공학석사 학위논문

매설관의 *3*차원 동적응답거동에 대한 연구

*2007*년 *2*월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

김 춘 진

공학석사 학위논문

매설관의 *3*차원 동적응답거동에 대한 연구

지도교수 정 진 호

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007년 2월

부경대학교대학원

토목공학과

김 춘 진

김춘진의 공학석사

학위논문으로 인준함

2007년 2월 23일

주 심 농공학박사 이 영 대 (인)

위 원 공학박사 정 두 회 (인)

위 원 공학박사 정 진 호 (인)

목 차

표 목차

그림 목차

The Study on 3-D Seismic Response of the Buried Pipelines

Chun Jin Kim

Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry,

Pukyong National University

Abstract

This research is for dynamic behavior of seismic wave using two different methods, 3D finite difference method and mode superposition method. The aim of the research is to compare these results about various boundary end conditions of buried pipeline and the results for this are as shown below.

Based on the axial strains in the middle of the buried pipeline with free ends boundary condition, we have found that the axial strain obtained by mode superposition method is appeared higher 6.15% and that by 3D finite difference method is appeared higher 5.93% than that obtained by using the formula of Ogawa(2001).

To compare the results of the mode superposition method with the 3D finite difference method, this research is analyzed with the sinusoidal wave of transmission velocity 300m/sec and 2000m/sec, respectively. We have studied the difference of the maximum displacement responses for axial direction obtained by the both methods in case that the transmission velocity is 300m/sec. The 3D finite

difference method have shown higher values than the mode superposition method in degree of about 38.45%~40.71% for the free ends, fixed ends and fixed-free ends boundary condition. When transmission velocity is 2000m/sec, the maximum displacement response by 3D finite difference method have shown higher values than the mode superposition method in degree of about 9.14%~9.22% for the free ends and fixed-free ends boundary condition. However, at the fixed ends boundary condition, the maximum displacement response of the 3D finite difference method have shown lower values than the mode superposition method by 8.50%. At the boundary condition for the transverse direction of the pipeline in case that the transmission velocity is 300m/sec, the maximum displacement responses by the 3D finite difference method have shown lower values than the mode superposition method in degree of about 7.99% at the fixed ends, about 8.89% at the free ends, about 23.20% at the fixed-free ends and about 5.71% at the simply supported ends boundary condition. However, it has shown higher values about 7.45% at the guided ends and the supported-guided ends boundary condition both. When transmission velocity is 2000m/sec, it also is higher values in degree of about 39.38% at the free ends, about 10.35% at the fixed-free, about 22.02% at the guided ends, about 3.84% at the simply supported ends, about 16.83% at the supported-guided ends boundary condition. However, it has shown lower values about 20.62% at the fixed ends boundary condition.

In the analysis of seismic response of the buried pipeline, thickness of the buried pipe doesn't really affect the dynamic behavior of buried pipeline even with the changes of ends boundary conditions of buried pipeline based on both the axial direction and transverse direction.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

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 조기진압불능이 원인이었다는 것도 이러한 요구를 뒷받침하고 있다.

또한 최근 환태평양 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)는 양단고정, 양단자유 경계조건에 대한 매설관의 동적거동을 모드중첩법을 이용하여 해석하였고 이병길 등(2005)은 모드중첩법을 이용하여 축방향 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 경계조건 및 축직각방향 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 경계조건에서의 해석을 하였다. 두 연구에서 사용하였던 모드중첩법은 산정식을 이용한 해석으로서 복잡한 식을 산정하고 식에 대한 계산은 별도의 전산 프로그램을 이용하여 계산해야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 해석을 어려움을 해결하기 위해 본 연구에서는 3D 수치해석 프로그램을 이용한 3D 유한차분 해석법을 사용하였다.

이에 본 연구에서는 매설관의 지진파 거동에 대한 모드중첩법과 3D 유

한차분 해석법의 결과를 비교하여 3D 내진해석방법을 제시함으로써 보다 쉽고 빠른 해석을 수행할 수 있는 틀을 제안하고자 한다.

1.2 연구동향

1.2.1 국외 연구동향

1.2.1.1 매설관 해석 모델에 관한 연구

상대적으로 폭넓게 사용되어 왔던 매설관 모델은 원통형 쉘 모델이다. Muleshi 등(1978)은 Flugge의 얇은 쉘 모형 이론을 바탕으로 한 쉘 모델을 발표하였다. Datta 등(1982)은 쉘 모델을 이용한 매설관의 선대칭 동적 반응에 대해 연구하였다.

최근 다른 모델과 특히 쉘 모델의 불합리성을 밝히기 위해 Mishra 등(1990)은 탄성이론을 바탕으로 더욱 정확한 해석을 발표했다. 이 해석은 매설관의 재료와 주변지반이 균질, 탄성, 등방성이며 훅의 법칙을 따른다고 가정하였으며 지반과 파이프 사이는 완전 강결 되었다고 가정하였다.

매설관 해석을 위해 가장 간단하고 많이 사용되는 모델은 탄성기초 위에 놓인 보이다. 이와 같은 모델은 1965년 8월 3일에서 1967년까지 Matsushiro 지진에서 매설관 시험을 통해 얻어진 결과를 증명하기 위해 Sakurai 등(1969)에 의해 적용되었고 지진파를 단순한 정현파 형태로 사용한 것은 지반 변위 입력을 위한 것이었다. 이 모델을 바탕으로 지반-매설관 상대변위는 지반강성에 따라 감소하며 휨변형률에 대한 축방향 변형률비는 매설관의 직경이 커짐에 따라 감소하고 터널과 같이 직경이 큰 매설관의 경우 휨변형률이 고려되어져야 한다고 하였다.

1.2.1.2 지진파에 의한 매설관로의 거동 연구

지진파에 의한 매설관로의 거동해석은 Newmark(1978)에 의해 단순 해

석법이 제안되어 본격적으로 논의되기 시작하였다.

Sakurai(1968)와 Ariman(1981) 등에 의한 초보적 연구에 이어 Shiozuka (1983)에 의한 해석적인 연구에서는 매설관로를 둘러싸고 있는 지반의 높은 구속과 감쇠효과로 인해 매설관로의 거동 해석 시 동적인 영향이 매우 미약하다는 것을 보여 주었다. 이에 착안하여 O′Rourke 등(1998)은 탄성지반 위의 보(Beam on Elastic Foundation) 이론에 근거한 매설관로의 해석모형을 사용하여 탄성영역에서 매설관의 변형률을 계산하였다.

O′Rourke와 Wang(1982)은 지반과 매설관의 동적 영향을 고려하지 않고 오직 지반운동의 시간이력에 따른 매설관의 거동을 파악할 수 있는 의사정적 해석을 수행하였다.

Mavridis 등(1996)과 Shakib 등(1995)이 지진파에 의한 지반과 매설관의 상호작용의 영향을 고려한 동적 해석을 수행하였다. 실제 지진 기록을 바탕으로 한 지반변위와 속도의 시간이력을 사용한 해석방법을 도입하였다.

1.2.2 국내 연구동향

1.2.2.1 유한차분법을 이용한 탄성파 모델링 연구

유해수 등(2003)은 주파수 영역과 시간 영역에서 매질의 물성만으로 자유면 경계조건을 정확히 묘사할 수 있는 새로운 2차원 변위근사 유한차분법을 제안하였다.

민동주 등(2004)은 MASW(Multichannel Analysis of Surface Waces)법의 적용가능성 연구 중 유해수 등(2003)이 제안했던 2차원 탄성파 모델링 방법을 3차원 탄성파 모델링에 적용하였다. 이는 실제 지하매질에서 파동은 3차원적으로 전파되므로 실제 파동의 전파를 정확히 묘사하기 위해서는 3차원 탄성파 모델링이 필요하기 때문이다. 3차원 탄성파 모델링의 경우 간단한 시간-공간영역 모델링이라 할지라도 많은 컴퓨터 메모리와 계

산시간을 필요로 하므로 응력과 속도를 함께 이용하는 엇격자법보다는 변위만을 이용하며 정확한 해를 제시하는 유한차분법이 필요하다.

1.2.2.2 관 단부경계조건에 대한 매설관의 동적응답 연구

이병길 등(2005)은 관 단부경계조건이 매설관의 동적응답에 미치는 영향에 대한 규명과 관의 동적응답에 영향을 주는 매개변수들의 영향에 대해 규명하였으며 수치해석을 통한 변위, (휨)변형률 산정식을 제안하였다.

1) 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부 경계조건의 매설관에 대한 축방향 변위, 변형률 산정식을 유도하였으며, 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건의 매설관에 대한 축직각방향의 변위, 곡률, 휨변형률 산정식을 유도하였다.
2) 매설관의 지점위치별 변위와 변형률응답을 해석한 결과 관 단부 경계조건에 따라 그 응답은 다른 양상을 보였으며 최대 변위와 변형률의 크기 및 발생하는 지점의 위치가 달리 산정되어 관 단부 경계조건의 영향을 확인할 수 있었다.

1.3 연구방법 및 범위

Larbi(1995)와 이병길 등(2005)이 매설관 동적거동 해석에 사용하였던 모드중첩법은 그 해들을 구하는 과정이 어려울 뿐만 아니라 동적응답(변위와 변형율)을 구하기 위해 산정된 해에 대해 별도의 수치해석 기법을 전산 프로그래밍한 후 이를 이용하여 동적응답을 구할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 불편한 계산과정이 없는 방법으로 3D 유한차분 해석법을 사용하여 매설관의 동적해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

2장에서는 매설관의 지진파에 대한 모드중첩법 해석에 대해 검토하였다.

단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답에 대해 설명하고 그 해석결과를 나타내었다.

3장에서는 3D 수치해석 프로그램인 FLAC 3D를 소개하고 유한차분 요소망의 구성과 동하중 입력 방법에 대해 제안하였다. 모델링 방법으로는 해석요소 수에 따른 해석시간과 정확성에 대해 검토하고 입력지진파의 입력조건을 설정하였으며 감쇠와 해석시간간격에 따른 적절한 모델을 선정하였다. 그리고 선정된 모델에 대해 정현파를 통과시켰을 경우 해석결과를 나타내었다.

4장에서는 3D 유한차분 해석법으로 얻어진 해석결과를 Ogawa 등(2001)과 Larbi(1995)의 연구에서 얻어진 축방향 변형률과 비교 검정하였으며 3D 유한차분 해석법으로 지점별 변위응답 해석을 수행하여 모드중첩법 해석결과와 비교하였다.

5장에서는 유한차분 동적해석에서 관의 두께에 대한 영향을 검토하였다.

2. 모드중첩법에 의한 동적해석

2.1 매설관의 자유진동 거동

2.1.1 축방향 자유진동

매설관을 탄성기초 위에 놓인 보로서 해석하였으며 축방향 자유 진동을 지배하는 미분방정식은 다음과 같다(Clough 등, 1975; Zerva 등, 1988; Larbi, 1995).

$$m\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2}+C_A\frac{\partial v(y,t)}{\partial t}+K_A v(y,t)-E_pA\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2}= 0 \qquad (2.1)$$

여기서,

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

m (kg/m) : 매설관의 단위 길이당 질량

C_A (N.sec/m/m), K_A (N/m/m) : 지반과 Winkler 기초에 대한 단위 길이당 감쇠계수와 축방향 강성

E_p (N/㎡), A (㎡) : 매설관의 탄성계수와 단면적

축방향 지배미분방정식은 질량과 감쇠계수, 축방향 강성 그리고 축방향 전파로 인해 발생하는 보의 내부력 항으로 구성되며 변위함수를 통해 모드형상과 고유진동수의 일반해를 산출한다. 이후 단부경계조건에 대해 경계조건을 대입하여 모드형상과 고유진동수 산정식을 구한다.

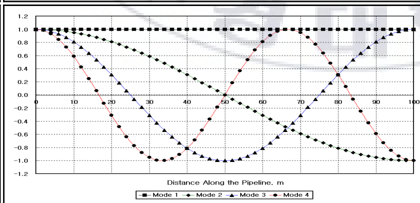
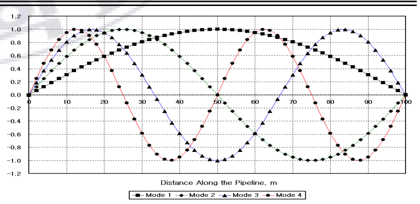
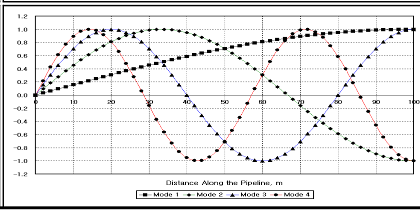
축방향 자유진동에서 고려된 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 경계조건에 대한 모드형상과 고유진동수에 대한 산정식은 표 2.1과 같다. 표 2.2는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부 경계조건에 대한 축방향에 대해 처음 네 개의 모드수(k=1, 2, 3, 4)에 대한 모드형상을 보이고 있다. $\phi_k(y)$와 ω_k는 각각 모드형상과 고유진동수를 뜻한다.

표 *2.1* 축방향 자유진동에서 경계조건을 고려한 모드형상과 고유진동수 *(Larbi, 1995;* 이병길 등*, 2005)*

Boundary Condition *	Model / Boundary Value	Mode Shape, $\phi_k(y)$ / Natural Frequency, ω_k
Free Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y)=\cos\frac{(k-1)\pi y}{L};\ k=1,2,3,\ldots$
	$\phi'(0)=0,\ \phi'(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\frac{K_A}{m}\left\{1+\frac{E_pA}{K_A}\left(\frac{(k-1)\pi}{L}\right)^2\right\}}$
Fixed Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y)=\ \sin\frac{k\pi y}{L};\ k=1,2,3,\ldots$
	$\phi(0)=0,\ \phi(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\frac{K_A}{m}\left\{1+\frac{E_pA}{K_A}\left(\frac{k\pi}{L}\right)^2\right\}}$
Fixed Free Ends		$\phi_k(y)\ =\ \sin\frac{(2k-1)\pi y}{2L};\ k=1,2,3,\ldots$
	$\phi(0)=0,\ \phi'(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\frac{K_A}{m}\left\{1+\frac{E_pA}{K_A}\left(\frac{(2k-1)\pi}{2L}\right)^2\right\}}$

* Free Ends(양단자유) ; Fixed Ends(양단고정) ; Fixed-Free Ends(일단고정-일단자유)

표 *2.2* 축방향 자유진동에서 경계조건에 따른 처음 네 모드형상 *(Larbi, 1995;* 이병길 등*, 2005)*

Boundary Condition	Free Ends (Larbi, 1995)	Fixed Ends (Larbi, 1995)
First Four Mode Shapes		
Boundary Condition	Fixed-Free Ends	-
First Four Mode Shapes		-

2.1.2 축직각방향의 자유진동

축직각방향 자유진동에 대해 지배적인 미분방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\frac{\partial^2 w(y,t)}{\partial t^2}+C_T\frac{\partial w(y,t)}{\partial t}+K_T w(y,t)+E_p I\frac{\partial^4 w(y,t)}{\partial y^4}=0 \qquad (2.2)$$

여기서,

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

m (㎏/m) : 매설관의 단위 길이당 질량

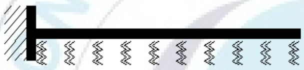
C_T (N.sec/m/m), K_T (N/m/m) : 지반과 Winkler 기초에 대한 단위 길이당 감쇠계수와 축직각방향 강성

E_p (N/㎡) : 매설관의 탄성계수

I (m^4) : 매설관의 관성모멘트

표 2.3에서는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건에 대한 축직각방향에 대해 경계조건과 고유진동수와 모드형상을 나타내고 있으며 표 2.4는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건에 대한 축직각방향에 대해 처음 네 개의 모드수(k=1, 2, 3, 4)에 대한 모드형상을 보이고 있다. $\phi_k(y)$와 ω_k는 각각 모드형상과 고유진동수를 뜻한다.

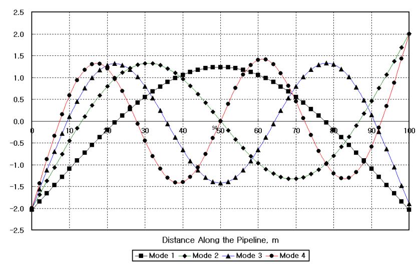
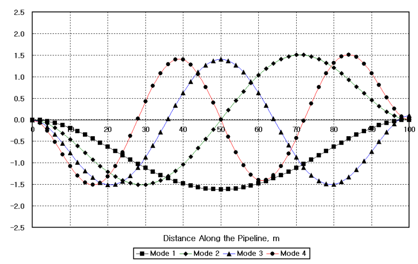
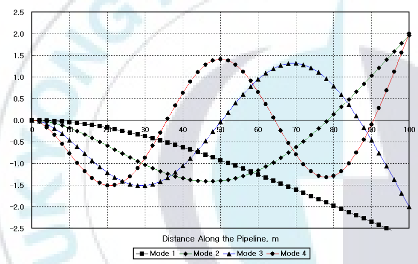
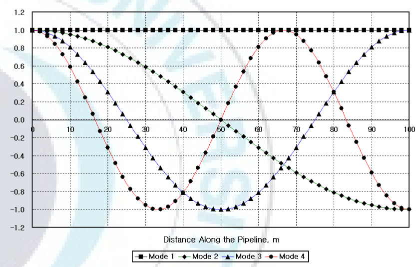
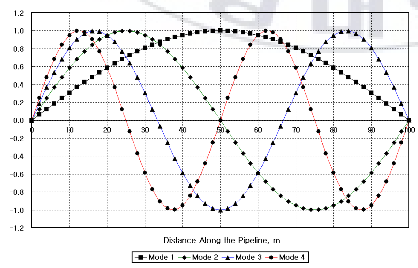
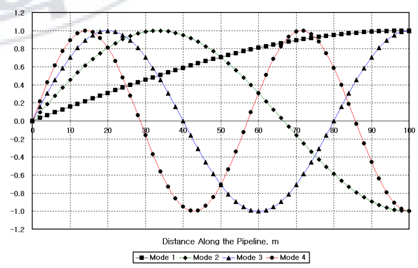
표 *2.3* 축직각방향 자유진동에서 경계조건을 고려한 모드형상과 고유진동수 *(Larbi, 1995;* 이병길 등, *2005)*

Boundary Condition *	Model / Boundary Value	Mode Shape, $\phi_k(y)$ / Natural Frequency, ω_k
Free Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y)=\dfrac{\sin(\beta L)-\sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L)-\cos(\beta L)}\{\cosh(\beta y)+\cos(\beta y)\}+\sinh(\beta y)+\sin(\beta y)$
	$\phi''(0)=\phi''(L)=0$ $\phi'''(0)=\phi'''(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\dfrac{K_T}{m}\left\{1+\dfrac{E_P I}{K_T}\beta_k^4\right\}}$
Fixed Ends		$\phi_k(y)=\dfrac{\sin(\beta L)-\sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L)-\cos(\beta L)}\{\cosh(\beta y)-\cos(\beta y)\}+\sinh(\beta y)-\sin(\beta y)$
	$\phi(0)=\phi(L)=0$ $\phi'(0)=\phi'(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\dfrac{K_T}{m}\left\{1+\dfrac{E_P I}{K_T}\beta_k^4\right\}}$
Fixed Free Ends		$\phi_k(y)=-\dfrac{\sin(\beta L)+\sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L)+\cos(\beta L)}\{\cosh(\beta y)-\cos(\beta y)\}+\sinh(\beta y)-\sin(\beta y)$
	$\phi(0)=\phi''(L)=0$ $\phi'(0)=\phi'''(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\dfrac{K_T}{m}\left\{1+\dfrac{E_P I}{K_T}\beta_k^4\right\}}$
Guided Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y)=\cos\dfrac{(k-1)\pi y}{L}$; $k=1, 2, 3, \ldots$
	$\phi'(0)=\phi'(L)=0$ $\phi'''(0)=\phi'''(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\dfrac{K_T}{m}\left\{1+\dfrac{E_p I}{K_T}\left(\dfrac{(k-1)\pi}{L}\right)^4\right\}}$
Simply Supported Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y)=\sin\dfrac{k\pi y}{L}$; $k=1, 2, 3, \ldots$
	$\phi(0)=\phi(L)=0$ $\phi''(0)=\phi''(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\dfrac{K_T}{m}\left\{1+\dfrac{E_p I}{K_T}\left(\dfrac{k\pi}{L}\right)^2\right\}}$
Supported Guided Ends		$\phi_k(y)=\sin\left(\dfrac{(2k-1)\pi}{2L}y\right)$: $k=1, 2, 3, \ldots$
	$\phi(0)=\phi''(0)=0$ $\phi'(L)=\phi'''(L)=0$	$\omega_k=\sqrt{\dfrac{K_T}{m}\left\{1+\dfrac{E_p I}{K_T}\left(\dfrac{(2k-1)\pi}{2L}\right)^4\right\}}$

* Free Ends(양단자유) ; Fixed Ends(양단고정) ; Fixed-Free Ends(일단고정-일단자유) ;

* Guided Ends(양단롤러) ; Simply Supported Ends(양단힌지) ; Supported-Guided Ends(일단힌지-일단롤러)

표 *2.4* 축직각방향 자유진동에서 경계조건에 따른 처음 네 모드형상 ***(Larbi, 1995;* 이병길 등*, 2005)***

Boundary Condition	Free Ends (Larbi, 1995)	Fixed Ends
First Four Mode Shapes		
Boundary Condition	Fixed-Free Ends	Guided Ends (Larbi, 1995)
First Four Mode Shapes		
Boundary Condition	Simply Supported Ends (Larbi, 1995)	Supported-Guided Ends
First Four Mode Shapes		

2.2 매설관의 강제진동 거동

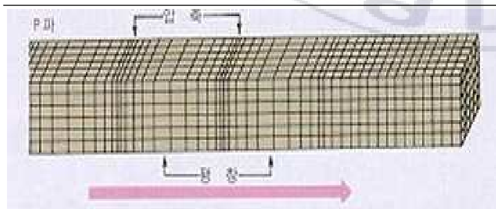
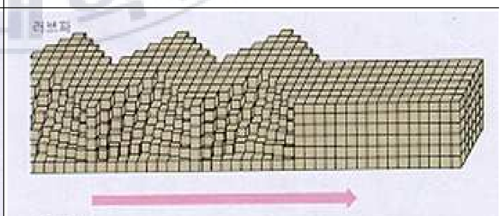
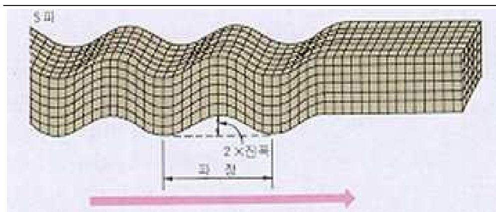
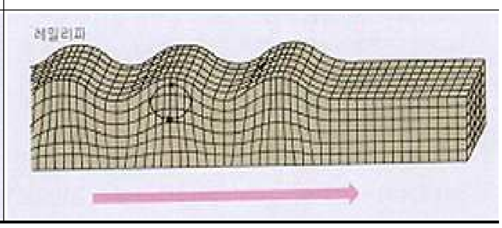
2.2.1 지반 거동

2.2.1.1 지진파

발생지진파(표 2.5)의 종류는 크게 체적파(Body Waves)와 표면파(Surface Waves)로 분류되어지며 체적파(Body Waves)는 지반이라는 매체를 통해 전달된다. 체적파는 압축파(P파)와 전단파(S파)가 있으며 파들의 영향을 받는 입자는 전파방향에 따라 축방향과 축직각방향으로 거동한다.

