

지반변형률 모형을 이용한 매설관의 지진파 해석

Seismic Wave Analysis of Buried Pipelines Using Ground Strain Model

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

ABSTRACT

In this study, a modified ground strain model is developed for an equivalent earthquake load and is applied 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 wave energy distribution. In order to verify the procedures, the observed earthquake data and the results of this study are compared. For the application of an equivalent earthquake load to the seismic analysis, the buried pipelines are modeled using the beam theory. The results of the analyses are compared with those of a dynamic analysis code and those obtained from the response displacement method. Finally various parametric studies considering different soil conditions and seismic loads are examined.

1. 서론

매설관로는 기능상의 특징으로 인하여 단일구조물의 형태로 존재하지 않고 광범위한 지역에 분포된 관망체계의 형태를 나타내므로 지진파에 의한 매설관로의 거동은 파의 위상차에 의해 발생되는 지반의 상대변위에 주로 영향을 받는다. 또한, 매설관 주변 지반의 구속과 감쇠효과로 인해 매설관의 거동해석에 있어서 구조물의 관성력에 의한 영향은 미약하다. 따라서 지진파에 의한 매설관로의 거동해석은 지진하중을 정적하중의 형태로 환산하는 지진해석이 주로 시도되고 있다.

매설관로에 지진하중으로 적용되는 지반변형률을 예측하는 방법은 실제 지진기록을 바탕으로 한 경험적인 방법^[1]과 이론적 접근^[2]을 통해 연구되고 있다. 지반변형률을 산정하기 위한 실제 지진기록이 존재하지 않는 지역에서는 이론적 접근을 통한 지반변형률의 예측만이 가능하다. 그러나, 기존의 이론적 접근은 지반변형률을 예측하는데 있어서 지진파 전파속도를 산출하는 과정의 연구가 부족하여 매설관 해석에 중요한 요소인 지진하중 산정의 타당한 근거를 제시하지 못하는 문제점이 있었다. 이를 개선하기 위해 파 전파 이론에 근거한 Rayleigh파의 분산곡선을 제안함으로써 지진파의 유형 및 지반특성에 따른 전파속도를 산정하여 지반변형률을 도출해 낸다. 이를 보 이론에 근거한 매설관로의 해석모형에 지진하중으로 적용한 지진해석 방법을 제시함으로써 변화하는 지반 및 지진환경에 노출되어 있는 매설관로의 지진해석을 효율적으로 수행할 수 있다.

* 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원
 ** 연세대학교 토목공학과 박사과정
 *** 연세대학교 토목공학과 석사과정
 **** 한국가스공사 연구개발원 선임연구원

2. 지반변형률 산정

지진 발생시 파 전파에 의해 발생하는 지반변형은 파 전파속도에 반비례하고 지반속도에 비례하므로 지반에서의 최대 축방향 변형률 $(\epsilon_g)_{\max}$ 은 식 (1) 과 같이 표현된다.

$$(\epsilon_g)_{\max} = \frac{V_{\max}}{C} \quad (1)$$

여기서 V_{\max} 는 축방향 최대 지반속도이고, C 는 매질관 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^[3]에 의해 제안된 값을 사용하여 기지의 최대 지반가속도로부터 최대 지반속도를 구할 수 있으나, 지진이 발생한 지역의 지진규모와 지반조건에 따라 그 사용이 제한된다. 따라서 본 연구에서는 일본에서 발생한 총 350 개의 지진기록을 바탕으로 Kamiyama 등^[4]이 제안한 식 (2) 와 같은 지진규모, 진원깊이, 지반조건 등을 반영할 수 있는 경험식을 사용하여 최대 지반속도를 산정하였다.

$$V_{\max}(M, D) = 2.879 \times 10^{0.153M} \times AMP \quad D \leq 10^{0.014 + 0.218M} \quad (2a)$$

$$V_{\max}(M, D) = 3.036 \times 10^{0.511M} \times D^{-1.64} \times AMP \quad D > 10^{0.014 + 0.218M} \quad (2b)$$

여기서 V_{\max} 는 최대 지반속도 (cm/s)이고, M 은 일본기상청(JMA) 진도이며, D 는 진원깊이 (km)이다. 또한, 식 (2) 에서 AMP 는 지반조건에 따른 증가계수로서 표준관입시험치(N 치)로부터 구한다. 식 (2) 로부터 실제 지진기록이 존재하지 않는 지점에서도 경험적으로 최대 지반속도를 계산할 수 있다. 지진파 전파에 의한 매질관이 위치한 지점의 지반운동은 지진규모, 진원깊이와 진앙거리의 비에 따라 체적파, 또는 표면파에 의해 지배적인 영향을 받으므로 지진파의 전파속도는 지진특성과 지반특성에 적합하게 산정되어야 한다.

