압축파 속도 (m/s)	전단파 속도 (m/s)	지반의 두께 (m)	지반의 깊이 (m)
320	140	5	5
550	320	10	15
1670	320	9	24
1670	420	27	41
5000	2800	∞	∞

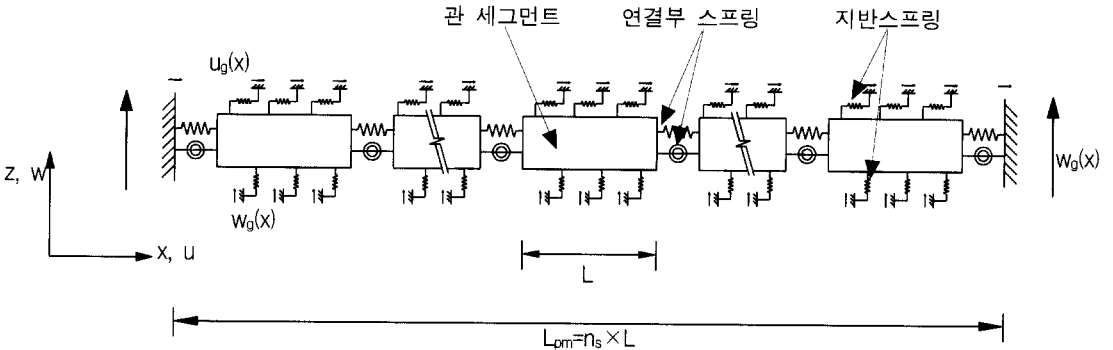


그림 5 매설관로의 해석모형

출된 지반변위를 지반과 연결부의 비선형성을 고려할 수 있는 매설관의 해석모형에 지진하중으로 적용하여 응답을 산출한다.

4. 수치해석 및 분석

4.1 지진해석의 적용성 검증

제안된 지반변형률 모형을 하중으로 적용하여 매설관로의 응답을 산정하고, 이를 범용 구조해석 프로그램을 사용하여 얻어진 동적 응답과 응답변위법을 통하여 구한 이론치와 비교하였다. 해석 대상은 그림 6에서와 같이 전단파 속도가 500m/s인 기반암과 전단파 속도가 90m/s이고, 두께가 30m인 표층으로 구성된 지반에 위치한 매설깊이가 1.5m인 매설관로에 대한 해석을 수행하였다. 매설관의 동적 해석은 지진파

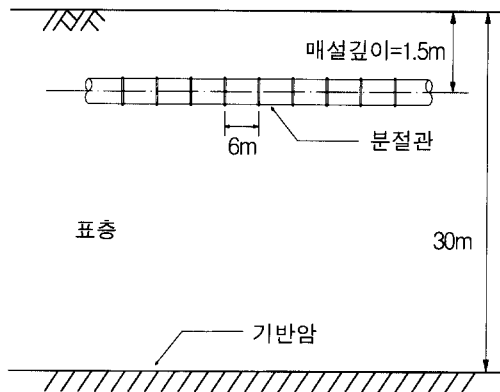


그림 6 매설관과 지반의 해석모형

전파로 인해 발생하는 매설관에 작용하는 하중을 그림 7에서 보는 바와 같이 전파속도가 60m/s인 sine파 형태로 고려하였으며 파장은 해석모형의 전체길이와 동일하게 하여 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 또한, 동적 해석 수행시 지진파의 전파효과를 반영할 수 있도록 하기 위해서 지반운동의 위상차를 고려한 하중을 매설관 모형에 적용하도록 모형화하였다. 그림 7에서 l_k 는 절점 1에서 절점 k 까지의 거리, C 는 지진파의 전파속도이며, 해석에 사용한 시간간격 Δt 는 0.01 초로 하여 지진파가