또 다른 지진파인 표면파(Surface Waves)는 지표면에서 전달되며 대표적으로 러브파와 레일리파가 있다. 두 파는 모두 분산적이고, 전파속도는 파장에 의해 결정된다. 표면파는 체적파에 비해 가속도와 전파속도는 낮으나 주기는 길다. 입자 거동의 차로 인해 러브파는 축직각방향 거동을 야기시키며, 결국 매설관에 휨을 발생시킨다. 반면 레일리파에서 입자의 거동은 매설관에 대해 축방향 및 축직각방향 거동을 발생시킨다.

표 2.5 발생지진파

압축파	러브파
	
전단파	**레일리파**
	

2.2.1.2 **지진파 전파효과**

일반 구조물의 거동과는 달리 매설관로의 거동에서 구조물과 지반의 상대운동으로 인해 발생하는 관성력은 주변 지반의 저항으로 인해 그 효과가 미흡하다. 즉, 매설관을 둘러싸고 있는 지반의 높은 구속과 감쇠효과로 인해 매설관의 거동에 있어서 동적인 영향은 매우 작다. 이러한 사실은 Sakurai 등(1968)과 Shinosuka(1983)에 의한 연구에서 실험적, 해석적으로 증명이 되었다. 따라서 지진파에 의한 매설관의 거동해석 시 매설관의 관성은 고려하지 않는다.

모든 매설관의 운동은 지반의 운동과 지반에 대한 매설관의 상대운동의 두 부분으로 나눌 수 있다. 현재 해석법에서는 지반에 대한 매설관의 상대운동은 무시한다. 즉, 매설관 주변을 둘러싸고 있는 전체 지반은 매설관에 비해 훨씬 강성이 크기 때문에 지반의 변형이 직접적으로 매설관에 영향을 미쳐서 매설관과 지반의 운동이 같다고 가정한다. 실제로 매설관과 접촉하고 있는 지반의 면적은 상당히 크고 이 면적에서 발생하는 마찰력은 매설관이 일반적으로 주변 지반에 따를 수 있도록 충분한 값을 갖는다. 따라서 지반변형과 매설관의 변형은 동일하다고 가정한다.

이 가정은 많은 학자들에 의해 실험적으로 증명되었고 해석적으로도 증명이 가능하다. Sakurai 와 Takahashi(1968)는 지반과 매설관의 변형률을 측정하여 지진 발생시 두 변형도가 큰 차이가 없음을 확인 하였다. 또한, Wang(1978)은 정적 해석모형을 사용하여 매설관과 지반의 변형이 같다는 가정이 모든 크기의 매설관과 지반특성에도 적용 가능하다고 해석적으로 규명하였다.

2.2.1.3 **정현파**

이 장에서 해석의 목적으로, 지진파는 단위 진폭과 각진동수($\overline{\omega}$)을 가진 정현파 형태의 지반 변위로서 모형화 하였고, 겉보기 전파속도(V)로 전파

된다. 축방향 진동에 대해서, 지반 거동($V_g(y,t)$)은 Heaviside 함수와 시간(t)과 거리(y)의 함수로서 표현되어 진다.

$$V_g(y,t)= H(t-y/V)\sin(\overline{\omega}t-\overline{\omega}y/V) \tag{2.3}$$

또는 $$V_g(y,t)= H(t-y/V)\sin(\overline{\omega}t-2\pi y/\lambda) \tag{2.4}$$

여기서, $\lambda= \dfrac{2\pi V}{\overline{\omega}}$는 지진파의 파장이다.

*H(t)*는 Heaviside 함수로서 매설관의 동적응답을 구하기 위해 해석에 이용되어지고 다음과 같은 조건을 가진다.

$$H(t-y/V)=0, \quad for\ all\ t<y/V \tag{2.5a}$$

$$H(t-y/V)=1, \quad for\ all\ t>y/V \tag{2.5b}$$

사인함수와 같은 유사한 표현은 축직각방향에서 지진 지반거동($w_g(y,t)$)을 묘사하는데 사용된다. 지반 변위는 매설관의 축방향에 대해 관측되었다.

2.2.2 축방향 강제진동

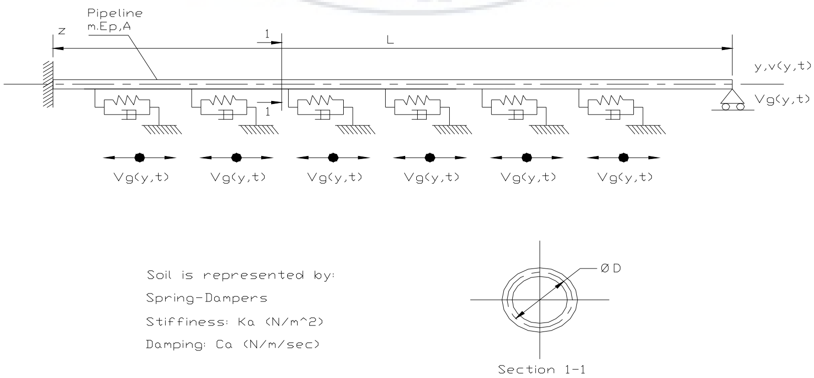


그림 *2.1* 축방향 강제진동에 대한 매설관 모델

매설관은 탄성기초 위에 놓인 보로서 모형화 되었다(그림 2.1과 그림 2.2). 파의 전파는 좌측 끝단(t=0)에서 전파된다. 축방향 진동에서 매설관의 거동을 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
& m\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} + C_A\frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + K_A v(y,t) - E_p A\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} \\
&= C_A\frac{\partial v_g(y,t)}{\partial t} + K_A v_g(y,t) \qquad (2.6)
\end{aligned}
$$

여기서, $v_g(y,t)$: 축방향 지반 변위

식 (2.6)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 Simpson법칙에 따라 단계적으로 전개한 후 정리하면 매설관의 축방향 변위($v_A(y,t)$)와 변형률($\epsilon_A(y,t)$) 산정식은 표 2.6과 같다.

표 *2.6* 축방향 진동에서 변위 및 변형률 산정식
(Larbi, 1995;* 이병길 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	$\epsilon_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)\pi}{2L} \cos\frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

2.2.3 축직각방향 강제진동

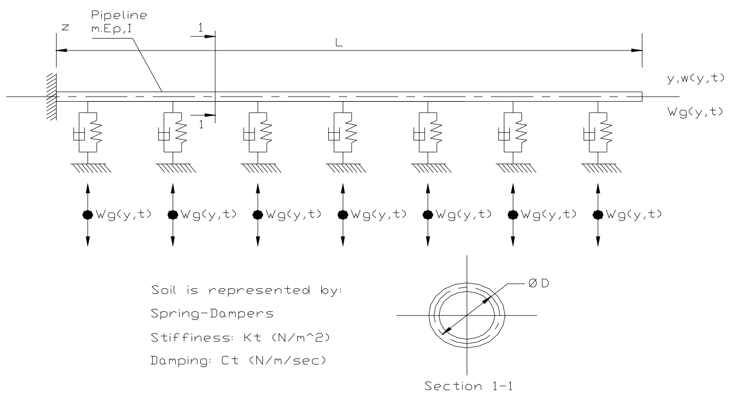


그림 *2.2* 축직각방향 강제진동에 대한 매설관 모델

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

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

$$=C_T\frac{\partial w_g(y,t)}{\partial t}+K_T w_g(y,t) \tag{2.7}$$

여기서, $w_g(y,t)$: 축직각방향 지반변위

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

$$w(y,t)=\sum_{k=1}^{\infty}\phi_k(y)q_k(t) \tag{2.8}$$

$$\text{즉, } w_k(y,t)\ =\ \phi_k(y)q_k(t) \tag{2.9}$$

식 (2.9)를 $\phi_k(y)$가 곱해진 식 (2.7)에 대입하고, 매설관의 길이에 대해 적분하여, 모드 형상에 대한 직교성을 이용함으로서 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\ddot{q}_k(t)+\frac{C_T}{m}\dot{q}_k(t)+\frac{K_T}{m}q_k(t)\left\{1+\frac{\beta_k^4 E_p I}{K_T}\right\}$$
$$=\frac{1}{mL_k}\int_0^L \phi_k(y)\left[C_T\dot{w}_g(y,t)\ +\ K_T w_g(y,t)\right]dy \qquad (2.10)$$

여기서, $L_k=\int_0^{L_t}\phi_k^2(y)dy$로서 L_t는 지진파가 t=0에서 매설관의 좌측단부를 진동한 후 이동한 거리를 말하고 이때의 모드형상 제곱의 합을 L_k라고 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 2.7과 같다.

표 2.7 축직각방향 진동에서 변위 및 휨변형률 산정식 (*Larbi, 1995;* 이병길 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	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2}\kappa_T(y,t) = -\frac{D}{2}\sum_{k=1}^{\infty}\left(\frac{(2k-1)\pi}{2L}\right)^2 \sin\frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

2.3 해석대상

매설관의 동적응답 해석을 수행하기 위하여 Larbi(1995)가 발표한 콘크리트 매설관을 예로 해석하였으며 매설관의 기하학적, 재료적 특성 및 지반특성치는 표 2.8과 같다.

표 2.8 매설관의 기하학적, 재료적 특성 및 지반특성치 (Larbi, 1995)

Classification		Symbol (unit)	Value
Concrete Pipe	Modulus of Elasticity	E_P (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/㎥)	2.2×10^3
	Mass per Unit Length	m (kg/m)	2.0735×10^3
Soil	Axial Soil Stiffness	K_A (N/m^2)	9.34×10^7
	Lateral Soil Stiffness	K_T (N/m^2)	14.01×10^7

2.4 매설관의 일시적 및 정상상태 변위응답

표 2.9와 표 2.10은 단부 경계조건에 따른 축방향 강제진동과 축직각방향 강제진동에 대한 매설관의 전형적인 변위응답을 보여주고 있다.

응답은 지반 진동과 같은 주기를 가진 정현파 형태로 나타나며, 다음의 두 가지 형태로 구별될 수 있다. 일시적 응답은 매설관의 전장을 통과하기 전에 나타나는 동적응답으로 정의된다. 이것은 파가 매설관 전장을 통과할 때까지 계속되며, 매설관이 정상상태에 도달하기 전에 몇 개의 진동을 받을 만큼 충분한 시간을 가진다. 파가 매설관의 전장을 통과하면 응답은 정현파가 되고 일정한 진폭을 가진다. 이와 같이 파가 매설관의 전장을 통과한 후, 정현파의 하중이 지속적으로 가해지는 상태의 동적응답을 정상상태 응답이라고 정의된다. 일정한 진폭을 가지며 주기는 지반진동의 주기와 같아진다.

표 2.9 매설관의 중간지점에서의 축방향 변위응답(이병길 등, 2005)

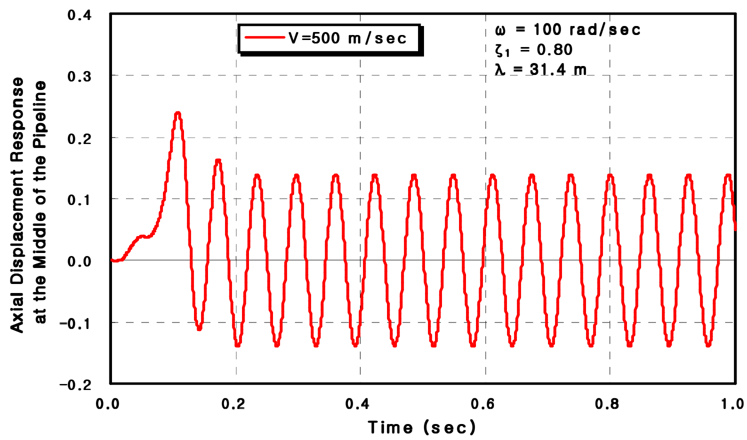
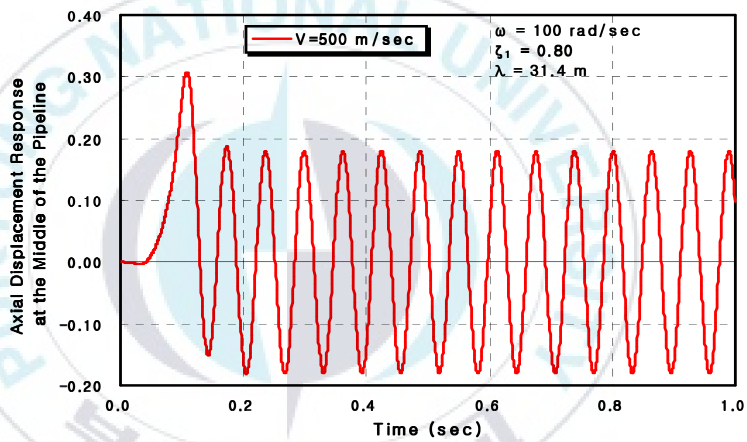
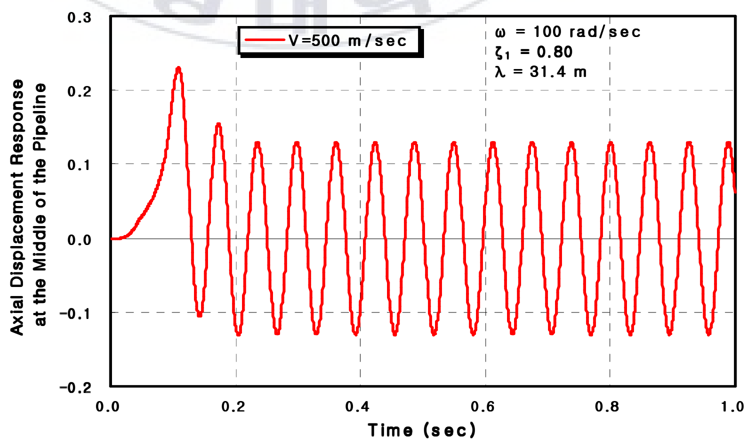
<table>
<tr><td>Free Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed-Free Ends</td><td>
</td></tr>
</table>

표 *2.10a* 매설관의 중간지점에서의 축직각방향 변위응답*(*이병길 등*, 2005)*

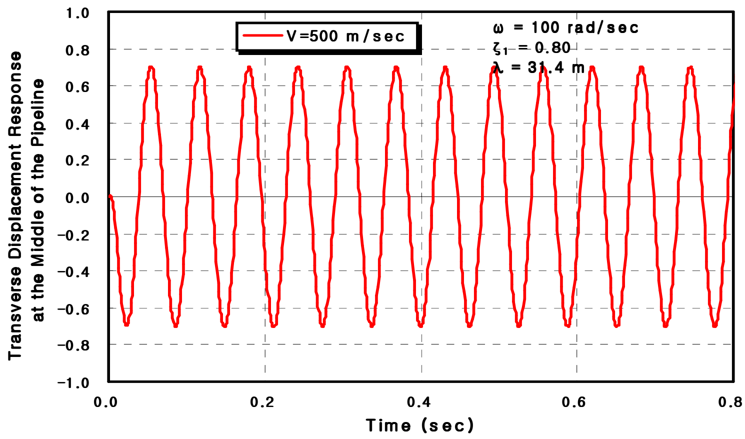
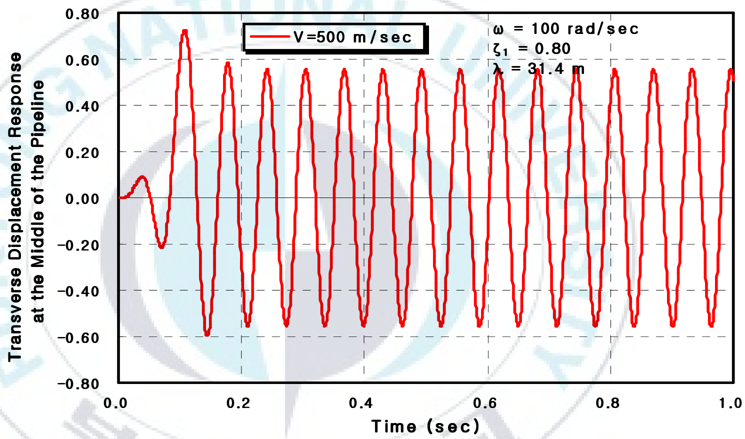
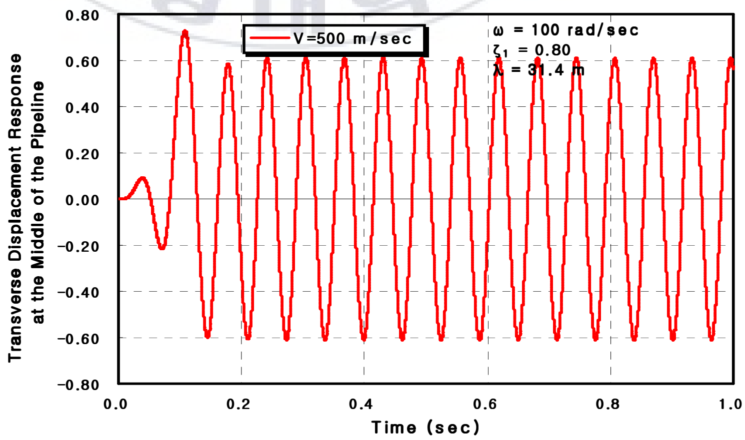
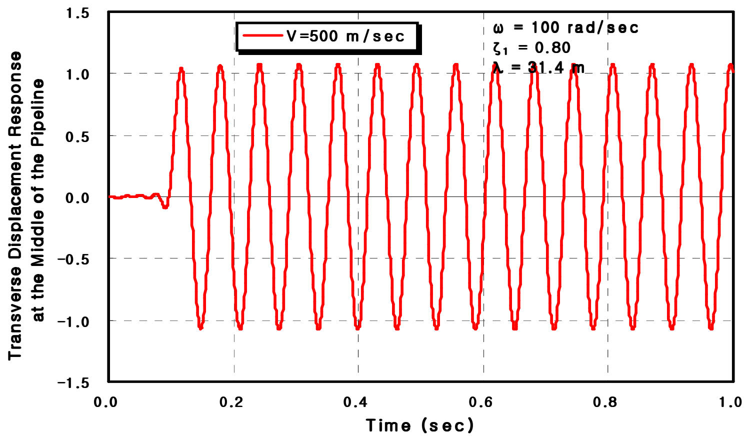
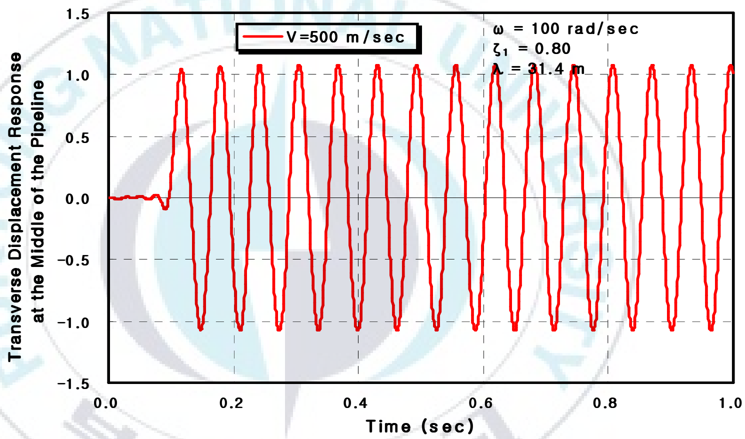
<table>
<tr><td>Free Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed-Free Ends</td><td>
</td></tr>
</table>

표 *2.10b* 매설관의 중간지점에서의 축직각방향 변위응답(이병길 등, *2005)*

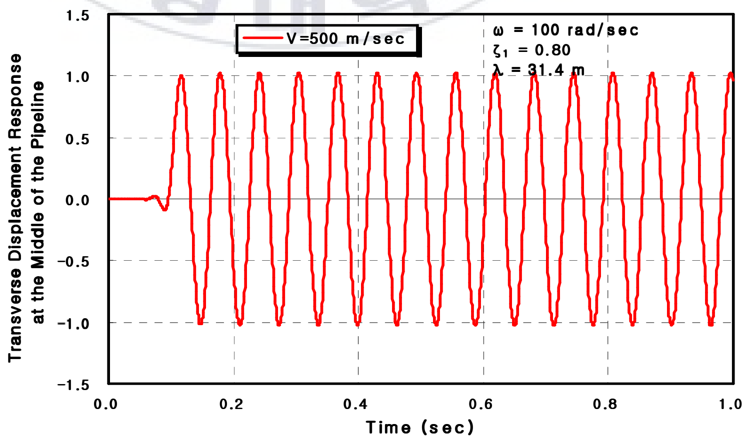
Guided Ends



Simply Supported Ends



Supported-Guided Ends



2.5 매설관의 지점위치별 변위응답

표 2.11과 표 2.12는 전파속도(V) 300m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 30rad/sec와 전파속도(V) 2000m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 5rad/sec에 대해 관 단부 경계조건에 따른 지점위치별 축방향 변위응답을 나타낸 것이다. 표 2.13과 표 2.14는 전파속도(V) 300m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 30rad/sec와 전파속도(V) 2000m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 5rad/sec에 대해 관 단부 경계조건에 따른 지점위치별 축직각방향 변위응답을 나타낸 것이다. 첫 번째 모드에 산정되는 감쇠비는 80%를 적용하였다.

