

각종 매설관의 내진성능평가를 위한 곡선적합식의 개발

Development of Curve Fitted Equations for Seismic Performance Evaluation of Various Buried Pipelines

정진호¹⁾, Jin-Ho Jeong, 박병호²⁾, Byung-Ho Park, 김성반³⁾, Sung-Ban Kim

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

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

³⁾ 부경대학교 대학원 토목공학과 석사과정, The Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ.

SYNOPSIS : Purpose of this research is a development for the curve fitted equations that can improve practical calculation and work application when seismic performance has been evaluated and this work has been made a study of the dynamic response under various boundary conditions of buried pipelines to compare the dynamic behavior of concrete pipe and steel pipe, FRP pipe. This research have been developed curve fitted equations that can be improving efficiency and practicality. Using a nonlinear least square method, and after testing several different exponential equations, Proposed the curve fitted equations to give the best result and constant value by the propagation velocities. With these results, dynamic response analysis and seismic performance evaluation have been achieved on concrete pipe, steel pipe and FRP pipe that have a various boundary conditions. Degree of a polynomial expression and coefficient value by propagation velocity have been calculated when using the curve fitting equations.

Key words : Seismic performance evaluation, Curve fitted equation, Exponential equation

1. 서 론

본 연구는 매설관의 종류와 단부 경계조건에 따른 최대 변형률 발생지점에 대하여 전파속도와 지반진동수의 조합된 영향을 파장($\lambda=2\pi V/\omega$)의 관점에서 고려하였다. 주어진 전파속도(V)에 대한 파장(λ)의 변화는 곧 지반진동수(ω)의 변화를 의미하며 지반진동수(ω)는 매설관의 (휨)변형률 산정에 중요한 변수가 됨을 알 수가 있다. 따라서 파장에 따른 (휨)변형률 곡선은 매설관의 내진성능 평가 시 매우 중요하다. 이러한 파장에 따른 (휨)변형률을 구하는 것은 많은 수치적 해석과 그에 따른 수치해석 기법의 프로그램이 필요하여 실무에서 사용하기가 대단히 불편하고 실무적용 시 많은 계산과정과 시간이 요구된다. 따라서 본 장에서는 매설관의 내진성능평가 시 계산의 실용성과 실무 적용성을 높이기 위해 수치적 해석을 통해 구해진 데이터들에 대하여 곡선적합을 수행하여 가장 높은 적합성을 보이는 곡선적합식과 상수, $m_i(V)$ 와 전파속도(V)에 따른 변화를 고려할 수 있도록 계수 값(a_i)을 제안하고자 한다.

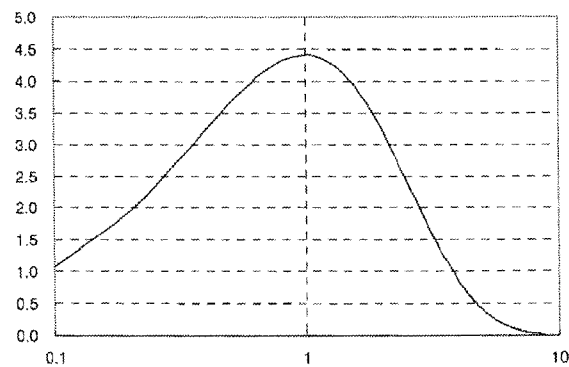
2. 곡선적합

매설관의 내진성능 평가를 위해 파장에 따른 (휨)변형률을 구하는 것은 수식 이해와 수치해석 프로그램이 요구되며 반복연산을 요구하는 수치해석 프로그램의 특성상 많은 시간이 요구되어 효율성과 실용성이 떨어진다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 지반운동 파장에 따른 (휨)변형률 곡선에 대해 변수를 파장으로 선택하여 곡선적합을 수행하고 가장 좋은 결과를 보여주는 적합식을 제안하여 해석상 편의를 도모하고자 한다. 수치적 해석을 통해 구해진 데이터들에 대하여 곡선적합을 수행하여 가장 높은 적합성을 보이는 곡선적합식과 상수, $m_1(V)$ 와 전파속도(V)에 따른 변화를 고려할 수 있도록 계수 값(a_i)을 제안한다.

