매설관의 3차원 동적응답거동

3-D Dynamic Response of Buried Pipelines

정진호¹⁾ · 김춘진²⁾

Jeong, Jin Ho · Kim, Chun Jin

국문 요약 >> 매설관의 동적해석법으로 Larbi(1995)와 정 등(2005)은 모드중첩법을 이용하여 매설관의 여러 단부경계조건에 대해 해석한 바 있다. 그러나 이 방법에서 얻고자 하는 해의 산정식은 유도과정이 매우 복잡할 뿐만 아니라 유도된 산정식마저 해를 얻기 위해선 별도의 수치해석 전산프로그래밍이 요구되므로 사실상 기술자가 실무에서 이용하기는 극히 어려운 해법으로 취급되고 있다. 이러한 모드중첩법의 단점을 고려하여 이 해석법의 대안으로 실무에서 보다 쉽게 사용 가능한 3D 유한차분법을 제안하고자 한다. 이를 위해 3D 동적해석의 정확성을 검증한 후 그 결과를 모드중첩법의 결과와 비교 분석하여 매설관의 지진응답을 구하는 또 하나의 방법이 될 수 있음을 확인하였다.

주요어 3D 유한차분 해석법, 모드중첩법, 동적 거동

ABSTRACT >> Larbi (1995) and Jeong et al. (2005) analyzed the various boundary end conditions of buried pipelines using the mode superposition method as one of the dynamic analysis methods of buried pipelines. However, it is very complicated to derive calculation equations for the solutions to be obtained by this method, and even the derived calculation equations need separate computer programming for the numerical analysis in order to obtain the solutions. For this reason, this method is extremely difficult for engineers to apply in their field works. In consideration of the shortcoming of the mode superposition method, this study's purpose is to propose a 3D dynamic finite difference method, which is more easily applicable in the field. For this purpose, we tested the accuracy of the 3D dynamic analysis and compared the results with those of the mode superposition method and certified that the 3D dynamic analysis could be an alternative method to obtain the seismic responses of the pipelines.

Key words 3D finite difference method, Mode superposition method, Buried pipelines, Boundary end conditions.

1. 서론

도시의 인구증가로 인해 매설관을 이용한 수송의 의존도가 높아지고 이에 따라 안전에 대한 관심 또한 높아지고 있다. 특히 가스나 상하수 등 실생활에 주요한 영향을 미치는 매체들은 도시 구조의 특성상 지상이 아닌 지하로 수송되는 것이 대부분이다. 이러한 매설관은 도시의 주요건축물과 유기적으로 연결되어 있어 지진과 같은 아주 큰 응력에 의한 안전성 검토가 필수적이다. 과거 발생한 지진에 의한 피해의 30~60%가 매설관의 파괴로 인한 화재의 조기진압불능

이 원인이었다는 것도 이러한 요구를 뒷받침하고 있다.

또한 최근 한태평양 지진대에서의 빈번한 지진과 화산활동이 발생함으로써 같은 지진대에 위치한 한반도에서의 지진 활동의 가능성이 높아지고 있다. 그러나 현재 우리나라는 지하구조물의 내진해석에 법규가 미비하고 이에 따라 관련 연구가 적다.

Larbi(1995)⁽¹⁾는 양단고정, 양단자유 경계조건에 대한 매설관의 동적거동을 모드중첩법을 이용하여 해석하였고 정 등(2005)⁽⁹⁾은 모드중첩법을 이용하여 축방향 일단고정-일단자유 경계조건 및 축직각방향 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 경계조건에서의 해석식과 식을 이용하여 해를 얻기 위한 전산프로그램을 개발하였다. 이와 같이 모드중첩법에 이용되는 해의 산정식은 유도과정이 매우 복잡할 뿐만아니라 유도된 산정식마저 해를 얻기위해선 별도의 수치해석 전산프로그래밍이 요구되므로 사실상 실무에서 이용되기는 극히 어려운 해법으로 취급된다.