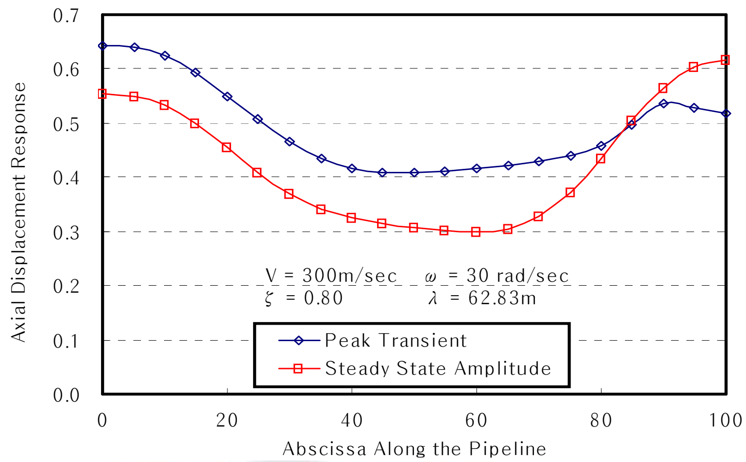
표 2.11과 표 2.12에서 볼 수 있듯이 축방향에서 양단자유의 경우, 끝단에서 가장 큰 변위응답을 가지며 중앙부에서 가장 낮은 변위응답을 보이고 있다. 양단고정인 경우 양 끝단에서는 변위가 중앙지점 좌우편에서 최대응답을 보인다. 일단고정-일단자유 경계조건에선 고정단에서 변위가 발생하지 않고 자유단에서 가장 큰 변위 응답을 보이며 전파속도(V)가 300m/sec일 경우는 일시적 응답이 우세하며 전파속도가 증가할수록(2000m/sec) 정상상태 응답이 우세함을 알 수 있다.

전파속도(V) 300m/sec일 경우 양단자유와 일단고정-일단자유 단부 경계조건에서 일시적 응답은 매설관 길이의 약 85% 이후에서는 감소하여 정상상태 응답이 발생되는 것을 알 수 있다. 이는 매설관 길이의 85% 이후의 지점에서는 일시적 응답의 지속시간 동안 적은 수의 진동을 받기 때문이다.

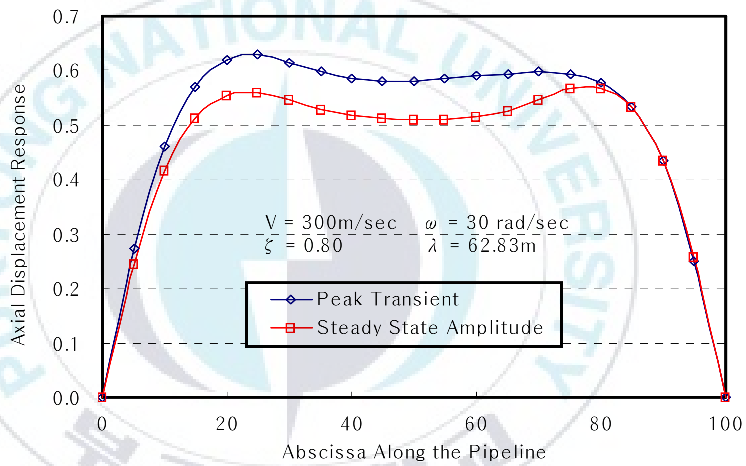
표 2.13은 축직각방향에 대한 전파속도 300m/sec, 표 2.14는 축직각방향에 대한 전파속도 2000m/sec일 경우 6가지 단부 경계조건에 대한 변위 응답을 보이고 있다. 관 단부에서의 응답 거동은 일시적 응답이 축방향에서와 동일하게 매설관 길이의 약 85% 이후에서 감소하는 경향을 보이지만 정상상태 응답의 최대 변위응답 발생위치는 약간의 차이를 보인다. 전파속도가 증가함에 따라(2000m/sec) 정상상태 응답이 우세함이 뚜렷이 나타난다.

표 *2.11* 단부 경계조건에 따른 축방향 변위응답*(V=300m/sec)*

Free Ends



Fixed Ends



Fixed-Free Ends

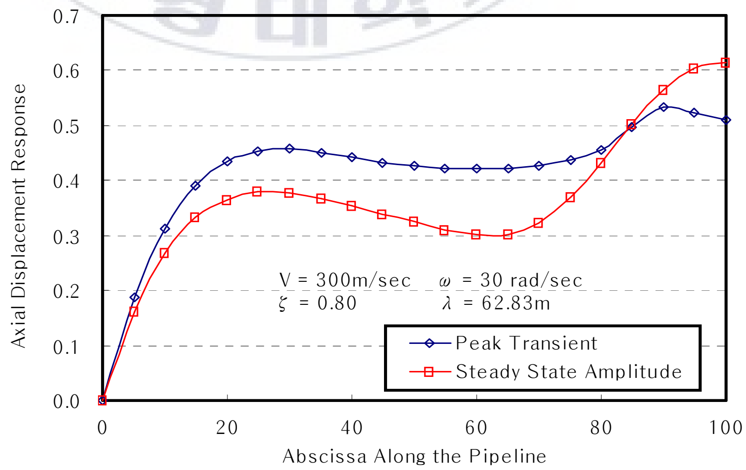
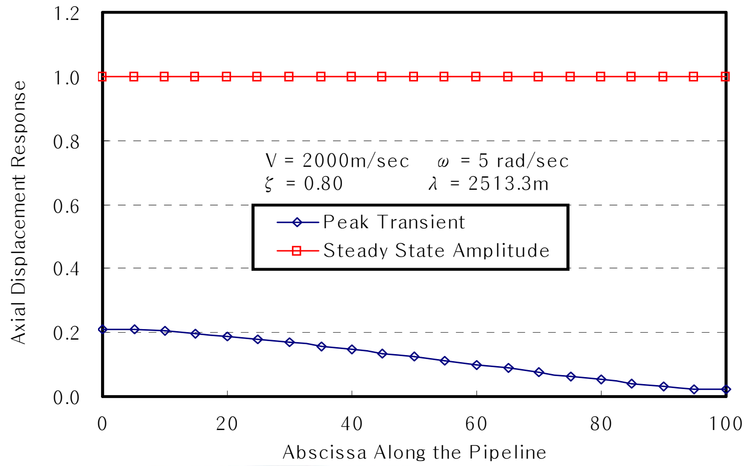
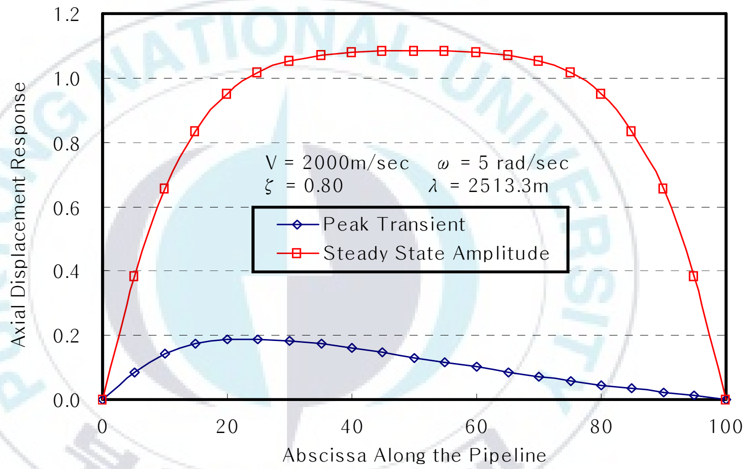


표 2.12 단부 경계조건에 따른 축방향 변위응답(*V*=2000*m/sec*)

Free Ends



Fixed Ends



Fixed-Free Ends

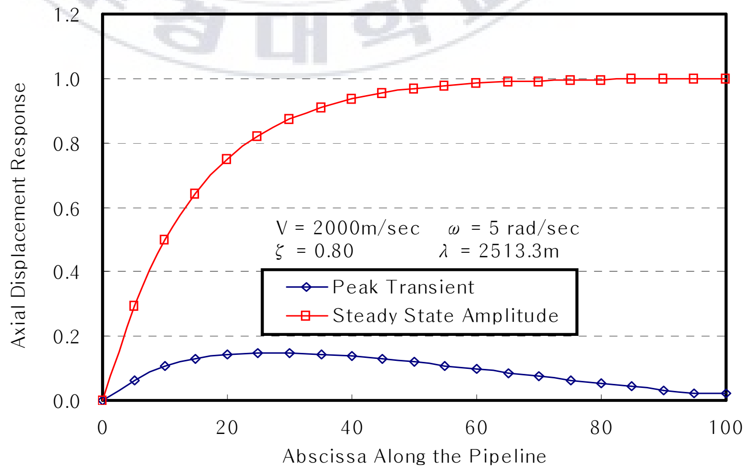


표 *2.13a* 단부 경계조건에 따른 축직각방향 변위응답*(V=300m/sec)*

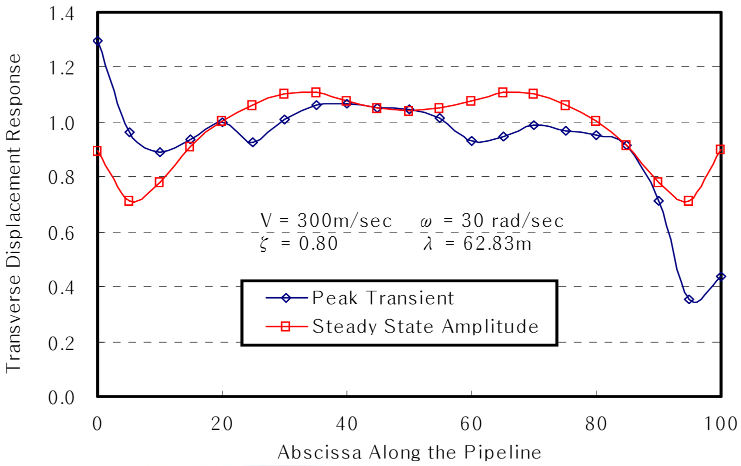
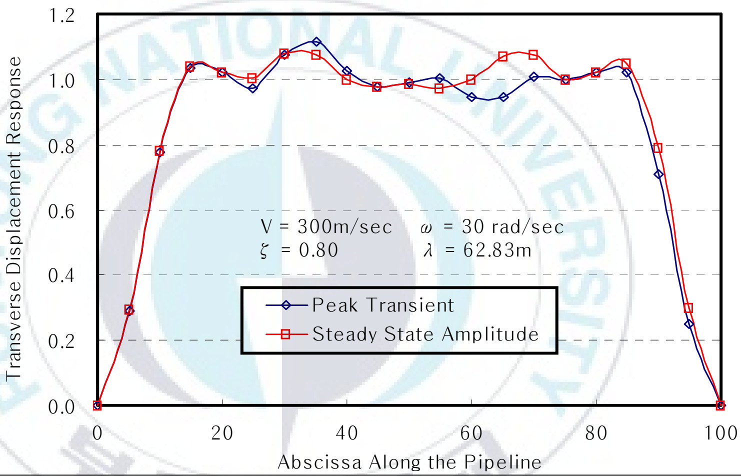
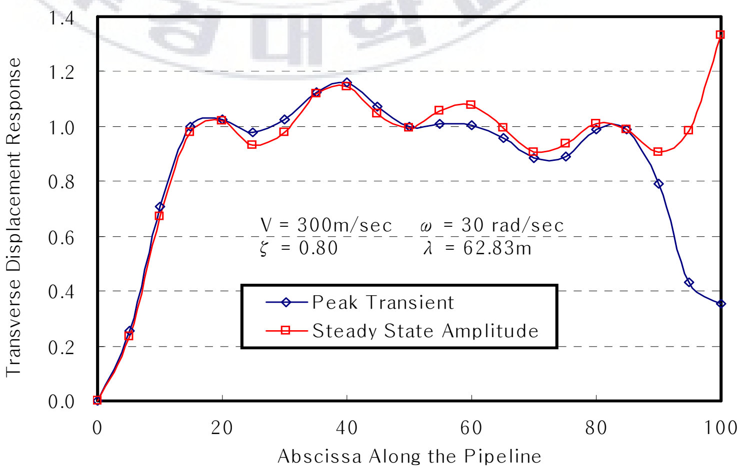
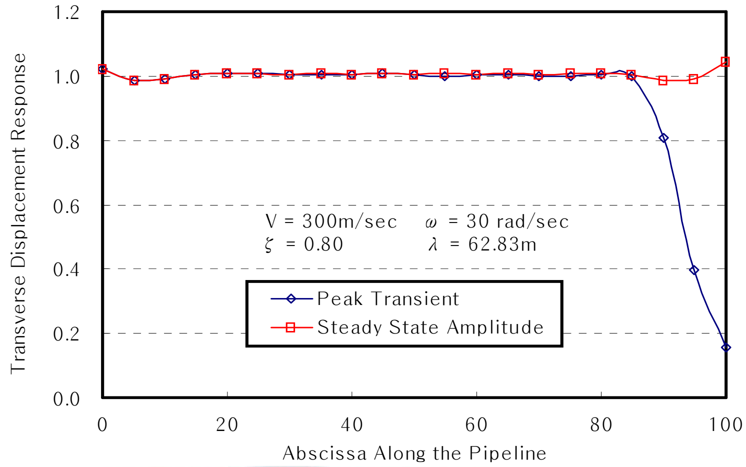
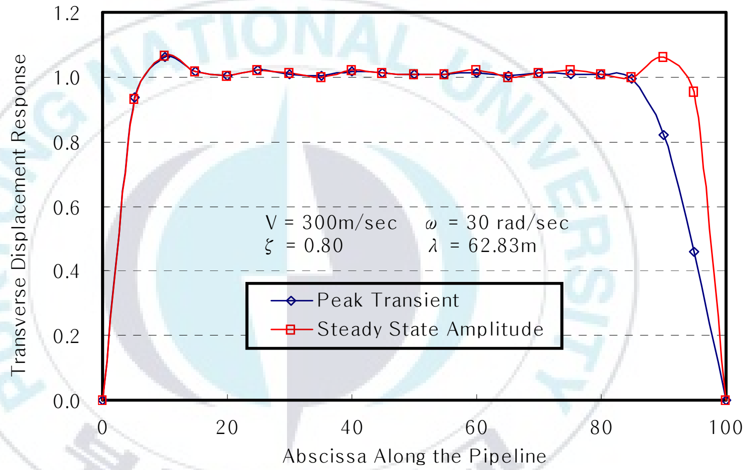
Free Ends	
Fixed Ends	
Fixed-Free Ends	

표 *2.13b* 단부 경계조건에 따른 축직각방향 변위응답*(V=300m/sec)*

Guided Ends



Simply Supported Ends



Supported -Guided Ends

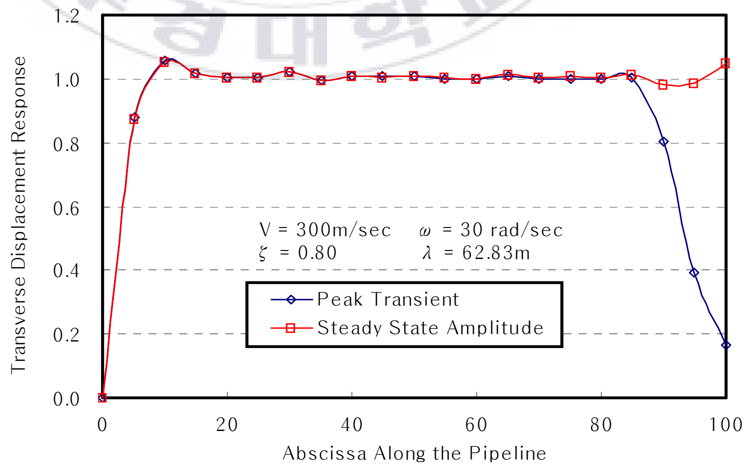
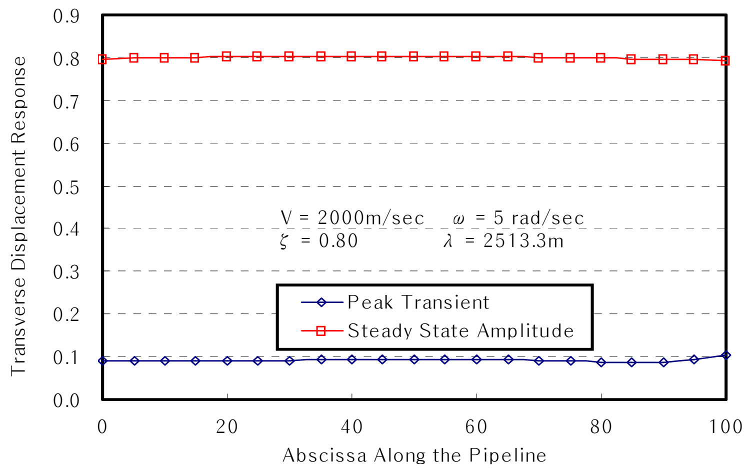
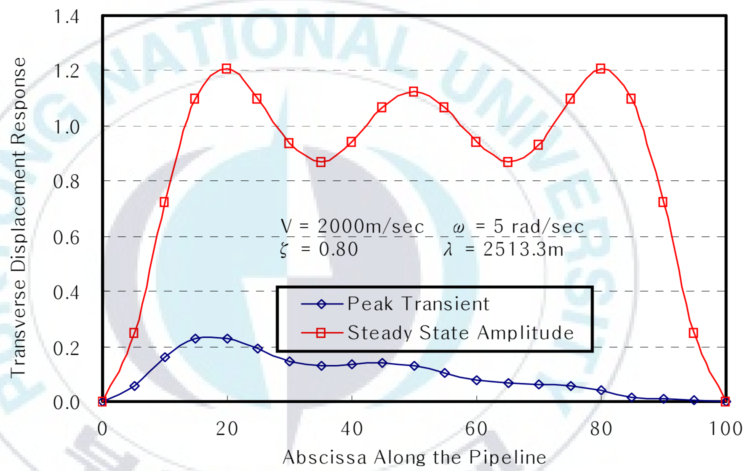


