

콘크리트 매설관의 동적응답해석에 대한 곡선적합식의 개발

정진호¹⁾, 김성반²⁾, 안명석^{3)*}

Development of Curve Fitted Equation about Dynamic Response Analysis of a Buried Concrete Pipelines

Jin-Ho Jeong, Sung-Ban Kim and Myung-Seok Ahn

Abstract : The objective of this study is to propose curve fitted equations that can facilitate calculations and improve a practical applicability when the seismic performance of buried pipelines needs to be evaluated. The curve fitted equations are derived based on the evaluation of the dynamic responses of concrete pipe with a boundary condition of fixed-free ends. To study the dynamic response of underground pipe, the numerical analysis program developed in the previous research has been used. The location of maximum strain has been determined through dynamic analyses for a boundary condition of fixed-free ends. Then wavelength(λ) of 5-1000(m) and propagation velocity(V_s) of 100-2000(m/s) have been applied at the location of maximum strain and the unit strain curve with the changes of the wavelength(λ) and propagation velocity(V_s) has been obtained. Non-linear least-square regression has been used to develop highly applicable curve fitted equations and various types of exponential regression equations have been checked out. Thus curve fitted equations and necessary coefficients with best results are suggested.

Key words : buried pipelines, fixed-free ends, dynamic response, curve fitted equation

초 록 : 본 연구는 일단고정-일단자유 단부 경계조건을 가진 콘크리트 매설관의 동적응답을 연구하고, 내진성능 평가 시 실용적이고 실무적용성이 높은 곡선 적합식의 개발을 목적으로 한다. 매설관의 동적응답을 연구하기 위해 기존 연구에서 개발된 수치해석 프로그램을 사용하여 일단고정-일단자유 단부 경계조건에 대한 최대변형을 발생지점을 산정한 후, 산정된 지점에 대하여 5-1000(m)의 파장(λ)과 100-2000(m/sec)의 전파속도(V_s)를 적용하여 파장(λ)의 변화와 전파속도(V_s)의 변화에 따른 단위 (휨)변형률 곡선식을 산출하였다. 적합성이 높은 곡선 적합식을 개발하기 위해 비선형 최소자승법을 이용하여 다양한 형태의 지수방정식을 검정한 후, 가장 좋은 결과를 나타내는 곡선 적합식과 필요한 계수 값을 제시 하였다.

핵심어 : 매설관, 경계조건, 일단고정-일단자유, 동적 응답, 곡선 적합식

1. 서 론

1.1 연구배경

지중 매설관으로 불리는 상수관, 오수 및 하수관, 가스관 등은 인간 생활의 근본을 구성한다는

측면에서 라이프라인(lifeline)구조물로 불리워진다. 1990년대 중반 이후, 미국 캘리포니아에서 발생한 Northridge 지진(1994, 지진규모 6.7), 고베지진으로 불리는 Hyogoken-Nanbu 지진(1995, 지진규모 7.2) 이후 라이프라인 구조물의 피해사태 및 라이프라인 구조물의 1차적인 구조적 손상으로 야기되는 2차적 피해의 규모와 그 심각성이 인식되기 시작하면서 라이프라인 구조물에 대한 내진해석의 필요성이 국내외적으로 대두되었다. 특히 국부의 파괴로 전체 기능이 마비되기 때문에 지진발생에 대비한 정확한 해석이 필요하다. 그에 따라 매설관의 설계와 내진성능 평가 시 매설관의 최대변형률

- 1) 부경대학교 교수
- 2) 부경대학교 박사과정
- 3) 동서대학교 겸임교수

* Corresponding author : amspeoff@chol.com

접수일 : 2006년 5월 30일

계재승인일 : 2006년 6월 18일

발생위치산정이 필요하며 그 위치에 대하여 지반 운동 파장을 고려한 변형을 평가가 요구된다.

정진호 등은 일단고정-일단자유 단부경계조건을 가진 콘크리트 매설관에 대하여 자유진동과 강제진동에 대한 수치해석을 통해 변위, (휨)변형을 산정식을 제안하였으며 매설관의 동적응답 수치해석 프로그램을 개발하여 콘크리트 매설관의 변위, 변형률응답을 연구하였다. 본 연구는 콘크리트 매설관에 대하여 수치해석 프로그램을 사용하여 매설관의 동적거동에 관한 연구를 수행하고 일단고정-일단자유 단부 경계조건에 대해 최대변형률이 발생하는 위치를 산정하였다. 최대변형률 발생위치에서 지반운동 파장(λ)에 따른 (휨)변형을 응답해석을 수행하고, 수치해석 프로그램을 통해 구해진 데이터에 대하여 곡선적합을 실시하여 실용성 높은 적합식을 제안하였다.

1.2 국내의 연구동향

EERI(Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley)가 간행한 예비조사 보고서는 지진발생 지역에서의 매설관의 손상에 대한 기본 자료를 포함하고 있으며, Novak 등은 지반의 강성은 지반의 전단계수, 포아송비, 재료감쇠, 진동수 그리고 지반의 전단파 속도에 의해 결정된다고 하였다(Hindy & Novak, 1979). El Hmadi 등은 과거 조사(해석, 실내시험, 현장시험)에 따르면 스프링 상수는 보통 전단계수의 1~3배라고 발표한 바 있으며 Colton은 과거 실내 시험을 바탕으로 스프링 상수를 역산하여 전단계수의 1.57-1.70배가 된다고 발표한 바 있다.

