

## 각종 매설관의 동적거동에 대한 곡선적합식의 개발

### Development of Curve Fitted Equations for Dynamic Behavior of Various Buried Pipelines

정진호<sup>1)</sup> · 김성반<sup>2)</sup> · 정두회<sup>3)</sup> · 이광열<sup>4)</sup>

Jeong, Jin-Ho · Kim, Sung-Ban · Joeng, Du-Hwoe · Lee, Kwang-Yeol

**국문 요약 >>** 지진해일 위험재해도의 작성과 재해경감대책 수립을 위해서는 연안역의 상세한 수심 및 지형을 이용한 시뮬레이션이 요구되고 있다. 본 연구에서는 Beowulf 병렬계산을 통해 동해 전 영역에서 정밀산정이 가능한 병렬유한요소모형을 이용하여 1993년 7월 12일 동해안에 내습한 지진해일에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 계산 결과와 관측치와의 비교결과를 제시한다. 또한, 해안에서의 지진해일고의 통계적 분포에 대해 논하며, 해안에서의 지진해일고의 파고분포가 전반적으로 대수정규분포를 따르는 경향을 제시하였다.

**주요어** 매설관, 내진성능평가, 곡선적합

**ABSTRACT >>** The purpose of this study is to develop the curve fitted equations for practicality and actual calculation during seismic performance evaluation of buried pipelines. Curve fitting for strain curve according to the wavelength of the seismic wave was produced using the non-linear least square method and the equations with the best results was suggested. In addition, a degree and coefficient of polynomial fitting equation needed to use curve fitted equation were identified. Interpreting process during the test of resistance of earthquake of buried pipelines with various end boundary conditions were provided through example questions. The results of this study were used to conduct a dynamic response analysis and a seismic performance evaluation of concrete, steel, and FRP pipes with various end boundary conditions.

**Key words** buried pipelines, seismic performance evaluation, curve fitting

## 1. 서론

본 연구는 매설관의 종류와 단부 경계조건에 따른 최대 변형을 발생지점에 대하여 전파속도와 지반진동수의 조합된 영향을 파장( $\lambda = 2\pi V/\bar{\omega}$ )의 관점에서 고려하였다. 주어진 전파속도( $V$ )에 대한 파장( $\lambda$ )의 변화는 곧 지반진동수( $\bar{\omega}$ )의 변화를 의미하며 지반진동수( $\bar{\omega}$ )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. 최대 (휨)변형률 발생지점

매설관의 최대 (휨)변형률 발생위치는 선행연구에서 산정되었다. 최대 (휨)변형률 발생위치는 매설관의 종류와는 관계없이 단부 경계조건에 대하여 달리 나타났으며 이를 표 1에 나타내었다.

<sup>1)</sup> 정회원·부경대학교 건설공학부 교수·공학박사

<sup>2)</sup> 비회원·부경대학교 토목공학과 박사과정

(대표저자: ban1579@nate.com)

<sup>3)</sup> 비회원·부경대학교 건설공학부 교수·공학박사

<sup>4)</sup> 비회원·동서대학교 토목공학과 부교수·공학박사

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

〈표 1〉 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

3. 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,  $m_i(V)$ 와 전파속도(V)에 따른 변화를 고려할 수 있도록 계수 값( $a_i$ )을 제안한다.

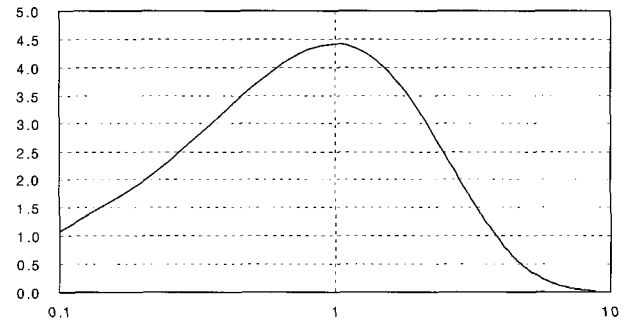
3.1 곡선적합 산정식

그림 1에 나타난 지수방정식 곡선은 본 연구에서 나타난 파장에 따른 (휨)변형률 곡선의 기본형으로서 표 2와 표 3에 나타난 (휨)변형률 곡선과 같이 파장의 증가에 따라 상승 또는 하강한 후 일정한 값으로 수렴하는 형태를 가진다.

