

## 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석 (II)

### Analysis of Seismic Response of the Buried Pipeline with Pipe End Conditions (II)

이병길<sup>1)</sup>, Byong-Gil Lee, 박병호<sup>2)</sup>, Byung-Ho Park, 정진호<sup>3)</sup>, Jin-Ho Jeong

<sup>1)</sup> 부경대학교 대학원 토목공학과 박사수료, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ.

<sup>2)</sup> 부경대학교 대학원 토목공학과 박사수료, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ.

<sup>3)</sup> 부경대학교 공과대학 건설공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Construction Eng., Pukyong National Univ.

**개요(SYNOPSIS) :** This work reports results of our study on the dynamic responses of the buried pipelines both along the axial and the transverse directions under various boundary end conditions. We have considered three cases, i.e., the free ends, the fixed ends, and the fixed-free ends for the axial direction, and three more cases including the guided ends, the simply supported ends, and the supported-guided ends for the transverse direction. In order to investigate the effect of the boundary end conditions for the dynamic responses of the buried pipeline, we have devised a computer program to find the solutions of the formulae on the dynamic responses (displacements, axial strains, and bending strains) under the various boundary end conditions considered in this study. The dynamic behavior of the buried pipelines for the forced vibration is found to exhibit two different forms, a transient response and a steady state response, depending on the time before and after the transfer of a seismic wave on the end of the buried pipeline. The former is identified by a slight change in its behavior before the sinusoidal-shaped seismic wave travels along the whole length of the pipeline whereas the latter by the complete form of a sinusoidal wave when the wave travels throughout the pipeline. The transient response becomes insignificant as the wave speed increases. We have observed a resonance when the mode wavelength matches the wavelength of the seismic wave, where the mode number(k) of resonance for the axial direction is found to be  $\bar{\omega}L/\pi V + 1/2$  for the fixed-free ends,  $\bar{\omega}L/\pi V + 1$  for the free ends, and  $\bar{\omega}L/\pi V$  for the fixed ends, respectively. By adding 10 more modes to the mode number(k) of resonance, we were able to study all the dynamic responses of the buried pipeline for the axial direction. On the other hand, we have not been able to observe a resonance in the analysis for the transverse direction, because the dynamic responses are found to vanish after the seventh mode. From the results of the dynamic responses at the many points of the pipeline, we have found that the responses appeared to be dependent critically on the boundary end conditions. Such effects are found to be most prominent especially for the maximum values of the displacement and the strain and its position.

**주요어(Key words) :** Seismic Response, Buried Pipeline, End Conditions

## 1. 서론

매설관은 광범위한 지역에 걸쳐 설치되기 때문에 지진에 의한 피해를 간과할 수 없다. 특히 국부의 파괴로 전체 기능이 마비되기 때문에 지진발생에 대비한 정확한 해석이 필요하다. 따라서 본 연구는 단부의 경계조건에 따른 매설관의 동적응답을 규명하기 위해 Larbi(1995)에 의해 수행된 축방향의 양단고정과 축직각방향의 양단자유 및 양단힌지에 대한 자유진동 해석에 강제진동 해석을 추가적으로 수행하였고, 가능한 모든 관 단부 경계조건을 고려하기 위해 축방향의 일단고정-일단자유와 축직각방향의 양단고정, 일단고정-일단자유 그리고 일단힌지-일단롤러에 대해서도 자유진동과 강제진동 해석을 수행하였다. Clough 등(1979)이 제시한 자유진동에 대한 지배미분방정식을 이용하여 각 경계조건에서의 모드형상을 결정한 후 고유진동수를 구하고, 이들을 이용하여

강제진동시 발생하는 매설관의 축방향에 대해 변위, 변형률 산정식과 축직각방향에 대한 변위, 휨변형률 산정식을 유도하여 Ogawa 등(2001)에 의해 제안된 축방향 변형률 식과 본 연구에서 유도된 식에 의한 결과치를 비교하여 본 해석법의 정확성을 검증하였으며, 가능한 모든 단부 경계조건의 매설관에 대해 최대응력이 발생하는 위치와 크기를 산정하였으며, 매설관의 동적거동에 영향을 가장 많이 발생시킬 수 있는 공진현상을 나타내는 모드수를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 관 단부 경계조건이 매설관의 동적응답에 미치는 영향에 대한 규명과 관의 동적응답에 영향을 주는 매개변수들의 영향에 대해 규명함을 본 연구의 목적으로 한다.

## 2. 매설관의 동적응답 해석

### 2.1 매설관의 변위, (휨)변형률 산정식

매설관의 동적응답 해석을 수행하기 위하여 자유진동을 통한 모드형상과 고유진동수를 결정한 후, 이를 이용하여 강제진동시 발생 가능한 매설관의 축방향 및 축직각방향에 대하여 변위, (휨)변형률 산정식을 표 1과 표 2와 같이 유도하였다. 여기서 D는 매설관의 직경이다.

