

각종 매설관의 강제진동거동에 관한 연구

A Study on the Forced Vibration Responses of Various Buried Pipelines

정진호¹⁾, Jin-Ho Jeong

¹⁾ 부경대학교 공과대학 건설공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Construction Eng., Pukyong National Univ. : geojh@pknu.ac.kr

SYNOPSIS : Dynamic response of buried pipelines both in the axial and the transverse directions on concrete pipe and steel pipe, FRP pipe were investigated through a forced vibration analysis. 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. 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.

Key words : Forced vibration, Axial direction, Transverse direction, Displacement, Strain

1. 서 론

본 연구는 단부 경계조건과 매설관의 종류에 따른 매설관의 강제진동 거동을 규명하기 위해 매설관은 탄성기초 위에 놓인 보요소로 모형화하였고, 지진파는 정현파 형태의 지반 변위로 적용하였다. Larbi(1995)에 의해 수행된 축방향의 양단자유와 축직각방향의 양단roller에 대한 강제진동 해석을 수행하고 가능한 모든 관 단부 경계조건을 고려하기 위해 축방향의 양단고정, 일단고정-일단자유와 축직각방향의 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단힌지 그리고 일단힌지-일단roller에 대해서도 강제진동 해석을 수행하였다. 단부 경계조건과 매설관의 종류에 따른 매설관의 강제진동 거동을 규명하기 위해 자유진동 해석을 통해 얻어진 모드형상과 고유진동수 산정식을 사용하여 강제진동에 대한 변위, (휨)변형률 산정식을 유도하였으며 이를 이용하여 콘크리트관, 강관 그리고 FRP관에 대하여 강제진동 거동 해석을 수행하였다.

2. 매설관의 강제진동 거동

2.1 축방향의 강제진동

매설관은 탄성기초 위에 놓인 보로서 모형화 되었으며 파의 전파는 좌측 끝단($t=0$)에서 전파된다. 축

방향 진동에서 매설관의 거동을 지배하는 방정식은 다음과 같다.

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

여기서, v_g : 축방향 지반 변위

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

표 1. 축방향 강제진동에서의 변위, 변형률 산정식

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

2.2 축직각방향의 강제진동

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

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

여기서, w_g : 축직각방향 지반변위

표 2에서는 축방향 강제진동과 동일한 방법으로 축직각 방향 강제진동에서 고려되는 양단자유, 양단 고정, 일단고정-일단자유, 양단roller, 양단힌지, 일단힌지-일단roller 단부 경계조건에 대해 변위, 휨변형률 산정식을 나타내었다.

표 2a. 축직각방향 강제진동에서의 변위, 변형률 산정식

구 분		Result
양단자유	변 위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
	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	변 위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	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	변 위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$

표 2b. 축직각방향 강제진동에서의 변위, 변형률 산정식

구 분		Result
양단틀러 (Larbi, 1995)	변 위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
	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	변 위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
	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 일단틀러	변 위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = -\frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

3. 매설관의 동적 변위응답

콘크리트관과 강관, FRP관에 대해서 축방향과 축직각방향에 대한 일시적 및 정상상태 변위응답을 검토하였다. 일시적 응답과 정상상태 응답의 명확한 비교와 단부 경계조건에 대한 검토를 위하여 매설관의 중앙지점을 택하여 해석을 수행하였다. 첫 번째 모드에 대한 지반-구조물의 상호작용에 의한 감소비(ζ)는 이병길(2005)에 의해 적용된 80% 및 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.

3.1 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. 그림 1에서는 축방향 변위응답을 나타내었으며 그림 2에서는 축직각방향 변위응답을 나타내었다.