표 *2.14a* 단부 경계조건에 따른 축직각방향 변위응답*(V=2000m/sec)*

Free Ends



Fixed Ends



Fixed-Free Ends

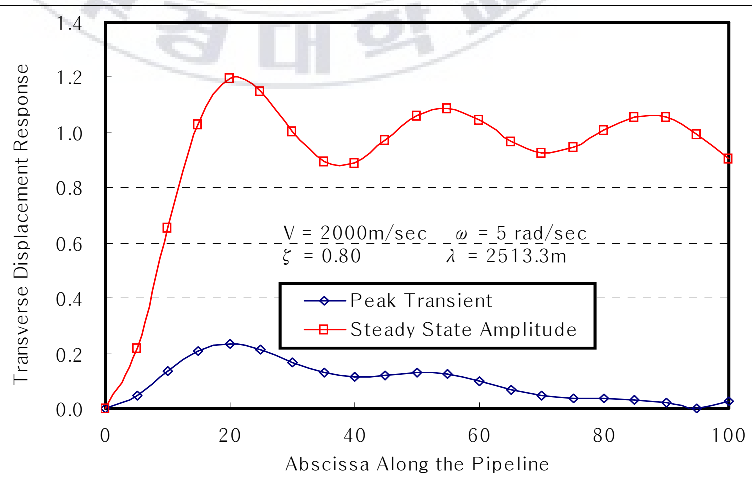
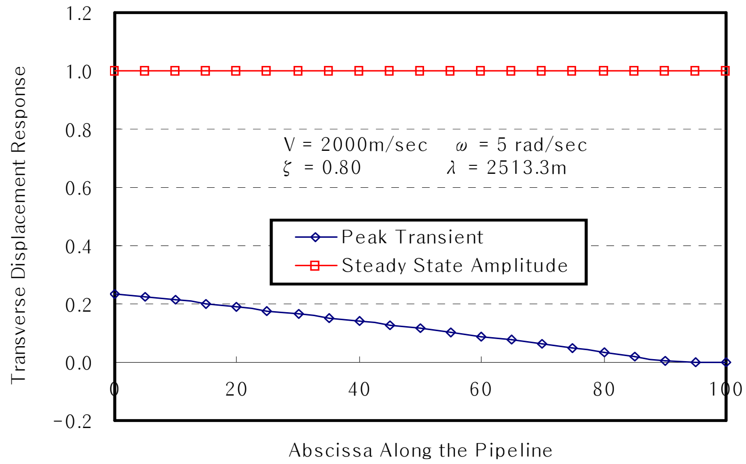
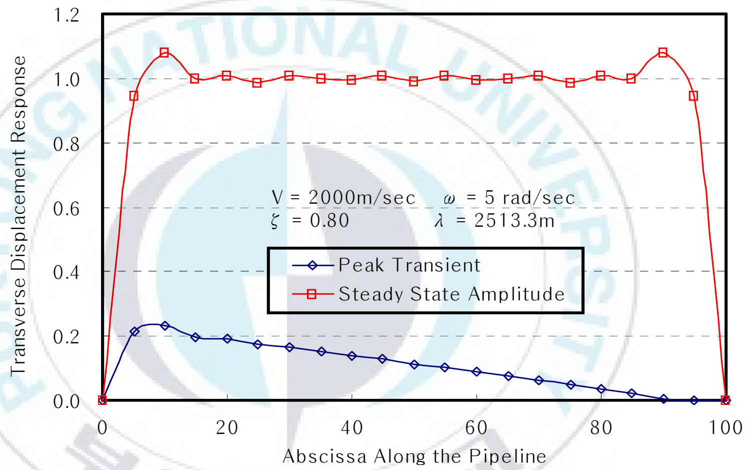
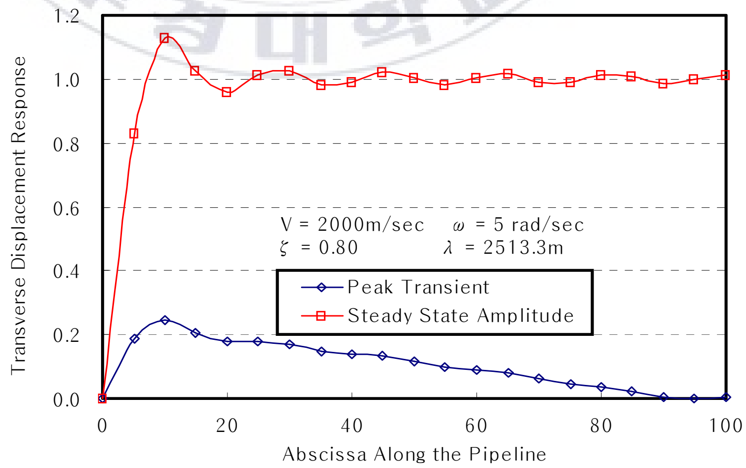


표 2.14b 단부 경계조건에 따른 축직각방향 변위응답(V=2000m/sec)

<table>
<tr><td>*Guided Ends*</td><td>
</td></tr>
<tr><td>*Simply Supported Ends*</td><td>
</td></tr>
<tr><td>*Supported -Guided Ends*</td><td>
</td></tr>
</table>

3. 3D 유한차분 동적해석

2장에서 언급된 모드중첩법에 의한 매설관의 동적응답해석은 그 해들을 구하는 과정이 어려울 뿐만 아니라 동적응답(변위와 변형율)을 구하기 위해 산정된 해에 대해 별도의 수치해석 기법을 전산 프로그래밍한 후 이를 이용하여 동적응답을 구할 수 있다. 이러한 불편한 계산과정이 필요없는 방법으로 매설관의 양단 경계조건들을 모두 고려할 수 있는 3D 유한차분 해석법을 이용하여 그 결과를 비교하였다.

3.1 3D 수치해석 프로그램의 소개

3.1.1 개 요

3D 수치해석 프로그램인 FLAC 3D는 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 분할하여 임의의 위치에서 각각의 지배방정식의 해를 구한다. 그리고 다음과 같은 지배방정식을 가진다.

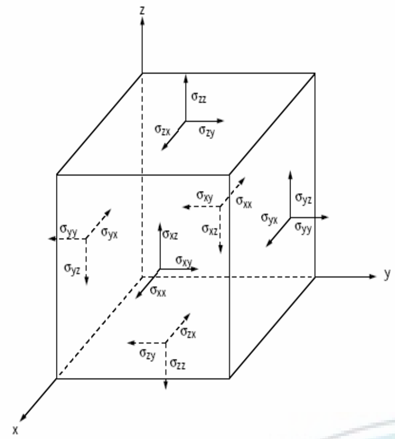
지배방정식
- 평형방정식(Equation of Equilibrium)
- 적합방정식(Equation of Compatibility)
- 구성방정식(Equation of Constitution)
- 연속방정식(Equation of Continuity)
- 운동방정식(Equation of Motion)
- 열전달방정식(Equation of Thermal Transmission)

*3.1.2 FLAC 3D*의 부호규약 및 단위규약

모든 수치해석 프로그램이 각각의 부호규약과 단위규약을 가지는 것과 같이 FLAC 3D도 나름의 부호규약과 단위규약을 가지고 있다. FLAC 3D의 부호규약과 단위규약은 표 3.1과 표 3.2에 나타내었다.

본 논문에서는 표 3.2에 제시된 SI단위계의 ①형태의 단위를 사용하였다.

표 *3.1 FLAC 3D*의 부호규약



	연직응력 : 인장(+), 압축(-)
	전단응력 : 면에서 각 축방향이 (+)
	축방향 변형률 : 인장에 의한 변형(+)
	전단변형률 : (+)방향의 전단력에 의한 변형률(+)
	압력 : 외부에서 내부로 작용(+)
	간극수압 : 방향에 따라 크기가 항상(+)
	중력 : 하향(+), 상향(-)

표 *3.2 FLAC 3D*의 단위규약

Unit	SI				Imperial	
	①	②	③	④	①	②
Length	m	m	m	cm	ft	in
Density	kg/m^3	10^3 kg/m^3	10^6 kg/m^3	10^6 g/cm^3	$slugs/ft^3$	$snails/in^3$
Force	N	kN	MN	Mdynes	lb_f	lb_f
Stress	Pa	kPa	MPa	bar	lb_f/ft^2	psi
Gravity	m/sec^2	m/sec^2	m/sec^2	cm/sec^2	ft/sec^2	in/sec^2

여기서, 1 bar = 10^6 $dynes/cm^2$ = 10^5 N/m^2 = 10^5 Pa

1 atm = 1.013 bars =14.7 psi = 2116 lb_f/ft^2 = 1.01325×10^5 Pa

1 slug = 1 lb_f-s^2/ft = 14.59 kg

1 gravity = 9.81 m/s^2 = 981 cm/s^2 = 32.17 ft/s^2

3.1.3 *FLAC 3D*의 구성

FLAC 3D에서 사용되는 연산구조는 점(Nodes)과 요소(Elements)에서 발생되는 응력이나 변형률을 평형방정식과 구성방정식을 이용하여 반복적으로 계산을 함으로써 해를 찾는 구조이다. 간단하게 도표로 나타내면 그림 3.1과 같다.

FLAC 3D는 여타 다른 수치해석 프로그램과는 달리 Tetrahedral Element를 사용하여 요소를 구성한다. 여기서 Tetrahedral Element란 4면체 형태의 요소로써 아래 그림 3.2와 같이 하나의 Hexadedral Element(육면체 형태의 요소)는 5개의 Tetrahedral Element로 분할되어 연산되어진다.

Hexadedral Element는 Tetrahedral Element로 분할된 요소들의 응력과 변형률을 중첩하여 계산한 값의 평균을 이용하여 연산된다. 그리고 각 Tetrahedral Element에서는 편차변형률이 계산되고 힘이나 변위, 응력, 체적변형률은 중첩된 계산 값의 평균을 이용한다.

3.1.4 *FLAC 3D*의 일반적인 해석순서

FLAC 3D는 그림 3.3에 제시된 순서도와 같은 과정으로 해석을 수행한다.

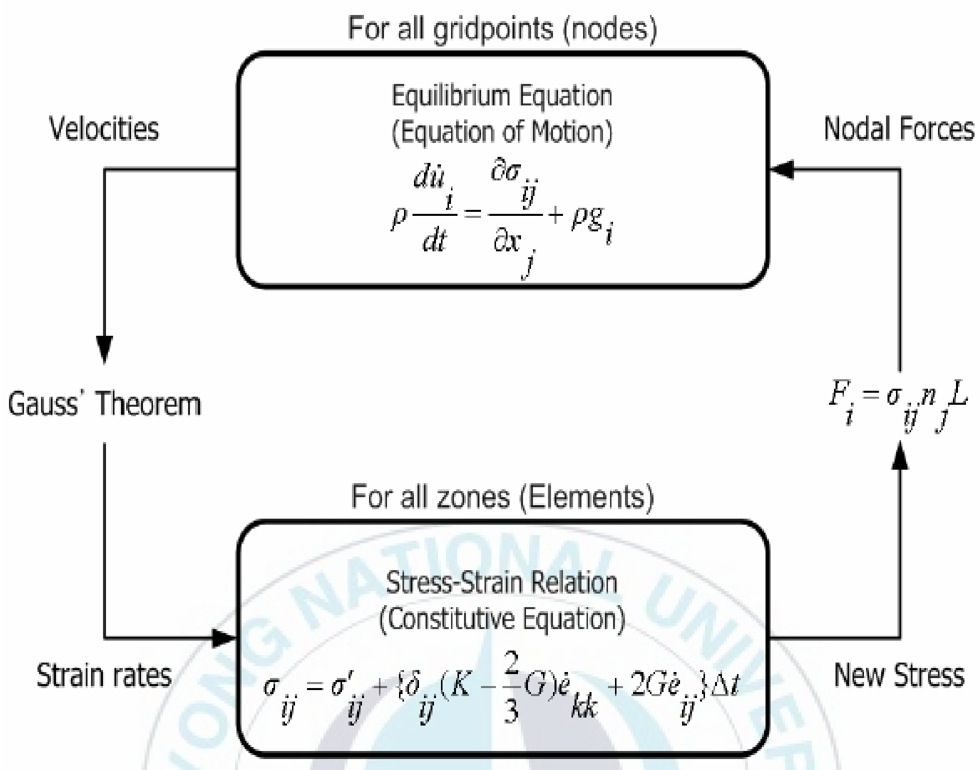


그림 3.1 FLAC 3D의 연산구조

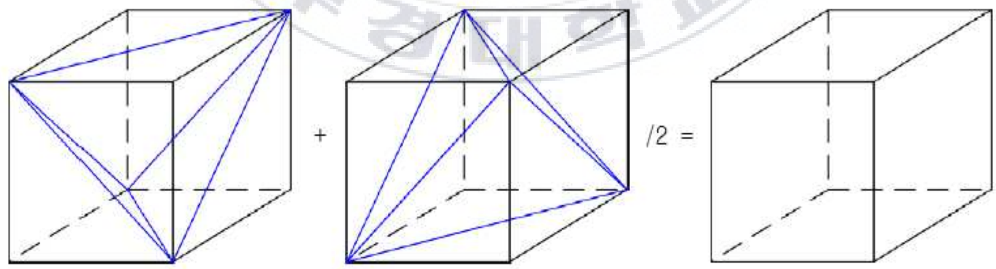


그림 3.2 FLAC 3D 요소의 구성

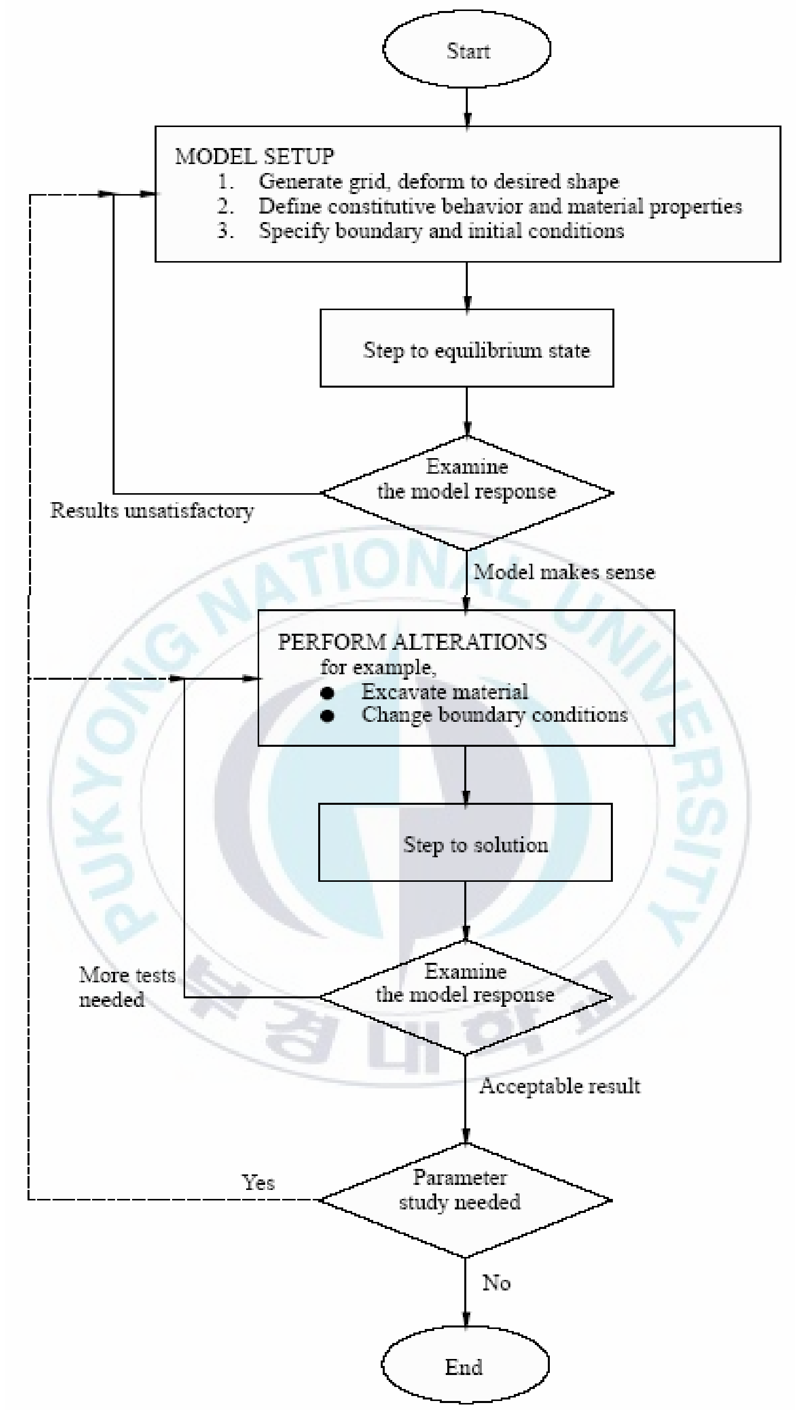


그림 *3.3 FLAC 3D*의 순서도

*3.1.5 FLAC 3D*의 동적해석

3.1.5.1 해석 종류

가) Equivalent-Linear method

일반적으로 사용되는 모델로써 층상구조에서의 파 전파나 구조물의 동적 거동 등을 해석하는데 사용된다. 모델 내에서 가정된 초기값(감쇠율, 강성률 등)으로부터 선형 해석을 실시한다. 정적 해석과 마찬가지로 각각의 영역에서 계산된 값들로부터 새로운 감쇠율과 강성률을 결정하는 계산과정을 수차례 반복함으로써 해석 수행한다.

- 특징

① 각각의 영역에서 진동 이력(history)을 통해 결정된 상수와 동적 운동의 평균 수준으로부터 결정된 선형 특성을 계산에 사용된다.

② 비선형 재료 내에서 서로 다른 주파수 성분 사이에 발생하는 간섭과 mixing 현상은 equivalent-linear 해석을 통해 무시한다.

③ 액상화(Liquefaction)와 관계되는 절대 변위나 불변량은 경험적으로 결정하여야 한다.

④ 소성 유동에 있어서는 "흐름 법칙"에 의거한 strain-increment tensor와 strees tensor간의 관계가 소성론에 입각한 함수 형태로서 주어지나, equivalent-linear 해석은 탄성론에 입각한 것이므로 단순히 strain-tensor(증분이 없는)와 stress tensor의 함수만이 주어진다. 따라서 소성 항복이 다소 부적절하게 모사되는 경향이 있다.

⑤ 이 방법에 사용되는 구성 모델은 타원 형태의 응력-변형률 곡선이다(Cundall, 1976).

나) Fully Non-linear method : Using FISH

Equivalent-Linear method와는 대조적으로 한 차례의 계산만을 수

행한다. 이러한 이유는 응력-변형률 법칙에서 비선형성이 각각의 해석 영역에서 독자적으로 결정되기 때문이다. 따라서, 비선형 해석 시에는 감쇠율과 강성률 등의 인자들이 각각 종속변수가 된다.

- 특징

① 임의의 비선형 구성관계식에 의거하여 계산한다. 즉, hysteretic-type 모델이 사용되고 특성화된 extra damping이 없다면 damping과 tangent modulus는 임의의 시공간 내 각 절점에서의 excitation 수준에 부합된다. 또한, Rayleigh나 local damping이 사용된다면 associated damping coefficients는 상수가 된다.

② 이 방법을 사용할 경우, 서로 다른 주파수 성분 간의 간섭과 mixing은 자연스레 발생하게 된다.

③ 절대 변위와 다른 불변량들은 자동적으로 설정된다.

④ 모든 구성모델에 있어서 적절한 소성함수를 사용한다.

3.1.5.2 동적 방정식

최대 시간간격(Δt_{crit})에 대한 식은 다음 식 (3.1)과 같다.

$$\Delta t_{crit} = \min\left[\frac{A}{C_p \Delta x_{\max}}\right] \tag{3.1}$$

여기서, C_p : P파 속도 , A : 영역(zone) 단면적

$\Delta x_{\max}$: 최대 zone 크기(통상 사거리)

여기서, Stiffness-proportional damping이 사용되지 않는 경우의 최대 시간간격(Δt_d)은 식 (3.2)와 같이 표현된다.

$$\Delta t_d = \frac{\Delta t_{crit}}{2} \tag{3.2}$$

Stiffness-proportional damping이 사용되는 경우의 최대 시간간격(Δt_β)은 안정성을 위해 감소되어야 하므로 다음과 같은 식 (3.3)으로 정의된다.

$$\Delta t_\beta = \left[\frac{2}{\omega_{max}}\right]\left(\sqrt{1+\lambda^2}-\lambda\right) \tag{3.3}$$

여기서, $\omega_{max} = \dfrac{2}{\Delta t_d}$, $\lambda = \dfrac{0.4\beta}{\Delta t_d}$, $\beta = \dfrac{\xi_{min}}{\omega_{min}}$

ξ_{min} : damping fraction,

ω_{min} : Rayleigh damping에 의해 특성화된 각주파수

3.1.5.3 동적 해석시 고려사항

가) Dynamic loading과 boundary conditions

입력 요소는 다음 중 하나를 고려한다.

① Acceleration history

② Velocity history

③ Stress(or pressure) history

④ Force history

입력된 속도로부터 응력는 다음 식으로 계산한다.

$$\sigma_n = 2(\rho C_p)v_n \tag{3.4}$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s)v_s$$

여기서, σ_n, σ_p : 수직응력 및 전단응력

ρ : 밀도

C_p, C_s : P파 및 S파의 속도

v_n, v_s : 법선 및 접선 방향 속도

P파 속도(C_p)와 S파 속도(C_s)는 다음 식으로부터 계산한다.

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \tag{3.5}$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

여기서, K : Bulk modulus

G : Shear modulus

ρ : 밀도

1) Boundary conditions

1-1) Quiet boundaries

심부의 터널이나 반무한 공간 위에 위치한 구조물 해석시 사용하는 경계조건으로서 본 논문에서 적용한 경계조건 형태이다. 정적 문제에서와 같은 경계조건에서는 파가 반사되며 파의 에너지를 흡수할 수 있는 경계조건의 설정이 필요하다. Viscous boundary(Lysmer & Kuhlemeyer, 1969)은 모델의 경계를 법선과 접선 방향으로 dashpot에 연결된다. Dashpot의 법선 및 접선 traction은 다음 식으로부터 계산한다.

$$t_n = -\rho C_p v_n \tag{3.6}$$

$$t_s = -\rho C_s v_s$$

여기서, t_n : 법선 traction

t_s : 접선 traction

C_p, C_s : P파 및 S파의 속도

v_n, v_s : 법선 및 접선 방향 속도

1-2) Free-Field Boundaries

댐과 같은 지상구조물 해석 시 주로 사용되며 이 경우 seismic input은 하부의 매질을 통해 상향으로 진행하는 평면파로 입력한다.

$$F_x = -\rho C_p(v_x^m - v_x^{ff}) + F_x^{ff} \tag{3.7}$$

$$F_y = -\rho C_s(v_y^m - v_y^{ff}) + F_y^{ff}$$

$$F_z = -\rho C_s(v_z^m - v_z^{ff}) + F_z^{ff}$$

여기서, F_x, F_y, F_z : x, y, z방향 절점력

v_x^m, v_y^m, v_z^m : main gridpoint의 x, y, z방향 속도

v_x^{ff}, v_y^{ff}, v_z^{ff} : side gridpoint의 x, y, z방향 속도

F_x^{ff}, F_y^{ff}, F_z^{ff} : σ_{xx}^{ff}, σ_{xy}^{ff}, σ_{xz}^{ff}에 의한 절점력

나) Mechanical Damping

적절한 감쇠의 선정과 timestep의 감소가 이루어져야 한다.

1) Rayleigh damping

Rayleigh damping는 질량비례감쇠와 강성비례감쇠로 구성된다.

