

각종 매설관의 동적거동에 관한 연구

A Study on the Dynamic Behavior of a Various Buried Pipeline

정진호¹⁾ · 임창규²⁾ · 정두회³⁾ · 국승규⁴⁾

Jeong, Jin-Ho · Lim, Chang-Kyu · Joeng, Du-Hwoe · Kook, Seung-Kyu

국문 요약 >> 본 연구는 각종 매설관의 경계조건에 따른 동적 거동에 대한 연구이다. 축방향 및 축직각방향에 대한 거동을 조사하였다. 매설관은 탄성기초 위에 놓인 보요소로 모형화하였고, 지진파는 정현파 형태의 지반 변위로 적용하였다. 매설관의 고유진동수와 모드 형태 그리고 매개변수의 영향을 조사하기 위해 자유 진동에 대한 해석을 수행했다. 그리고 지반진동에 대한 거동을 조사하기 위해 자유 진동 해석을 통해 얻어진 고유진동수와 모드 형태를 이용하여 강제 진동에 대한 수식을 유도하였다. 자유 진동시 매설관의 고유진동수에 가장 큰 영향을 미치는 것은 지반 강성과 매설관의 길이였다. 지반진동의 전파방향과 전파속도 그리고 진동수에 대한 콘크리트관, 강관, FRP관의 동적거동을 연구하였고 그 결과를 비교하였으며 다양한 단부경계조건에 대한 동적거동해석을 통해 매설관의 종류와 단부경계조건에 따른 최대 변형을 발생지점을 산정하였다.

주요어 매설관, 경계조건, 동적 거동

ABSTRACT >> This work reports the results of our study on the dynamic response of various buried pipelines depending on their boundary conditions. We have studied behavior of the buried pipelines both along the axial and the transverse direction. The buried pipelines are modeled as beams on elastic foundation while the seismic wave as a ground displacement in the form of a sinusoidal wave. The natural frequency, its mode, and the effect of parameters have been interpreted in terms of free vibration. In order to investigate the response on the ground wave, the resulting frequency and the mode shape obtained from the free vibration have been utilized to derive the mathematical formula for the forced vibration. The natural frequency varies most significantly by the soil stiffness and the length of the buried pipelines in the case of free vibration. The effects of the propagation direction and velocity and the frequency of ground wave on the dynamic responses of concrete, steel, and FRP pipes have been analyzed and then dynamic responses depending on the type of pipes have been compared. Through performing dynamic analyses for various boundary conditions and estimation of the location of maximum strain has been estimated for the type of pipes and boundary conditions.

Key words buried pipelines, boundary conditions, dynamic behavior

1. 매설관의 자유진동 산정식

동적 응답의 기본적인 특성과 매설관의 거동을 입증하기 위해선 우선 매설관의 고유진동수와 진동 모드형상의 결정이 필요하다. Clough 등(1979)이 제시한 자유진동에 대한 지배미분방정식을 이용하여 여러 가지 경계조건에서의 진

동 모드형상 및 고유진동수를 산정할 수 있는 식을 유도하였다.

1.1 축방향의 자유진동

매설관을 탄성기초 위에 놓인 보로서 해석하였으며, 이러한 연구방법은 해석의 간편성과 정확성을 바탕으로 O'Rourke 등 (1978), Hindy와 Novak (1980), Zerva 등(1988), Larbi (1995)의 연구에 사용되었고 축방향 자유 진동을 지배하는 미분방정식은 다음과 같다(Clough 등, 1975; Zerva 등, 1988; Larbi, 1995).

$$m \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} + C_A \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + K_A v(y,t) - E_p A \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

¹⁾ 정회원·부경대학교 건설공학부 교수, 공학박사
(대표저자: geojh@pknu.ac.kr)

²⁾ 비회원·부경대학교 토목공학과 박사과정

³⁾ 비회원·부경대학교 건설공학부 교수, 공학박사

⁴⁾ 정회원·부경대학교 건설공학부 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 2. 9 / 심사종료일 : 2006. 5. 11)

여기서,

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

$m(kg/m)$: 매설관의 단위 길이당 질량

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

$E_p(N/m^2), A(m^2)$: 매설관의 탄성계수와 단면적

축방향 지배미분방정식은 질량과 감쇠계수, 축방향강성 그리고 축방향 전파로 인해 발생하는 보의 내부력의 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 1과 같다.

1.2 축직각방향의 자유진동

축직각방향 자유진동에 대해 지배적인 미분방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서,

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

$m(kg/m)$: 매설관의 단위 길이당 질량

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

$E_p(N/m^2)$: 매설관의 탄성계수




$I(m^4)$: 매설관의 관성모멘트

표 2에서는 축방향 자유진동과 동일한 방법으로 축직각방향 자유진동에서 고려되는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건에 대해 고유진동수와 모드형상 산정식을 나타내었다.

2. 고유진동수의 매개변수 영향

구조물의 동적응답에 영향을 미치는 가장 중요한 변수는 고유진동수다. 고유진동수는 지반의 강성뿐 아니라 매설관의 단위길이당 질량, 강성(축방향 및 축직각방향), 길이와 재료의 물성치 등과 같은 변수에 영향을 받는다. 이러한 영향을 평가하기 위해 콘크리트관과 광관, FRP관에 대하여 해석하였다. 이러한 해석은 어느 변수가 고유진동수에 가장 큰 영향을 미치는가를 알 수 있게 해주며 매설관의 종류에 따른 영향을 확인할 수 있다. 축방향 및 축직각방향 지반강성은 연약지반에 대한 값을 택하여 해석에 적용하였다(Larbi, 1995). 결과를 나타내는 그래프는 일단고정-일단자유 단부경계조건에 대하여 대표적으로 나타내었다.