매설관 해석을 위해 가장 간단하고 많이 사용되는 모델은 Sakurai 등에 의해 적용되었고 이 모델을 바탕으로 지반-매설관 상대변위는 지반강성에 따라 감소하며 휨변형률에 대한 축방향 변형률비는 매설관의 직경이 커짐에 따라 감소하고 터널과 같이 직경이 큰 매설관의 경우 휨변형률이 고려되어야 한다고 하였다. Nishio는 Sakurai 등이 사용했던 것과 유사한 모델을 사용했으며 단성기초 위의 모모델을 사용하였다(Sakurai & Takahashi, 1969).

국내의 매설관의 거동에 관한 연구는 영구지반변형에 대한 연구가 지배적이다(안명석외, 2004). 영구지반변형이 발생하는 지역에 위치한 라이프라인 구조물은 주변지반으로 부터의 모든 지지력을

상실하게 되고 결과적으로 영구지반변형이 발생하지 않는 지역에 매설된 경우보다 더 높은 파손율을 나타내게 된다는 사실이 많은 사례조사를 통해 언급되어 왔다(구본근, 2001).

김태옥은 횡방향 영구지반변형이 발생함에 따라 수반되는 지반 강성의 감소 및 지반의 감쇠특성 등을 고려하여 연속된 매설관망에 대한 동적 거동 특성을 고찰하였다(김태옥, 1999).

최근에는 매설관로의 거동을 파악하기 위하여 지반의 액상화과정에 따른 동적토압 및 수압계수, 감쇠계수 및 동적지반계수 등을 사용하여 비선형 운동 방정식을 작성하여 맨홀이 있는 매설관의 동적 비선형거동해석을 하였으며, 원자력발전소 부지내 지하매설관을 대상으로 Newmark 시간적분법을 이용하여 지반특성에 대한 매설관의 내진해석을 수행하여 파이프와 주변 흙의 분리가 일어나지 않는다면 파이프는 일반적인 지반조건하에서 지반의 변형과 거의 일치하고 지반이 약할수록 상호작용의 효과가 커짐을 나타내었다(정성원, 1993).

그리고 일단고정-일단자유 단부경계조건을 가진 콘크리트 매설관의 동적응답에 미치는 영향에 대한 규명과 관의 동적응답에 영향을 주는 매개변수들의 영향에 대해 규명을 위하여 수치해석을 통한 변위, (휨)변형을 산정식을 제안하였다(정진호 외, 2005).

2. 매설관의 동적응답

2.1 매설관의 변위 및 (휨)변형률 산정식

매설관의 동적응답 해석을 수행하기 위하여 Clough 등이 제시한 자유진동을 통해 모드형상과 고유진동수를 결정한 후, 이를 이용하여 강제진동시 발생 가능한 매설관의 축방향 및 축직각방향에 대하여 변위, 변형률 및 휨변형률 산정식을 유도한 결과는 표 1과 같다(Clough et al, 1975).

2.2 콘크리트 매설관

콘크리트 매설관은 국내에서 상수 및 하수관으로 사용되고 있으며 강관과 FRP관에 비해 연성이 약하고 취성이 강하여 허용 변형률이 상대적으로 작은 값을 가진다. 지진에 의한 매설관의 파괴 시 국부적인 파괴가 전체 매설관망의 파괴로 이어질 수 있으며 특히 상·하수도관의 파괴는 화재와 전염병 피해를 일으키는 원인이 된다. 예를 들어 1906년 San Francisco 지진의 경우 4.7평방마일에

표 1. 일단고정-일단자유 경계조건에 대한 변위 및 (휨)변형률 산정식

축방향 강제진동	변위	$v_A(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	변형률	$\varepsilon_A(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)\pi}{2L} \cos \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
축직각방향 강제진동	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	$\varepsilon_T(y, t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$

여기서, $v_A(y, t)$: 축방향 변위

$\varepsilon_A(y, t)$: 축방향 변형률

$w_T(y, t)$: 축직각방향 변위

$\varepsilon_T(y, t)$: 축직각방향 변형률

y : 해석지점

t : 지진파 적용 시간

L : 매설관의 길이

D : 매설관의 직경

k : 축방향 모드수

k : 축방향 모드수

β_k : 축직각방향 모드에 따른 해석 값

$q_k(t)$: 시간만의 함수로서 일반화된 좌표

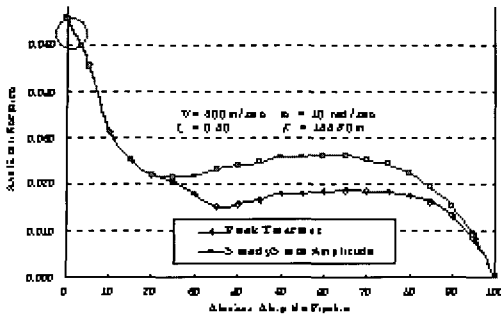
달하는 피해지역의 재산손실 중 80%가 화재로 인한 것이고 물의 부족으로 말미암아 전염병 등에 의한 인명피해도 막심하여 사망이 700명, 재산손실은 약 4억 달러에 달했으며, 일본의 경우 1923년 지진에서 동경시의 35%가 화재로 인해 파손되었고, 1979년 San Fernando 지진, 1985년 Mexico City 지진, 1995년 Hygoken-Nanbu 지진 등에서 매설관의 파괴로 인한 피해사례를 확인 할 수 있다. 본 연구에 사용된 매설관은 Larbi에 의해 해석된 콘크리트 매설관을 대상으로 수행하였으며, 표 2는 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성 및 해석지반의 축방향 및 축직각 방향 지반강성을 나타내고 있다(Larbi, 1995).