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 경계조건에 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

그림 1. 축방향 일시적 및 정상상태 변위응답, 일단고정-일단자유

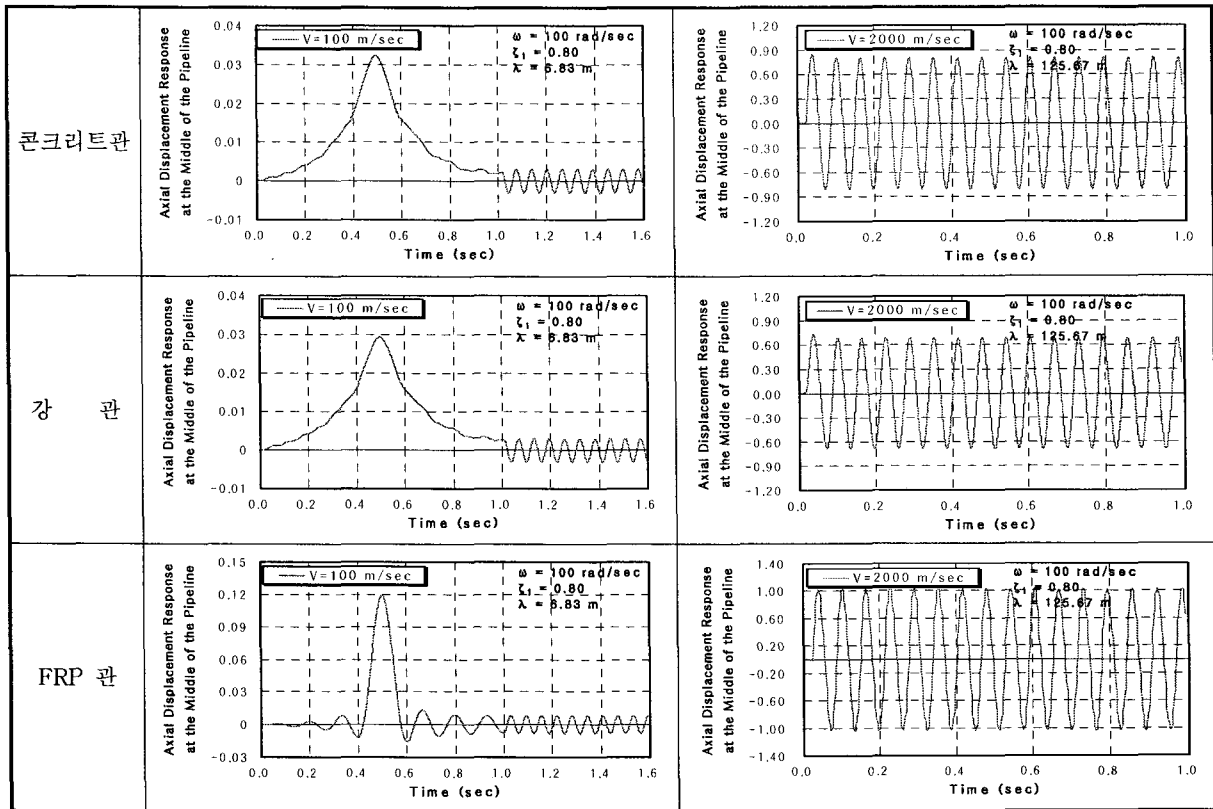
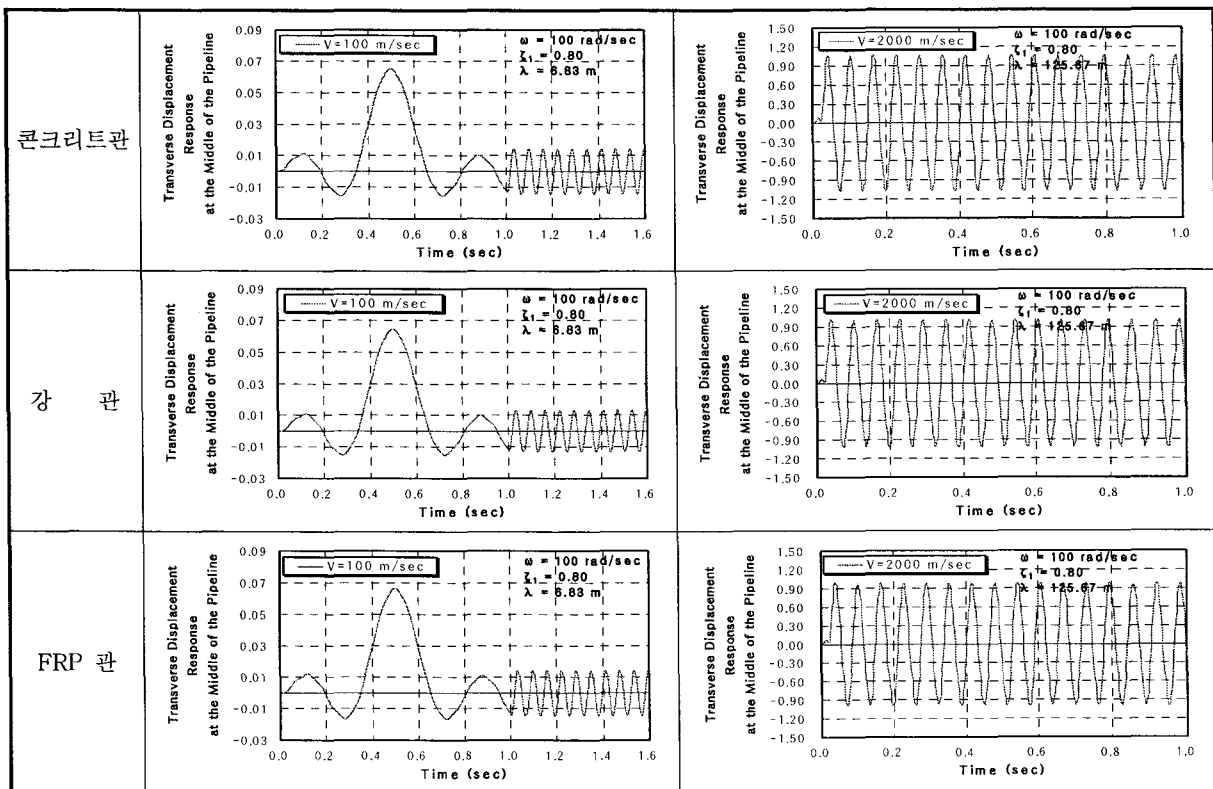