표 1. 축방향 변위와 변형률 산정식

Classification		Result
Free Ends (Larbi, 1995)	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 변위와 휨변형률 산정식

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 (Larbi, 1995)	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	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = - \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

\* Free Ends(양단자유), Fixed Ends(양단고정), Fixed-Free Ends(일단고정-일단자유)

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

## 2.2 해석대상

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

표 3. 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성 및 지반특성치 (Larbi, 1995)

Classification		Symbol (unit)	Value
Concrete Pipe	Modulus of Elasticity	$E_p$ (N/m <sup>2</sup> )	$2.07 \times 10^{10}$
	Length	L (m)	100
	Average Radius	R (m)	1
	Thickness	t (m)	0.15
	Cross-Sectional Area	A (m <sup>2</sup> )	0.94248
	Moment of Inertia	I (m <sup>4</sup> )	0.47389
	Mass per Unit Volume	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2.2 \times 10^3$
	Mass per Unit Length	m (kg/m)	$2.0735 \times 10^3$
Soil	Axial Soil Stiffness	$K_A$ (N/m <sup>2</sup> )	$9.34 \times 10^7$
	Lateral Soil Stiffness	$K_T$ (N/m <sup>2</sup> )	$14.01 \times 10^7$

## 2.3 해석결과의 검증

관 단부 경계조건에 대해서 유도된 축방향 변형률 산정식(표 1)의 정확성을 검증하기 위해 Ogawa 등(2001)이 제시한 매설관의 축방향 변형률과 비교를 하였다. 해석에 이용된 지진파는 1940년에 발생한 El Centro 지진 기록을 이용하였다.

### 2.3.1 Ogawa 등(2001)의 제안식

흡입자의 거동은 파형태에 의존적이며, 파의 진행방향에 대해 축방향 성분과 축직각방향 성분으로 분리될 수 있다. 지진파를 수평방향으로 정현파 형태의 파가 전파된다고 가정하여, 최대 지반 변형률( $\epsilon_G$ )을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h \quad \text{여기서, } L : \text{과장 } U_h : \text{지반 변위} \quad (1)$$

Ogawa 등(2001)은 매설관의 관성에 의한 영향을 무시하고 지반과 매설관 변위비를 나타내는 변환계수  $\alpha_0$ 에 의해 양단자유 단부조건을 가진 매설관의 변형률( $\epsilon_S$ )을 식 (2)와 같이 산정될 수 있음을 제안하였다.

$$\epsilon_S = \alpha_0 \epsilon_G \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_0 = 1/1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L_a}\right)^2$ ,  $\lambda_1 = \sqrt{K_1/EA}$ ,  $L_a$  : 매설관 축방향으로 전파되는 파의 과장

$E$  : 매설관의 탄성계수,  $K_1$  : 축방향 등가 스프링 계수,  $A$  : 매설관의 단면적

표 3에 제시된 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성을 이용하여 식 (2)에서 주기 1sec일 때 매설관의 최대변형률을 산정하면  $1.349 \times 10^{-3}$ 이 된다.

### 2.3.2 결과 비교

표 4는 주기 1sec일 때 관 중심부에서 단부 경계조건에 따른 축방향 변형률을 본 연구와 Ogawa 등

(2001)의 제안식에 의해 산출된 축방향 변형률을 비교한 것이며, Ogawa 등(2001)에 의해 산정된 값을 기준으로 양단자유 경계조건에서는 6.2%, 양단고정 경계조건에서는 51.4%, 일단고정-일단자유 경계조건에서는 3.0%의 차이를 나타내고 있다.

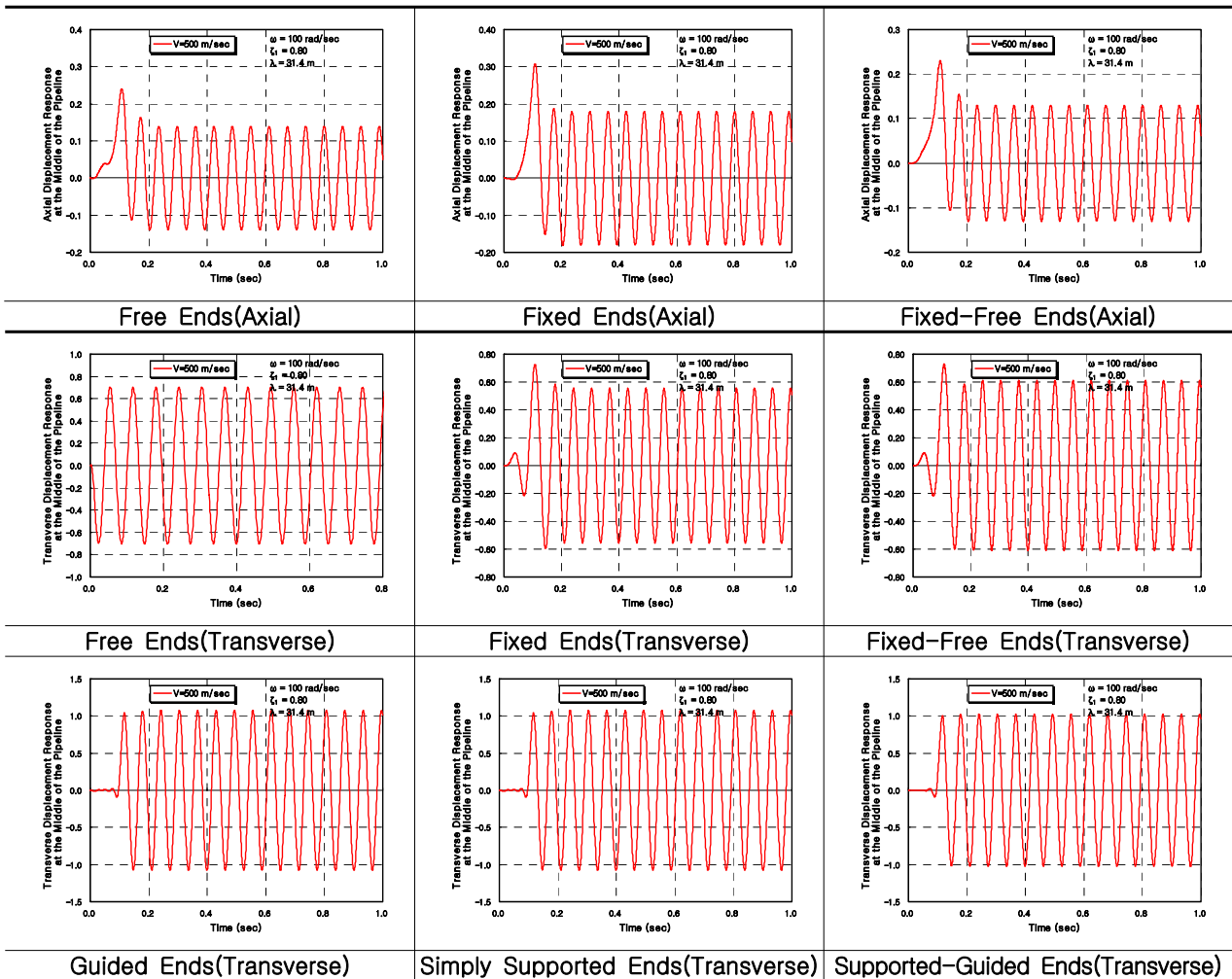
표 4. 축방향 변형률의 비교 (T=1sec)

