

여러 단부경계조건을 가진 콘크리트 매설관의 동적응답에 대한 곡선적합식의 개발 Development of Curve Fitted Equation for the Dynamic Response of a Buried Concrete Pipelines with Various End Boundary Conditions

정진호¹⁾, Jeong, Jin Ho, 김성반²⁾, Kim, Sung Ban, 정두희³⁾, Joeng, Du Hwoe

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

²⁾ 부경대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ.

³⁾ 부경대학교 건설공학부 교수, Prof., Dept. of Civil and Construction Eng., Pukyong National Univ.

SYNOPSIS : This study is to investigate dynamic response of concrete buried pipelines with various end boundary conditions and develop a curve fitted equation to ensure practicality and convenience for the use at the actual field for the test of resistance of earthquake. Dynamic response under the various end boundary conditions is calculated with analysis on values and computing programs. However, such a method of analysis requires skillfulness in using computing programs for dynamic movement of buried pipelines with dynamic analysis formula and has lower efficiency and practicality because, in the nature of analysis program of values, it needs much time to conduct repeated calculations. Therefore, the study is intended to develop a curve fitted equation to ensure more efficient and practical analysis. This paper tests various degrees of equation with non-linear least square method and developments a curve fitted equation based on the transmission speed with the best results. In the use of curve fitted equation, degree of polynomial and determining coefficient are influenced by the speed of transmission.

Key words : Buried pipelines, Boundary conditions, Dynamic response, Curve fitted equations

1. 서 론

정진호 등(2005)은 단부의 경계조건에 따른 매설관의 동적응답을 규명하기 위해 Larbi(1995)에 의해 수행된 자유진동 및 강제진동 해석에서 가능한 모든 관 단부 경계조건을 추가하여 해석을 수행하였다. 또한 Clough 등(1979)이 제시한 자유진동에 대한 지배미분방정식을 이용하여 각 경계조건에서의 모드형상을 결정한 후 고유진동수를 구하였고, 이들을 이용하여 강제진동시 발생하는 매설관의 축방향에 대해 변위, 변형률 산정식과 축직각방향에 대해 변위, 횡변형률 산정식을 유도하였으며 복잡한 계산과정을 전산 해석프로그램을 이용하여 변위응답을 나타낼 수 있도록 프로그래밍 하였다. 그러나 전산프로그램을 사용한 해석은 수식 이해와 프로그램에 대한 숙련도가 요구되며 반복연산을 요구하는 수치해석 프로그램의 특성상 많은 시간이 요구되어 효율성과 실용성이 떨어지는 문제점을 가진다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 지반운동 파장에 따른 변형률 및 횡변형률 곡선에 대해 변수를 파장으로 선택하여 곡선적합을 수행하고 가장 좋은 결과를 보여주는 적합식을 개발하여 해석상 편의를 도모하고자 한다.

2. 매설관의 동적응답

2.1 매설관의 변위, 변형률 및 휨변형률 산정식

매설관의 동적응답 해석을 수행하기 위하여 Clough 등(1975)이 제시한 자유진동을 통해 모드형상과 고유진동수를 결정한 후, 이를 이용하여 강제진동시 발생 가능한 매설관의 축방향 및 축직각방향에 대하여 변위, 변형률 및 휨변형률 산정식을 표 1과 표 2와 같이 유도하였다.

표 1. 축방향 변위와 변형률 산정식

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

표 2. 축직각방향 변위와 휨변형률 산정식

구 분		결 과
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	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} [\cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y)] + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
양단롤러 (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 -일단롤러	변 위	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	휨변형률	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \kappa_T(y,t) = -\frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

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

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

3. 매설관의 응답해석

매설관 응답해석을 위하여 매설관의 동적해석 프로그램을 개발하여 응답해석을 수행하였다. 해석에 사용된 매설관은 Larbi(1995)에 의해 해석된 콘크리트 매설관을 예로 수행하였다. 표 3은 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성을 나타내고 있다.

