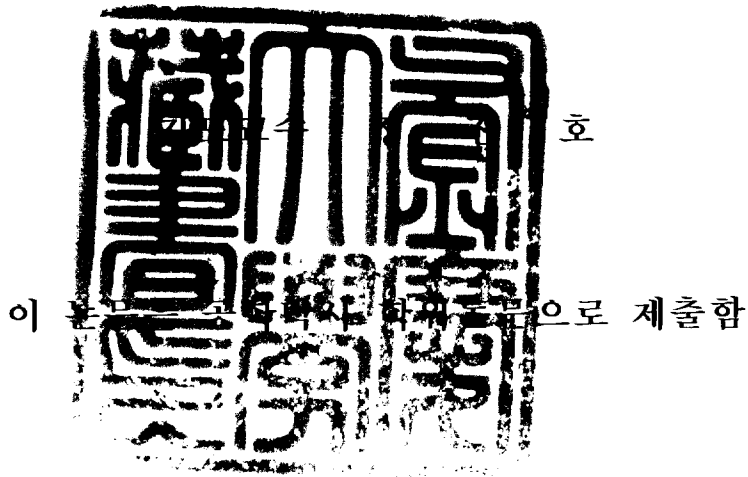


공 학 박 사 학 위 논 문

단부 경계조건을 고려한 매설관의
동적응답 해석



2005년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

이 병 길

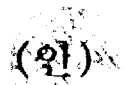
이병길의 공학박사 학위논문을 인준함

2004년 12월 23일

주 심 공 학 박 사 김 명 모



위 원 공 학 박 사 김 진 만



위 원 공 학 박 사 김 윤 태



위 원 공 학 박 사 국 승 규



위 원 공 학 박 사 정 진 호



목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vii
List of Symbols	ix
Abstract	x
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	4
1.2.1 국외 연구동향	4
1.2.2 국내 연구동향	8
1.3 연구방법 및 범위	9
제 2 장 매설관의 자유진동 거동	10
2.1 축방향의 자유진동	10
2.2 축직각방향의 자유진동	16
2.3 고유진동수의 매개변수 영향	23
2.3.1 지반강성의 영향	25
2.3.2 매설관의 탄성계수 영향	25
2.3.3 매설관의 질량 영향	26
2.3.4 매설관의 횡단면적 및 관성모멘트의 영향	26
2.3.5 매설관의 길이 영향	27

제 3 장 매설관의 강제진동 거동	33
3.1 지반운동	33
3.2 강제진동 수식전개	36
3.2.1 축방향 강제진동	36
3.2.2 축직각방향 강제진동	44
제 4 장 매설관의 동적응답	51
4.1 ADRP 매설관 동적해석 프로그램	51
4.2 해석결과의 검증	58
4.2.1 Ogawa 등(2001)의 제안식	58
4.2.1.1 최대 지반 변형률	58
4.2.1.2 매설관의 축방향 변형률	58
4.2.2 해석결과의 비교	59
4.2.2.1 축방향 변형률 및 응력 비교	63
4.2.2.2 축직각방향 휨변형률 및 휨응력 비교	65
4.3 매설관의 동적 변위응답	67
4.3.1 일시적 변위응답	67
4.3.2 정상상태 변위응답	68
4.4 매설관의 동적 변형률응답	75
4.4.1 축방향 변형률응답	75
4.4.2 축직각방향 휨변형률응답	75
4.5 수치해석 결과의 정확성 인자	79
4.5.1 모드수의 영향	79
4.5.2 적분시간간격의 영향	85

4.6 매설관의 지점위치별 변위와 변형률응답	87
4.6.1 지점위치별 변위응답	87
4.6.2 지점위치별 변형률응답	92
제 5 장 동적해석 매개변수 연구	97
5.1 지반-구조물 상호작용 감쇠에 의한 영향	97
5.1.1 축방향에서의 감쇠 영향	97
5.1.2 축직각방향에서의 감쇠 영향	99
5.2 지반운동 파장의 영향	103
제 6 장 결 론	106
참 고 문 헌	109
APPENDIX	117

List of Tables

Table 2.1	Mode Shape and Natural Frequency with Boundary Conditions in Axial Vibration	14
Table 2.2	First Four Mode Shapes with Boundary Conditions in Axial Vibration	15
Table 2.3	Mode Shape and Natural Frequency with Boundary Conditions in Transverse Vibration	21
Table 2.4	First Four Mode Shapes with Boundary Conditions in Transverse Vibration	22
Table 2.5	The Geometric and Material Properties of the Pipeline and Soil Properties (Larbi, 1995)	23
Table 2.6	Variation of the Natural Frequency with the Soil's Stiffness	28
Table 2.7	Variation of the Natural Frequency with the Modulus of Elasticity of the Pipeline Material	29
Table 2.8	Variation of the Natural Frequency with the Unit mass of the Pipeline	30
Table 2.9	Variation of the Natural Frequency with the Cross Sectional Area and the Moment of Inertia of the Pipeline	31
Table 2.10	Variation of the Natural Frequency with the Length of the Pipeline	32
Table 3.1	Earth waves	34
Table 3.2	Displacement and Strain in Axial Vibration	43
Table 3.3	Displacement and Strain in Transverse Vibration	50
Table 4.1	Comparison of Axial Strain (T=1sec)	61

Table 4.2a	Comparison of Axial Strain and Stress in the Middled of Buried Pipeline	64
Table 4.2b	Comparison of Maximum Axial Strain and Stress along the Buried Pipeline	64
Table 4.3a	Comparison of Bending Strain and Stress in the Middled of Buried Pipeline	66
Table 4.3b	Comparison of Maximum Bending Strain and Stress along the Buried Pipeline	66
Table 4.4	Displacement Response on the Free Ends	70
Table 4.5	Displacement Response on the Fixed Ends	71
Table 4.6	Displacement Response on the Fixed-Free Ends	72
Table 4.7	Displacement Response on the Guided Ends	73
Table 4.8	Displacement Response on the Simply Supported Ends	73
Table 4.9	Displacement Response on the Supported-Guided Ends	74
Table 4.10a	Strain Time History Response	76
Table 4.10b	Strain Time History Response	77
Table 4.10c	Strain Time History Response	78
Table 4.11	Variation of the Peak Transient and Steady State Axial Strain with the Number of Modes($\bar{\omega}=100\text{rad/sec}$)	82
Table 4.12a	Variation of the Peak Transient Curvature with the Number of Modes($\bar{\omega}=100\text{rad/sec}$)	83
Table 4.12b	Variation of the Steady State Curvature with the Number of Modes($\bar{\omega}=100\text{rad/sec}$)	84
Table 4.13	Effect of the Integration Time Step Size on the Transient Response	86
Table 4.14a	Axial Displacement Response Profile	89

Table 4.14b	Transverse Displacement Response Profile(V=300m/sec)	90
Table 4.14a	Transverse Displacement Response Profile(V=2000m/sec)	91
Table 4.15a	Axial Strain Response Profile	94
Table 4.15b	Bending Strain Response Profile(V=300m/sec)	95
Table 4.15c	Bending Strain Response Profile(V=2000m/sec)	96
Table 5.1	Variation of the Steady State Axial Strain with the Wavelength	104
Table 5.2	Variation of the Steady State Bending Strain with the Wavelength	105

List of Figures

Fig. 2.1	Fixed-Free Boundary in Axial Vibration	12
Fig. 2.2	First Four Mode Shape of the Fixed-Free Ends in Axial Vibration	13
Fig. 2.3	Fixed-Free Boundary in Transverse Vibration	17
Fig. 2.4	First Four Mode Shape of the Fixed-Free Ends in Axial Vibration	19
Fig. 3.1	Pipeline Model for Axial Vibrations	36
Fig. 3.2	Pipeline Model for Transverse Vibrations	44
Fig. 4.1	Flow chart of ADRP Program	53
Fig. 4.2	Initial Screen of ADRP Program	54
Fig. 4.3	Screen of Input Data	54
Fig. 4.4	Screen of Analysis Condition	55
Fig. 4.5	Screen of Program Operating	55
Fig. 4.6	Screen of Response Spectrum	56
Fig. 4.7	Screen of Output Data	56
Fig. 4.8	Screen of Response Spectrum Output	57
Fig. 4.9	Screen of Excel	57
Fig. 4.10	Acceleration Record of El Centro 1940	61
Fig. 4.11	Ground Displacement Spectrum, El Centro 1940	62
Fig. 4.12	Comparison of Axial Strain(T=1sec)	62
Fig. 5.1	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Free Ends(Axial Direction)	98

Fig. 5.2	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed Ends(Axial Direction)	98
Fig. 5.3	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed-Free Ends(Axial Direction)	99
Fig. 5.4	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Free Ends(Transverse Direction)	100
Fig. 5.5	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed Ends(Transverse Direction)	100
Fig. 5.6	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed-Free Ends(Transverse Direction)	101
Fig. 5.7	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Guided Ends(Transverse Direction)	101
Fig. 5.8	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Simply Supported Ends(Transverse Direction)	102
Fig. 5.9	Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Supported-Guided Ends(Transverse Direction)	102

List of Symbols

- m : 매설관의 단위 길이당 질량
- C_A : 지반과 Winkler 기초에 대한 단위 길이당 축방향 감쇠계수
- K_A : 축방향 강성
- E_p : 매설관의 탄성계수
- A : 매설관의 단면적
- C_T : 지반과 Winkler 기초에 대한 단위 길이당 축직각방향 감쇠계수
- K_T : 축직각방향 강성
- I : 매설관의 관성모멘트
- $\phi_k(y)$: 모드형상
- ω_k : 고유진동수
- V : 겉보기 전파속도
- $\bar{\omega}$: 지반진동수
- $H(t)$: Heaviside 함수
- λ : 지진파의 파장
- v_g : 축방향 지반변위
- w_g : 축직각방향 지반변위
- $q_k(t)$: 시간만의 함수로서 일반화된 좌표
- ζ_k : 감쇠비
- L : 매설관의 길이
- R : 매설관의 평균반경

Analysis of Seismic Response of the Buried Pipeline with Pipe End Conditions

Byong - Gil Lee

*Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

This work reports results of our study on the dynamic responses of the buried pipelines both along the axial and the transverse directions under various boundary end conditions. We have considered three cases, i.e., the free ends, the fixed ends, and the fixed-free ends for the axial direction, and three more cases including the guided ends, the simply supported ends, and the supported-guided ends for the transverse direction.

The buried pipelines are modeled as beams on elastic foundation while the seismic waves as a ground displacement in the form of a sinusoidal wave. The natural frequency and its mode, and the effect of parameters have been interpreted in terms of free vibration. The natural frequency varies most significantly by the soil stiffness and the length of the buried pipelines in the case of free vibration, which increases with increasing soil stiffness and decreases with increasing length of the buried pipeline. Such a behavior appears most prominently along the axial rather than the transverse direction of the

buried pipelines.

The resulting frequencies and the mode shapes obtained from the free vibration for the various boundary end conditions of the pipelines have been utilized to derive the mathematical formulae for the displacements and the strains along the axial direction, and the displacements and the bending strains along the transverse direction in case of the forced vibration.

And we have devised a computer program(ADRP) to find the solutions of the formulae on the dynamic responses derived for the various boundary end conditions considered in this study. The negligibly small difference of 1.57% between our result and that of Ogawa et. al. for the axial strain confirms the accuracy of our approach in this study.

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.

We have observed a resonance when the mode wavelength matches the wavelength of the seismic wave, where the mode number(k) of resonance for the axial direction is found to be $\bar{\omega}L/\pi V + 1$ for the free ends, and $\bar{\omega}L/\pi V$ for the fixed ends,

$\bar{\omega}L / \pi V + 1/2$ for the fixed-free ends, respectively. By adding 10 more modes to the mode number(k) of resonance, we were able to study all the dynamic responses of the buried pipeline for the axial direction. On the other hand, we have not been able to observe a resonance in the analysis for the transverse direction, because the dynamic responses are found to vanish after the seventh mode.

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.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

지하에 매설된 관은 광범위한 지역에 걸쳐 물, 가스, 오일 등과 같은 물질을 운반하는데 사용된다. 이러한 물질들은 인간생활에 필수적인 요소로서 원활한 공급이 되지 않을 경우 큰 혼란을 야기 시킨다. 매설관은 이러한 유체를 생산지에서 소비지까지 운반하는데 가장 안전하고 효율적인 운송수단으로서 큰 비중을 차지하고 있다. 하지만 매설관은 광범위한 지역에 걸쳐 설치되기 때문에 지진에 의한 피해를 간과할 수 없다. 특히 국부의 파괴로 전체 기능이 마비되기 때문에 지진발생에 대비한 정확한 해석이 필요하다.

매설관의 내진해석은 매설관 전체의 파괴보다는 2차적인 피해가 아주 크기 때문에 중요한 비중을 차지하고 있다. 최근 수년간 발생한 큰 지진에 의한 피해의 30-60%가 매설관의 파괴로 인한 화재의 조기진압 불능이 원인이었다. 예를 들어 1906년 San Francisco 지진의 경우 4.7평방마일에 달하는 피해지역의 재산손실 중 80%가 화재로 인한 것이고 물의 부족으로 말미암아 전염병 등에 의한 인명피해도 막심하여 사망이 700명, 재산손실은 약 4억 달러에 달했다. 일본의 경우 1923년 지진에서 동경시의 35%가 화재로 인해 파손되었다. 또한 1979년 San Fernando 지진, 1985년 Mexico City 지진, 1995년 Hygoken-Nanbu 지진 등의 사례에서도 볼 수 있듯이 매설관 체계는 지진발생시 심각하게 손상될 수 있음이 입증되어 왔다.

또한 지진과의 전파로 인해 매설관은 국부적인 파괴가 발생하며, 이에 대한 매설관의 설계와 해석시 매설관의 길이에 따른 지점위치별 응력 평가가 필요하다. 또한 지점위치별 응력은 매설관의 단부 구속 조건에 따라

달라진다. 예를 들어, 양단자유 의 경계조건을 가진 경우 매설관의 중앙부에서 큰 변형이 발생하여 최대 응력을 유발시킬 수 있으나, 양단고정의 경우 단부 근처에서 큰 응력이 발생한다. 이처럼 최대응력 발생위치는 관 단부 경계조건에 따라 달라질 수 있음을 본 연구의 수행하는 과정에서 확인하였다.

반면에 Larbi(1995)는 축방향의 양단자유, 양단고정 그리고 축직각방향의 양단자유, 양단롤러(Guided Ends), 양단힌지(Simply Supported Ends)에 대해 자유진동 해석을 수행한 결과로부터 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 모두 매설관의 중앙 지점에서 최대 변형이 발생할 것으로 보고, 중앙지점에 대해서만 연구하였다.

이와 같이 최근의 매설관 동적해석시 최대 변형 발생 위치를 관의 중앙 지점에 대해 적용하고 있으나, 단부의 구속 조건에 따라 최대 응력 발생 위치가 변하는 지점위치별 응력 평가에는 적용될 수 없는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구는 단부의 경계조건에 따른 매설관의 동적거동을 규명하기 위해 Larbi(1995)에 의해 수행된 축방향의 양단고정과 축직각방향의 양단자유 및 양단힌지에 대한 자유진동 해석에 강제진동 해석을 추가적으로 수행하였고, 가능한 모든 관 단부 경계조건을 고려하기 위해 축방향의 일단고정-일단자유와 축직각방향의 양단고정, 일단고정-일단자유 그리고 일단힌지-일단롤러에 대해서도 자유진동과 강제진동 해석을 수행하였다. Clough 등(1979)이 제시한 자유진동에 대한 지배미분방정식을 이용하여 각 경계조건에서의 모드형상을 결정한 후 고유진동수를 구하고, 이들을 이용하여 강제진동시 발생하는 매설관의 축방향에 대해 변위, 변형률 산정식과 축직각방향에 대한 변위, 곡률, 휨변형률 산정식을 유도하였으며, 비주열 베이직 언어를 이용하여 이들 동적거동을 산정할 수 있는 전산프로그램을 개발하였다. 그리고 Ogawa 등(2001)에 의해 제안된 축방향 변형률

식과 본 연구에서 유도된 식에 의한 결과치를 비교하여 본 해석법의 정확성을 검증한 후, 모든 단부 경계조건에 대한 매설관에 대해 최대응력이 발생하는 위치와 크기를 산정하였으며, 매설관의 동적거동에 영향을 가장 많이 발생시킬 수 있는 공진현상을 나타내는 모드수를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 이를 통해 관의 동적거동에 영향을 주는 매개변수들의 영향을 규명한 후 관 단부 경계조건이 매설관의 동적응답에 미치는 영향에 대해 규명함을 본 연구의 목적으로 한다.

1.2 연구동향

1.2.1 국외 연구동향

EERI(Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley)가 간행한 예비조사 보고서는 지진발생 지역에서의 매설관의 손상에 대한 기본 자료를 포함하고 있으며, Wang 등(1977)과 Ariman 등(1981)의 보고서는 일본과 미국에서 발생한 지진으로 인한 매설관의 손상에 대해 구체적으로 기술하고 있다. Sakurai 등(1969)은 1965년 8월 3일에서 1967년 3월 31일까지 발생한 Matsushiro 지진에서 매설관의 현장실험을 수행하였으며 시험의 목적은 세 종류의 관(맨홀이 있는 사각형 석면 매설관, 강관, 맨홀과 굴곡을 가진 관)에 대해 파의 전파특성과 수직·수평방향에 대한 가속도와 변위의 분포크기 그리고 지반 변위와 매설관의 변형률을 구하기 위함이었다. 이 연구로부터 1) 지반과 매설관은 같은 변형량이 일어났다. 2) 지반의 축 변형량과 축직각 변형량은 거의 같다. 3) 관의 직선구간에서 축방향 변형률은 휨변형률보다 크다. 4) 굴곡부에서의 기록된 휨변형률은 직선부에서 관찰된 변형률과 유사하다. 5) 매설관에서 최대변형률은 최대지반가속도이후에 발생한다. 6) 큰 응력 집중은 휨변형률이 우세한 매설관과 맨홀의 연결부에서 관찰되었으며 연결부로부터 떨어진 곳에서는 축방향 변형률이 우세하다고 하였다. 또한 Kubo(1974)는 일본에서 과거 행해진 현장 시험의 결과를 검토하였고, 일반적으로 축방향 변형률이 휨변형률보다 더 지배적이라고 밝혔다. 매설관의 거동은 근접한 지반의 거동과 매우 유사하며 굴곡부에서의 휨변형률은 직선부의 휨변형률과 유사한 경향을 보이나 최대변형률은 최대지반가속도에서 발생하지 않는다고 하였다.

Parmelee(1973)는 콘크리트 매설관의 지반-구조물의 상호작용에 대한 대규모 실험 조사를 수행하였고 결과는 지반-구조물 시설에 적절한 유한요소 모델을 얻는데 사용되었다. 이후 Parmelee 등(1975)은 반무한 탄성체

라는 가정과 지진파는 매설관을 향해 전파되고 매설관의 축방향에 수직인 수평방향 힘을 발생시킨다는 가정하에 지반-구조물의 상호작용에 대한 해석적 모델의 결과를 발표한 바 있으며 여기서, 매설관과 지반과의 상대 변위는 아주 작았고 매설관은 지반과 함께 거동하여 상호작용에 의한 매설관의 파손은 직접적으로 나타나지 않는다고 하였다. 반면에 Hindy 등(1979)은 지반-구조물의 상호작용으로 인해 응력감소가 발생하며, 이러한 감소는 축방향 진동에 더욱 중요하며 지반의 강성과 매설관의 반경이 감소하면서 함께 증가한다고 하였다.

Nishio 등(1983)은 탄성기초 위의 보 모델에 대해 완전탄성모델을 사용하여 미끄러짐 없이 발생할 수 있는 축방향 지반 최대변위를 산정하였으며, 또한 미끄러짐이 발생하는 시점에서 지반 임계변위와 지반 파장과의 관계를 제안한 바 있다.

탄성모델에 사용되는 지반강성은 수많은 매개변수에 의해 좌우된다. Novak 등(1978)의 이론적 조사에 의하면 지반의 강성은 지반의 전단계수, 포아송비, 재료감쇠, 진동수 그리고 지반의 전단파 속도에 의해 결정된다고 하였다.

지반-매설관 접합부에서 적절한 응력-변형률 관계를 설정하면 지반 강성을 결정할 수 있으며, Parmelee 등(1975)은 측면 지반 강성은 지반의 탄성계수의 0.77~1.14배 값을 가진다고 하였다. 이 값들은 Hindy 등(1979)의 진동수 함수로 이루어진 축방향 지반 강성 공식으로 산출된 지반 전단계수의 약 2~3배 범위에서 있으며, 평면 변형의 경우 지반 전단계수의 1.5~2.75배 값을 나타낸다. El Hmadi 등(1988)은 과거 조사(해석, 실내시험, 현장시험)에 따르면 스프링 상수는 보통 전단계수의 1~3배라고 발표한 바 있다. 그 후 Colton(1981)의 과거 실내 시험을 바탕으로 스프링 상수를 역산하여 전단계수의 1.57~1.70배가 된다고 발표한 바 있다.

유한요소법은 매설관 해석에서 광범위하게 사용되고 있다. Kubo(1974)

는 지층의 모형화와 파의 영향 및 수평 인접지층사이에서의 상대적 거동을 연구하기 위해 El Centro 지진기록의 지반거동 입력값을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 모형은 두 지층사이의 경계에서 최대 변위에 도달할 것이라고 예측했다. Chen 등(1979)은 파의 영향을 연구하기 위해 유한요소 프로그램을 사용하였고, 반면에 El Hmadi 등(1989)은 지반 변형을 주제로 한 연속매설관의 해석을 위해 유한요소법을 이용하였다.

매설관 해석을 위해 가장 간단하고 많이 사용되는 모델은 탄성기초 위에 놓인 보이다. 이와 같은 모델은 1965년 8월 3일에서 1967년까지 Matsushiro 지진에서 매설관 시험을 통해 얻어진 결과를 증명하기 위해 Sakurai 등(1969)에 의해 적용되었고 지진파를 단순한 정현파 형태로 사용한 것은 지반 변위 입력을 위한 것이었다. 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.

Nishio 등(1983)은 Sakurai 등(1969)이 사용했던 것과 유사한 모델을 사용했으며 매설관은 정현파형태의 지반거동 전파를 받으며, 감쇠와 질량의 영향은 무시하고 축방향과 축직각방향의 응답을 조사하였다.

또한 그는 파의 전파 영향을 규명하기 위해 탄성기초 위의 보모델을 사용하기도 하였다. 여기서 전단파는 수직입사파라는 사실로부터 매설관의 변위를 발생시키지 않는다고 하였으며 반면에 비균질 지반의 경우, 전단파는 더 큰 응력을 발생시킬 수도 있으며 유효 지진파의 속도가 150m/sec 이하가 되면 연약지반에서도 큰 변위가 예상된다고 하였다.

Chen 등(1979)은 지반-구조물의 상호작용을 고려하여 매설관의 축방향 및 축직각방향 거동에 대한 지연시간의 영향을 규명한 바 있다. 지연시간이 길어질 때, 수평변위는 감소하지만 수직 변위는 증가하고 종방향 모델의 경우, 지연시간이 길어질 때 수평변위는 감소하지만 축방향 및 휨변형

를 뿐만 아니라 수직 변위와 축방향 응력은 증가한다고 하였다.

정현파 형태의 지반거동에 대한 전파를 사용하여 Nishio (1983)은 탄성 기초 위에 놓인 보 모델을 바탕으로 한 매설관의 변위를 산정한 바 있으나 정현파는 진동수와 겹보기 전파속도로 구성되며, 비록 정현파가 지진파 형상을 재현하지는 못하지만, 지진파는 정현파의 진폭, 평면, 그리고 전파 속도를 이용해 표현될 수 있다고 하였다.

1.2.2 국내 연구동향

정성원(1993)은 원자력발전소 부지내 지하매설관을 대상으로 Newmark 시간적분법을 이용하여 지반특성에 대한 매설관의 내진해석을 수행하였으며 경계조건은 양단자유와 건물 접속부에서의 응력검토 연구를 하였다.

이준(1999)은 지반변형률 모형을 적용한 매설관로의 지진해석을 수행하였으며 경계조건은 양단자유를 대상으로 하였다.

김태욱(1999)은 횡영구지반변형, 장재원(2000)은 종방향 영구지반변형에 대해서 매설관로의 동적거동해석을 수행하였으며 두 경우 모두 양단자유 의 경계조건이었다. 또한 구본근(2001)은 선행되어진 횡영구지반변형과 종방향 영구지반변형 연구를 통해 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 합리적인 해석 모형에 관한 연구를 수행하였으며 경계조건은 양단자유로 모형화 되었다.

이와 같이 우리나라는 현재까지 지중구조물의 내진설계절차에 대하여 체계적으로 정립되지 않은 상황이며 단부 경계조건에 대하여 전반적인 자료가 부족하고 연구가 미흡한 실정이다.

1.3 연구방법 및 범위

본 연구의 목적은 매설관에서의 여러 가지 단부 경계조건에 따른 동적 응답을 연구하는 것이다. 지진파에 의해 발생된 지반 변위가 적용된 탄성 기초 위에 놓인 보로서 매설관이 모형화 되었고, 매설관의 동적응답에 대한 단부 경계조건에 따라서 지진파의 파장, 진동수, 전파속도와 매개변수의 영향을 평가하며 지진파는 정현파 형태의 지반변위를 적용한다.

2장에서는 매설관의 자유진동에 대해서 여러 가지 단부 경계조건에 대한 축방향과 축직각방향의 모드형상과 고유진동수를 결정된 후 동적응답에 대한 매개변수의 영향을 규명한다.

3장에서는 2장에서 결정된 모드형상과 고유진동수를 이용하여 매설관의 강제진동에 대해서 여러 가지 단부 경계조건에 따라 축방향에 대한 변위, 변형률 식을, 그리고 축직각방향에 대한 변위, 곡률, 휨변형률 식을 유도하여 매설관의 동적응답해석의 기초자료로 이용한다.

4장에서는 여러 가지 단부 경계조건에 대한 본 연구에서 개발한 매설관의 동적응답해석 프로그램(ADRP)을 설명한다. ADRP 프로그램의 정확성을 확인하기 위해 양단자유 경계조건을 가진 매설관의 중앙부에서 변형률을 구하는 Ogawa 등(2001)의 제안식과 본 연구에서 제안된 산정식의 결과를 비교하여 본 연구의 정확성을 검증하고자 한다. 또한 ADRP 프로그램을 이용하여 여러 가지 단부조건에 대한 매설관의 공진현상을 나타낼 수 있는 모드수를 예측하는 식을 제안한다.

5장에서는 2장에서의 고유진동수에 영향을 주는 매개변수와 4장에서의 파장 함수 관계인 전파속도, 지진파 진동수의 영향에 관련하여 여러 가지 단부조건을 고려한 지반-매설관 상호작용 감쇠에 의한 영향과 지진파 파장의 영향에 대해서 규명하기로 한다.

제 2 장 매설관의 자유진동 거동

동적 응답의 기본적인 특성과 매설관의 거동을 입증하기 위해선 우선 매설관의 고유진동수와 진동 모드형상의 결정이 필요하다. Clough 등 (1979)이 제시한 자유진동에 대한 지배미분방정식을 이용하여 여러 가지 경계조건에서의 진동 모드형상 및 고유진동수를 산정할 수 있는 식을 유도하였다. 수식의 전개과정은 일단고정-일단자유 경계조건인 매설관을 대상으로 하여 축방향 및 축직각방향에 의해 해석하였으며, 기타 다른 단부 경계조건에 대한 결과들도 제시하였다.

2.1 축방향의 자유진동

매설관을 탄성기초 위에 놓인 보로서 해석하였다. 축방향 자유 진동을 지배하는 미분방정식은 다음과 같다.(Clough 등, 1975; Zerva 등, 1988; Larbi, 1995)

$$m \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} + C_A \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + K_A v(y,t) - E_p A \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = 0 \quad (2.1)$$

여기서,

v (m) : 매설관을 따라 좌표 y (m)와 시간 t (sec)의 함수인 축방향 변위

m (kg/m) : 매설관의 단위 길이당 질량

C_A (N.sec/m/m), K_A (N/m/m) : 지반과 Winkler 기초에 대한 단위 길이당 감쇠계수와 축방향 강성

E_p (N/m²), A (m²) : 매설관의 탄성계수와 단면적

매설관에서의 감쇠는 지반으로부터 발생된 감쇠보다 훨씬 낮다(Hindy

등(1979)). 따라서 구조물의 고유 진동수와 모드형상을 결정하기 위해 감쇠 개념을 고려하지 않고, 식 (2.1)을 정리하면 아래와 같다.

$$m \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} + K_A v(y,t) - E_p A \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = 0 \quad (2.2)$$

위 식 (2.2)의 해 $v(y,t)$ 는 위치(y)와 시간(t)에 관한 함수이며, t 에 주기적이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(y,t) = \phi(y)e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

식 (2.2)에 식 (2.3)을 대입하고 상수계수 $e^{i\omega t}$ 을 소거하여 간단하게 나타내면 다음과 같다.

$$(K_A - m\omega^2)\phi(y) - E_p A \phi''(y) = 0 \quad (2.4)$$

이 2계 미분방정식의 해는 다음과 같다.

$$\phi(y) = C_1 \sin(\alpha y) + C_2 \cos(\alpha y) \quad (2.5)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \sqrt{\frac{m\omega^2 - K_A}{E_p A}} \quad (2.6)$$

$\phi(y)$ 는 모드 형상으로서 고유진동수와 함께 경계조건으로부터 계산되어진다.



Fig. 2.1 Fixed-Free Boundary in Axial Vibration

일단고정-일단자유 경계조건은 Fig. 2.1과 같이 축방향 진동에서 고정단의 변위와 자유단의 응력은 0이다. 따라서 경계조건은 $v(0)=0$, $v'(L)=0$ 으로 아래와 같이 표현되어진다.

$$\phi(0) = 0 \quad (2.7a)$$

$$\phi'(L) = 0 \quad (2.7b)$$

식 (2.5)를 y 에 대하여 미분하여 식 (2.7a)와 식 (2.7b)의 조건을 대입하면 다음과 같다.

$$\phi(0) = \alpha C_2 = 0 \quad (2.8)$$

$$\phi'(L) = \alpha(C_1 \cos \alpha L - C_2 \sin \alpha L) = 0 \quad (2.9)$$

식 (2.8)에서 $\alpha=0$ 일 때 식 (2.6)에서 $\omega^2 = K_A/m$ 이고 $C_2 = 0$ 이다. 식 (2.8)과 식 (2.9)를 비교하면 $C_1 \neq 0$ 이며 $\cos \alpha L = 0$ 이 된다. 따라서 α 는 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$\alpha L = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots, \frac{(2n-1)\pi}{2}, \dots \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\alpha = \frac{(2k-1)\pi}{2L} \quad ; \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.10)$$

따라서 모드형상($\phi_k(y)$)은 식 (2.10)을 식 (2.5)에 대입함으로써 식 (2.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_k(y) = \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} ; k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.11)$$

고유진동수(ω_k)는 식 (2.6)과 식 (2.10)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\frac{m\omega^2 - K_A}{E_p A} = \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2$$

$$\omega_k = \sqrt{\frac{K_A}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \right\}} \quad (2.12)$$

네 개의 모드수(k=1, 2, 3, 4)에 대한 모드형상을 Fig. 2.2에 나타내었다. 이 그림으로부터 모드형상이 관 중심부(L=50m)를 기준으로 모두 비대칭적으로 나타나는 것을 알 수 있다.