1-1) 질량비례감쇠

$$c_m = a_0 m$$

여기서, c_m : 질량감쇠행렬 , m : 질량행렬

a_0 : 비례계수 , $a_0 = 2\zeta_i\omega_i$

ζ_i : 모드감쇠비 , $\zeta_i = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_i}$

ω_i : 고유진동수

1-2) 강성비례감쇠

$$c_k = a_1 k$$

여기서, c_k : 강성감쇠행렬 , k : 강성행렬

a_1 : 비례계수 , $a_1 = \frac{2\zeta_i}{\omega_i}$

ζ_i : 모드감쇠비 , $\zeta_i = \frac{a_1}{2}\omega_i$

1-3) Rayleigh 감쇠

$$c = a_0 m + a_1 k$$

여기서, c : Rayleigh감쇠행렬

비례계수 : $\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix}$

$a_0 = \zeta\frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i+\omega_j}$, $a_1 = \zeta\frac{2}{\omega_i+\omega_j}$ (동일감쇠비 지정시)

ζ_i : 모드감쇠비 , $\zeta_i = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_i} + \frac{a_1}{2}\omega_i$

실제 구조물의 감쇠비는 모드에 따라 크게 변화하지 않고 일정하다. 따라서 Rayleigh damping를 통해 기여도가 큰 모드들이 유사한 감쇠비를 갖도록 계수를 결정한다.

나) Local damping

Rayleigh damping을 간단한 형태로 적용시키기 용이하게 한 감쇠모델로써 본 논문에서는 Local 감쇠모델을 사용하였다. 단순한 해석은 검증을 거쳤으나 복잡한 문제, 즉 많은 superimposed waveform이 포함된 경우에는 사용을 해서는 안된다.

3.2 해석모델 및 해석방법

3.2.1 지반 및 매설관 물성치

본 연구에서 사용되는 지반 및 매설관 물성치는 Ogawa 등(2001)에 의해 연구된 모드중첩법에 사용한 값을 그대로 이용하였다. 이 값들을 표 2.8과 같으며 유한차분 해석을 위해 지반물성치로서 흙의 밀도(ρ) 1800 kg/m^3과 전단탄성계수(E_s) 4.67×10^7 N/m^2, 그리고 매설관의 물성치로써 콘크리트관의 포아송비(μ) 0.25를 추가로 적용하였다.

3.2.2 입력 지진파

3.2.2.1 입력 지진파의 파형

FLAC 3D의 해석 특성상 진폭이 일정한 정현파 형태의 변위를 나타내기 위해 파형을 코사인파로 적용하였다. 그림 3.4는 관 단부에 코사인파를 적용시 관 중앙지점에서의 변위응답을 나타낸 것으로 그림 3.5에 나타낸 모드중첩법에 의한 관 중앙지점에서의 변위응답과 유사한 변위응답을 얻을 수 있었다.

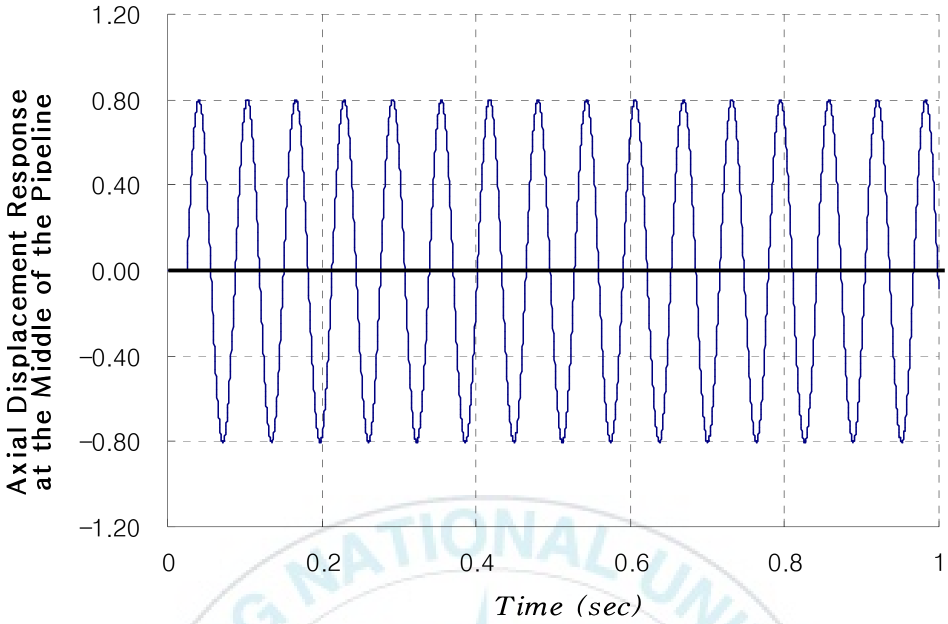


그림 *3.4 3D* 유한차분법에서 코사인파 적용시 변위응답

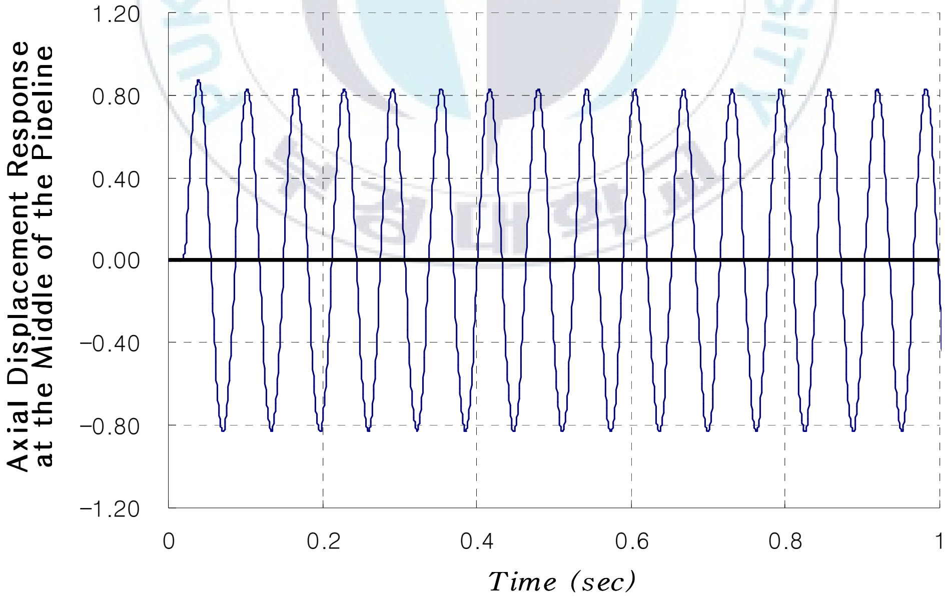


그림 *3.5* 모드중첩법에서 사인파 적용시 변위응답

3.2.2.2 입력 지진파의 적용방법

모드중첩법에서 지진파는 수식으로 적용하여 진행방향이나 경계조건에 대한 내용은 언급되어 있지 않았다. 그러나 수치해석프로그램에 지진파를 적용하기 위해서는 파의 진행방향 및 경계조건을 고려하여야 한다. 이에 본 연구에서는 지진파를 매설관의 시점에서 종점 방향으로 각각의 면에 순차적으로 적용시켜 감으로써 지진파가 매설관에 순차적으로 영향을 미치게 하였다. 적용방법으로는 매설관 전장에 대해 일정한 간격으로 분할된 평면에 축방향(매설관 길이방향)과 축직각방향(매설관 길이방향과 연직인 방향)의 지진파를 해당지점의 면에 직접 적용시키는 방법을 사용하였다. 지진파의 진행방향에 대한 간단한 모형도는 그림 3.6과 같다.

감쇠비는 Larbi(1995)의 연구에서 적용한 0.8을 적용하였다. 이병길 등(2005)의 연구결과에서 볼 수 있듯 동일한 조건에서 감쇠비 크기의 영향은 무시할 수 있으므로 해석의 편의상 감쇠비를 0.8을 적용하였다. FLAC 3D에서는 여러 가지 감쇠 모델을 적용할 수 있는데 이 중 간단한 모델에 대해서는 적용이 용이한 Local 감쇠모델을 사용하였다. 다른 감쇠모델은 질량감쇠와 강성감쇠를 모두 입력하여야 하는데 비해 Local 감쇠모델은 전체적인 감쇠비만을 적용하면 되며 이는 모드중첩법에서 고려한 조건과 부합되기 때문이다.

해석시간간격은 유한차분 해석시 구성요소수에 따라 다르게 적용할 수 있으며 본 연구에서는 모드중첩법에 적용한 시간간격 5×10^{-5}sec와 동일하게 적용하였다.

3.2.3 해석모델

3.2.3.1 지반 및 매설관 요소의 구성

해석모델의 구성모델 중 지반 모델은 탄성모델(Elastic Model)을 사용하였다. 이는 모드중첩법에 의한 해석결과와 비교하기 위해 동일한 모델의

탄성모델을 사용하였다. 그림 3.7은 FLAC 3D에서 해석에 이용한 유한차분요소망이다.

매설관 모델은 지반과 같이 거동하고 등방성이며 변위와 모멘트를 구할 수 있는 Shell 요소를 사용하여 나타내었다. 그리고 매설관의 직경은 이병길 등(2005)의 연구에서와 동일한 2m로 하였으며 지반은 길이방향으로 100m, 폭과 높이는 각각 10m로 하였다. 지반의 길이는 매설관 길이와 동일하게 하였고 폭과 높이는 터널과 같은 진행방향에 대해 영향을 가진 조건에 대해 FLAC 3D에서 최소 해석영역(매설관 직경의 3~5배)으로 제안한 영역을 적용하였다.

3.2.3.2 해석모델의 요소 수에 따른 해석

FLAC 3D를 이용한 해석에서 요소의 수는 해석의 정확도와 해석 소요시간과 관계된다. 다시 말해 해석의 정확도가 확인되는 최소한의 요소수에 의해 해석을 수행함으로써 해석 소요시간을 줄일 수 있다. 이러한 요소 수에 따른 해석결과를 비교하기 위해 다음과 같은 두 가지 경우를 비교하였다. 정밀모델은 매설관 길이방향으로 0.5m 간격으로 요소를 나눈 것이고, 단순모델은 5m 간격으로 요소를 나눈 것이다.

정밀모델 - ***12800 zone, 16080 gp, 6400 se, 3216 node***

단순모델 - ***1280 zone, 1680gp, 640 se, 336 node***

여기서, “zone”은 응력/변형, 유체유동, 열전달과 같은 현상내의 변화가 산정되는 다각형 volume의 최소영역으로 지반을 뜻하고, “gp”는 grid point로 zone을 생성하는 4개이상의 꼭지점을 의미하며, “se”는 structural element로 매설관을 뜻하고, “node”는 structural element를 생성하는 꼭지점을 의미한다. 위의 두 모델을 FLAC 3D에서 구성하면 표 3.3와 같다.

이렇게 두 가지 모델을 선정하게 된 기준은 FLAC 3D에서 보통의 경우 요소의 가로-세로비를 1:3으로 택하는 것에 비해서 1:0.64를 정밀모델로, 1:6.67을 단순모델로 정의하여 이들 요소 크기의 비가 해석결과인 매설관의 변위에 어떠한 영향을 주는가를 확인하기 위함이다.

이렇게 구성된 두 모델을 x=0m 평면에서 진동을 1초동안 주었을 경우 다음과 같은 지점별 변위-시간 그래프를 얻을 수 있다.

표 3.4에서 볼 수 있듯이 변위는 초기에는 차이가 다소 발생하나 그 이후에는 거의 동일한 변위를 보임을 알 수 있다. 진동이 가해진 x=0m 평면에서의 매설관 변위는 두 모델 모두 1.0m의 동일한 변위가 발생하였다. 그리고 x=50m지점에서는 정밀모델의 매설관 변위 0.1437m, 단순모델의 매설관 변위 0.1411m로 나타났고 x=100m지점에서는 정밀모델의 매설관 변위 0.04951m, 단순모델의 매설관 변위 0.03924m로 나타나 지점별 최대 변위는 진동지점에서 멀어질수록 단순모델이 조금 작게 나오지만 대부분 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

총 소요된 해석시간은 정밀 모델일 경우 3시간이, 단순모델일 경우 15분이 소요되었다. 그러므로 거의 유사한 지점별 최대 변위값을 가진 두 모델에서 적은 소요 해석시간을 가진 단순모델로 해석을 수행하였다.

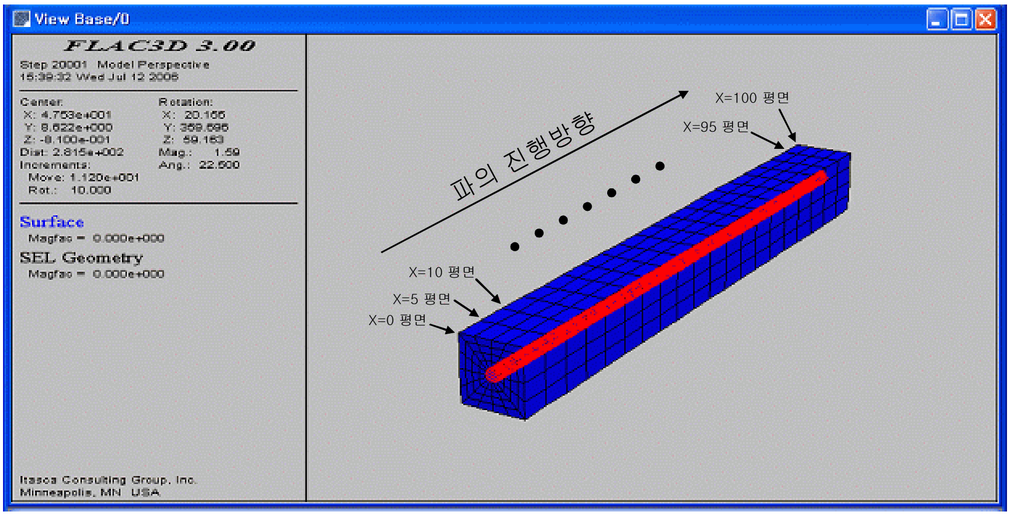


그림 3.6 지진파의 진행방향

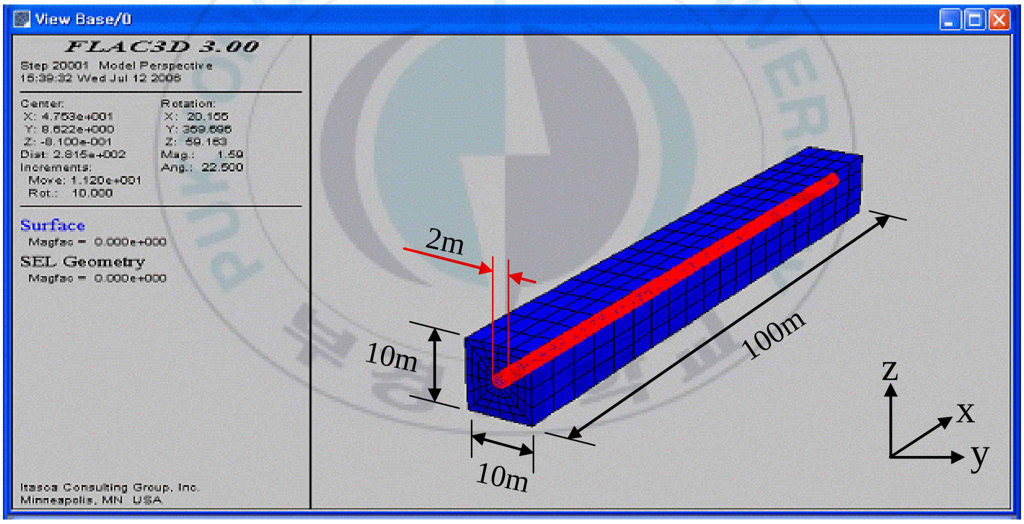


그림 3.7 해석에 이용한 유한차분망

표 *3.3* 정밀모델, 단순모델의 지반 및 매설관

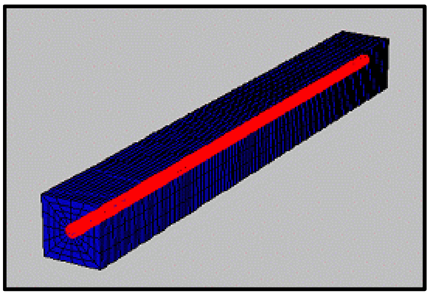
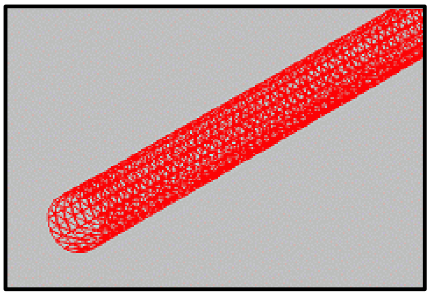
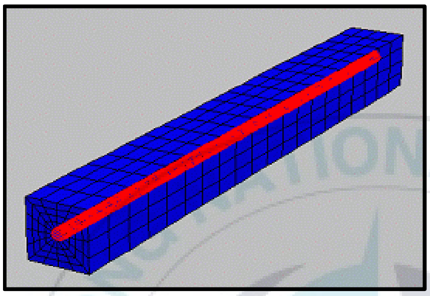
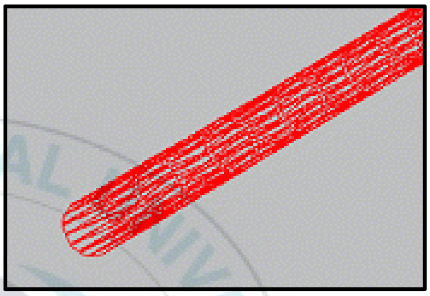
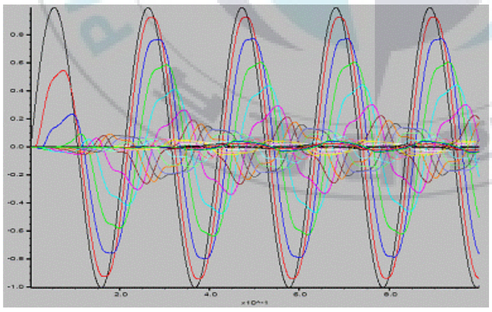
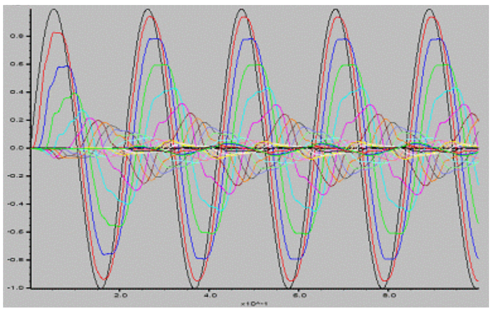
모델	지반 및 매설관	매설관 확대
정밀 모델		
단순 모델		

표 *3.4* 정밀모델, 단순모델의 지점별 최대변위 비교

모델	지점별 변위-시간 그래프	지점별 최대 변위	
정밀 모델		x=0m	1.0000
		x=10m	0.7904
		x=20m	0.4463
		x=30m	0.2671
		x=40m	0.2127
		x=50m	0.1437
		x=60m	0.08579
		x=70m	0.07361
		x=80m	0.04702
		x=90m	0.03055
		x=100m	0.04951
단순 모델		x=0m	1.0000
		x=10m	0.7948
		x=20m	0.4718
		x=30m	0.2618
		x=40m	0.2214
		x=50m	0.1411
		x=60m	0.08497
		x=70m	0.05936
		x=80m	0.02318
		x=90m	0.01767
		x=100m	0.03924

3.2.4 해석방법

앞의 3.2.2.2절 입력지진파의 적용방법에서 언급한 것과 같이 3차원 수치해석 프로그램을 이용하여 매설관의 내진해석을 하기 위해서는 지진파의 방향성과 경계조건이 필요하다. 우선 모드중첩법에서 언급된 바와 같이 지진파는 매설관 시작 부위에서 시작하여 매설관을 따라 전파된다. 이를 3D 유한차분 해석에서 묘사하기 위해 매설관의 시작부분부터 매설관과 지반에 직접 지진파를 적용하는 방법을 택하였다.

축직각방향 양단자유 경계조건의 경우를 예를 들어 우선 모델에서 지진파를 가하고자하는 평면을 설정한 후 지진파를 가한다. 그림 3.8은 x=0m 평면에 지진파를 적용시켰을 때를 표현한 것이다. 이렇게 적용된 지진파에 의해 각 지점별 매설관의 변위를 구하면 그림 3.9와 같다. 이렇게 구해진 변위 그래프에서 지점별 최대변위만을 표현하면 그림 3.10과 같다. 이와 같은 방법으로 x=0m평면에서 x=100m평면까지 모든 평면에 대해 지진파를 적용하여 각각의 평면에서 발생하는 지점별 최대변위를 구하면 그림 3.11과 같다.

이렇게 구해진 지진파 발생 지점별 최대 변위 중 각 지점에서 발생하는 최대 변위만을 택하여 도시하면 그림 3.12와 같이 구하고자하는 지점별 최대변위 그래프를 얻을 수 있다.