〈표 1〉 축방향 자유진동에서의 모드형상 과 고유진동수 산정식


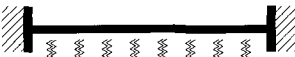
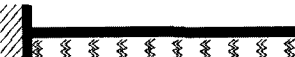
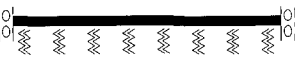


단부 경계조건	경 계 모 델	모드형상, $\phi_k(y)$
	경 계 값	고유진동수, ω_k
양단자유 (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \cos \frac{(k-1)\pi y}{L}; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi'(0) = 0, \phi'(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_A}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{(k-1)\pi}{L} \right)^2 \right\}}$
양단고정 (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \sin \frac{k\pi y}{L}; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = 0, \phi(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_A}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \right\}}$
일단고정 일단자유		$\phi_k(y) = \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L}; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = 0, \phi'(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_A}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \right\}}$

여기서, k : 모드수

L : 매설관의 길이

y : 해석지점

〈표 2〉 축직각방향 자유진동에서의 모드형상과 고유진동수 산정식

단부경계조건	경 계 모 델	모드형상, $\phi_k(y)$
	경 계 값	고유진동수, ω_k
양단자유 (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \frac{\sin(\beta L) - \sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L) - \cos(\beta L)} \{ \cosh(\beta y) + \cos(\beta y) \} + \sinh(\beta y) + \sin(\beta y)$
	$\phi''(0) = \phi''(L) = 0$ $\phi'''(0) = \phi'''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \beta_k^4 \right\}}$
양단고정		$\phi_k(y) = \frac{\sin(\beta L) - \sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L) - \cos(\beta L)} \{ \cosh(\beta y) - \cos(\beta y) \} + \sinh(\beta y) - \sin(\beta y)$
	$\phi(0) = \phi(L) = 0$ $\phi'(0) = \phi'(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \beta_k^4 \right\}}$
일단고정 일단자유		$\phi_k(y) = -\frac{\sin(\beta L) + \sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L) + \cos(\beta L)} \{ \cosh(\beta y) - \cos(\beta y) \} + \sinh(\beta y) - \sin(\beta y)$
	$\phi(0) = \phi'(L) = 0$ $\phi'(0) = \phi''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \beta_k^4 \right\}}$
양단롤러 (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \cos\left(\frac{(k-1)\pi y}{L}\right); k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi'(0) = \phi'(L) = 0$ $\phi'''(0) = \phi'''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \left(\frac{(k-1)\pi}{L} \right)^4 \right\}}$
양단힌지 (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \sin\left(\frac{k\pi y}{L}\right); k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = \phi(L) = 0$ $\phi''(0) = \phi''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \right\}}$
일단힌지 일단롤러		$\phi_k(y) = \sin\left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right); k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = \phi''(0) = 0$ $\phi'(L) = \phi'''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^4 \right\}}$

여기서, $q_k(t)$: 시간만의 함수로서 일반화된 좌표 β : 각 경계조건에서의 초월함수를 만족하는 값

〈표 3〉 지반강성과 각종 매설관의 재원

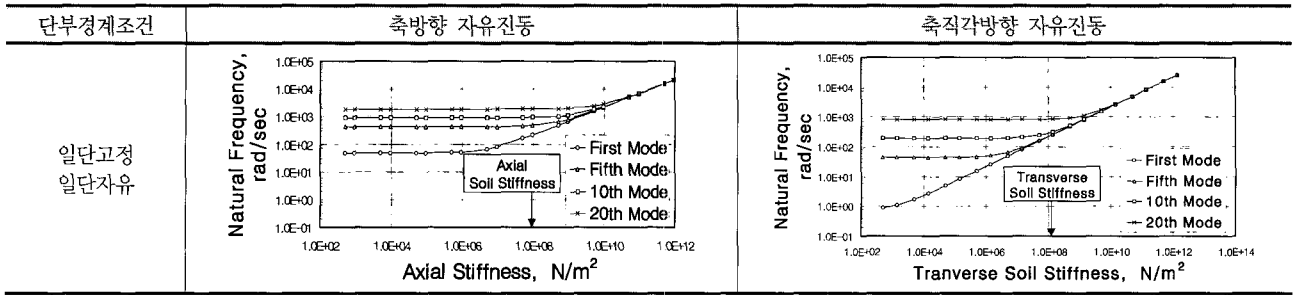
구 분	기호 (단위)	콘크리트관	강 관	FRP 관	
매설관	탄 성 계 수	E_p (N/m ²)	2.07×10^{10}	2.10×10^{11}	2.20×10^9
	길 이	L (m)	100	100	100
	평 균 반 경	R (m)	1	1	1
	두 겹	t (m)	0.15	0.018	0.04
	단 면 적	A (m ²)	0.94248	0.11389	0.25635
	관성모멘트	I (m ⁴)	0.47389	0.05775	0.13341
	단위길이당 질량	m (kg/m)	2.0735×10^3	0.894×10^3	0.467×10^3
지반	축방향 지반강성	K_A (N/m/m)		9.34×10^7	
	축직각방향 지반강성	K_T (N/m/m)		14.01×10^7	