¹⁾ 정회원 · 부경대학교 건설공학부, 정교수
(교신저자: geojh@pknu.ac.kr)

²⁾ 한국 농어촌공사 기술 본부팀원

본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 3. 22 / 수정일 1차: 2010. 12. 3, 2차: 2011. 3. 7 / 게재확정일 : 2011. 3. 7)

이러한 모드중첩법의 단점을 고려하여 이 해석법의 대안으로 실무에서 보다 쉽게 사용 가능한 3D 유한차분법을 제안하며 이에 대한 3D 해석의 정확성을 검증한 후 그 결과를 모드중첩법의 결과와 비교 분석하여 매설관의 동적거동 해석법의 대안으로서 3D 유한차분해석법을 제안하고 저 함이 본 연구의 목적이다.

2. 모드중첩법에 의한 동적해석

2.1 축방향 강제진동

매설관은 탄성기초 위에 놓인 보로서 모형화 되었다. 파의 전파는 좌측 끝단($t=0$)에서 전파된다. 축방향 진동에서 매설관의 거동을 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} + C_A \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + K_A v(y,t) - E_p A \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = C_A \frac{\partial v_g(y,t)}{\partial t} + K_A v_g(y,t) \quad (1)$$

여기서, $v(m)$: 매설관을 따라 좌표 $y(m)$ 와 시간 t (sec)의 함수인 축방향 변위

$m(kg/m)$: 매설관의 단위길이당 질량

$C_A(N \cdot sec/m/m)$, $K_A(N/m/m)$: 지반과

Winkler 기초에 대한 단위길이당 감쇠 계수와 축방향 강성

$E_p(N/m^2)$, $A(m^2)$: 매설관의 탄성계수와 단면적

식 (1)에서 우측항은 지진진동으로 발생한 변위를 나타내고 있다. 이러한 변위를 모드형상과 시간에 대한 함수로 나타낸 후 모드형상에 대한 식을 양변에 곱하고 매설관의 전체 길이에 대해 적분한다. Duhamel의 적분공식과 Simpson 법칙에 따라 단계적으로 전개한 후 정리하면 매설관의 축방향 변위($v_A(y,t)$)와 변형률($\epsilon_A(y,t)$) 산정식은 표 1과 같다.

2.2 축직각방향 강제진동

축직각방향 지반 변위를 갖는 매설관의 거동에 대한 미분 방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{\partial^2 w(y,t)}{\partial t^2} + C_T \frac{\partial w(y,t)}{\partial t} + K_T w(y,t) + E_p I \frac{\partial^4 w(y,t)}{\partial y^4}$$

$$= C_T \frac{\partial w_g(y,t)}{\partial t} + K_T w_g(y,t) \quad (2)$$

여기서, $w(m)$: 매설관을 따라 좌표 $y(m)$ 와 시간 t (sec)의 함수인 축직각방향 변위

$C_T(N \cdot sec/m/m)$, $K_T(N/m/m)$: 지반과

Winkler 기초에 대한 단위길이당 감쇠

계수와 축직각방향 강성

$I(m^4)$: 매설관의 관성모멘트

축방향 진동의 경우처럼 일반적인 모드형상($\phi_k(y)$)과 시간에 대한 함수($q_k(t)$)를 사용하여 매설관의 변위($w_g(y,t)$)를 표현함으로써, 위의 미분방정식의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_k(y,t) = \phi_k(y)q_k(t) \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하고, 매설관의 길이에 대해 적분하여, 모드형상에 대한 직교성을 이용함으로써 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\ddot{q}_k(t) + \frac{C_T}{m} \dot{q}_k(t) + \frac{K_T}{m} q_k(t) \left\{ 1 + \frac{\beta_k^4 E_p I}{K_T} \right\} = \frac{1}{m L_k} \int_0^L \phi_k(y) [C_T \dot{w}_g(y,t) + K_T w_g(y,t)] dy \quad (4)$$