	Ogawa et al(2001)	Free Ends	Fixed Ends	Fixed-Free Ends
Axial Strain	$1.349 \times 10^{-3}$	$1.432 \times 10^{-3}$	$2.042 \times 10^{-3}$	$1.390 \times 10^{-3}$

## 2.4 매설관의 일시적 및 정상상태 변위응답

표 5는 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 5. 매설관의 중간지점에서의 축방향 및 축직각방향의 변위 응답

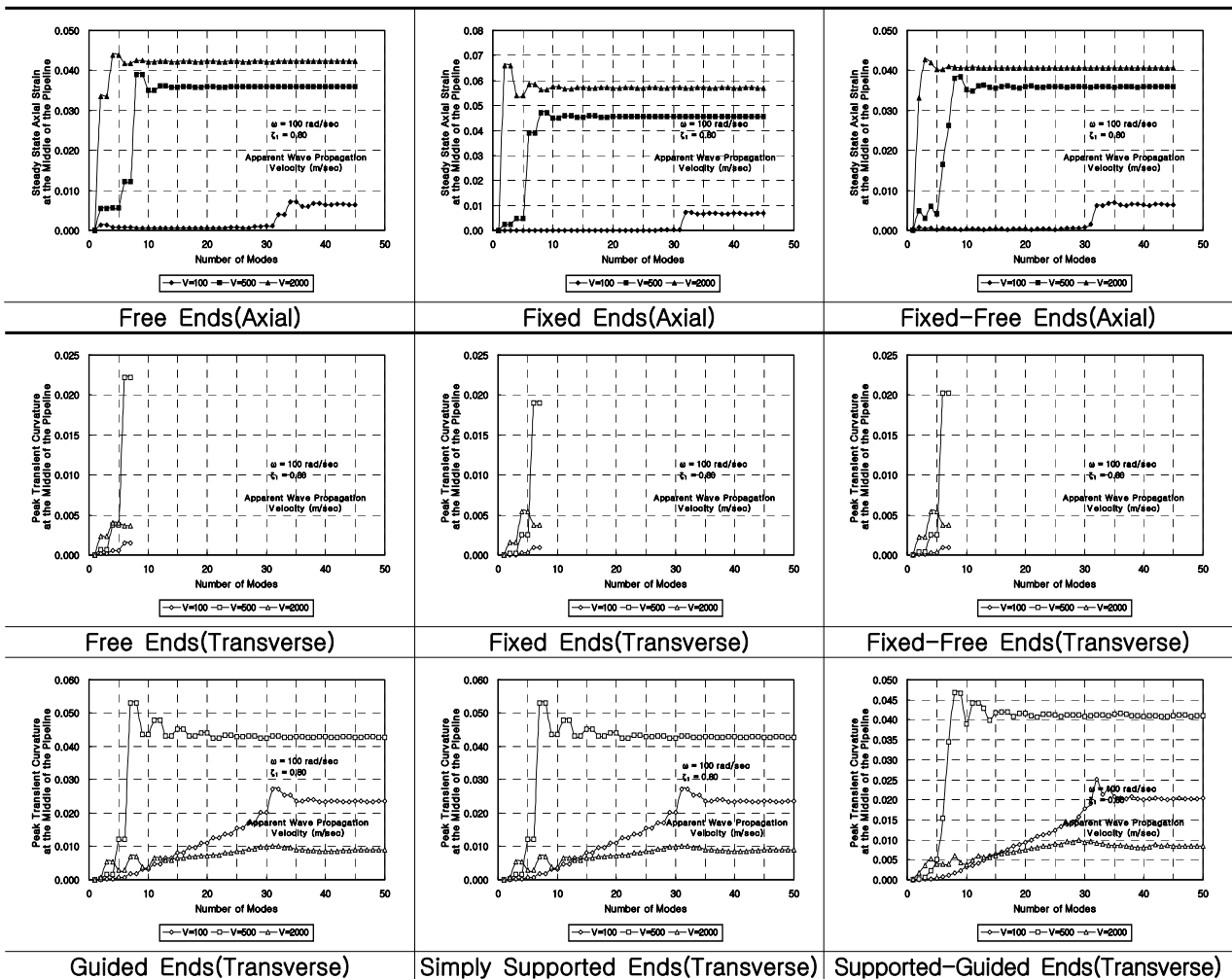


## 2.5 모드수의 영향

연속계의 동적해석에서 있어 주요 고려사항은 응답을 정확하게 평가하는데 필요한 모드의 수이다. 본 연구에서는 낮은 전파속도 100m/sec, 중간 전파속도 500m/sec, 높은 전파속도 2000m/sec, 그리고 높은 지반진동수 100rad/sec를 적용하여 단부 경계조건에 따른 모드수의 영향에 대해서 검토하였다.

표 6은 이러한 조건을 고려하여 모드수의 변화에 따른 변형률과 곡률의 변화를 나타내고 있다. 축방향 강제진동의 경우 해석시 매설관의  $k$ 번째 모드의 파장 ( $4L/(2k-1)$ )과 지진파의 파장 ( $2\pi V/\omega$ )이 같아질 때 공진현상이 발생한다. 따라서 공진이 발생하는 모드는  $k = \omega L/\pi V + 1/2$ 로 산정된다. 표 6에서 축방향 강제진동의 경우 진동수 100rad/sec와 전파속도 100m/sec 그리고 매설관의 길이 100m를 이용하여 공진 발생 모드를 산정하면  $k = (100 \times 100)/(\pi \times 100) + 1/2 = 32.3$ 이 된다. 이와 같이 다른 단부 경계조건에 대해서 동적응답 해석을 수행하여 매설관의 축방향 및 축직각방향에 대한 동적응답 해석에서 매설관의 모드 파장과 지진파의 파장이 같아지는 공진현상을 확인할 수 있었으며, 이때의 모드수( $k$ )는 축직각방향의 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부조건에서는 7개 그리고 축방향의 일단고정-일단자유에서는  $k = \omega L/\pi V + 1/2$ , 양단자유에서는  $k = \omega L/\pi V + 1$ , 양단고정에서는  $k = \omega L/\pi V$ 로 산정되었다. 