2.1 지반강성의 영향

지반 강성은 매설관을 지지하는 탄성기초를 나타낸다. 축방향 및 축직각방향 진동에 관한 표 4로부터, 지반강성이 1×10^{10} N/m 이상에서 지반의 강성이 증가함에 따라 고유진동수도 증가한다는 것을 알 수 있다. 반면, 지반강성이

1×10^{10} N/m 이하에서 고유진동수는 어느 한계를 넘어서는 일정하게 유지되고 모드수가 증가할수록 고유진동수는 증가한다. 지반강성이 1×10^{10} N/m 이하에서, 축방향 고유진동수는 축직각방향 진동수보다 높다. 이러한 경향은 관단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

〈표 4〉 지반강성에 따른 고유진동수의 변화



2.2 매설관의 탄성계수 영향

표 5에서 보는 바와 같이, 고유진동수는 탄성계수 $1 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 을 경계로 낮은 값에서는 고유진동수의 증가가 없으며 그 이상의 값의 범위에서는 탄성계수의 증가와 함께 증가하는 것을 알 수 있다. FRP관의 경우 $2.20 \times 10^9 \text{N/m}^2$ 이라는 탄성계수 값을 가지므로 탄성계수로 인한 고유진동수의 증가는 없는 것으로 나타난다. 콘크리트관($2.07 \times 10^{10} \text{N/m}^2$)과 강관($2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$)의 탄성계수 값은 고유진동수에 영향을 미침을 알 수 있다.

표 5에서 탄성계수가 $1 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 보다 작거나 같은 강성을 가진 재료에 있어 탄성계수는 결정적인 요소가 아니라는 것을 적어도 처음 10개의 모드에서는 사실임을 알 수 있다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

2.3 매설관의 질량 영향

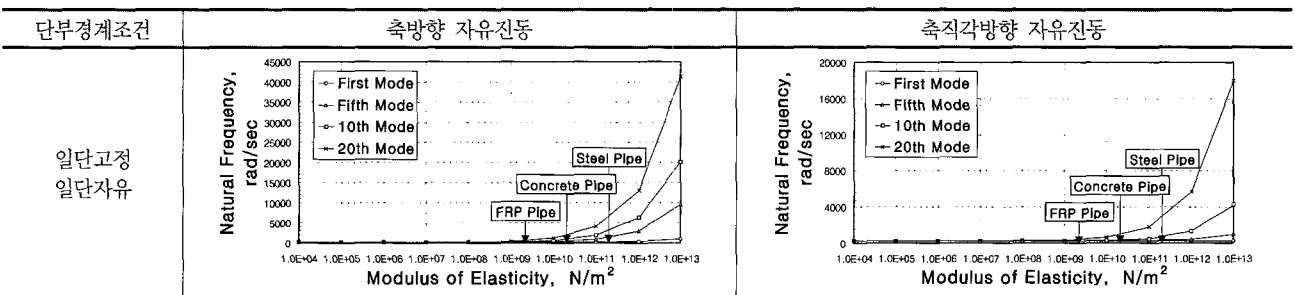
표 6에서는 고유진동수에 대해 매설관 질량의 영향을 나

타내고 있다. 질량의 영향은 낮은 질량에서 크게 나타나는 것을 알 수 있으며 질량이 증가함에 따라 영향은 작아진다. FRP관의 경우 강관과 콘크리트 관에 비해 매우 낮은 단위 질량($0.467 \times 10^3 \text{kg/m}$)을 가지므로 질량으로 인한 고유진동수의 증가가 큰 것으로 나타난다. 콘크리트관은 강관과 FRP 관에 비해 비교적 큰 단위 질량($2.074 \times 10^3 \text{kg/m}$)을 가지므로 질량으로 인한 고유진동수의 증가는 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 고유진동수에 대한 매설관의 질량에 의한 전반적인 영향은 축방향 및 축직각방향 진동, 모두에 대해 유사하게 나타난다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

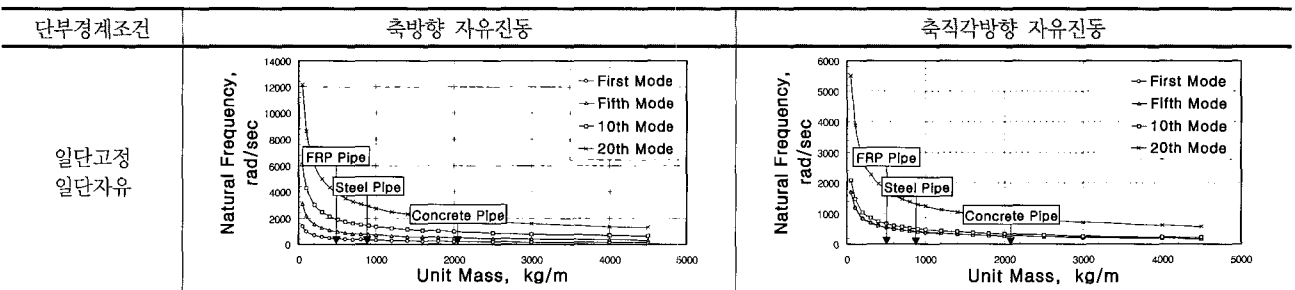
2.4 매설관의 횡단면적 및 관성모멘트의 영향

표 7에서 고유진동수는 관 횡단면적과 관성 모멘트의 증가와 함께 증가한다. 증가비율은 두 경우의 모두 기본적인 고유진동수를 제외하고는 모든 모드에 대해 같은 경향을 보이고 있다. FRP관($t=0.04\text{m}$)과 강관($t=0.018\text{m}$)에 비해 콘

〈표 5〉 탄성계수에 따른 고유진동수의 변화



〈표 6〉 매설관의 단위질량에 따른 고유진동수의 변화



크리트관은 두께가 0.15m로 관의 횡단면적과 관성 모멘트가 상대적으로 크며 고유진동수 또한 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

고유진동수가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 FRP 관 < 콘크리트관 < 강관의 순서로 고유진동수가 크게 나타남을 알 수 있다.