이러한 데이터를 곡선적합 하는데 사용가능한 지수방정

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

곡선적합을 수행하기 위해 (휨)변형률 곡선은 콘크리트관과 강관, FRP관에 대하여 전파속도 100~2000m/sec 사이에서 측정되었으며, 측정간격은 100m/sec로 해석하였다. 해석위치는 선행연구에서 나타난 단부 경계조건에 따른 매설관의 최대변형을 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 이산 정도에 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. 표 2에서는 콘크리트 매설관의 축방향 일단고정-일단자유 경계조건에 대하여 전파속도(V) 500m/sec와 2,000m/sec에 대하여 곡선적합을 수행하고 그 형태를 나타내었다. 그림에서 나타난 상수  $m_i$ 은 곡선의 좌측 끝단의



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

〈그림 1〉 지수방정식 형태

〈표 2〉 축방향 일단고정-일단자유 경계조건에서의 곡선적합, 콘크리트관

적합식	$m_1(V) + m_2(V)EXP(-\ln\lambda) + m_3(V)(\ln\lambda)^{m_4(V)} EXP[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_6(V)(\ln\lambda)]$
곡선적합	

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 매설

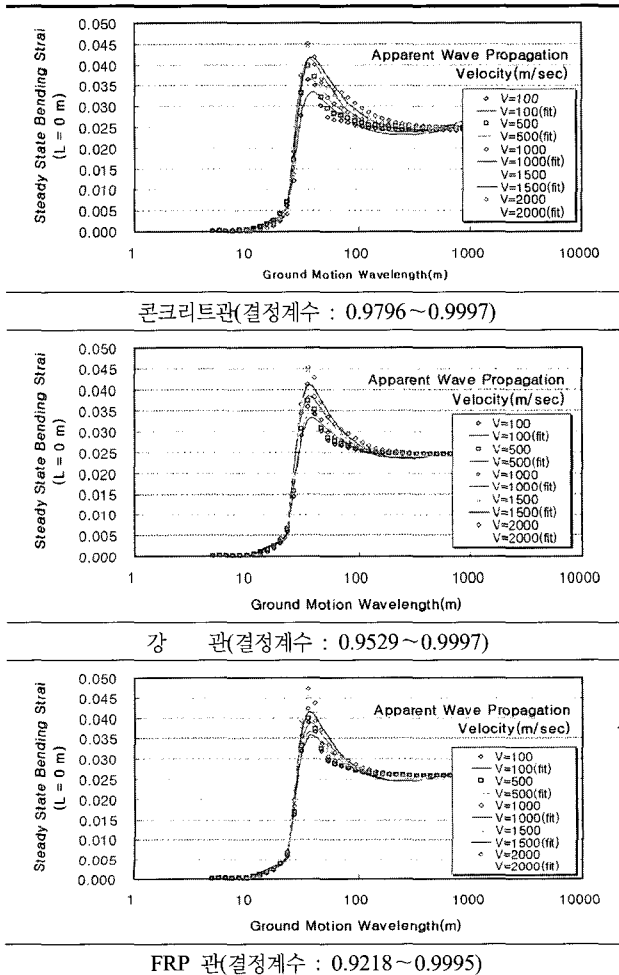
관의 종류, 단부 경계조건과 전파속도(V)에 따라 달라지므로 전파속도 함수,  $m_i(V)$ 라 정의되어진다.