지진 발생시 매질관이 위치한 지점에서의 지반운동이 체적파(P파, S파)에 의한 영향을 주로 받을 때, 지표면에 대한 입사각이 θ 이고 최상단층의 체적파 속도가 C_s 라고 하면 지표면에 대한 체적파의 전파속도(C)는 식 (3) 과 같다.

$$C = C_s / \sin \theta \quad (3)$$

여기서 C_s 는 전단파일 때 $\sqrt{G/\rho}$, 압축파일 때 $\left\{ \frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)} \right\}^{1/2}$ 로 G 는 지반의 전단탄성계수, E 는 지반의 탄성계수, ρ 는 지반의 밀도, 그리고 ν 는 지반의 포아송비이다. 이에 반해 지반운동이 표면파에 의한 영향을 주로 받을 때 지진파 전파에 의한 지반변형률을 계산하기 위해서는 지반특성에 따른 Rayleigh파의 전파속도를 산정해야 한다. 균질, 탄성인 반무한 지층에서 Rayleigh파의 전파속도는 Rayleigh파의 특성방정식으로부터 전단파 속도(V_s)와 포아송비(ν)를 사용해서 식 (4) 로 표현할 수 있다.

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} V_s \quad (4)$$

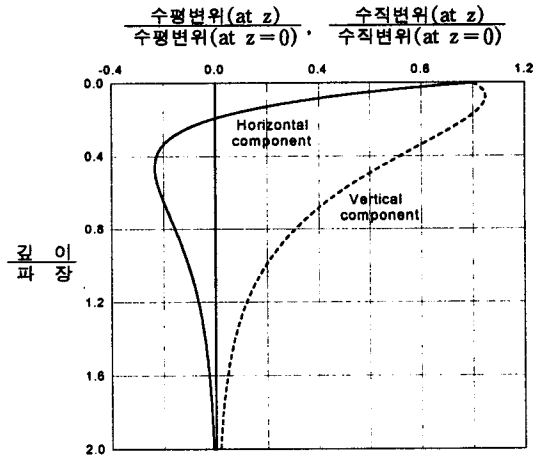


그림 1 깊이별 Rayleigh파의 에너지 분포

그러나, 이층 반무한 지반의 경우 Rayleigh파의 전파속도는 파가 매질의 상이한 층에서 변형되기 때문에 주파수 또는 파장에 따라 변화하는 분산특성을 갖으므로 분산곡선을 사용하여 표현해야 한다. 이러한 경우 Rayleigh파의 전파속도는 각 경계면에서 변위와 응력의 경계조건을 파악하기가 곤란하므로 이론적으로 계산하는 것은 매우 어렵다. 그림 1에서 주어진 바와 같이 Rayleigh파는 깊이가 증가함에 따라 진폭이 지수함수적인 감소를 보이며, 지표면 아래로 한 파장 이내에서 파 에너지의 대부분이 존재하므로 상층 지반의 두께보다 더 짧은 파장에서 전파속도 (C_R)는 상층 지반에서의 전파속도와 같다. 이에 반해 상층 지반 두께의 약 30 배보다 긴 파장에서 전파속도는 에너지의 대부분이 반무한 층에 존재하므로 반무한 층에서의 전파속도의 영향을 지배적으로 받게 된다. 또한, 파장이 상층 두께의 1-30 배인 천이영역에서 전파속도는 두 층 모두에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 식 (5)로서 Rayleigh파의 이층 반무한 지반에 대한 근사적인 분산곡선을 산정한다.