2.1 곡선적합 산정식

그림 1에 나타낸 지수방정식 곡선은 본 연구에서 나타낸 파장에 따른 (휨)변형률 곡선의 기본형으로서 표 1과 그림 3에 나타낸 (휨)변형률 곡선과 같이 파장의 증가에 따라 상승 또는 하강한 후 일정한 값으로 수렴하는 형태를 가진다.

이러한 데이터를 곡선적합 하는데 사용가능한 지수방정식은 $y=Cxe^{-Dx}$ 로서 이때 $C, D > 0$ 이다. 비선형 최소자승법을 이용하여 가장 좋은 결과를 주는 곡선적합식을 시행착오법을 통해 채택하였다.



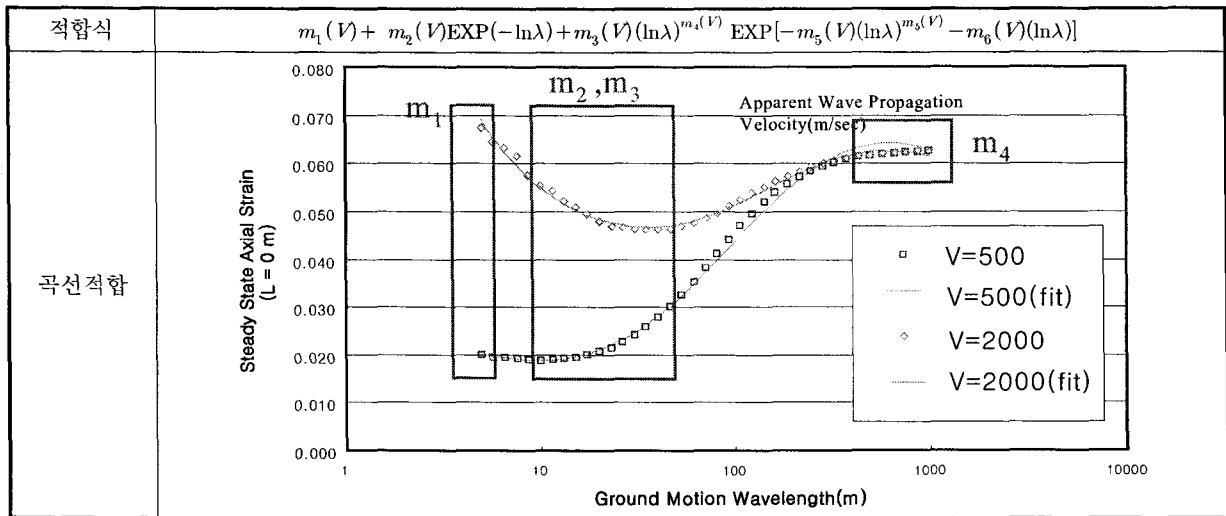
$$y = Cxe^{-Dx} \quad (C, D > 0)$$

그림 1. 지수방정식 형태

곡선적합을 수행하기 위해 (휨)변형률 곡선은 콘크리트관과 강관, FRP관에 대하여 전파속도 100 ~ 2000m/sec 사이에서 측정되었으며, 측정간격은 100m/sec로 해석하였다. 해석위치는 선행연구에서 나타낸 단부 경계조건에 따른 매설관의 최대변형률 발생지점이다. 곡선의 형태는 동일한 경계조건과 파의 진행방향에서는 전파속도가 변할 때 오직 상수(m_i)만 변화하는 형태이다. 결국 각각의 상수(m_i)는 전파속도(V)에 대비하여 그려지게 된다. 이렇게 획득된 전파속도(V)에 대한 상수(m_i)는 다항식 곡선을 통해 정리하였다. 이때 다항식 곡선의 차수결정은 전파속도에 대한 곡선의 이산정도에 따라 결정된다. 이러한 다항식에서 얻어진 계수 (a_i)를 변형률 방정식에 대입하게 되면 변형률에 대한 일반적인 방정식은 오직 두 개의 변수로 표현된다. 즉 전파속도와 파장이다. 그 외의 변수들은 이미 해석과정에서 사용되었으므로 고정된 값이다. 그림 2에서는 콘크리트 매설관의 축방향 일단고정-일단자유 경계조건에 대하여 전파속도(V) 500m/sec와 2,000m/sec에 대하여 곡선적합을 수행하고 그 형태를 나타내었다. 그림에서 나타낸 상수 m_1 은 곡선의 좌측 끝단의 상승과 하강을 결정하며 상수 m_2 와 m_3 는 곡선의 휨 정도를 결정하고 상수 m_4 는 임계파장 이후의 일정 값으로 수렴하는 형상을 결정하여 나타낸다. 그 밖의 상수 m_5, m_6, m_7 는 전체적인 형태를 나타낸다. 이러한 상수 m_i 의 역할은 매설관의 종류, 단부 경계조건과 전파속도(V)에 따라 달라지므로 전파속도 함

수, $m_i(V)$ 라 정의되어진다.