2.5 매설관의 길이 영향

고유진동수에 대한 매설관의 길이에 의한 영향은 표 8에 나타나 있다. 고유진동수는 매설관의 길이가 짧을수록 높은 값을 가지며 특히 매설관의 길이가 100m이하일 때 그런 경향이 뚜렷이 나타난다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

3. 매설관의 강제진동 안정식

3.1 축방향의 강제진동

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

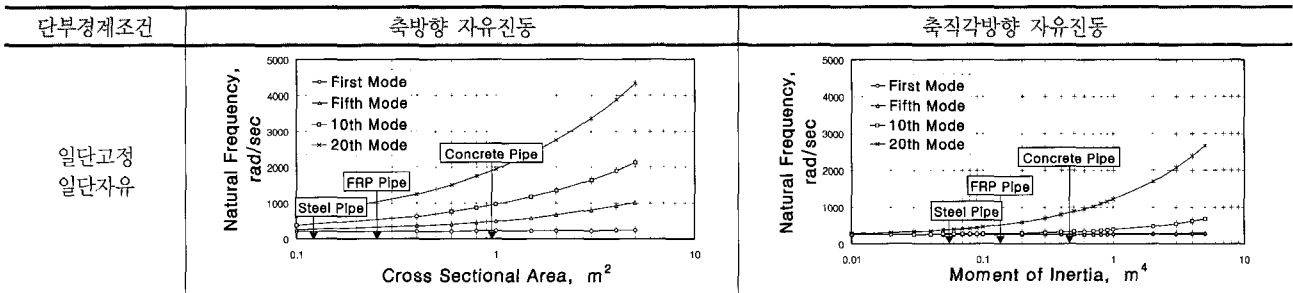
$$m \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} + C_A \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + K_A v(y,t) - E_p A \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = C_A \frac{\partial v_g(y,t)}{\partial t} + K_A v_g(y,t) \quad (3)$$

여기서, v_g : 축방향 지반 변위

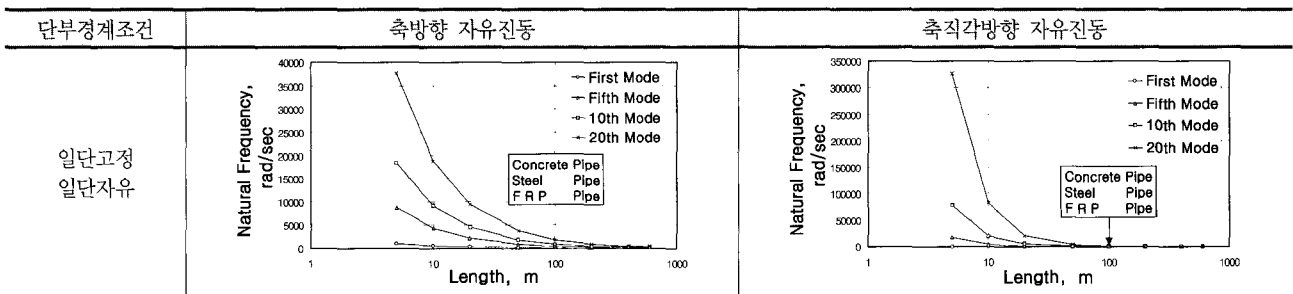
2.6 해석에 적용한 관중에 따른 영향

표 9에 나타난 콘크리트관과 강관, FRP관의 제원에 대해서 모드수에 따른 고유진동수의 변화를 나타내었다. 관의 종류에 관계없이 축방향 진동에 비해 축직각방향 진동에서

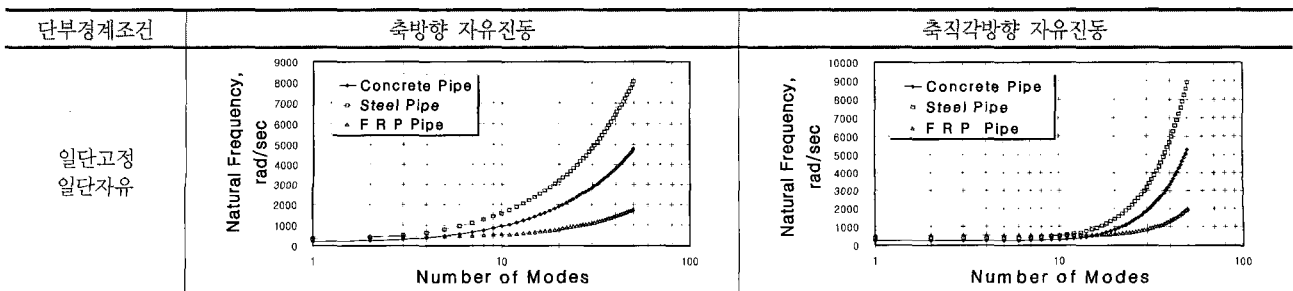
〈표 7〉 매설관의 횡단면적과 관성모멘트에 따른 고유진동수의 변화



〈표 8〉 매설관의 길이에 따른 고유진동수의 변화



〈표 9〉 관중에 따른 고유진동수의 변화



〈표 10〉 축방향 강제진동에서의 변위, 변형률 산정식

	양단자유(Larbi, 1995)	양단고정	일단고정-일단자유
변위	$v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$	$v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$	$v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
변형률	$\epsilon_A(y,t) = -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(k-1)\pi}{L} \sin \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$	$\epsilon_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{L} \cos \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$	$\epsilon_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)\pi}{2L} \cos \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