여러 가지 단부 경계조건을 가진 콘크리트관, 강관, FRP 관에 대해 곡선적합식을 표 3에 수록하였다. FRP관에 대한

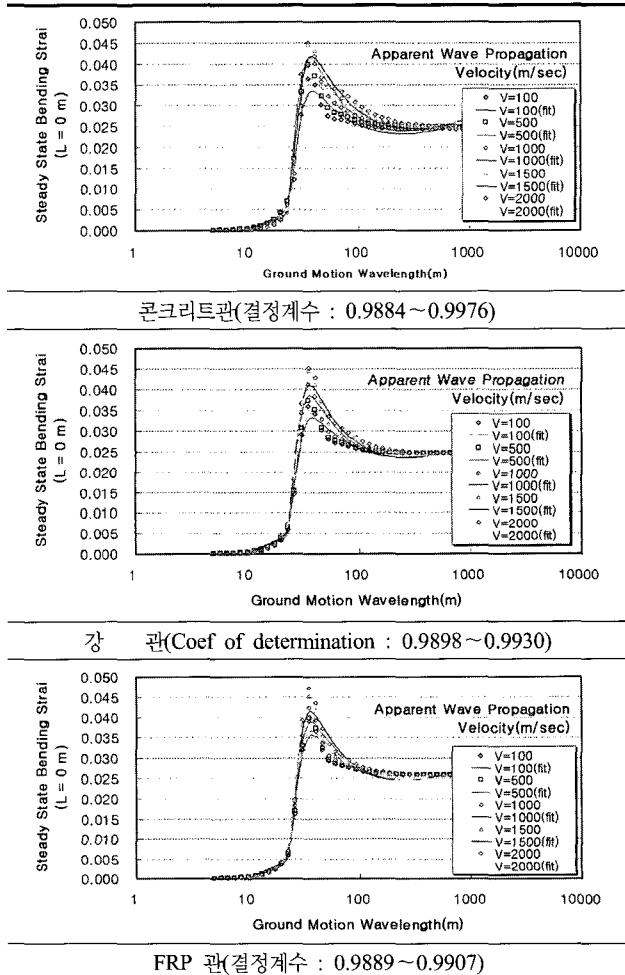
〈표 3〉 단부경계조건에 따른 곡선적합식

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	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda) + m_3(\ln\lambda)^{m_4(V)} \text{EXP}[-m_5(V)(\ln\lambda)^{m_6(V)} - m_7(V)(\ln\lambda)]$
양단롤러	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$
양단한지	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)
일단한지 일단롤러	축직각방향 진동	$m_1(V) + m_2(V)(\ln\lambda)^{m_3(V)} \text{EXP}[-m_4(V)(\ln\lambda)^2 - m_5(V)(\ln\lambda) - m_6]$

〈표 4〉 축방향 진동에서의 곡선적합, 일단고정-일단자유



〈표 5〉 축직각방향 진동에서의 곡선적합, 일단고정-일단자유



일단고정-일단자유, 양단힌지 경계조건에서는 다른 관종과 다른 거동을 보이는 적합식을 나타내며 그 외는 모두 동일한 곡선적합식이 개발되었다.

표 4와 표 5에서는 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.

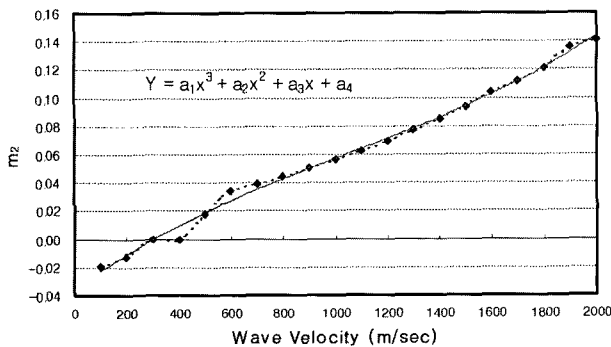
### 3.2 다항식 적합

앞서 서술한 바와 같이 전파속도(V)를 100m/sec 간격으로 적용하여 곡선적합을 수행하였으므로 간격에 포함되지 않는 전파속도(V)에 대하여 다항식 적합이 필요하다. 전파속도함수( $m_i(V)$ )는 오직 전파속도(V)에 관해 변하기 때문

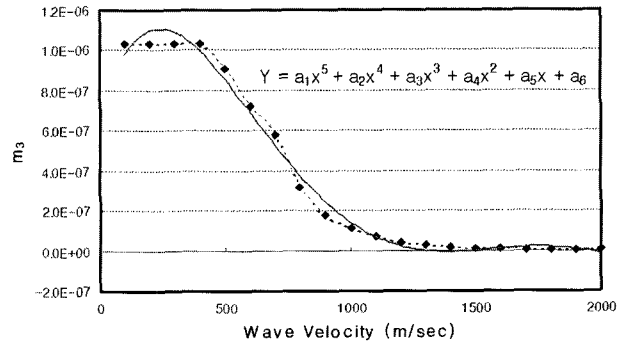
에 다항식 적합의 차수는 곡선이 직선에 가까울수록 낮아지며 비선형성이 복잡해질수록 높아진다. 표 6은 일단고정-일단자유 단부경계조건을 가진 콘크리트판에 대해 산정된 전파속도함수( $m_i(V)$ )값을 나타내었다. 그림 2와 그림 3은 표 6에서의 값 중  $m_2$ 와  $m_3$ 에 대한 다항식 적합 곡선을 나타낸 그림이다. 전파속도함수( $m_i(V)$ )는 오직 전파속도(V)에 관해 변하기 때문에 다항식 적합의 차수는 곡선이 직선에 가까울수록 낮아지며 비선형성이 복잡해질수록 높아진다. 식 (1)은 다항식 계수,  $a_i$ 를 사용하여 구하는 전파속도함수,  $m_i(V)$ 를 나타낸 식이며 표 7~표 15에서는 단부경계조건과 매설관의 종류에 따른 다항식 계수,  $a_i$ 를 나타내었다.