$$\begin{aligned}
 C_R &= 0.875 V_H & \lambda \geq 30H \\
 &= \frac{0.875 V_H - \alpha_v V_L (\log \lambda - \log H) + \alpha_v V_L}{\log 30} & H \leq \lambda \leq 30H \\
 &= \alpha_v V_L & \lambda \leq H
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 α_v 는 균질 반무한 층에서 Rayleigh파의 전파속도에 대한 전단파 속도의 비이고, V_H 는 반무한 층에서의 전단파 속도, V_L 은 표층에서의 전단파 속도이다. 그러나, 식 (5)는 지반이 3개 이상의 층으로 구성되어 있을 때는 직접 적용할 수 없다. 이러한 경우 2 층에서 분산곡선을 구성하여 결합함으로써 전체 지반에 대한 분산곡선을 도출해 낼 수 있다. 식 (5)를 통해 얻어진 분산곡선의 타당성을 검토하기 위해서 Shinozuka 등^[5]에 의한 분산곡선과 비교를 수행하였다. 분산곡선 산정에 사용한 지반 단면의 물성은 표 1과 같고 이에 따른 분산곡선은 그림 2와 같다. 그림 2에서 보는 바와 같이 두 분산곡선의 경계값과 파장에 따라 전파속도가 증가하는 경향이 잘 일치함을 알 수 있다.

지반변형을 산정과정의 타당성을 검토하기 위해 예측된 지반변형률과 표 2에 주어진 지반특성치를 갖는 일본 동경대학교 내 Chiba 부지에서 1983년에서 1988년까지 발생한 지진으로부터 관측한 지반변형률^[6]과 비교를 실시하였고, 그 결과는 그림 3에 주어진 바와 같다. 그림 3에서 가로축은 예측 지반변형률을, 세로축은 관측 지반변형률을 나타낸다. 실선은 지반변형률의 예측값과 관측값이 동일함을 의미하며, 점선은 두 값의 차이가 2 배일 때를 의미한다. 그림 3에서 예측된 지반변형률과 관측된 지반변형률은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

표 1 분산곡선 산정에 사용한 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	∞	∞

표 2 Chiba 부지의 지반특성치

지반 종류	지반물성			
	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

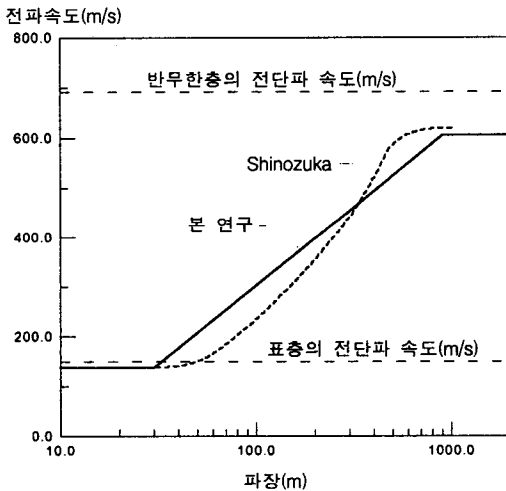


그림 2 Rayleigh파 분산곡선의 비교

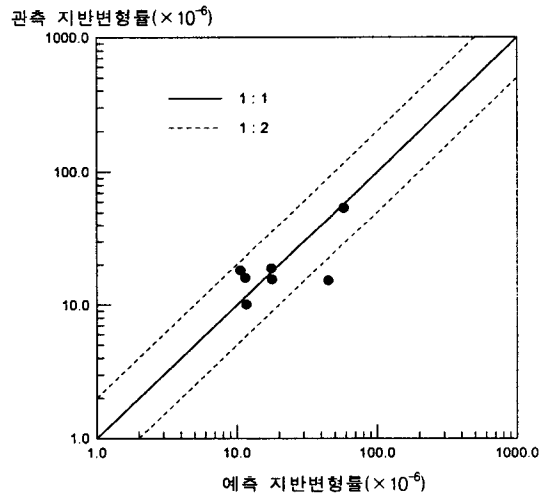


그림 3 관측지반변형률과 예측지반변형률 비교

3. 매설관의 해석모형

그림 4에서 주어진 바와 같이 매설관로의 해석모형은 연속적인 축방향과 횡방향 지반 스프링으로 둘러싸인 관 세그먼트로 구성되어 있다. 관 세그먼트는 n_s 로, 각 관 세그먼트당 요소의 수는 n_e 로 표시되며 각 요소는 단부에 두 개의 절점을 가지는 보 요소로 이산화 되어 있다. 각 요소의 길이는 관 세그먼트의 길이가 L 이라면 $l = L/n_e$ 로 표시되고 관 세그먼트 사이에 있는 연결부는 축방향과 회전 스프링으로 구성되며 전체 모형의 길이는 $L_{pm} = n_s \times L$ 이다. 지진파 전파로 인해 발생한 지반변형률로부터 매설관의 축방향을 따라 발생하는 수평 지반변위 $u_g(x)$ 는