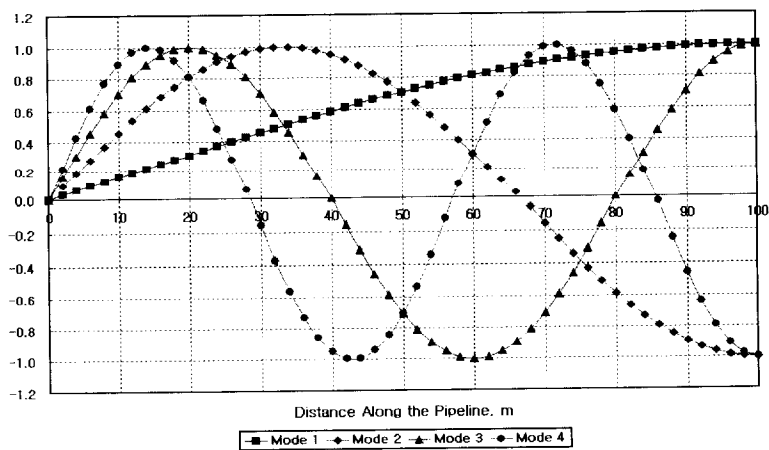
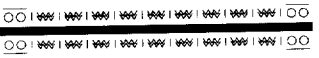
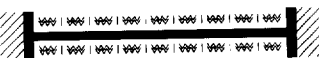



Fig. 2.2 First Four Mode Shape of the Fixed-Free Ends in Axial Vibration

Table 2.1 Mode Shape and Natural Frequency with Boundary Conditions in Axial Vibration

Boundary Condition *	Model	Mode Shape, $\phi_k(y)$
	Boundary Value	Natural Frequency, ω_k
Free Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} ; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi'(0) = 0, \phi'(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_A}{m} \left(1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{(k-1)\pi}{L} \right)^2 \right)}$
Fixed Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \sin \frac{k\pi y}{L} ; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = 0, \phi(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_A}{m} \left(1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \right)}$
Fixed Free Ends		$\phi_k(y) = \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} ; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = 0, \phi'(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_A}{m} \left(1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \right)}$

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

일단고정-일단자유 단부 경계조건의 매설관에 대한 자유진동시 축방향 진동에 대해 유도된 모드형상($\phi_k(y)$)과 고유진동수(ω_k) 뿐만 아니라 Larbi(1995)에 의해 제안된 양단자유, 양단고정의 단부 경계조건에 대한 값들을 모두 Table 2.1에 제시하였다. Table 2.2는 매설관의 길이(L)가 100m일 경우 모드수(k) 4번째까지의 모드형상을 나타낸 그림들을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 양단자유 및 양단고정 단부 경계조건에서는 모드형상이 홀수모드(k=1, 3)에서는 관 중앙지점에서 최대값을 보이며 양측

이 대칭성을 나타내며, 짝수 모드($k=2, 4$)에서는 관 중앙지점에서 0값을 보이며 양측이 비대칭성을 나타낸다. 이런 양상은 관 양단부에서 경계조건이 대칭적인 구조일 경우에 일관성으로 나타남을 알 수 있다. 반면에 일단 고정-일단자유 관 단부 경계조건처럼 구조적으로 비대칭적인 경우에는 모드형상이 전 모드수($k=1, 2, 3, 4$)에 대해서 비대칭적인 경향을 나타내고 있다. 이로부터 관 단부 경계조건이 다를 경우 동적응답은 달라질 수 있음을 알 수 있다.

Table 2.2 First Four Mode Shapes with Boundary Conditions in Axial Vibration

Boundary Condition	Free Ends (Larbi, 1995)	Fixed Ends (Larbi, 1995)
First Four Mode Shapes		
Boundary Condition	Fixed-Free Ends	-
First Four Mode Shapes		-

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

2.2 축직각방향의 자유진동

축직각방향 자유진동에 대해 지배적인 미분방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m \frac{\partial^2 w(y,t)}{\partial t^2} + C_T \frac{\partial w(y,t)}{\partial t} + K_T w(y,t) + E_p I \frac{\partial^4 w(y,t)}{\partial y^4} = 0 \quad (2.13)$$

여기서,

w (m) : 매설관을 따라 좌표 y (m)와 시간 t (sec)의 함수인 축직각방향 변위

m (kg/m) : 매설관의 단위 길이당 질량

C_T (N.sec/m/m), K_T (N/m/m) : 지반과 Winkler 기초에 대한 단위 길이당 감쇠계수와 축직각방향 강성

E_p (N/m²) : 매설관의 탄성계수

I (m⁴) : 매설관의 관성모멘트

식 (2.13)에서는 매설관의 감쇠는 주변지반에 의해 발생한 감쇠보다 매우 작으므로 무시한다. 구조물의 고유진동수와 모드형상을 결정하기 위해 감쇠를 무시하면, 식 (2.13)은 다음과 같다.

$$m \frac{\partial^2 w(y,t)}{\partial t^2} + K_T w(y,t) + E_p I \frac{\partial^4 w(y,t)}{\partial y^4} = 0 \quad (2.14)$$

식 (2.14)의 해 $w(y,t)$ 는 y 와 t 에 관한 함수이며, t 에 주기적이므로 다음과 같다.

$$w(y,t) = \phi(y)e^{i\omega t} \quad (2.15)$$

식 (2.14)에 식 (2.15)를 대입하고 상수계수 $e^{i\omega t}$ 를 소거하여 간단하게 나타내면 다음과 같다.

$$(K_T - m\omega^2)\phi(y) + E_p I \phi^{IV}(y) = 0 \quad (2.16)$$

이 4계 미분방정식의 해는 아래와 같다.

$$\phi(y) = C_1 \cosh(\beta y) + C_2 \sinh(\beta y) + C_3 \cos(\beta y) + C_4 \sin(\beta y) \quad (2.15)$$

$$\text{여기서, } \beta = \sqrt[4]{\frac{m\omega^2 - K_T}{E_p I}} \quad (2.16)$$

또한 축방향 자유진동과 동일하게 일단고정-일단자유 경계조건에 대해서 모드형상과 고유진동수 수식전개를 나타내고 일단고정-일단자유 경계조건을 포함한 다른 경계조건에 대해서 Table 2.3과 Table 2.4에 정리하여 나타내었다.

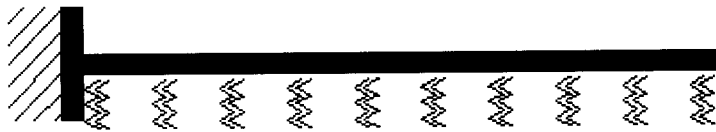


Fig. 2.3 Fixed-Free Boundary in Transverse Vibration

일단고정-일단자유 경계조건은 Fig. 2.3과 같이 고정단에서 변위와 처짐 각은 0이며, 자유단에서의 전단력과 모멘트는 0이다. 따라서 모드형상에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi(0) = \phi'(0) = \phi''(L) = \phi'''(L) = 0 \quad (2.17)$$

식 (2.17)의 각 경계조건에 대하여 정리하면 다음과 같이 초월함수로 표현된다.

$$\cosh(\beta L) \cos(\beta L) = -1 \quad (2.18)$$

식 (2.18)은 수치적으로 계산되고 βL 의 값은 다음과 같다.

$$\beta L = 1.875, 4.694, 7.855, 10.996, 14.137, 17.279, \dots \quad (L = 100\text{m}) \quad (2.19)$$

따라서 축직각방향 자유진동의 일단고정-일단자유 경계조건에서의 모드형상($\phi_k(y)$)과 고유진동수(ω_k)는 각각 식 (2.20)과 식 (2.21)과 같다.

$$\phi_k(y) = -\frac{\sin(\beta L) + \sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L) + \cos(\beta L)} \{ \cosh(\beta y) - \cos(\beta y) \} + \sinh(\beta y) - \sin(\beta y) \quad (2.20)$$

$$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left(1 + \frac{E I}{K_T} \beta_k^4 \right)} \quad (2.21)$$

$$\phi_1(y) = -\sin(0.01875y) + \sinh(0.01875y) - 1.36222 \{ -\cos(0.01875y) + \cosh(0.01875y) \}$$

$$\phi_2(y) = -\sin(0.04964y) + \sinh(0.04964y) - 0.98187 \{ -\cos(0.04964y) + \cosh(0.04964y) \}$$

$$\phi_3(y) = -\sin(0.07855y) + \sinh(0.07855y) - 1.00078 \{ -\cos(0.07855y) + \cosh(0.07855y) \}$$

$$\phi_4(y) = -\sin(0.10996y) + \sinh(0.10996y) - 0.99997 \{ -\cos(0.10996y) + \cosh(0.10996y) \}$$

네 개의 모드수($k=1, 2, 3, 4$)에 대한 모드형상을 Fig. 2.4에 나타내었다. 이 그림으로부터 모드형상이 관 중앙부($L=50\text{m}$)를 기준으로 모두 비대칭적으로 나타나는 것을 알 수 있다.

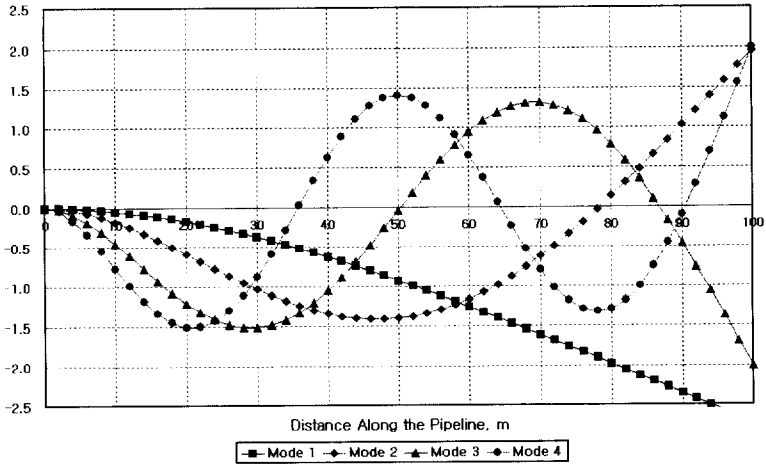
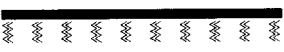


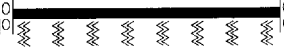




Fig. 2.4 First Four Mode Shape of the Fixed-Free Ends in Transverse Vibration

Table 2.3은 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건에 대한 관 축직각방향에 대해 네 개의 모드수($k=1, 2, 3, 4$)에 대한 모드형상을 보이고 있다. 축방향에 대한 자유진동에서와 동일하게 즉, 양단자유, 양단고정, 양단롤러, 양단힌지 관 단부 경계조건에서는 홀수모드($k=1, 3$)일 경우 중앙지점에서 최대값을 나타내며 관 중심을 기준으로 양측이 대칭성의 모드형상을 보이며, 짝수모드($k=2, 4$)에서는 중앙지점에서 0값을 가지며 양측이 비대칭성을 보이는 일관성을 가지나 일단고정-일단자유와 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건에서는 전 모드수($k=1, 2, 3, 4$)에 대해 비대칭적인 모드형상으로 나타남을 알 수 있다. 축방향과 축직각방향에 대한 자유진동 해석결과 축방향의 양단자유 경계조건과 축직각방향의 양단롤러 경계조건에 대한 모드형상이 동일하며, 축방향 양단고정 경계조건과 축직각방향의 양단힌지 경계조건에 대한 모드형상이 동일하게 나타났다. 이런 결과로부터 Larbi(1995)는 모드형상이 동일하게 나타나는 축방향 양단자유 경계조건과 축직각방향의 양단롤러 경계조건에 대해서 관 중앙부에서 가장 큰 변형률이 발생할 것으

로 간주하여 관 중앙부에 대한 동적해석 결과에 주안점을 둔 연구를 수행한 바 있다. 그러나 본 연구를 수행하는 과정에서 관 단부 경계조건이 다를 경우 최대 변형률의 발생위치는 중앙부에서만 발생하는 것이 아니라 단부 경계조건에 따라 다른 지점에서 발생됨을 알 수 있었으며 특히 단부 경계조건이 비대칭인 구조 예를 들면 일단고정-일단자유 및 일단힌지-일단롤러 경계조건과 같은 경우에는 모드형상의 비대칭성으로 동적거동이 달라 질 것으로 예상할 수 있다. 이로부터 관 단부조건에 따른 동적거동은 달라질 수 있음을 알 수 있다.

Table 2.3 Mode Shape and Natural Frequency with Boundary Conditions in Transverse Vibration

Boundary Condition *	Model	Mode Shape, $\phi_k(y)$
	Boundary Value	Natural Frequency, ω_k
Free Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \frac{\sin(\beta L) - \sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L) - \cos(\beta L)}$ $\{ \cosh(\beta y) + \cos(\beta y) \} + \sinh(\beta y) + \sin(\beta y)$
	$\phi''(0) = \phi''(L) = 0$ $\phi'''(0) = \phi'''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \beta_k^4 \right\}}$
Fixed Ends		$\phi_k(y) = \frac{\sin(\beta L) - \sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L) - \cos(\beta L)}$ $\{ \cosh(\beta y) - \cos(\beta y) \} + \sinh(\beta y) - \sin(\beta y)$
	$\phi(0) = \phi(L) = 0$ $\phi'(0) = \phi'(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \beta_k^4 \right\}}$
Fixed Free Ends		$\phi_k(y) = -\frac{\sin(\beta L) + \sinh(\beta L)}{\cosh(\beta L) + \cos(\beta L)}$ $\{ \cosh(\beta y) - \cos(\beta y) \} + \sinh(\beta y) - \sin(\beta y)$
	$\phi(0) = \phi''(L) = 0$ $\phi'(0) = \phi'''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \beta_k^4 \right\}}$
Guided Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} ; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi'(0) = \phi'(L) = 0$ $\phi'''(0) = \phi'''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \left(\frac{(k-1)\pi}{L} \right)^4 \right\}}$
Simply Supported Ends (Larbi, 1995)		$\phi_k(y) = \sin \frac{k\pi y}{L} ; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = \phi(L) = 0$ $\phi''(0) = \phi''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \right\}}$
Supported Guided Ends		$\phi_k(y) = \sin \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} y \right) ; k = 1, 2, 3, \dots$
	$\phi(0) = \phi''(0) = 0$ $\phi'(L) = \phi'''(L) = 0$	$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^4 \right\}}$

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

* Guided Ends(양단볼러) ; Simply Supported Ends(양단힌지) ; Supported-Guided Ends(일단힌지-일단볼러)

Table 2.4 First Four Mode Shapes with Boundary Conditions in Transverse Vibration

Boundary Condition	Free Ends (Larbi, 1995)	Fixed Ends
First Four Mode Shapes		
Boundary Condition	Fixed-Free Ends	Guided Ends (Larbi, 1995)
First Four Mode Shapes		
Boundary Condition	Simply Supported Ends (Larbi, 1995)	Supported-Guided Ends
First Four Mode Shapes		

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

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

2.3 고유진동수의 매개변수 영향

구조물의 동적응답에 영향을 미치는 가장 중요한 변수는 고유진동수이며 매설관의 경우, 고유진동수는 다음의 변수에 의해 지배된다. 즉, 변수에는 매설관의 단위길이당 질량, 강성(축방향 및 축직각방향), 지반의 강성뿐만 아니라 길이로 구성된 재료의 물성치가 있다. 이러한 영향을 평가하기 위해 콘크리트 매설관(Larbi, 1995)을 예로 하여 해석하였다. 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성 및 지반특성치는 Table 2.5와 같다.

Table 2.5 The Geometric and Material Properties of the Pipeline and Soil Properties (Larbi, 1995)

	Classification	Symbol (unit)	Value
Concrete Pipe	Modulus of Elasticity	E_p (N/m ²)	2.07×10^{10}
	Length	L (m)	100
	Average Radius	R (m)	1
	Thickness	t (m)	0.15
	Cross-Sectional Area	A (m ²)	0.94248
	Moment of Inertia	I (m ⁴)	0.47389
	Mass per Unit Volume	ρ (kg/m ³)	2.2×10^3
	Mass per Unit Length	m (kg/m)	2.0735×10^3
Soil	Axial Soil Stiffness	K_A (N/m/m)	9.34×10^7
	Lateral Soil Stiffness	K_T (N/m/m)	14.01×10^7

또한 해석상 요소로서의 지반 강성은 매우 복잡하다. 첫째, 매설관이 매설된 지반은 일반적으로 수직방향 및 수평방향으로 구별되는 지반 강성을 가진 다양한 층으로 구성되어 있다. 게다가, 지반 물성은 흙의 비균질성으로 같은 층내라도 보통 일정하지 않으며 이것은 구조물의 길이가 매우 길어질 때 더욱 큰 영향을 미친다. 비록 겉보기 전파속도가 깊은 층에 영향을 미칠지라도 매설관이 매설된 표토층은 해석에서 사용된 스프링 강성을 결정하는 요소가 된다. 이것은 지반의 축방향 강성이 지반의 전단탄성계수의 곱으로 표현될 수 있는 실험적 결과와 해석에 의해 제안되어졌다. El Hmadi 등(1988)은 다양한 자료로부터 축방향 강성이 $G \sim 3G$ 사이의 값을 가진다고 발표했으며, 여기서 G 는 지반 전단탄성계수이다. 강성이라는 측면에서, 지반은 일반적으로 다음과 같이 분류되어지며 연약지반, 중간정도의 강성을 가진 지반, 견고하거나 단단한 지반이며, 다양한 형태의 지반은 각각의 분류로 점토지반, 연약 충적토, 사질지반들은 연약한 것으로 고려되었고 조밀한 지반과 변성암은 견고하고 단단한 지반으로 고려되었다. 또한 G 의 전형적인 값은 2개의 지반 형태에 대해 확인되었다(Shinozuka 등, 1979).

- 1) 연약 지반 : $G=4.67 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
- 2) 중간 정도의 견고한 지반 : $G=2.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

위의 전단탄성계수값은 축방향 및 축직각방향 강성에 대해 다음과 같은 값을 나타내었다(Larbi, 1995).

- 1) 연약 지반 : $K_A=9.34 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, $K_T=14.01 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
- 2) 중간 정도의 견고한 지반 : $K_A=5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $K_T=7.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

2.3.1 지반강성의 영향

지반 강성은 매설관을 지지하는 탄성기초를 나타내며 본 해석에서의 지반강성값은 연약한 점토지반을 대상으로 적용할 수 있는 값(Shinozuka 등, 1979 ; Larbi, 1995)을 이용하였다. 축방향 및 축직각방향 진동에 관한 Table 2.6으로부터, 지반강성이 1×10^{10} N/m/m이상에서 지반의 강성이 증가함에 따라 고유진동수도 증가한다는 것을 알 수 있다. 반면, 지반강성이 1×10^{10} N/m/m이하에서 고유진동수는 어느 한계를 넘어서는 일정하게 유지되고 모드수가 증가할수록 고유진동수는 증가한다.

지반강성이 1×10^{10} N/m/m이하에서, 축방향 고유진동수는 축직각방향 진동수보다 높다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

2.3.2 매설관의 탄성계수 영향

축방향 진동에 대한 첫 번째 진동수는 $\omega_1 = \sqrt{K_A/m}$ 이며, 축직각방향 진동에 대한 진동수는 $\omega_1 = \sqrt{K_T/m}$ 이 된다. 따라서 축방향 및 축직각방향 진동에 있어 첫 번째 고유진동수는 오직 지반강성과 매설관의 단위질량에 의존한다.

Table 2.7에서 보는 바와 같이, 고유진동수는 콘크리트관보다 높은 탄성계수($E_p > 2.07 \times 10^{10}$ N/m²)에서는 증가하는 경향을 보이며 1×10^9 N/m²이하의 탄성계수에서는 고유진동수의 변화가 없는 경향을 보인다. 높은 탄성계수와 모드수가 증가할수록, 고유진동수는 급격히 증가한다. 첫 번째 고유진동수에 대응하는 곡선은 일정하다는 것을 알 수 있다.

콘크리트(1×10^{10} N/m²)보다 작거나 같은 강성을 가진 재료에 있어 탄성계수는 동적해석에 별 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 이것은 적어도 처음 10개의 모드에서 뚜렷이 나타나는 경향이다. 콘크리트보다 강성이 높은 재료에 있어 탄성계수는 10번째 모드에서부터 그 영향을 나타내기 시

작한다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

2.3.3 매설관 질량 영향

Table 2.8은 고유진동수에 대해 매설관 질량의 영향을 나타내고 있다. 비교적 낮은 질량에서 고유진동수는 큰 값을 보이며 질량이 증가할수록 고유진동수는 낮은 값을 나타내고 있다. 이로부터 질량이 각각 다른 값을 가지는 콘크리트관, 강관, 플라스틱관처럼 관에 따라 동적거동이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 그리고 모드수의 영향은 축방향 진동에서의 고유진동수가 축직각방향 진동일 때 보다 낮은 모드(5번째)에서는 작게 나타나지만 높은 모드(>5번째)에서는 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 질량이 증가함에 따라 현저하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

2.3.4 매설관의 횡단면적 및 관성모멘트의 영향

Table 2.9에서 고유진동수는 관 횡단면적과 관성 모멘트의 증가와 함께 증가한다. 증가비율은 두 경우의 모두 기본적인 고유진동수를 제외하고는 모든 모드에 대해 같은 경향을 보이고 있다. 기본적인 고유진동수는 횡단면적과 매설관의 관성모멘트에는 영향을 받지 않기 때문이다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

2.3.5 매설관의 길이 영향

고유진동수에 대한 매설관의 길이에 의한 영향은 Table 2.10에 나타나 있다. 고유진동수는 매설관의 길이가 짧을수록 높은 값을 가지며 특히 매설관의 길이가 100m이하일 때 그런 경향이 뚜렷이 나타난다. 그림에서 나타나는 가장 작은 값의 고유진동수는 관의 길이에 무관한 값을 나타낸다. 이러한 경향은 관 단부 경계조건의 변화에 관계없이 동일한 경향을 나타낸다.

이상과 같은 고유진동수의 매개변수 영향 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 지반강성이 높은 경우($>1 \times 10^{10}$ N/m/m)에는 강성이 증가함에 따라 고유진동수는 증가하며 지반강성이 낮은 경우($<1 \times 10^{10}$ N/m/m)에는 어느 한계 값까지 일정하게 유지되며 진동 모드수가 증가할수록 증가한다.
- 2) 관의 탄성계수가 1×10^{10} N/m²보다 작은 값에서는 고유진동수에 미치는 영향이 없으나 1×10^{10} N/m²보다 높은 값일 경우에는 고유진동수가 증가하며 진동 모드수가 증가할수록 고유진동수는 급격히 증가하고 축방향 자유진동에서 그 경향이 뚜렷이 나타난다.
- 3) 매설관의 질량이 클수록 그리고 모드수가 낮을수록 고유진동수는 낮아지며 축방향에서 그 경향이 뚜렷이 나타난다.
- 4) 관의 횡단면적과 관성모멘트가 증가함에 따라 고유진동수는 증가한다.
- 5) 매설관의 길이가 증가함에 따라 고유진동수는 감소하며 관의 길이가 100m이하인 경우 진동 모드수가 증가할수록 고유진동수는 급격히 증가한다.

Table 2.6 Variation of the Natural Frequency with the Soil's Stiffness

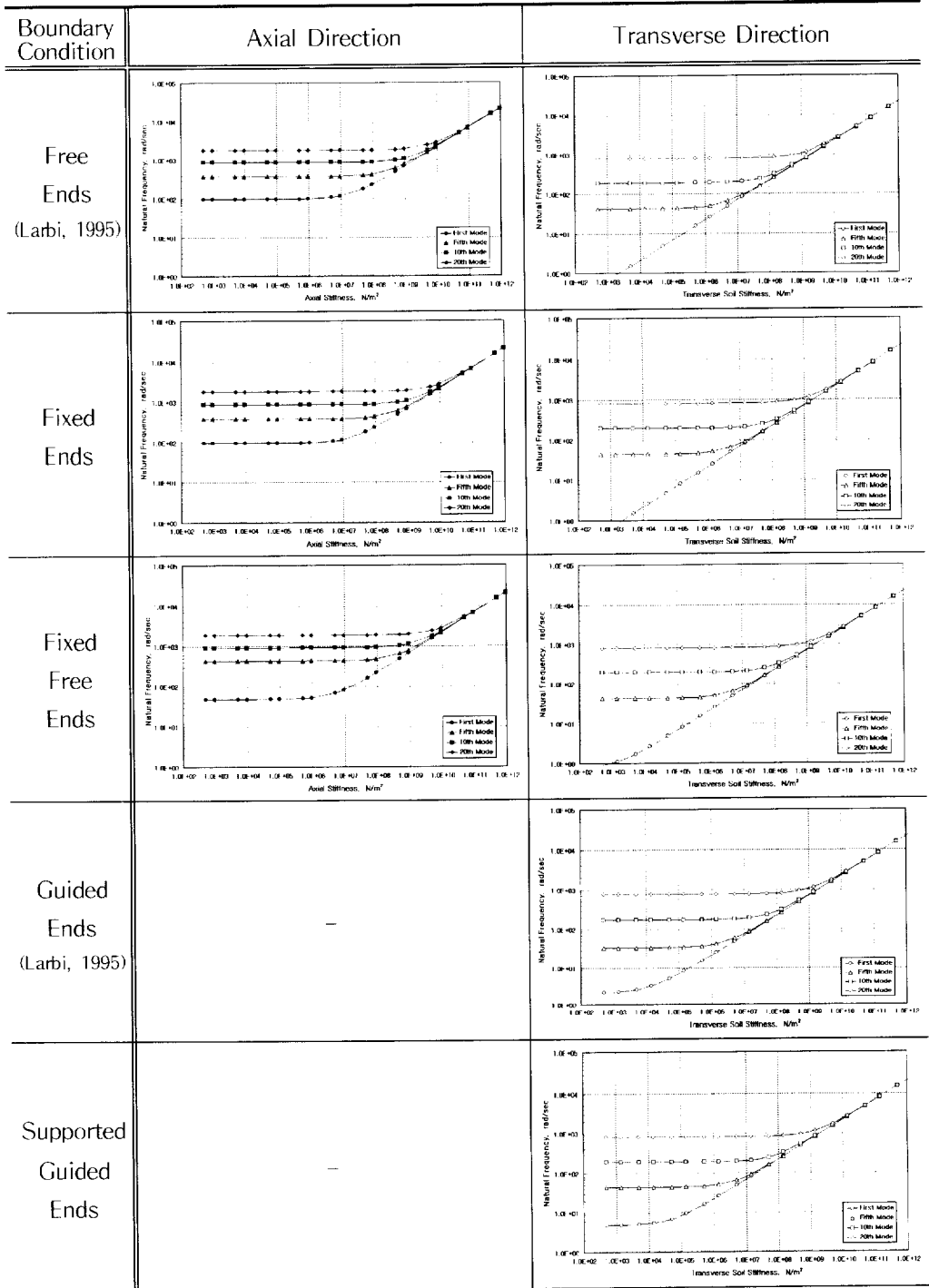


Table 2.7 Variation of the Natural Frequency with the Modulus of Elasticity of the Pipeline Material

Boundary Condition	Axial Direction	Transverse Direction
Free Ends (Larbi, 1995)		
Fixed Ends		
Fixed Free Ends		
Guided Ends (Larbi, 1995)		
Supported Guided Ends		

Table 2.8 Variation of the Natural Frequency with the Unit mass of the Pipeline

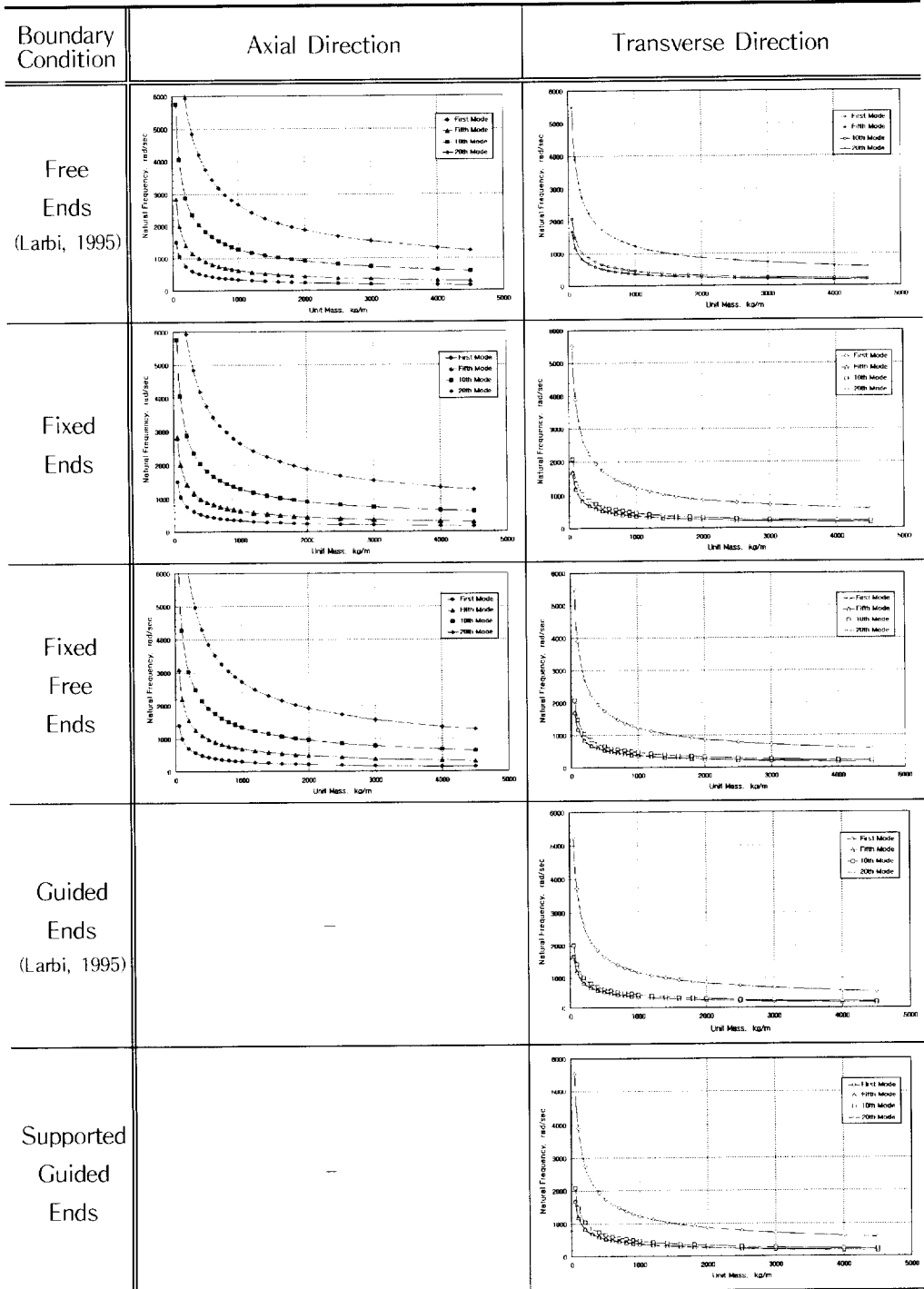


Table 2.9 Variation of the Natural Frequency with the Cross Sectional Area and the Moment of Inertia of the Pipeline

Boundary Condition	Axial Direction	Transverse Direction
Free Ends (Labi, 1995)		
Fixed Ends		
Fixed Free Ends		
Guided Ends (Labi, 1995)	<p style="text-align: center;">-</p>	
Supported Guided Ends	<p style="text-align: center;">-</p>	

Table 2.10 Variation of the Natural Frequency with the Length of the Pipeline

Boundary Condition	Axial Direction	Transverse Direction
Free Ends (Larbi, 1995)		
Fixed Ends		
Fixed Free Ends		
Guided Ends (Larbi, 1995)		
Supported Guided Ends		

제 3 장 매설관의 강제진동 거동

본 장에서는 여러 가지 단부 경계조건에서 정현파 형태의 지반 거동을 대상으로 하여 연속매설관의 축방향에 대한 변위와 변형률과 축직각방향에 대한 변위, 곡률, 휨변형률 산정식을 유도하였다. 수식전개 과정은 일단 고정-일단자유 단부 경계조건에 대한 매설관을 대상으로 이루어지며 기타 여러 가지 단부 경계조건에 대한 결과들도 제시하였다. 이것은 연속매설관의 동적응답을 구하기 위해 필요한 자료들이다.

3.1 지반운동

지진 발생시 상당히 많은 형태의 파가 지반을 통과한다. 이러한 지진은 Table 3.1에 나타낸 체적파와 표면파의 두 종류로 분류된다(Bolt, 1970; Newmark 등, 1971).

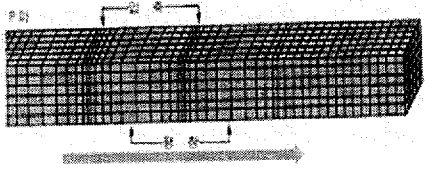
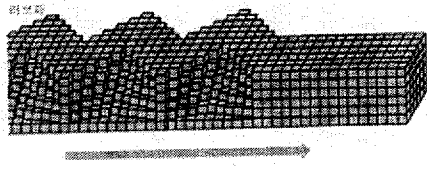
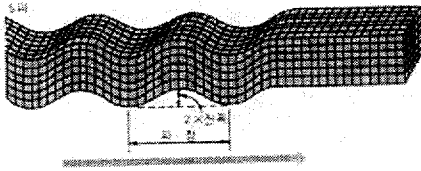
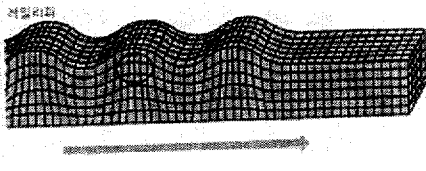
체적파는 지반이라는 매체를 통해 통과하며 1차파(압축파:P파)와 2차파(전단파:S파)의 두 종류로 나누어진다. 진원으로부터의 원거리에서 두 파 모두의 활동범위는 평면에 존재한다. 이러한 파들에 영향을 받는 입자의 거동은 전파방향에 따라 관의 축방향과 축직각방향으로 움직인다. S파에 있어 거동이 연직일 때 파는 SV, 거동이 수평일 때 파는 SH로 명명된다. S파는 일반적으로 P파보다 느린 것으로 알려져 있다.