여기서, $L_k = \int_0^{L_k} \phi_k^2(y) dy$ 로서 L_k 는 지진파가 $t=0$ 에서 매설관의 좌측단부를 진동한 후 이동한 거리를 말하고 이때의 모드형상 제곱의 합을 L_k 라고 한다. 이후 축방향 강제진동과 같이 Duhamel 적분공식과 Simpson 법칙에 따라 적분하여 전개하면 축직각방향 단부 경계조건에 대한 변위($w_T(y,t)$), 휨변형률($\epsilon_T(y,t)$) 산정식은 표 2와 같다.

3. 3D 유한차분 동적해석의 방법

FLAC 3D를 해석에 이용하였으며, 이 프로그램은 공학적 계산을 위해 제작된 3차원 음해함수 유한차분(Explicit Finite Difference)프로그램으로써 3차원 연속체 공간(Three Dimensional Continuum Space)을 유한차분망(Finite Difference Mesh)으로 원하는 만큼 자세하게 분할되어 임의의 위치에서 각각의 지배방정식의 해를 구할 수 있다.

〈표 1〉 축방향 진동에서 변위 및 변형률 산정식(Larbi, 1995; 정 등, 2005)

Classification		Result
Free Ends	Displacement	$v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
	Strain	$\epsilon_A(y,t) = - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(k-1)\pi}{L} \sin \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
Fixed Ends	Displacement	$v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
	Strain	$\epsilon_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{L} \cos \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
Fixed Free Ends	Displacement	$v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	Strain	$\epsilon_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)\pi}{2L} \cos \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

〈표 2〉 축직각방향 진동에서 변위 및 휨변형률 산정식(Larbi, 1995; 정진호 등, 2005)

Classification		Result
Free Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
Fixed Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
Fixed Free Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ - \frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ - \frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
Guided Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = - \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(k-1)\pi}{L} \right)^2 \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
Simply Supported Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = - \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
Supported Guided Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = - \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

3.1 모델링 및 매쉬 형상도

해석에서 지반 모델은 탄성모델(Elastic Model)을 사용하였다. 이는 모드중첩법에 의한 해석결과와 비교하기 위해 동일한 모델의 탄성모델을 사용하였다. 그림 1은 범용 전산프로그램, FLAC 3D에서 해석에 이용한 유한차분요소망이다.

흡요소 모델은 Tetrahedral Element를 사용하였고 각 요소에서는 편차변형률이 계산되고 힘이나 변위, 응력, 체적변형률은 중첩된 계산값의 평균이 이용된다. 매설관 모델은 지반과 같이 거동하고 등방성이며 변위와 모멘트를 구할 수 있

〈그림 1〉 해석에 이용한 유한차분망

는 Shell 요소를 사용하여 나타내었다. 구조물과 흙 경계부분은 인터페이스 엘리먼트를 축방향과 축직각방향으로 각각 적용하였고, 매설관의 직경은 2m, 길이는 100m, 해석대상 지반의 폭과 높이는 각각 10m로 하여, FLAC 3D에서 최소 해석영역(매설관 직경 의 3~5배)을 만족하도록 적용하였다.

3.2 입력지진파 적용방법

3차원 수치해석 프로그램을 이용하여 매설관의 내진해석을 하기 위해서는 지진파의 방향성과 경계조건이 필요하다. 우선 모드중첩법에서 사용한 바와 같이 지진파는 매설관 시작 부위에서 시작하여 매설관을 따라 전파된다. 이를 3D 유한차분 해석에서 묘사하기 위해 매설관의 시작 부분부터 매설관과 지반에 직접 지진파를 적용하는 방법을 택하였다.