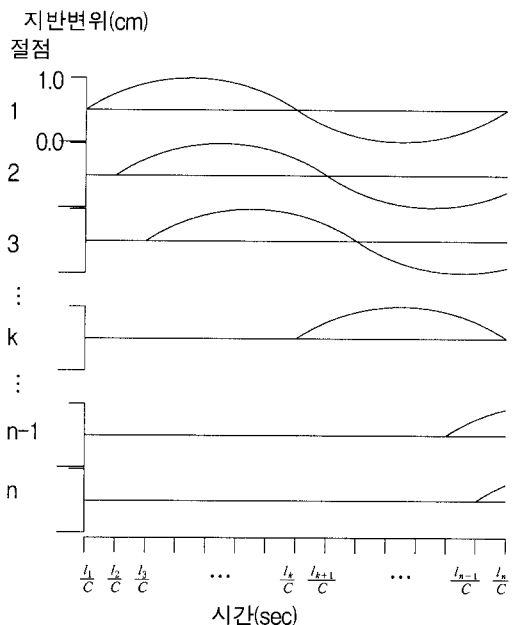


그림 7 위상차를 고려한 하중입력 모형

해석모형의 마지막 절점 n에 도달하는 시간까지의 응답을 대상으로 하였다. 또한, 응답변위법에 의한 매설관 연결부의 변위는 동적 해석에서 이용한 지반변위의 시간이력으로부터 얻어진 최대 지반변형률을 하중으로 적용함으로써 산출하였다. 이로부터 지반변위의 시간이력을 하중으로 적용한 동적 해석과 동일한 지반운동으로 적용하중을 도출할 수 있다. 이러한 과정을 통해 산정된 지반변형률을 하중으로 적용한 지진해석을 실시하여 매설관로의 응답을 구하였다. 지진해석에 사용한 관의 제원과 지반의 물성은 각각 표 3과 표 4에 정리하였고, 여기서 사용된 지반의 비선형 하중-변위관계는 그림 8

과 같이 ASCE committee 중 하나인 Gas and Liquid Fuel Lifelines에서 제안된 완전 탄소성 모형으로 가정하였다.⁽¹⁴⁾

각 해석결과를 비교하기 위해서 매설관에 인장 지반변형률에 의한 하중이 작용할 때 지반변형률의 변화에 따른 연결부 최대 상대변위를 도출해 내었고, 그 결과는 그림 9와 같다. 그림 9에서 본 연구의 해석결과와 상용 프로그램을 사용한 동적 해석결과와 지반변형률(0.0005) 수준을 제외(지진 발생 이외 상시하중에도 발생할 수 있는 변형수준)하고는 최대 약 20%의 차이를 보인다. 이러한 연결부 상대변위의 차이는 동적 지진해석을 수행할 때 지반변위의 시간이력곡선으로부터 구한 최대 지반변형률 값을 하중으로 사용하기 때문에 발생한 것으로 사료되며 본 해석이 안전측에 해당함을 보여준다. 또한 동적 해석의 경우 전체 계 방정식에서 관의 질량으로 인한 저항력이 추가되므로 연결부 상대변위의 감소가 발생한 것으로 판단된다. 응답변위법에 의한 해석결과와는 지반변형률이 큰 경우에는 잘 일치하나, 지반변형률이 작은 경우에는 약 10%의 차이를 보인다. 이는 응답변위법에 의한 해석이 구조물과 지반의 접촉면이 완전 부착상태라는 가정에 근거한 선형 탄성해석이며 연결부의 강성을 고려하지 않은 해석이기 때문에 나타난 것으로 사료된다. 표 5에 알 수 있듯이 연결부 강성을 감소시키면 응답변위

표 3 해석에 사용한 관의 제원

탄성계수 (kgf/cm^2)	1.00×10^6
두께 (cm)	2.16
공칭지름 (cm)	76.20
단면적 (cm^2)	537.00
단면 2차 모멘트 (cm^4)	42.03×10^2
세그먼트의 길이 (m)	6.00

표 4 관이 매설된 지반의 물성

표층의 단위중량 (kgf/cm^3)	0.17×10^2
표층의 두께 (m)	30
표층의 전단파 속도 (m/s)	90
반무한 층의 전단파 속도 (m/s)	500
표층의 전단탄성계수 (kgf/cm^2)	140