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

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



〈그림 2〉  $m_2$ 에 대한 다항식 적합



〈그림 3〉  $m_3$ 에 대한 다항식 적합

〈표 6〉 전파속도 함수,  $m_i(V)$

V (m/sec)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$m_1$	1.006E-02	1.206E-02	1.406E-02	1.506E-02	1.656E-02	1.706E-02	1.948E-02	2.184E-02	2.398E-02	2.599E-02
$m_2$	-1.926E-02	-1.256E-02	-4.256E-04	-4.256E-04	1.803E-02	3.426E-02	3.940E-02	4.426E-02	5.029E-02	5.645E-02
$m_3$	1.032E-06	1.030E-06	1.030E-06	1.030E-06	9.083E-07	7.243E-07	5.807E-07	3.173E-07	1.799E-07	1.086E-07
$m_4$	1.112E+01	1.113E+01	1.112E+01	1.112E+01	1.115E+01	1.119E+01	1.176E+01	1.234E+01	1.288E+01	1.334E+01
$m_5$	-1.166E+00	-1.169E+00	-1.176E+00	-1.176E+00	-1.176E+00	-1.165E+00	-1.185E+00	-1.214E+00	-1.242E+00	-1.268E+00
$m_6$	1.186E-02	1.886E-02	4.186E-02	4.386E-02	5.186E-02	5.286E-02	5.513E-02	5.765E-02	6.075E-02	6.686E-02
$m_7$	1.716E+00	1.720E+00	1.739E+00	1.749E+00	1.739E+00	1.716E+00	1.864E+00	1.954E+00	2.036E+00	2.106E+00
V (m/sec)	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
$m_1$	2.790E-02	2.979E-02	3.141E-02	3.300E-02	3.459E-02	3.602E-02	3.753E-02	3.863E-02	3.969E-02	4.102E-02
$m_2$	6.300E-02	6.921E-02	7.753E-02	8.538E-02	9.399E-02	1.036E-01	1.114E-01	1.216E-01	1.360E-01	1.412E-01
$m_3$	6.627E-08	3.865E-08	2.660E-08	1.681E-08	9.869E-09	6.798E-09	3.635E-09	3.363E-09	2.595E-09	1.358E-09
$m_4$	1.380E+01	1.430E+01	1.461E+01	1.504E+01	1.554E+01	1.585E+01	1.646E+01	1.643E+01	1.666E+01	1.732E+01
$m_5$	-1.290E+00	-1.319E+00	-1.341E+00	-1.363E+00	-1.396E+00	-1.420E+00	-1.461E+00	-1.479E+00	-1.493E+00	-1.538E+00
$m_6$	6.982E-02	7.508E-02	8.003E-02	8.080E-02	8.233E-02	8.823E-02	8.571E-02	9.860E-02	9.581E-02	8.859E-02
$m_7$	2.176E+00	2.252E+00	2.299E+00	2.364E+00	2.440E+00	2.488E+00	2.583E+00	2.578E+00	2.614E+00	2.719E+00

〈표 7〉 축방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 양단자유

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	$a_0$	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	-	-	-	-
	강 관	$a_0$	2.70E-03	6.00E-04	3.94E+00	-9.50E-03	-3.25E+00	4.76E+00	-
		$a_1$	3.00E-05	-7.00E-06	3.79E-02	6.20E-03	9.20E-03	9.00E-03	-
		$a_2$	-6.00E-08	3.00E-08	-6.00E-04	-1.00E-05	-3.00E-04	-2.00E-05	-
		$a_3$	6.00E-11	-4.00E-11	1.00E-06	9.00E-09	6.00E-07	1.00E-08	-
		$a_4$	-3.00E-14	2.00E-14	-1.00E-09	-3.00E-12	-6.00E-10	-3.00E-12	-
		$a_5$	5.00E-18	-5.00E-18	5.00E-13	5.00E-16	3.00E-13	-	-
	F R P 관	$a_0$	4.70E-03	-5.75E-02	1.01E+01	1.16E-01	4.22E+00	-2.72E-01	-
		$a_1$	6.00E-05	1.30E-03	-1.04E-01	1.60E-03	-6.15E-02	2.20E-03	-
		$a_2$	-2.00E-07	-6.00E-06	4.00E-04	-5.00E-06	2.00E-04	-1.00E-05	-
		$a_3$	2.00E-10	1.00E-08	-6.00E-07	5.00E-09	-4.00E-07	9.00E-09	-
		$a_4$	-6.00E-14	-7.00E-12	5.00E-10	-2.00E-12	3.00E-10	-2.00E-12	-
		$a_5$	6.00E-18	2.00E-15	-2.00E-13	3.00E-16	-1.00E-13	-	-