축직각방향 양단자유 경계조건의 경우를 예를 들어 설명하면 우선 모델에서 지진파를 가하고자하는 평면을 설정한 후 지진파를 가한다. 이렇게 적용된 지진파에 의해 각 지점별 매설관의 변위를 구하고 이렇게 구해진 변위 그래프에서 지점별 최대변위만을 기록한다. 이와 같은 방법으로 그림 2에서와 같이 $x=0$ 평면에서 $x=100$ 평면까지 모든 평면에 대해 지진파를 적용하여 각각의 평면에서 발생하는 지점별

최대변위를 구한다. 이렇게 구해진 지진파 발생 지점별 최대 변위 중 각 지점에서 발생하는 최대 변위만을 택하여 구하고자하는 지점별 최대변위 그래프를 얻을 수 있다.

3.3. 해석대상

매설관의 동적응답 해석을 수행하기 위하여 Larbi(1995)⁽¹⁾가 발표한 콘크리트 매설관을 예로 해석하였으며 매설관의 기하학적, 재료적 특성 및 지반특성치는 표 3과 같다.

4. 모드중첩법 및 3D 유한차분 해석법 결과 비교

4.1 해석결과의 검증

4.1.1 최대 지반 변형률

흙입자의 거동은 파형태에 의존적이며 파의 진행방향에 대해 축방향 성분과 축직각방향 성분으로 분리될 수 있다. 일반적으로 심도가 얇은 매설관에 대해선 표면파인 Rayleigh 파가 가장 영향을 많이 미치는 것으로 알려져 있다. Ogawa 등(2001)⁽²⁾은 지진파를 수평방향으로 정현파 형태의 파가 전파된다고 가정하여 최대 지반 변형률(ϵ_G)을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$\epsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h \quad (5)$$

여기서, L : 파장, U_h : 지반 변위

4.1.2 매설관의 축방향 변형률

Ogawa 등(2001)⁽²⁾은 매설관을 무한 지반에 놓인 양단자유 단부경계조건의 관으로 단순화된 모형을 사용하였으며, 매설관의 축방향에 대한 힘의 평형방정식은 D'Alembert의

〈그림 2〉 지진파의 진행방향

〈표 3〉 매설관의 기하학적, 재료적 특성 및 지반특성치(Larbi, 1995)

Classification		Symbol (unit)	Value
Concrete Pipe	Modulus of Elasticity	EP (N/m ²)	2.07×10^{10}
	Length	L (m)	100
	Average Radius	R (m)	1
	Thickness	t (m)	0.15
	Cross-Sectional Area	A (m ²)	0.94248
	Moment of Inertia	I (m ⁴)	0.47389
	Mass per Unit Volume	ρ (kg/m ³)	2.2×10^3
	Mass per Unit Length	m (kg/m)	2.0735×10^3
Soil	Axial Soil Stiffness	KA (N/m ²)	9.34×10^7
	Lateral Soil Stiffness	KT (N/m ²)	14.01×10^7

원리에 근거하여 식 (6)과 같이 표현하였다.

식 (6)은 지반의 질량항과 축방향 전파로 인해 발생하는 보의 내부력 항과 축방향 등가 스프링계수의 항으로 구성된다.

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = K_1 (u_G - u) \quad (6)$$

여기서, u : 매설관의 축방향 변위

u_G : 축방향 지반 변위

ρ : 매설관의 밀도

E : 매설관의 탄성계수

K_1 : 축방향 등가 스프링 계수

Ogawa 등(2001)⁽²⁾은 매설관의 관성에 의한 영향은 무시하고 매설관과 지반의 변형률비를 나타내는 변환계수, α_0 에 의해 양단자유 단부 경계조건을 가진 매설관의 변형률(ϵ_s)을 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_s = \alpha_0 \epsilon_G \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \alpha_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L_a} \right)^2}, \quad \lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}}$$