〈표 11〉 축직각방향 강제진동에서의 변위, 변형률 산정식

구분		Result
양단자유	변위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
양단고정	변위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
일단고정 일단자유	변위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
양단roller (Larbi, 1995)	변위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = -\frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(k-1)\pi}{L} \right)^2 \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
양단힌지	변위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = -\frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
일단힌지 일단roller	변위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = -\frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

여기서, D : 매설관의 직경

식 (3)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 10과 같다.

3.2 축직각방향의 강제진동

축직각방향 지반 변위를 갖는 매설관의 거동에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

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

$$= C_T \frac{\partial w_g(y,t)}{\partial t} + K_T w_g(y,t) \tag{4}$$

여기서, w_g : 축직각방향 지반변위

표 11에서는 축방향 강제진동과 동일한 방법으로 축직각방향 강제진동에서 고려되는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단roller, 양단힌지, 일단힌지-일단roller 단부 경계조건에 대해 변위, 휨변형률 산정식을 나타내었다.

4. 매설관의 동적 변위응답

콘크리트관과 강관, FRP관에 대해서 축방향과 축직각방향에 대한 일시적 및 정상상태 변위응답을 검토하였다. 일

시적 응답과 정상상태 응답의 명확한 비교와 단부 경계조건에 대한 검토를 위하여 매설관의 중앙지점을 택하여 해석을 수행하였다. 첫 번째 모드에 대한 지반-구조물의 상호작용에 의한 감쇠비(ζ_1)는 80%를 적용하였고 전파속도(V) 100m/sec~2,000m/sec를 적용하였으며, 지반진동수(ω)는 100rad/sec를 적용하였다. 매설관의 변위응답은 지반변위 1m당의 응답으로서 무차원이다. 결과를 나타내는 그래프는 일단고정-일단자유 단부경계조건에 대하여 대표적으로 나타내었다.

4.1 일시적 및 정상상태 변위응답

일시적 응답은 $t = 0 \sim L/V$ 동안 지속되는 응답을 의미하며 매설관의 전장을 통과하기 전에 나타나는 동적응답으로 정의된다(L :매설관의 길이, V :전파속도). 파가 매설관의 전장을 통과한 후($t \geq L/V$), 응답은 정현파가 되고 일정한 진폭을 가진다. 이와 같이 파가 매설관의 전장을 통과한 후, 정현파 하중이 지속적으로 가해지는 상태의 동적응답을 정상상태 응답이라고 정의된다. 표 12에서는 축방향 변위응답을 나타내었으며 표 13에서는 축직각방향 변위응답을 나타내었다.

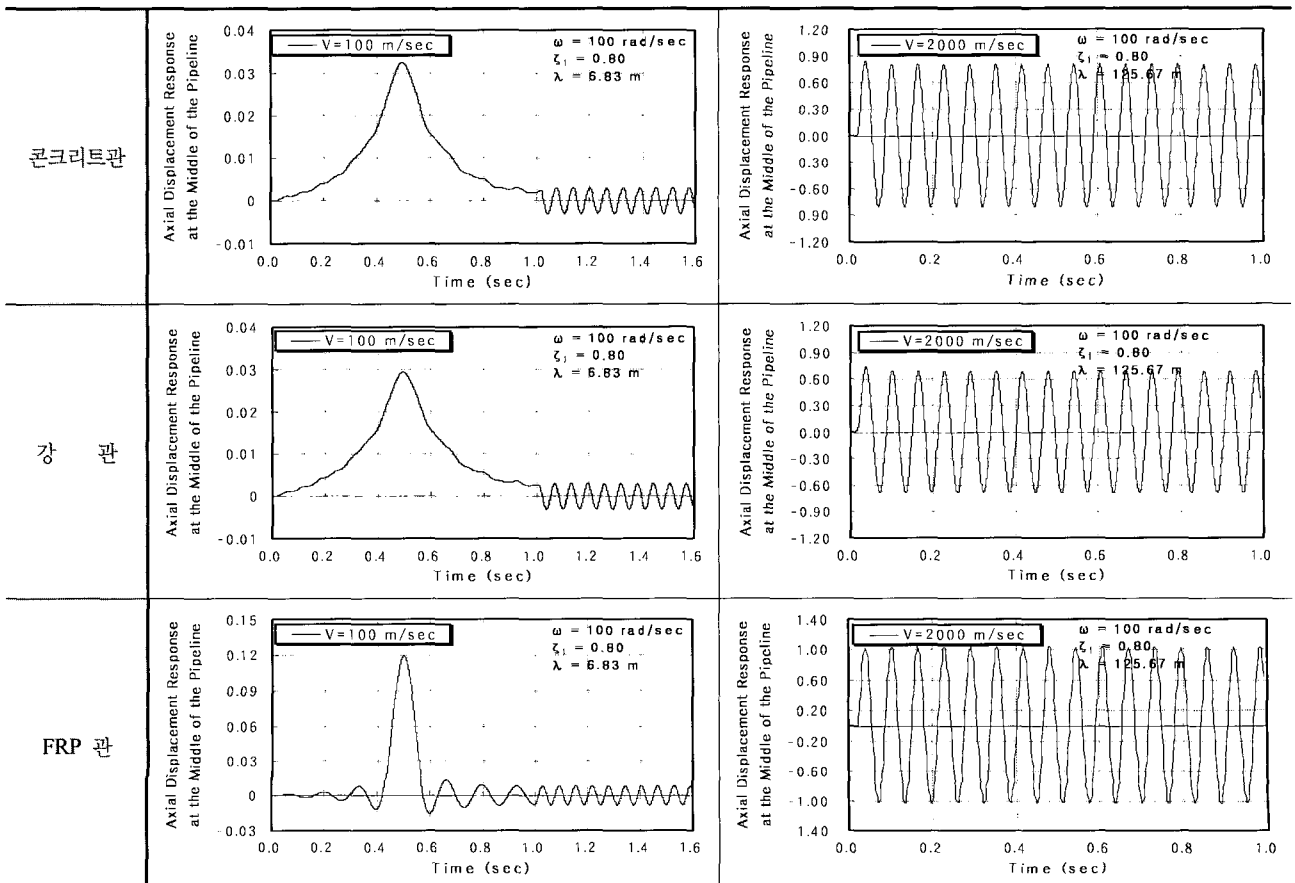
내었다.