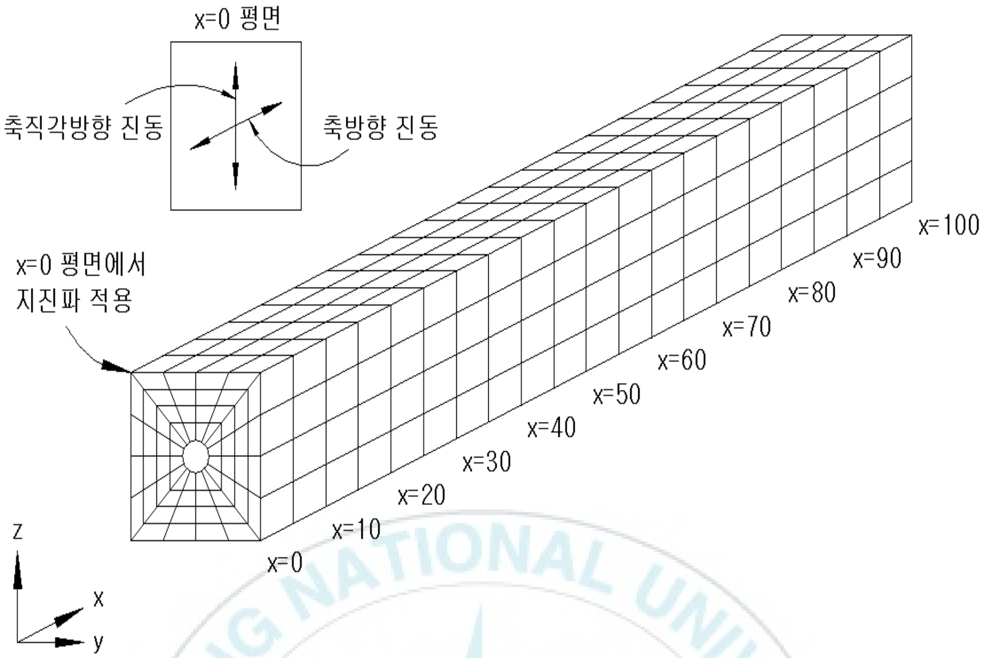


그림 *3.8 x=0m*평면에 지진파 적용

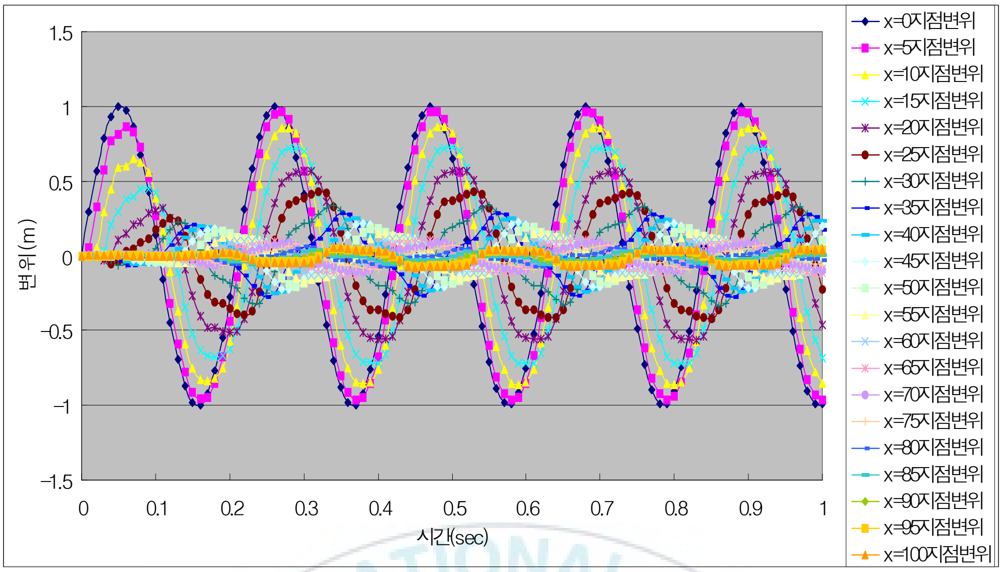


그림 *3.9* 매설관 지점별 변위응답*(x=0m*에 지진파 적용*)*

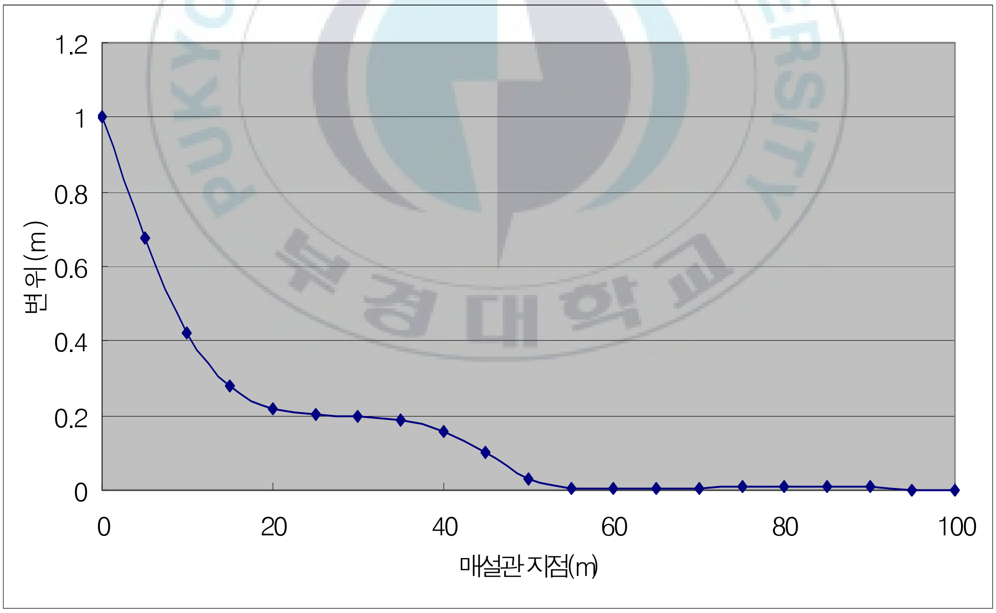


그림 *3.10 x=0m*평면에서 지진파 발생시 지점별 최대변위응답

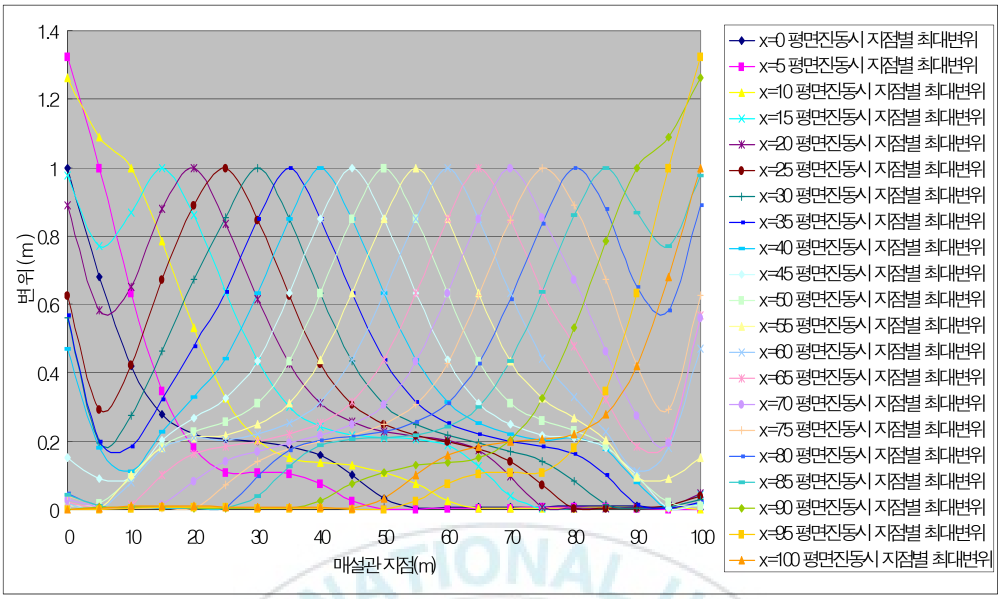


그림 *3.11* 지진파 발생평면별 지점최대변위응답(축직각방향 양단자유)

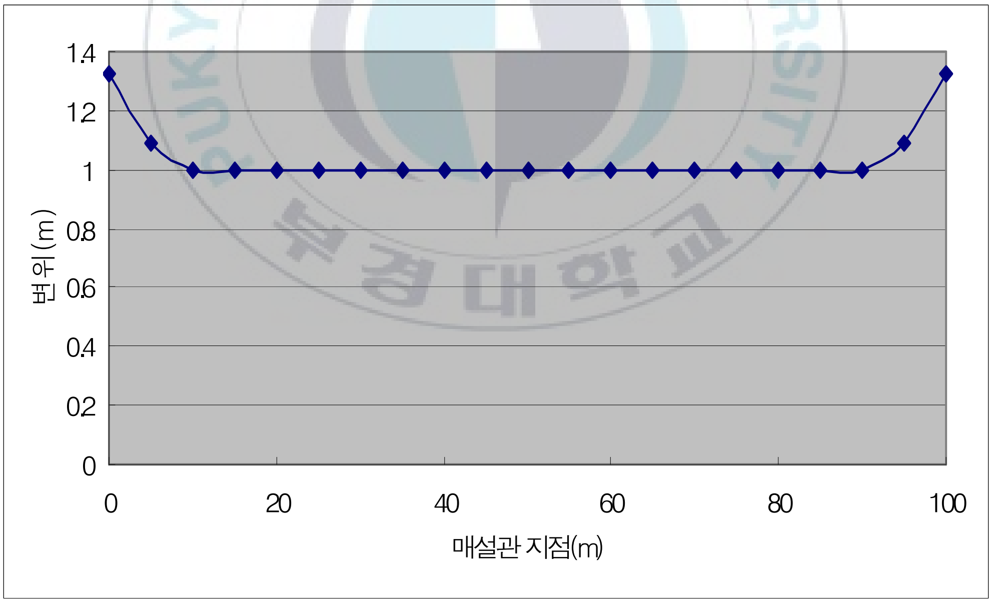


그림 *3.12* 지점별 최대 변위응답(축직각방향 양단자유)

3.3 매설관의 지점위치별 응답변위

표 3.5은 전파속도(V) 300m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 30rad/sec와 전파속도(V) 500m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 20rad/sec와 전파속도(V) 1000m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 10rad/sec와 전파속도(V) 2000m/s, 지반진동수($\overline{\omega}$) 5rad/sec에 대해 관 단부경계조건에 따른 지점위치별 축방향 변위응답을 나타낸 것이며 표 3.6a와 표 3.6b는 3D 유한차분 해석을 통해 관 단부경계조건에 따른 지점위치별 축직각방향 변위응답을 3D 유한차분 해석을 통해 나타낸 것이다.

표 3.5에서 볼 수 있듯이 축방향에서 매설관의 양단자유 경계조건(Free Ends)의 경우, 끝단에서 가장 큰 변위응답을 가지며 중앙부에서 가장 낮은 변위응답을 보이고 있다. 양단고정 경계조건(Fixed Ends)인 경우 양 끝단에서는 변위가 발생하지 않고 그 외 지점에서는 변위응답이 유사하게 나왔다. 일단고정-일단자유 경계조건(Fixed-Free Ends)에선 고정단에서 변위가 발생하지 않고 자유단에서 가장 큰 변위 응답을 보인다. 전파속도가 증가할수록(300m/sec→2000m/sec) 자유단에서 변위가 크게 발생함을 알 수 있다. 이를 통해 전파속도가 클수록 이에 따른 응력도 커짐을 알 수 있다.

표 3.6a와 표 3.6b에서는 4가지 전파속도에 따른 축직각방향의 6가지 단부 경계조건에 대한 변위 응답을 보이고 있다. 양단자유 경계조건인 경우 양단에서 최대 변위응답이 발생하고 양단고정 경계조건은 고정단에서는 변위가 발생하지 않고 그 외 지점에서는 유사한 변위를 보인다. 일단고정-일단자유 경계조건은 고정단에서는 변위가 발생하지 않고 자유단에서 최대변위가 발생한다. 양단롤러 경계조건(Guried Ends)은 양 끝단에서 최대변위를 보이고 양단힌지 경계조건(Simply Supported Ends)은 힌지단에서는 변위가 발생하지 않고 x=10, 90m 지점에서는 최대 변위가 발생한다. 일단힌지-일단롤러 경계조건(Supported- Guried Ends)은 힌지단에서는 변위가 발생하지 않았고 롤러단에서 최대변위가 발생하였다. 축방향 변위응답과 같이 전파속도가 증가할수록 자유단에서 변위가 크게 발생함을 알 수 있다.

표 3.5 단부 경계조건에 따른 축방향 변위응답(3D 유한차분해석법)

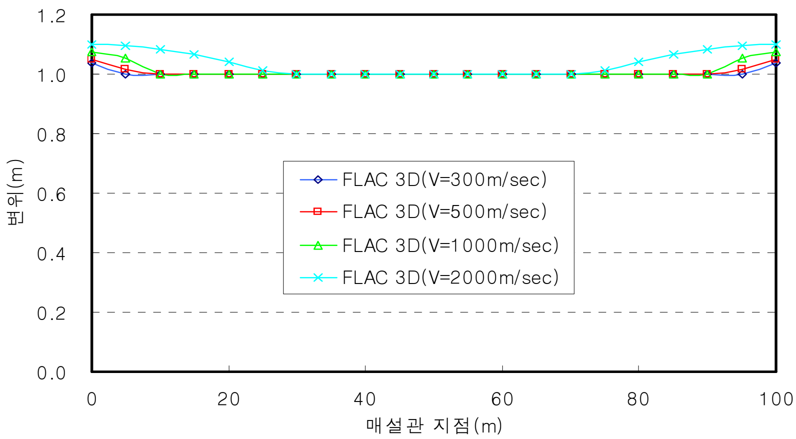
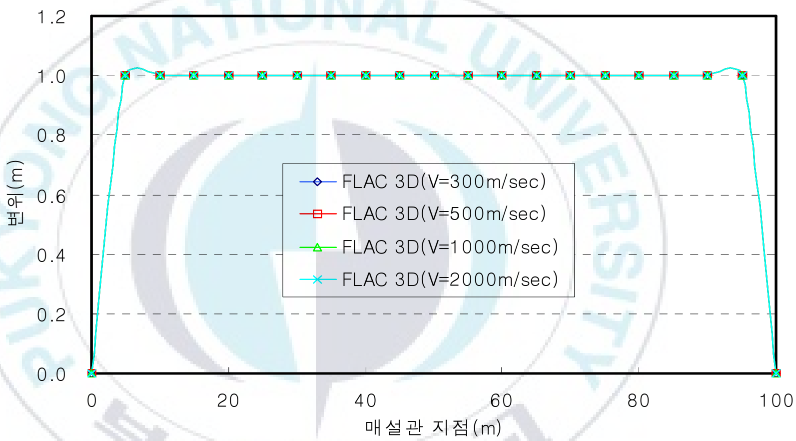
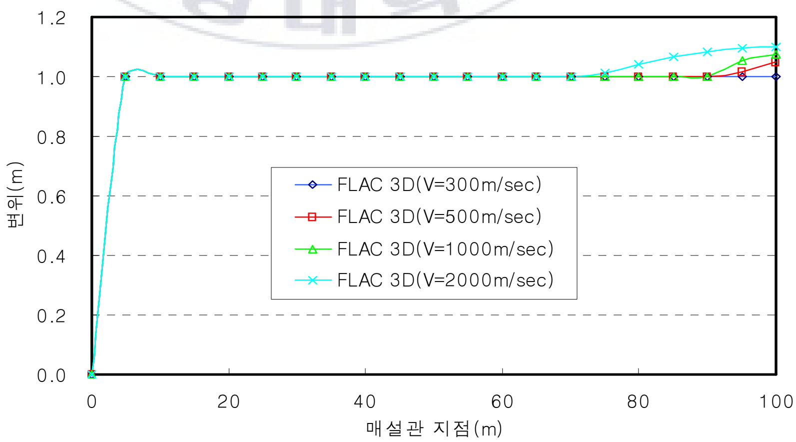
Free Ends	
Fixed Ends	
Fixed-Free Ends	

표 *3.6a* 단부 경계조건에 따른 축직각방향 변위응답*(3D* 유한차분해석법*)*

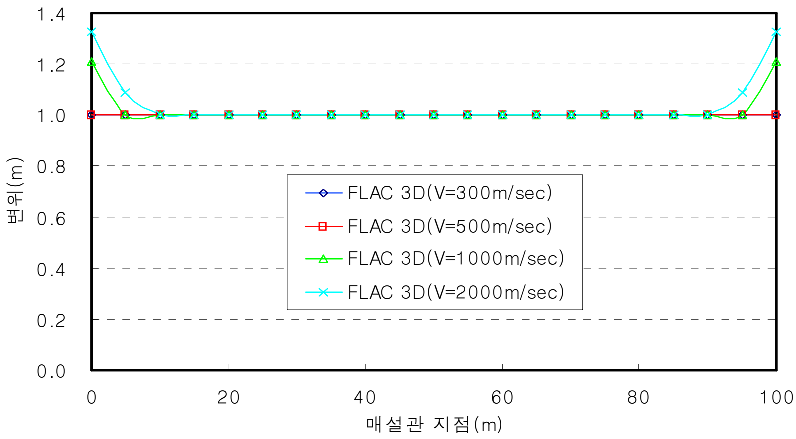
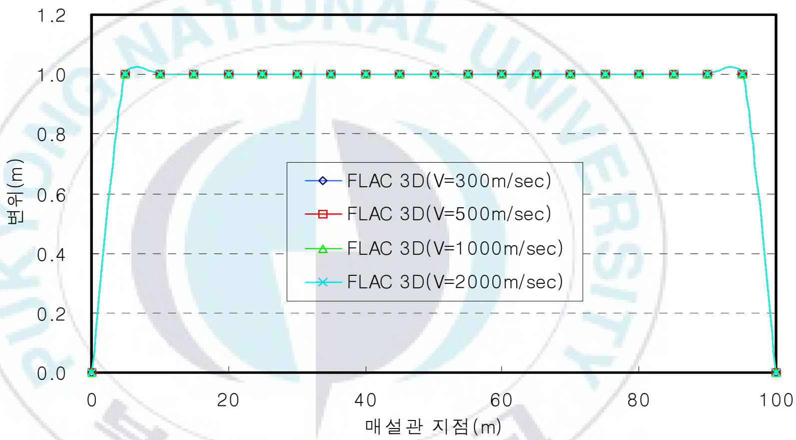
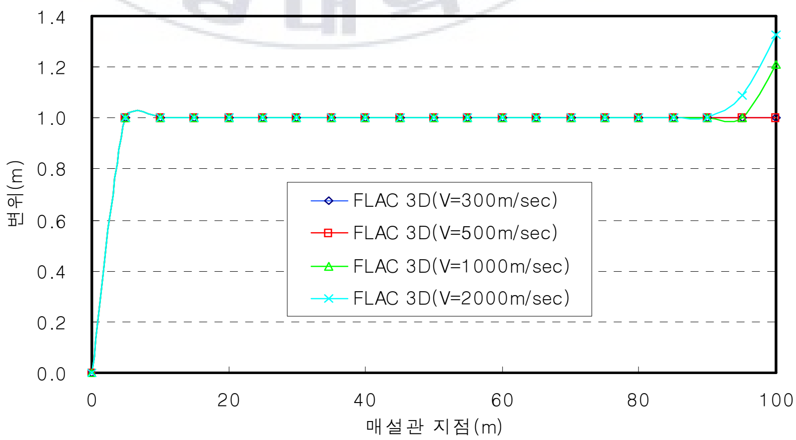
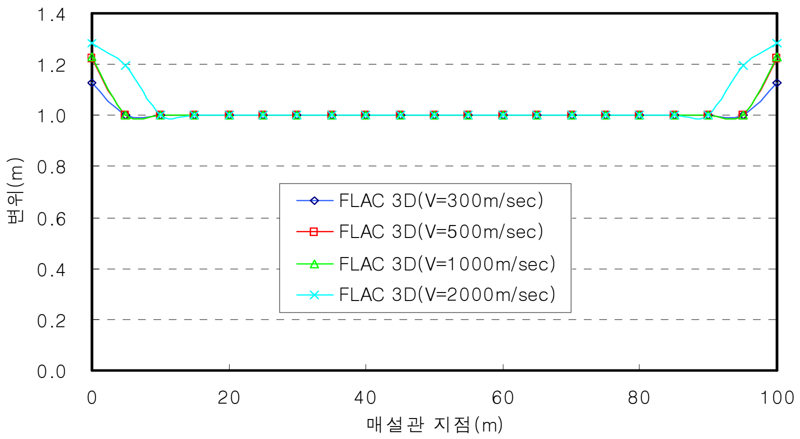
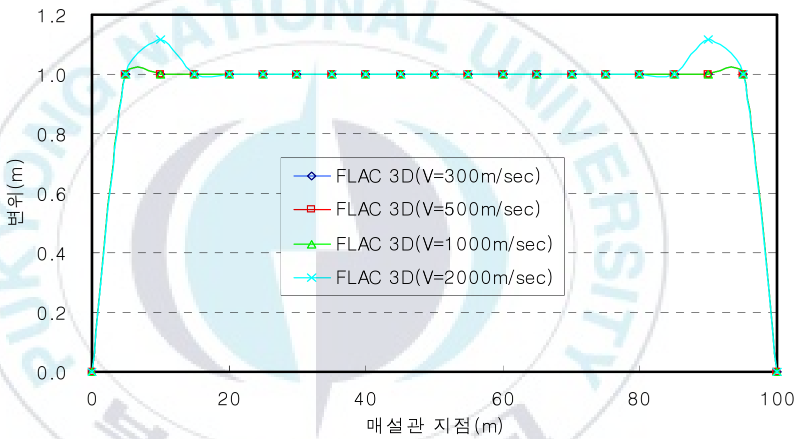
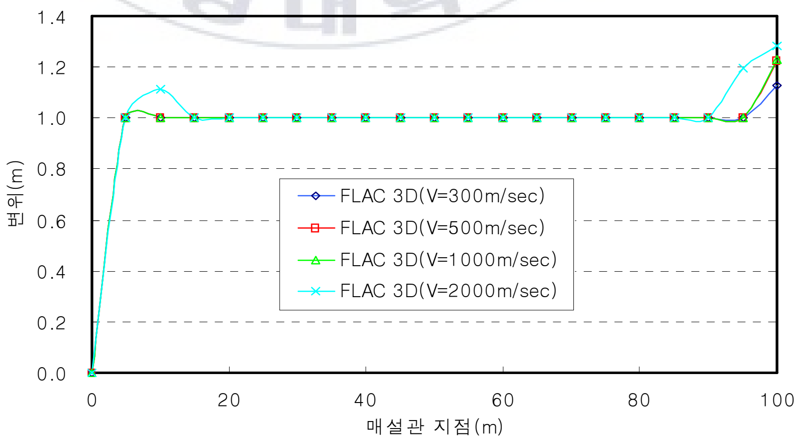
Free Ends	
Fixed Ends	
Fixed-Free Ends	

표 *3.6b* 단부 경계조건에 따른 축직각방향 변위응답*(3D* 유한차분해석법*)*

Guided Ends	
Simply Supported Ends	
Supported -Guided Ends	

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 얕은 매설관에 대해선 표면파인 Rayleigh파가 가장 영향을 많이 미치는 것으로 알려져 있다.