그림 2. 축직각방향 일시적 및 정상상태 변위응답, 일단고정-일단자유



4. 매설관의 지점위치별 변형률 응답

매설관의 최대 변형률 발생위치 산정을 위해 단부 경계조건과 매설관의 종류에 대하여 전파속도(V) 300m/sec, 지반진동수(ω) 10rad/sec, 파장(λ) 188.5m일 경우와 전파속도(V) 2000m/sec, 지반진동수(ω) 5rad/sec, 파장(λ) 2,513.27m 그리고 전파속도(V) 1,000m/sec, 지반진동수(ω) 30rad/sec, 파장(λ) 209.44m인 3가지 경우를 적용하여 해석하였다. 그림 3에서는 위 조건에 대해 해석한 결과를 콘크리트관, 강관과 FRP관에 각각의 경우를 나타내었으며 대표적으로 일단고정-일단자유 단부경계조건에 대해 나타내었다. 표에 수록하지 않은 단부경계조건에 대해서는 표 3에서 나타낸 위치에서 최대 변형률이 발생하였다. 이러한 최대 (횡) 변형률 발생 위치는 매설관의 종류와는 관계없이 단부 경계조건에 대하여 달리 나타났으며 이를 표 3에 나타내었다. 매설관의 종류에 따라서는 최대 변형률 발생 위치는 콘크리트관과, 강관, FRP관이 동일한 지점에서 나타남을 확인할 수 있었으며 최대 변형률의 크기는 FRP관 > 콘크리트관 > 강관 순서로 발생하였다.