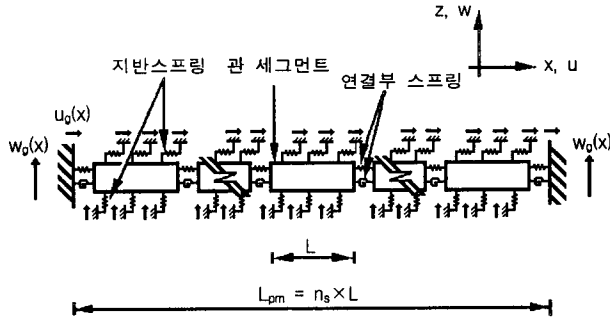


그림 4 매설관로의 해석모형

지진과 과장이 일반적으로 매설관로 모형의 길이 L_{pm} 보다 훨씬 크므로 선형함수로 가정한다. 따라서 수평 지반변위 $u_g(x)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_g(x) = \pm \varepsilon_g \cdot (x - L_{pm}/2) \quad (6)$$

여기서 ε_g 는 수평 지반변형률이다. 식 (6) 에서 (+) 는 인장 수평 지반변형률을, (-) 는 압축 수평 지반변형률을 의미한다. 식 (6) 에 의해서 산출된 지반변위를 지반과 연결부의 비선형성을 고려할 수 있는 매설관의 해석모형에 지진하중으로 적용하여 응답을 산출한다.

4. 수치해석 결과 및 분석

제안된 지반변형률 모형을 하중으로 적용하여 매설관로의 응답을 산정하고, 이를 범용 구조해석 프로그램을 사용하여 얻어진 동적 응답과 응답변위법을 통하여 구한 이론치와 비교하였다.

매설관의 동적 해석은 지진과 전파로 인해 발생하는 매설관에 작용하는 하중을 그림 5 에서 보는 바와 같이 전파속도가 60 m/s 인 sine파 형태의 지반운동으로 모형화하여 수행하였다. 또한, 동적 해석 수행시 지진파의 전파효과를 반영할 수 있도록 하기 위해서 지반운동의 위상차를 고려한 하중을 매설관 모형에 적용하도록 모형화 하였다. 그림 5 에서 l_k 는 절점 1 에서 절점 k 까지의 거리, C 는 지진파의 전파속도이며, 해석에 사용한 시간간격 Δt 는 0.01 초로 하여 지진파가 해석모형의 마지막 절점 n 에 도달하는 시간까지의 응답을 대상으로 하였다. 또한, 응답변위법에 의한 매설관 연결부의 변위는 동적 해석에서 이용한 지반변위의 시간이력으로부터 얻어진 최대 지반변형률을 하중으로 적용함으로써 산출하였다. 즉, 동적 해석에서 사용한 지반변위의 시간이력으로부터 유도된 최대 지반속도와 지진파의 전파속도로부터 지반변형률을 산정하였다. 이로부터 지반변위의 시간이력을 하중으로 적용한 동적 해석과 동일한 지반운동에 대한 적용하중을 도출할 수 있다. 이러한 과정을 통해 산정된 지반변형률을 하중으로 적용한 지진해석을 실시하여 매설관로의 응답을 구하였다. 해석에 사용한 관의 제원과 지반의 물성은 각각 표 3 과 표 4 에 정리하였고, 해석결과는 그림 6 과 같다. 그림 6 에서 본 연구의 해석결과는 구조해석 프로그램을 사용한 동적 해석결과와 약 20% 정도의 차이를 보이고, 응답변위법에 의한 해석결과와는 지반변형률이 큰 경우에는 잘 일치하나, 지반변형률이 작은 경우에는 약간의 차이를 보인다.

또한, 그림 6 에서 본 연구의 결과가 응답변위법에 의한 결과보다 동적 해석의 결과에 보다 근접한 해석결과를 나타냄을 알 수 있다.

표 3 해석에 사용한 관의 제원

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

표 4 관이 매설된 지반의 물성

표층의 단위중량	표층의 두께	표층의 전단파 속도	반무한 층의 전단파 속도	표층의 전단탄성계수
$0.17 \times 10^{-2} kgf/cm^3$	30 m	90 m/s	500 m/s	140 kgf/cm^2