L_a : 매설관 축방향으로 전파되는 파의 파장

4.1.3 해석결과의 비교

양단자유 단부 경계조건을 가진 매설관에 대해 매설관 중앙단면에서의 축방향 변형률을 Ogawa 등(2001)⁽²⁾은 식 (7), Larbi(1995)⁽¹⁾는 표 1에 제시된 식에 의해 구할 수 있음을 제안하였다. 본 논문에서 사용한 3D 유한차분 해석의 결과를 검증하기 위해 이들 식으로부터 구한 값과 비교하였다. 해석의 검증을 위해 El Centro 지진 기록(그림 3)을 이용하여 주기에 따른 지반변위응답 스펙트럼을 나타낸 것이 그림 4이며 그림 3에서 2.12초에 발생하는 최대가속도를 포함할 수 있도록 지진기록을 시간 8초에 대해 0.02초씩 기록된 데이터를 400개 이용하여 그림 4와 같은 지반변위응답 스펙트럼을 구하였다. 그림 4에서 주기 1초에 대한 지반변위(식 (5)에서 U_h)는 0.03916m이며 이 값을 이용해 식 (5)

와 식 (7)에 의해 산정된 매설관의 변형율은 1.349×10^{-3} (Ogawa et al)로 산정되었고 표 1의 축방향 양단자유경계조건에 대한 식을 이용하여 구한 매설관의 변형율은 0.036571 (Larbi)로 산정되어 실제 매설관의 변형율은 여기에다 주기 1초에 해당하는 지반변위(그림 4)를 곱함으로써 산정된다. 그 값은 $0.036571 \times 0.039161 = 1.432 \times 10^{-3}$ 이다.

표 4는 양단자유 단부경계조건을 가진 매설관에 대해 주기 1sec일 때 관 중심부에서 축방향 변형률을 산정한 값으로 Ogawa 등(2001)⁽²⁾의 제안식에 의한 값과 Larbi(1995)⁽¹⁾의 모드중첩법에 의한 값과 본 연구에서의 구한 3D 유한차분 해석법에 의한 축방향 변형률의 값들을 나타내었다. 이들 값 산정에 이용된 지진파의 전파속도는 Ogawa 등(2001)⁽²⁾의 제안식과 Larbi(1995)⁽¹⁾의 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법에서 100m/sec로 모두 동일하게 적용하였다.

표 4에서 알 수 있듯이 Ogawa 등(2001)⁽²⁾에 의해 산출된

〈그림 3〉 El Centro 지진기록(1940)

〈그림 4〉 El Centro 지진의 변위응답 스펙트럼(1940)

〈표 4〉 축방향 변형률 비교(T=1sec)

해석방법	축방향 양단자유 경계조건 변형률	Ogawa et al과의 오차
Ogawa et al(2001)	1.349×10^{-3}	-
모드중첩법에 의한 해석	1.432×10^{-3}	6.15 %
3D 유한차분 해석법에 의한 해석	1.429×10^{-3}	5.93 %

변형률 값을 기준으로 각 방법에 의한 값들의 차이를 오차로 표시하면 모드중첩법에 의한 값은 6.15%, 3D 유한차분 해석법에 의한 값은 5.93%의 차이를 보여 3D 유한차분 해석법이 가장 작은 오차범위의 동적응답을 보여 주고 있다.

4.2 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법 결과의 비교

본 장에서는 관 단부 경계조건에 대한 파의 영향을 규명하기 위해 전파속도(V) 300m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$) 30rad/sec와 전파속도(V) 2000m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$) 5rad/sec인 두 정현파를 사용하였다. 모드중첩법을 이용한 해석 결과와 본 연구에서의 3D 유한차분 해석법을 이용한 해석 결과를 비교하였다. 여기서 두가지의 파를 사용한 것은 전파속도를 달리 적용하므로 인해서 얻어 질수 있는 일시적 변위응답과 정상상태 변위응답을 고려하기 위해서이다. 여기서 일시적 변위응답이란 파가 매설관 전장을 통과하기 전에 나타나는 동적응답이며 파가 매설관 전장을 통과한 후 정현파 하중이 지속적으로 가해지는 상태의 동적응답을 정상상태 응답이라고 정의하였다.