따라서 축방향 강제진동시의 소요 모드수 산정은 최대 영향을 나타내는 모드수에 영향을 미치지 않을 것으로 예상되는 추가 10개의 모드를 더해서  $2L/\lambda + 11$ 번째 모드수를 사용하면 전반적인 동적거동 현상을 확인할 수 있다.

표 6. 모드수에 따른 정상상태 변형률(축방향)과 곡률(축직각방향) 응답



## 2.6 매설관의 지점위치별 변위응답과 변형률응답

표 7은 단부 경계조건에 따른 매설관의 지점위치별 최대 변위응답을 나타낸 표이며, 표 8은 매설관의 지점위치별 최대 변형률응답을 나타낸 표이다. 이는 매설관의 설계시 최대응력 발생위치와 크기를 산정할 경우 반드시 검토해야할 사항이다. 해석에 적용된 파의 특성으로서는 전파속도( $V$ ), 300m/sec, 지반진동수( $\omega$ ), 30rad/sec, 파장( $\lambda$ ), 62.8m에 대해서 해석되었으며 첫 번째 모드에 산정되는 감쇠비는 80%를 적용하였다. 표 7에서 볼 수 있듯이 축방향에서 양단자유와 양단고정의 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 보인다. 또한 양단자유와 일단고정-일단자유 단부 경계조건에서 일시적 응답은 매설관 길이의 약 85%이후에서는 감소하여 정상상태 응답이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 매설관 길이의 85%이후의 지점에서는 일시적 응답의 지속시간 동안 적은 수의 진동을 받기 때문이다. 그리고 축직각방향에 대한 6가지 단부 경계조건에 대해서도 관 단부에서의 응답거동은 축방향에서와 같이 동일한 거동을 보이지만 최대 변위응답이 발생하는 위치는 차이를 보인다. 또한 표 8에서 볼 수 있듯이 관 단부 경계조건을 달리하는 매설관에 대해서 관 단부에서 나타나는 (휨)변형률응답은 변위응답에서와 같이 유사한 경향을 보이며 지점위치별 (휨)변형률 응답은 관 단부조건이 대칭인 구조에선 중앙부를 기준으로 좌우 대칭적인 경향을 보이고 있다. 반면 일단고정-일단자유와 일단힌지-일단롤러와 같이 비대칭적인 구조에서는 관 중앙부를 기준으로 비대칭적인 경향을 나타냄을 알 수 있다.