그림 2. 축방향 일단고정-일단자유 경계조건에서의 곡선적합, 콘크리트관



여러 가지 단부 경계조건을 가진 콘크리트관, 강관, FRP관에 대해 곡선적합식을 표 1에 수록하였다. FRP관에 대한 일단고정-일단자유, 양단힌지 경계조건에서는 다른 관종과 다른 거동을 보이는 적합식을 나타내며 그 외는 모두 동일한 곡선적합식이 개발되었다.

표 1. 단부경계조건에 따른 곡선적합식

구 분		Curve Fitted Equation
양단자유	축방향 진동 (Larbi 1995)	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$
	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^{m_5(V)} - m_6(V)(\ln\lambda)]$
양단고정	축방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$
	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda) + m_3(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6} - m_7(V)(\ln\lambda)]$
일단고정 일단자유	축방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)\text{EXP}(-\ln\lambda) + m_3(V)(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_7(V)(\ln\lambda)]$ $m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$ (FRP Pipe)
	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda) + m_3(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_7(V)(\ln\lambda)]$
양단틀러	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$
양단힌지	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda) + m_3(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_7(V)(\ln\lambda)]$ $m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$ (FRP Pipe)
	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$

그림 3과 표 2에서는 수치해석을 통해 얻어진 데이터와 곡선적합을 통해 얻어진 데이터를 중첩하여 나타내었으며 수치해석을 통해 얻어진 데이터는 도형으로 표시하였고 곡선적합을 통한 데이터는 실선으로 표시하였다. 이러한 곡선적합식의 적합성은 결정계수를 통하여 나타내었으며 평균 0.95이상의 높은 적합성을 나타냄을 알 수 있다. 일단고정-일단자유 단부경계조건에 대하여 대표적으로 나타내었다.