4.2.1 매설관의 지점위치별 변위응답 비교

매설관의 지점위치별 변위응답을 모드중첩법과 3D 유한차분 해석에 의한 결과들을 비교하였다. 표 5는 축방향 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 경계조건에 대한 것이며 표 6은 축직각방향 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 경계조건에 대한 지점별 변위응답을 나타냈다.

축방향 양단자유 경계조건에서 두 해석법 모두 자유단인 $x=0$ 지점과 $x=100$ 지점에서 최대변위응답이 발생하였다.

전파속도 300m/sec인 경우 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였다. 전파속도 2000m/sec인 경우 자유단측($x=0 \sim 25$ m, $x=75 \sim 100$ m)에서의 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법의 해석결과보다 크고 중앙부위($x=30 \sim 70$ m)에서는 변위응답이 유사하게 발생하였다. 축방향 양단고정 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석결과 중 전파속도 300m/sec인 경우 $x=80$ m 지점에서 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 $x=50$ m 지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석 결과는 두 전파속도에서 변위가 발생하지 않은 고정단($x=0$ m, $x=100$ m) 이외 지점에서 유사한 변위가 발생하였다. 전파속도 300m/sec인 경우 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였다. 전파속도 2000m/sec인 경우 고정단측($x=5 \sim 20$ m, $x=80 \sim 95$ m)에서의 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석 결과보다 크고 중앙부위($x=25 \sim 75$ m)에서는 작게 발생하였다. 축방향 일단고정-일단자유 경계조건에서는 두 해석법 모두 자유단인 $x=100$ m 지점에서 최대변위응답이 발생하였다. 전파속도 300m/sec와 전파속도 2000m/sec인 두 경우 모두 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였다.

축직각방향 양단자유 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석 중 전파속도 300m/sec인 경우 $x=35$ m지점과 $x=65$ m지점에서 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 모든 지점에서 변위응답이 유사하게 발생하였고 3D 유한차분 해석은 전파속도 300m/sec인 경우 모든 지점에서 변위응답이 유사하게 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 자유단($x=0$ m, 100m)에서 최대변위응답이 발생하였다. 전파속도 300m/sec인 경우 자유단측($x=0 \sim 20$ m, $x=80 \sim$

〈표 5〉 축방향 단부 경계조건에 따른 지점위치별 변위응답 비교

〈표 6〉 축직각방향 단부 경계조건에 따른 지점위치별 변위응답 비교

100m)에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점($x=25\sim75\text{m}$)에서는 모드중첩법 해석결과가 더 크게 발생하였다. 전파속도 2000m/sec인 경우 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였다. 축직각방향 양단고정 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석 중 전파속도 300m/sec인 경우 $x=30\text{m}$ 지점과 $x=70\text{m}$ 지점에서 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 $x=20\text{m}$ 지점과 $x=80\text{m}$ 지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석은 두 전파속도에서 모두 고정단($x=0\text{m}$, $x=100\text{m}$)에서 변위가 발생하지 않고 그 외 지점($x=5\sim95\text{m}$)에서는 유사한 변위가 발생하였다. 전파속도 300m/sec인 경우 고정단측($x=5\sim40\text{m}$, $x=60\sim95\text{m}$)에서 모드중첩법 해석결과가 3D 유한차분 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점($x=45\sim55\text{m}$)에서 작게 발생하였다. 전파속도 2000m/sec인 경우 $x=15\sim25\text{m}$, $x=45\sim55\text{m}$, $x=75\sim85\text{m}$ 에서 모드중첩법 해석결과가 3D 유한차분 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점($x=5\sim10\text{m}$, $x=30\sim40\text{m}$, $x=60\sim70\text{m}$, $x=90\sim95\text{m}$)에서 작게 발생하였다. 축직각방향 일단고정-일단자유 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석 중 전파속도 300m/sec인 경우 자유단인 $x=100\text{m}$ 지점에서 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 $x=20\text{m}$ 지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석은 두 전파속도에서 모두 자유단인 $x=100\text{m}$ 지점에서 발생하였

다. 전파속도 300m/sec와 전파속도 2000m/sec인 두 경우의 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과와 모드중첩법 해석 결과가 유사하게 발생하였다. 축직각방향 양단롤러 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법의 해석결과 모두 롤러단($x=0\text{m}$, $x=100\text{m}$)에서 발생하였다.