표 7. 단부 경계조건에 따른 변위응답( $V=300\text{m/sec}$ )

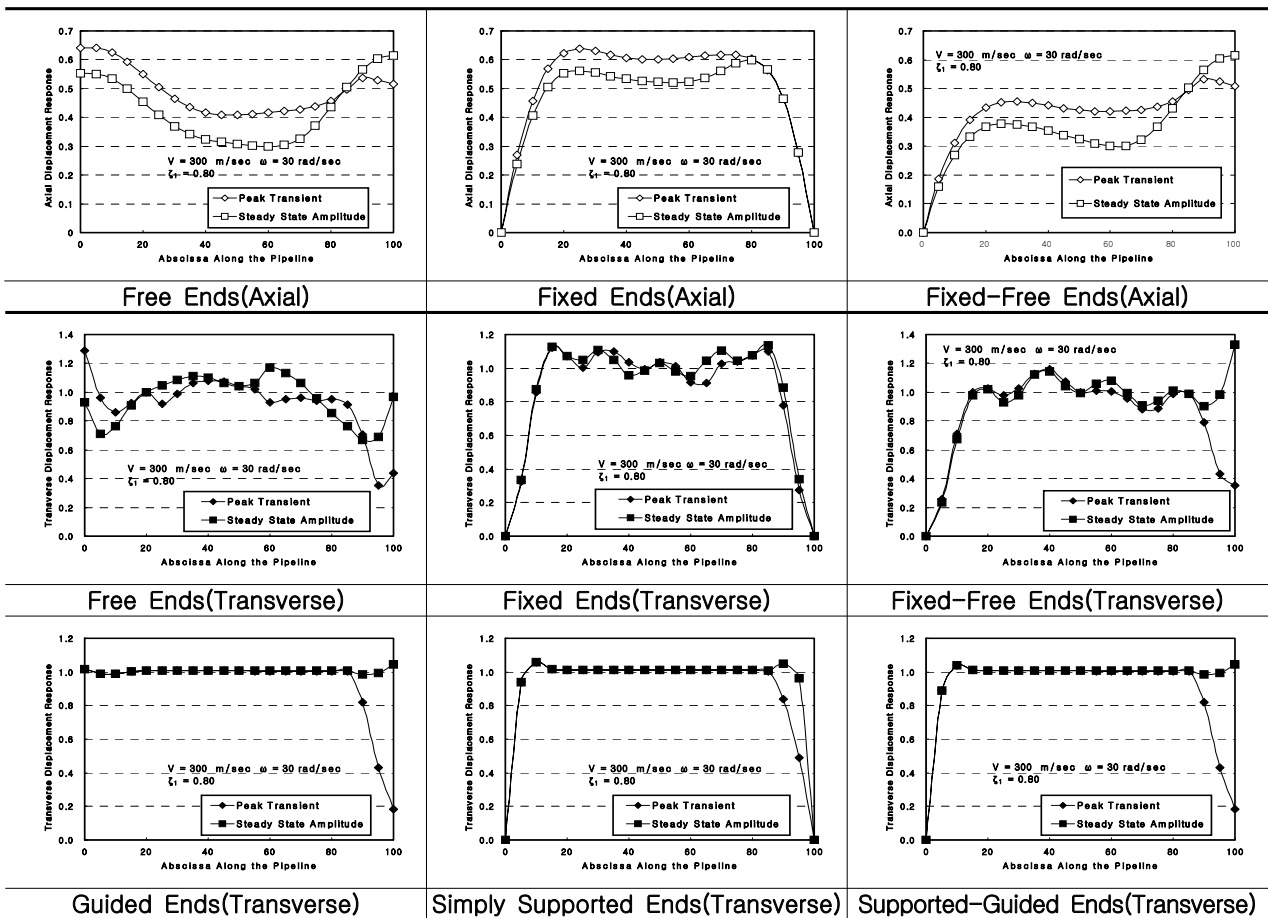
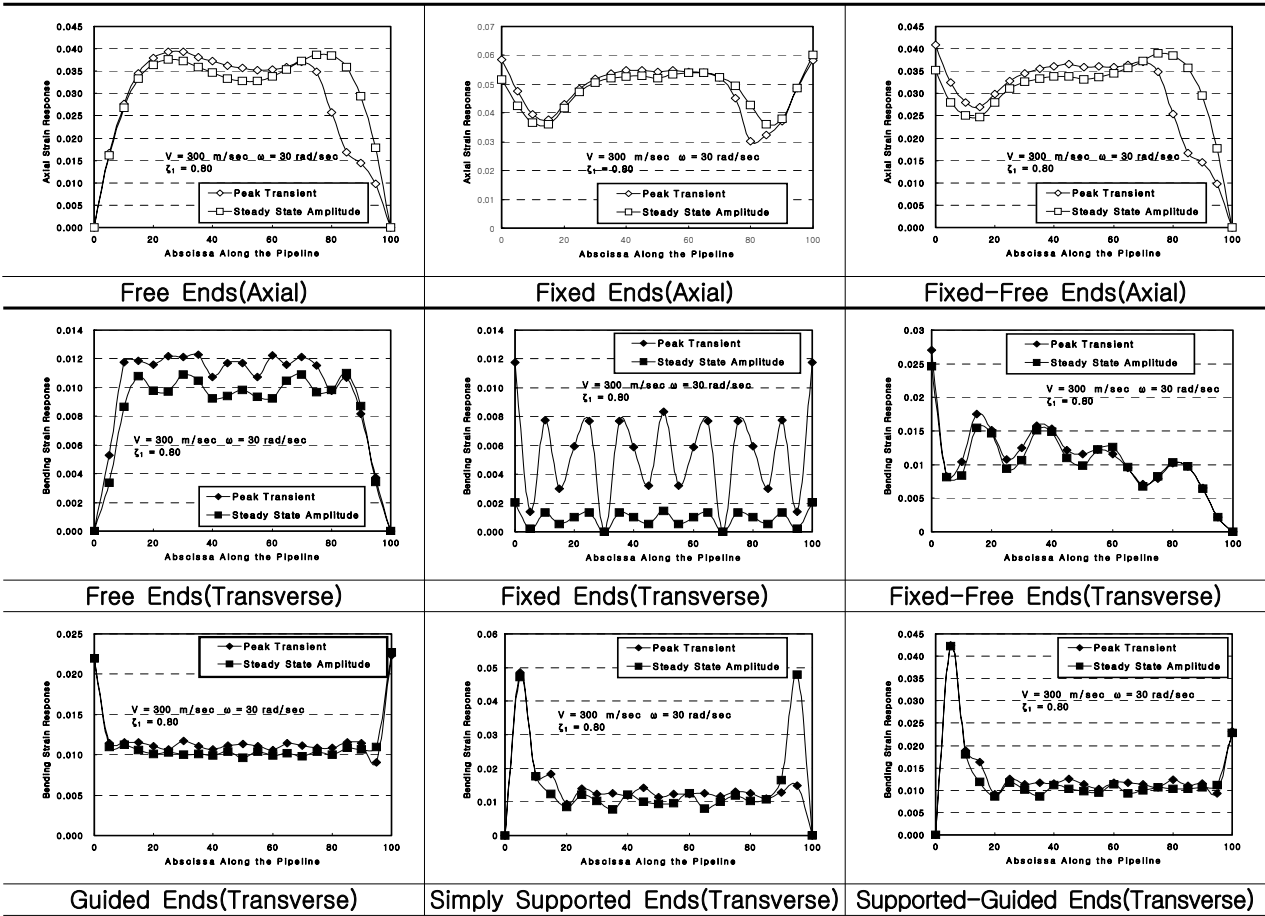