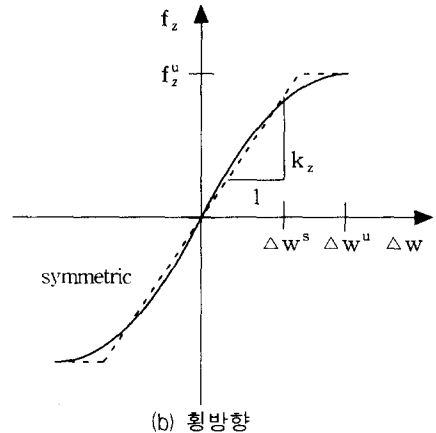
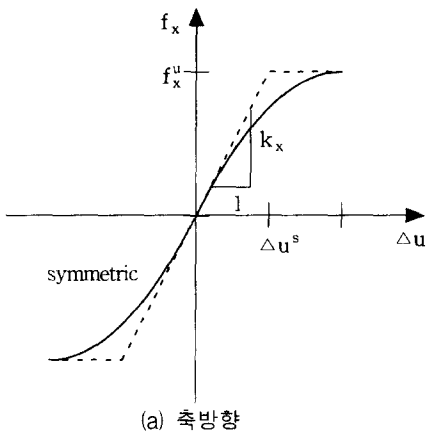


그림 8 지반위 하중-변위 관계곡선

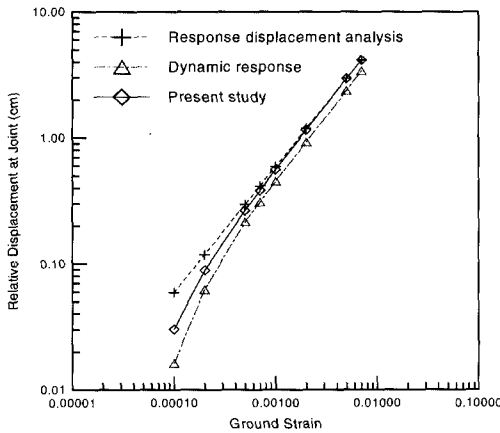


그림 9 해석방법별 연결부 상대변위의 비교

표 5 응답변위법과 지진해석의 응답 비교

지반 변형률 ($\times 10^{-4}$)	응답 변위법	연결부의 상대변위(cm)	
		본 연구	
		$AK_j=6.8 \times 10^7$ (kgf/cm)	$AK_j=2.7 \times 10^9$ (kgf/cm)
1.0	0.059	0.030	0.059
2.0	0.118	0.089	0.119
5.0	0.296	0.266	0.297
7.0	0.415	0.383	0.416
10.0	0.593	0.561	0.595
20.0	1.184	1.157	1.195
50.0	2.962	2.948	2.995
70.0	4.145	4.412	4.195

법과의 오차를 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, 제안된 해석방법은 매설관 연결부에서의 압축거동에 대한 해석이 수행될 수 있으나, 응답변위법은 매설관 연결부에서의 인장거동에 대한 해석만이 가능하고 압축거동에 대한 해석을 수행할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서, 제시된 방법은 다양한 지진과 지반 조건을 고려할 수 있고 동적해석에서 지적되고 있는 비효율성을 극복할 수 있으며 관망체계로의 확대해석에도 유용하게 적용될 수 있다.

4.2 지진파 전파에 의한 매설관의 수치해석

개발된 해석 프로그램을 사용하여 지진파 전

파로 인한 매설관로의 응답에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 다양한 지진해석을 실시하여 응답특성을 고찰하였다.^{(15),(16)} 지진해석에 사용한 관의 제원 및 물성은 표 6에 정리하였다.

매설관 구조계에서 관경이 변화한다는 것은 다른 조건이 동일하다고 가정한다면 매설관 구조계의 강성이 변하는 것으로 말할 수 있다. 이러한 양상이 매설관 응답에 미치는 영향을 고찰한 결과는 그림 10에 주어진 바와 같다. 관경은 45cm, 80cm, 130cm 로 증가시키면서 매설관 응답 양상을 고찰하였다.

그림 10(a)에서는 관경이 증가함에 따라 연결부의 인장 변위가 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이러한 양상은 관경의 증가가 관 본체 강성의 증가로 이어져 관 본체에 발생하는 변형률 크기를 감소시키는 반면 연결부 강성에는 무관하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 한편, 그림 10(a)에서 고수준의 지반변형률에서 연결부의 인장 변위는 관경변화에 따른 영향이 작지만, 저수준의 지반변형률에서는 그 영향이 크게 나타난다. 이는 관 본체 강성증가로 인한 관의 변형률은 지반변형률 수준과 무관하지만, 지반변형률이 커짐에 따라 관경의 크기에 상관없이 연결부의 인장 변위는 현격히 증가하므로 연결부의 인장 변위가 작게 발생하는 저수준의 지반변형률에서 관경 크기의 영향이 상대적으로