그림 3. 축방향 진동에서의 곡선적합, 일단고정-일단자유

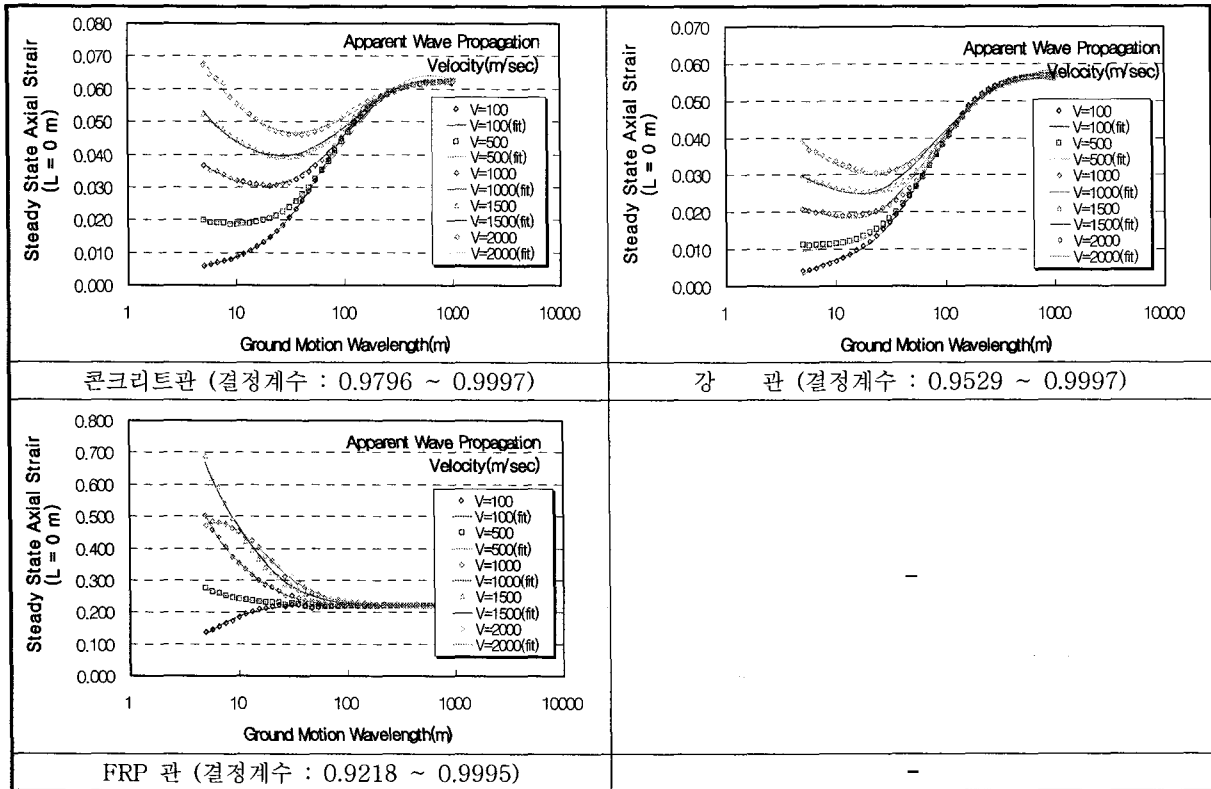
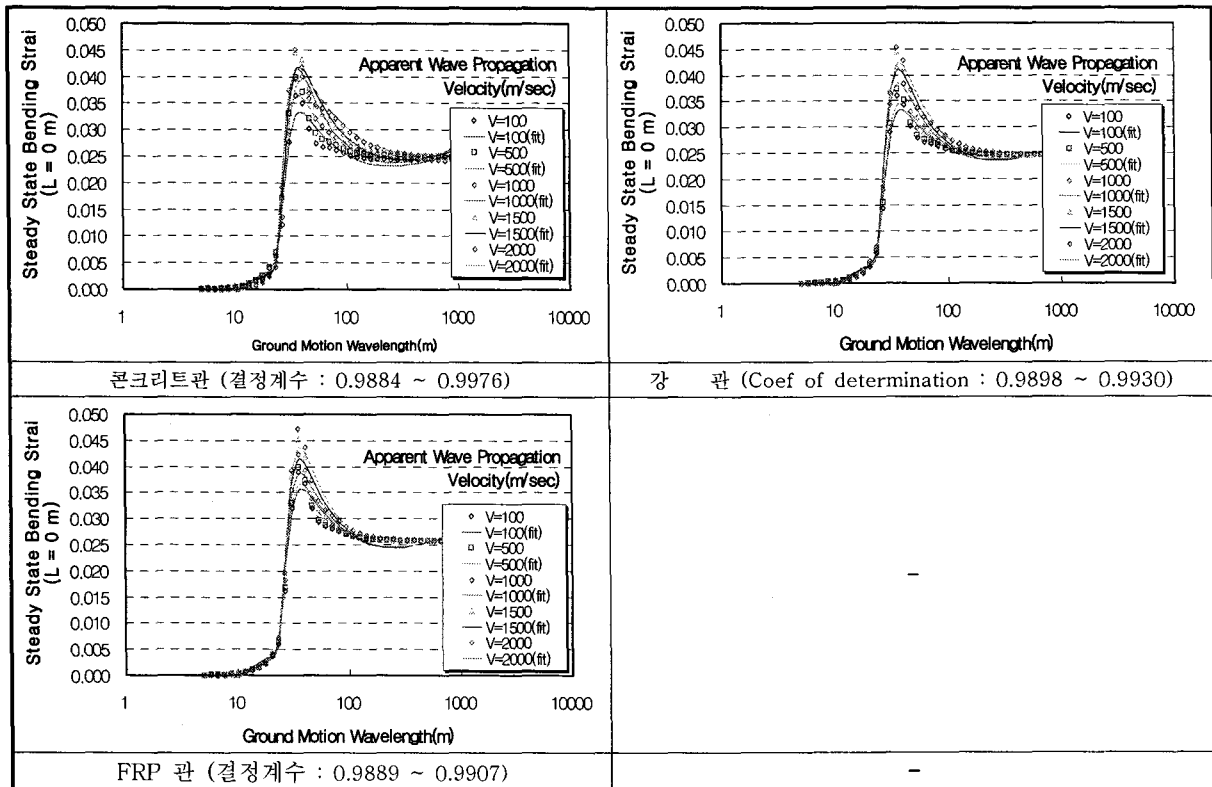