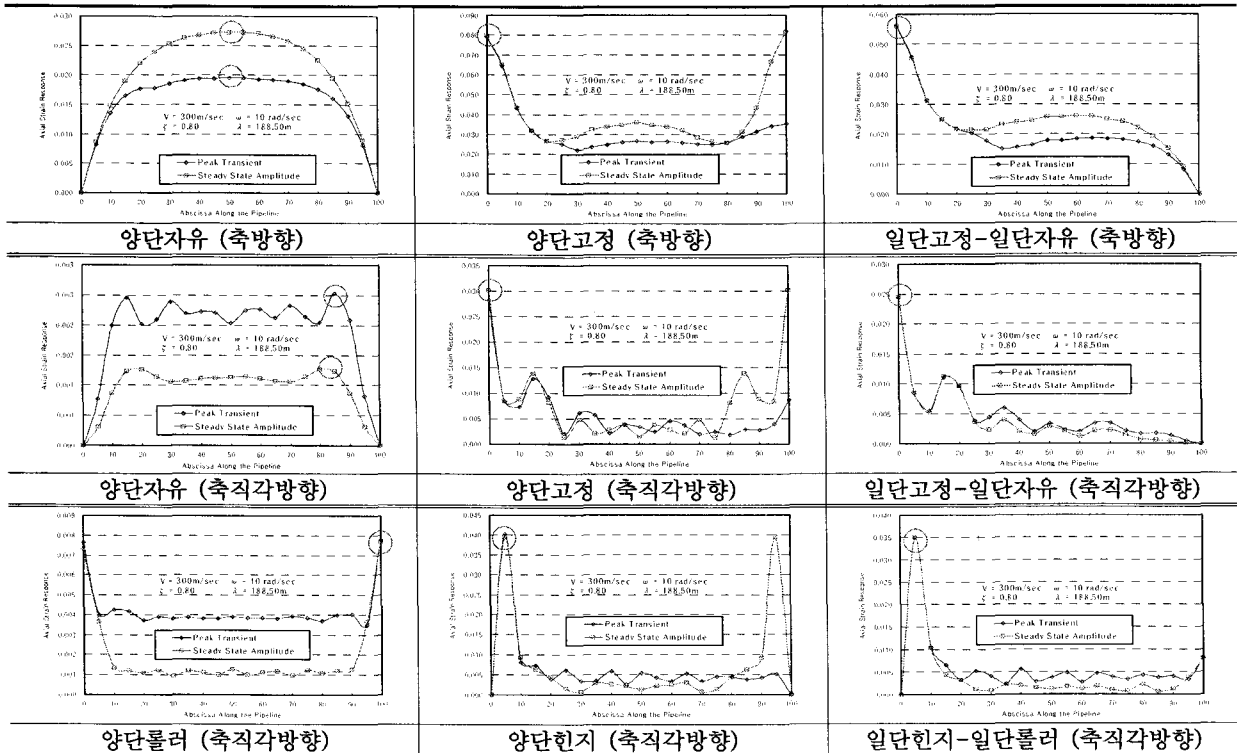
표 3. 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성

-탄성계수 : $E_p = 2.07 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	-관성모멘트 : $I = 0.47389 \text{ m}^4$
-길이 : $L = 100 \text{ m}$	-단위체적당 질량(밀도) : $\rho = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}$
-평균반경 : $R = 1 \text{ m}$	-단위길이당 질량 : $m = 2.0735 \times 10^3 \text{ kg/m}$
-두께 : $t = 15 \text{ cm}$	-축직각방향 지반 강성 : $K_T = 14.01 \times 10^7 \text{ N/m/m}$
-형단면적 : $A = 0.94248 \text{ m}^2$	-축방향 지반 강성 : $K_A = 9.34 \times 10^7 \text{ N/m/m}$