〈표 8〉 축직각방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 양단자유

구 분	계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
축직각 방향 진동	콘크리트관	$a_0$	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	-	-	-	-	-
	강 관	$a_0$	1.20E-03	2.00E-17	1.09E+02	-5.05E+00	1.33E-01	3.05E+01	-
		$a_1$	1.00E-06	-2.00E-19	7.60E-03	-7.00E-04	1.00E-04	2.30E-03	-
		$a_2$	-2.00E-09	5.00E-22	-3.00E-05	2.00E-06	-3.00E-08	-8.00E-06	-
		$a_3$	8.00E-13	-6.00E-25	3.00E-08	-1.00E-09	-6.00E-11	9.00E-09	-
		$a_4$	-1.00E-16	3.00E-28	-9.00E-12	3.00E-13	3.00E-14	-2.00E-12	-
		$a_5$	-	-5.00E-32	-	-	-	-	-
	F R P 관	$a_0$	1.80E-03	4.00E-13	8.42E+01	-4.58E+00	3.06E-01	2.46E+01	-
		$a_1$	1.00E-06	-4.00E-15	1.81E-02	-1.10E-03	6.00E-05	5.50E-03	-
		$a_2$	-2.00E-09	1.00E-17	-6.00E-05	1.00E-06	2.00E-07	-2.00E-05	-
		$a_3$	1.00E-12	-1.00E-20	5.00E-08	-3.00E-10	-3.00E-10	1.00E-08	-
		$a_4$	-3.00E-16	5.00E-24	-1.00E-11	-4.00E-13	7.00E-14	-3.00E-12	-
		$a_5$	-	-8.00E-28	-	1.00E-16	-	-	-

〈표 9〉 축방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 양단고정

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	$a_0$	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	-
	강 관	$a_0$	5.60E-03	-3.00E-04	1.91E+01	-7.10E-02	4.37E+00	4.46E+00	-
		$a_1$	1.00E-05	7.00E-06	1.29E-01	-3.90E-03	6.36E-02	-6.10E-03	-
		$a_2$	1.00E-08	-3.00E-08	-5.00E-04	2.00E-05	-2.00E-04	4.00E-05	-
		$a_3$	-	7.00E-11	9.00E-07	-3.00E-08	5.00E-07	-7.00E-08	-
		$a_4$	-	-7.00E-14	-8.00E-10	3.00E-11	-4.00E-10	7.00E-11	-
		$a_5$	-	3.00E-17	4.00E-13	-1.00E-14	2.00E-13	-3.00E-14	-
	F R P 관	$a_0$	-8.80E-01	3.57E-01	1.71E+01	-1.15E+00	9.73E+00	-3.95E+00	-
		$a_1$	9.20E-03	-1.30E-03	-2.04E-01	1.36E-02	-1.11E-01	3.54E-02	-
		$a_2$	-3.00E-05	-2.00E-06	7.00E-04	-4.00E-05	3.00E-04	-9.00E-05	-
		$a_3$	4.00E-08	1.00E-08	-1.00E-06	5.00E-08	-5.00E-07	1.00E-07	-
		$a_4$	-3.00E-11	-2.00E-11	9.00E-10	-3.00E-11	4.00E-10	-5.00E-11	-
		$a_5$	1.00E-14	8.00E-15	-3.00E-13	1.00E-14	-1.00E-13	1.00E-14	-

〈표 10〉 축직각방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 양단고정

구 분	계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
축직각 방향 진동	콘크리트관	$a_0$	-1.16E-02	5.00E-03	8.23E-01	-8.59E-01	3.00E+13	-2.65E+01	4.24E-01
		$a_1$	-5.00E-06	1.00E-06	2.70E-03	1.90E-03	-4.00E+10	7.00E-04	3.00E-04
		$a_2$	1.00E-08	2.00E-09	-4.00E-06	-9.00E-06	4.00E+07	2.00E-06	4.00E-07
		$a_3$	-6.00E-12	-4.00E-12	6.00E-08	1.00E-08	1.11E+05	-1.00E-08	-6.00E-10
		$a_4$	-7.00E-17	3.00E-15	-8.00E-11	-5.00E-12	-1.75E+02	1.00E-11	2.00E-13
		$a_5$	6.00E-19	-6.00E-19	4.00E-14	8.00E-16	8.38E-02	-4.00E-15	-
	강 관	$a_0$	-1.08E-02	4.70E-03	3.18E-01	-5.61E-01	1.00E+13	-2.64E+01	4.36E-01
		$a_1$	-6.00E-06	2.00E-06	2.00E-04	-9.00E-04	8.00E+10	1.00E-04	7.00E-05
		$a_2$	1.00E-08	-2.00E-09	5.00E-06	2.00E-06	-3.00E+08	-8.00E-07	4.00E-07
		$a_3$	-6.00E-12	1.00E-12	-2.00E-08	-3.00E-09	4.81E+05	1.00E-09	-3.00E-10
		$a_4$	2.00E-15	-4.00E-16	2.00E-11	2.00E-12	-4.04E+02	-1.00E-12	5.00E-14
		$a_5$	-2.00E-19	6.00E-20	-1.00E-14	-4.00E-16	1.62E-01	4.00E-16	-
	F R P 관	$a_0$	-1.15E-02	5.20E-03	7.09E-01	-7.39E-01	3.00E+13	-2.65E+01	4.70E-01
		$a_1$	-1.00E-05	2.00E-06	-1.20E-03	-1.00E-04	-2.00E+10	1.50E-03	8.00E-05
		$a_2$	2.00E-08	-2.00E-09	3.00E-06	-4.00E-07	-1.00E+06	-5.00E-07	1.00E-07
		$a_3$	-3.00E-11	1.00E-12	-8.00E-10	1.00E-10	1.13E+05	-5.00E-09	-5.00E-11
		$a_4$	1.00E-14	-3.00E-16	-	-	-1.39E+02	5.00E-12	-
		$a_5$	-3.00E-18	-	-	-	6.19E-02	-2.00E-15	-