두 전파속도 모두 롤러단측($x=0\sim5\text{m}$, $x=95\sim100\text{m}$)에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점($x=10\sim90\text{m}$)에서는 유사하게 발생하였다. 축직각방향 양단힌지 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석에서 두 전파속도 모두 $x=10\text{m}$ 지점과 $x=90\text{m}$ 지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석에서 전파속도 300m/sec인 경우 힌지단($x=0\text{m}$, $x=100\text{m}$)에서 변위가 발생하지 않고 그 외 지점($x=5\sim95\text{m}$)에서는 유사한 변위가 발생하였고 전파속도 2000m/sec인 경우 $x=10\text{m}$ 지점과 $x=90\text{m}$ 지점에서 발생하였다.

전파속도 300m/sec와 전파속도 2000m/sec인 두 경우의 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과와 모드중첩법 해석 결과가 유사하게 발생하였다.

축직각방향 일단힌지-일단롤러 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석에서 두 전파속도 모두 $x=10\text{m}$ 지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석에서 두 전파속도 모두 롤러단인 $x=100\text{m}$ 지점에서 발생하였다.

두 전파속도 모두 롤러단측($x=95\sim100\text{m}$)에서 3D 유한

차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점($x=5\sim 90\text{m}$)에서는 유사하게 발생하였다.

축방향 변위응답에서 전파속도 300m/sec에 대한 모드중첩법의 해석결과는 같은 조건에서의 3D 유한차분 해석결과와 다소 차이를 보이고, 축직각방향 변위응답의 전반적인 형태가 모드중첩법은 파동의 형태로 변하고 3D 유한차분 해석법은 직선으로 나타나는데 이들은 파가 관을 따라 전파될 때 모드중첩법은 시간에 따라 파가 진행해 감으로써 변위응답이 중첩되어 표현되어지는데 반해 3D 유한차분 해석법은 각 지점에서 발생하는 최대변위응답만을 고려했기 때문이다.

축방향과 축직각방향 경계조건의 변위 형태 중 자유단에서 3D 유한차분 해석이 모드중첩법에 의한 해석과 조금의 차이가 발생하는데 이는 자유단에 대한 경계조건을 설정할 경우 모드중첩법에 의한 해석은 변형률, 곡률, 축력이 0이라는 간단한 조건을 설정한 반면 3D 유한차분 해석은 그러한 조건 이외에 지반의 밀도나 매설관의 모델 형상에 따른 영향 등이 포함되어 모드중첩법에 의한 해석보다 변위응답이 크게 발생하였다.

5. 결론

본 연구는 매설관의 여러 가지 관 단부경계조건에 대한 매설관의 동적거동 해석법으로 3D 유한차분 해석법을 제안하며 이 해석법의 정확성을 검증한 후 그 결과를 모드중첩법의 결과와 비교하여 보았다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 축방향 양단자유 단부경계조건을 가진 매설관에 대해 EI Centro 지진 기록을 이용하여 Ogawa 등(2001)⁽²⁾의 제안식에 의해 산출된 축방향 변형률 값을 기준으로 Larbi (1995)⁽¹⁾의 모드중첩법과 본 연구에서의 3D 유한차분 해석법에 의한 값들의 차이를 오차로 표시하면 모드중첩법에 의한 값은 6.15%, 3D 유한차분 해석법에 의한 값은 5.93%의 차이를 보여 3D 유한차분 해석법이 더 정확한 해석 결과를 보이고 있다. 따라서, 3D 유한차분 해석법이 매설관에 대한 지진응답을 구하는 또 하나의 대안으로 될 수 있음을 확인하였다.
2. 모드중첩법에 의한 동적응답 산정식의 복잡성과 그 식들의 활용에 있어 별도의 수치해석 프로그래밍의 기법이 필요하므로 기술자들의 실무 적용에 대단한 어려움이 있는데 반하여 범용프로그램인 FLAC 3D에 의한 보다 쉬운 방법으로 동적 지진응답을 구할 수 있는 3D 유한차분 해석법의 장점을 확인하였다.