3.1 매설관의 지점위치별 변형률응답

표 4는 단부 경계조건에 따른 매설관의 지점위치별 최대 변형률응답을 나타낸 표이며, 이는 매설관의 내진 설계시 최대응력 발생위치와 크기를 산정할 경우에 반드시 검토해야할 사항이다. 해석에 적용된 파의 특성으로는 전파속도(V), 300m/sec, 지반진동수(ω), 10rad/sec, 파장(λ), 188.5m에 대해서 해석되었으며 첫 번째 모드에 산정되는 감소비는 80%를 적용하였다. 또한 표 4에서 볼 수 있듯이 관 단부 경계조건을 달리하는 매설관에 대해서 관 단부에서 나타나는 축방향 변형률 및 축직각방향 휨변형률응답은 관 단부조건이 대칭인 구조에선 중앙부를 기준으로 좌우 대칭적인 경향을 보이고 있다. 반면 일단고정-일단자유와 일단힌지-일단roller와 같이 비대칭적인 구조에서는 관 중앙부를 기준으로 비대칭적인 경향을 나타냄을 알 수 있다.

표 4. 단부 경계조건에 따른 변형률응답(V=300m/sec)



3.2 지반운동 파장의 영향

지반운동 파장(λ)의 영향은 관 단부 경계조건에서 축방향과 축직각방향의 응답 모두에 대해 중요하며, 파장은 지반진동수와 전파속도에 직접적으로 관계가 있다($\lambda = 2\pi V/\omega$). 본 연구는 매설관의 응답에 대해 전파속도와 지반진동수의 조합된 영향을 파장의 측면에서 해석하였고 지진시 가능한 전파속도와 지반운동의 다양한 범위를 해석하기 위해, 넓은 범위의 파장(5m~1km)과 100, 500, 1000, 1500, 2000m/sec의 겉보기 전파속도를 고려하였다. 해석은 변형률 응답을 통해 얻어진 매설관의 최대 변형률 발생지점에서 실시하였다.

축방향에 대해 고려될 수 있는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부 경계조건과 축직각방향에 대해 고려될 수 있는 6가지의 관 단부 경계조건에 대해 변형률 및 휨변형률에 미치는 파장의 효과를 표 5에 나타내었다.

표 5. 단부 경계조건에 따른 지반운동 파장의 영향

<p style="text-align: center;">양단자유 (축방향)</p>	<p style="text-align: center;">양단고정 (축방향)</p>	<p style="text-align: center;">일단고정-일단자유 (축방향)</p>
Coef. of determination : 0.9321 ~ 0.9877		
<p style="text-align: center;">양단자유 (축직각방향)</p>	<p style="text-align: center;">양단고정 (축직각방향)</p>	<p style="text-align: center;">일단고정-일단자유 (축직각방향)</p>
Coef. of determination : 0.9537 ~ 0.9643		
<p style="text-align: center;">양단롤러 (축직각방향)</p>	<p style="text-align: center;">양단힌지 (축직각방향)</p>	<p style="text-align: center;">일단힌지-일단롤러 (축직각방향)</p>
Coef. of determination : 0.9826 ~ 0.9998		

이 그림으로부터 최대 변형률을 발생시키는 파장을 임계파장이라고 정의하면 임계파장보다 더 큰 파장에 대해서 변형률은 결국 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 이로부터 단파에 있어서는 전파속도(V)가 클수록 변형률은 크게 발생되므로 전파속도의 영향이 대단히 많음을 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 낮게 산정되는 경향을 보이고 있다.

4. 적합곡선식의 개발

표 5에 나타난 바와 같이 매설관의 각 경계조건에 대해서 1m~10³m 사이의 지반 거동 파장에 대한 축방향

변형률 및 축직각방향 휨변형률을 산출한 후 곡선적합을 수행하였다.

본 연구에서 곡선적합을 파장에 따른 변형률 및 휨변형률 곡선에 대해 실시하여 그 결과의 곡선적합식과 계수값을 제안하였다. 그 이유는 표 1과 표 2에 제시하는 변위와 변형률 산정식은 각각의 그 해를 얻기 위해 수치해석 기법의 프로그램이 필요하여 실무에서 사용하기가 대단히 불편한 복잡한 식으로 되어있어 매설관의 내진성능 평가시 실용적인 계산과 실무 적용성을 높이기 위함이다.

그림 1에서 나타낸 지수방정식 곡선형태는 본 연구에서 산정한 곡선적합식의 가장 기본적인 형태로서 변형률 및 휨변형률 곡선은 지수방정식 형태와 같이 파장의 증가에 따라 상승한 후 일정한 수렴하는 형태를 가진다.