축방향 및 축직각방향에서 단부 경계조건과 매설관의 종류에 상관없이 낮은 전파속도 100m/sec와 높은 지반진동수 100rad/sec에서 일시적 응답이 크게 나타났다. 즉, 단파의 조건일수록 일시적 응답은 크게 나타난다.

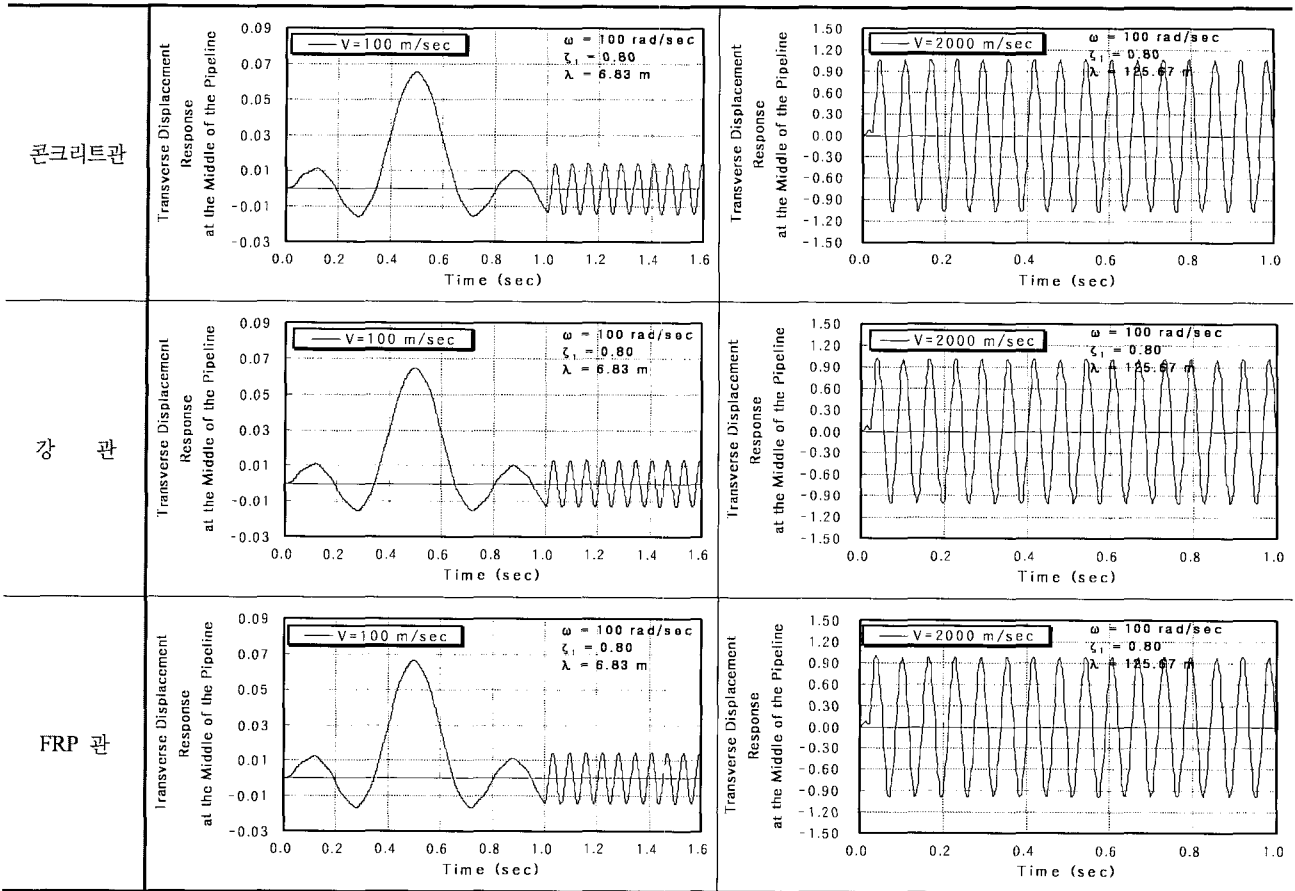
축방향 응답의 경우 높은 전파속도($V=2,000\text{m/sec}$)에서는 콘크리트관과 강관, FRP관 모두 유사한 응답형상을 나타내며 낮은 전파속도($V=100\text{m/sec}$)에서는 콘크리트관과 강관에서는 응답크기의 차이는 있으나 변위응답의 형상은 매우 유사하다. 해석지점에 도달하기 까지 진동을 일으키며 서서히 증가하는 것을 나타내지만 FRP관에서의 응답은 해석지점 도달 전에는 낮은 응답을 보이다가 해석지점 도달 시 매우 큰 응답을 나타내었으며 그 후 급격하게 감소하는 형상을 나타내었다.