표면파는 지표면에서 전달되며 Love파와 Rayleigh파로 분류되어진다. Love파에 대한 입자의 거동은 전파방향에 수직인 수평선을 따라 발생하고, 파의 진폭은 지표면 아래 깊이에 따라 감소한다. Rayleigh파의 경우, 입자는 전파방향에 평행한 수직평면에서 타원형의 거동을 한다. 그리고 타원의 크기는 지표면 아래 깊이에 따라 감소한다. 두파는 모두 분산적이고,

전파속도는 파장에 의해 결정된다. 표면파는 체적파와 비교하여 가속도와 전파속도는 낮고 주기는 길다.

입자의 거동의 차이로 인해, Love파는 축직각방향 거동을 야기시켜 직선매설관에서 대해서 횡변형률을 야기시킨다. 반면 Rayleigh파는 직선매설관에 대해 축방향 및 축직각방향 모두에 대해 변형을 야기시킨다. 매설관의 내진해석에서는 보통 Rayleigh파로 적용된다(O'Rourke 등, 1988).

Table 3.1 Earth waves

Compressional waves	Love waves
	
Shear waves	Rayleigh waves
	

전단파의 겹보기 수평 전파속도는 지진시 지표면에서 측정된 자료로부터 결정되며, 가속도 시간이력은 진앙으로부터 넓은 범위에서 기록되어져 겹보기 수평 전파속도를 계산하는데 이용된다(O'Rourke 등, 1982).

표면파속도는 일반적으로 전단파 속도에 비해 낮으나 때로는 동일한 속도를 나타내기도 한다. 표면파의 전파속도는 지반의 물성과 파장에 의해 결정될 수 있으며 O'Rourke 등(1988)은 반무한공간에 놓인 지반을 모델로 하여 Rayleigh파의 분산 특성을 연구한 후 단파에서 Rayleigh파의 전파속도는 표토층의 재료특성에 의해 지배되고, 장파에서는 반무한공간의 재료

특성에 의해 지배된다고 하였다.

표면파의 주기는 진앙근처에서 2~3초사이의 범위를 가지고 진앙으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 한 시간단위의 주기를 가지기도 하지만, 체적파는 아주 작은 주기를 가진다. 다시 말해 진앙근처에서 P파는 1/10~1/5초 그리고 S파는 1/4~1/2초이다. 진앙에서 멀어질수록 P파와 S파는 7~15초 사이의 주기범위를 가진다.

지진발생시 지반거동은 단위 진폭과 각진동수($\bar{\omega}$)를 가진 정현파로 표현할 수 있다. 지반진동수($\bar{\omega}$)와 겉보기 전파속도(V)를 이용하여 관의 축방향 진동에 대해서, 지진 지반거동을 다음과 같이 형상화할 수 있다.

$$V_g(y,t) = H(t-y/V) \sin(\bar{\omega}t - \bar{\omega}y/V), \text{ 또는} \quad (3.1)$$

$$V_g(y,t) = H(t-y/V) \sin(\bar{\omega}t - 2\pi y/\lambda) \quad (3.2)$$

여기서, $\lambda = \frac{2\pi V}{\bar{\omega}}$ 는 지진파의 파장이다.

H(t)는 Heaviside 함수로서 매설관의 동적응답을 구하기 위해 해석에 이용되어지고 다음과 같은 조건을 가진다.

$$H(t-y/V)=0, \text{ for all } t < y/V \quad (3.3a)$$

$$H(t-y/V)=1, \text{ for all } t > y/V \quad (3.3b)$$

즉, 매설관의 해석 지점(예, 중앙부)에 대해 파가 도달하기 전이면 Heaviside 함수, H(t)는 0이며, 파가 도달하면 1의 값을 나타내는 Switch 함수이다. 이 함수를 이용하여 지반거동의 변위를 산정할 수 있다.

3.2 강제진동 수식전개

매설관은 탄성기초 위에 놓인 보로서 모형화 되었다(Fig. 3.1과 Fig. 3.2). 파의 전파는 좌측 끝단($t=0$)에서 전파된다. 보는 다음의 힘 아래서 평형을 이룬다. 매설관의 질량으로 인한 관성력, 지반-구조물의 상호작용으로 인한 감쇠력, 거동에 대한 지반의 저항력인 스프링력, 보의 강성력, 지진파에 의한 외부력 등이 있다.

3.2.1 축방향 강제진동

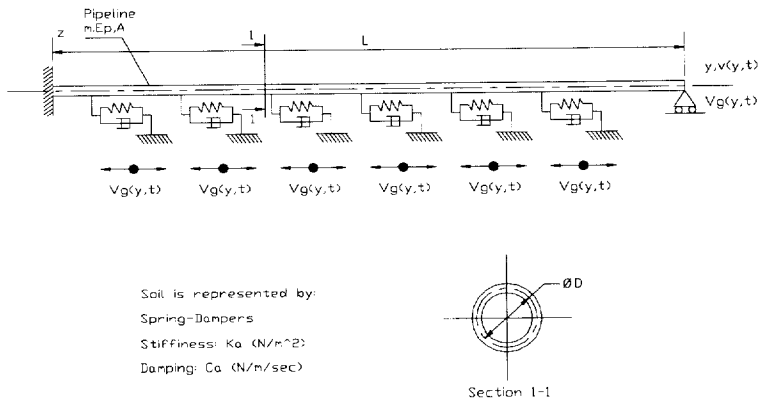


Fig. 3.1 Pipeline Model for Axial Vibrations

Fig 3.1에서와 같이 일단고정-일단자유 경계조건의 축방향 진동에서 매설관의 거동을 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & m \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} + C_A \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} + K_A v(y,t) - E_p A \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} \\
 & = C_A \frac{\partial v_g(y,t)}{\partial t} + K_A v_g(y,t)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

여기서, v_g : 축방향 지반 변위

이 경우에 이용된 경계조건의 형태에 대해, 동일한 결과가 2장에서 얻어졌고, 모드형상과 고유진동수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 \phi_k(y) &= \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} \\
 \omega_k &= \sqrt{\frac{K_A}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p A}{K_A} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \right\}}
 \end{aligned}$$

일반화된 좌표와 일반적인 모드형상으로 변위를 표현함으로서 해는 다음과 같은 형태로 얻어진다.

$$v(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k(y) q_k(t) \tag{3.5}$$

$$\text{즉, } v_k(y,t) = \phi_k(y) q_k(t) \tag{3.6}$$

여기서, $\phi_k(y)$: 모드 형상

$q_k(t)$: 시간만의 함수로서 일반화된 좌표

식 (3.6)을 식 (3.4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m\phi_k(y) \left[\ddot{q}_k(t) + \frac{C_A}{m} \dot{q}_k(t) + \frac{K_A}{m} q_k(t) \left\{ 1 + E_p A \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \right\} \right] \\
 = C_A \dot{v}_g(y, t) + K_A v_g(y, t)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

식 (3.7)의 양변에 $\phi_k(y)$ 를 곱한 후 매설관의 전체 길이에 대해 적분하고 모드형상의 직교성을 이용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{q}_k(t) + \frac{C_A}{m} \dot{q}_k(t) + \frac{K_A}{m} q_k(t) \left\{ 1 + E_p A \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \right\} \\
 = \frac{1}{mL_k} \int_0^L \phi_k(y) [C_A \dot{v}_g(y, t) + K_A v_g(y, t)] dy
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

여기서, $L_k = \int_0^L \phi_k^2(y) dy$

L_t 는 지진파가 $t=0$ 에서 매설관의 좌측단부를 진동한 후 이동한 거리이다. 또한 이것은 전파된 파의 결과로서 매설관에 작용한 모든 힘을 합한 것의 상한이 된다. L_t 는 0에서 파가 도달한 지점사이의 값이다. 즉, $V \cdot t$ 이다. 파가 매설관의 전체 길이($L_t=L$)를 통과한 후, 매설관은 전장에 걸쳐 동일한 크기를 가진 정현파 형태의 지진파를 받게 된다.

$$L_k = L/2, \text{ 모든 } k \text{에 대해서}$$

$$L_t = V \cdot t, \quad t < L/V \text{ 경우}, = L, \quad t > L/V \text{ 경우} \tag{3.9}$$

$C_A/m = 2\zeta_k\omega_k$ 로서, 모드수 k 에 대한 지반-구조물의 상호작용에 의한 감쇠비(ζ_k)는 고유진동수(ω_k)를 이용하여 표현하면 아래와 같다.

$$\zeta_k = \frac{C_A}{2\sqrt{mK_A}} \left[1 + \frac{E_p A}{K_A} \frac{(2k-1)^2 \pi^2}{4L^2} \right]^{-1/2} \quad (3.10)$$

식 (3.7)에 ω_k 와 ζ_k 을 대입하여 정리하면, $q_k(t)$ 에 대한 다음 식이 얻어진다.

$$\ddot{q}_k(t) + 2\zeta_k\omega_k\dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = P_k(t) \quad (3.11)$$

여기서,

$$P_k(t) = \frac{1}{mL_k} \int_0^L \phi_k(y) [C_A \dot{v}_g(y, t) + K_A v_g(y, t)] dy \quad (3.12)$$

$P_k(t)$ 는 시간 t 와 모드 k 에서 지반으로부터 매설관에 전달된 모든 힘의 합을 나타내며 식 (3.12)에 식 (3.1)을 대입하여 시간 t 에서 매설관에 작용한 힘을 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_k(t) &= \frac{1}{mL_k} \int_0^L \phi_k(y) \left[C_A \bar{\omega} H\left(t - \frac{y}{V}\right) \cos\left(\bar{\omega}t - \bar{\omega} \frac{y}{V}\right) + K_A H\left(t - \frac{y}{V}\right) \sin\left(\bar{\omega}t - \bar{\omega} \frac{y}{V}\right) \right] dy \\ &= \frac{H\left(t - \frac{y}{V}\right)}{mL_k} \int_0^{L_1} \phi_k(y) \left[C_A \bar{\omega} \left\{ \cos(\bar{\omega}t) \cos\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) + \sin(\bar{\omega}t) \sin\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + K_A \left\{ \sin(\bar{\omega}t) \cos\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) - \cos(\bar{\omega}t) \sin\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) \right\} \right] dy \\ &= \frac{H\left(t - \frac{y}{V}\right)}{mL_k} \left[(C_A \bar{\omega} \cos(\bar{\omega}t) + K_A \sin(\bar{\omega}t)) \int_0^{L_1} \phi_k(y) \cos\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) dy \right. \\ &\quad \left. + (C_A \bar{\omega} \sin(\bar{\omega}t) - K_A \cos(\bar{\omega}t)) \int_0^{L_1} \phi_k(y) \sin\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) dy \right] \quad (3.13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_k &= \int_0^{L_t} \cos\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) \phi_k(y) dy = \int_0^{L_t} \cos\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) \sin\left\{\frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} dy \\
&= \frac{1}{2} \int_0^{L_t} \left[\sin\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} + \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} - \sin\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} - \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} \right] dy \\
&= \left[-\frac{\frac{1}{2}}{\frac{\bar{\omega}}{V} + \frac{(2k-1)\pi}{2L}} \cos\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} + \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} + \frac{\frac{1}{2}}{\frac{\bar{\omega}}{V} - \frac{(2k-1)\pi}{2L}} \cos\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} - \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} \right]_0^{L_t} \\
&= -\frac{\cos(a_k L_t)}{2a_k} + \frac{\cos(b_k L_t)}{2b_k} + \frac{1}{2a_k} - \frac{1}{2b_k} \\
&= \frac{1 - \cos(a_k L_t)}{2a_k} - \frac{1 - \cos(b_k L_t)}{2b_k} \tag{3.14}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_k &= \int_0^{L_t} \sin\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) \phi_k(y) dy = \int_0^{L_t} \sin\left(\bar{\omega} \frac{y}{V}\right) \sin\left\{\frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} dy \\
&= \frac{1}{2} \int_0^{L_t} \left[\cos\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} - \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} - \cos\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} + \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} \right] dy \\
&= \left[\frac{\frac{1}{2}}{\frac{\bar{\omega}}{V} - \frac{(2k-1)\pi}{2L}} \sin\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} - \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} - \frac{\frac{1}{2}}{\frac{\bar{\omega}}{V} + \frac{(2k-1)\pi}{2L}} \sin\left\{\frac{\bar{\omega}}{V} + \frac{(2k-1)\pi}{2L} y\right\} \right]_0^{L_t} \\
&= \frac{\sin(b_k L_t)}{2b_k} - \frac{\sin(a_k L_t)}{2a_k} \\
&= -\frac{\sin(a_k L_t)}{2a_k} + \frac{\sin(b_k L_t)}{2b_k} \tag{3.15}
\end{aligned}$$

$$\text{여기서, } a_k = \frac{\bar{\omega}}{V} + \frac{(2k-1)\pi}{2L}, \quad b_k = \frac{\bar{\omega}}{V} - \frac{(2k-1)\pi}{2L} \tag{3.16}$$

일반화된 좌표 $q_k(t)$ 는 Duhamel의 적분공식으로부터 결정된다.

$$q_k(t) = \int_0^t h_k(t-\tau) P_k(\tau) d\tau \tag{3.17}$$

$$\text{여기서, } h_k(t) = \frac{1}{\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2}} e^{-\zeta_k \omega_k t} \sin \sqrt{1 - \zeta_k^2} \omega_k t \tag{3.18}$$

식 (3.18)을 식 (3.17)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 q_k(t) &= \frac{1}{\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2}} \int_0^t \{P_k(\tau) e^{\omega_k \zeta_k (t-\tau)} \sin(\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} (t-\tau))\} d\tau \\
 &= \frac{1}{\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2}} \left[\left(\int_0^t P_k(\tau) \frac{e^{\omega_k \zeta_k \tau}}{e^{\omega_k \zeta_k t}} \cos(\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} \tau) d\tau \right) \sin(\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} t) \right. \\
 &\quad \left. - \left(\int_0^t P_k(\tau) \frac{e^{\omega_k \zeta_k \tau}}{e^{\omega_k \zeta_k t}} \sin(\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} \tau) d\tau \right) \cos(\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} t) \right] \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

$$A(t) = \int_0^t P_k(\tau) \frac{e^{\omega_k \zeta_k \tau}}{e^{\omega_k \zeta_k t}} \cos(\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} \tau) d\tau \quad (3.20)$$

$$B(t) = \int_0^t P_k(\tau) \frac{e^{\omega_k \zeta_k \tau}}{e^{\omega_k \zeta_k t}} \sin(\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} \tau) d\tau \quad (3.21)$$

식 (3.20)과 식(3.21)을 이용하여 식 (3.19)를 다시 정리하면 아래와 같다.

$$q_k(t) = \frac{1}{\omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2}} [A(t) \sin \omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} t - B(t) \cos \omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} t] \quad (3.22)$$

식 (3.20)과 식 (3.21)에 전개된 적분을 풀기 위하여 적분은 일정시간 증분($\Delta\tau$)을 이용하여 Simpson법칙에 따라 단계적으로 전개될 수 있다. 따라서, A(t)와 B(t)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A(t) = \frac{\Delta\tau}{3} \sum^A(t), \quad B(t) = \frac{\Delta\tau}{3} \sum^B(t) \quad (3.23)$$

$\sum^A(t)$ 와 $\sum^B(t)$ 는 $A(t)$ 와 $B(t)$ 의 적분에 대해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}\sum^A(t) &= \left[\sum^A(t-2\Delta\tau) + P_k(t-2\Delta\tau) \cos(\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2}(t-2\Delta\tau)) \right] e^{-\zeta_k \omega_k 2\Delta\tau} \\ &\quad + 4P_k(t-\Delta\tau) \cos(\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2}(t-\Delta\tau)) e^{-\zeta_k \omega_k \Delta\tau} \\ &\quad + P_k(t) \cos(\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2}t)\end{aligned}\quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}\sum^B(t) &= \left[\sum^B(t-2\Delta\tau) + P_k(t-2\Delta\tau) \sin(\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2}(t-2\Delta\tau)) \right] e^{-\zeta_k \omega_k 2\Delta\tau} \\ &\quad + 4P_k(t-\Delta\tau) \sin(\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2}(t-\Delta\tau)) e^{-\zeta_k \omega_k \Delta\tau} \\ &\quad + P_k(t) \sin(\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2}t)\end{aligned}\quad (3.25)$$

따라서 일단고정-일단자유 경계조건에 대한 매설관의 변위($v_A(y,t)$)와 변형률($\varepsilon_A(y,t)$) 산정식은 각각 식 (3.26)과 식 (3.27)로 유도되어진다.

$$v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k(y) q_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t) \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial \phi_k(y)}{\partial y} q_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)\pi}{2L} \cos \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t) \quad (3.27)$$

이와 동일한 방법으로 수식을 전개하여 축방향의 경계조건인 양단자유와 양단고정 단부 경계조건에 대한 변위와 변형률 산정식을 구한 후 Table 3.2에 수록하였다. 양단자유 경계조건에 대한 동적응답 산정식은 Larbi(1995)에 의해 수행된 바 있다.

Table 3.2 Displacement and Strain in Axial Vibration

Classification		Result
Free Ends (Larbi, 1995)	Displacement	$v_A(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
	Strain	$\epsilon_A(y, t) = - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(k-1)\pi}{L} \sin \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
Fixed Ends	Displacement	$v_A(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
	Strain	$\epsilon_A(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{L} \cos \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
Fixed Free Ends	Displacement	$v_A(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	Strain	$\epsilon_A(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)\pi}{2L} \cos \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

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

3.2.2 축직각방향 강제진동

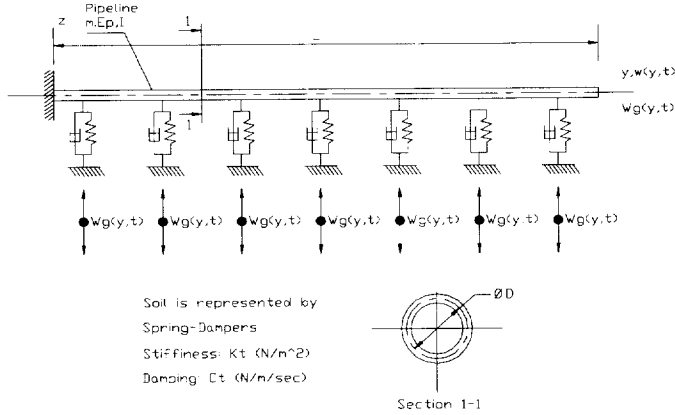


Fig. 3.2 Pipeline Model for Transverse Vibrations

Fig. 3.2에서와 같이 일단고정-일단자유 경계조건에서의 축직각방향 지반 변위를 갖는 매설관의 거동에 대한 부분 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m \frac{\partial^2 w(y,t)}{\partial t^2} + C_T \frac{\partial w(y,t)}{\partial t} + K_T w(y,t) + E_p I \frac{\partial^4 w(y,t)}{\partial y^4} \\
 = C_T \frac{\partial w_g(y,t)}{\partial t} + K_T w_g(y,t)
 \end{aligned} \quad (3.28)$$

여기서, w_g : 축직각방향 지반변위

Fig. 3.2와 같은 경계조건에 대해 모드형상과 고유진동수는 2장에서 설명되었으며 식은 아래와 같다.

$$\phi_k(y) = - \frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y)$$

$$\omega_k = \sqrt{\frac{K_T}{m} \left\{ 1 + \frac{E_p I}{K_T} \beta_k^4 \right\}}$$

여기서, $\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} = M$ 이라 둔다.

또한 축방향 진동의 경우처럼 일반적인 모드형상과 일반화된 좌표를 사용하여 매설관의 변위를 표현함으로써, 위의 미분방정식의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(y, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k(y) q_k(t) \quad (3.29)$$

$$\text{즉, } w_k(y, t) = \phi_k(y) q_k(t) \quad (3.30)$$

식 (3.30)을 $\phi_k(y)$ 가 곱해진 식 (3.28)에 대입하고, 매설관의 길이에 대해 적분하여, 모드 형상에 대한 직교성을 이용함으로써 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_k(t) + \frac{C_T}{m} \dot{q}_k(t) + \frac{K_T}{m} q_k(t) \left\{ 1 + \frac{\beta_k^4 E_p I}{K_T} \right\} \\ = \frac{1}{m L_k} \int_0^L \phi_k(y) [C_T \bar{w}_g(y, t) + K_T w_g(y, t)] dy \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\text{여기서, } L_k = \int_0^L \phi_k^2(y) dy \quad (3.32)$$

$\phi_k^2(y)$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\phi_k^2(y) &= [-M\{\cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y)\} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y)]^2 \\ &= M^2\{\cosh^2(\beta_k y) - 2\cosh(\beta_k y)\cos(\beta_k y) + \cos^2(\beta_k y)\} \\ &\quad + \sinh^2(\beta_k y) - 2\sinh(\beta_k y)\sin(\beta_k y) + \sin^2(\beta_k y) \\ &\quad - 2M\{\cosh(\beta_k y)\sinh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y)\sin(\beta_k y) - \cosh(\beta_k y)\sin(\beta_k y) + \cos(\beta_k y)\sin(\beta_k y)\}\end{aligned}$$

따라서 식 (3.32)는 위의 $\phi_k^2(y)$ 식을 이용하여 아래와 같이 수식전개를 할 수 있다.

$$\begin{aligned}L_k &= \int_0^L \phi_k^2(y) dy \\ &= M^2 \int_0^L \{\cosh^2(\beta_k y) - 2\cosh(\beta_k y)\cos(\beta_k y) + \cos^2(\beta_k y)\} dy \\ &\quad + \int_0^L \{\sinh^2(\beta_k y) - 2\sinh(\beta_k y)\sin(\beta_k y) + \sin^2(\beta_k y)\} dy \\ &\quad - 2M \int_0^L \{\cosh(\beta_k y)\sinh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y)\sin(\beta_k y) - \cosh(\beta_k y)\sin(\beta_k y) + \cos(\beta_k y)\sin(\beta_k y)\} dy\end{aligned}\tag{3.33}$$

식 (3.33)에서 수식전개를 위하여 아래와 같이 구분할 수 있다.

$$\begin{aligned}X &= \int_0^L \{\cosh^2(\beta_k y) - 2\cosh(\beta_k y)\cos(\beta_k y) + \cos^2(\beta_k y)\} dy \\ Y &= \int_0^L \{\sinh^2(\beta_k y) - 2\sinh(\beta_k y)\sin(\beta_k y) + \sin^2(\beta_k y)\} dy \\ Z &= \int_0^L \{\cosh(\beta_k y)\sinh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y)\sin(\beta_k y) - \cosh(\beta_k y)\sin(\beta_k y) + \cos(\beta_k y)\sin(\beta_k y)\} dy\end{aligned}$$

X, Y, Z에 대해서 각각 적분하면 다음과 같다.

$$X = \frac{1}{4\beta_k} \{ \sinh(2\beta_k L) + \sin(2\beta_k L) \} + L \\ - \frac{1}{\beta_k} \{ \sinh(\beta_k L) \cos(\beta_k L) + \cosh(\beta_k L) \sin(\beta_k L) \}$$

$$Y = \frac{1}{4\beta_k} \{ \sinh(2\beta_k L) - \sin(2\beta_k L) \} \\ - \frac{1}{\beta_k} \{ \cosh(\beta_k L) \sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L) \cos(\beta_k L) \}$$

$$Z = \frac{1}{2\beta_k} \{ \sinh(\beta_k L) - \sin(\beta_k L) \}^2$$

$C_T/m = 2\zeta_k \omega_k$ 로서, 모드수 k 에 대한 감쇠비(ζ_k)는 고유진동수(ω_k)를 이용하여 표현하면 아래와 같다.

$$\zeta_k = \frac{C_T}{2\sqrt{mK_T}} \left[1 + \frac{E_P I}{K_T} \beta_k^4 \right]^{-1/2} \quad (3.34)$$

식 (3.31)에 ω_k 와 ζ_k 을 대입하여 정리하면, $q_k(t)$ 에 대한 다음 식이 얻어진다.

$$\ddot{\bar{q}}_k(t) + 2\zeta_k \omega_k \dot{\bar{q}}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = Q_k(t) \quad (3.35)$$

여기서,

$$Q_k(t) = \frac{1}{mL_k} \int_0^L \phi_k(y) [C_T \dot{w}_g(y, t) + K_T w_g(y, t)] dy \quad (3.36)$$

$Q_k(t)$ 는 시간 t 와 모드 k 에서 지반으로부터 매설관에 전달된 모든 힘의

합을 나타내며, 식 (3.36)에 지진 지반 변위($w_g(y,t)$)를 대입하면 다음과 같다.

$$Q_k(t) = \frac{1}{mL_k} \int_0^L \phi_k(y) \left[C_T \bar{\omega} H(t - \frac{y}{V}) \cos(\bar{\omega}t - \bar{\omega} \frac{y}{V}) + K_T H(t - \frac{y}{V}) \sin(\bar{\omega}t - \bar{\omega} \frac{y}{V}) \right] dy \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} A_k &= \int_0^{L_t} \cos(\bar{\omega} \frac{y}{V}) \phi_k(y) dy \\ &= -\frac{M+1}{\beta_k^2 + (\frac{\omega}{V})^2} \left\{ \beta_k \sinh(\beta_k L_t) \cos(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t) + \frac{\bar{\omega}}{V} \cosh(\beta_k L_t) \sin(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{\omega}{V} + \beta_k} \left\{ M \sin(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t + \beta_k L_t) + \cos(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t + \beta_k L_t) - 1 \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{\omega}{V} - \beta_k} \left\{ M \sin(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t - \beta_k L_t) - \cos(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t - \beta_k L_t) + 1 \right\} \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} B_k &= \int_0^{L_t} \sin(\bar{\omega} \frac{y}{V}) \phi_k(y) dy \\ &= \frac{1}{\beta_k^2 + (\frac{\omega}{V})^2} \left\{ \beta_k \cosh(\beta_k L_t) \sin(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t) - \frac{\bar{\omega}}{V} \sinh(\beta_k L_t) \cos(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t) \right\} \\ &\quad - \frac{M}{\beta_k^2 + (\frac{\omega}{V})^2} \left\{ \beta_k \sinh(\beta_k L_t) \sin(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t) - \frac{\bar{\omega}}{V} \cosh(\beta_k L_t) \cos(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t) + \frac{\bar{\omega}}{V} \right\} \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{\omega}{V} + \beta_k} \left\{ M \cos(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t + \beta_k L_t) - \sin(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t + \beta_k L_t) - M \right\} \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{\omega}{V} - \beta_k} \left\{ M \cos(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t - \beta_k L_t) + \sin(\frac{\bar{\omega}}{V} L_t - \beta_k L_t) - M \right\} \end{aligned} \quad (3.39)$$

식 (3.35)의 해는 Duhamel 적분공식으로부터 결정된다.

$$q_k(t) = \int_0^t h_k(t-\tau)Q_k(\tau)d\tau \quad (3.40)$$

$$\text{여기서, } h_k(t) = \frac{1}{\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2}} e^{-\zeta_k \omega_k t} \sin(\omega_k \sqrt{1-\zeta_k^2} t) \quad (3.41)$$

축방향과 동일한 방법으로 Simpson 법칙에 따라 적분하여 전개하면 축 직각방향에 대한 일단고정-일단자유 단부 경계조건에 대한 변위($w_T(y,t)$), 곡률($x_T(y,t)$), 횡변형률($\epsilon_T(y,t)$) 산정식은 각각 식 (3.42), 식 (3.43), 식 (3.44)로 유도되어진다.

$$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\} \quad (3.42)$$

$$x_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\} \quad (3.43)$$

$$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ -\frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\} \quad (3.44)$$

다른 단부 경계조건에 대해서 동일한 방법으로 수식을 유도한 후 Table 3.3에 수록하였다. 양단roller 단부 경계조건에 대해선 Larbi(1995)에 의해 제안된 바 있다.

Table 3.3 Displacement and Bending Strain in Transverse Vibration

Classification		Result
Free Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
Fixed Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
Fixed Free Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ - \frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ - \frac{\sin(\beta_k L) + \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) + \cos(\beta_k L)} \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$
Guided Ends (Larbi, 1995)	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} x_T(y,t) = - \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(k-1)\pi}{L} \right)^2 \cos \frac{(k-1)\pi y}{L} q_k(t)$
Simply Supported Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} x_T(y,t) = - \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$
Supported Guided Ends	Displacement	$w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$
	Bending Strain	$\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} x_T(y,t) = - \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(2k-1)\pi}{2L} \right)^2 \sin \frac{(2k-1)\pi y}{2L} q_k(t)$

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

* Guided Ends(양단몰려) ; Simply Supported Ends(양단힌지) ; Supported-Guided Ends(일단힌지-일단몰려)

4. 매설관의 동적응답

4.1 ADRP 매설관 동적해석 프로그램

관 단부 경계조건에 따라 매설관의 축방향에 대한 변위, 변형률 산정식과 축직각방향에 대한 변위, 곡률, 휨변형률 산정식을 3장에서 유도하였다. 이들 값을 손쉽게 산정하기 위해 엑셀이 활용 가능한 객체지향언어인 비주얼 베이직을 이용하여 매설관의 동적응답 해석프로그램(Program for Analysis of Dynamic Response of Buried Pipeline Considering End Conditions), ADRP 프로그램을 개발하였다. ADRP 프로그램의 흐름도는 Fig. 4.1과 같으며 ADRP 프로그램 중 여러 가지 단부 경계조건에 대한 매설관의 동적응답을 구할 수 있는 소스 프로그램은 부록에 수록하였다.

ADRP 프로그램을 이용하면 매설관의 동적해석에 대한 대부분의 주요 변수가 일목요연하게 조사되어질 수 있으며 필요한 변수들만 주어진다면 단부 경계조건에 따른 매설관의 축방향 및 축직각방향 동적응답을 쉽게 산정할 수 있다. 이와 같이 기존 연구를 통해 알려진 매설관의 설계자료를 이용하여 동적응답을 미리 결정하는 것은 설계에 많은 도움을 줄 수 있다.

매설관의 동적응답이 수행되어진 ADRP 프로그램의 해석과정 화면을 Fig. 4.2~Fig. 4.9에 나타내었다. 먼저 2장과 3장에서 수행되어진 단부 경계조건에서의 축방향 및 축직각방향의 자유진동과 강제진동에 대한 수식을 동적응답 코딩하였으며, Fig. 4.2는 프로그램의 초기화면을 나타낸 것이다. 프로그램의 흐름도에 따라 입력, 해석조건, 실행, 응답스펙트럼 아이콘으로 설정하였고 초기화면에서 자료 불러오기 및 그래프를 동시에 실행되도록 하였다. Fig. 4.3은 매설관의 동적해석을 위한 자료를 입력하는 화면으로서 지반물성치인 축방향 및 축직각방향의 지반강성과 감쇠비, 매설관

의 물성치인 탄성계수, 길이, 직경, 단면적, 관성모멘트, 질량 등이 있으며, 지진파에 대한 자료로서 파장과 전파속도 및 해석위치와 해석시 시간간격의 입력 등으로 구성되어진다. Fig. 4.4는 해석조건에 대한 아이콘의 실행 화면이며, 매설관의 경계조건에 대한 선택과 동적응답에 대한 선택을 지정한다. 단부조건으로는 축방향에 대해서 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유와 축직각방향에 대해서 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러로 매설관의 경계조건을 선택할 수 있다. 또한 동적응답의 특징인 일시적 및 정상상태 응답의 해석조건과 축방향 및 축직각방향의 변위, 곡률, (휨)변형률 산정을 선택할 수 있다. 기타 조건으로서 모드수와 시간에 따른 변위 및 변형률응답도 선택할 수 있다. Fig. 4.5는 프로그램의 실행화면으로서 입력자료와 해석조건자료에 대한 결과를 보여준다. Fig. 4.6은 응답스펙트럼을 할 수 있는 화면이며, 지진기록은 실시간으로 인터넷에서 얻을 수 있고 응답스펙트럼을 얻기 위한 감쇠계수, 고유주기, 시간간격, 데이터 갯수로 입력되어진다. Fig. 4.7은 프로그램의 실행 후 종료를 알려주는 화면이다. Fig. 4.8은 응답스펙트럼 결과를 수치와 그래프로 보여주는 화면이다. 또한 인터넷에서 얻은 지진기록을 엑셀에서 변환하여 자료 불러오기 아이콘 실행으로 화면에 수치적으로 보여주며 그래프 아이콘 실행으로 화면상에 그래프를 보여준다. Fig. 4.9는 ADRP 프로그램을 통해 얻어진 응답결과를 저장 경로지정으로 엑셀 프로그램에서 볼 수 있도록 하여 더욱 다양한 해석과 분석을 할 수 있도록 하였다.