표 3. 매설관의 최대 변형률 발생 위치(L=100m)

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

그림 3a. 매설관의 지점위치별 변형률 응답, 일단고정-일단자유

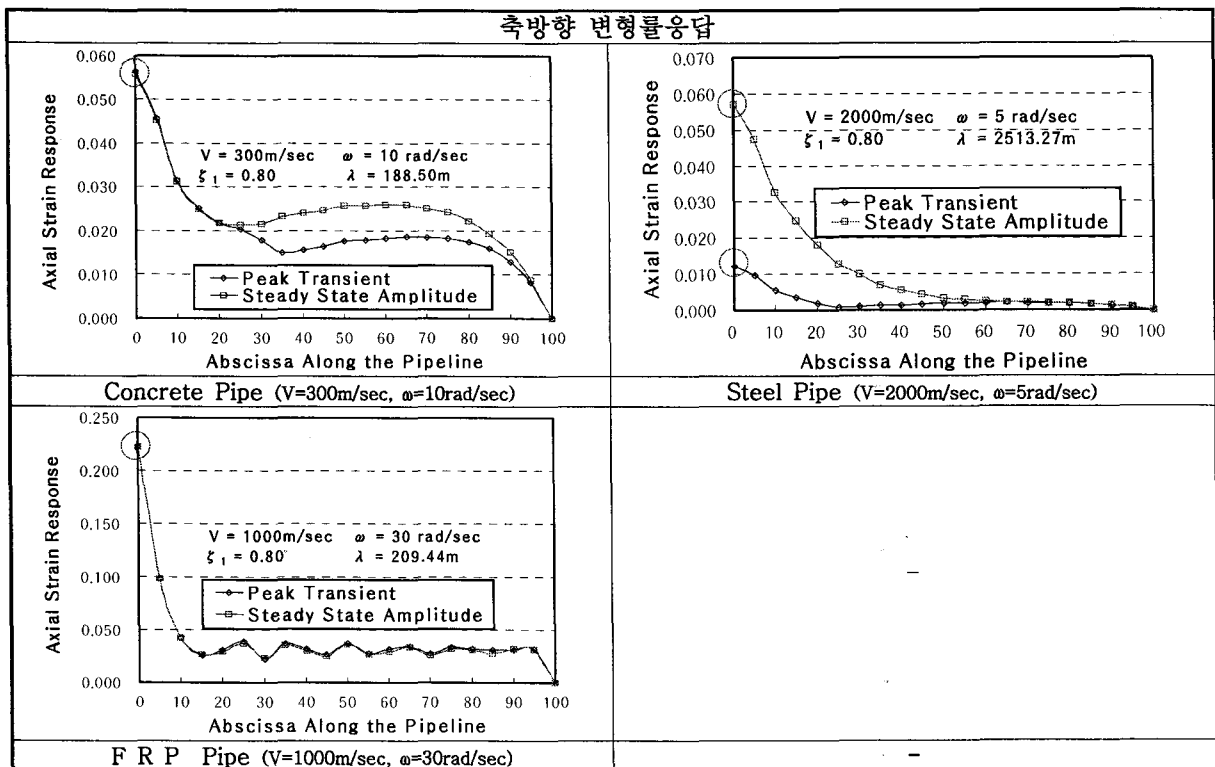
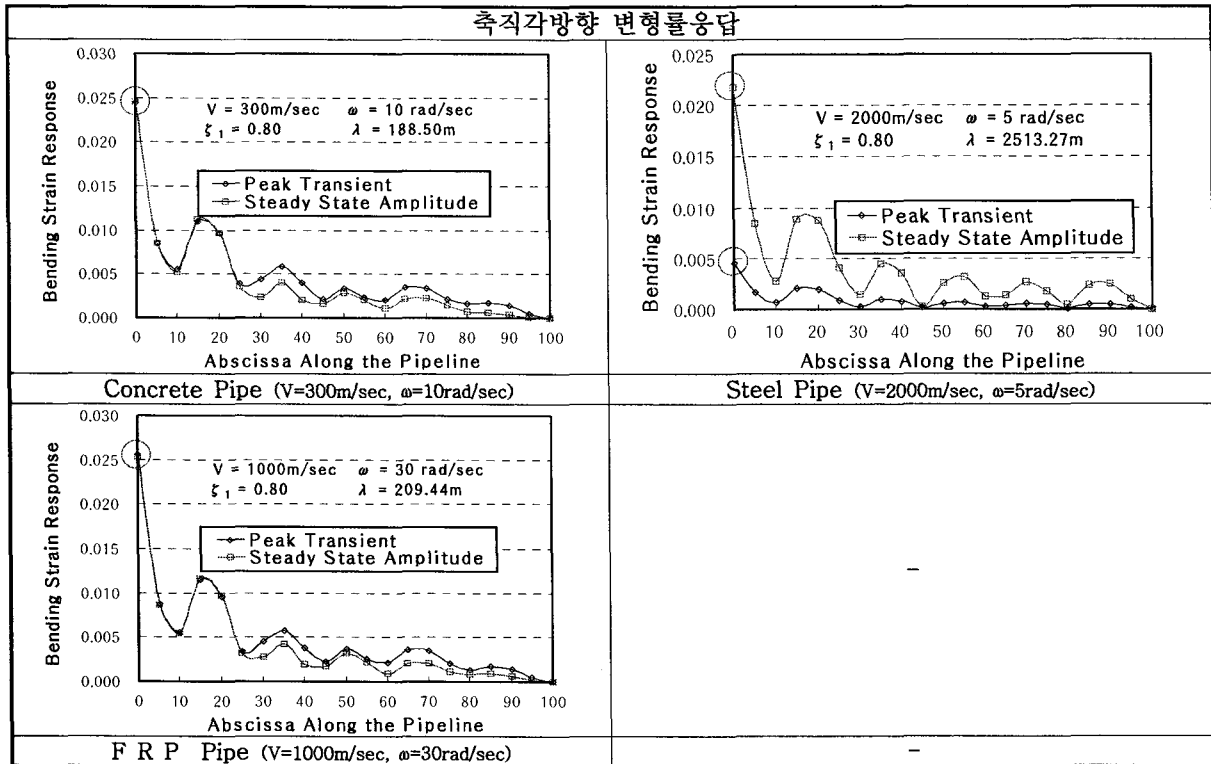