2.3 매설관의 지점 위치별 (휨)변형률응답

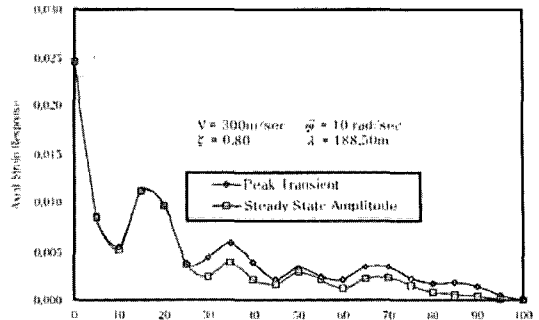
매설관의 최대 변형률 발생위치 산정을 위해 일단고정-일단자유 경계조건을 가진 콘크리트 매설관에 대한 하중으로 전파속도(V_s), 300m/sec와 지반진동수(ω), 10rad/sec인 경우를 적용하여 해석하였다. 이때 적용된 감쇠비(ζ)는 80%이며 과장(λ)은 188.50m이다. 그림 1에서 나타난 바와 같이 일단고정-일단자유 경계조건에서는 지진파가 매설관의 전장을 통과하기 전인 일시적 응답과 매설관의 전장을 통과한 후인 정상상태 응답 모두 고정단인 좌측끝단(L=0m)에서 최대 변형률과 최대 휨변형률을 나타내었으며 자유단인 우측끝단에서는 변형률이 발생하지 않았다.

표 2. 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성

기하학적 특성	길이(L)	100 m	재료적 특성	탄성계수(E_p)	2.07×10^{10} N/m ²
	평균반경(R)	1 m		관성모멘트(I)	0.47389 m ⁴
	두께(t)	15 cm		단위체적당 질량(ρ)	2.2×10^3 kg/m
	횡단면적(A)	0.94248 m ²		단위길이당 질량(m)	2.0735×10^3 kg/m
축방향 지반강성(K_A)		9.34×10^7 N/m/m	축직각방 지반강성(K_T)		14.01×10^7 N/m/m



(a) 축 방향



(b) 축 직각 방향

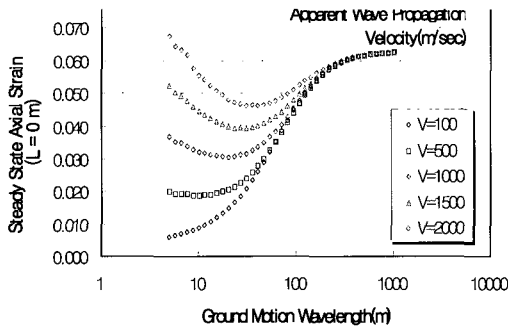
그림 1. 매설관의 지점 위치별 (휨)변형률 응답.

2.4 지반운동 파장의 영향

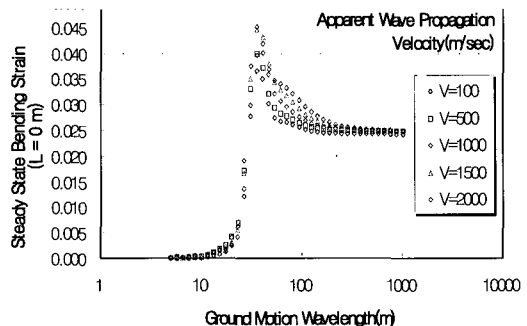
본 절에서는 2.3절에서 산정된 최대 변형률 발생 지점에 대하여 전파속도(V_s)와 지반진동수($\bar{\omega}$)의 조합된 영향을 파장($\lambda = 2\pi V / \bar{\omega}$)의 관점에서 고려하였다. 주어진 전파속도(V_s)에 대한 파장(λ)의 변화는 곧 지반진동수($\bar{\omega}$)의 변화를 의미하며 지반진동수($\bar{\omega}$)는 매설관의 (휨)변형률 산정에 중요한 변수가 된다. 따라서 (휨)변형률 산정을 위한 매개변수로서 파장(λ)과 전파속도(V_s)를 이용하여 동적거동을 나타내고 저 한다. 지진시 발생 가능한 전파속도($\bar{\omega}$)와 지반운동(λ)의 다양한 범위를 해석하기 위해, 넓은 범위의 파장(5m-1km)과 100, 500, 1000, 1500, 2000(m/s)의 겉보기 전파속도(V_s)를 고려하여 매설관의 (휨)변형률을 산정하였다.

그림 2에서 최대 변형률을 발생시키는 파장(λ)을 임계파장이라고 정의하면 임계파장보다 더 큰 파장에 대해서 변형률은 결국 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 이로부터 전파속도(V_s)가 클수록 변형률은 크게 발생되므로 전파속도의 영향이 대단히 크다는 것을 알 수 있다.

축방향 변형률의 경우 1,000m 전후의 파장에서 임계파장을 나타내며 축직각방향 휨변형률의 경우 파장 50m 전, 후로 최대 변형률을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 일단고정-일단자유 단부경계조건을 가진 콘크리트 매설관의 내진성능평가 시 축방향 강제진동에서는 1,000m 이상의 파장범위를 고려하여 해석하여야 하며 축직각방향 강제진동 시에는 100m 정도의 파장범위를 고려해도 무리가 없는 것으로 판단된다.



(a) 축방향 강제진동



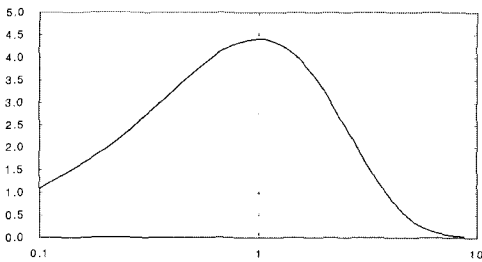
(b) 축직각방향 강제진동

그림 2. 지반운동 파장의 영향.