표 6 지진해석에 필요한 관과 지반의 입력치

내 용		입력치	
관 체 원	관 경	D	80 cm
	두께	t	2 cm
	탄성계수	E	1.00×10^6 kgf/cm ²
	항복응력	σ_y	3×10^3 kgf/cm ²
	관 세그먼트 수	N	10개
	세그먼트당 요소 수	n_e	10개
연 결 부	연결부 축방향 강성	AK_j	6.84×10^7 kgf/cm
	연결부 변위 탄성한계	u_j^s	0.50×10^{-3} cm
	지 반 물 성	단위 중량	γ
상대 밀도		D_r	50%
축방향 강성		k_x	280 kgf/cm ²
축방향 극한 저항력	f_x^u	51.20 kgf/cm	

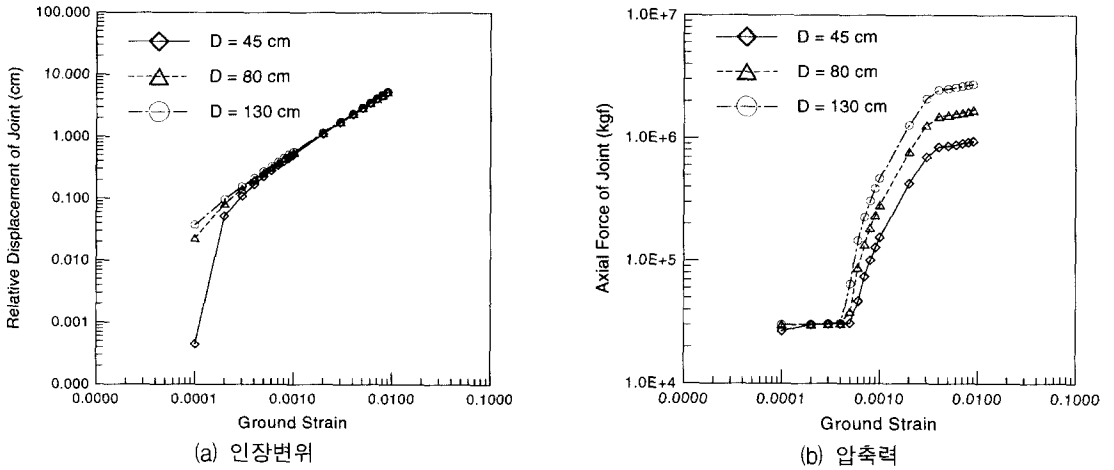


그림 10 지반변형률 변화에 따른 관경별 연결부 응답

크게 나타나는 것으로 사료된다.

분절관이 압축 지반변형률에 의한 영향을 받을 경우 연결부 상대변위만으로는 매설관의 파괴 거동을 파악할 수 없다. 왜냐하면 연결부에서는 인접하는 관 세그먼트가 서로 접촉한 이후 변위 증가는 발생하지 않으며, 단지 연결부에 작용하는 압축력만을 증가시킨다. 그러므로 분절관이 압축 지반변형률의 영향을 받는 경우 연결부에서 발생하는 압축력을 응력으로 환산해서 관 본체의 허용응력과 비교하면 압축파괴 기준을 제시할 수 있다. 그림 10(b)에서 볼 수 있듯이 연결부의 압축력은 관경 변화에 의한 영향이 지반변형률의 수준에 비례하여 증가하다가 일정한 수준에 도달하면 증가폭은 매우 완만하게 된다. 분절관 연결부의 압축 거동은 인장 거동과는 달리 허용 최대 변위에 도달하여도 직접적으로 연결부의 파괴로 이어지지 않고 관 본체의 강성에 의해서 저항하다가 본체의 강성이 압축력에 저항할 수 없는 단계에 이르면 파괴가 발생한다. 따라서 그림 10(b)에서와 같이 연결부의 압축력은 인접한 관 세그먼트가 접촉하기 전까지 연결부 강성의 영향으로 인해 관경별로 미소한 차이를 보이며 증가하고, 이후에는 연결부 강성과 무관하게 관계없이 오직 관 본체의 강성에 영향을 받아 관경별로 서로 다른 기울기를 가지는 비선형 거동특성을

나타내는 것으로 판단된다.