매설관의 단부 경계조건이 다를 경우에는 일시적 변위응답의 크기와 형상이 다르게 나타났으며 매설관의 종류에 따른 응답의 크기는 FRP관 > 콘크리트관 > 강관의 순서로 나타났다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

<표 12> 축방향 일시적 및 정상상태 변위응답, 일단고정-일단자유



〈표 13〉 축직각방향 일시적 및 정상상태 변위응답, 일단고정-일단자유



〈표 14〉 매설관의 최대변형을 발생위치(L=100m)

	단부경계조건	발생위치(좌측단부 기준)
축방향 강제진동	양단자유	50m
	양단고정	0m, 100m
	일단고정-일단자유	0m
축직각방향 강제진동	양단자유	85m
	양단고정	0m, 100m
	일단고정-일단자유	0m
	양단힌지	5m, 95m
	양단롤러	100m
	일단힌지-일단롤러	5m

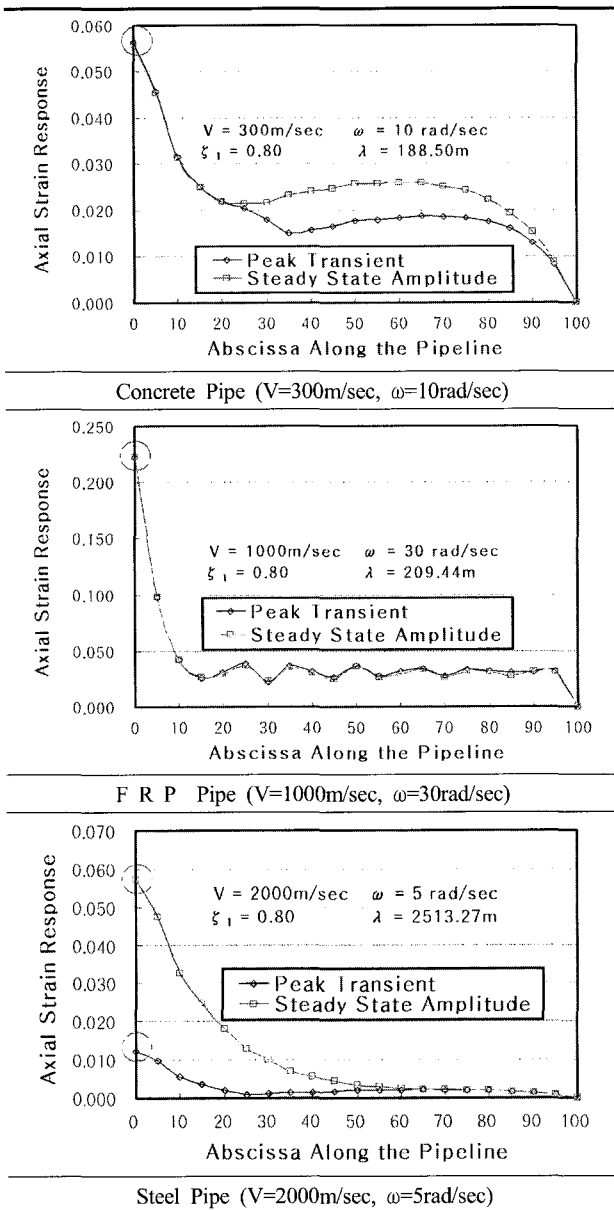
5. 매설관의 지점위치별 변형률 응답

매설관의 최대 변형률 발생위치 산정을 위해 단부 경계조건과 매설관의 종류에 대하여 전파속도(V) 300m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$) 10rad/sec, 파장(λ) 188.5m일 경우와 전파속도(V) 2000m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$) 5rad/sec, 파장(λ) 2,513.27m 그리고 전파속도(V) 1,000m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$) 30rad/sec, 파장(λ) 209.44m인 3가지 경우를 적용하여 해석하였다. 표 15와 표 16에서는 위 조건에 대해 해석한 결과를 콘크리트관, 강관과 FRP관에 각각의 경우를 나타내었으며 대표적으