3. 곡선 적합식의 개발

그림 3에 나타낸 지수방정식 곡선은 본 연구에서 나타낸 파장(λ)에 따른 (휨)변형률 곡선의 기본형으로서 그림 2에 나타낸 파장(λ)에 따른 (휨)변형률 곡선과 같이 파장(λ)의 증가에 따라 상승 또는 하강한 후 일정한 값으로 수렴하는 형태를 가진다. 이러한 데이터를 곡선적합이라고 하는데 사용가능한 지수방정식은 $y=Cxe^{-Dx}$ 로서 이때 $C, D > 0$ 이다. 비선형 최소자승법(nonlinear least-square regression)을 이용하여 가장 좋은 결과를 주는 곡선적합식을 시행착오법을 통해 결정하였다.

곡선적합을 수행하기 위해 100-2000(m/s)의 겉보기 전파속도(V_s)를 적용하여 (휨)변형률 곡선이 측정되었으며 측정간격은 100m/s이다. 적용된 파장(λ)의 범위는 5-1000(m)이다. 적용파장(λ)의 범위를 1000m 까지로 국한한 것은 1000m 이후 파장(λ)에서는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 임계파장을 지나 (휨)변형률 값이 일정한 값으로 수렴하기 때문이다.



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

그림 3. 지수방정식 형태.

3.1 곡선적합 방정식

비선형 최소자승법을 이용하여 다양한 형태의 지수방정식을 검정한 후, 가장 좋은 결과를 나타내는 방정식이 적용되었다. 축방향 변형률과 축직각 방향 휨변형률에 대한 적합곡선식은 각각 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$Y = m_1(V) + m_2(V) \exp(-\ln \lambda) + m_3(V) (\ln \lambda)^{m_4(V)} \exp[-m_5(V) (\ln \lambda)^{m_6(V)} - m_7(V) (\ln \lambda)] \quad (1)$$

$$Y = m_1(V) + m_2(V) (\ln \lambda) + m_3(\ln \lambda)^{m_4(V)} \exp[-m_5(V) (\ln \lambda)^{m_6(V)} - m_7(V) (\ln \lambda)] \quad (2)$$

여기서, λ : 입력 거동의 파장

$m_i(V)$: 파의 전파속도 함수

위 식에서 각각의 상수(m_i)는 전파속도(V_s)에 따라 변화하며 이 값들을 나타내면 표 3 및 표 4와 같다. 결국 (휨)변형률을 구하기 위한 변수는 파장(λ)이므로 설계자가 내진성능평가를 위한 전파속도(V_s)를 선택하고 전파방향을 결정한 후 그 때의 상수(m_i)를 선택하여 식 (1), (2)에 대입하고 요구되는 파장범위를 대입하면 (휨)변형률을 산정할 수 있다.

그림 4는 수치해석을 통해 구해진 (휨)변형률 데이터를 도형으로 표시하고 곡선적합식을 이용한 곡선을 실선으로 표시하였다. 이것은 콘크리트 매설관의 축방향 일단고정-일단자유 경계조건에 대하여 전파속도(V_s) 500m/s와 2,000m/s에 대하여 곡선적합을 수행하고 그 형태를 나타낸 것이다. 곡선의 형태는 전파속도(V_s)가 변할 때 오직 상수(m_i)만 변화하는 형태이다. 결국 각각의 상수(m_i)는 전파속도(V_s)에 대비하여 결정된다. 이와 같이 획득된 전파속도(V_s)에 대한 상수(m_i)는 다항식 곡선을 통해 정리하였다. 이때 다항식 곡선의 차수결정은 전파속도(V_s)에 대한 곡선의 이산정도에 따라 결정된다. 다항식에서 얻어진 계수(a_i)를 변형률 방정식에 대입하게 되면 변형률에 대한 일반적인 방정식은 오직 두 개의 변수로 표현된다. 즉 전파속도(V_s)와 파장(λ)이다. 그 외에 해석위치, 전파방향, 매설관의 입력치, 지반진동수(ω)와 같은 변수들은

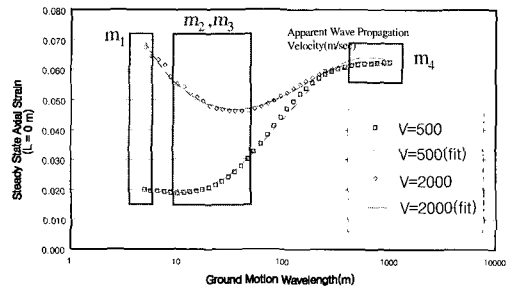


그림 4. 축방향 일단고정-일단자유 경계조건에서의 곡선적합식.

표 3. 축방향 강제진동에서의 전파속도 함수, $m_i(V)$ 값

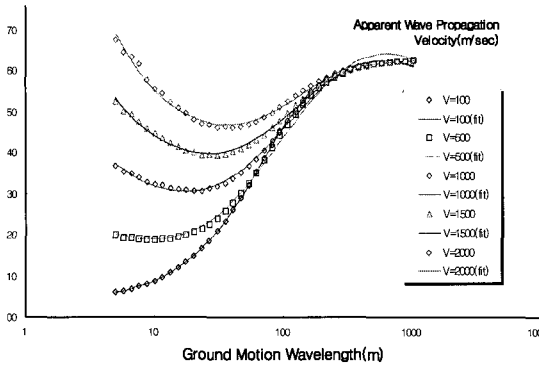
V (m/sec)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
m1	1.006E-02	1.206E-02	1.406E-02	1.506E-02	1.656E-02	1.706E-02	1.948E-02	2.184E-02	2.398E-02	2.599E-02
m2	-1.926E-02	-1.256E-02	-4.256E-04	-4.256E-04	1.803E-02	3.426E-02	3.940E-02	4.426E-02	5.029E-02	5.645E-02
m3	1.032E-06	1.030E-06	1.030E-06	1.030E-06	9.083E-07	7.243E-07	5.807E-07	3.173E-07	1.799E-07	1.086E-07
m4	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
m5	-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
m6	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
m7	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
m1	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
m2	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
m3	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
m4	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
m5	-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
m6	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
m7	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 4. 축직각방향 강제진동에서의 전파속도 함수, $m_i(V)$ 값