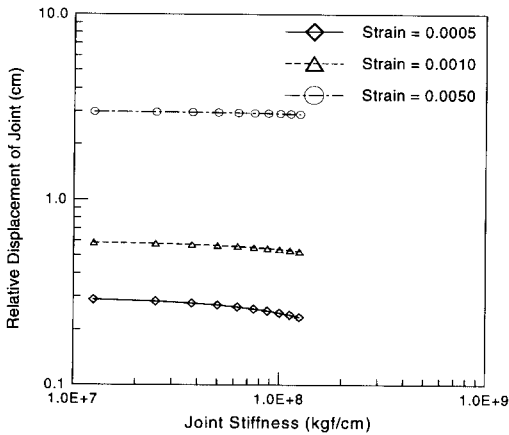
분절관의 지진응답 해석에서는 관 본체의 특성뿐만 아니라, 연결부의 역학적 성질을 파악하는 것이 매우 중요하다. 이러한 연결부의 물성변화에 대한 지진응답 특성을 파악하기 위해 연결부 축방향 강성은 탄성조건하에서 $1.25 \times 10^7 \text{ kgf/cm}$ 에서 $1.25 \times 10^8 \text{ kgf/cm}$ 의 범위에서 고려되었으며, 비탄성 구간 역시 이에 비례하여 고려되었다. 또한, 다양한 지진하중조건에 따른 응답 양상을 고찰하기 위해 지반변형률 수준을 0.0005, 0.0010 및 0.0050 의 세 가지 수준으로 구분하여 응답을 구하였다.

해석결과는 그림 11에 도시한 바와 같다. 그림 11(a)에서 볼 수 있듯이 연결부 강성증가에 따라 인장 변위는 점진적으로 감소하며, 저수준의 지반변형률에서는 이런 현상이 상대적으로 크게 나타난다. 이는 연결부의 강성증가로 인해 인장 변위에 저항하는 매설관 구조계의 저항능력이 커지기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한, 저수준의 지반변형률 상태에서는 연결부의 초기 강성에 대한 영향이 크게 나타나므로 연결부 강성증가에 따른 인장 변위의 감소폭도 커지게 된다. 이러한 연결부 강성의 증가는 연결부의 인장 변위에 대해 저항할뿐 아니라 관 본체의 응력증가를 발생시킨다.

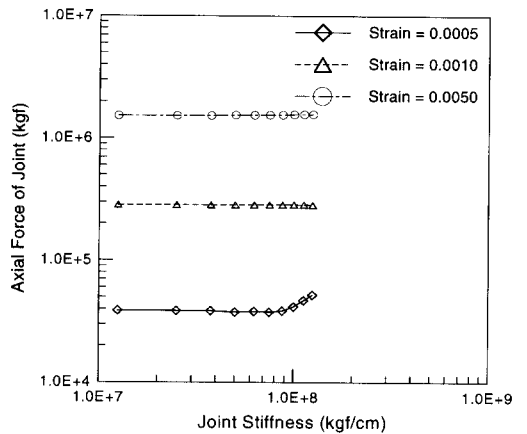
연결부의 압축력은 그림 11(b)와 같이 고수준의

지반변형률에서는 연결부의 강성에 무관하게 일정한 크기를 유지한다. 이는 연결부에서 허용 최대 변위를 초과하면서 인접한 관 세그먼트가 접촉하게 되므로 연결부 압축력이 연결부 강성보다 관 본체의 강성에 지배되기 때문이다. 반면에 저수준의 지반변형률에서는 연결부 강성이 증가함에 따라 압축력도 완만하게 증가하는 양상을 나타낸다. 이러한 양상은 연결부에서 발생하는 상대변위가 작아서 인접한 관 세그먼트가 접촉하지 않게 되고, 이로 인해 연결부 압축력이 오직 연결부 강성에 의해 결정되기 때문으로 사료된다.