〈표 11〉 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	-

〈표 12〉 축직각방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 일단고정-일단자유

구 분	계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
축직각 방향 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	-	-
	F R P 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

〈표 13〉 축직각방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 양단힌지

구 분	계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
축직각 방향 진동	콘크리트관	$a_0$	-1.16E-02	5.00E-03	8.23E-01	-8.59E-01	3.00E+13	-2.65E+01	4.24E-01
		$a_1$	-5.00E-06	1.00E-06	2.70E-03	1.90E-03	-4.00E+10	7.00E-04	3.00E-04
		$a_2$	1.00E-08	2.00E-09	-4.00E-06	-9.00E-06	4.00E+07	2.00E-06	4.00E-07
		$a_3$	-6.00E-12	-4.00E-12	6.00E-08	1.00E-08	1.11E+05	-1.00E-08	-6.00E-10
		$a_4$	-7.00E-17	3.00E-15	-8.00E-11	-5.00E-12	-1.75E+02	1.00E-11	2.00E-13
		$a_5$	6.00E-19	-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	-	
	강 관	$a_0$	-1.08E-02	4.70E-03	3.18E-01	-5.61E-01	1.00E+13	-2.64E+01	4.36E-01
		$a_1$	-6.00E-06	2.00E-06	2.00E-04	-9.00E-04	8.00E+10	1.00E-04	7.00E-05
		$a_2$	1.00E-08	-2.00E-09	5.00E-06	2.00E-06	-3.00E+08	-8.00E-07	4.00E-07
		$a_3$	-6.00E-12	1.00E-12	-2.00E-08	-3.00E-09	4.81E+05	1.00E-09	-3.00E-10
		$a_4$	2.00E-15	-4.00E-16	2.00E-11	2.00E-12	-4.04E+02	-1.00E-12	5.00E-14
		$a_5$	-2.00E-19	6.00E-20	-1.00E-14	-4.00E-16	1.62E-01	4.00E-16	-
	$a_6$	-	-	3.00E-18	-	-3.00E-05	-5.00E-20	-	
	F R P 관	$a_0$	-1.15E-02	5.20E-03	7.09E-01	-7.39E-01	3.00E+13	-2.65E+01	4.70E-01
		$a_1$	-1.00E-05	2.00E-06	-1.20E-03	-1.00E-04	-2.00E+10	1.50E-03	8.00E-05
		$a_2$	2.00E-08	-2.00E-09	3.00E-06	-4.00E-07	-1.00E+06	-5.00E-07	1.00E-07
		$a_3$	-3.00E-11	1.00E-12	-8.00E-10	1.00E-10	1.13E+05	-5.00E-09	-5.00E-11
$a_4$		1.00E-14	-3.00E-16	-	-	-1.39E+02	5.00E-12	-	
$a_5$		-3.00E-18	-	-	-	6.19E-02	-2.00E-15	-	
$a_6$	-	-	-	-	-1.00E-05	3.00E-19	-		