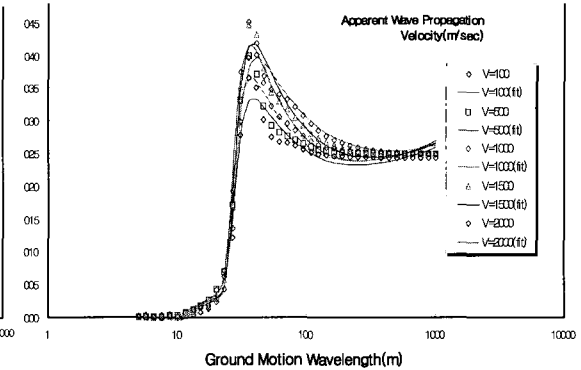
V (m/sec)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
m1	-1.232E-02	-1.225E-02	-1.214E-02	-1.204E-02	-1.202E-02	-1.210E-02	-1.220E-02	-1.239E-02	-1.255E-02	-1.271E-02
m2	5.151E-03	5.176E-03	5.190E-03	5.211E-03	5.245E-03	5.295E-03	5.329E-03	5.381E-03	5.413E-03	5.428E-03
m3	7.613E-01	6.680E-01	7.560E-01	9.171E-01	1.114E+00	1.300E+00	1.575E+00	1.830E+00	2.018E+00	2.105E+00
m4	-9.221E-01	-9.027E-01	-9.589E-01	-1.087E+00	-1.178E+00	-1.189E+00	-1.307E+00	-1.350E+00	-1.371E+00	-1.381E+00
m5	2.341E+13	2.143E+13	2.141E+13	2.101E+13	2.267E+13	2.402E+13	2.420E+13	2.377E+13	2.411E+13	2.609E+13
m6	-2.561E+01	-2.559E+01	-2.570E+01	-2.570E+01	-2.574E+01	-2.580E+01	-2.588E+01	-2.577E+01	-2.576E+01	-2.581E+01
m7	5.628E-01	5.431E-01	5.434E-01	5.449E-01	5.583E-01	5.770E-01	5.895E-01	6.057E-01	6.164E-01	6.170E-01
V (m/sec)	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
m1	-1.276E-02	-1.291E-02	-1.293E-02	-1.292E-02	-1.288E-02	-1.271E-02	-1.249E-02	-1.222E-02	-1.207E-02	-1.156E-02
m2	5.403E-03	5.417E-03	5.357E-03	5.327E-03	5.270E-03	5.159E-03	5.050E-03	4.922E-03	4.835E-03	4.772E-03
m3	2.034E+00	2.012E+00	1.793E+00	1.611E+00	1.381E+00	1.130E+00	9.180E-01	7.670E-01	6.377E-01	5.335E-01
m4	-1.378E+00	-1.316E+00	-1.279E+00	-1.189E+00	-1.089E+00	-1.021E+00	-9.155E-01	-8.456E-01	-6.983E-01	-5.585E-01
m5	2.728E+13	2.713E+13	2.912E+13	2.835E+13	2.614E+13	2.479E+13	2.228E+13	1.388E+13	5.249E+12	2.168E+12
m6	-2.583E+01	-2.574E+01	-2.584E+01	-2.581E+01	-2.566E+01	-2.564E+01	-2.559E+01	-2.518E+01	-2.428E+01	-2.355E+01
m7	6.189E-01	6.169E-01	5.969E-01	5.967E-01	5.892E-01	5.602E-01	5.438E-01	5.210E-01	5.240E-01	5.260E-01

이미 해석과정에서 사용되었으므로 고정된 값이다. 여기서 상수 m_1 는 곡선의 좌측 끝단의 상승과 하강을 결정하며 상수, m_2 와 m_3 는 곡선의 휨 정도를 결정하고 상수, m_4 는 입계과장 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 값은 전파속도(V_s)에 따라 달라지므로 전파속도 함수 $m_i(V)$ 로 정의된다

그림 5는 축방향 및 축직각방향 강제진동에 대해 수치해석 프로그램을 통해 구해진 데이터와 곡선적합식을 이용한 데이터를 중첩하여 표시하였다. 상관계수는 평균 0.98 이상의 높은 적합성을 나타내었으며, 도출된 곡선적합식의 적용범위는 길이 100m의 원형 콘크리트 매설관, 지반강성고정, 일단고정 및 다단자유의 경계조건에 한정된 것이다.



(a) 축방향 강제진동



(b) 축직각방향 강제진동

그림 5. 전파방향에 따른 적합곡선.