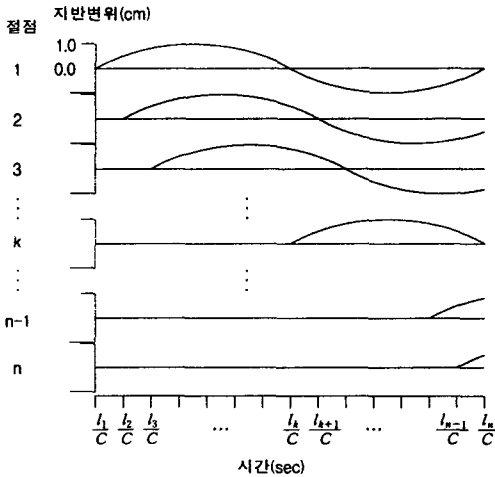


그림 5 위상차를 고려한 하중입력 모형

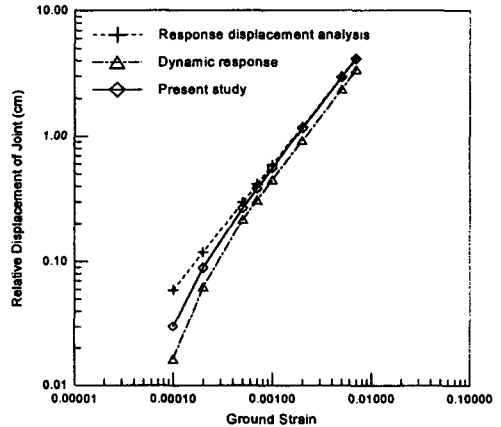
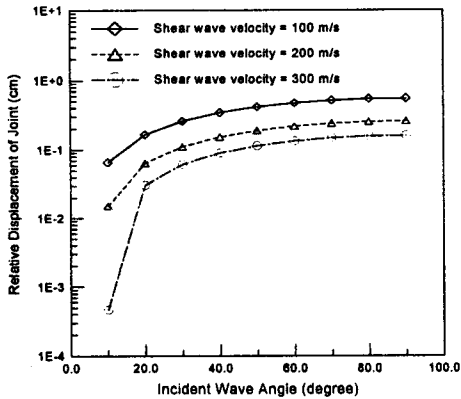


그림 6 해석방법별 연결부 상대변위의 비교

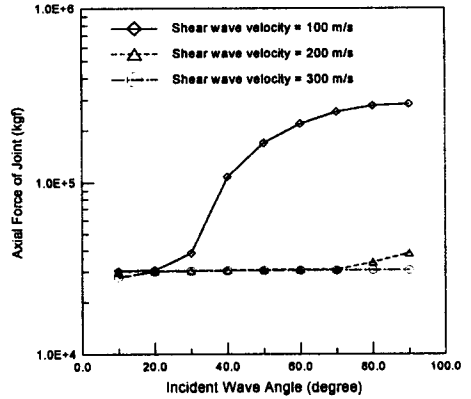
개발된 해석 프로그램을 사용하여 지진파 전파로 인한 매설관로의 응답에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 다양한 지진해석을 실시하여 응답특성을 고찰하였다. 해석에 사용한 관의 제원 및 물성은 표 5 에 정리하였다. 그림 7 은 체적파 입사각의 변화에 따른 전단파 속도별 매설관의 응답을 나타낸 것으로 가로축은 체적파의 입사각을 나타내고 세로축은 각각 연결부 인장 변위와 압축력을 의미한다. 전단파 속도는 100 m/s, 200 m/s 및 300 m/s 인 경우에 대해 검토하였고 지반 속도는 $V = 0.1 m/s$ 로 가정하였으며 체적파의 입사각은 10° 에서부터 90° 까지 다양한 조건의 입사각에 대해 고려하여 그 양상을 살펴보았다. 그 결과 체적파의 지표면에 대한 입사각이 증가하고 전단파 속도가 감소함에 따라 매설관 연결부의 인장 변위와 압축력이 증가하였다. 그림 8 은 Rayleigh파의 파장변화에 따른 표층깊이별 매설관의 응답을 나타낸 것으로 가로축은 Rayleigh파의 파장을 나타내고 세로축은 각각 연결부 인장 변위와 연결부의 압축력을 표시한다. 표층깊이는 10 m, 20 m 및 30 m 의 경우에 대해서 검토하였으며, 그 결과 Rayleigh파의 파장이 감소하고 표층깊이가 증가할수록 매설관 연결부의 인장 변위와 압축력이 증가하였다.