그림 4. 축직각방향 진동에서의 곡선적합, 일단고정-일단자유



2.2 다항식 적합

앞서 서술한 바와 같이 전파속도(V)는 100m/sec 간격으로 곡선적합을 수행하였으므로 간격에 포함되지 않는 전파속도(V)에 대하여 다항식 적합이 필요하다. 전파속도함수($m_i(V)$)는 오직 전파속도(V)에 관해 변하기 때문에 다항식 적합의 차수는 곡선이 직선에 가까울수록 낮아지며 비선형성이 복잡해질수록 높아진다. 식 1은 전파속도함수, $m_i(V)$ 를 나타낸 식이다. 표 2와 표 3에서는 일단고정-일단자유 단부경계조건에 대해 대표적으로 다항식 계수, a_i 를 나타내었다.

$$m_i(V) = a_0 + a_1V + a_2V^2 + \dots + a_nV^n \quad (1)$$

여기서, a_i 는 일정한 계수 값의 형태를 가지며 $n = 1, 2, 3, \dots$ 이다.

표 2. 축방향 진동에서의 다항식 계수 a_i , 일단고정-일단자유

구 분		계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$
축방향 진동	콘크리트관	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	-
	강 관	a_0	1.42E-02	-4.01E-02	2.79E+02	-2.87E+00	4.39E+01	-1.56E+00	1.24E-01
		a_1	-1.00E-05	4.00E-05	-1.93E-01	-1.80E-03	3.55E-02	-5.00E-04	-2.00E-04
		a_2	3.00E-08	2.00E-08	7.00E-04	5.00E-06	-7.00E-05	1.00E-06	2.00E-07
		a_3	-1.00E-11	-8.00E-12	-9.00E-07	-8.00E-09	7.00E-08	-1.00E-09	-1.00E-10
		a_4	2.00E-15	-	5.00E-10	7.00E-12	-3.00E-11	6.00E-13	3.00E-14
		a_5	-	-	-9.00E-14	-3.00E-15	6.00E-15	-1.00E-16	-
	F R P 관	a_0	-3.04E-01	1.38E-01	-6.20E+00	8.36E-01	-5.74E+00	-4.78E-01	1.24E-01
		a_1	2.80E-03	1.00E-04	1.36E-01	-1.32E-02	1.02E-01	-5.50E-03	-2.00E-04
		a_2	-6.00E-06	-3.00E-06	-6.00E-04	6.00E-05	-4.00E-04	4.00E-05	2.00E-07
		a_3	6.00E-09	6.00E-09	1.00E-06	-9.00E-08	7.00E-07	-8.00E-08	-1.00E-10
		a_4	-4.00E-12	-5.00E-12	-9.00E-10	7.00E-11	-6.00E-10	6.00E-11	3.00E-14
		a_5	1.00E-15	2.00E-15	4.00E-13	-3.00E-14	2.00E-13	-2.00E-14	-
		a_6	-1.00E-19	-4.00E-19	-6.00E-17	4.00E-18	-3.00E-17	4.00E-18	-