표 8. 단부 경계조건에 따른 변형률응답( $V=300\text{m/sec}$ )



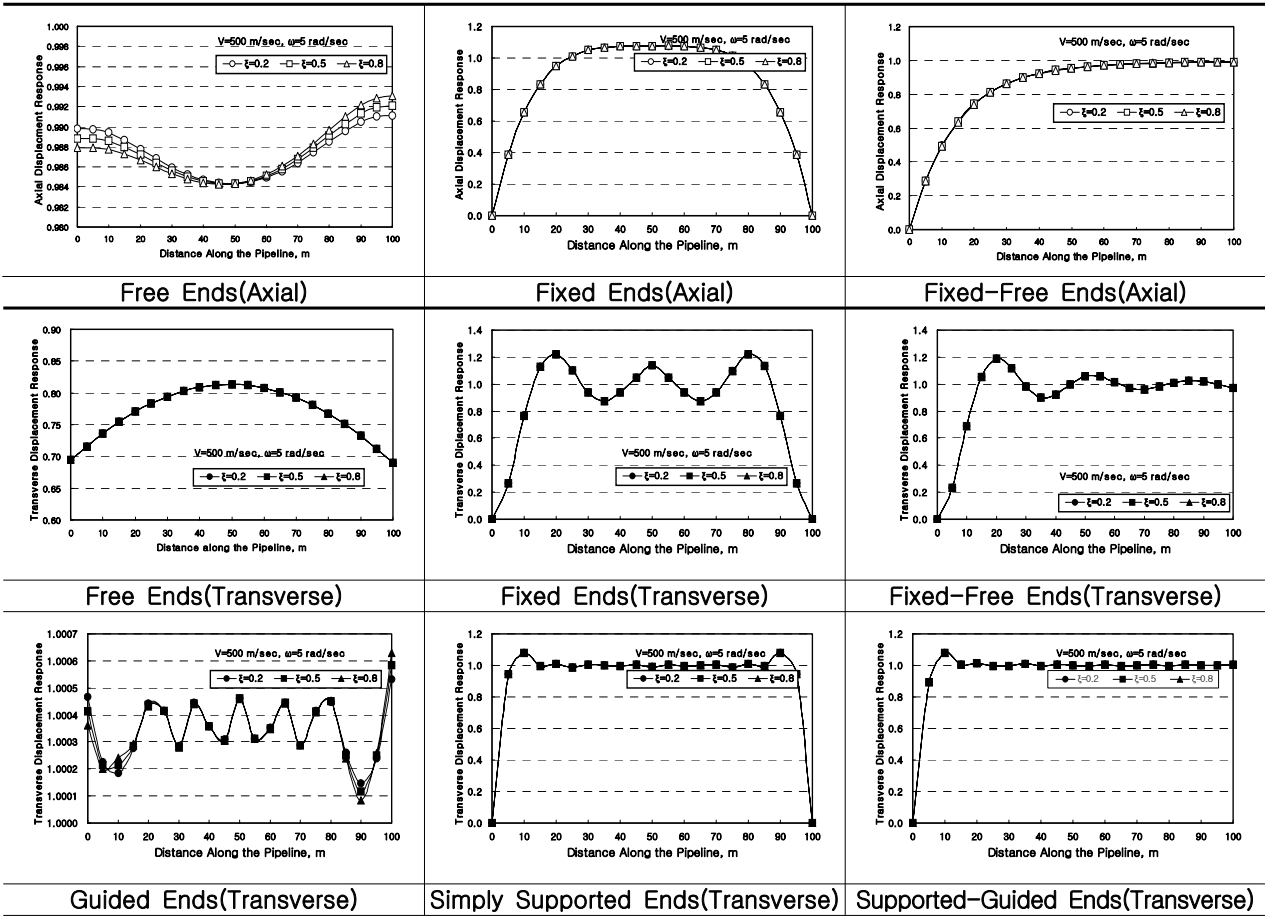
### 3. 동적해석 매개변수 연구

#### 3.1 지반-구조물 상호작용 감쇠에 의한 영향

본 절은 매설관의 응답에서 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비( $\zeta_1$ )의 영향을 검토하였다. 관 단부 경계조건을 대상으로 매설관의 중간지점에서 정상상태 변위응답은 첫 번째 모드의 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비를 20%, 50%, 80%를 적용하였고 지반진동수 5rad/sec와 전파속도 500m/sec를 적용하여 해석하였다.