3.2 다항식 적합

표 3 및 4와 같이 전파속도(V_s)는 100m/s 간격으로 곡선적합을 수행하였으므로 간격에 포함되지 않는 전파속도(V_s)에 대하여 다항식 적합이 필요하다. 그림 6과 그림 7은 표 3의 값 중 m_2 와 m_3 에 대한 다항식 적합 곡선을 나타낸 그림이다. 전파속도 함수, $m_i(V)$ 는 오직 전파속도(V_s)에 따라 변하기 때문에 다항식 적합의 차수는 곡선이 직선에 가까울수록 낮아지며 비선형성이 복잡해질수록 높아진다. 식 (3)은 전파속도 함수, $m_i(V)$ 를 나타낸 식이다.

$$m_i(V) = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \dots + a_n V^n \quad (3)$$

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

적절한 a_i 계수를 선택한다면 곡선의 형상을 정의하는 전파속도 함수, $m_i(V)$ 를 결정할 수 있으며 또한 임의의 속도(V_s)에 대한 $m_i(V)$ 도 결정할 수 있게 된다. 표 5는 파의 입사각을 나타내는 전파방향에 따른 계수 a_i 의 값을 나타내었다.

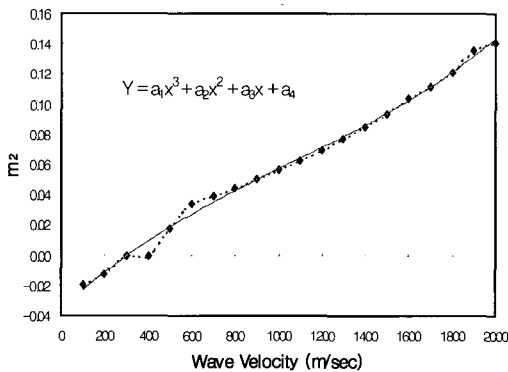


그림 6. m_2 에 대한 다항식 적합곡선.

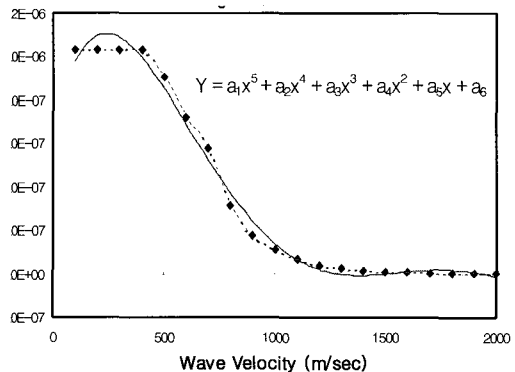


그림 7. m_3 에 대한 다항식 적합곡선.

표 5. 전파방향에 따른 계수 (a_j)

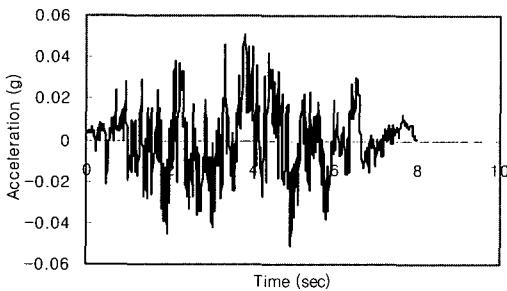
전파방향	상 수	$m_1(V)$	$m_2(V)$	$m_3(V)$	$m_4(V)$	$m_5(V)$	$m_6(V)$	$m_7(V)$
축방향 강제진동	a_0	9.50E-03	-3.57E-02	7.00E-07	1.13E+01	-1.16E+00	-1.13E-02	1.75E+00
	a_1	1.00E-05	1.00E-04	4.00E-09	-1.50E-03	-2.00E-04	2.00E-04	-4.00E-04
	a_2	1.00E-08	-6.00E-08	-1.00E-11	-1.00E-06	7.00E-07	-4.00E-07	1.00E-06
	a_3	-3.00E-12	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	-
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	-

4. 적합곡선식을 이용한 내진성능 평가 예

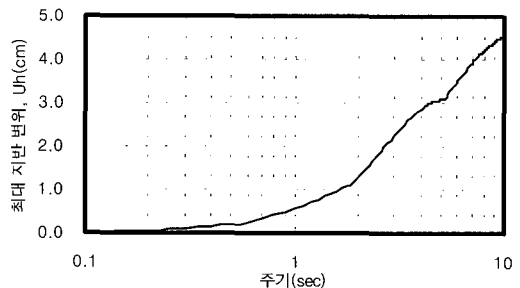
본 장에서는 적합곡선식을 이용한 콘크리트 매설관의 내진성능평가 예를 나타내었다. 지중구조물의 내진성능평가는 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 나누어지며 성능목표는 재현주기가 50년부터 2400년까지 각각 내진 1등급, 내진 2등급, 내진 특등급으로 나누어 설계되고 있다. 본 연구에서는 기능수행수준 1등급과 2등급에 대하여 내진성능평가 예를 나타내었고 붕괴방지수준과 기타 성능목표에 따라 설계하고자 할 때에는 설계순서를 따

라 평가되어야 할 것이다. 또한 전단파속도와 주기의 결정은 각 현장상황에 알맞게 고려하여 매설관의 내진성능평가가 이루어 져야 한다.

본 예에서는 일단고정-일단자유 단부경계조건을 가진 콘크리트 매설관의 내진성능 평가를 위해 인공지진 생성 프로그램인 SIMQKE를 사용하여 기능수행수준 1등급과 2등급 인공지진을 생성한 후 변위 응답스펙트럼을 구하였다. 인공지진 생성 시 지역계수는 1구역으로 설정하였으며 위험도 계수는 각각 100년 주기와 50년 주기로 설정하여 생성하였다. 그림 8 및 9에서는 시간 8초에 대해 0.02