Ogawa 등(2001)은 지진파를 수평방향으로 정현파 형태의 파가 전파된다고 가정하여 최대 지반 변형률(ϵ_G)을 식 (4.1)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h \qquad (4.1)$$

여기서, L : 파장, U_h : 지반 변위

4.1.2 매설관의 축방향 변형률

Ogawa 등(2001)은 매설관을 무한 지반에 놓인 양단자유 단부경계조건의 관으로 단순화된 모형을 사용하였으며, 매설관의 축방향에 대한 힘의 평형방정식은 D'Alembelt의 원리에 근거하여 식 (4.2)와 같이 표현하였다.

식 (4.2)은 지반의 질량항과 축방향 전파로 인해 발생하는 보의 내부력항과 축방향 등가 스프링계수의 항으로 구성된다.

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = K_1 (u_G - u) \qquad (4.2)$$

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)은 매설관의 관성에 의한 영향은 무시하고 매설관과 지반의 변형률비를 나타내는 변환계수, α_0에 의해 양단자유 단부 경계조건을 가진 매설관의 변형률(ϵ_S)을 식 (4.3)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_S = \alpha_0 \epsilon_G \tag{4.3}$$

여기서, $\alpha_0 = \dfrac{1}{1+\left(\dfrac{2\pi}{\lambda_1 L_a}\right)^2}$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}}$$

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)은 식 (4.3), Larbi(1995)는 표 2.6에 제시된 식에 의해 구할 수 있음을 제안하였다. 이를 식으로부터 구한 값은 3D 유한차분 해석의 결과와 비교하기 위해 El Centro 지진 기록(그림 4.1)을 해석에 사용하였으며 El Centro 지진의 지반 변위응답 스펙트럼은 그림 4.2와 같이 구하여 제시하였다.

여기서 지반 변위응답스펙트럼이란 특정 방향의 지반운동을 받고 있는 지반의 최대응답을 지반의 고유진동수(혹은 고유주기)별로 그려 놓은 것이다. 그림 4.1의 El Centro 지진 가속도 기록에서 2.12초에 발생한 최대 가속도를 포함할 수 있도록 지진기록을 시간 8초에 대해 0.02초씩 기록된 데이터를 400개 이용하여 지반응답스펙트럼을 구하여 그림 4.2에 나타내었다. 해석에 이용된 지진파의 전파속도는 Ogawa 등(2001)의 제안식과 Larbi(1995)의 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법에서 100m/sec로 모두 동

일하게 적용하였다.

Ogawa 등(2001)의 제안식을 이용하여 주기 1sec일 때 최대 지반변위(U_h)는 그림 4.2로부터 0.039161m임을 알 수 있고, 주기 1sec에 대한 파장과 진동수는 각각 식 (4.4)와 식 (4.5)와 같이 산정할 수 있다.

$$L = L_a = V \cdot T = 100 \times 1 = 100\mathrm{m} \tag{4.4}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{1} = 6.283\,\mathrm{rad/sec} \tag{4.5}$$

여기서, L : 파장 , V : 속도

T : 주기 , ω : 진동수

따라서 최대 지반 변형률은 식 (4.1)을 이용하여 식 (4.6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h = \frac{2\pi \times 0.039161}{100} = 2.461 \times 10^{-3} \tag{4.6}$$

변환계수 α_0는 식 (4.7)과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_0 = \frac{1}{1+\left(\dfrac{2\pi}{\lambda_1 L_a}\right)^2} = \frac{1}{1+\left(\dfrac{2\pi}{\sqrt{\dfrac{9.34\times10^7}{2.07\times10^{10}\times0.94248}}\times100}\right)} = 0.548 \tag{4.7}$$

따라서 주기 1sec일 때 매설관의 최대 축방향 변형률(ϵ_S)은 식 (4.8)과 같이 계산된다.

$$\epsilon_S = \alpha_0 \epsilon_G = 0.548 \times 2.461 \times 10^{-3} = 1.349 \times 10^{-3} \quad (4.8)$$

다른 방법으로 Larbi(1995)의 연구에 적용된 모드중첩법을 이용한 양단자유 단부경계조건을 가진 매설관의 변형률은 0.036571로 나타났다. 실제 매설관의 변형률은 주기 1sec에 해당하는 지반변위를 곱함으로서 산정되며 0.036571×0.039161 =1.432×10^{-3}이 된다.

또한 본 연구에서의 3D 유한차분 해석법을 이용한 양단자유 단부조건을 가진 매설관의 변형률은 0.036571로 나타났다. 실제 매설관의 변형률은 주기 1sec에 해당하는 지반변위를 곱함으로서 산정되며 0.036490×0.039161 =1.429×10^{-3}이 된다.

표 4.1은 양단자유 단부경계조건을 가진 매설관에 대해 주기 1sec일 때 관 중심부에서 축방향 변형률을 산정한 값으로 Ogawa 등(2001)의 제안식에 의한 값과 Larbi(1995)의 모드중첩법에 의한 값과 본 연구에서의 구한 3D 유한차분 해석법에 의한 축방향 변형률의 값들을 나타내었다. 여기서 Ogawa 등(2001)에 의해 산출된 변형율 값을 기준으로 각 방법에 의한 값들의 차이를 오차로 표시하면 모드중첩법에 의한 값은 6.15%, 3D 유한차분 해석법에 의한 값은 5.93%의 차이를 보이며 이는 서로 유사한 축방향 변형율로 나타남을 알 수 있다.

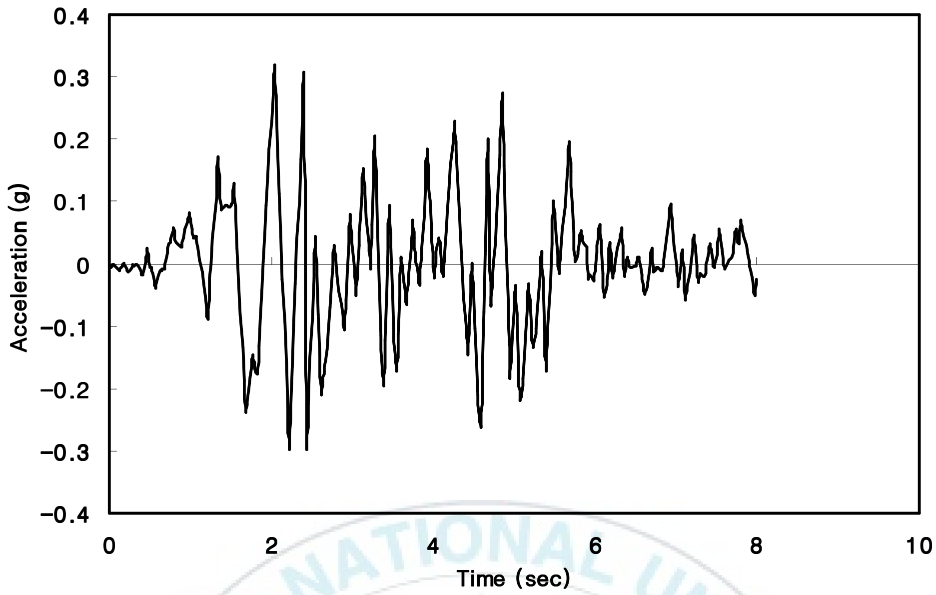


그림 *4.1 El Centro* 지진기록*(1940)*

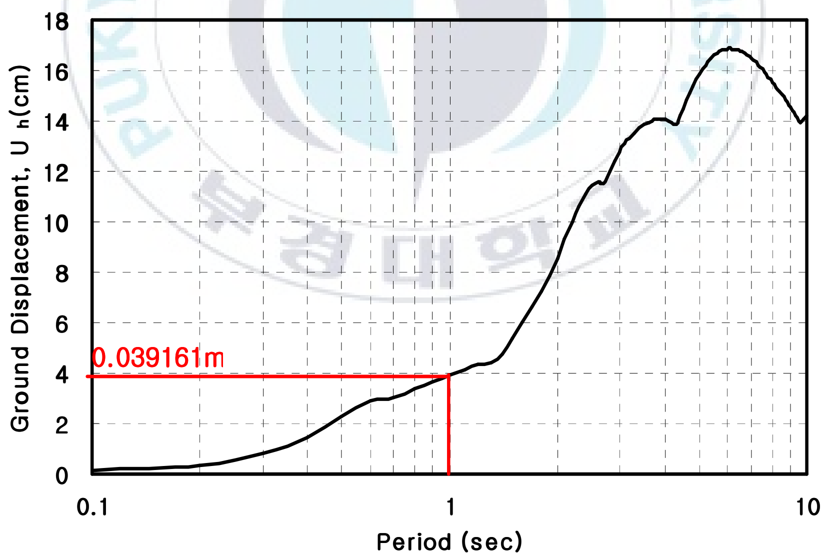


그림 *4.2 El Centro* 지진의 변위응답 스펙트럼*(1940)*

표 *4.1* 축방향 변형률 비교*(T=1sec)*

해석방법	축방향 양단자유 경계조건 변형률	Ogawa et al 과의 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 %

4.2 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법 결과의 비교

본 장에서는 관 단부 경계조건에 대한 전파속도(V) 300m/sec, 지반진동수($\overline{\omega}$) 30rad/sec와 전파속도(V) 2000m/sec, 지반진동수($\overline{\omega}$) 5rad/sec인 두 정현파에 대해서 모드중첩법을 이용한 해석 결과와 본 연구에서의 3D 유한차분 해석법을 이용한 해석 결과를 비교하였다.

4.2.1 매설관의 지점위치별 변위응답 비교

매설관의 지점위치별 변위응답을 모드중첩법과 3D 유한차분 해석에 의한 결과들을 비교하였다. 표 4.2는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 경계조건에 대한 것이며 표 4.3a는 축직각방향에 대한 지점별 변위응답을 나타내며, 표 4.3b는 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부경계조건에 대한 축직각방향에 대한 지점별 변위응답을 보여주고 있다.

축방향 양단자유 경계조건에서 두 해석법 모두 자유단인 x=0m지점과 x=100m지점에서 최대변위응답이 발생하였다. 전파속도 300m/sec인 경우 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였다. 전파속도 2000m/sec인 경우 자유단측(x=0～25m, x=75～100m)에서의 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법의 해석결과보다 크고 중앙부위(x=30～70m)에서는 변위응답이 유사하게 발생하였다.

축방향 양단고정 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석결과 중 전파속도 300m/sec인 경우 x=80m지점에서 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 x=50m지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석 결과는 두 전파속도에서 변위가 발생하지 않은 고정단(x=0m, x=100m) 이 외 지점에서 유사한 변위가 발생하였다. 전파속도 300m/sec인 경우 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였다. 전파속

도 2000m/sec인 경우 고정단측(x=5~20m, x=80~95m)에서의 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석 결과보다 크고 중앙부위(x=25~75m)에서는 작게 발생하였다.

축방향 일단고정-일단자유 경계조건에서는 두 해석법 모두 자유단인 x=100m지점에서 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=35m지점과 x=65m지점에서 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=0m, 100m)에서 최대변위응답이 발생하였다. 전파속도 300m/sec인 경우 자유단측(x=0~20m, x=80~100m)에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점(x=25~75m)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=30m지점과 x=70m지점에서 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 x=20m지점과 x=80m지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석은 두 전파속도에서 모두 고정단(x=0m, x=100m)에서 변위가 발생하지 않고 그 외 지점(x=5~95m)에서는 유사한 변위가 발생하였다. 전파속도 300m/sec인 경우 고정단측(x=5~40m, x=60~95m)에서 모드중첩법 해석결과가 3D 유한차분 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점(x=45~55m)에서 작게 발생하였다. 전파속도 2000m/sec인 경우 x=15~25m, x=45~55m, x=75~85m에서 모드중첩법 해석결과가 3D 유한차분 해

석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점(x=5~10m, x=30~40m, x=60~70m, x=90~95m)에서 작게 발생하였다.

축직각방향 일단고정-일단자유 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석 중 전파속도 300m/sec인 경우 자유단인 x=100m지점에서 발생하였으며 전파속도 2000m/sec인 경우 x=20m지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석은 두 전파속도에서 모두 자유단인 x=100m지점에서 발생하였다. 전파속도 300m/sec와 전파속도 2000m/sec인 두 경우의 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과와 모드중첩법 해석결과가 유사하게 발생하였다.

축직각방향 양단롤러 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법의 해석결과 모두 롤러단(x=0m, x=100)에서 발생하였다. 두 전파속도 모두 롤러단측(x=0~5m, x=95~100m)에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점(x=10~90m)에서는 유사하게 발생하였다.

축직각방향 양단힌지 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석에서 두 전파속도 모두 x=10m지점과 x=90m지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석에서 전파속도 300m/sec인 경우 힌지단(x=0m, x=100m)에서 변위가 발생하지 않고 그 외 지점(x=5~95m)에서는 유사한 변위가 발생하였고 전파속도 2000m/sec인 경우 x=10m지점과 x=90m지점에서 발생하였다. 전파속도 300m/sec와 전파속도 2000m/sec인 두 경우의 모든 지점에서 3D 유한차분 해석 결과와 모드중첩법 해석결과가 유사하게 발생하였다.

축직각방향 일단힌지-일단롤러 경계조건에서 최대변위응답은 모드중첩법 해석에서 두 전파속도 모두 x=10m지점에서 발생하였고 3D 유한차분 해석에서 두 전파속도 모두 롤러단인 x=100m지점에서 발생하였다. 두 전파속도 모두 롤러단측(x=95~100m)에서 3D 유한차분 해석 결과가 모드중첩법 해석결과보다 크게 발생하였고 그 외 지점(x=5~90m)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 발생되는 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.

표 4.2 축방향 경계조건에 따른 지점위치별 변위응답 비교

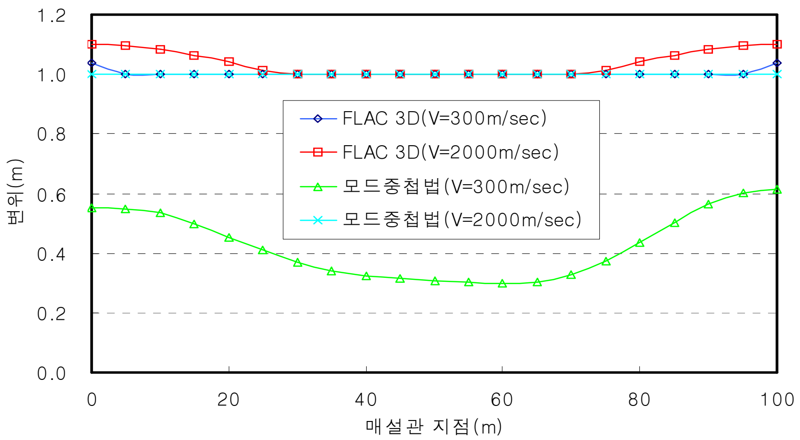
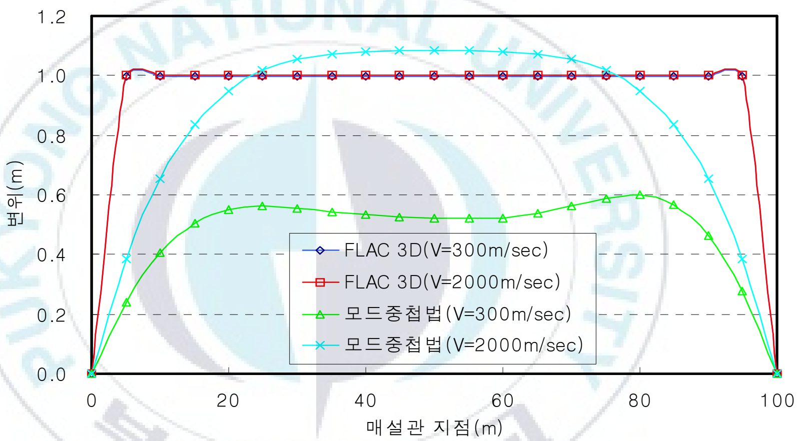
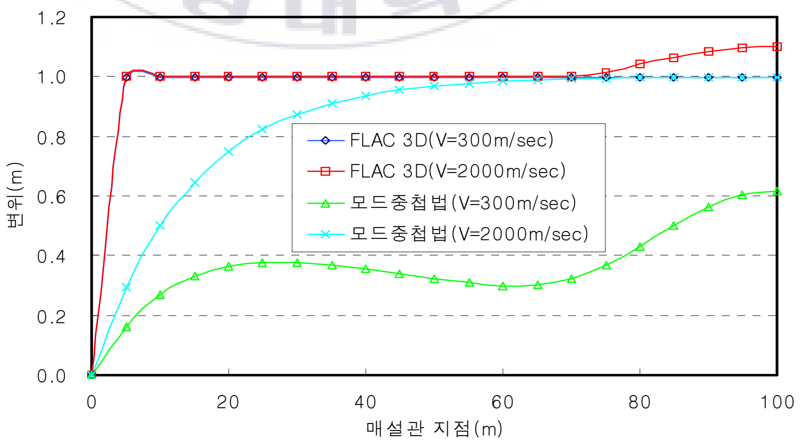
<table>
<tr><td>Free Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed-Free Ends</td><td>
</td></tr>
</table>