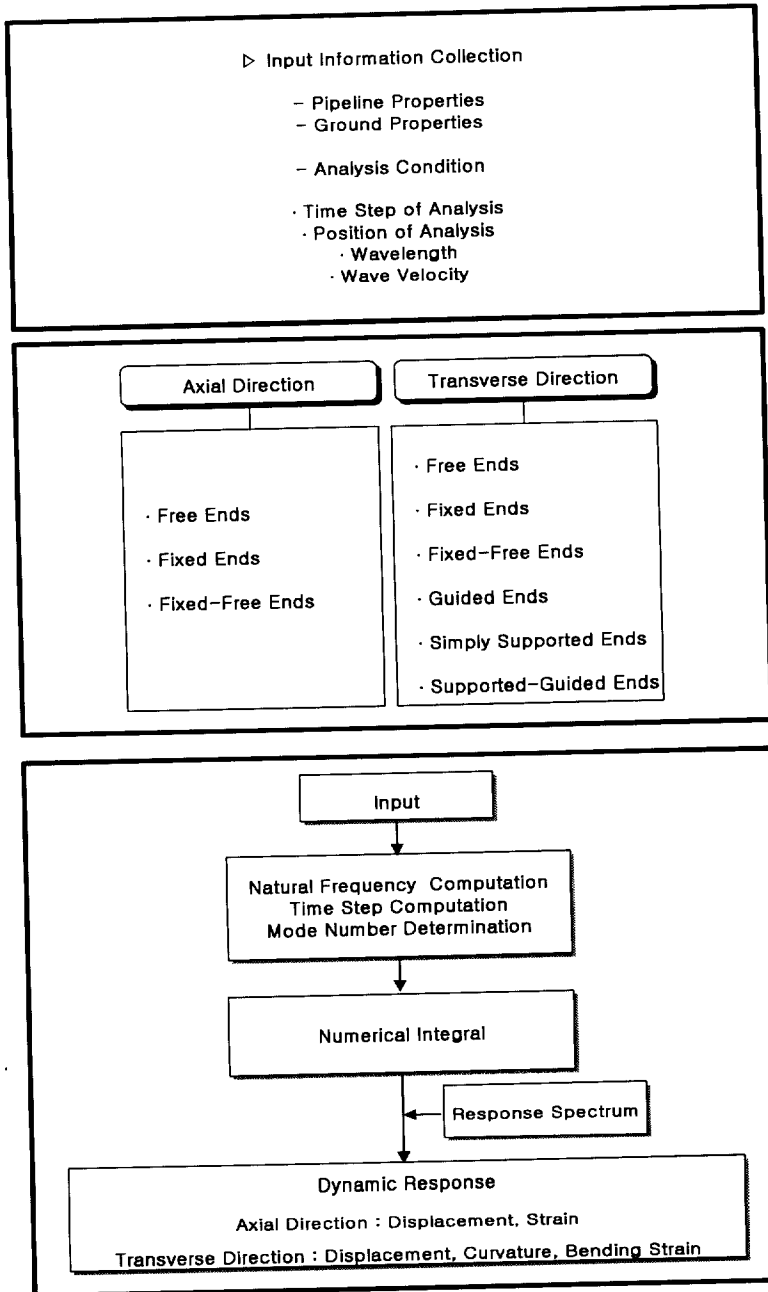


Fig. 4.1 Flow Chart of ADRP Program

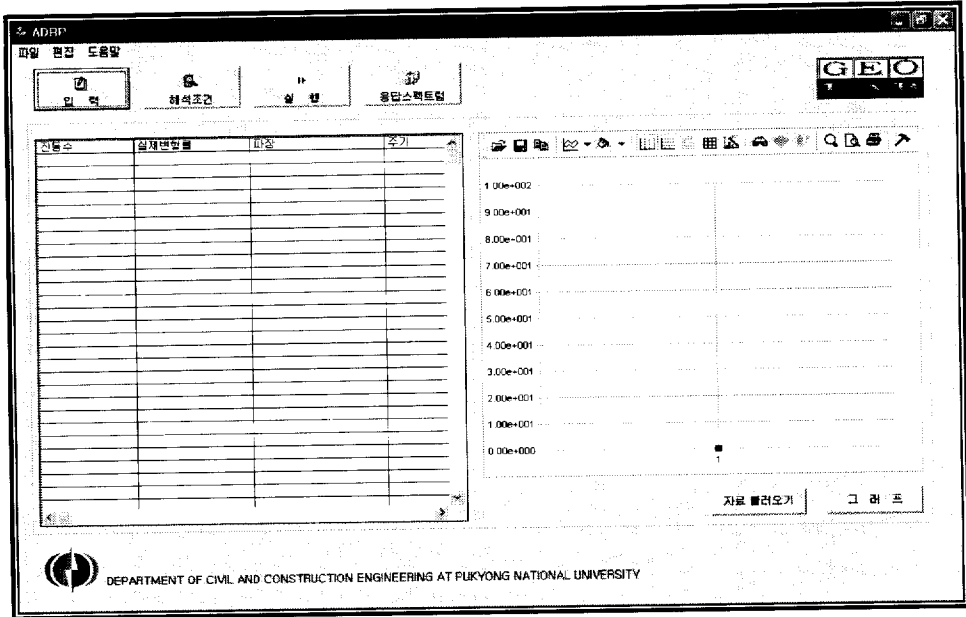


Fig. 4.2 Initial Screen of ADRP Program

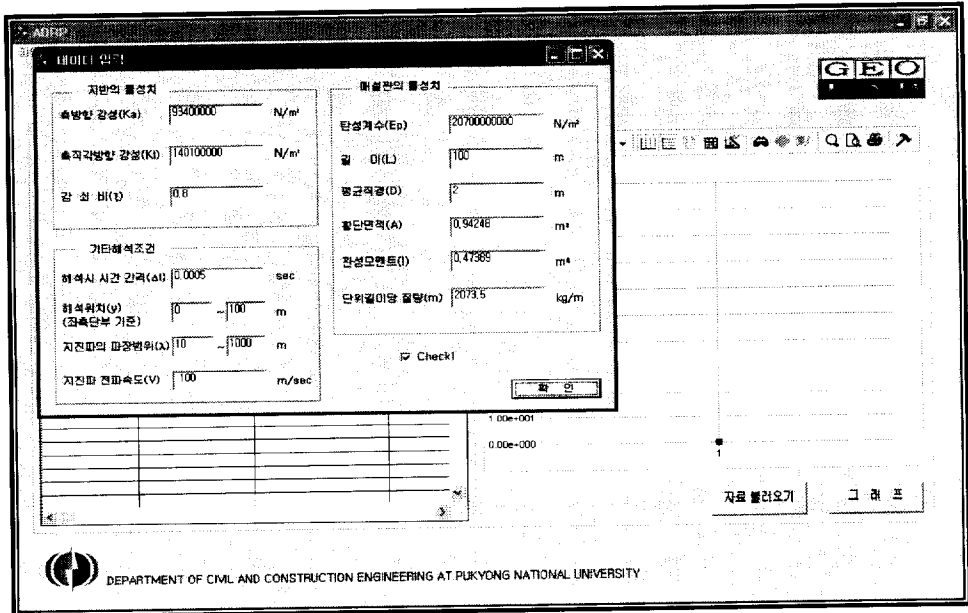


Fig. 4.3 Screen of Input Data

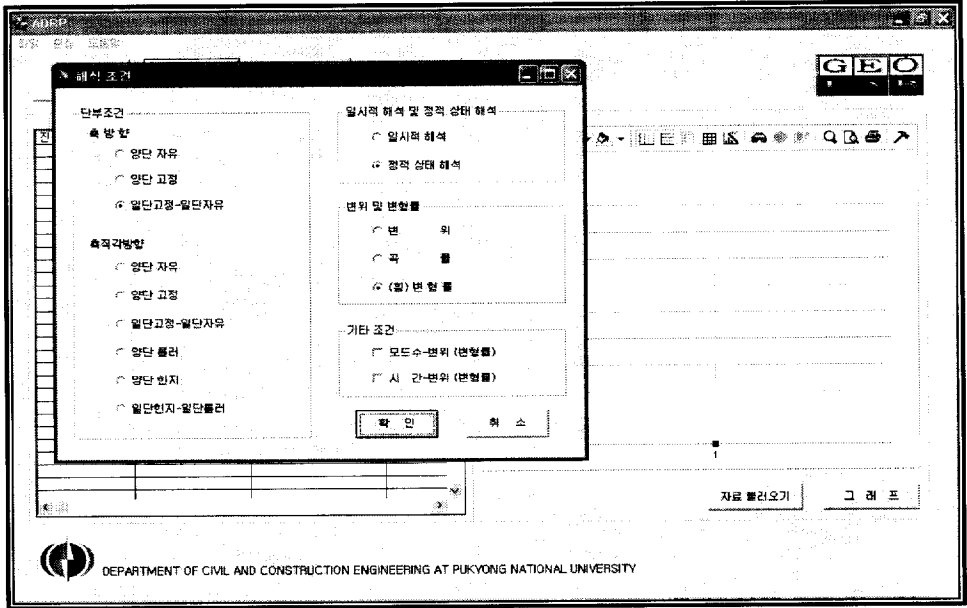


Fig. 4.4 Screen of Analysis Condition

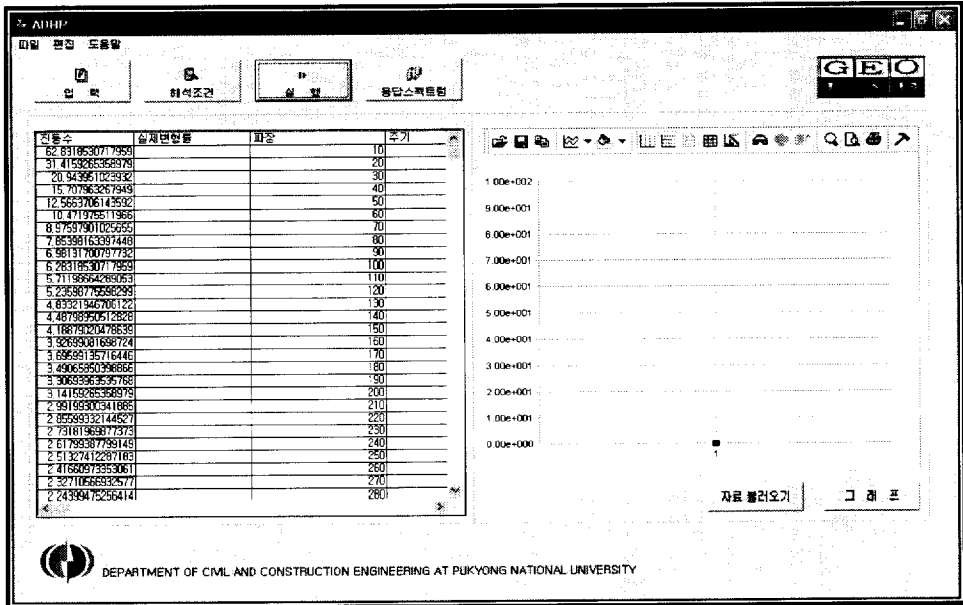


Fig. 4.5 Screen of Program Operating

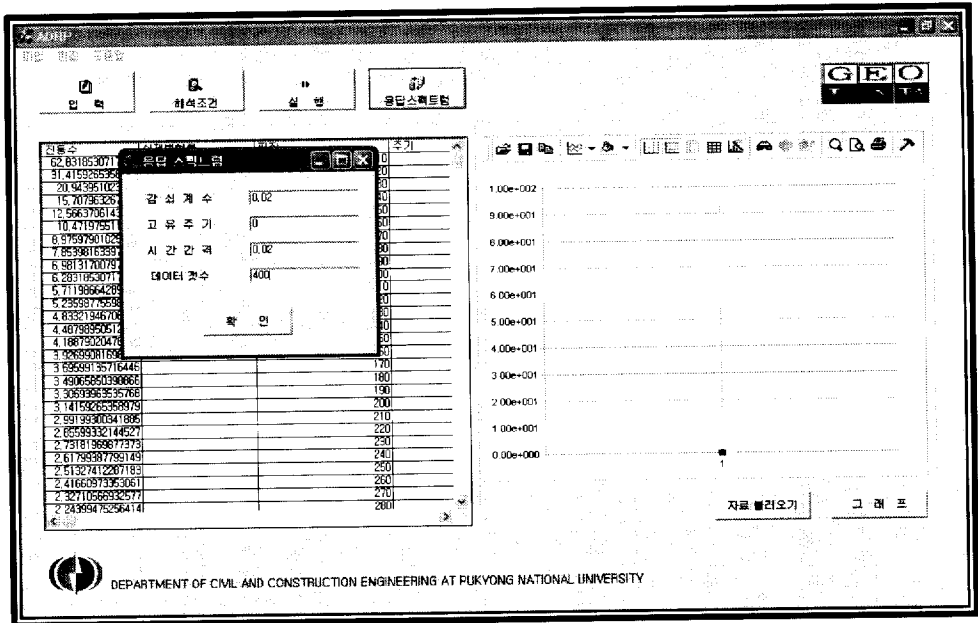


Fig. 4.6 Screen of Response Spectrum

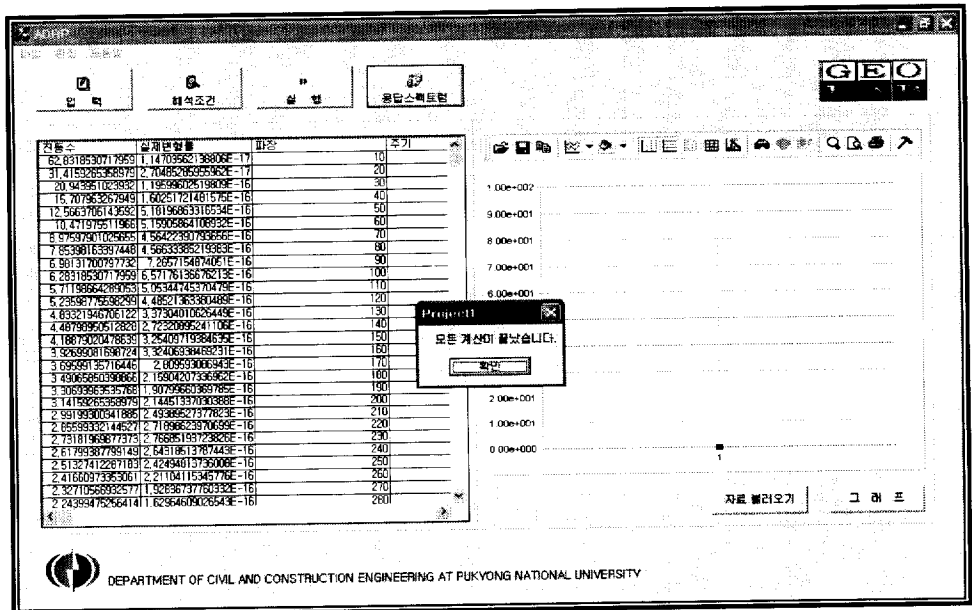


Fig. 4.7 Screen of Output Data

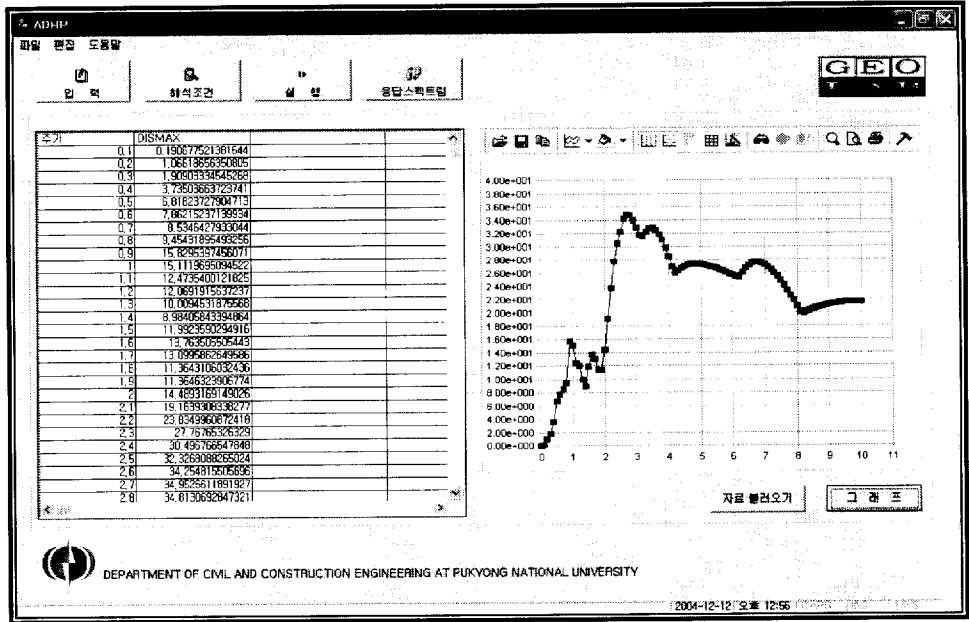


Fig. 4.8 Screen of Response Spectrum Output

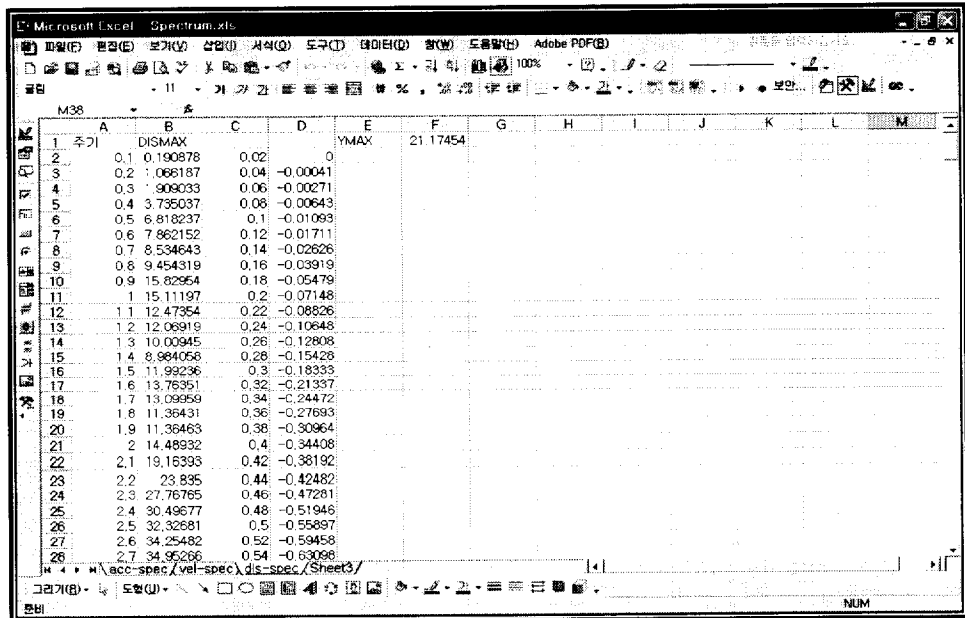


Fig. 4.9 Screen of Excel

4.2 해석결과의 검증

4.2.1 Ogawa 등 (2001)의 제안식

4.2.1.1 최대 지반 변형률

흡입자의 거동은 파형태에 의존적이며 파의 진행방향에 대해 축방향 성분과 축직각방향 성분으로 분리될 수 있다. 일반적으로 심도가 얇은 매설관에 대해선 표면파인 Rayleigh파가 가장 영향을 많이 미치는 것으로 알려져 있다.

Ogawa 등(2001)은 지진파를 수평방향으로 정현파 형태의 파가 전파된다고 가정하여 최대 지반 변형률(ϵ_G)을 식 (4.1)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h \quad (4.1)$$

여기서, L : 파장, U_h : 지반 변위

4.2.1.2 매설관의 축방향 변형률

Ogawa 등(2001)은 매설관을 무한 지반에 놓인 양단자유 단부조건인 관으로 단순화된 모형을 사용하였으며, 매설관의 축방향에 대한 힘의 평형방정식은 D'Alembert의 원리에 근거하여 식 (4.2)와 같이 표현하였다.

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = K_1 (u_G - u) \quad (4.2)$$

여기서, u : 매설관의 축방향 변위

u_G : 축방향 지반 변위

ρ : 매설관의 밀도

E : 매설관의 탄성계수

K_1 : 축방향 등가 스프링 계수

Ogawa 등(2001)은 매설관의 관성에 의한 영향은 무시하고 지반과 매설관의 변위비를 나타내는 변환계수, α_0 에 의해 양단자유 단부조건을 가진 매설관의 변형률(ϵ_s)을 식 (4.3)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_s = \alpha_0 \epsilon_G \quad (4.3)$$

여기서,
$$\alpha_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L_a}\right)^2}$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}}$$

L_a : 매설관 축방향으로 전파되는 파의 파장

4.2.2 해석결과의 비교

Ogawa 등(2001)의 지반변형률과 양단자유 단부조건을 가진 매설관에 대한 축방향 변형률 산정과 본 연구에서 제안된 일단고정-일단자유, 양단자유, 양단고정 단부조건을 가진 매설관의 축방향 변형률 산정식에 의해 구해진 결과를 비교하였다. El Centro 지진 기록(Fig. 4.10)을 해석에 적용하였으며 El Centro 지진의 변위응답 스펙트럼은 Fig 4.11과 같다. 지반변위 응답스펙트럼은 본 연구에서 개발한 전산 프로그램(ADRP)으로 쉽게 구할 수 있으며, 응답스펙트럼이란 특정 방향의 지반운동을 받고 있는 구조물의 최대응답을 구조물의 고유진동수(혹은 고유주기)별로 그려 놓은 것이다. Fig. 4.10의 El Centro 지진 가속도 기록을 이용하여 주기에 따른 지반변위 응답스펙트럼을 나타낸 것이 Fig 4.11이며, 2.12초에 발생한 최대 가속도를 포함할 수 있도록 지진기록을 시간 8초에 대해 0.02초씩 기록된

데이터를 400개 이용하여 응답스펙트럼을 구하였다. 해석에 이용된 지진파의 전파속도는 100m/sec로 하였으며, 매설관의 기하학적 특성과 재료적 특성은 Table 2.5의 자료를 이용하였다.

Ogawa 등(2001)의 제안식을 이용하여 주기 1sec일 때 최대 지반변위 (U_h)는 Fig 4.11로부터 0.039161m임을 알 수 있고, 주기 1sec에 대한 파장과 진동수는 각각 식 (4.4)와 식 (4.5)와 같이 산정할 수 있다.

$$L = L_a = V \cdot T = 100 \times 1 = 100 \text{ m} \quad (4.4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{1} = 6.283 \text{ rad/sec} \quad (4.5)$$

따라서 최대 지반 변형률은 식 (4.1)을 이용하여 식 (4.6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h = \frac{2\pi \times 0.039161}{100} = 2.461 \times 10^{-3} \quad (4.6)$$

변환계수 α_0 는 식 (4.7)과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L_a} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\sqrt{\frac{9.34 \times 10^7}{2.07 \times 10^{10} \times 0.94248}} \times 100} \right)^2} = 0.548 \quad (4.7)$$

따라서 주기 1sec일 때 매설관의 최대 축방향 변형률(ϵ_S)은 식 (4.8)과 같이 계산된다.

$$\epsilon_S = \alpha_0 \epsilon_G = 0.548 \times 2.461 \times 10^{-3} = 1.349 \times 10^{-3} \quad (4.8)$$

Table 4.1은 주기 1sec일 때 관 중심부에서 축방향 변형률을 산정한 값을 나타내고 있다. 양단자유 단부조건을 가진 매설관의 변형률은 0.036571로 산정되었다. 따라서 실제 매설관의 변형률은 여기 주기 1sec에 해당하는 지반변위를 곱함으로써 산정되며 $0.036571 \times 0.039161 = 1.432 \times 10^{-3}$ 이 된다. 그리고 양단고정 단부조건에선 매설관의 변형률은 0.052149이며, 실제 매설관의 변형률은 2.042×10^{-3} 이 된다. 또한 일단고정-일단자유 단부조건인 경우는 매설관의 변형률은 0.035494이며 실제 매설관의 변형률은 1.390×10^{-3} 이 된다.

Table 4.1 Comparison of Axial Strain (T=1sec)

	Ogawa et al(2001)	Free Ends	Fixed Ends	Fixed-Free Ends
Axial Strain	1.349×10^{-3}	1.432×10^{-3}	2.042×10^{-3}	1.390×10^{-3}

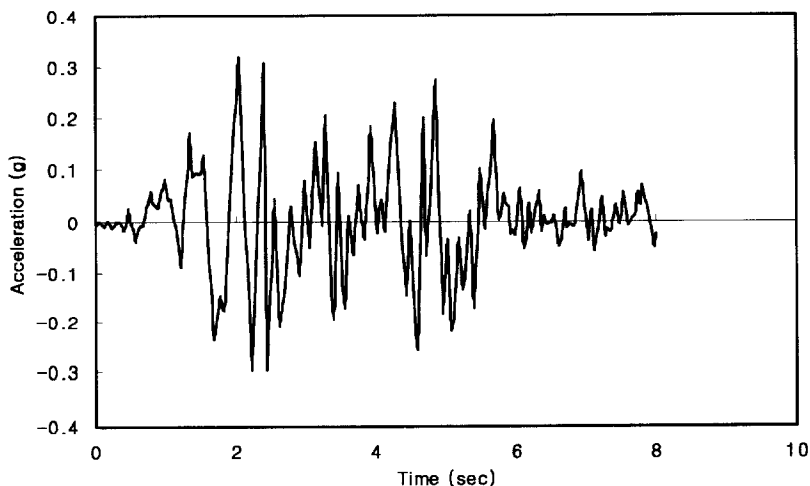


Fig. 4.10 Acceleration Record of El Centro 1940

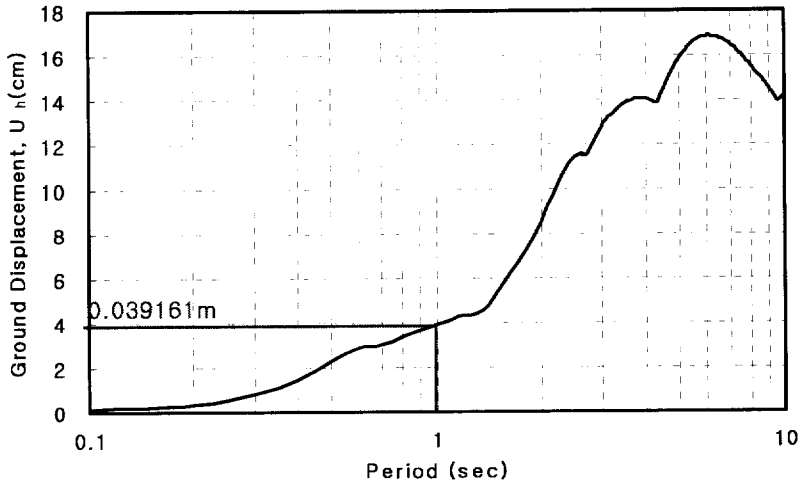


Fig. 4.11 Ground Displacement Spectrum, El Centro 1940

Fig. 4.12는 이렇게 산정되어진 계산값을 그래프로 도시한 것이며, 지반 변위 응답스펙트럼의 주기에 대해 지진파의 진동수에 따른 축방향 변형률을 나타내고 있다.

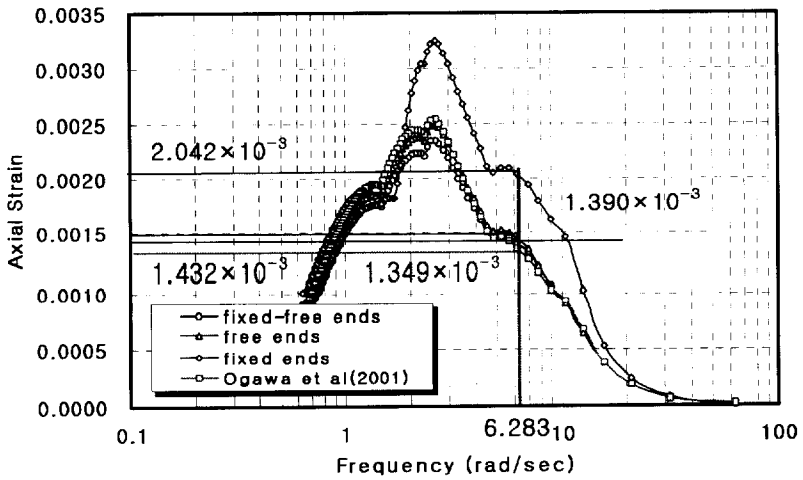


Fig. 4.12 Comparison of Axial Strain (T=1sec)

4.2.2.1 축방향 변형률 및 응력 비교

Table 4.2a는 각 단부조건에서 매설관 중심부의 축방향 변형률을 비교한 표로서 최대 축방향 변형률이 나타나는 주기는 Fig. 4.12에서 2.4sec로 나타남을 알 수 있다. 매설관 중심부에 대한 축방향 변형률을 비교하면, Ogawa 등(2001)에 의해 산정된 값을 기준으로 양단자유 경계조건에서는 1.57%, 양단고정 경계조건에서는 27.91%, 일단고정-일단자유 경계조건에서는 7.24%의 차이를 나타내고, 매설관의 중심부에 대한 축방향 응력은 487.7~672.6 kg/cm²으로 나타났다.

이와 같이 Ogawa 등(2001)이 제시한 양단자유 경계조건의 변형률 산정식과 본 연구에서 제안된 양단자유 경계조건 변형률 산정식의 결과는 1.57%의 차이를 보이는 것으로 본 해석의 정확성을 확인할 수 있다.

또한 관 단부조건에 따른 최대 축방향 변형률, 최대응력, 발생위치도 산정하여 Table 4.2b에 나타내었으며 양단자유에서는 중앙부에서, 양단고정에서는 끝단부에서, 일단고정-일단자유에서는 고정단부에서 최대변형률이 발생되었고 최대 축방향 응력은 517.6~2888.6 kg/cm²으로 나타났다. 이와 같이 매설관의 단부 경계조건이 상이함에 따라 최대변형률 발생위치의 차이에 따른 축방향 응력값이 매설관의 중앙부 응력값의 범위와 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 El Centro 지진에 의해 발생된 응력을 검토하면 모두 파괴되는 것으로 나타났다

Table 4.2a Comparison of Axial Strain and Stress in the Middled of Buried Pipeline

Classification	Ogawa et al (2001)	Free Ends	Fixed Ends	Fixed-Free Ends
Strain	2.540×10^{-3}	2.500×10^{-3}	3.249×10^{-3}	2.356×10^{-3}
Stress (kg/cm ²)	525.9	517.6	672.6	487.7

Table 4.2b Comparison of Maximum Axial Strain and Stress along the buried Pipeline

Classification	Position (from left end)	Maximum Strain	Maximum Stress (kg/cm ²)	Allowable Stress (f _{ck} , kg/cm ²)	Judgement
Free Ends	50 m	2.500×10^{-3}	517.6	240	Break
Fixed Ends	100 m	1.395×10^{-2}	2888.6	240	Break
Fixed-Free Ends	0 m	1.047×10^{-2}	2167.1	240	Break

4.2.2.2 축직각방향 휨변형률 및 휨응력 비교

Table 4.3a는 각 단부조건에서 매설관 중심부의 최대 축직각방향 휨변형률을 제시한 표이며, 휨응력값은 73.8~169.7 kg/cm²으로 나타났고 매설관 축직각방향에 대한 최대 휨변형률과 휨응력을 각 단부조건에 대해 구한 결과는 Table 4.3b에 나타냈으며 최대값 발생위치가 각 단부조건에 따라 달라짐을 알 수 있으며 매설관의 좌측단부를 기준으로 양단자유에서는 30m, 양단고정에서는 끝단부, 일단고정-일단자유에서는 고정단, 양단롤러에서는 끝단부, 양단힌지에서는 5m, 일단힌지-일단롤러에서는 5m 지점에서 최대 휨변형률과 휨응력이 발생하였다. El Centro 지진에 의해 발생된 응력을 검토하면 양단자유 경계조건을 제외하고는 모두 파괴되는 것으로 나타났다

Table 4.3a Comparison of Bending Strain and Stress in the Middled of Buried Pipeline

Classification	Free Ends	Fixed Ends	Fixed-Free Ends	Guided Ends	Simply Supported Ends	Supported Guided Ends
Strain	3.908×10^{-4}	8.200×10^{-4}	4.630×10^{-4}	3.595×10^{-4}	3.566×10^{-4}	3.602×10^{-4}
Stress (kg/cm ²)	80.9	169.7	95.8	74.4	73.8	74.6

Table 4.3b Comparison of Maximum Bending Strain and Stress along the Buried Pipeline

Classification	Position (from left end)	Maximum Bending Strain	Maximum Bending Stress (kg/cm ²)	Allowable Bending Stress (0.4f _{ck} , kg/cm ²)	Judgement
Free Ends	30 m	3.920×10^{-4}	81.1	96	Stability
Fixed Ends	100 m	4.446×10^{-3}	920.3	96	Break
Fixed-Free Ends	0 m	3.710×10^{-3}	768.1	96	Break
Guided Ends	100 m	6.750×10^{-4}	139.7	96	Break
Simply Supported Ends	5 m	6.705×10^{-3}	1387.9	96	Break
Supported-Guided Ends	5 m	5.754×10^{-3}	1191.1	96	Break

4.3 매설관의 동적 변위응답

여러 가지 단부 경계조건의 매설관에 대해서 축방향과 축직각방향에 대한 일시적 및 정상상태 변위응답을 검토하였다.