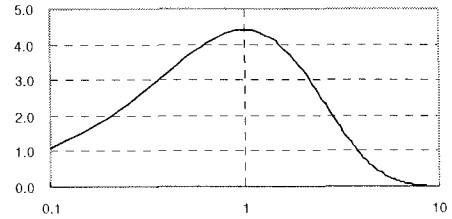


그림 1. 지수방정식 곡선형태

곡선적합을 수행하기 위해 변형률 및 휨변형률 곡선은 전파속도 100~2000m/sec 사이에서 측정되었으며, 측정간격은 100m/sec로 해석하였다. 해석위치는 각 경계조건에 따른 매설관의 최대변형률 발생지점이다. 곡선의 형태는 동일한 경계조건과 파의 진행방향에 서는 전파속도가 변할 때 오직 상수만 변화하는 형태이다. 결국 각각의 전파속도에 대한 상수는 전파속도에 대비하여 그려지게 된다. 이렇게 획득된 전파속도에 대한 상수는 다항식 곡선을 통해 정리하였다. 이때 다항식 곡선의 차수결정은 전파속도에 대한 곡선의 이산정도에 따라 결정된다. 이러한 다항식에서 얻어진 상수를 변형률 방정식에 대입하게 되면 변형률에 대한 일반적인 방정식은 오직 두 개의 변수로 표현된다. 즉 전파속도와 파장이다. 그 외의 변수들은 이미 해석과정에서 사용되었으므로 고정된 값이다. 비선형 최소자승법을 이용하여 다양한 형태의 지수방정식을 검정한 후, 가장 좋은 결과를 주는 다음과 같은 방정식이 채택되었다. 각각의 경계조건에 대한 축방향 변형률과 축직각방향 휨변형률에 대한 곡선적합식은 표 6와 같다.

표 6. 파장에 따른 변형률 및 휨변형률 곡선적합식

구 분		곡선적합 식
양단자유	축방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$
	축직각방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^{m_5(V)} - m_6(V)(\ln\lambda)]$
양단고정	축방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$
	축직각방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda) + m_3(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6} - m_7(V)(\ln\lambda)]$
일단고정 - 일단자유	축방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)\text{EXP}(-\ln\lambda) + m_3(V)(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_7(V)(\ln\lambda)]$
	축직각방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda) + m_3(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_7(V)(\ln\lambda)]$
양단롤러	축직각방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$
양단힌지	축직각방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda) + m_3(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_7(V)(\ln\lambda)]$
일단힌지 - 일단롤러	축직각방향 강제진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$

* λ : 입력 거동의 파장, $m_i(V)$: 파의 전파속도 함수

전파속도 함수, $m_i(V)$ 의 표현은 다음과 같은 다항식으로부터 얻어진다.

$$m_i(V) = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \dots + a_n V^n \quad (1)$$

a_i 는 일정한 상수 값의 형태를 가지며 $n = 1, 2, 3, \dots$ 이다. 식 (1)에서 획득된 상수 a_i 를 사용하여 전파속도에 대한 함수인 $m_i(V)$ 의 값을 얻을 수 있다. 표 7에는 상수 a_i 를 나타내었다. 아래의 값을 각 조건별로 취하여 식 (1)에 대입하면 각 경계조건과 전파방향에 대한 $m_i(V)$ 의 값을 얻을 수 있다. 산정된 $m_i(V)$ 를 표 6에 나타나 있는 곡선적합 식에 대입하면 파장에 따른 변형률과 횡변형률을 구할 수 있다.