표 *4.3a* 축직각방향 경계조건에 따른 지점위치별 변위응답 비교

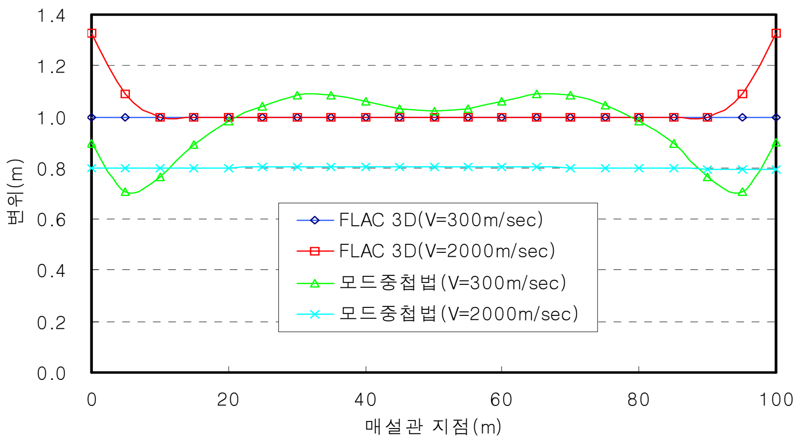
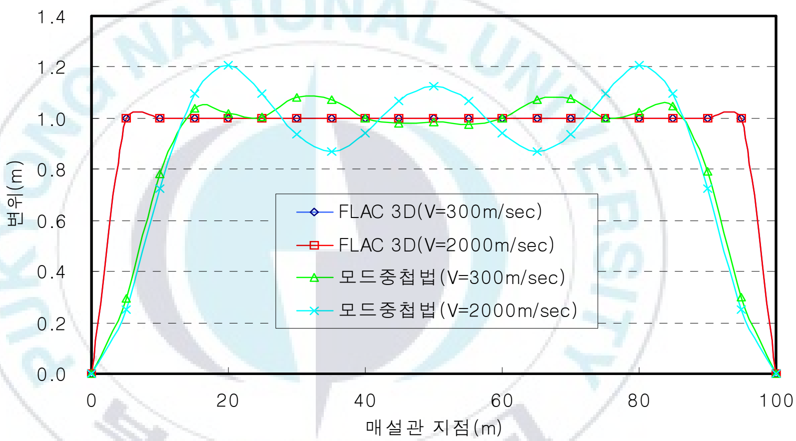
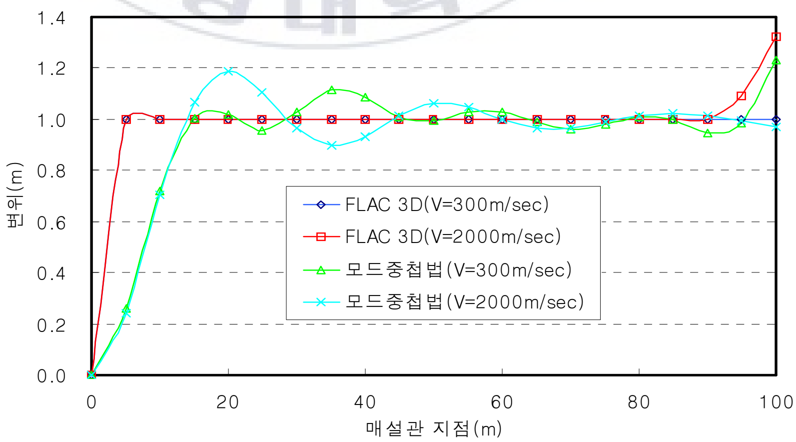
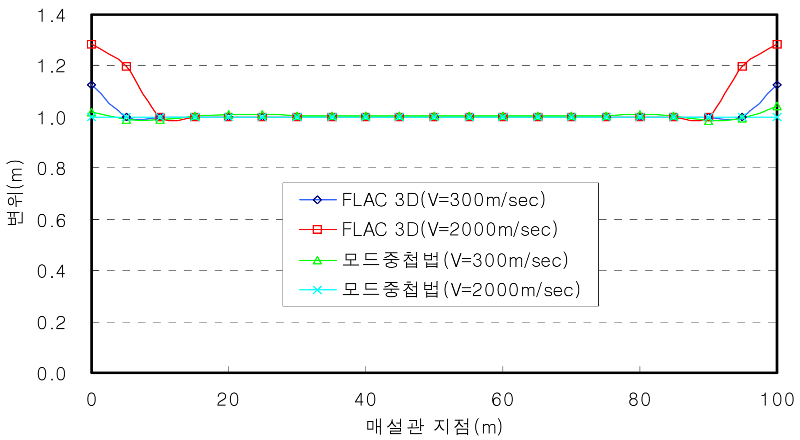
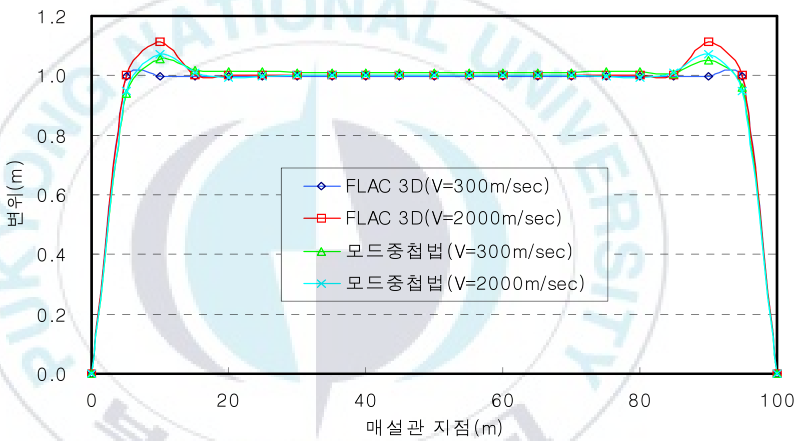
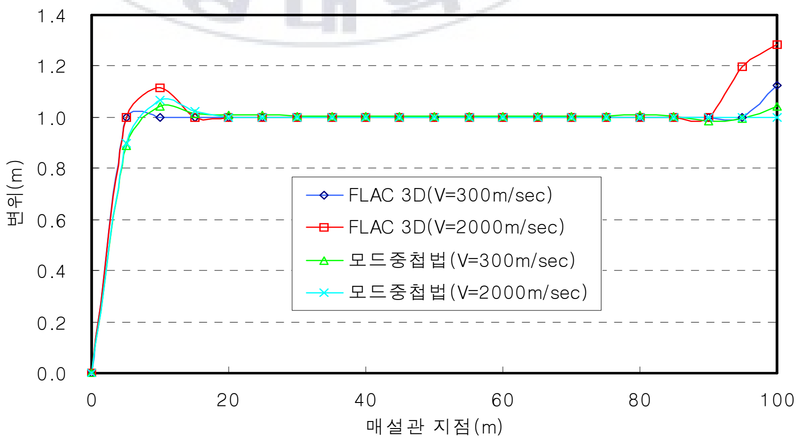
경계조건	변위응답
Free Ends	
Fixed Ends	
Fixed-Free Ends	

표 4.3b 축직각방향 경계조건에 따른 지점위치별 변위응답 비교

Guided Ends	
Simply Supported Ends	
Supported -Guided Ends	

5. 동적해석 매개변수 연구

5.1 매설관의 관 두께에 따른 영향

5.1.1 축방향에서의 관 두께의 영향

표 5.1은 전파속도(V) 2000m/sec, 지반진동수($\overline{\omega}$) 5rad/sec인 경우에 축방향 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 경계조건에 대한 관 두께의 영향을 해석한 것이다.

표 5.1에서 알 수 있듯 축방향 경계조건에서 관 두께의 영향은 관 단부조건의 변화에도 매설관의 동적거동에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

5.1.2 축직각방향에서의 관 두께의 영향

표 5.2은 전파속도(V) 2000m/sec, 지반진동수($\overline{\omega}$) 5rad/sec인 경우에 축직각방향 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 경계조건에 대한 관 두께의 영향을 해석한 것이다.

표 5.2에서 알 수 있듯 축직각방향 경계조건에서 관 두께의 영향은 관 단부조건의 변화에도 매설관의 동적거동에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

즉, 관 두께의 영향은 축방향이나 축직각방향 경계조건 모두에서 관 단부조건의 변화에도 매설관의 동적거동에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

표 5.1 축방향 단부 경계조건에 따른 관 두께의 영향

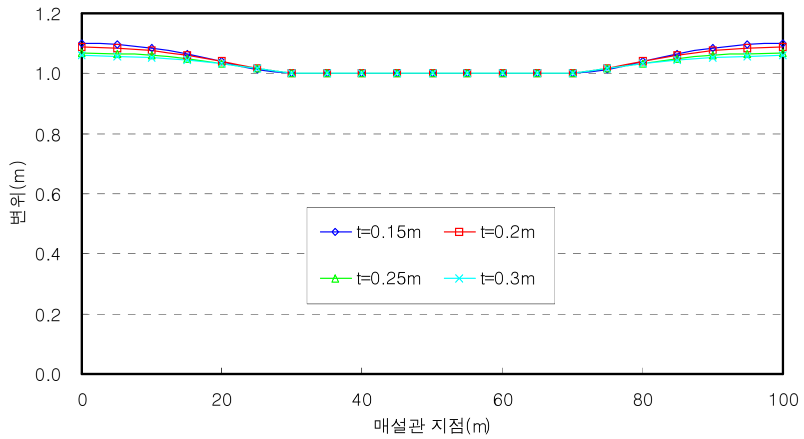
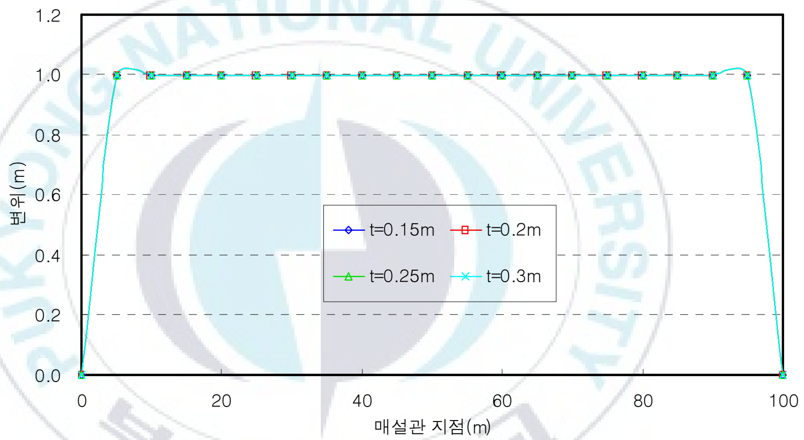
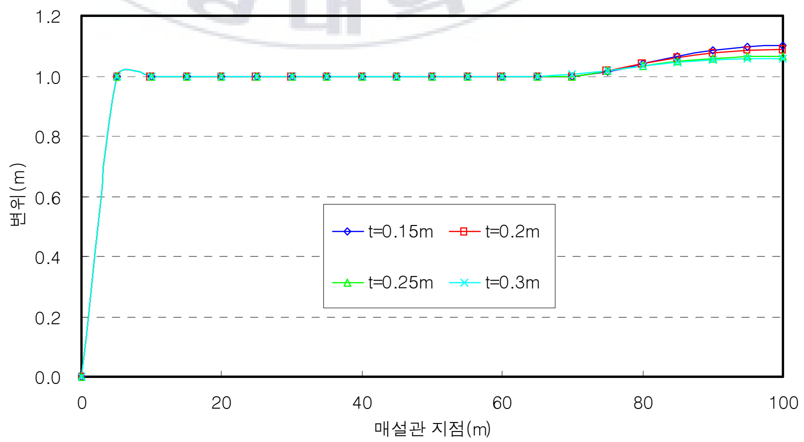
<table>
<tr><td>Free Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed-Free Ends</td><td>
</td></tr>
</table>

표 *5.2a* 축직각방향 단부 경계조건에 따른 관 두께의 영향

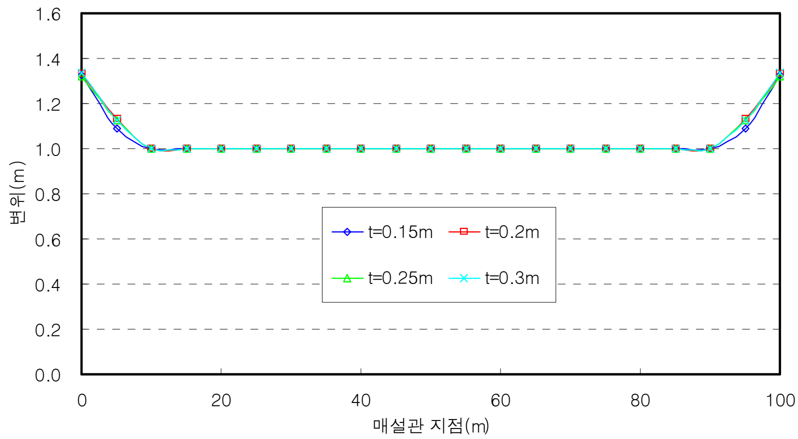
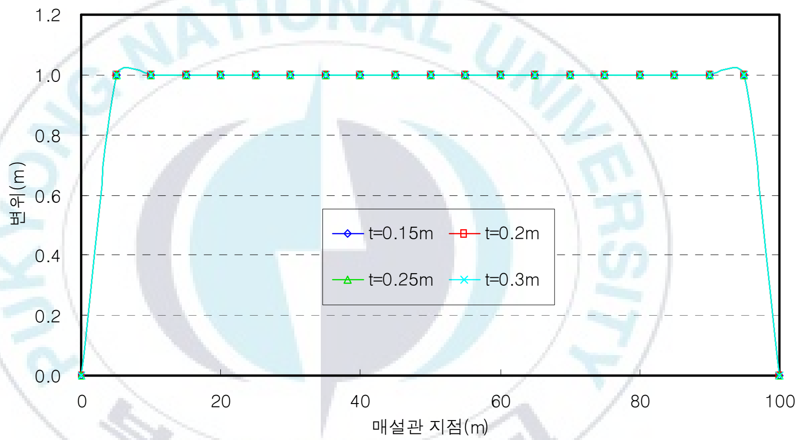
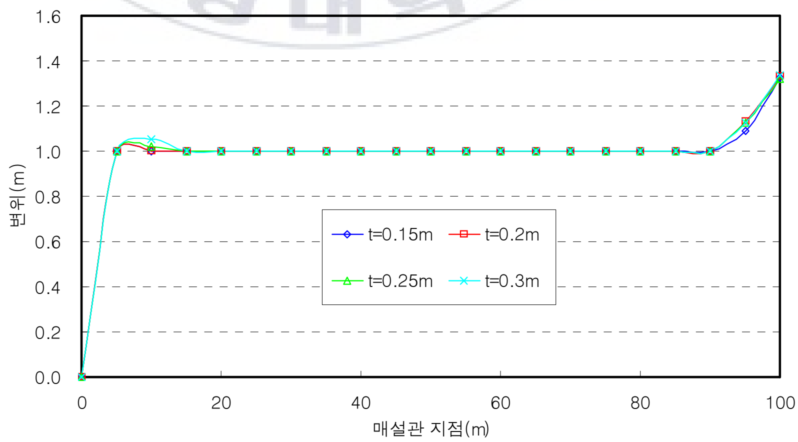
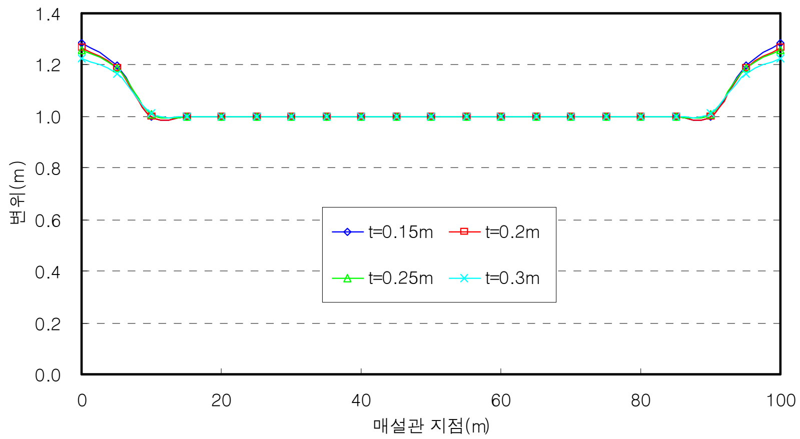
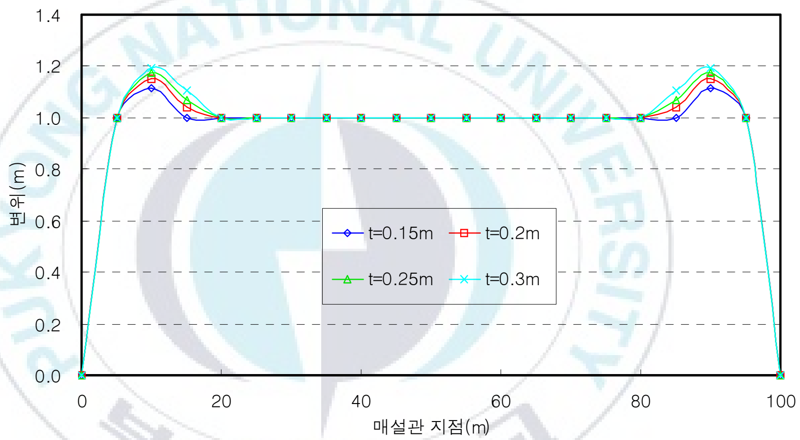
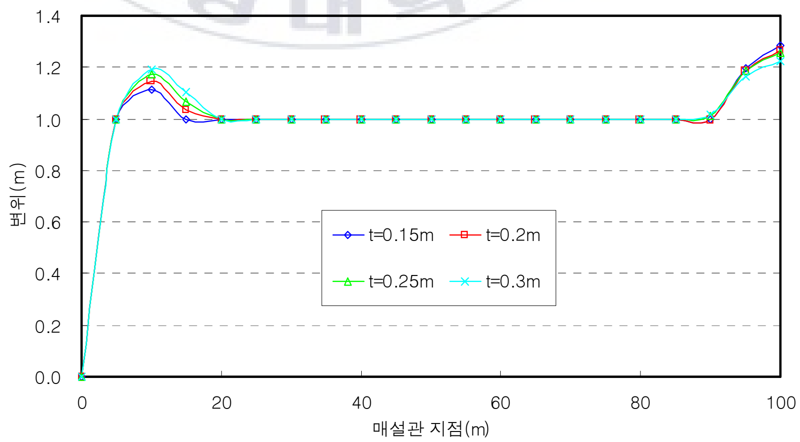
<table>
<tr><td>Free Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fixed-Free Ends</td><td>
</td></tr>
</table>

표 5.2b 축직각방향 단부 경계조건에 따른 관 두께의 영향

<table>
<tr><td>Guided Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Simply Supported Ends</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Supported -Guided Ends</td><td>
</td></tr>
</table>

6. 결 론

본 연구는 매설관의 여러 가지 관 단부경계조건에 대하여 지진파에 대한 매설관의 동적거동을 3D 유한차분 해석법에 의해 구한 후 이들 결과를 모드중첩법으로 구한 결과들과 비교하여 보았다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 축방향 양단자유 단부경계조건을 가진 매설관에 대해 El Centro 지진기록을 이용하여 Ogawa 등(2001)의 제안식에 의해 산출된 축방향 변형율 값을 기준으로 Larbi(1995)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 서로 유사한 축방향 변형율이 나타남을 알 수 있다.

2. 모드중첩법과 3D 유한차분 해석법의 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 경계조건에서

는 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.

3. 매설관의 동적해석에서 관 두께의 영향은 축방향이나 축직각방향 경계조건 모두에서 관 단부조건의 변화에도 매설관의 동적거동에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Ahcene Larbi (1995), 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*, pp. 23-43.

2. Hindy, A. and Novak, M. (1979), Earthquake Response of Underground Pipelines, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, pp. 451-476.

3. Itasca. (2005), FLAC 3D version 3.0 manual, Itasca Consulting Group, Inc.

4. Min, D.-J., Shin, C., Pratt, R.G., and Yoo, H.s., 2003, "Weighted-averaging finite-element method for 2-D elastic wave equations in the frequency domain," Bull. Seism. Soc. Am., Vol, 93, pp. 904-921.

5. Yoo, H.s., Min, D.-J., and Shin, C., 2004, "Free surface boundary condition in finite-difference elastic wave modeling," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 94, pp. 234-250

6. Nishio, N. and Satake, M. (1983), Characteristics of Deformation in a Buried Pipeline Under Sinusoidal Ground Motion, *Natural Disaster Science*, Japan, Vol. 5, No. 1, pp. 53-68.

7. Novark, M., Nogami Toyoaki and Abou-Ella, Farkhry (1978), Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case, *Technical Note, ASCE Journal of Engineering Mechanics*, EM4, pp. 953-959.

8. O'Rourke, M. J. and Wang, L. R. (1978), "Earthquake Response of Buried Pipelines," *Proceedings of the ASCE Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena, California.

9. O'Rourke, M. J. and El Hmadi, K. (1985), Earthquake Ground Wave Effects on Buried Piping., PVP-98-4, *ASME Pressure Vessel and Piping Technology*, Conference, pp. 165-171.

10. Ogawa, Y. and Koike T. (2001), Structural design of buried pipelines for severe earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering Vol. 21, pp.199-209.

11. Parmelee, R. A. and Ludtke, C. A. (1975), Seismic Soil-Structure Interaction of Buried Pipeline., *Proc. US Natlional Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, Michigan, Jun. 18-20, 1975, pp. 406-415. Published by Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

12. Sakurai, Akio and Takahashi, Tadashi (1969), Dynamic Stresses of Underground Pipelines During Earthquakes, *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Chile, pp. 81-95

13. 김태욱 (1999), 횡영구지반변형에 의한 라이프라인 구조물의 동적 거동 해석, 석사학위논문, 연세대학교 대학원.

14. 김성반, 정진호, 이병길 (2004), 매설관의 동적거동에 관한 연구(1), 대한토목학회학술발표회논문집, pp.5428-5433.

15. 이병길(2005), 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석, 박사학위논문, 부경대학교 대학원.

16. 이병길, 정진호, 장봉현, 안명석 (2004), 양단자유 경계조건을 가진 매설관의 동적거동에서 진동안전 기준에 관한 연구, 대한화약발파공학회, 제22권 제3호, pp.13-26.

17. 장봉현, 정진호, 이병길 (2003), 매설관의 동적거동에 대한 수치적 해석 접근(1), 대한토목학회학술발표회 논문집, pp. 4092-4096.

18. 장봉현, 정진호, 이병길 (2003), 매설관의 동적거동에 대한 수치적 해석 접근(2), 대한토목학회학술발표회 논문집, pp. 4097-4102.

19. 장봉현, 정진호, 이병길 (2004), 매설관의 동적거동에 관한 연구(2), 대한토목학회학술발표회논문집, pp.5422-5427.

20. 정진호, 이병길, 정두회, 박병호 (2005), 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석, 한국지반공학회특별논문집, 제21권 제5호 pp.33-43.

감사의 글

항상 부족한 저에게 끊임없는 격려로 저를 학문의 기로 인도해 주시고, 본 논문이 완성되기까지 열의와 성의를 다해 세심한 지도해 주신 지도교수 정진호 교수님께 머리 숙여 감사드립니다.

여러 가지로 바쁘신 중에서도 본 논문을 심사하시며 세밀한 지도와 충고와 격려를 해주신 이영대 교수님, 정두회 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

그리고 학위 과정 동안에 지도와 편달로 이끌어 주신 김종수 교수님, 손인식 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이종충 교수님, 김명식 교수님, 이환우 교수님, 국승규 교수님, 이상호 교수님, 김수용 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

아울러 본 논문이 완성되기까지 많은 도움을 준 이병길 선배님, 장봉현 선배님, 김성반 선배님, 김종식 후배님, 진종태 후배님, 정세환 후배님에게 감사의 마음을 전합니다. 그리고 대학원 과정동안 따뜻한 격려와 아낌없는 후원을 주신 박병호 소장님, 이영수 부장님에게도 감사의 마음을 전합니다. 그 외 대학원 선배님들, 동기들, 후배님들 일일이 나열하여 적지 못한 분들에게도 감사의 마음을 전합니다.

언제나 같은 자리에서 저를 묵묵히 지켜봐주시고 믿어주신 아버지, 어머니, 형님! 사랑합니다~! 그리고 대학생활 4년, 군생활 2년 6개월, 대학원 생활 2년 동안 공부한다고 많이 못 만나고 잘해주지 못한 은정이에게 미안하고 사랑한다고 전하고 싶습니다.

끝으로 이 자리에 서기까지 관심을 아끼지 않고 도움을 주신 모든 분들께 깊은 감사의 마음을 전합니다.