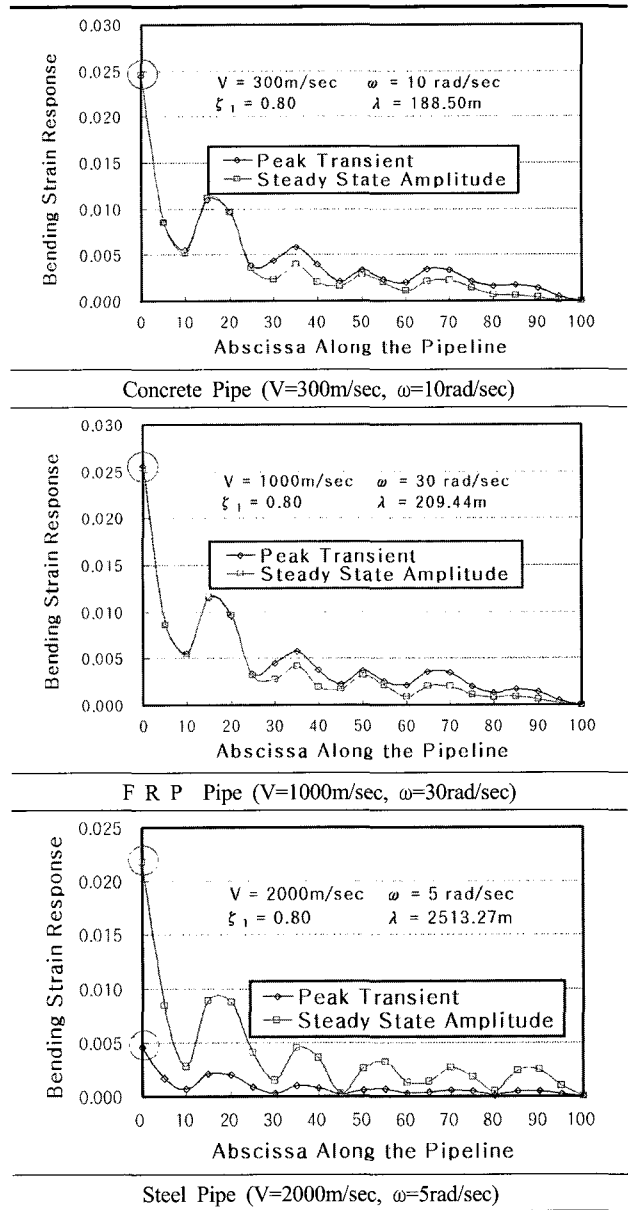
로 일단고정-일단자유 단부경계조건에 대해 나타내었다. 표에 수록하지 않은 단부경계조건에 대해서는 표 14에서 나타난 위치에서 최대변형률이 발생하였다. 이러한 최대 (휨) 변형률 발생위치는 매설관의 종류와는 관계없이 단부 경계조건에 대하여 달리 나타났으며 이를 표 14에 나타내었다. 매설관의 종류에 따라서는 최대 변형률 발생위치는 콘크리트관과, 강관, FRP관이 동일한 지점에서 나타남을 확인할 수 있었으며 최대 변형률의 크기는 FRP관 > 콘크리트관 > 강관 순서로 발생하였다.

이상과 같은 결과들로부터 관의 단부조건에 따라 변형

〈표 15〉 지점위치별 축방향 변형률응답, 일단고정-일단자유



〈표 16〉 지점위치별 축직각방향 변형률응답, 일단고정-일단자유



률응답은 각각 다른 양상을 보이며 최대 변형률이 발생하는 위치도 관의 단부조건에 따라 달라짐을 알 수 있다. 따라서 현재까지 주로 적용하고 있는 관 중심부에서의 동적 응답으로 매설관을 설계함에는 다소 무리가 있음을 알 수 있다.

6. 결론

이상과 같은 각종 매설관의 동적거동에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 매설관의 질량이 작은 FRP관에서 질량의 영향이 가장 뚜렷하게 나타나며 모드수가 낮을수록 질량이 클수록

고유진동수는 낮아지며 축방향에서 그 경향이 뚜렷이 나타난다.

- (2) 고유진동수는 매설관의 길이가 짧을수록 높은 값을 가지며 특히 매설관의 길이가 100m이하일 때 그런 경향이 뚜렷이 나타난다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.
- (3) 관의 종류에 관계없이 축방향 진동에 비해 축직각방향 진동에서 고유진동수가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 FRP관 < 콘크리트관 < 강관의 순서로 고유진동수가 크게 나타남을 알 수 있다.
- (4) 낮은 전파속도에서는 일시적 응답이 정상상태 응답과 같거나 크게 나타나지만 전파속도가 증가함에 따라 일시적 응답의 발생시간이 짧아지므로 정상상태 응답이

뚜렷이 크게 나타난다.

- (5) 일시적 응답은 전파속도가 증가함에 따라 지속시간 동안 적은 수의 진동을 받게 되므로 감소하여 이후 정상 상태 응답을 나타낸다.
- (6) 최대 발생 (휨)변형률은 발생지점은 단부 경계조건에 따라 달라지며 크기는 FRP관 > 콘크리트관 > 강관 순서로 발생한다.

참 고 문 헌

1. 이병길, 박병호, 정진호, “단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(II)”, '05춘계학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 328-337.
2. 이병길, “단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석”, 박사학위논문, 부경대학교, 2005, 159 pp.
3. 정진호, 이병길, 박병호, “단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(I)”, '05춘계학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 1148-1158.
4. 정진호, 이병길, 정두희, 박병호, “단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석”, 한국지반공학회특별논문집, 제21권 제5호, 2005, pp. 33-43.