표 7a. 매설관의 단부조건에 따른 a_i

구분	상수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
양단자유	축방향 강제진동	a_0	4.00E-03	1.00E-04	-7.50E+00	1.19E+00	-1.14E+01	7.13E+00	-
		a_1	3.00E-05	-2.00E-06	-7.30E-02	-9.00E-04	-1.31E-02	-9.50E-03	-
		a_2	-8.00E-08	5.00E-09	2.00E-04	2.00E-07	4.00E-05	4.00E-06	-
		a_3	7.00E-11	-1.00E-12	-2.00E-07	5.00E-11	-3.00E-08	-6.00E-10	-
		a_4	-3.00E-14	-	9.00E-11	-	7.00E-12	-	-
		a_5	4.00E-18	-	-1.00E-14	-	-	-	-
	축직각방향 강제진동	a_0	1.30E-03	2.00E-19	1.15E+02	-5.28E+00	1.19E-01	3.23E+01	-
		a_1	1.00E-06	7.00E-20	-4.48E-02	1.00E-03	3.00E-04	-1.25E-02	-
		a_2	-2.00E-09	-2.00E-22	1.00E-04	-2.00E-06	-6.00E-07	3.00E-05	-
		a_3	1.00E-12	2.00E-25	-6.00E-08	1.00E-09	3.00E-10	-2.00E-08	-
		a_4	-2.00E-16	-7.00E-29	1.00E-11	-3.00E-13	-7.00E-14	3.00E-12	-
		a_5	-	1.00E-32	-	-	-	-	-
양단고정	축방향 강제진동	a_0	3.30E-03	2.00E-05	1.79E+01	-4.01E-01	5.93E+00	3.65E+00	-
		a_1	7.00E-05	6.00E-06	1.73E-01	-6.00E-04	6.01E-02	-1.70E-03	-
		a_2	-2.00E-07	-4.00E-08	-8.00E-04	8.00E-06	-3.00E-04	3.00E-05	-
		a_3	3.00E-10	9.00E-11	2.00E-06	-3.00E-08	8.00E-07	-9.00E-08	-
		a_4	-2.00E-13	-9.00E-14	-2.00E-09	4.00E-11	-9.00E-10	1.00E-10	-
		a_5	5.00E-17	4.00E-17	1.00E-12	-2.00E-14	5.00E-13	-5.00E-14	-
	축직각방향 강제진동	a_6	-	-8.00E-21	-2.00E-16	5.00E-18	-9.00E-17	8.00E-18	-
		a_0	6.00E-19	5.00E-03	8.23E-01	-8.59E-01	3.00E+13	-2.65E+01	4.24E-01
		a_1	-7.00E-17	1.00E-06	2.70E-03	1.90E-03	-4.00E+10	7.00E-04	3.00E-04
		a_2	-6.00E-12	2.00E-09	-4.00E-06	-9.00E-06	4.00E+07	2.00E-06	4.00E-07
		a_3	1.00E-08	-4.00E-12	6.00E-08	1.00E-08	1.11E+05	-1.00E-08	-6.00E-10
		a_4	-5.00E-06	3.00E-15	-8.00E-11	-5.00E-12	-1.75E+02	1.00E-11	2.00E-13
a_5	-1.16E-02	-6.00E-19	4.00E-14	8.00E-16	8.38E-02	-4.00E-15	-		
a_6	-	-	-8.00E-18	-	-1.00E-05	7.00E-19	-		