3. 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법의 결과를 비교하면 다음과 같다. 비교를 위해 전파속도 300m/sec와 2000m/sec의 정현파에 대해 각 단부경계조건에 따른 최대변위응답을 비교하였다. 축방향 단부경계조건에서는 전파속도 300m/sec일 경우 3D 유한차분 해석법의 최대변위응답이 모드중첩법에 대하여 양단자유 경계조건에서 약 40.71%, 양단고정 경계조건에서 약 40.15%, 일단고정-일단자유 경계조건에서 약 38.45%만큼 크게 나타나며 전파속도 2000m/sec일 경우 양단자유 경계조건에서 약 9.14%, 일단고정-일단자유 경계조건에서 약 9.22%만큼 크게, 양단고정 경계조건에서는 약 8.50%만큼 작게 나타났다. 축직각방향 관 단부경계조건에서는 전파속도 300m/sec일 경우 3D 유한차분 해석법의 최대변위응답이 모드중첩법에 대하여 양단자유 경계조건에서 약 8.89%, 양단고정 경계조건에서 약 7.99%, 일단고정-일단자유 경계조건에서 약 23.20%, 양단힌지 경계조건에서 약 5.71%만큼 작고, 양단롤러와 일단힌지-일단롤러 경계조건에서는 약 7.45%만큼 크게 나타났다. 2000m/sec일 경우 3D 유한차분 해석법의 최대변위응답이 모드중첩법에 대하여 양단자유 경계조건에서 약 39.38%, 일단고정-일단자유 경계조건에서 약 10.35%, 양단롤러 경계조건에서 약 22.02%, 양단힌지 경계조건에서 약 3.84%, 일단힌지-일단롤러 경계조건에서는 약 16.83%만큼 크고, 양단고정 경계조건에서 약 20.62%만큼 작게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2008-045)

참 고 문 헌

1. Ahcene, Larbi., Earthquake Resistance of Buried Pipelines, A Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 23-43, 1995.
2. Ogawa, Y., and Koike T., "Structural design of buried pipelines for severe earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, 199-209. 2001.
3. 김성반, 정진호, 이병길, "매설관의 동적거동에 관한 연구(1)," 대한토목학회학술발표논문집, 5428-5433, 2004.
4. 이병길, 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석, 박사학위논문, 부경대학교, 2005.
5. 이병길, 정진호, 장봉현, 안명석, "양단자유 경계조건을 가진 매설관의 동적거동에서 진동안전 기준에 관한 연구," 대한화

- 약발파공학회, 제22권, 제3호, 13-26, 2004.
6. 장봉현, 정진호, 이병길, “매설관의 동적거동에 대한 수치적 해석 접근(1),” 대한토목학회학술발표회 논문집, 4092-4096, 2003.
 7. 장봉현, 정진호, 이병길, “매설관의 동적거동에 대한 수치적 해석 접근(2),” 대한토목학회학술발표회 논문집, 4097-4102, 2003.
 8. 장봉현, 정진호, 이병길, “매설관의 동적거동에 관한 연구(2), 대한토목학회학술발표회논문집,” 5422-5427, 2004.
 9. 정진호, 이병길, 정두희, 박병호, “단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석,” 한국지반공학회특별논문집, 제21권, 제5호 33-43, 2005.
 10. 정진호, 임창규, 정두희, 국승규, “각종 매설관의 동적거동에 관한 연구,” 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제4호 15-24, 2006.