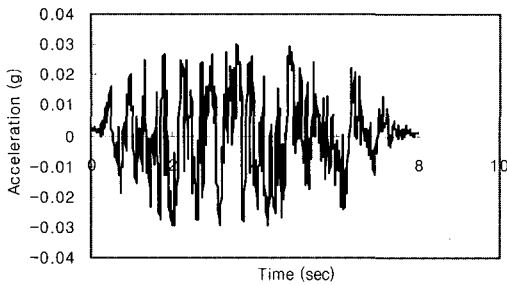


(a) 가속도 이력

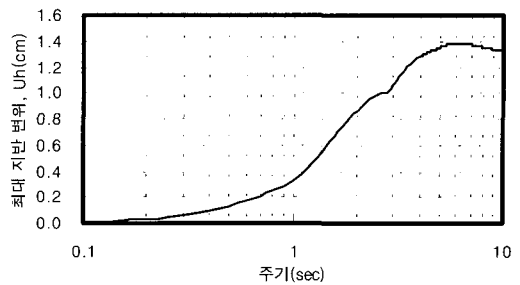


(b) 변위 응답 스펙트럼

그림 8. 기능 수행수준 1등급에 대한 인공지진.



(a) 가속도 이력



(b) 변위 응답 스펙트럼

그림 9. 기능 수행수준 2등급에 대한 인공지진.

초씩 기록된 인공지진기록 데이터 400개 이용하여 응답스펙트럼을 구하였다. 응답스펙트럼이란 특정 방향의 지반운동을 받고 있는 구조물의 최대응답을 구조물의 고유진동수(혹은 고유주기)별로 그려 놓은 것이다.

응답스펙트럼 주기(T), 10초에 대해서 적용 전파속도(V_s)는 100m/s로 하였으며 이때의 파장(λ)은 1000m이다. 파장(λ)에 따른 변형률 및 휨변형률 곡선은 표. 9에 나타낸 a_i 값을 식 (3)에 대입한 후 추출된 $m_i(V)$ 값을 각각 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 구할 수 있다. 실제 지진파로 인한 매설관의 변형률(ϵ_s)은 주어진 파장(λ)과 이에 상응하는 주기(T)에 대한 변위 응답 스펙트럼의 지반 변위(U_h)를 구한 후 이 값에 곡선적합식을 통해 구해진 단위 변형률(ϵ_u)을 곱함으로써 계산된다($\epsilon_s = \epsilon_u \times U_h$). 각 주기에 따른 매설관의 변형률들(ϵ_s)이 산정되어지면 그때의 최대 값을 허용변형률과 비교하여 매설관의 내진성능을 평가하게 된다.

그림 10은 수치해석 프로그램을 사용하여 콘크리트 매설관의 (휨)변형률을 산정하는 순서도를 나타내었으며 그림 11은 곡선적합식을 통해 콘크리

트 매설관의 (휨)변형률을 산정하는 순서도이다. 순서도에서 알 수 있듯이 수치해석 프로그램을 사용 시 프로그램 연산과정과 속도도가 요구되지만 곡선적합식을 사용 시에는 설계자의 몇 가지 선택 과정과 대입과정만으로도 손쉽게 매설관의 내진성능평가를 할 수 있다.

내진성능 평가의 기준은 변형률에 대해 평가하였다. 콘크리트관의 허용 변형률 산정은 축방향 변형률의 경우 한국 가스공사에서 제시한 내진설계 세부 기술기준 중 직선배관의 허용 변형률 산정식을 이용하였다.

제안된 식은 아래와 같으며 두 값중 작은 값을 택한다.

1) 1 % (0.01)

2) 30 t/D (%)

여기서, t = 배관의 두께(cm)

D = 배관의 외경(cm)

축직각방향 휨변형률의 경우 콘크리트의 극한 변형률을 검토에 적용하였다. 표 6은 각각의 허용 변형률에 대한 축방향 변형률 및 축직각방향 휨 변형률을 평가한 것이다.

표 6. 콘크리트 매설관의 내진성능평가

설계등급	전파방향	최대 변형률 및 휨변형률	허용변형률	내진성능평가
				변형률
기능수행수준 1등급	축방향	3.762×10^{-3}	1.000×10^{-2}	안정
	축직각 방향	1.178×10^{-3}	3.000×10^{-3}	안정
기능수행수준 2등급	축방향	1.145×10^{-3}	1.000×10^{-2}	안정
	축직각 방향	3.436×10^{-4}	3.000×10^{-3}	안정

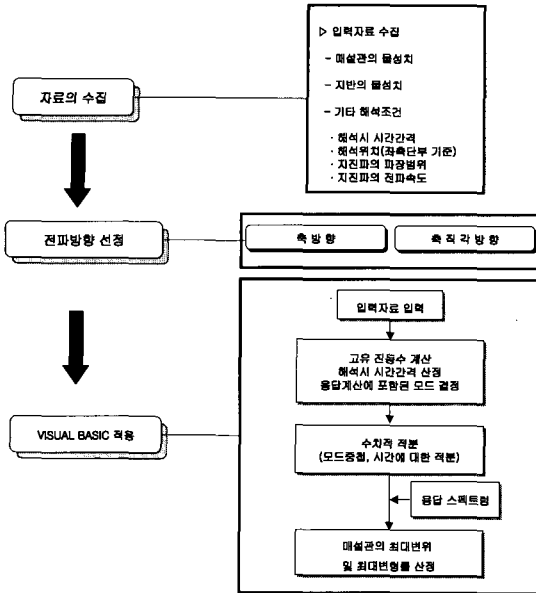


그림 10. 수치해석 프로그램 순서도.