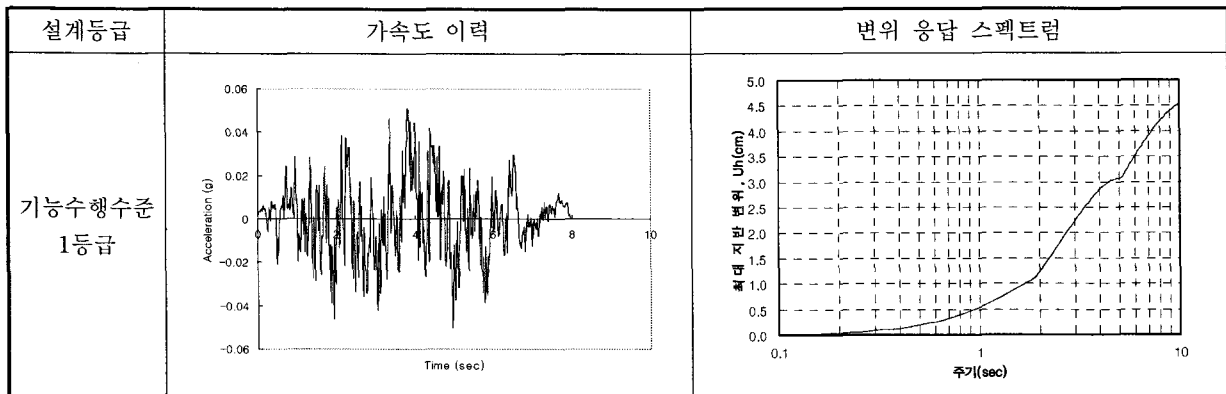
표 3. 축직각방향 진동에서의 다항식 계수 a_i , 일단고정-일단자유

구 분		계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$
축직각방향 진동	콘크리트관	a_0	5.10E-03	8.60E-01	-9.90E-01	2.00E+13	-2.57E+01	5.96E-01	-
		a_1	1.00E-07	-1.20E-03	1.30E-03	7.00E+09	1.30E-03	-4.00E-04	-
		a_2	-2.00E-10	2.00E-08	-6.00E-06	-5.00E+07	-7.00E-06	1.00E-06	-
		a_3	1.00E-12	-2.00E-11	7.00E-09	8.36E+04	1.00E-08	-8.00E-10	-
		a_4	-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	-	-
	강 관	a_0	5.10E-03	6.96E-01	-9.26E-01	2.00E+13	-2.56E+01	5.26E-01	-
		a_1	-3.00E-07	-1.20E-03	1.00E-03	-2.00E+10	1.00E-03	-5.00E-05	-
		a_2	8.00E-10	3.00E-06	-3.00E-06	8.00E+07	-4.00E-06	2.00E-07	-
		a_3	-5.00E-13	-1.00E-09	3.00E-09	-9.27E+04	4.00E-09	-1.00E-10	-
		a_4	1.00E-16	-3.00E-14	-8.00E-13	4.71E+01	-2.00E-12	2.00E-14	-
		a_5	-1.00E-20	3.00E-17	1.00E-16	-8.80E-03	4.00E-16	-	-
	FRP 관	a_0	-1.30E-02	5.50E-03	8.39E-01	-9.16E-01	2.00E+13	-2.57E+01	5.38E-01
		a_1	-2.00E-07	-8.00E-08	-6.00E-04	-5.00E-05	-1.00E+09	-5.00E-05	1.00E-04
		a_2	2.00E-09	2.00E-10	2.00E-06	-4.00E-07	-2.00E+07	6.00E-07	-3.00E-07
		a_3	-2.00E-12	-6.00E-14	-4.00E-10	1.00E-10	4.47E+04	-1.00E-09	5.00E-10
		a_4	4.00E-16	-	-	-	-3.06E+01	5.00E-13	-3.00E-13
		a_5	-	-	-	-	6.70E-03	-1.00E-16	5.00E-17

3. 매설관의 내진성능 평가 예

본장에서는 앞서 수행한 곡선적합식과 계수 값을 이용한 매설관의 내진설계 절차와 방법을 제시한다. 매설관의 내진성능 평가를 위해 인공지진 생성 프로그램인 Simqke를 사용하여 기능수행수준 1등급 인공지진을 생성한 후 변위 응답스펙트럼을 구하였다. 인공지진 생성시 지역계수는 1구역으로 설정하였으며 위험도 계수는 100년 주기로 설정하여 생성하였다. 평가에 사용된 허용 변형률은 선행연구에 나타난 바에 따라 콘크리트관은 0.0025, 강관은 0.0027, FRP관은 0.035를 사용하였으며 그 결과를 표 4에 나타내었다.

그림 5. 내진성능 평가를 위한 인공지진



매설관 변형률 산정을 위한 절차는 아래에 제시한 방법에 따라 수행된다. 본 예제에서 전파속도(V)는 100m/sec를 적용하였고 주기는 그림 5에서와 같이 0.1 ~ 10초를 적용하여 변위응답 스펙트럼을 작성하였다.