표 5 지진해석에 필요한 관과 지반의 입력치

내 용		입 력 치	
관 계 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	10 개
	세그먼트당 요소의 수	n_e	10 개
	연결부의 축방향 강성	AK_j	6.84×10^7 kgf/cm
	연결부 변위의 탄성한계	u_j^i	0.50×10^{-3} cm
지 반 물 성	단위 중량	γ	0.17×10^{-2} kgf/cm ³
	상대 밀도	D_r	50 %
	축방향 강성	k_x	280 kgf/cm ²
	축방향 극한 저항력	f_x^u	51.20 kgf/cm

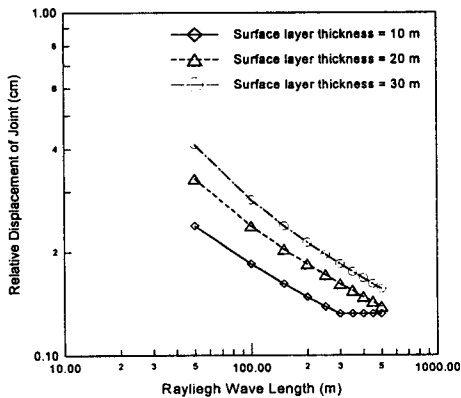


(a) 인장변위

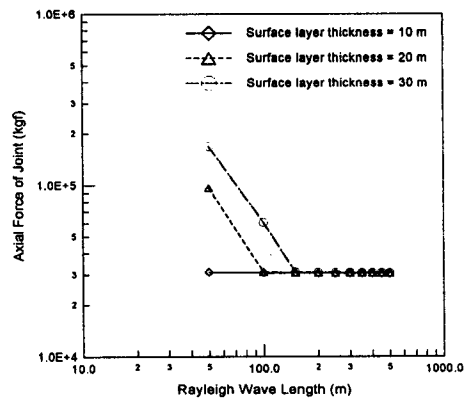


(b) 압축력

그림 7 체적파의 입사각에 따른 전단파 속도별 연결부 응답



(a) 인장변위



(b) 압축력

그림 8 Rayleigh파 파장변화에 따른 표층깊이별 연결부 응답

5. 결 론

본 연구에서는 지진과 지반특성을 고려하여 지진과 전파로 인해 발생하는 지반변형률을 산정하였고, 이를 매설관로의 지진해석 모형에 하중으로 적용할 수 있는 개선된 해석방법을 제시하였다. 지진해석으로부터 얻어진 매설관의 응답은 범용 구조해석 프로그램을 사용한 동적 해석에서 얻어진 응답 및 응답변위법과 비교하였다. 또한, 다양한 지반 및 지진환경을 반영하기 위해 지반조건, 지진파의 전파특성을 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 입증하였고, 지진과 지반특성을 고려할 수 있는 지진하중 산정방법의 타당성을 확인하였다.
3. 타당성이 확인된 지진하중 산정과정을 매설관 모형에 적용하였고 범용 구조해석 프로그램에 의한 동적 응답 및 응답 변위법에 의한 응답과 비교하였으며, 그 결과 본 연구에 의한 해석에서 얻어진 응답은 전반적인 지반변형률 수준에 대해 응답변위법과 동해석에 의한 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이로써 본 연구에서 제안한 지진해석 방법의 타당성을 입증할 수 있었으며, 지진과 전파로 인한 매설관의 지진해석을 효과적으로 수행할 수 있음을 보였다.
4. 체적파의 전단파 속도의 증가와 입사각의 감소, Rayleigh파 파장길이의 증가는 매설관 연결부의 응답을 감소시키는 결과를 나타내었다. 이로부터 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.

참고문헌

1. Iwamoto, T., Inada, H., and Nemoto, Y.(1995), "Observation on Behaviors of Buried Pipelines and Ground Strain during Earthquakes," Proceedings of Tenth World Conference on Earthquake Engineering, pp. 5575-5579.
2. O'Rourke, M.J., Castro, G., and Hossain, I.(1984), "Horizontal Soil Strain due to Seismic Waves," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 9, pp. 1173-1187.
3. Newmark, M.(1973), A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra, Directorate of Licensing, U.S. Atomic Energy Commission, Washington, D.C..
4. Kamiyama, M. and O'Rourke, M.J.(1995), "A Simplified Estimate Of Seismic Soil Strain For Lifeline Systems," Proceedings of the Fourth U. S. Conference, No. 6, pp. 192-199.
5. Shinozuka, M., Kameda, H., and Koike, T.(1983), "Ground Strain Estimation for Seismic Risk Analysis," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 175-191.
6. Sato, N., Katayama, T., and Nakamura, M.(1988), "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, pp. 29-34.