표 9는 관 단부 경계조건에 대한 축방향 및 축직각방향에서의 감쇠비 영향을 해석한 그림이다. 이들 그림으로부터 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비( $\zeta_1$ )는 관 단부조건에 변화에도 매설관의 동적거동에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이런 현상은 매설관의 동적응답이 지반의 동적응답보다 작게 발생하므로 타당한 결과로 판단된다(Larbi, 1995). 그리고 축방향 및 축직각방향 진동 모두 동일한 경향이 나타났으며, 축직각방향의 강성계수가 축방향 강성계수의 1.5배 상당함을 통해 감쇠비의 영향이 축방향에서 보다도 더 없는 것을 알 수 있다.

표 9. 단부 경계조건에 따른 지반-구조물 상호작용 감쇠에 의한 영향



### 3.2 지반운동 파장의 영향

지반운동 파장( $\lambda$ )의 영향은 관 단부 경계조건에서 축방향과 축직각방향의 응답 모두에 대해 중요하며, 파장은 지반진동수와 전파속도에 직접적으로 관계가 있다 ( $\lambda = 2\pi V/\omega$ ). 본 절은 매설관의 응답에 대해 전파속도와 지반진동수의 조합된 영향을 파장의 측면에서 해석하였고 지진시 가능한 전파속도와 지반운동의 다양한 범위를 해석하기 위해, 넓은 범위의 파장(5m ~ 10km)과 100, 200, 500, 1000, 2000m/sec의 겉보기 전파속도를 고려하였다.

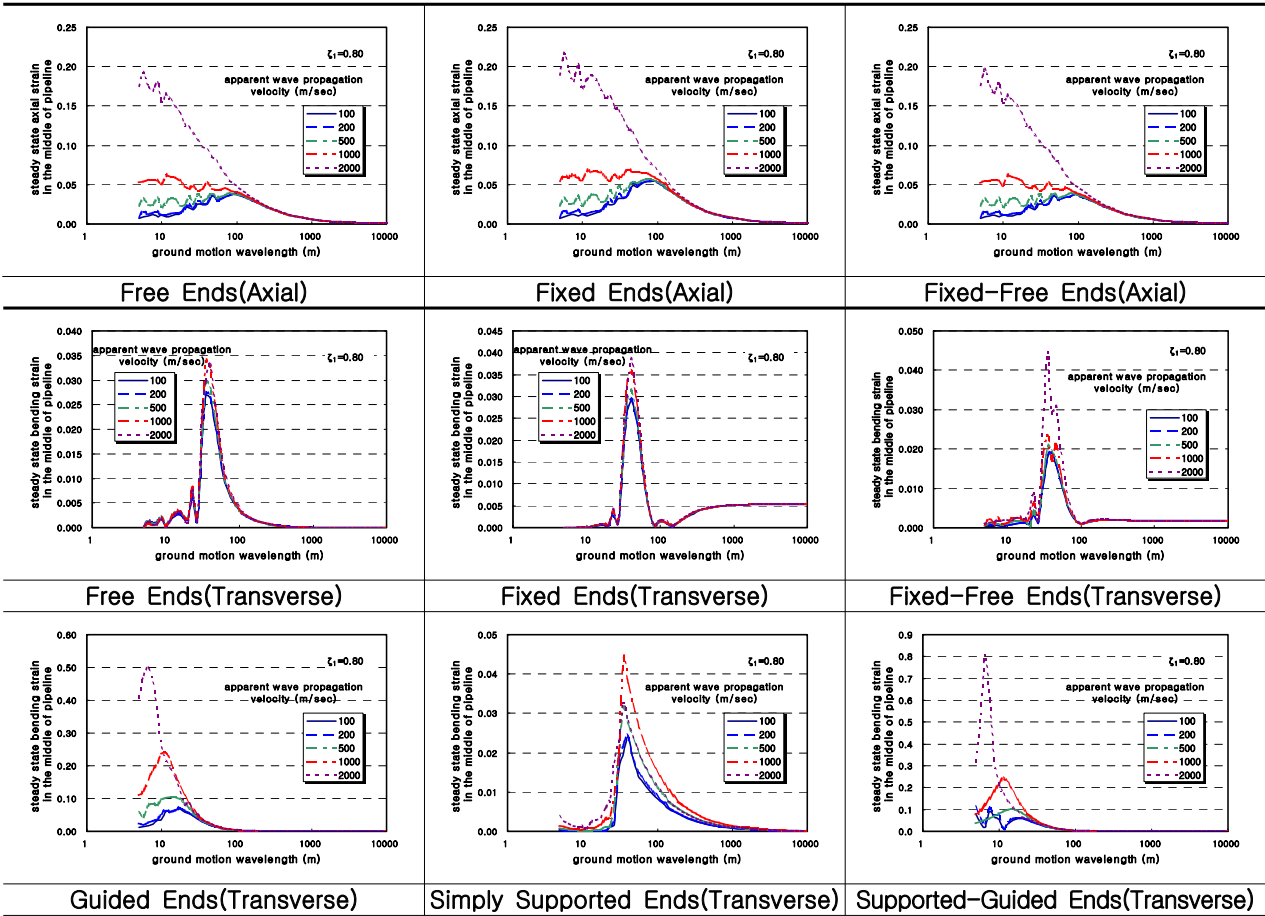
축방향에 대해 고려될 수 있는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부 경계조건과 축직각방향에 대해 고려될 수 있는 6가지의 관 단부 경계조건에 대해 (휨)변형률에 미치는 파장의 효과를 표 10에 나타내었다. 이 그림으로부터 최대 변형률을 발생시키는 파장을 임계파장이라고 정의하면 임계파장보다 더 큰 파장에 대해서 변형률은 감소하며 결국 0으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 이로부터 단파에 있어서는 전파속도( $V$ )가 클수록 변형률은 크게 발생되므로 전파속도의 영향이 대단히 많음을 알 수 있다.