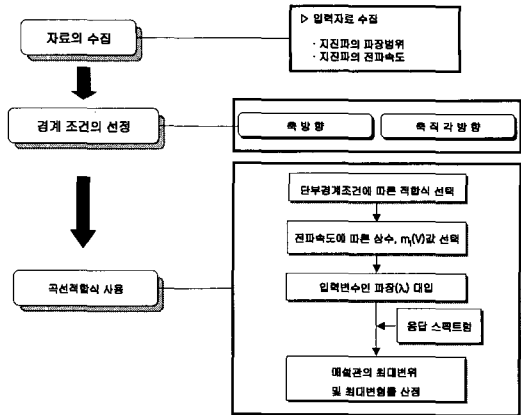


그림 11. 곡선적합식의 사용 순서도.

5. 결 론

본 연구에서는 매설관의 동적응답 수치해석 프로그램을 사용한 매설관의 내진성능 평가 수행 시 수식의 이해와 프로그램에 대한 숙련도가 요구되고 반복연산을 요구하는 수치해석 프로그램의 특성상 많은 시간을 필요로 하는 문제점을 보완하여 매설관의 내진성능 평가 시 실무적용성과 실용성을 높이기 위해 수치해석 프로그램을 통해 구해진 파장에 따른 변형률 및 휨변형률 곡선에 대하여 비선형 최소 자승법(method of nonlinear least square)을 이용한 곡선적합을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) 일단고정-일단자유 경계조건에서는 고정단인 좌측끝단(L=0m)에서 최대 변형률과 최대 휨변형률을 나타내었으며 자유단인 우측끝단에서는 변형률이 발생하지 않았다.

2) 최대 (휨)변형률 발생지점에 대해 지반운동 파장(λ)에 대한 영향을 검토 하였으며 콘크리트 매설관의 내진성능 평가 시, 축방향 강제진동에서는 1,000m 이상의 파장범위를 고려하여 해석하여야 하며 축직각방향 강제진동 시에는 100m 정도의 파장범위를 고려해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

3) 수치해석 프로그램을 통해 구해진 파장(λ)에 따른 매설관의 변형률 및 휨변형률 곡선에 대해 지수방정식의 곡선 형태를 기본형으로 하여 비선형 최소 자승법을 이용하여 상관계수가 평균 0.98 이상의 곡선적합식을 개발하고 전파속도 함수 $m_i(V)$ 값을 제한하였으며, 기능수행수준 1, 2등급 인공지진에 대해 내진성능평가 예를 수행하고 해석결과를 나타내었다.

4) 산정된 곡선적합식에 필요한 전파속도 함수 $m_i(V)$ 는 100m/s의 간격으로 전파속도(V_s) 100-2000(m/s) 사이에서 측정되었고 간격에 포함되지 않는 $m_i(V)$ 에 대해서는 다항식 적합을 실시하여 계수 값 a_i 를 제한하였으며, 향후 미비점 및 발전사항은 계속 연구 노력할 것입니다.

참고문헌

1. 구본근, 2001, 영구지반변형에 대한 지중 매설관의 합리적인 해석 모형에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교, 서울.
2. 김병호, 2005, 발파진동에 대한 가스관의 진동응답 측정기법에 관한 연구, 석사학위논문, 전남대학교, 광주.

3. 김태욱, 1999, 횡영구지반변형에 의한 라이프라인 구조물의 동적 거동 해석, 석사학위논문, 연세대학교, 서울.

4. 안명석, 이병길, 정진호, 장봉현, 2004, 양단자유 경계조건을 가진 매설관의 동적거동에서 진동안전 기준에 관한 연구, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 22, No. 3, pp. 13-26.

5. 정성원, 1993, 원자력발전소 부지내 지하매설관의 지반특성에 대한 내진해석, 석사학위논문, 서울대학교, 서울.

6. 정진호, 이병길, 신준용, 장봉현, 박병호, 2005, 일단고정-일단자유 경계조건을 가진 매설관의 동적거동에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 25, No. 1C, pp. 15-25.

7. 정진호, 이병길, 정두희, 박병호, 2005, 단부경계조건을 고려한 매설관의 동적응답 해석, 한국지반공학회논문집, Vol. 21, No. 5, pp. 33-43.

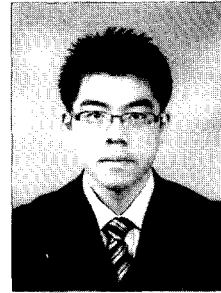
8. Clough, R. W. and J. Penzien, 1975, Dynamics of Structures, MacGraw Hill Book Company, New York, pp. 293-327.

9. Hindy, A. and M. Novak, 1979, Earthquake Response of Underground Pipelines, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, pp. 451-476.

10. Sakurai, A. and T. Takahashi, 1969, Dynamic Stresses of Underground Pipelines During

Earthquake, Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, pp. 81-95.

11. Larbi, A., 1995, Earthquake Resistance of Buried Pipelines, Ph.D Thesis, University of Drexel, Ahn Arbor, Michigan, 205p.



김 성 반

2004년 부경대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2006년 부경대학교 대학원 토목공학과 공학석사

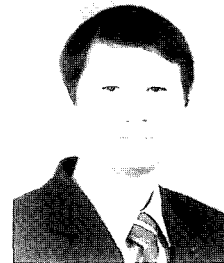
현재 부경대학교 공과대학 대학원 박사과정
(E-mail : ban1579@nate.com)



정 진 호

1983년 인하대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1985년 인하대학교 대학원 토목공학과 공학석사
1994년 인하대학교 대학원 토목공학과 공학박사

현재 부경대학교 공과대학교 토목공학과 교수
(E-mail : geojh@pknu.ac.kr)



안 명 석

1985년 서울산업대학교 환경공학과 공학사
2000년 동아대학교 대학원 지구환경공학부 공학박사

현재 동서대학교 응용생명/건설공학부 겸임교수
(E-mail : amspeoff@chol.com)