지진특성에 의해 변화하는 매설관의 거동을 고찰하기 위해 지진규모에 따라 진원깊이가 매우 낮은 천발지진에서부터 심층부에서 그 에너지가 시작되는 심발지진에 걸쳐 매설관의 응답에 미치는 영향을 살펴보았다. 지반속도 산출을 위한 기본 자료로서 지진규모는 JMA 지진규모 $M=4$, $M=5$ 및 $M=6$ 인 경우에 대해 검토하였고 지진파 전파속도는 지진파의 유형에 무관하게 $C=200\text{m/s}$ 로 가정하였다. 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 진원깊이가 깊어짐에 따라 연결부의 인장 변위가 대수적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 동일한 지진규모하에 진원

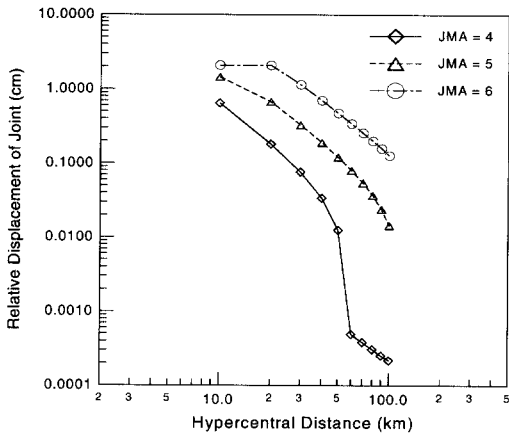


(a) 인장변위

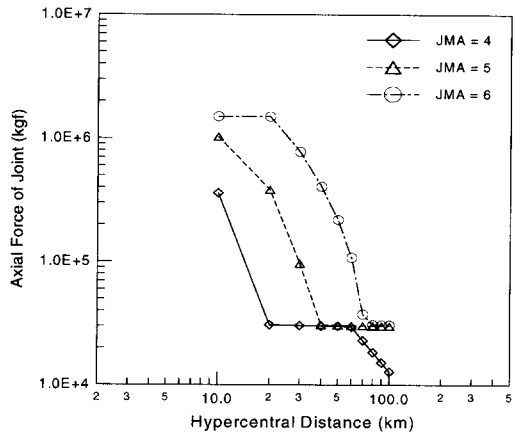


(b) 압축력

그림 11 연결부 강성 변화에 따른 지반변형률 수준별 연결부 응답



(a) 인장변위



(b) 압축력

그림 12 진원깊이 변화에 따른 지진규모별 연결부 응답

이 깊어짐에 따라 매설관이 위치한 지반의 운동에 미치는 영향이 감소하고, 이로 인해 지반의 운동속도도 감소하기 때문이다. 또한, 그림 12(a)에서는 지진규모가 증가함에 따라 동일한 진원 깊이에서 연결부의 인장 변위가 증가하는 양상을 보인다. 이는 지진규모가 커짐에 따라 동일한 진원 깊이에서 발생한 지진파는 매설관 주변 지반의 운동속도를 증가시켜, 매설관 주변에 유도되는 지반변형률의 크기가 커지기 때문이다.

연결부 압축력은 그림 12(b)에서 볼 수 있듯이 천발지진의 경우 연결부의 인접한 관 세그먼트가 접촉한 상태이므로 관 본체의 강성에 영향을 받아 급격한 감소를 보이고 이후에는 연결부 강성의 영향을 받아 상대적으로 완만히 감소하는 경향을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진과 지반특성을 고려하여 지진파 전파로 인해 발생하는 지반변형률을 산정하였고, 이를 매설관로의 지진해석 모형에 하중으로 적용할 수 있는 개선된 해석방법을 제시하였다. 지진해석으로부터 얻어진 매설관의 응답은 범용 유한요소해석을 이용한 동적 해석과 응답변위법에서 얻어진 응답과 비교하였다. 또한, 다양한 지반 및 지진환경과 관 특성을 반영하기 위해 지반조건, 지진파의 전파특성 및 관의 영향인자를 변화시키면서 매개변수 해석을 실시하였다. 이러한 과정을 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. Rayleigh파의 에너지 분포특성에 근거하여 제안된 다층 지반에 대한 근사적인 분산곡선을 Shinozuka 등에 의한 분산곡선과 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었으며, 이로써 다층 지반에 대한 Rayleigh파의 전파속도를 효율적으로 산정할 수 있음을 보였다.
2. 예측한 지반변형률을 관측된 지반변형률과 비교한 결과 잘 일치하는 결과를 얻었다. 따라서 지반변형률 산정과정의 타당성을 입증

하였고, 지진과 지반특성을 고려할 수 있는 지진하중 산정방법의 타당성을 확인하였다.