첫 번째 모드에 대한 지반-구조물의 상호작용에 의한 감쇠비(ζ_1)인 80%를 해석에 적용하였고 변위응답은 경계조건을 비교를 위하여 매설관의 중앙 지점에서 해석하였다. 전파속도(V)는 낮은 전파속도 100m/sec, 2개의 중간정도 전파속도인 300m/sec, 500m/sec, 높은 전파속도 2000m/sec 적용하였으며, 지반진동수(ω)는 중간 지반진동수 30rad/sec, 높은 지반진동수 100rad/sec를 적용하였다. 해석 결과는 Table 4.4~Table 4.9에 나타내었으며, 매설관의 변위응답은 지반변위 1m당의 응답으로서 무차원이다.

4.3.1 일시적 변위응답

일시적 응답은 매설관의 전장을 통과하기 전에 나타나는 동적응답으로 정의된다. 이것은 파가 매설관의 전장을 통과할 때까지 계속되며, 결과적으로 일시적 응답은 낮은 속도에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 또한 매설관이 정상상태에 도달하기 전에 몇 개의 진동을 받을 만큼 충분한 시간을 가지며 일시적 응답의 지속 시간보다 높은 진동수를 가진 지반 거동에서 더욱 뚜렷하게 나타난다.

축방향 진동과 축직각방향 진동은 주기와 입력 지반진동수에 의존하며 일시적 응답은 정상상태에 도달하기 전에 몇 개의 진동을 받게 될 것이다.

Table 4.4~Table 4.9에서, 일시적 응답은 매설관이 정상상태에 도달하기 전에 많은 진동을 받는 것을 보여주고 있다. 이것은 지반진동수가 높은 반면 전파속도가 낮을 경우에 발생한다. 이와 같이 일시적 응답은 파가 응답 해석 지점을 진동하는 순간에 발생한다.

매설관의 단부 경계조건이 다를 경우에는 변위의 크기도 달라짐을 알

수 있으며 축방향에 대한 일시적 응답에서 양단고정 > 양단자유 > 일단 고정-일단자유의 단부 경계조건 순으로 변위 응답이 크게 나타남을 알 수 있다. 축직각방향에 대한 일시적 응답에서는 양단롤러=양단힌지 > 일단힌지-일단롤러 > 양단자유 > 양단고정 > 일단고정-일단자유 단부 경계조건 순으로 변위응답이 크게 나타난다.

4.3.2 정상상태 변위응답

파가 매설관의 전장을 통과하면 응답은 정현파가 되고 일정한 진폭을 가진다. 이와 같이 파가 매설관의 전장을 통과한 후, 정현파 하중이 지속적으로 가해지는 상태의 동적응답을 정상상태 응답이라고 정의된다. 이것은 일정한 진폭과 지반진동수와 동일한 진동수에 의해 특징지어지며 파장이 증가함에 따라, 정상상태 응답은 증가한다. 매우 긴 장파에 있어 변위는 지반거동의 진폭과 동일한 최대 진폭에 도달하며, 매설관은 지반거동을 따른다는 것을 의미한다. 매설관의 단부경계조건이 다를 경우에는 일시적 응답에서와 같이 정상상태 응답에서도 변위의 크기는 달라지며 단부 경계조건에 따라 그 크기도 달라짐을 알 수 있다.

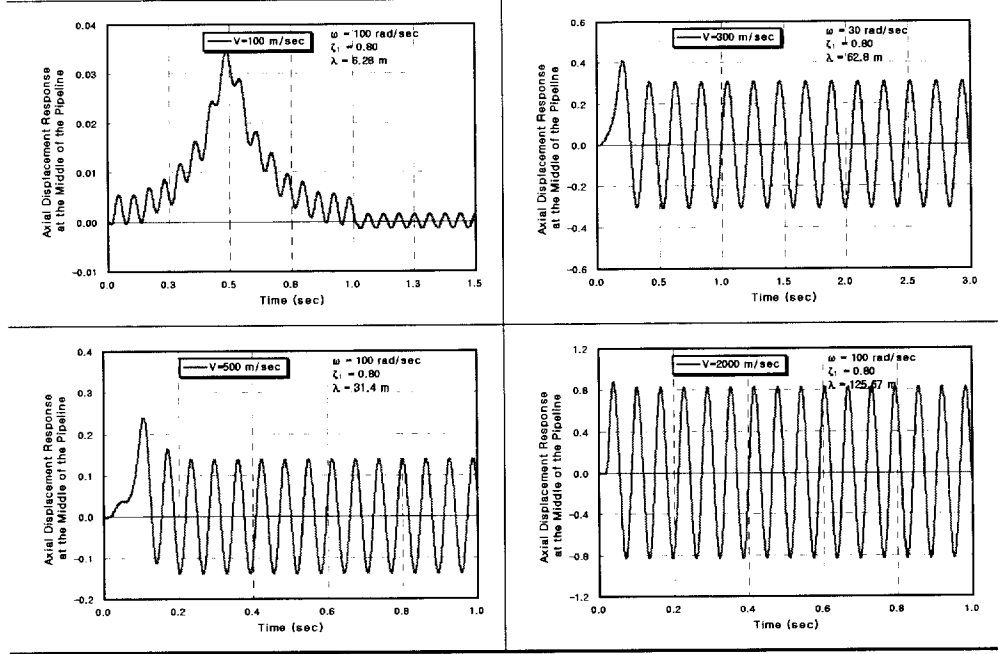
관 단부 경계조건에 따른 일시적 및 정상상태 변위응답을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 축방향 및 축직각방향에서 모든 단부 경계조건인 경우 낮은 전파속도 100m/sec와 높은 지반진동수 100rad/sec에서 일시적 응답이 크게 나타났다. 즉, 단파의 조건일수록 일시적 응답은 크게 나타난다.
- 2) 모든 단부 경계조건에서 파가 매설관의 전장을 통과한 후 매설관은 같은 크기의 일정한 진폭의 지반거동과 동일하게 진동하는 정상상태 응답을 나타낸다.
- 3) 관 단부 경계조건에 따라서 일시적 변위응답과 정상상태 변위응답은

달라지며 따라서 발생하는 변위의 크기도 달라진다.

Table 4.4 Displacement Response on the Free Ends

Axial Response on the Free Ends



Transverse Response on the Free Ends

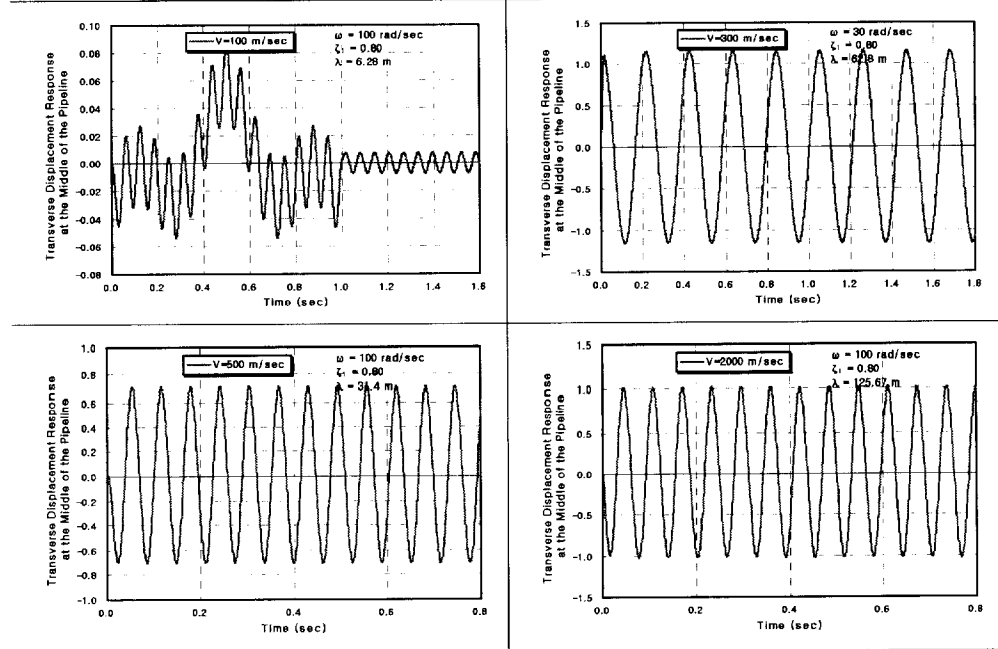
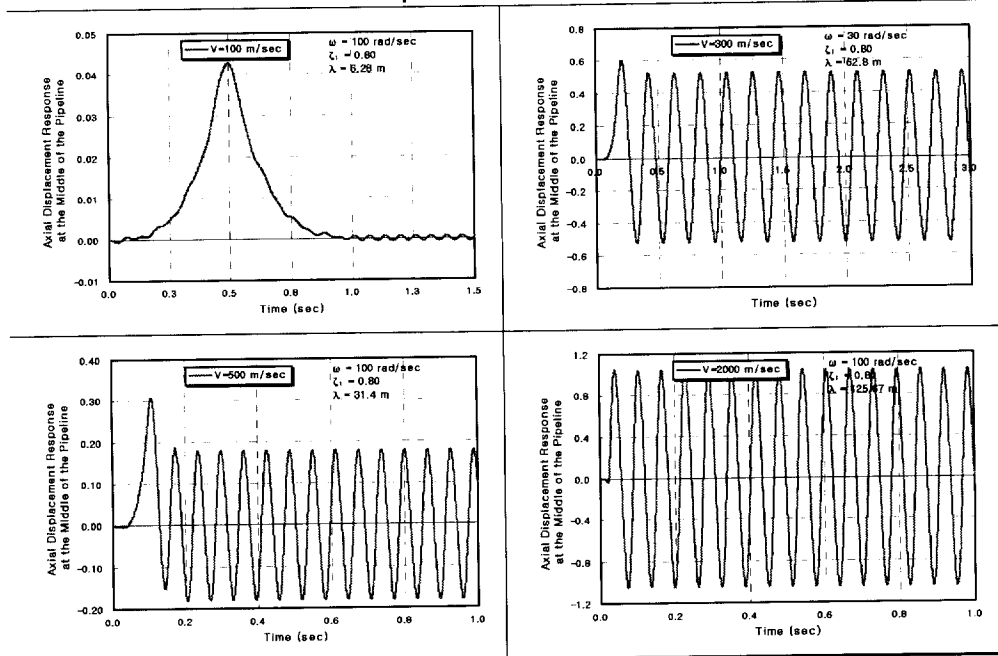


Table 4.5 Displacement Response on the Fixed Ends

Axial Response on the Fixed Ends



Transverse Response on the Fixed Ends

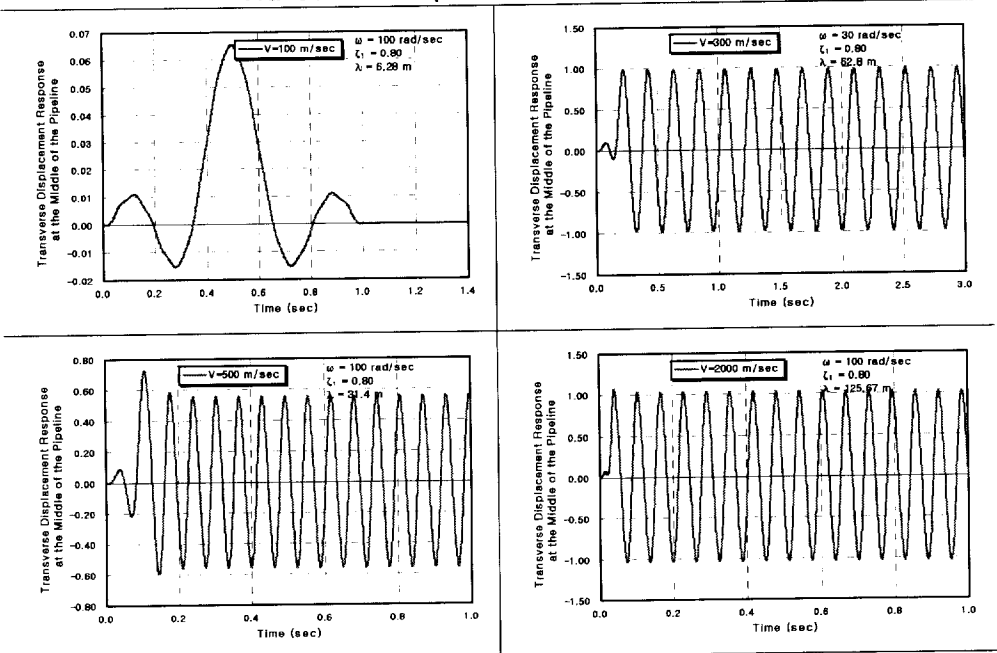
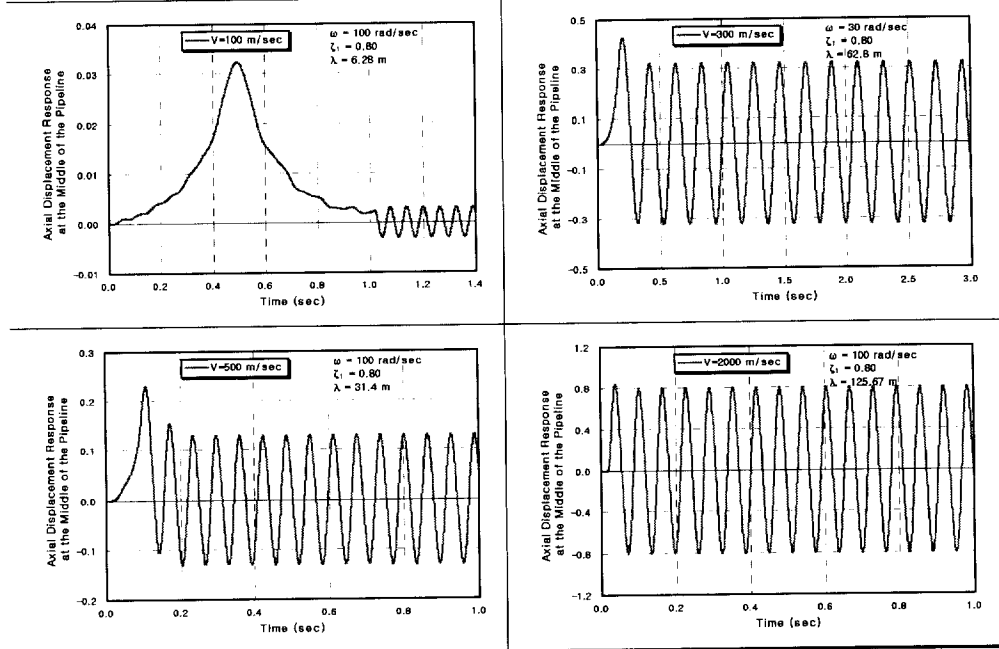


Table 4.6 Displacement Response on the Fixed-Free Ends

Axial Response on the Fixed-Free Ends



Transverse Response on the Fixed-Free Ends

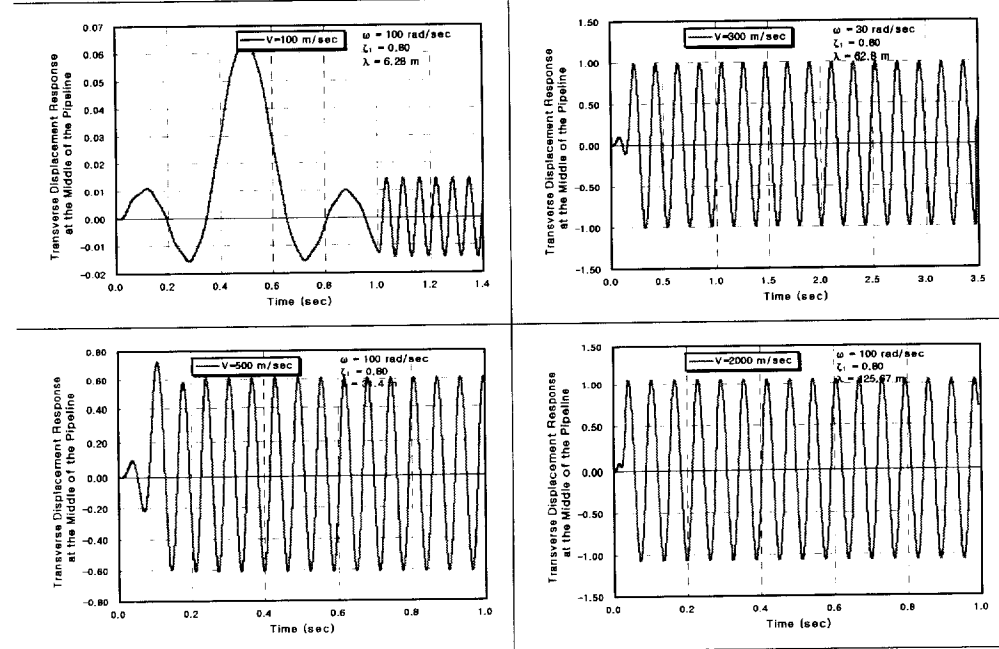


Table 4.7 Displacement Response on the Guided Ends

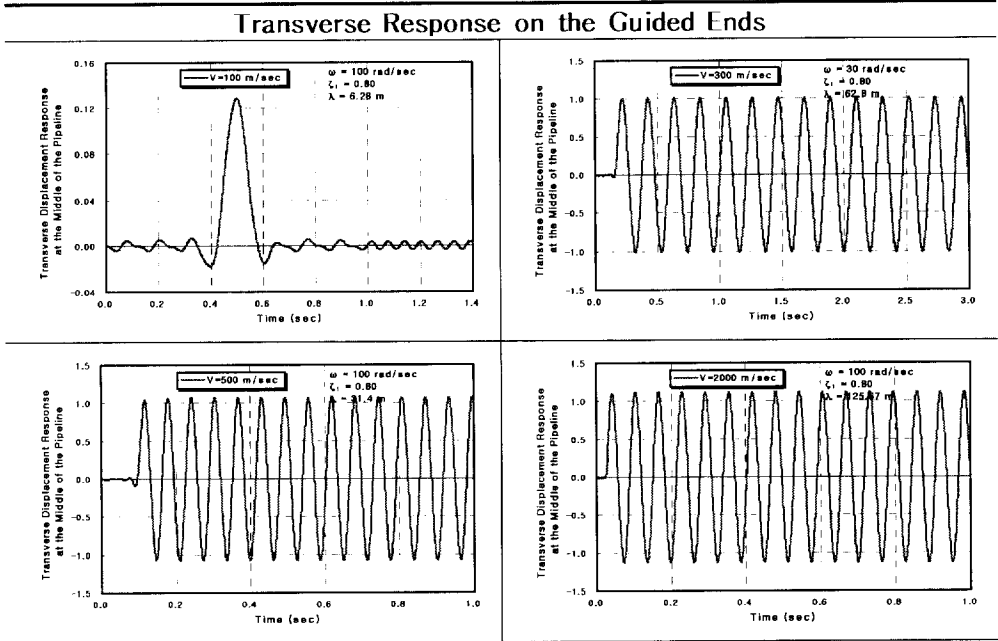


Table 4.8 Displacement Response on the Simply Supported Ends

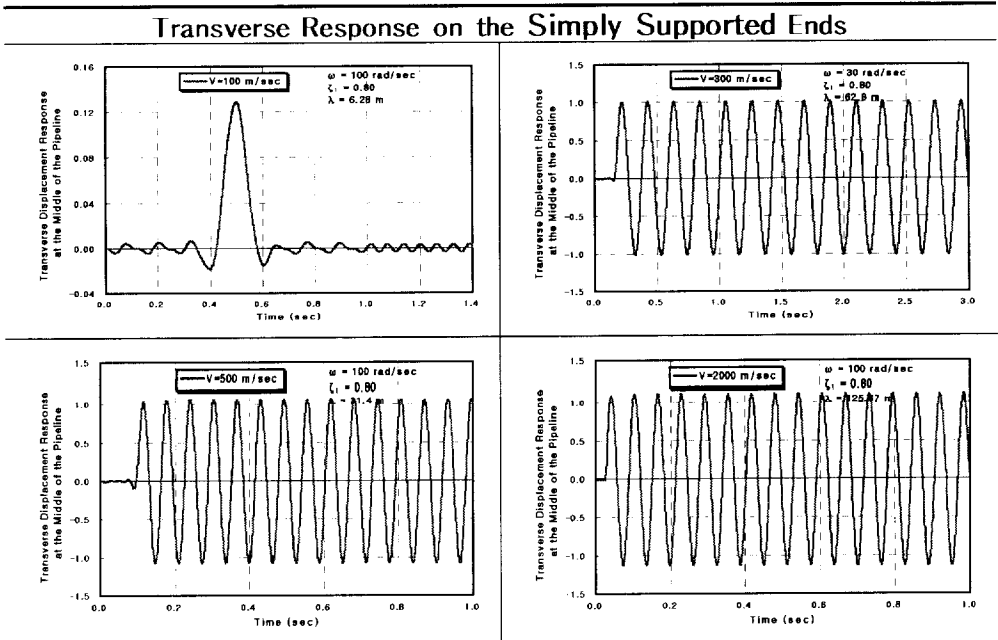
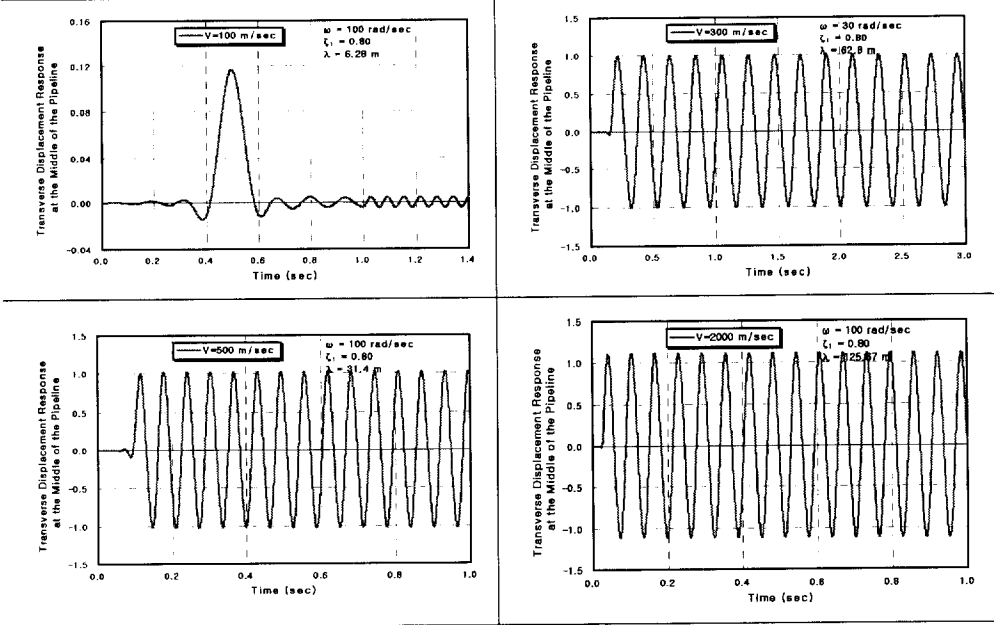


Table 4.9 Displacement Response on the Supported-Guided Ends

Transverse Response on the Supported-Guided Ends



4.4 매설관의 동적 변형률응답

본 절에서는 단부 경계조건에 따른 매설관의 일시적 및 정상상태에서 최대 변형률응답에 대한 동적해석을 수행하였다. 매설관은 4.3절에서 변위 응답 해석에서와 같이 관의 중앙부에서 관의 축방향과 축직각방향에 대해서 검토하였으며 그 결과를 Table 4.10에 나타내었다.

4.4.1 축방향 변형률응답

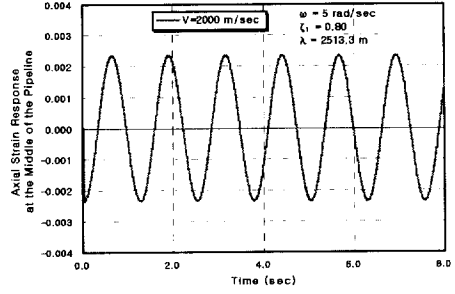
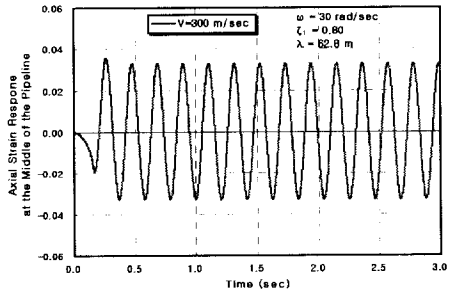
축방에 대해서 고려할 수 있는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부 경계조건에 대해서 전파속도(V), 300m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 30rad/sec, 지반 파장(λ), 62.8m와 전파속도(V), 2000m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 5rad/sec, 지반 파장(λ), 2513.3m를 적용하였고 지반과 관의 상호작용에 의한 감쇠비(ζ_1)는 0.8를 적용하여 해석하였다. 4.3절의 변위응답 해석과 동일한 경향을 확인할 수 있다. 즉 Table 4.10에서 나타낸 바와 같이 전파속도가 작을 때는 일시적 응답이 크게 산정되나 전파속도가 클 때에는 정상상태 응답이 지배적임을 알 수 있다. 관 단부 경계조건이 다를 경우에도 모두 비슷한 경향을 보임을 알 수 있으나 다뉴 경계조건이 달라질 경우 변형율의 크기는 달라질 수 있다.

4.4.2 축직각방향 휨변형률응답

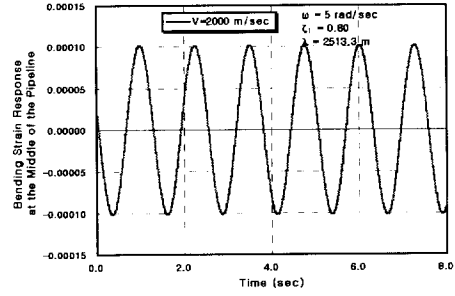
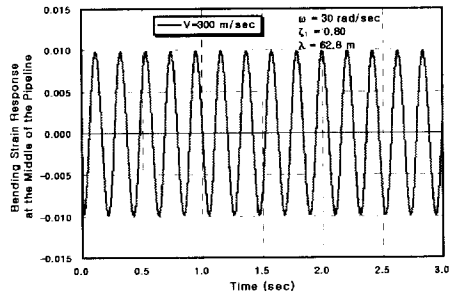
축직각방향에 대해서 고려할 수 있는 6가지 단부 경계조건에 대해 축방향에서와 동일한 조건을 적용하여 휨변형률을 경과시간에 따라 해석한 결과를 Table 4.10에 나타내었다. 매설관 중앙지점에서 휨변형률을 해석한 경우로서 관 단부 경계조건에 따라 휨변형률의 크기는 달라짐을 알 수 있으나 일시적 응답과 정상상태 응답의 양상은 축방향에서와 유사한 경향을 보이고 있다.

Table 4.10a Strain Time History Response

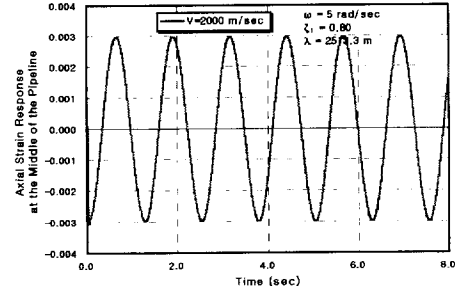
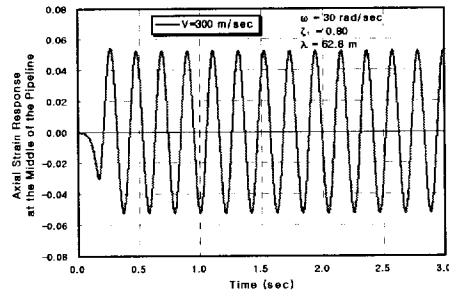
Axial Strain on the Free Ends (Axial Direction)



Bending Strain on the Free Ends (Transverse Direction)



Axial Strain on the Fixed Ends (Axial Direction)



Bending Strain on the Fixed Ends (Transverse Direction)

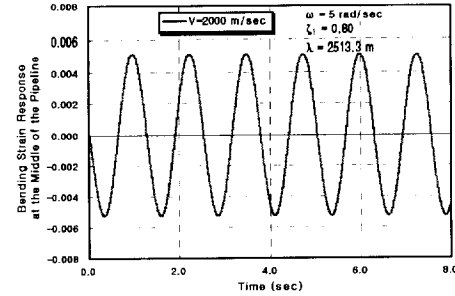
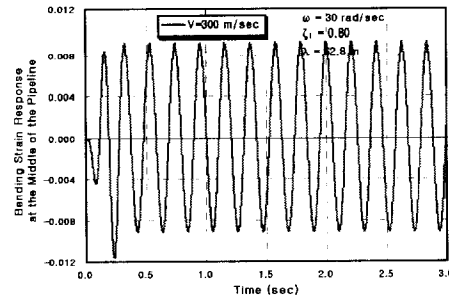
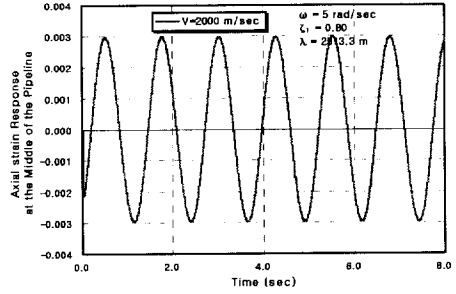
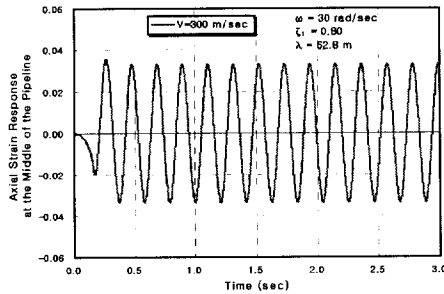
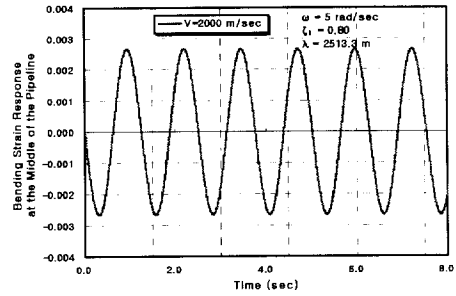
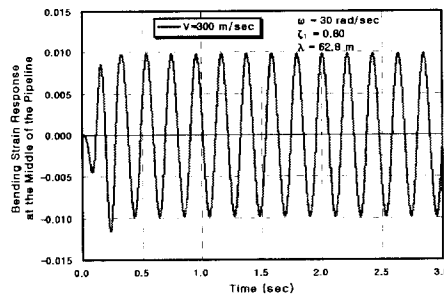


Table 4.10b Strain Time History Response

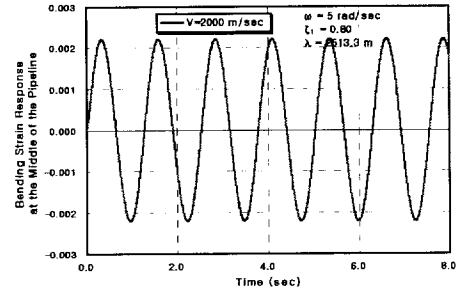
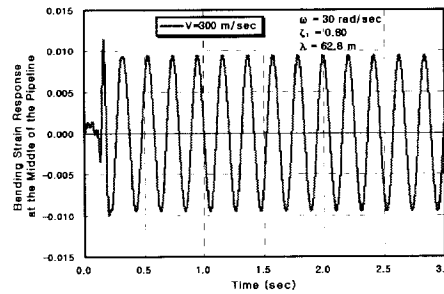
Axial Strain on the Fixed-Free Ends (Axial Direction)



Bending Strain on the Fixed-Free Ends (Transverse Direction)



Bending Strain on the Guided Ends (Transverse Direction)



Bending Strain on the Simply Supported Ends (Transverse Direction)

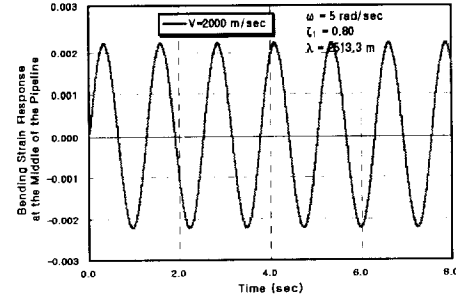
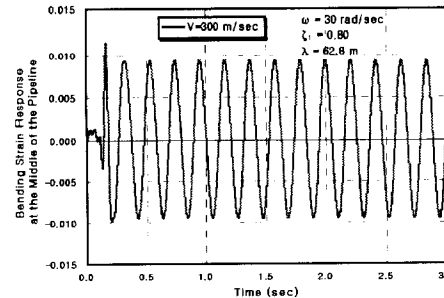
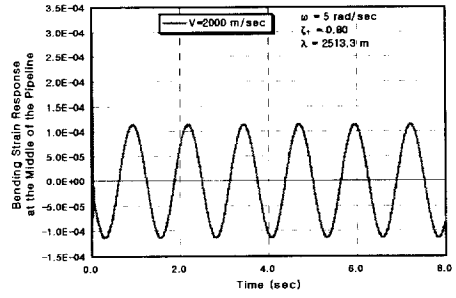
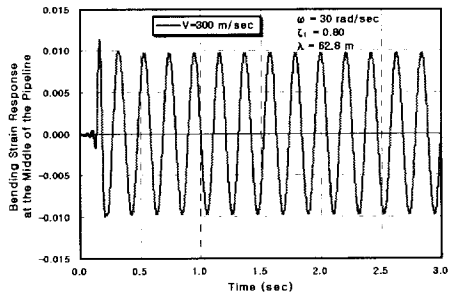


Table 4.10c Strain Time History Response

Bending Strain on the Supported-Guided Ends (Transverse Direction)



4.5 수치해석 결과의 정확성 인자

4.5.1 모드수의 영향

모드는 전체적인 계의 운동 형태를 구성하는 개개의 기본 운동 형태이며 계의 자유도가 유한개이면 유한개의 모드가 있고, 무한개의 자유도 즉, 연속체이면 무한개의 모드가 존재한다. 서로 다른 모드간에서는 직교성이 성립하는데, 이는 질량행렬과 강성행렬에 관한 직교성이다. 모드형상은 각 모드에 해당하는 계의 공간적인 운동 형상을 나타낸다.