〈표 14〉 축직각방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 양단롤러

구 분	계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
축직각 방향 진동	콘크리트관	$a_0$	3.50E-03	-3.31E+01	-8.87E+00	-4.41E-01	1.38E+01	-4.12E+00	-
		$a_1$	-9.00E-06	-2.56E-02	2.35E-01	3.60E-03	-1.48E-01	2.07E-02	-
		$a_2$	3.00E-08	3.40E-03	-8.00E-04	-8.00E-06	7.00E-04	-5.00E-05	-
		$a_3$	-2.00E-11	-1.00E-05	1.00E-06	3.00E-09	-1.00E-06	2.00E-08	-
		$a_4$	2.00E-15	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	-	-	
	강 관	$a_0$	3.60E-03	5.60E-03	5.28E+00	4.33E-01	4.17E+00	3.35E+00	-
		$a_1$	-2.00E-06	-5.00E-05	-3.76E-02	8.00E-04	-8.23E-02	-1.83E-02	-
		$a_2$	9.00E-09	2.00E-07	1.00E-04	-3.00E-06	3.00E-04	3.00E-05	-
		$a_3$	-2.00E-12	-4.00E-10	-1.00E-07	5.00E-09	-5.00E-07	-1.00E-08	-
		$a_4$	-	4.00E-13	5.00E-11	-2.00E-12	4.00E-10	-	-
		$a_5$	-	-2.00E-16	-6.00E-15	-	-2.00E-13	-	-
	$a_6$	-	3.00E-20	-	-	3.00E-17	-	-	
	F R P 관	$a_0$	2.30E-03	4.38E+01	2.34E+01	-1.42E+00	1.34E+01	-8.40E+00	-
		$a_1$	-6.00E-06	-6.48E-01	-1.44E-01	1.14E-02	-5.85E-02	4.61E-02	-
		$a_2$	9.00E-08	3.00E-03	5.00E-04	-4.00E-05	2.00E-04	-2.00E-04	-
		$a_3$	-1.00E-10	-5.00E-06	-7.00E-07	6.00E-08	-2.00E-07	2.00E-07	-
$a_4$		7.00E-14	4.00E-09	4.00E-10	-3.00E-11	-3.00E-11	-1.00E-10	-	
$a_5$		-1.00E-17	-2.00E-12	-8.00E-14	6.00E-15	9.00E-14	2.00E-14	-	
$a_6$	-	3.00E-16	-	-	-2.00E-17	-	-		

〈표 15〉 축직각방향 진동에서의 다항식 계수  $a_i$ , 일단힌지-일단롤러

구 분	계 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$	
축직각 방향 진동	콘크리트관	$a_0$	7.40E-03	1.19E-01	3.00E+01	-1.46E+00	2.27E+01	-5.25E+00	-
		$a_1$	1.00E-04	-8.00E-04	-1.46E-01	1.26E-02	-1.80E-01	4.53E-02	-
		$a_2$	-2.00E-07	2.00E-06	3.00E-04	-3.00E-05	5.00E-04	-1.00E-04	-
		$a_3$	2.00E-10	-2.00E-09	-3.00E-07	3.00E-08	-7.00E-07	1.00E-07	-
		$a_4$	-9.00E-14	9.00E-13	1.00E-10	-1.00E-11	5.00E-10	-5.00E-11	-
		$a_5$	1.00E-17	-2.00E-16	-2.00E-14	2.00E-15	-2.00E-13	8.00E-15	-
	$a_6$	-	-	-	-	2.00E-17	-	-	
	강 관	$a_0$	-1.66E-02	1.42E-01	3.44E+01	-1.71E+00	2.11E+01	-6.17E+00	-
		$a_1$	4.00E-04	-1.20E-03	-2.18E-01	1.71E-02	-1.69E-01	6.19E-02	-
		$a_2$	-1.00E-06	4.00E-06	7.00E-04	-5.00E-05	5.00E-04	-2.00E-04	-
		$a_3$	2.00E-09	-5.00E-09	-1.00E-06	8.00E-08	-8.00E-07	3.00E-07	-
		$a_4$	-1.00E-12	4.00E-12	1.00E-09	-6.00E-11	7.00E-10	-2.00E-10	-
		$a_5$	4.00E-16	-1.00E-15	-4.00E-13	2.00E-14	-3.00E-13	7.00E-14	-
	$a_6$	-6.00E-20	2.00E-19	6.00E-17	-3.00E-18	4.00E-17	-1.00E-17	-	
	F R P 관	$a_0$	6.28E-02	5.18E+01	3.13E+01	-1.57E+00	2.21E+01	-9.55E+00	-
		$a_1$	-1.00E-06	-5.47E-02	-6.90E-02	4.80E-03	-5.09E-02	1.81E-02	-
		$a_2$	3.00E-10	-2.00E-05	2.00E-04	-1.00E-05	1.00E-04	-5.00E-05	-
		$a_3$	-2.00E-11	4.00E-08	-2.00E-07	2.00E-08	-2.00E-07	6.00E-08	-
$a_4$		4.00E-14	-1.00E-11	8.00E-11	-9.00E-12	7.00E-11	-3.00E-11	-	
$a_5$		-3.00E-17	-	-1.00E-14	1.00E-15	-1.00E-14	5.00E-15	-	
$a_6$	5.00E-21	-	-	-	-	-	-		

### 4. 매설관의 내진성능 평가 예

본장에서는 앞서 수행한 곡선적합식과 계수 값을 이용한 매설관의 내진설계 절차와 방법을 제시한다. 내진설계 절차는 Ogawa 등(2001)이 제안한 방법을 택하여 수행하였다. 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 17에 나타내었다.