표 7b. 매설관의 단부조건에 따른 a_i

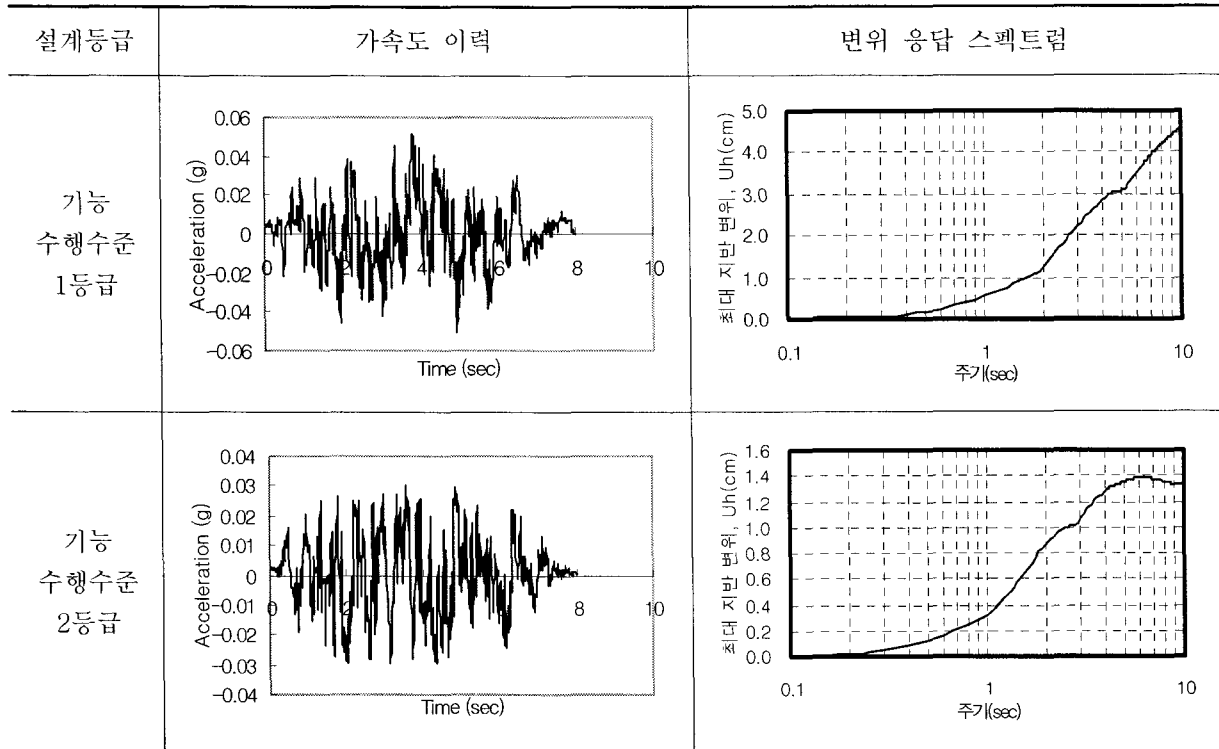
구분	상수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
일단고정	축방향 강제진동	a_0	9.50E-03	-3.57E-02	7.00E-07	1.13E+01	-1.16E+00	-1.13E-02	1.75E+00
		a_1	1.00E-05	1.00E-04	4.00E-09	-1.50E-03	-2.00E-04	2.00E-04	-4.00E-04
		a_2	1.00E-08	-6.00E-08	-1.00E-11	-1.00E-06	7.00E-07	-4.00E-07	1.00E-06
		a_3	-3.00E-12	2.00E-11	1.00E-14	1.00E-08	-1.00E-09	3.00E-10	-3.00E-10
		a_4	-	-	-4.00E-18	-8.00E-12	7.00E-13	-9.00E-14	-
		a_5	-	-	6.00E-22	2.00E-15	-1.00E-16	9.00E-18	-
일단자유	축직각방향 강제진동	a_0	-1.27E-02	5.10E-03	8.60E-01	-9.90E-01	2.00E+13	-2.57E+01	5.96E-01
		a_1	4.00E-06	1.00E-07	-1.20E-03	1.30E-03	7.00E+09	1.30E-03	-4.00E-04
		a_2	-7.00E-09	-2.00E-10	2.00E-08	-6.00E-06	-5.00E+07	-7.00E-06	1.00E-06
		a_3	4.00E-12	1.00E-12	-2.00E-11	7.00E-09	8.36E+04	1.00E-08	-8.00E-10
		a_4	-5.00E-16	-1.00E-15	1.00E-14	-3.00E-12	-4.90E+01	-7.00E-12	2.00E-13
		a_5	-	3.00E-19	-2.00E-18	5.00E-16	8.20E-03	2.00E-15	-
양단롤러	축직각방향 강제진동	a_0	-5.81E-02	-3.31E+01	-8.87E+00	-4.41E-01	1.38E+01	-4.12E+00	-
		a_1	1.10E-03	-2.56E-02	2.35E-01	3.60E-03	-1.48E-01	2.07E-02	-
		a_2	-2.00E-06	3.40E-03	-8.00E-04	-8.00E-06	7.00E-04	-5.00E-05	-
		a_3	2.00E-09	-1.00E-05	1.00E-06	3.00E-09	-1.00E-06	2.00E-08	-
		a_4	-4.00E-13	2.00E-08	-7.00E-10	2.00E-13	1.00E-09	-	-
		a_5	-	-1.00E-11	1.00E-13	-	-7.00E-13	-	-
		a_6	-	2.00E-15	-	-	1.00E-16	-	-
양단힌지	축직각방향 강제진동	a_0	-1.99E-02	1.05E-02	2.37E-02	1.36E+01	-1.63E-01	-3.33E-01	3.53E+00
		a_1	3.00E-04	-5.00E-05	-3.00E-04	2.70E-02	-1.53E-02	6.60E-03	2.21E-02
		a_2	-6.00E-07	1.00E-07	1.00E-06	-2.00E-04	5.00E-05	-2.00E-05	-1.00E-04
		a_3	4.00E-10	-9.00E-11	-1.00E-09	3.00E-07	-6.00E-08	2.00E-08	2.00E-07
		a_4	-8.00E-14	3.00E-14	4.00E-13	-3.00E-10	4.00E-11	-6.00E-12	-1.00E-10
		a_5	-	-3.00E-18	-6.00E-17	9.00E-14	-1.00E-14	6.00E-16	4.00E-14
		a_6	-	-	-	-1.00E-17	2.00E-18	1.00E-19	-6.00E-18
일단힌지 - 일단롤러	축직각방향 강제진동	a_0	1.00E-17	-2.00E-16	-2.00E-14	2.00E-15	2.00E-17	8.00E-15	-
		a_1	-9.00E-14	9.00E-13	1.00E-10	-1.00E-11	-2.00E-13	-5.00E-11	-
		a_2	2.00E-10	-2.00E-09	-3.00E-07	3.00E-08	5.00E-10	1.00E-07	-
		a_3	-2.00E-07	2.00E-06	3.00E-04	-3.00E-05	-7.00E-07	-1.00E-04	-
		a_4	1.00E-04	-8.00E-04	-1.46E-01	1.26E-02	5.00E-04	4.53E-02	-
		a_5	7.40E-03	1.19E-01	3.00E+01	-1.46E+00	-1.80E-01	-5.25E+00	-
		a_6	-	-	-	-	2.27E+01	-	-