연속계의 동적해석에서 중요한 고려사항은 응답을 정확하게 평가하는데 필요한 모드의 수이다. 단부 경계조건에서 축방향 및 축직각방향 변형률에 대한 해석은 동적응답을 평가하는데 필요한 모드의 수를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 낮은 전파속도 100m/sec, 중간 전파속도 500m/sec, 높은 전파속도 2000m/sec, 그리고 높은 지반진동수 100rad/sec를 적용하여 단부 경계조건에 따른 모드수의 영향에 대해서 검토하였다.

Table 4.11은 축방향 변형률을 구할 수 있는 양단자유, 양단고정, 일단 고정-일단자유 단부 경계조건에 대해서 Table 4.11(a)는 일시적 응답, Table 4.11(b)는 정상상태의 축방향 변형률응답을 나타낸 그림들이다. Table 4.12a은 축직각방향의 곡률을 구할 수 있는 6가지의 단부 경계조건에 대해서 일시적 응답, Table 4.12b는 축직각방향에 대한 정상상태 곡률 응답을 나타낸 그림들이다.

Table 4.11(a), (b)에 나타낸 바와 같이 축방향의 단부 경계조건에서 낮은 전파속도 100m/sec와 높은 지반진동수 100rad/sec인 경우 변형률응답이 32번째 모드에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 양단자유 경계조건에서 축방향 강제진동의 경우 해석시 매설관의 k번째 모드의 파장 ($2L/(k-1)$)과 지진파의 파장($2\pi V/\bar{\omega}$)이 같아질 때 공진현상이 발생한다. 따라서 공진이 발생하는 모드는 $k = \bar{\omega}L/\pi V + 1$ 로 산정된다. 이와

동일하게 양단고정 경계조건에서의 모드는 $k = \bar{\omega}L / \pi V$ 이며, 일단고정-일단자유 경계조건에서의 모드는 $k = \bar{\omega}L / \pi V + 1/2$ 로 나타났다. 예를 들면 30번째 모드수에서 변형률응답이 크게 일어나는 조건인 전파속도(V), 100m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$), 100rad/sec에 대하여 본 연구에서 수행된 매설관 길이(L), 100m를 적용하여 일단고정-일단자유 경계조건에 대해서 공진이 발생하는 모드수를 결정해 보면, $k = 100 \times 100 / \pi \times 100 + 1/2 = 32.3$ 으로서 32번째 또는 33번째 모드수가 된다. 이때 최대 변형률이 발생하게 된다.

축방향 강제진동시의 단부 경계조건에서 해석에 필요한 적절한 모드수는 추가 10개의 모드를 더해서 $k = \bar{\omega}L / \pi V + 11$ 번째 모드까지 포함하면 전반적인 동적거동 해석을 할 수 있게 된다.

Table 4.12a와 Table 4.12b에서와 같이 축직각방향 일단고정-일단자유, 양단자유, 양단고정 경계조건에서 강제진동의 경우 6번째 모드까지 증가를 보이다가 7번째 모드에서 거의 영향을 미치지 않는다. L_k 값은 식 (3.33)을 이용하여 산정할 수 있으며, 산정된 L_k 값은 7번째 모드 이후에서 소수점 오차로 인하여 0으로 수렴된다. 축직각방향 강제진동의 경우 모드수가 적어 모드수에 의한 영향을 평가하기에는 부족하나 대부분의 영향이 낮은 모드에서 나타난다는 기존의 연구(Datta, 1986)와 Table 4.12a 및 Table 4.12b에서 볼 수 있듯이 7번째 모드에서 영향이 작게 나타나므로 해석상 문제는 없다고 할 수 있다.

이와 같이 관 단부 경계조건에 대한 모드수의 영향에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

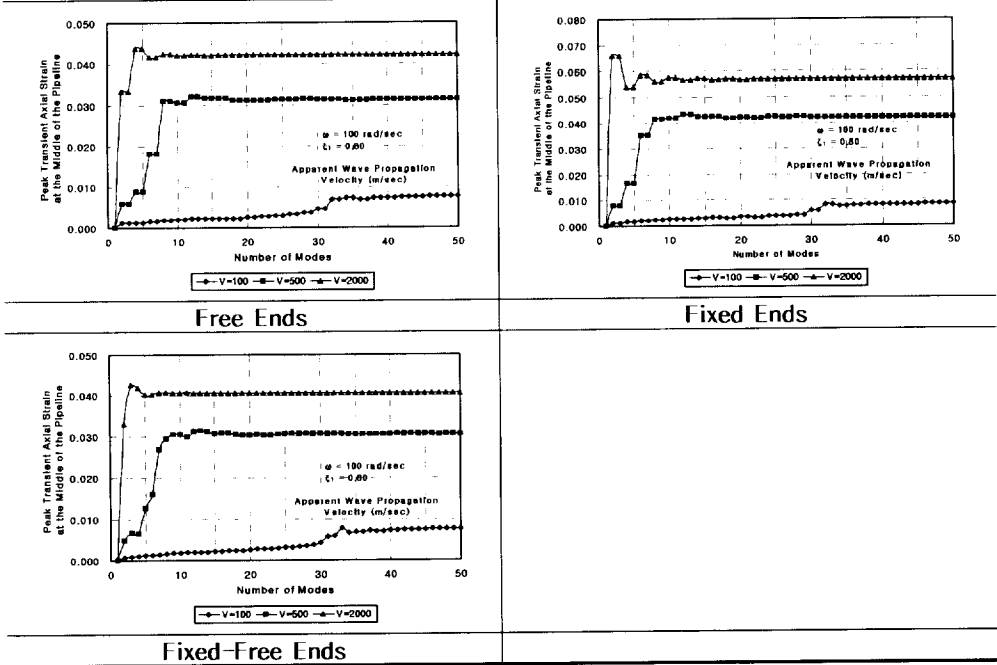
- 1) 축직각방향의 일단고정-일단자유, 양단자유, 양단고정 이외의 경계조건을 가진 매설관의 축방향 및 축직각방향에 대한 동적해석에서 매설관의 모드 파장과 지진파의 파장이 같아지는 공진현상을 확인할

수 있었으며, 이때의 모드수(k)는 양단자유에서는 $k = \overline{\omega}L / \pi V + 1$, 양단 고정에서는 $k = \overline{\omega}L / \pi V$, 일단고정-일단자유에서는 $k = \overline{\omega}L / \pi V + 1/2$ 로 산정되었다. 여기에 10개의 모드를 추가한 모드수를 포함하면 전반적인 동적거동을 확인할 수 있다.

- 2) 축직각방향의 일단고정-일단자유, 양단자유, 양단고정 경계조건에서 L_k 값은 7번째 모드이후에서는 소수점 오차로 인하여 0으로 수렴되어져 7번째 모드까지만 고려하더라도 전반적인 동적거동을 확인할 수 있다.

Table 4.11 Variation of the Peak Transient and Steady State Axial Strain with the Number of Modes ($\bar{\omega}=100\text{rad/sec}$)

(a) Variation of the Peak Transient Axial Strain



(b) Variation of the Steady State Axial Strain

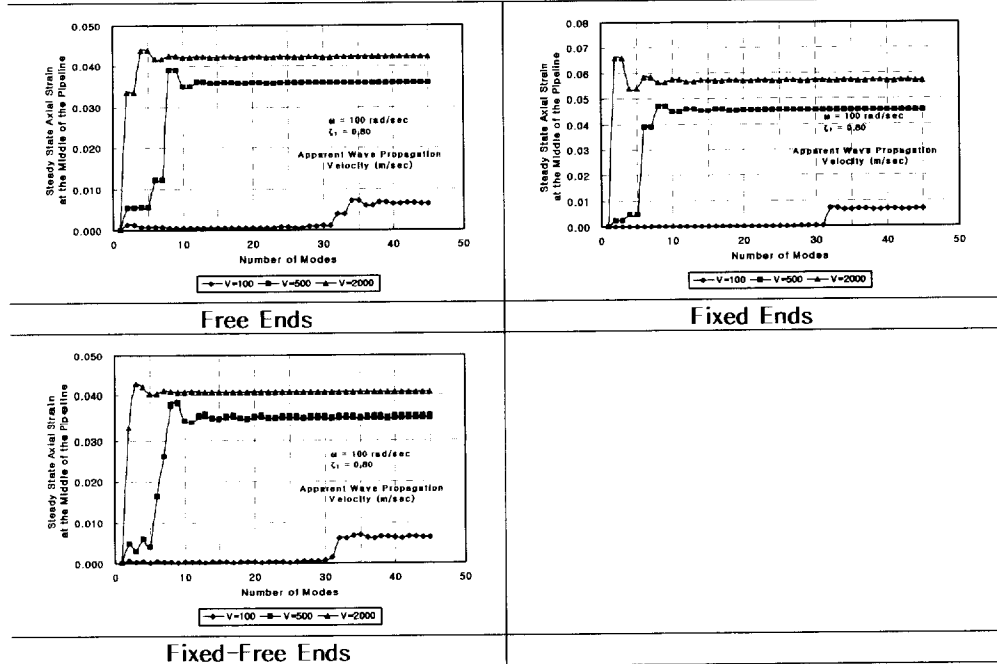


Table 4.12a Variation of the Peak Transient Curvature with the Number of Modes ($\bar{\omega}=100\text{rad/sec}$)

Variation of the Peak Transient Curvature

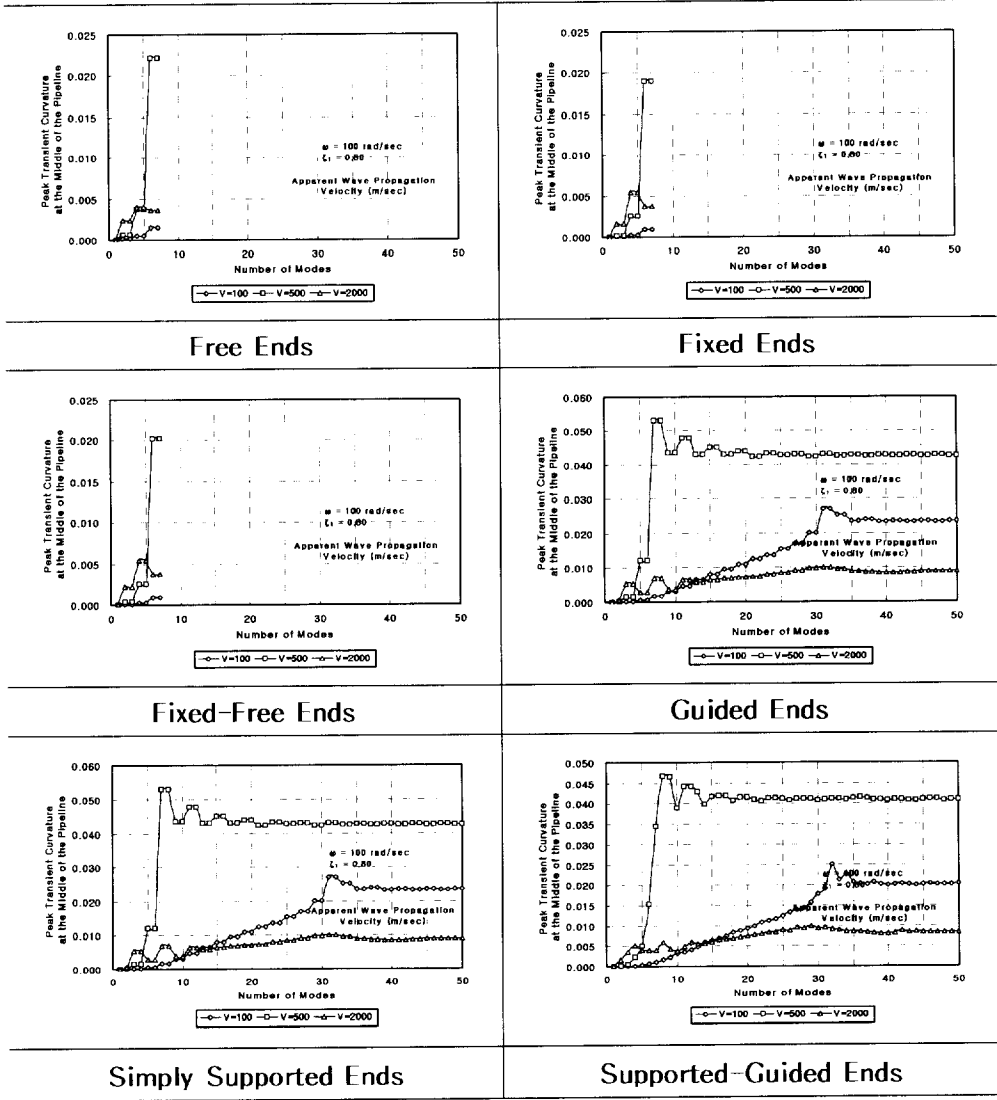
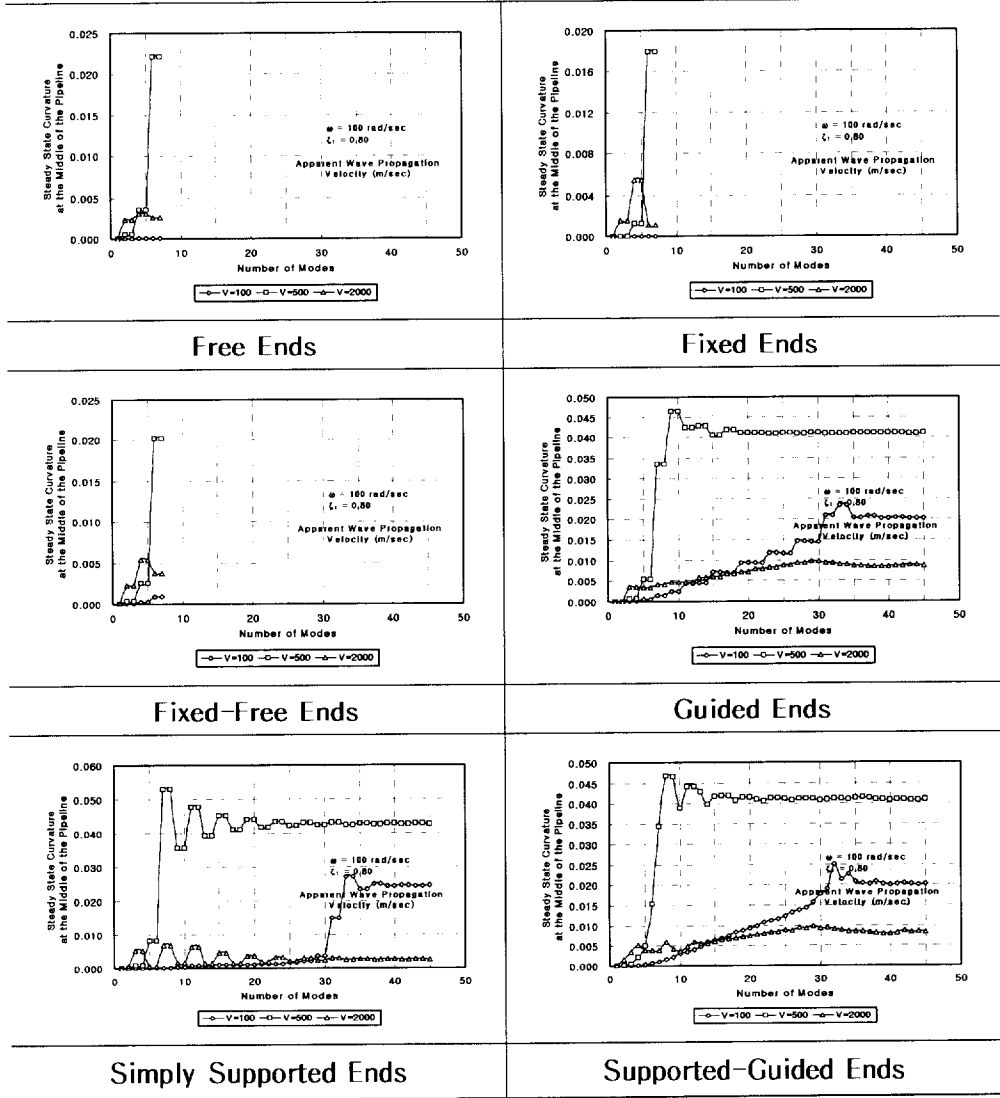


Table 4.12b Variation of the Steady State Curvature with the Number of Modes ($\bar{\omega}=100\text{rad/sec}$)

Variation of the Steady State Curvature



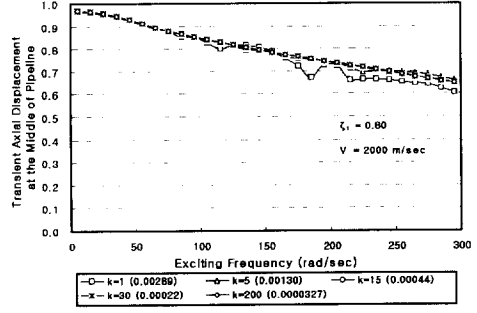
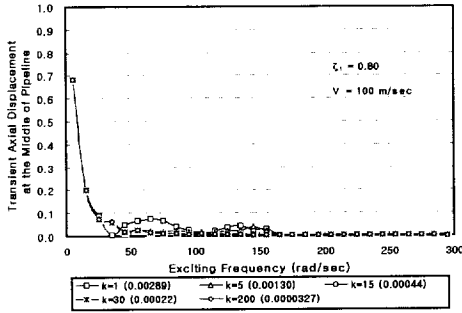
4.5.2 적분시간간격의 영향

Table 4.13은 일단고정-일단자유 경계조건인 축방향과 축직각방향에서 매설관의 진동에 대한 지반진동수와 변위응답의 관계를 나타내고 있다. 진동의 첫 번째 모드에서 지반-구조물의 상호작용에 의한 감쇠비는 80%이다. 지진 거동의 겉보기 전파속도로서 낮은 전파속도(V), 100m/sec, 높은 전파속도(V), 2000m/sec를 적용하였고, 모드수(k) 1, 5, 15, 30, 200번째에 해당하는 각각의 적분 시간간격인 0.00289, 0.0013, 0.00044, 0.00022, 0.0000327sec를 사용하였다. 모드수에 따른 적분 시간간격은 각각의 모드 주기의 1/10로 하여 적분 시간간격의 영향을 검토하였고 모드수 증가에 따라 주기가 작아지며 그에 따라 적분 시간간격도 작아진다. Table 4.13에서 볼 수 있듯이 적분 시간간격이 작아짐에 따라 200번째 모드에 해당하는 적분 시간간격, 0.0000327sec의 해석값에 수렴되어짐을 알 수 있고 낮은 모드의 적분 시간간격에서 수렴되어지지 않는 값들은 매설관의 고유진동수에 따른 고유주기를 충분히 고려하지 못하기 때문이다. 만약 매설관의 고유진동수가 지반진동수보다 훨씬 높다고 하면, 적분 시간간격은 더욱 작은 주기로 조절되어야 하며, 주기는 해석에서 사용된 높은 모드의 고유진동수와 일치하여야 한다. 이와 같이 해석시간의 단축과 정확성을 위하여 적절한 적분 시간간격이 필요하다.

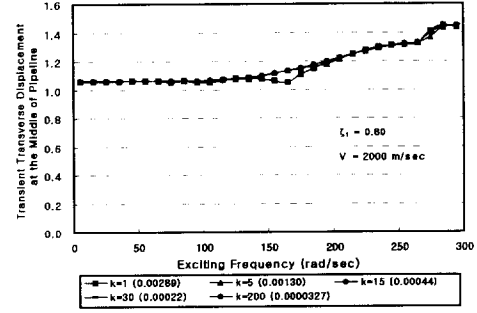
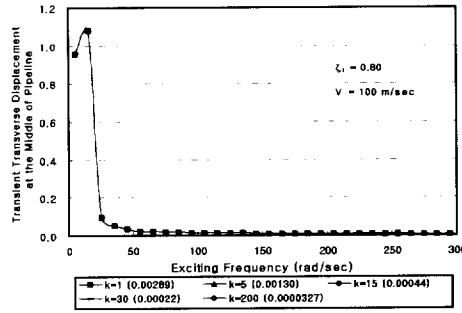
따라서 본 연구에서의 적절한 적분 시간간격은 공진현상이 발생할 수 있는 모드수에 10개의 모드수를 추가한 모드 주기의 1/10과 같은 값을 적용하였다. 이러한 경향은 모드 관 단부 경계조건에 대해서 동일하게 나타났다.

Table 4.13 Effect of the Integration Time Step Size on the Transient Response

Axial Response on the Fixed-Free Ends



Transverse Response on the Fixed-Free Ends



4.6 매설관의 지점위치별 변위와 변형률응답

4.3절과 4.4절에서는 관 단부 경계조건에 대하여 매설관의 중앙지점의 변위와 변형률응답을 시간영역에서 해석하였으며, 본 절에서는 매설관의 지점위치에 따라 발생하는 최대 변위와 변형률의 응답에 대해 연구하였다. 이는 매설관의 설계시 최대 응력 발생위치와 크기를 산정할 경우 반드시 검토해야할 사항이다.

관 단부 경계조건에 대해 축방향과 축직각방향에 대해서 해석하였으며 해석에 적용된 파의 특성으로서는 전파속도(V), 300m/sec 지반진동수($\bar{\omega}$), 30rad/sec, 파장(λ), 62.83m인 경우와 전파속도(V), 2000m/sec 지반진동수($\bar{\omega}$), 5rad/sec, 파장(λ), 2513.3m인 두 경우에 대해 첫 번째 모드에서 산정되는 감쇠비(ζ_1) 80%를 적용하였다. 이 해석의 결과는 Table 4.14에 나타내었다.

4.6.1 지점위치별 변위응답

Table 4.14a는 전파속도(V), 300m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$), 30rad/sec 및 전파속도(V), 2000m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$) 5rad/sec에 대해 관 단부 경계조건에 따른 지점위치별 축방향 변위응답을 나타낸 것이며, Table 4.14b는 축직각방향 변위응답을 나타낸 것이다. Table 4.14c는 전파속도(V), 2000m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$), 5rad/sec에 대해 축직각방향 변위응답을 나타낸 것이다. Table 4.14a에서 볼 수 있듯이 양단자유인 경우, 끝단에서 가장 큰 변위응답을 가지며 중앙부에서 가장 낮은 변위응답을 보이고 있다. 양단고정인 경우 양 끝단에서는 변위가 중앙지점 좌우편에서 최대응답을 보인다. 일단 고정-일단자유의 경계조건에선 고정단에서 변위가 발생하지 않고 자유단에서 큰 변위응답을 보이며 전파속도(V)가 300m/sec일 경우는 일시적 응

답이 우세하며 전파속도가 증가할수록(2000m/sec) 정상상태 응답이 우세함을 알 수 있다.

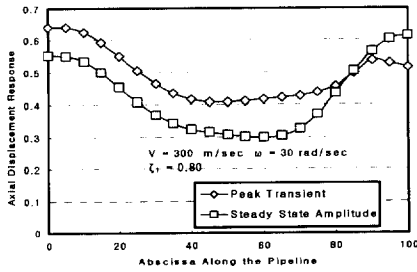
전파속도(V), 300m/sec일 경우 양단자유와 일단고정-일단자유 단부 경계조건에서 일시적 응답은 매설관 길이의 약 85% 이후에서는 감소하여 정상상태 응답이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 매설관 길이의 85% 이후의 지점에서는 일시적 응답의 지속시간 동안 적은 수의 진동을 받기 때문이다.

Table 4.14b와 Table 4.14c는 축직각방향에 대한 전파속도(V), 300m/sec와 2000m/sec일 경우 6가지 단부 경계조건에 대한 변위응답을 보이고 있다. 관 단부에서의 응답 거동은 축방향에서와 동일한 거동을 보이지만 최대 변위응답이 발생하는 위치는 차이를 보인다. 전파속도가 증가함에 따라 (2000m/sec) 정상상태 응답이 우세함이 뚜렷이 나타난다.

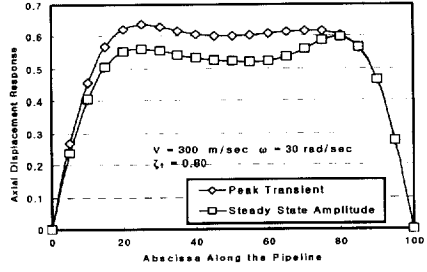
이상과 같은 결과들로부터 관의 단부조건에 따라 변위응답은 각각 다른 양상을 보이며 최대 변위응답이 발생하는 위치도 관의 단부조건에 따라 달라짐을 알 수 있다. 따라서 현재까지 주로 적용하고 있는 관 중심부에서의 동적응답으로 매설관을 설계함에는 다소 무리가 있음을 알 수 있다.

Table 4.14a Axial Displacement Response Profile

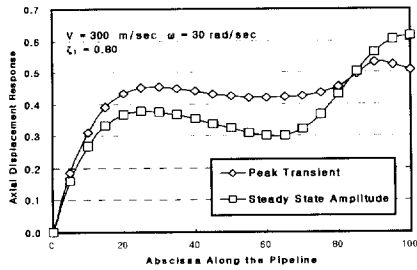
Wave Propagation Velocity ($V=300\text{m/sec}$)



Free Ends

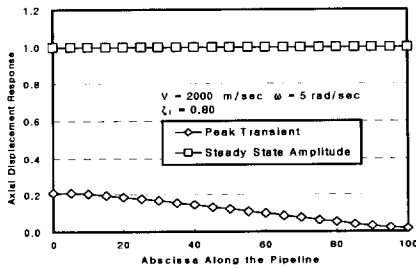


Fixed Ends

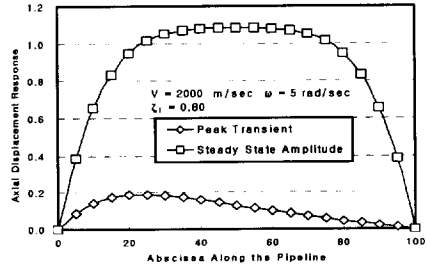


Fixed-Free Ends

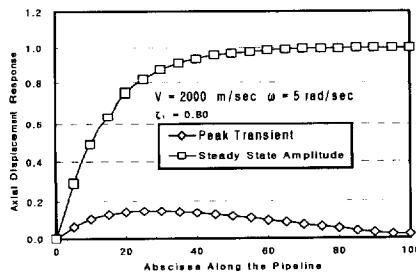
Wave Propagation Velocity ($V=2000\text{m/sec}$)



Free Ends



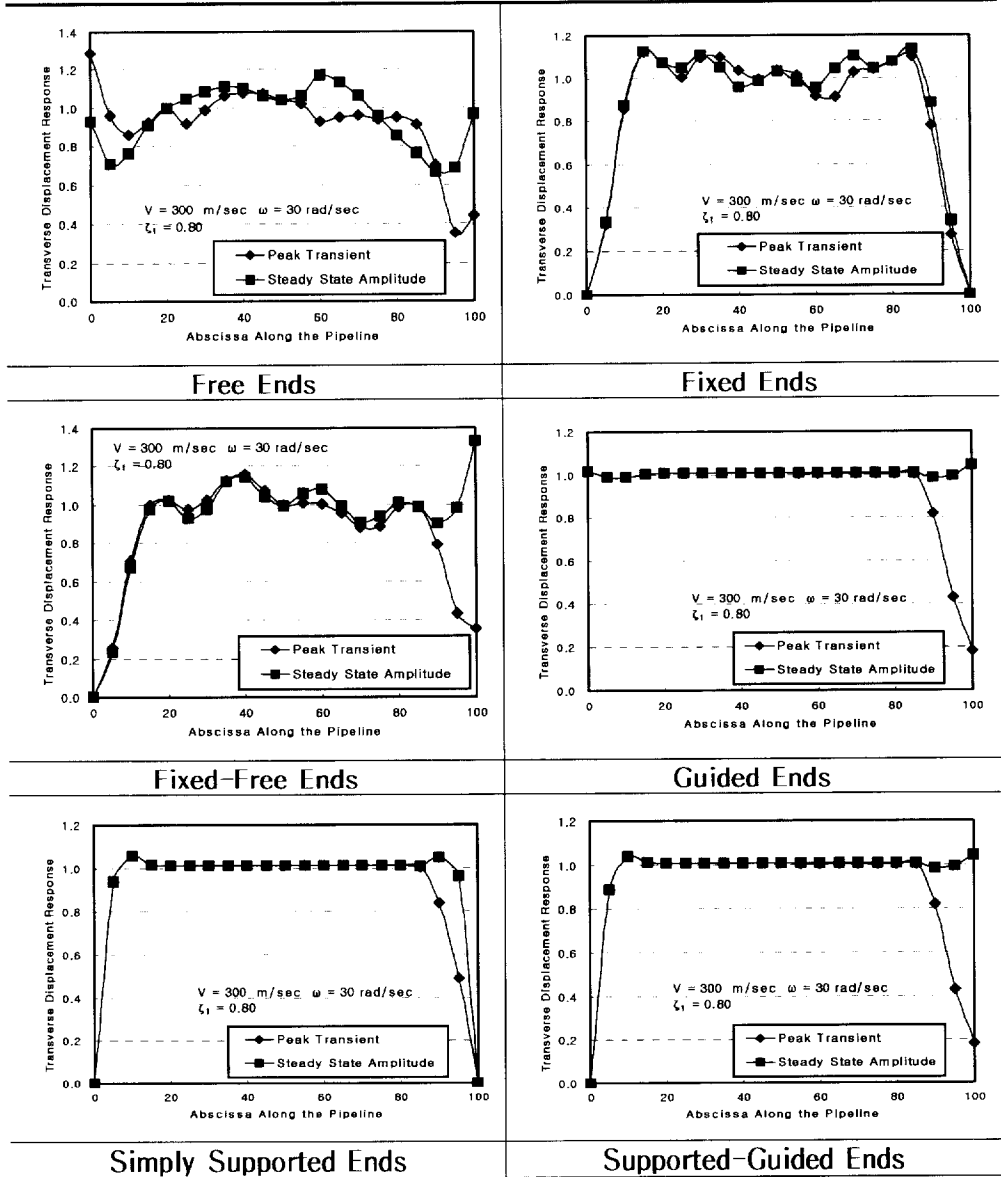
Fixed Ends



Fixed-Free Ends

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

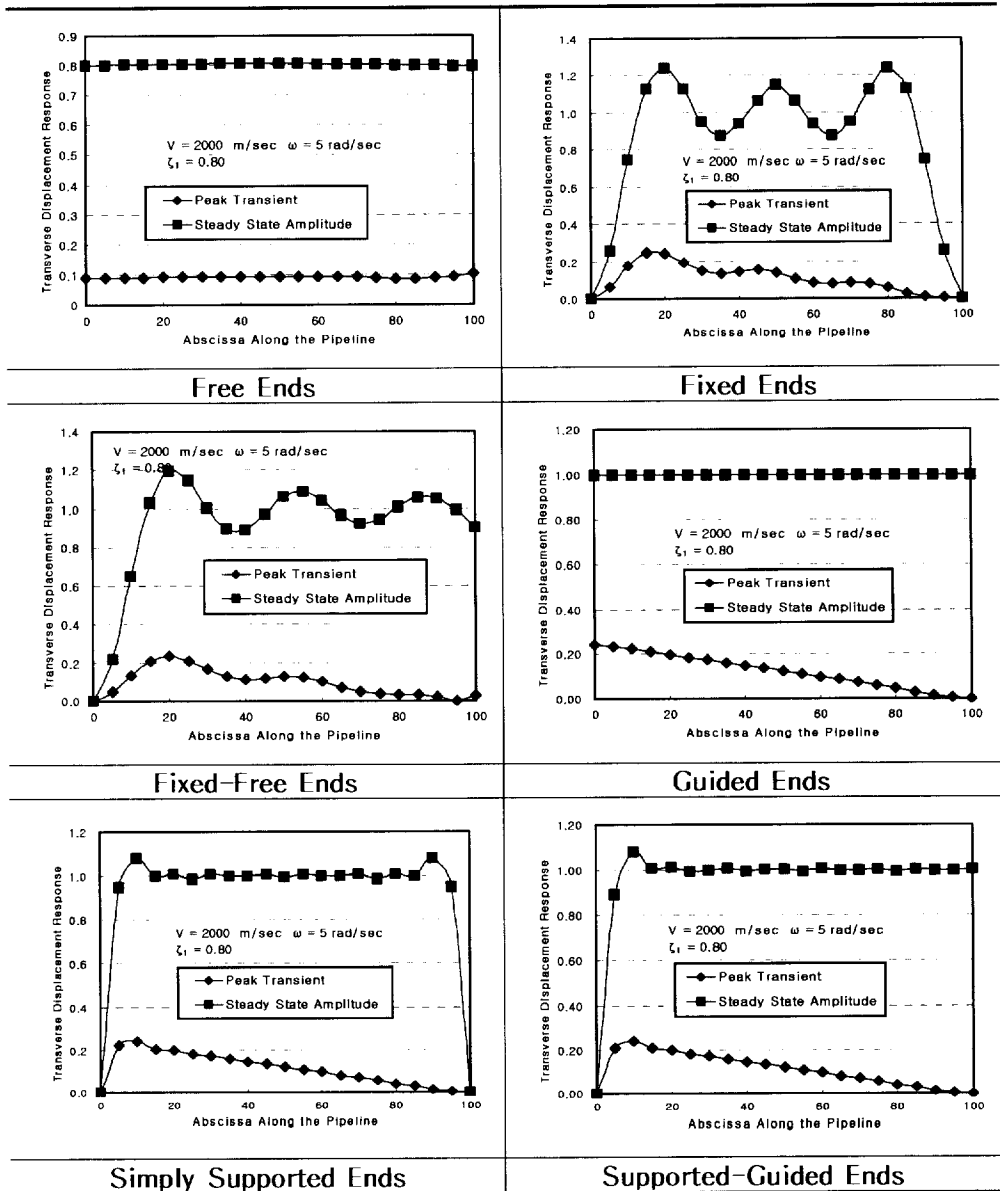
Table 4.14b Transverse Displacement Response Profile ($V=300\text{m/sec}$)



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

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

Table 4.14c Transverse Displacement Response Profile ($V=2000\text{m/sec}$)



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

* Guided Ends(양단물러) ; Simply Supported Ends(양단힌지) ; Supported-Guided Ends(일단힌지-일단물러)

4.6.2 지점위치별 변형률응답

Table 4.15a는 축방향에 대해 관 단부 경계조건을 달리하는 매설관에 대해서 전파속도(V), 300m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$), 30rad/sec 그리고 전파속도(V), 2000m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$), 5rad/sec를 적용하여 지점 위치별로 변형률응답을 해석한 그림이다. Table 4.15b는 축직각방향에 대해 관 단부 경계조건을 달리하는 매설관에 대해서 전파속도(V), 300m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$), 30rad/sec를 적용하여 휨변형률응답을 해석한 그림이다. Table 4.15c는 전파속도(V), 2000m/sec와 지반진동수($\bar{\omega}$), 5rad/sec를 적용하여 휨변형률응답을 해석한 그림이다.