3. 타당성이 확인된 지진하중 산정과정을 매설관 모형에 적용하였고 범용 프로그램에 의한 동적 응답 및 응답 변위법에 의한 응답과 비교함으로써 본 연구에서 제안한 지진해석 방법의 타당성을 입증할 수 있었다. 이로써, 본 연구가 하중산정 및 기하 형상의 복잡성으로 문제점으로 제시되었던 동적해석의 단점을 보완할 수 있으므로 관망의 지진해석으로 확장 가능성을 확인할 수 있었다.
4. 동일한 수준의 지반변형률에서 매설관로는 관경이 증가함에 따라 연결부의 인장 변위와 압축력은 증가하였다. 또한 연결부 강성 증가는 연결부의 인장 변위를 감소시키는 반면 관 본체에서의 변형률을 증가시켰다. 따라서 지진 수준에 따른 연결부 및 관 본체의 강성비 평가가 필요하다는 결론을 얻었다. 또한, 지진규모의 증가 및 진원깊이의 감소가 매설관 연결부 변위를 증가시키는 현상을 확인할 수 있었다. 이로써 지반조건 및 지진파 전파 특성을 반영한 본 연구방법이 다양한 지반 및 지진환경에 적용할 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 지진재해 대응기술 개발사업(97-N2-01-01-A-02)으로 한국가스공사와 협조하에 수행된 내용의 일부이며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Ariman, T. and Hamada, N., "Experimental investigations on seismic behavior of buried pipelines," *Lifeline Earthquake Engineering*, 1981, pp. 48-64.

2. Shinozuka, M., Kameda, H., and Koike, T., "Ground strain estimation for seismic risk analysis," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 109, No. 1, 1983, pp. 175-191.
3. O'Rourke, M. J., Pikul, R. R., and Wang, L. R. L., "Transverse seismic waves at pipeline junctions," *Journal of Technical Councils*, ASCE, Vol. 108, No. TCI, 1982, pp. 173-177.
4. Mavridis, G. A. and Ptilakis, K. D., "Axial and transverse seismic analysis of buried pipelines," *Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, 1996, pp. 109-116.
5. Shakib, H. and Shakib, N., "Analysis of buried pipelines to random ground motion in homogeneous medium," *Proceedings of Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, 1995, pp. 2185-2190.
6. Newmark, M., *A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra*, Directorate of Licensing, U.S. Atomic Energy Commission, Washington, D.C., 1973.
7. Kamiyama, M. and O'Rourke, M. J., "A simplified estimate of seismic soil strain for lifeline systems," *Proceedings of the Fourth U. S. Conference*, No. 6, 1995, pp. 192-199.
8. Nakamura, S., "Prediction of the Characteristics of Surface Waves Considering Irregularity of Stratum and Application to Design," Ph. D. Thesis, Tohoku University, 1989.
9. Tamura, C., "Design of underground structures by considering ground displacements during earthquakes," *Proceedings of U.S.-Japan Seminar of Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems*, 1976, pp. 417-433.
10. Hanks, T., "Strong ground motion of the San Fernando, California earthquake : ground displacements," *Bulletin of the Seismographic Society of America*, Vol. 65, No.1, 1975, pp. 193-225.
11. Mooney, H. M. and Bolt, B., "Dispersive characteristics of the first three Rayleigh modes for a single surface layer," *Bulletin of the Seismographic Society of America*, Vol. 56, No. 1, 1966, pp. 43-67.
12. Sato, N., Katayama, T., and Nakamura, M., "Observation of seismic ground motion and buried pipe strain in a very dense seismometer array," *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 7, 1988, pp. 29-34.
13. Elhmadi, K. and O'Rourke, M. J., "Seismic wave propagation effects on straight jointed buried pipelines," *Technical Report*, NCEER-89-0022, Rensselaer Polytechnique Institute, Troy, New York, 1988. 12.
14. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, ASCE, New York, 1984.
15. 김문겸, 조우연, 어준, 이강원, "지반변형률 모형을 이용한 매설관의 지진파 해석", 1999년 추계 학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 1999, pp. 91-98.
16. 어준, "지반변형률 모형을 적용한 매설관의 지진해석", 석사학위논문, 연세대학교, 1999.