5. 곡선적합식을 이용한 내진성능 평가

매설관의 내진성능 평가를 위해 인공지진 생성 프로그램인 Simqke를 사용하여 기능수행수준 1등급과

2등급 인공지진을 생성한 후 변위 응답스펙트럼을 구하였다. 인공지진 생성시 지역계수는 1구역으로 설정하였으며 위험도 계수는 각각 100년 주기와 50년 주기로 설정하여 생성하였다.

표 8. 내진성능 평가를 위한 인공지진



주기 10초에 대해서 전파속도는 100m/sec로 하였으며 이때의 파장은 1000m이다. 매설관의 경계조건에 대한 파장에 따른 변형률 및 휨변형률 곡선은 표 7에 나타낸 a_i 값을 식 (1)에 대입한 후 추출된 $m_i(V)$ 값을 표 6에 제시한 곡선적합식에 대입하여 구할 수 있다. 곡선적합식을 사용하여 얻어진 변형률 및 휨변형률 곡선에 표 8에 나타낸 변위 응답스펙트럼 값을 곱하여 지진파로 인해 매설관에 발생하는 실제 변형률 및 휨변형률 값을 얻을 수 있다.

내진성능 평가의 기준은 변형률에 대해 평가하였다. 변형률평가 방법은 축방향 변형률의 경우 내진설계 세부 기술기준에 명시한 직선배관의 내진설계기준을 검토에 적용하였으며 축직각 방향 휨변형률의 경우 콘크리트의 극한 변형률을 검토에 적용하였다. 표 9과 10에 그 결과를 표현하였다.