- 1) 주어진 전파속도(V)에 대해 주기(T) 변수에 따른 파장(λ) 변수를 산정한다.
- 2) 일단고정-일단자유 단부 경계조건에 대하여 표 2에 제시된 바와 같이 계수, a_i 값을 사용하여 전파속도함수, $m_i(V)$ 를 구한다.
- 3) 구해진 전파속도함수, $m_i(V)$ 의 값들을 표 1에 제시된 곡선적합 식에 대입한다. 이를 이용하여 단위 변형률(ϵ_u)을 산정한다.
- 4) 실제 지진파로 인한 매설관의 변형률(ϵ_s)은 주어진 파장(λ)과 이에 상응하는 주기(T)에 대한 변위응답 스펙트럼의 지반 변위(U_h)를 구한 후 이 값에 단위 변형률(ϵ_u)을 곱함으로써 계산된다. 여러 가지 주기에 따른 매설관의 변형률들(ϵ_s)이 산정되어지면 그때 최대 값을 허용변형률과 비교하여 매설관의 내진성능을 평가하게 된다.

$$\epsilon_s = \epsilon_u \times U_h \quad (2)$$

표 4. 인공지진에 대한 매설관의 내진성능평가

구 분		최대 변형률			내진성능평가		
		콘크리트관	강 관	F R P 관	콘크리트관 (2.500×10^{-3})	강 관 (2.700×10^{-3})	F R P 관 (3.500×10^{-2})
축방향 진동	양단자유	3.896×10^{-4}	3.736×10^{-4}	4.733×10^{-4}	안 정	안 정	안 정
	양단고정	2.429×10^{-3}	2.373×10^{-3}	1.060×10^{-2}	안 정	안 정	안 정
	일단고정 일단자유	2.323×10^{-3}	2.219×10^{-3}	1.011×10^{-2}	안 정	안 정	안 정
축직각방향 진동	양단자유	3.396×10^{-5}	3.348×10^{-5}	3.160×10^{-5}	안 정	안 정	안 정
	양단고정	1.176×10^{-3}	1.122×10^{-3}	1.170×10^{-3}	안 정	안 정	안 정
	일단고정 일단자유	1.129×10^{-3}	1.119×10^{-3}	1.171×10^{-3}	안 정	안 정	안 정
	양단힌지	1.816×10^{-3}	1.700×10^{-3}	2.929×10^{-3}	안 정	안 정	안 정
	양단롤러	1.023×10^{-4}	9.824×10^{-5}	1.358×10^{-5}	안 정	안 정	안 정
	일단힌지 일단롤러	1.550×10^{-3}	1.439×10^{-3}	2.659×10^{-3}	안 정	안 정	안 정

4. 결 론

이상과 같은 각종 매설관의 내진성능평가를 위한 곡선적합식의 개발에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 수치해석을 통해 구해진 파장에 따른 매설관의 (휨)변형률 곡선에 대해 지수방정식($y=Cx e^{-Dx}$)의 곡선 형태를 기본형으로 하여 비선형 최소 자승법을 이용하여 결정계수가 평균 0.95이상의 곡선적합식을 개발하였다. 매설관의 단부경계조건에 따라 콘크리트관과 강관, FRP관에 대한 곡선적합식을 개발하였다.
- 2) 전파속도 함수, $m_i(V)$ 는 100m/sec 간격으로 산정하였으며 간격에 포함되지 않는 $m_i(V)$ 에 대한 다항식 적합을 실시하여 매설관의 종류와 단부 경계조건에 대해 계수 값, a_i 를 산정하였다.
- 3) 4단계로 이루어진 매설관의 내진성능평가 절차를 제안하였으며 곡선적합식을 사용하여 기능수행수준 1등급 인공지진에 대해 내진성능평가를 수행하였고 콘크리트관과 강관, FRP관 모두 안정한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김성반, 정진호, 이병길 (2004) 매설관의 동적거동에 관한 연구(1). 2004년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 5428-5433.
2. 장봉현, 정진호, 이병길 (2004) 매설관의 동적거동에 관한 연구(2). 2004년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 5422-5427.
3. 정진호, 이병길, 박병호 (2005) 단부경계 조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(1). 2005년도 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 1148-1158
4. 이병길, 박병호, 정진호 (2005) 단부경계 조건을 고려한 매설관의 동적응답해석(2). 2005년도 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 328-337
5. 정진호, 이병길, 신준용, 장봉현, 박병호 (2005) 일단고정-일단자유 경계조건을 가진 매설관의 동적거동에 관한 연구. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권, 제1C호, pp. 15-25.