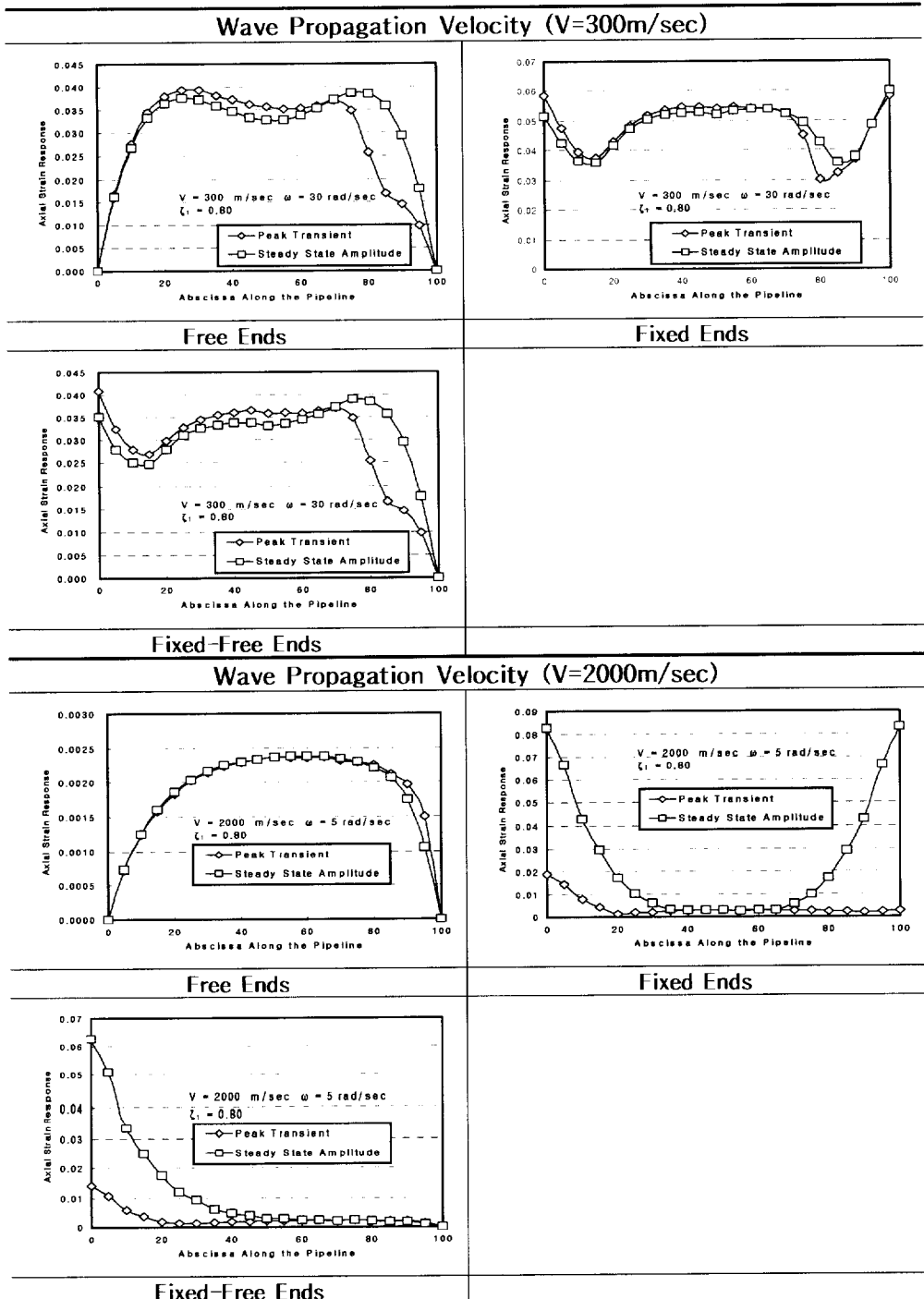
축직각방향에 대해 관 단부 경계조건을 달리하는 매설관에 대해서 관 단부에서 나타나는 휨변형률응답은 변위응답에서와 유사한 경향을 보이며 지점 위치별 휨변형률응답은 관 단부조건이 대칭인 구조에선 중앙부를 기준으로 좌우 대칭적인 경향을 보이고 있다. 반면 일단고정-일단자유와 일단힌지-일단롤러와 같이 비대칭적인 구조에서는 관 중앙부를 기준으로 비대칭적인 경향을 나타냄을 알 수 있다. 전파속도가 증가할수록($V=2000\text{m/sec}$) 정상상태 응답이 우세한 결과를 뚜렷이 보이고 있다. 이상과 같은 결과로부터 관 단부의 경계조건에 따라 변형률응답이 달라짐을 알 수 있으며 최대 변형률이 발생하는 지점의 위치도 각각 달라짐을 알 수 있다.

일시적 변형률도 변위응답과 마찬가지로 매설관 길이의 85% 이후에서는 일시적 변형률응답이 감소하여 정상상태 변형률응답이 발생하는 것을 나타낸다. 대칭구조를 이루는 축방향의 양단자유와 축직각방향의 양단자유와 양단롤러 경계조건에서 지점별 변형률응답이 대칭적으로 나타나는 것을 볼 수 있으며 비대칭구조인 일단고정-일단자유와 일단힌지-일단롤러 경계조건에서 일단고정-일단자유 단부조건에서는 고정단에서 가장 큰 휨변형률이 발생하였고 일단힌지-일단롤러의 경우 단부조건이 힌지로 인하여 근접한 지점에서 휨변형률이 크게 발생하였다.

관 단부 경계조건에 대한 지점 위치별 변위응답과 변형률응답 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

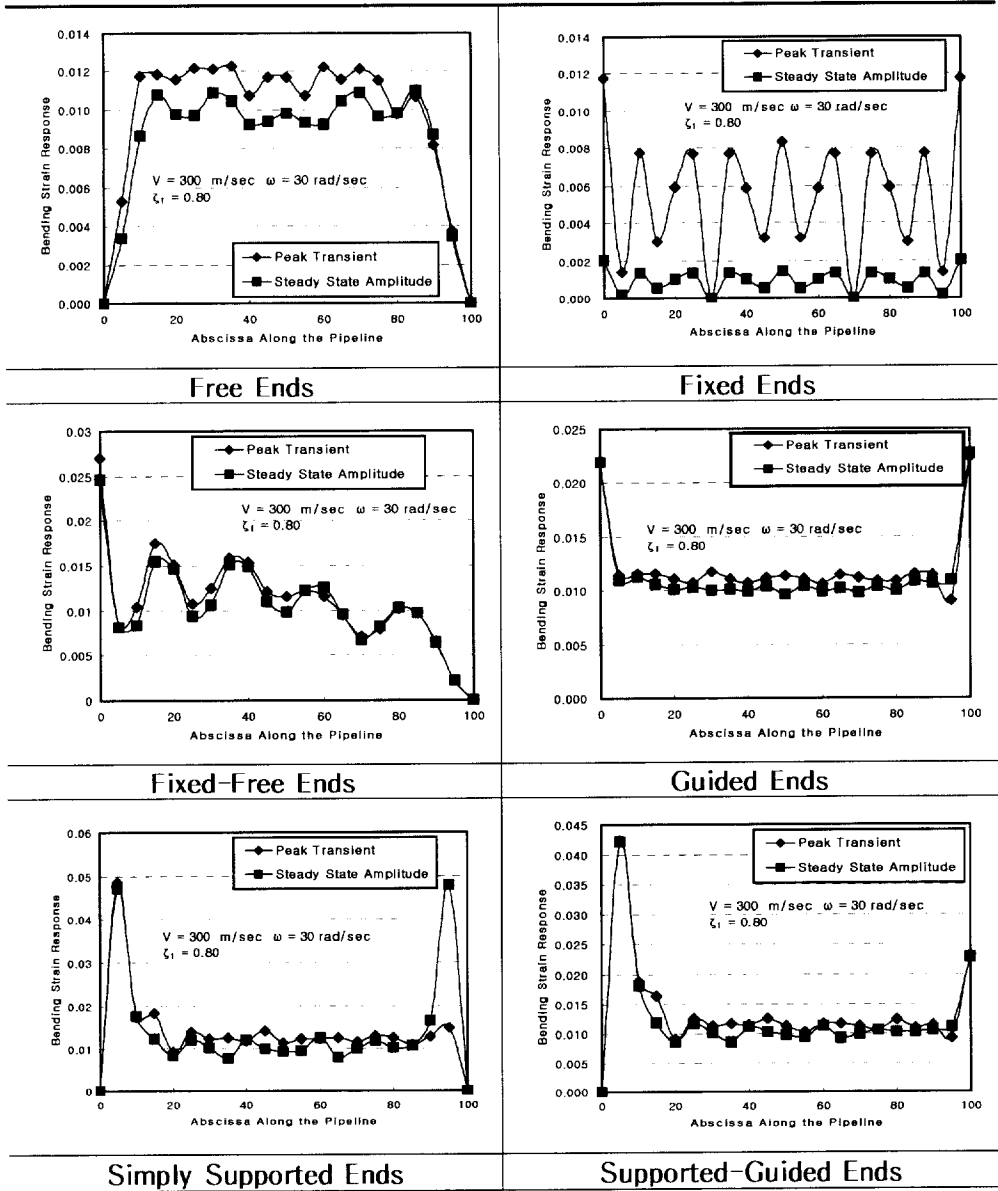
- 1) 관 단부 경계조건에 축방향 및 축직각방향 지점별 변위와 변형률응답에서 일시적 응답은 매설관 전장의 85%이후에서는 감소하여 정상상태 응답이 발생한다. 이것은 매설관 길이의 85% 이후의 지점에서 일시적 응답의 지속시간 동안 적은 수의 진동을 받기 때문이다.
- 2) 관 단부 경계조건에서 전파속도(V)가 증가하면 일시적 응답보다 정상상태 응답이 뚜렷이 크게 나타난다.
- 3) 관 단부 경계조건에 따라 변위응답 및 변형률응답의 특성이 구별되며 최대 변위와 최대 변형률이 발생하는 지점의 위치도 상이하게 나타난다.

Table 4.15a Axial Strain Response Profile



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

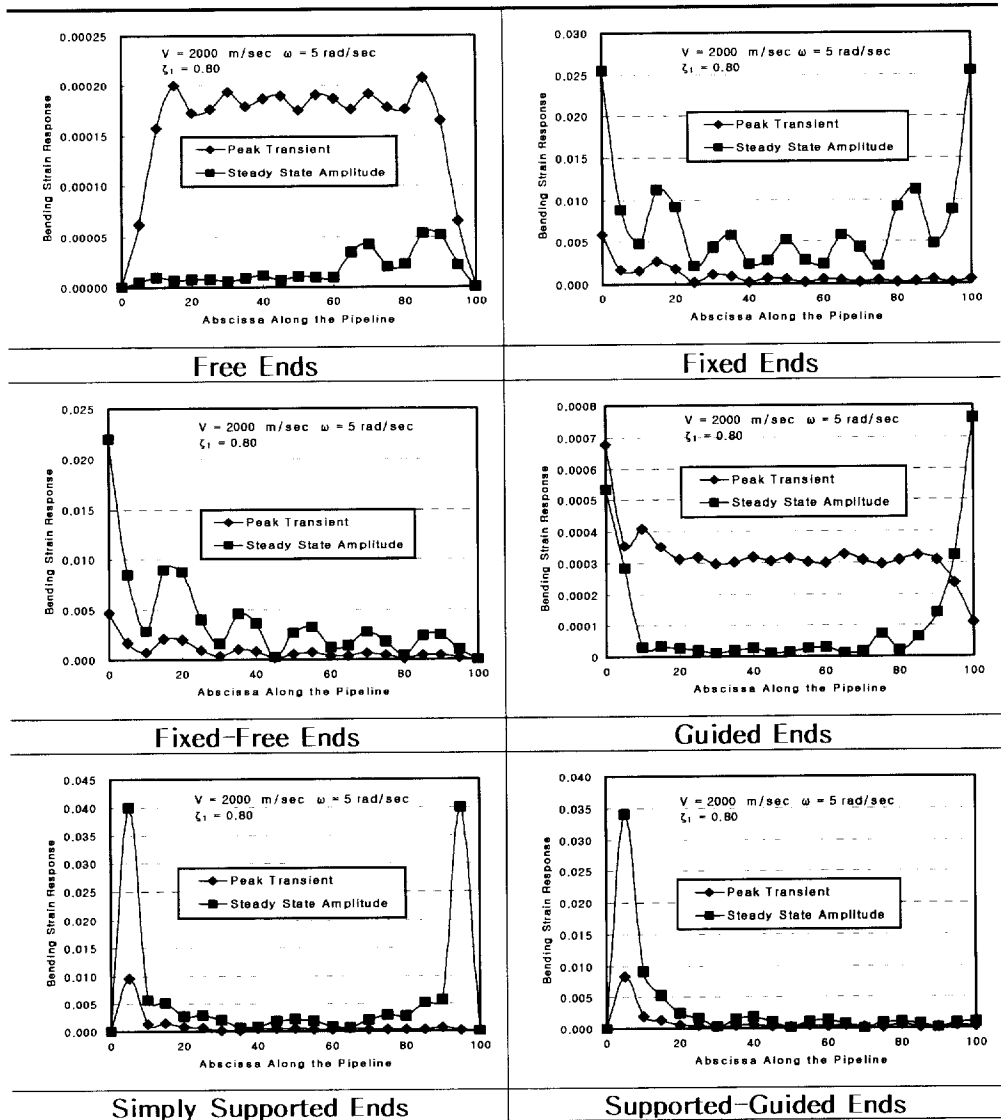
Table 4.15b Bending Strain Response Profile ($V=300\text{m/sec}$)



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

* Guided Ends(양단몰려) ; Simply Supported Ends(양단힌지) ; Supported-Guided Ends(일단힌지-일단몰려)

Table 4.15c Bending Strain Response Profile ($V=2000\text{m/sec}$)



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

* Guided Ends(양단볼러) ; Simply Supported Ends(양단힌지) ; Supported-Guided Ends(일단힌지-일단볼러)

제 5 장 동적해석 매개변수 연구

2장에서 구조물의 고유진동수는 지반강성에 영향을 받으며 4장에서 매설관의 응답은 겉보기 전파속도(V)와 지반진동수($\bar{\omega}$)의 영향을 받음을 알 수 있었다. 본 장에서는 1) 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠, 2) 지반진동의 파장이 매설관의 동적거동에 미치는 영향에 대해 검토하고자 한다.

5.1 지반-구조물 상호작용 감쇠에 의한 영향

본 절은 매설관의 응답에서 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비(ζ_1)의 영향을 검토하였다. 관 단부 경계조건을 대상으로 매설관의 중간지점에서 정상상태 변위응답은 첫 번째 모드의 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비를 20%, 50%, 80%로 적용하였고 지반진동수($\bar{\omega}$), 5rad/sec와 전파속도(V), 500m/sec를 적용하여 해석하였다.

5.1.1 축방향에서의 감쇠 영향

Fig. 5.1은 양단자유 관 단부 경계조건, Fig. 5.2는 양단고정 관 단부 경계조건, Fig. 5.3은 일단고정-일단자유 관 단부 경계조건에 대한 축방향에서의 감쇠비의 영향을 해석한 그림이다.

이들 그림으로부터 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비(ζ_1)는 관 단부조건의 변화에도 매설관의 동적거동에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이런 현상은 매설관의 동적응답이 지반의 동적응답보다 작게 발생하므로 타당한 결과로 판단된다(Larbi, 1995).

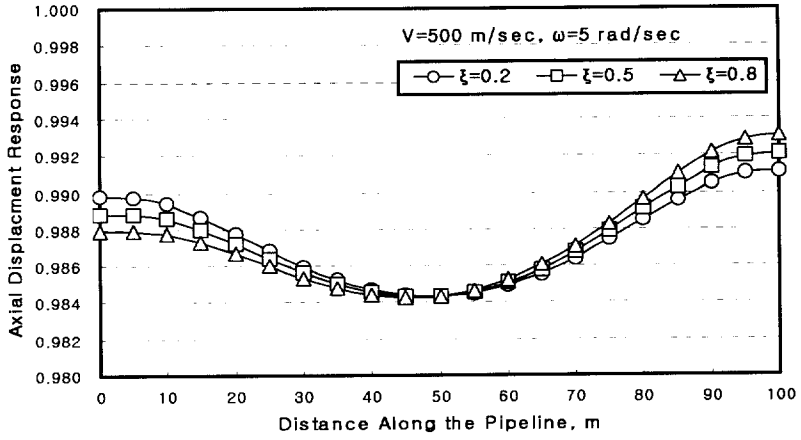


Fig. 5.1 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Free Ends (Axial Direction)

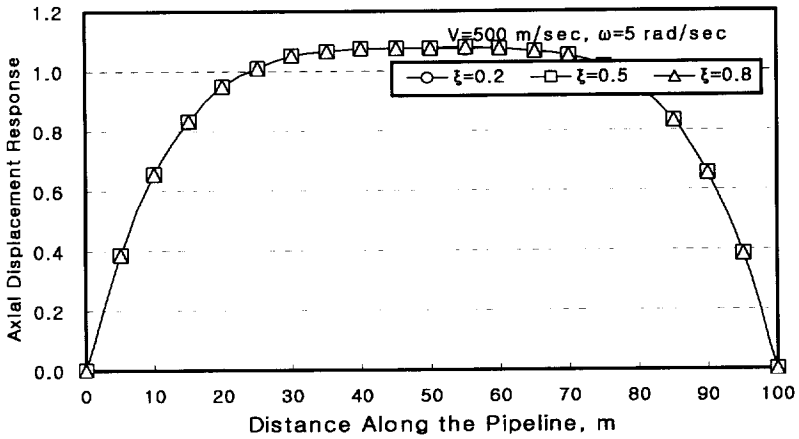


Fig. 5.2 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed Ends (Axial Direction)

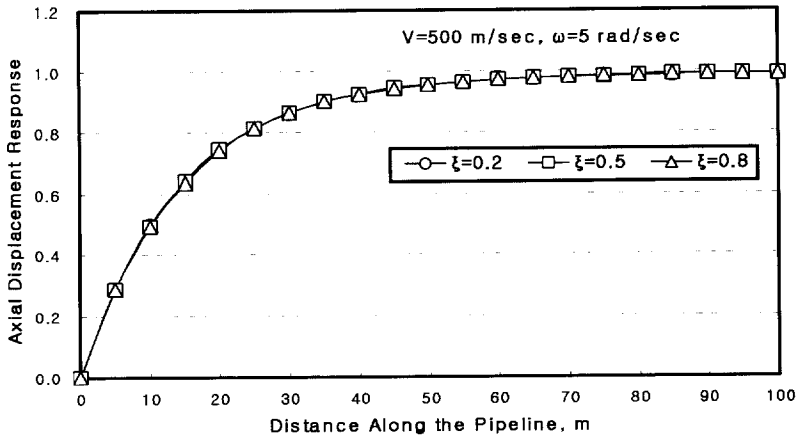


Fig. 5.3 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed-Free Ends (Axial Direction)

5.1.2 축직각방향에서의 감쇠 영향

축직각방향 진동에 대해서도 축방향에서와 동일한 경향이 Fig. 5.4~Fig. 5.9에서 나타난다. 즉, 매설관의 동적거동에 대해서 감쇠비(ζ_1)의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 이는 축직각방향의 강성계수(K_T)가 축방향 강성계수의 1.5배에 상당함을 통해 감쇠비의 영향이 축방향에서 보다도 더 없는 것을 알 수 있다.

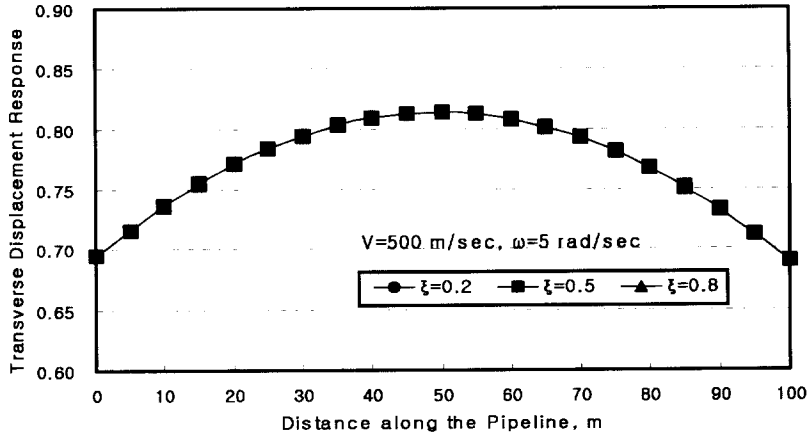


Fig. 5.4 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Free Ends (Transverse Direction)

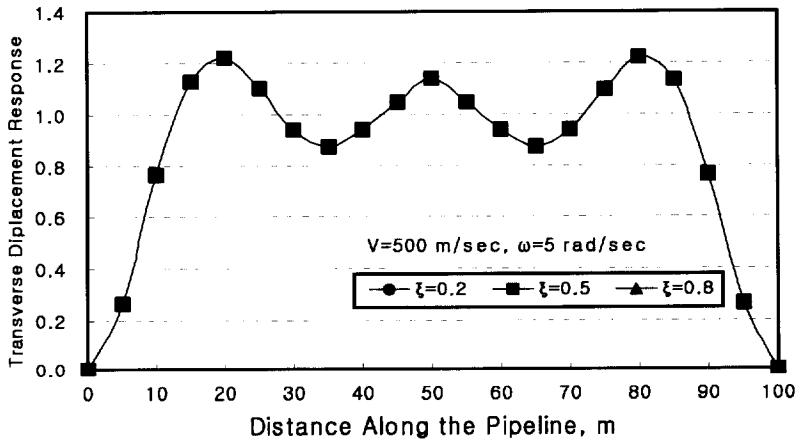


Fig. 5.5 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed Ends (Transverse Direction)

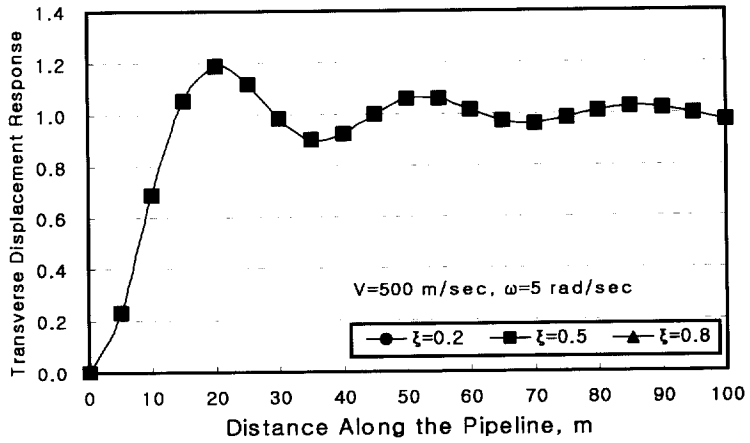


Fig. 5.6 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Fixed-Free Ends (Transverse Direction)

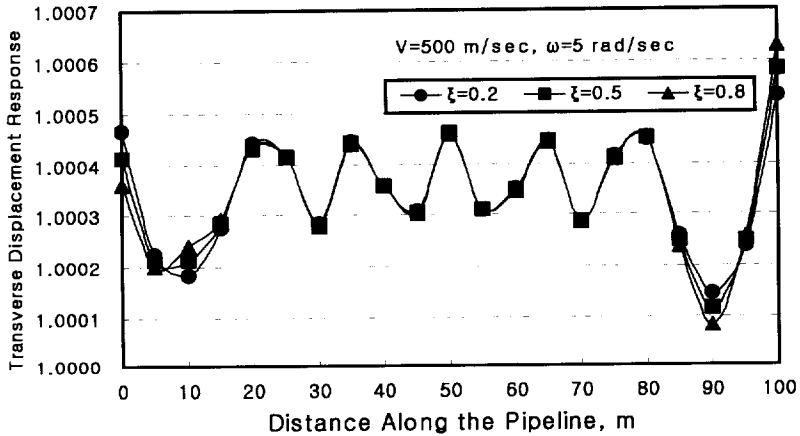


Fig. 5.7 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Guided Ends (Transverse Direction)

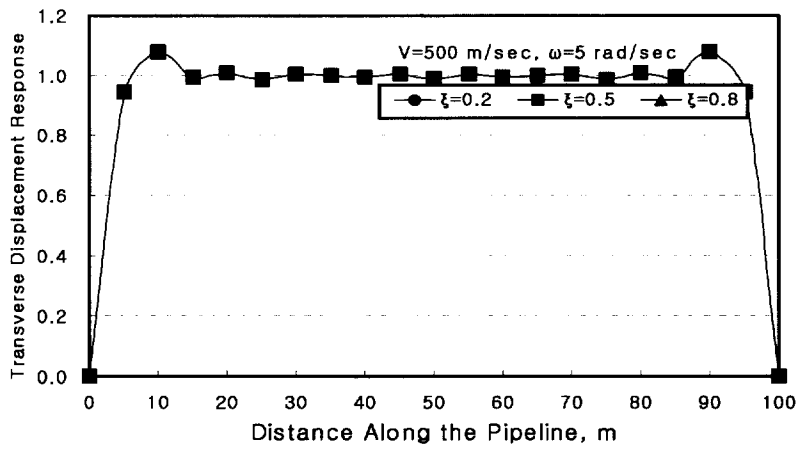


Fig. 5.8 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Simply Supported Ends (Transverse Direction)

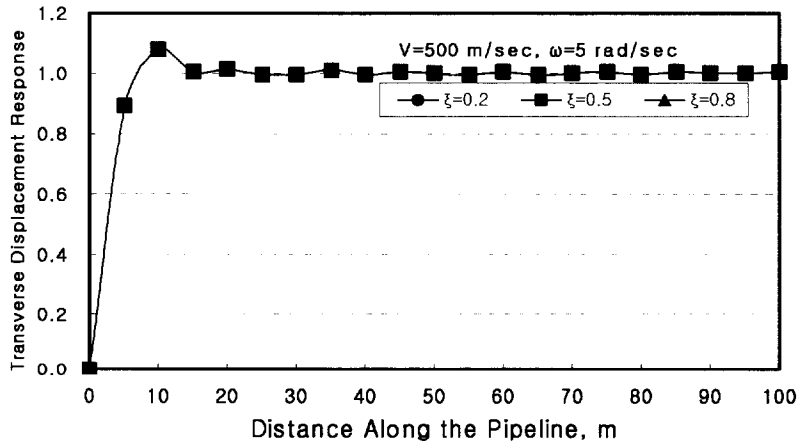


Fig. 5.9 Effect of Soil-Structure Interaction Damping on the Supported-Guided Ends (Transverse Direction)

5.2 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 절은 매설관의 응답에 대해 전파속도와 지반진동수의 조합된 영향을 파장의 측면에서 해석하였다.

지진시 가능한 전파속도와 지반운동의 다양한 범위를 해석하기 위해, 넓은 범위의 파장(5m~10km)과 100, 200, 500, 1000, 2000m/sec의 겉보기 전파속도를 고려하였다.