표 9. 최대 축방향 변형률 비교

설계등급	경계조건	해석위치 (최측단 기준)	최대변형률	허용변형률	내진성능 평가
					변형률평가
기능수행 1등급	양단자유	50 m	3.896×10^{-4}	1.000×10^{-2}	안 정
	양단고정	0 m	2.429×10^{-3}	1.000×10^{-2}	안 정
	고정-자유	0 m	2.323×10^{-3}	1.000×10^{-2}	안 정
기능수행 2등급	양단자유	50 m	2.104×10^{-4}	1.000×10^{-2}	안 정
	양단고정	0 m	8.590×10^{-4}	1.000×10^{-2}	안 정
	고정-자유	0 m	1.145×10^{-3}	1.000×10^{-2}	안 정

표 10. 최대 축직각방향 휨변형률 비교

설계등급	경계조건	해석위치 (좌측단 기준)	최대변형률	허용변형률	내진성능 평가
					변형률평가
가능수행 1등급	양단자유	85 m	3.396×10^{-5}	3.000×10^{-3}	안 정
	양단고정	0 m	1.176×10^{-3}	3.000×10^{-3}	안 정
	고정-자유	0 m	1.129×10^{-3}	3.000×10^{-3}	안 정
	양단롤러	100 m	1.816×10^{-3}	3.000×10^{-3}	안 정
	양단힌지	5 m	1.023×10^{-4}	3.000×10^{-3}	안 정
	힌지-롤러	5 m	1.550×10^{-3}	3.000×10^{-3}	안 정
가능수행 2등급	양단자유	50 m	2.142×10^{-5}	3.000×10^{-3}	안 정
	양단고정	100 m	3.655×10^{-4}	3.000×10^{-3}	안 정
	고정-자유	0 m	3.436×10^{-4}	3.000×10^{-3}	안 정
	양단롤러	100 m	5.994×10^{-5}	3.000×10^{-3}	안 정
	양단힌지	5 m	5.501×10^{-4}	3.000×10^{-3}	안 정
	힌지-롤러	5 m	4.720×10^{-4}	3.000×10^{-3}	안 정

6. 결 론

본 연구는 지반운동 과장에 따른 변형률 및 휨변형률 곡선에 대해 변수를 과장으로 선택하여 곡선적합을 수행하고 가장 좋은 결과를 보여주는 적합식을 개발하였다. 매설관의 동적응답에 영향을 주는 지반운동 과장의 영향 연구를 수행하고 과장에 따른 변형률 곡선과 휨변형률 곡선에 대해 곡선적합을 실시하여 곡선적합 방정식을 개발하였다. 가능수행수준 1등급과 2등급 인공지진을 생성한 후 개발된 곡선적합식을 이용하여 콘크리트 매설관의 내진성능 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매설관의 최대 변형률응답을 나타내는 과장을 임계과장이라고 정의하면 임계과장보다 더 큰 과장에 대해서 변형률은 감소하며, 결국 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 단파에 있어서 전파속도가 클수록 변형률은 커지므로 전파속도의 영향이 커지며 모든 관의 단부 경계조건에 관계없이 적용되어질 수 있다.
2. 전파속도와 과장에 따른 곡선적합식을 개발하였으며 이를 이용한 콘크리트 매설관의 내진성능 평가시 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 경계조건에 대해서 큰 응력과 변형률이 발생함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 정진호, 이병길, 정두희, 박병호 (2005), “단부경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석”, 한국지반공학회논문집, 제21권, 제5호, pp.33-43
2. 정진호, 이병길, 신준용, 장봉현, 박병호 (2005), “일단고정-일단자유 경계조건을 가진 매설관의 동적거동에 관한 연구”, 대학토목학회논문집, 제 25권, 제1C호, pp.15-25
3. 정진호, 이병길, 박병호 (2005), “단부경계 조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(1)”, 2005년도 학술발표회 논문집, pp. 1148-1158
4. 이병길, 박병호, 정진호 (2005), “단부경계 조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(2)”, 2005년도 학술발표회 논문집, pp. 328-337

5. 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.
6. Clough, Ray W., Penzien, Joseph (1975), *Dynamics of Structures*, MacGraw Hill Book Company, New York, pp. 293-327.
7. Ogawa, Y. and Koike T. (2001), "Structural design of buried pipelines for severe earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, pp.199-209.