그림 3b. 매설관의 지점위치별 변형률응답, 일단고정-일단자유



4. 결론

이상과 같은 각종매설관의 강제진동 거동에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 낮은 전파속도에서는 일시적 응답이 정상상태 응답과 같거나 크게 나타나지만 전파속도가 증가함에 따라 일시적 응답의 발생시간이 짧아지므로 정상상태 응답이 뚜렷이 크게 나타난다.
- 2) 일시적 응답은 전파속도가 증가함에 따라 지속시간 동안 적은 수의 진동을 받게 되므로 감소하여 이후 정상상태 응답을 나타낸다.
- 3) 콘크리트관과 강관에서는 응답크기의 차이는 있으나 변위응답의 형상은 매우 유사하며 FRP관에서의 응답은 두 관에 비해 응답의 크기가 매우 크고 변위응답의 형상은 낮은 전파속도에서 많은 차이를 나타낸다.
- 4) 최대 발생 (휨)변형률은 발생지점은 단부 경계조건에 따라 달라지며 크기는 FRP관 > 콘크리트관 > 강관 순서로 발생한다.

참고 문헌

1. 이병길, 박병호, 정진호 (2005), 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(II), 한국지반공학회 학술발표회논문집, pp.328-337.
2. 이병길 (2005), 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석, 박사학위청구논문, 부경대학교 대학원.
3. 정진호, 이병길, 박병호 (2005), 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(I), 한국지반공학회 학술논문집, pp.1148-1158.