축직각방향에 대한 전반적인 경향은 축방향에서와 비슷하게 나타나지만 관 단부 경계조건이 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유일 경우 임계파장보다 짧은 파장에 대해 전파속도의 영향이 미소함은 모드수가 7번째로 동적응답이 완료되는 특성에 기인하기 때문이다. 반면 모드수 32번째 이상에서 공진현상을 보이는 양단roller, 양단hinge, 일단hinge-일단roller 단부 경계조건에서는 단파에서 속도의 영향이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다.

본 연구에서 수행되어진 것과 같이, 매설관의 동적거동은 지반진동수나 파장과 같은 주요 특성의 인자에 대해 독립적으로 평가될 수 없으며 지반진동수와 전파속도의 조합과 표준화된 정현파 입력 진동에 대해 동적해석을 수행한 결과 대체적으로 축직각방향의 휨변형률응답이 축방향의 변형률보다 높게 산정되는 경향을 보이고 있다.



표 10. 단부 경계조건에 따른 지반운동 파장의 영향



#### 4. 결론

본 연구는 단부의 경계조건에 따른 매설관의 동적응답을 규명하기 위해 Larbi(1995)에 의해 수행된 축방향의 양단고정과 축직각방향의 양단자유 및 양단힌지에 대한 자유진동 해석에 강제진동 해석을 추가적으로 수행하였고, 가능한 모든 관 단부 경계조건을 고려하기 위해 축방향의 일단고정-일단자유와 축직각방향의 양단고정, 일단고정-일단자유 그리고 일단힌지-일단롤러에 대해서도 자유진동과 강제진동 해석을 수행하였다. Clough 등(1979)이 제시한 자유진동에 대한 지배미분방정식을 이용하여 각 경계조건에서의 모드형상을 결정된 후 고유진동수를 구하고, 이들을 이용하여 강제진동시 발생하는 매설관의 축방향에 대해 변위, 변형률 산정식과 축직각방향에 대한 변위, 휨변형률 산정식을 유도(표 1과 표2)하여 Ogawa 등(2001)에 의해 제안된 축방향 변형률 식과 본 연구에서 유도된 식에 의한 결과치를 비교하여 본 해석법의 정확성을 검증하였으며, 단부 경계조건에 따른 매설관의 동적응답 해석과 관의 동적응답에 영향을 주는 매개변수 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매설관의 동적응답(변위, (휨)변형률)은 일시적 응답과 정상상태 응답으로 구분되어짐을 확인하였다.
2. 매설관의 축방향 및 축직각방향에 대한 동적응답 해석에서 매설관의 모드 파장과 지진파의 파장이 같아지는 공진현상을 확인할 수 있었으며, 이때의 모드수(k)는 축직각방향의 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부조건에서는 7개 그리고 축방향의 일단고정-일단자유에서는  $k = \bar{\omega}L / \pi V + 1/2$ , 양단자유에서는  $k = \bar{\omega}L / \pi V + 1$ , 양단고정에서는  $k = \bar{\omega}L / \pi V$ 로 산정되었다. 여기에 10개의 모드를 추가한 모드수를 포함하면 전반적인 동적거동을 확인할 수 있다.

3. 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.
4. 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비는 관 단부 경계조건에 관계없이 매설관의 동적응답 해석에 영향을 미치지 않는다.
5. 매설관의 최대 변형률응답을 나타내는 파장을 임계파장이라고 정의하면 임계파장보다 더 큰 파장에 대해서 변형률은 감소하며, 결국 0으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 단파에 있어서 전파속도가 클수록 변형률은 커지므로 전파속도의 영향이 커지며 모든 관의 단부 경계조건에 관계없이 적용되어질 수 있다.

## 참고문헌

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. Clough, Ray W., Penzien, Joseph (1975), *Dynamics of Structures*, MacGraw Hill Book Company, New York, pp. 293-327.
3. Datta, T. K. and Mashally, E. A. (1986), *Pipeline Response to Random Ground Motion by Discrete Model*, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, Vol. 14, pp. 559-572
4. Ogawa, Y. and Koike T. (2001), *Structural design of buried pipelines for severe earthquake*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering Vol. 21, pp.199-209.