매설관 변형률 산정을 위한 절차는 아래에 제시한 방법에 따라 수행된다. 본 예제에서 전파속도(V)는 100m/sec를 적용하였고 주기는 표 16에서와 같이 0.1~10초를 적용하여 변위응답 스펙트럼을 작성하였다.

- 1) 주어진 전파속도(V)에 대해 주기(T) 변수에 따른 파장(λ) 변수를 산정한다.

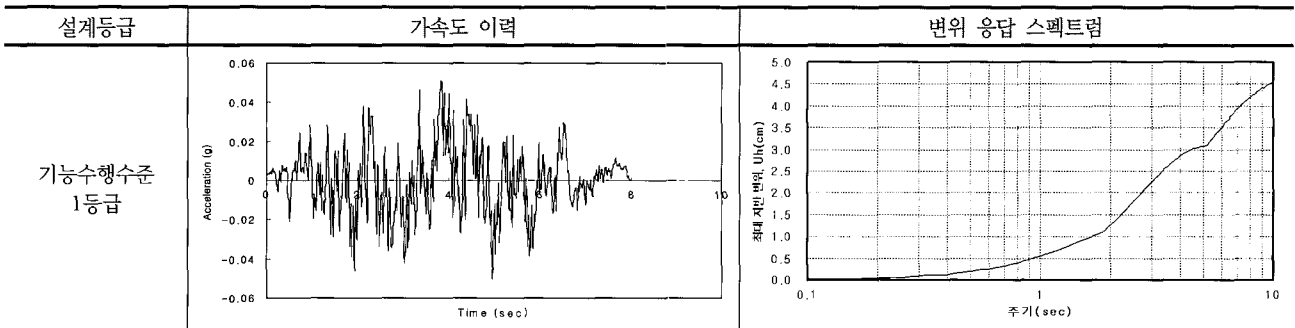
- 2) 단부경계조건과 매설관의 종류에 따라 표 6~표 14에 제시된 계수, a<sub>i</sub>값을 결정한 후 다항식에 대입하여 전파속도함수, m<sub>i</sub>(V)를 구한다.
- 3) 구해진 전파속도함수, m<sub>i</sub>(V)의 값들을 표 4에 제시된 곡선적합 식에 대입한다. 이제 남은 변수는 파장이므로 주기에 따른 파장을 대입하여 단위 변형률(ε<sub>u</sub>)을 산정한다.
- 4) 실제 지진파로 인한 매설관의 변형률(ε<sub>s</sub>)은 주어진 파장(λ)과 이에 상응하는 주기(T)에 대한 변위 응답 스펙트럼의 지반 변위(U<sub>h</sub>)를 구한 후 이 값에 단위 변형률(ε<sub>u</sub>)을 곱함으로써 계산된다. 이는 식 (2)와 같다. 여러 가지 주기에 따른 매설관의 변형률들(ε<sub>s</sub>)이 산정되어지면 그때의 최대 값을 허용변형률과 비교하여 매설관의 내진성능을 평가하게 된다.

$$\epsilon_s = \epsilon_u \times U_h \tag{2}$$

### 5. 결론

이상과 같은 각종 매설관의 동적거동에 대한 곡선적합식의

〈표 16〉 내진성능 평가를 위한 인공지진



〈표 17〉 인공지진에 대한 매설관의 내진성능평가

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



개발에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

**참 고 문 헌**

- (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, FRP 관에 대한 곡선적합식을 개발하였다.
- (2) 전파속도 함수,  $m_1(V)$ 는 100m/sec 간격으로 산정하였으며 간격에 포함되지 않는  $m_1(V)$ 에 대한 다항식 적용을 실시하여 매설관의 종류와 단부 경계조건에 대해 계수 값,  $a_1$ 를 제시하였다.
- (3) 4단계로 이루어진 매설관의 내진성능평가 절차를 제안하였으며 곡선적합식을 사용하여 기능수행수준 1등급 인공지진에 대해 내진성능평가를 수행하였고 콘크리트 관과 강관, FRP관 모두 안정한 것으로 나타났다.

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