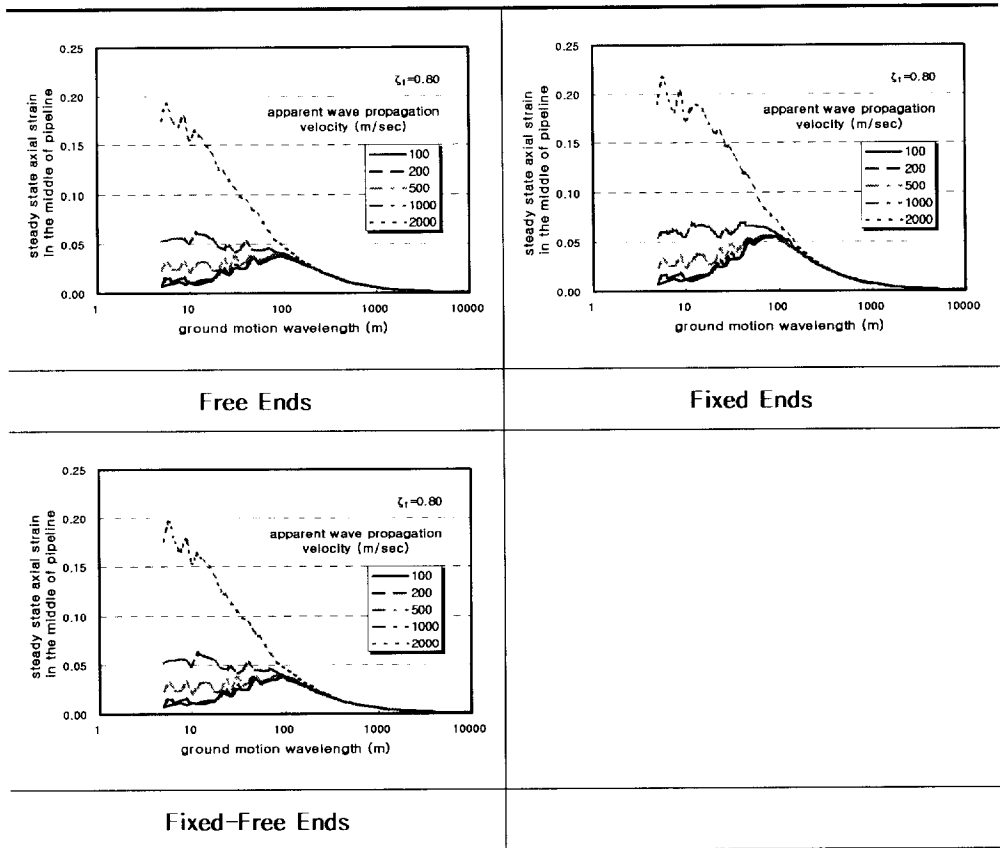
축방향에 대해 고려될 수 있는 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부 경계조건에 대해 변형률에 미치는 파장의 효과를 Table 5.1에 나타내었다. 이 그림으로부터 최대 변형률을 발생시키는 파장을 임계파장이라고 정의하면 임계파장보다 더 큰 파장에 대해서 변형률은 감소하며 결국 0으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 이로부터 단파에 있어서는 전파속도(V)가 클수록 변형률은 크게 발생되므로 전파속도의 영향이 대단히 많음을 알 수 있다.

축직각방향에 대해 고려될 수 있는 6가지의 관 단부 경계조건에 대해 변형률에 미치는 파장의 효과를 Table 5.2에 나타내었다. 전반적인 경향은 축방향에서와 비슷하게 나타나지만 관 단부 경계조건이 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유일 경우 임계파장보다 짧은 파장에 대해 전파속도의 영향이 미소함은 모드수가 7번째로 동적응답이 완료되는 특성에 기인하기 때문이다. 반면 모드수 32번째 이상에서 공진현상을 보이는 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건에서는 단파에서 속도의 영향이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다.

본 연구에서 수행되어진 것과 같이, 매설관의 동적거동은 지반진동수나 파장과 같은 주요 특성의 인자에 대해 독립적으로 평가될 수 없으며 지반

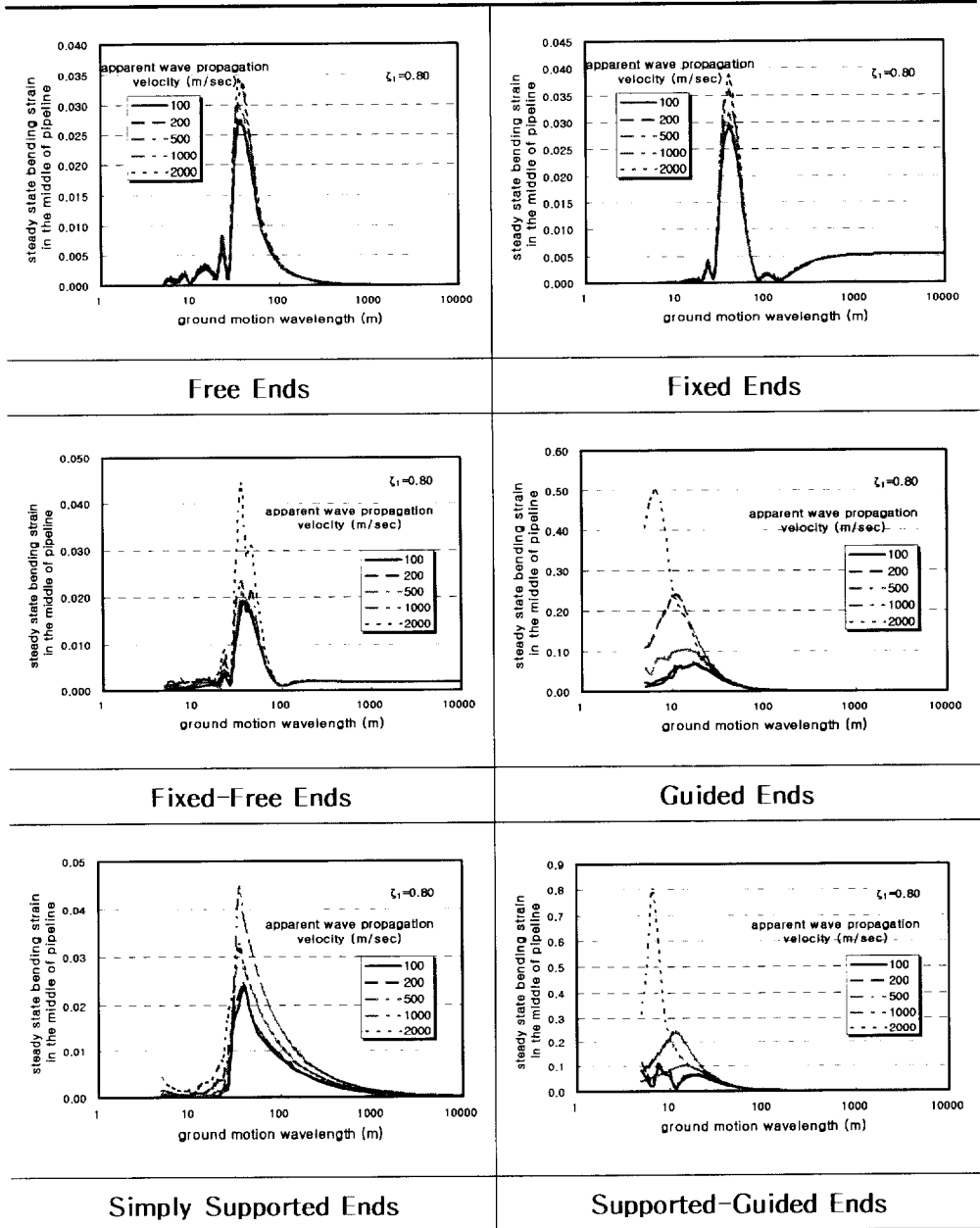
진동수와 전파속도의 조합과 표준화된 정현파 입력 진동에 대해 동적해석을 수행한 결과 대체적으로 축직각방향의 휨변형률응답이 축방향의 변형률보다 높게 산정되는 경향을 보이고 있다.

Table 5.1 Variation of the Steady State Axial Strain with the Wavelength



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

Table 5.2 Variation of the Steady State Bending Strain with the Wavelength



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

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

제 6 장 결 론

본 연구에서는 여러 가지 관 단부의 경계조건을 가진 매설관에 대해서 자유진동 해석을 수행하여 이 경우의 모드형상과 고유진동수를 결정하였다. 이들을 이용하여 강제진동시 발생 가능한 매설관의 축방향에 대해 변위, 변형률 산정식과 축직각방향에 대해 변위, 곡률, 휨변형률 산정식을 유도하였다. 관 단부 경계조건으로서는 축방향에 대해선 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 그리고 축직각방향에 대해선 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단롤러, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부조건을 설정하였다.

동적해석법은 시간영역해석인 모드중첩법을 적용하였으며 동적거동에 영향을 주는 매개변수들의 영향을 규명한 후, 여러 가지 관 단부 경계조건이 매설관의 동적거동에 미치는 영향에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매설관의 자유진동

- 1) 지반강성이 높은 경우($>1 \times 10^{10}$ N/m/m)에는 강성이 증가함에 따라 고유진동수는 증가하며 지반강성이 낮은 경우($<1 \times 10^{10}$ N/m/m)에는 어느 한계 값까지 일정하게 유지되며 진동 모드수가 증가할수록 증가한다.
- 2) 관의 탄성계수가 1×10^{10} N/m²보다 작은 값에서는 고유진동수에 미치는 영향이 없으나 1×10^{10} N/m²보다 높은 값일 경우에는 고유진동수가 증가하며 진동 모드수가 증가할수록 고유진동수는 급격히 증가하고 축방향 자유진동에서 그 경향이 뚜렷이 나타난다.
- 3) 매설관의 질량이 클수록, 모드수가 낮을수록 고유진동수는 낮아지며 축방향에서 그 경향이 뚜렷이 나타난다.
- 4) 관의 횡단면적과 관성모멘트가 증가함에 따라 고유진동수는 증가

한다.

- 5) 매설관의 길이가 증가함에 따라 고유진동수는 감소하며 관의 길이가 100m이하인 경우 진동 모드수가 증가할수록 고유진동수는 급격히 증가한다.

2. 매설관의 강제진동

양단고정, 일단고정-일단자유 단부 경계조건의 매설관에 대한 축방향 변위, 변형률 산정식(Table 3.2)을 유도하였으며, 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유, 양단힌지, 일단힌지-일단롤러 단부 경계조건의 매설관에 대한 축직각방향의 변위, 곡률, 휨변형률 산정식(Table 3.3)을 유도하였다.

3. 매설관의 동적응답 해석

- 1) 관 단부 경계조건을 고려한 매설관의 동적해석프로그램을 개발하였다(ADRP 프로그램).
- 2) Ogawa 등(2001)이 제시한 변형률 산정식과 본 연구에서 제안한 변형률 산정식의 결과를 비교하였으며 그 결과 1.57%의 차이를 보여 본 해석의 정확성을 확인할 수 있었다.
- 3) 매설관의 동적거동(변위, (휨)변형률)은 일시적 응답과 정상상태 응답으로 구분되어지며 단파의 조건일 때 일시적 응답이 우세한 경향을 보이며 파장이 길어질수록 정상상태 응답이 우세한 경향을 보였다.
- 4) 매설관의 축방향 및 축직각방향에 대한 동적응답 해석에서 매설관의 모드 파장과 지진파의 파장이 같아지는 공진현상을 확인할 수 있었으며, 이때의 모드수(k)는 축직각방향의 양단자유, 양단고정, 일단고정-일단자유 단부조건에서는 7개 그리고 축방향의 일단고정-일단자유에서

는 $k = \overline{\omega}L / \pi V + 1/2$, 양단자유에서는 $k = \overline{\omega}L / \pi V + 1$, 양단고정에서는 $k = \overline{\omega}L / \pi V$ 로 산정되었다. 여기에 10개의 모드를 추가한 모드수를 포함하면 전반적인 동적거동을 확인할 수 있다.

- 5) 동적해석 시간과 정확성을 위하여 적절한 적분 시간간격이 필요하며 이 값은 공진현상을 확인할 수 있는 모드수(k)에 10개를 추가한 k+10번째 모드의 주기값을 1/10하여 구할 수 있다.
- 6) 매설관의 지점위치별 변위와 변형률응답을 해석한 결과 관 단부 경계조건에 따라 그 응답은 다른 양상을 보였으며 최대 변위와 변형률의 크기 및 발생하는 지점의 위치가 달리 산정되어 관 단부 경계조건의 영향을 확인할 수 있었다.
- 7) 지반-구조물 상호작용에 의한 감쇠비는 관 단부 경계조건에 관계없이 매설관의 동적응답 해석에 영향을 미치지 않는다.
- 8) 매설관의 최대 변형률응답을 나타내는 파장을 임계파장이라고 정의하면 임계파장보다 더 큰 파장에 대해서 변형률은 감소하며, 결국 0으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 단파에 있어서 전파속도가 클수록 변형률은 커지므로 전파속도의 영향이 커지며 모든 관의 단부 경계조건에 관계없이 적용되어질 수 있다.

향후 지반강성 변화에 따른 비선형 해석 모형을 연구할 경우 매설관의 동적응답 해석분야에서 응용될 것으로 판단되며 매설관의 교차부분에 대해서도 연구되어질 필요성이 있다.

참고 문헌

1. 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.
2. Ariman, Teoman and Muleski, Gregory E. (1981), Review of the Response of Buried Pipelines Under Seismic Excitation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, No. 2, pp. 133-152.
3. Ayala, A. Gustavo and O'rourke, Michael J. (1989), Effects of The 1985 Michoacan Earthquake on Water Systems and Other Buried Lifelines in Mexico, *National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo*, Technical Report NCEER-89-0009.
4. Bolt, B. (1970), Elastic Waves in the Vicinity of the Earthquake Source, *Chapter I of Earthquake Engineering, Edited by R. Wiegel, Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, N. J.
5. Chen, C. C., Ariman, T. and Katona, M. (1979), A Finite Analysis of Buried Pipelines Under Seismic Excitations, Symposium of National Congress on Pressure Vessels and Piping, *San Francisco, CA, ASME PVP-34*, pp. 133-142.

6. Colton, J., Chang, P., Lindberg, H. and Abrahamson, G. (1981), Measurement of Dynamic Soil-Pipe Axial Interaction for Full-Scale Buried Pipelines under Field Laying Conditions, *SRI International*, Menlo Park, California
7. Clough, Ray W., Penzien, Joseph (1975), Dynamics of Structures, *MacGraw Hill Book Company, New York*, pp. 293-327.
8. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines (1993), Seismic Response of Buried Pipes and Structural Components, *ASCE Structural Division Committee on Nuclear Structures and Materials, American Society of Civil Engineers*, New York.
9. Datta, S. H., Shah, A. H. and EL-Akily, N. (1982), Dynamic Behavior of a Buried Pipe in a Seismic Environment, *Journal of Applied Mechanics, ASCE*, Vol. 49, pp. 141-148
10. Datta, T. K. and Mashally, E. A. (1986), Pipeline Response to Random Ground Motion by Discrete Model, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 14, pp. 559-572
11. El Hmadi, K. (1988), Seismic Wave Propagation Effects on Straight Jointed Buried Pipelines Ph.D. Thesis, *Rensselaer Polytechnique Institute*, Troy, New York, December.
12. Hindy, A. and Novak, M. (1979), Earthquake Response of

Underground Pipelines, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, pp. 451-476.

13. Isenberg, J., Weldlinger, P., Wright, J. P. and Baron, M. L. (1977), Underground Pipeline in a Seismic Environment, *Proc. of the Current State of Knowledge of of Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, Los Angeles, CA, August 1977, pp. 267-281

14. Kubo, K. (1974), Behavior of Underground Waterpipes During an Earthquake, *Proc. of the Fifth World Conference on Earthquake*, Rome, Italy, 1973. Published by the International Association of Energy Economists

15. Mashally, E. A. and Datta, T.K. (1987), Parametric Studies on Seismic Response of Buried Pipelines, *5th Canadian Conf. Earthquake Engineering*, Ottawa, pp. 625-635.

16. Newmark, N. M. (1967), Problems in Wave Propagation in Soil and Rock, *Proc. of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, Albuquerque, New Mexico, pp. 7-26.

17. Newmark, N. M. (1973), A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra Directorate of Licensing, *U.S. Atomic Energy Commission*, Washington D.C..

18. Newmark, N. M. and Rosenbluth Emilio (1971), *Fundamental of Earthquake Engineering*, *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ.
19. Newmark, N. M. and Hall William J. (1982), *Earthquake Spectra and Design*, *Earthquake Engineering Research Institute*, Monograph Series, Berkeley, CA.
20. Nishio, N. and Satake, M. (1983), Characteristics of Deformation in a Buried Pipeline Under Sinusoidal Ground Motion, *Natural Disaster Science*, Japan, Vol. 5, No. 1, pp. 53-68.
21. Nishio, N. and Tsukamoto, K. (1985), Seismic Behavior of a Buried Pipeline in a Nonuniform Subsurface Layer, *Proceeding of the National Congress on Pressure Vessel and Piping Conference of ASME*, PVP-98-4, pp. 119-124.
22. Novark, M., Nogami Toyoaki and Abou-Ella, Farkhry (1978), Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case, *Technical Note, ASCE Journal of Engineering Mechanics*, EM4, pp. 953-959.
23. O'Rourke, M. J. and Wang, L. R. (1978), "Earthquake Response of Buried Pipelines," *Proceedings of the ASCE Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena, California.
24. O'Rourke, M. J., Castro, Gerardo and Centola, N. (1980), Effects of Seismic Wave Propagation Upon Buried Pipelines, *Earthquake and*

Structural Dynamics, Vol. 8, pp.455-467.

25. O'Rourke, M. J., Bloom, Mary C. and Dobry, R. (1982), Apparent Propagation Velocity of Body Waves, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, No. 6, pp.283-294.

26. O'Rourke, M. J., Castro G. and Hossain, I. (1984), Horizontal Soil Strain Due to Seismic Waves, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 110, No. 9, pp. 1173-1187.

27. O'Rourke, M. J. and El Hmadi, K. (1985), Earthquake Ground Wave Effects on Buried Piping., PVP-98-4, *ASME Pressure Vessel and Piping Technology*, Conference, pp. 165-171.

28. O'Rourke, M. J. and El Hmadi, K. (1988), Analysis of Continuous Buried Pipelines For Seismic Wave Effects, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, pp.917-929.

29. O'Rourke, M. J. and Ayala, G. Seismic Damage to a Pipeline, A Case Study, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 116, pp. 123-134.

30. Ogawa, Y. and Koike T. (2001), Structural design of buried pipelines for severe earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 21, pp.199-209.

31. Parmelee, R. A. (1973), Investigation of Soil-Structure Interaction of Buried Concrete Pipe, *Structural Performance of Drainage Structures*, Highway Record No 443, Highway Research Board, pp. 33-39
32. Parmelee, R. A. and Ludtke, C. A. (1975), Seismic Soil-Structure Interaction of Buried Pipeline., *Proc. US National Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, Michigan, Jun. 18-20, 1975, pp. 406-415. Published by Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
33. Sakurai, Akio and Takahashi, Tadashi (1969), Dynamic Stresses of Underground Pipelines During Earthquakes, *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Chile, pp. 81-95
34. Shinozuka, M. and Koike, T. (1979), Estimation of Ground Strain in Underground Lifeline Pipes, *Columbia University, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics*, Technical Report No. NSF-FPR-78-15049-CU-4.
35. Wang, L. R. (1980), *Seismic Analysis and Design of Buried Pipelines*, International Conference on Engineering for Protection from Natural Disasters, Asian Institute of technology, Bangkok, pp. 71-83
36. Wolfram, Stephen (1991), *Mathematica, a System for Doing Mathematics by Computer*, Second Edition, *Addison & Wesley*.

37. Yeh, Gordon C. (1977), Seismic Analysis of Buried Metal of Concrete Pipes, *Third International Conference on Pressure Vessel Technology*, Part 1: Analysis, Design and Inspection, Tokyo, Japan, Published by ASME, NY.
38. Zerva, A., Ang, A. H-S and Wen, Y. K (1988)., Lifelind Response to Spatially Variable Ground Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, pp. 361-379.
39. 구분근 (2001), 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 합리적인 해석 모형에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교 산업대학원.
40. 김성반, 정진호, 이병길 (2004), 매설관의 동적거동에 관한 연구(1), 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.5428-5433.
41. 김태욱 (1999), 횡영구지반변형에 의한 라이프라인 구조물의 동적 거동 해석, 석사학위논문, 연세대학교 대학원.
42. 어 준 (1999), 지반변형을 모형을 적용한 매설관로의 지진해석, 석사 학위 청구 논문, 연세대학교 대학원.
43. 이병길, 정진호, 장봉현, 안명석 (2004), 양단자유 경계조건을 가진 매 설관의 동적거동에서 진동안전 기준에 관한 연구, 대한화약발과공학회, 제 22권 제3호, pp.13-26.
44. 장재원 (2000), 종방향 영구지반변형에 의한 매설관로의 거동 특성 해

석, 석사학위 청구논문, 연세대학교 대학원.

45. 장봉현, 정진호, 이병길 (2003), 매설관의 동적거동에 대한 수치적 해석 접근(1), 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 4092-4096.

46. 장봉현, 정진호, 이병길 (2003), 매설관의 동적거동에 대한 수치적 해석 접근(2), 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 4097-4102.

47. 장봉현, 정진호, 이병길 (2004), 매설관의 동적거동에 관한 연구(2), 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.5422-5427.

48. 정성원 (1993), 원자력발전소 부지내 지하매설관의 지반특성에 대한 내진해석, 석사학위 청구논문, 서울대학교, 대학원.

APPENDIX

1. 메인화면 창

```

Private Sub Form_Load()
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 0) = "진동수"
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 1) = "실제변형률"
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 2) = "파장"
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 3) = "주기"
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 4) = "변형률"
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 5) = "스펙트럼"
    '차트 초기화
    ChartFX1.OpenDataEx COD_VALUES, 0, 1
    ChartFX1.CloseData COD_REMOVE
    ChartFX1.CloseData COD_VALUES
    '(0,0) DATA 랑추기
    With ChartFX1
        .Value(0) = CHART_HIDDEN
        .ValueEx(0, 0) = CHART_HIDDEN
    End With
End Sub
'-----입력창 열기-----
Private Sub Command1_Click()
    Form2.Show
End Sub
'-----결과 Data 불러오기-----
Private Sub Command10_Click()
    Form4.Show
End Sub
'-----해석조건창 열기-----
Private Sub Command2_Click()
    Form3.Show
End Sub
'-----스펙트럼창 열기-----
Private Sub Command3_Click()
    Form5.Show
End Sub
'-----동해석-----
Private Sub Command4_Click()
'***** 선언문*****
    Dim A As Variant, AAA, ABV, ABV1, ACOL As Double
    Dim AK, AL, ALK, AM, AV As Double
    Dim B, BCOL, BK, BL, CCOL As Double
    Dim CT, DCOL, DI, DT, DT1 As Double
    Dim EP, EX1, EX2, F, FF, FB As Double
    Dim FN, FX, G, GI As Double, H As Integer
    Dim I As Long, J As Integer, K As Double, KK, L As Long, nMin As Integer, MaxVV, MinVV As Double
    Dim N As Integer, N1, N2 As Integer, Period, pi As Double, Q As Integer, MaxV, MinV As Double
    Dim R As Integer, T As Double, T0 As Double, TAU As Double, TH As Double
    Dim TMAX As Double, TMAX1 As Double, TMIN As Double, Tot As Double, y As Double
    Dim VMAX As Double, vmax1 As Double, WL As Double, WLEND As Double, XI As Double
    Dim YEND As Double, z As Integer, COLA(3) As Double, COLB(3) As Double, BB(50) As Double
    Dim BBL(50) As Double, FK(3000) As Double, p(3) As Double, VV(400000), V(400000) As Double
    Dim x As Integer, M As Double, XX As Double, YY As Double, ZZ As Double '축직각
    Dim A1 As Double, A2 As Double, A3 As Double, A4 As Double, B1 As Double '축직각
    Dim B2 As Double, B3 As Double, B4 As Double, KY As Integer, KY1 As Integer '축직각
    Dim sinh(100) As Double, cosh(100) As Double '쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
'*****
    R = 1
    Q = 1
'***** 응답 조사 위치 *****
    y = Form2.y1.Text
    YEND = Form2.yend1.Text
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
    '(파장-변위(변형률)-지점)
    Dim xAp As Object '생성될 엑셀 개체
    Dim xlBook As Object
    Dim xlSheet As Object
    Dim Sh_Name As String
    Dim Sh_Name1 As String
    Dim Sh_Name2 As String
    Dim Sh_Name3 As String
    Sh_Name = "Pp"
    Sh_Name1 = "Mp"
    Sh_Name2 = "Mp1"

```

```

Sh_Name3 = "Tp"
'개체 생성
Set xAp = CreateObject("Excel.Application")
'사용자가 응용 프로그램을 보길 원하는 경우,Visible 속성을 True로 지정할 수도 있습니다.
xAp.Visible = True
'새 통합 문서를 추가한다.
Set xlBook = xAp.Workbooks.Add
Set xlSheet = xAp.sheets.Add
'지점-변위(변형률) 저장할 시트명 지정
xAp.worksheets("sheet4").Name = Sh_Name
'모드-변위(변형률) 조건 선택 유무
If Form3.Check1.Value = 1 Then
    GoTo 1
Else: GoTo 2
End If
'모드수-변위(변형률) 저장할 시트명 지정
1: xAp.worksheets("sheet1").Name = Sh_Name1
xAp.worksheets("sheet2").Name = Sh_Name2
'시간-변위(변형률) 조건 선택 유무
2: If Form3.Check2.Value = 1 Then
    GoTo 3
Else: GoTo 4
End If
'시간-변위(변형률) 저장할 시트명 지정
3: xAp.worksheets("sheet3").Name = Sh_Name3
*****
'열 제목 지정
xAp.worksheets("Tp").cells(1, 1).Value = "시간"
xAp.worksheets("Tp").cells(1, 2).Value = "변위(변형률)"
*****
4: If Form3.Option1.Value = True Then
    GoTo 30 '축방향(양단 자유)
Elseif Form3.Option2.Value = True Then
    GoTo 50 '축방향(양단 고정)
Elseif Form3.Option3.Value = True Then
    GoTo 70 '축방향(일단고정-일단자유)
Elseif Form3.Option4.Value = True Then
    GoTo 90 '축직각방향(양단 자유)
Elseif Form3.Option5.Value = True Then
    GoTo 110 '축직각방향(양단 고정)
Elseif Form3.Option6.Value = True Then
    GoTo 130 '축직각방향(일단고정-일단자유)
Elseif Form3.Option7.Value = True Then
    GoTo 150 '축직각방향(양단 롤러)
Elseif Form3.Option8.Value = True Then
    GoTo 170 '축직각방향(양단 힌지)
Elseif Form3.Option9.Value = True Then
    GoTo 190 '축직각방향(일단힌지-일단롤러)
End If
***** 축방향 (양단 자유) *****
'파장 범위
30: WL = Form2.wl1.Text
WLEND = Form2.wlend1.Text
AAA = 1
'전파 속도
AV = Form2.av1.Text
'지반 강성
TK = Form2.tk1.Text
'매설관의 횡단면적
GI = Form2.gi1.Text
'최대 시간 간격
DT1 = Form2.dt11.Text
pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
AM = Form2.am1.Text
'매설관의 길이
AL = Form2.al1.Text
'첫번째 모드의 감쇠비
XI = Form2.xi1.Text
'감쇠 계수

```

```

CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
For KK = 1 To 3000
    FK(KK) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((KK - 1) * pi / AL) ^ 2)))
Next KK
'지반진동수
31: FB = 2 * pi * AV / WL
    TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
    TMAX = AL / AV + 2 * TH
'계산에 필요한 소요 모드수 산정
    N1 = 1
    nMin = 15
    N2 = 2# * AL / WL + 11
    If N2 > nMin Then
        N2 = N2
    ElseIf N2 < nMin Then
        N2 = nMin
    End If
    For K = 1 To N2
        z = 3
        TMIN = T0
        ACOL = 0#
        BCOL = 0#
        If (K - 1) = 0 Then
            ALK = AL
        Else: ALK = AL / 2
        End If
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
        FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((K - 1) * pi / AL) ^ 2)))
        XI = CT / AM / 2# / FN
        FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
        If DT1 < (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then
            DT2 = DT1
        ElseIf DT1 > (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then DT2 = (2 * pi / (10 * FK(N2)))
        End If
        If DT2 < (2 * pi / (10 * FB)) Then
            DT = DT2
        ElseIf DT2 > (2 * pi / (10 * FB)) Then DT = (2 * pi / (10 * FB))
        End If
        EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
        EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
        G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
        AK = (FB / AV) + (pi * (K - 1) / AL)
        BK = (FB / AV) - (pi * (K - 1) / AL)
        N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
        T0 = 0#
        TAU = 0#
        TMIN = 0#
        V(1) = 0#
        WV(1) = 0#
        MaxV = 0#
        MaxWV = 0#
'수치 적분
        For I = 2 To N
            For J = 1 To 3
                TAU = TMIN + (J - 1) * DT
                FT = FB * TAU
                If AL / AV < TAU Then
                    BL = AL
                Else
                    BL = (AV * TAU)
                End If
                If (Abs(BK) > 0.000000000000001) Then
                    A = Sin(BK * BL) / (2# * BK) + Sin(AK * BL) / (2# * AK)
                    B = (1# - Cos(BK * BL)) / (2# * BK) + (1# - Cos(AK * BL)) / (2# * AK)
                Else
                    A = BL / 2# + (Sin(2# * FB * BL / AV)) / (4# * (FB / AV))
                    B = ((Sin(FB * BL / AV)) ^ 2) / (2# * (FB / AV))
                End If
                p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
                COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
                COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
            Next J
        Next I
    Next K
Next KK

```

```

ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
If Form3.Option13.Value = True Then
    GoTo 32
Elseif Form3.Option14.Value = True Then
    GoTo 33
Elseif Form3.Option15.Value = True Then
    GoTo 34
'매설관의 축방향 변위
32: V(l) = V(l) + (Cos((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(l) = Cos((K - 1) * pi * y / AL) * (CCOL - DCOL) * G
    GoTo 35
33: GoTo 45
'매설관의 축방향 변형률
34: V(l) = V(l) - (pi * (K - 1) / AL) * (Sin((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(l) = -(pi * (K - 1) / AL) * (Sin((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
35: If Form3.Check1.Value = 1 Then
    GoTo 36
Else: GoTo 38
    End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
36: xAp.worksheets("Mp").cells(z, K).Value = V(l)
    xAp.worksheets("Mp1").cells(z, K).Value = VV(l)
    z = z + 1
'모드수에 따른 최대,최소 변위(변형률) 산정
If Abs(V(l)) <= MaxV Then
    GoTo 37
End If
MaxV = Abs(V(l))
37: If Abs(VV(l)) <= MaxVV Then
    GoTo 38
    End If
MaxVV = Abs(VV(l))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
38: If Form3.Check2.Value = 1 Then
    GoTo 39
Else: GoTo 40
    End If
'시간과 변위(변형률) 출력
39: If (K = 15) Then
    R = R + 1
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(l)
    End If
40: TMIN = TAU
    Next l
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
If Form3.Check1.Value = 0 Then
    GoTo 41
End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
xAp.worksheets("Mp").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp").cells(2, K).Value = MaxV
xAp.worksheets("Mp1").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp1").cells(2, K).Value = MaxVV
41: Next K
T = 0#
For l = 2 To N
    T = T + 2# * DT
    If (T <= (AL / AV)) Then
        GoTo 42
    Else: GoTo 43
    End If
42: ABV1 = Abs(V(l))
    If (ABV1 < vmax1) Then
        GoTo 44
    Else: vmax1 = ABV1
    End If
    GoTo 44

```

```

43:   ABV = Abs(V(I))
      If (ABV < VMAX) Then
          GoTo 44
      Else: VMAX = ABV
      End If
44:   Next I
'주기 산정
'Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
'Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB
If Form3.Option11.Value = True Then
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
End If
'파장, 변위(변형률) 출력
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
If Form3.Option11.Value = True Then
    xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
End If
If (WL >= WLEND) Then
    GoTo 45
End If
WL = WL + 0.1 * AV
AAA = AAA + 1
'매셀관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 31
45:   xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
      If (y >= YEND) Then
          GoTo 46
      End If
      y = y + 5
      Q = Q + 1
'매셀관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 30
46:   MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
' (파장-변위(변형률)-지점)
With xlSheet
-----
'내용 입력부분
-----
End With
'지정된 경로로 저장
xlSheet.SaveAs "E:\논문관련\W박사 논문\W프로그램 작업\WVBA를 VB로 변환\작업\W외형디자인\Wdata(frfr).xls"
xlBook.Close '현재 워크북을 종료
xAp.Quit '엑셀 종료
Set xlSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xAp = Nothing
Exit Sub
'***** 축방향 (양단 고정) *****
Exit Sub
'파장 범위
50:   WL = Form2.wl1.Text
      WLEND = Form2.wlend1.Text
      AAA = 1
'전파 속도
AV = Form2.av1.Text
'지반 강성
TK = Form2.tk1.Text

```

```

'매설관의 횡단면적
  GI = Form2.gi1.Text
'최대 시간 간격
  DT1 = Form2.dt11.Text
  pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
  EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
  DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
  AM = Form2.am1.Text
'매설관의 길이
  AL = Form2.al1.Text
'첫번째 모드의 강쇠비
  XI = Form2.xi1.Text
'강쇠 계수
  CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
  For KK = 1 To 3000
    FK(KK) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((KK - 1) * pi / AL) ^ 2)))
  Next KK
'지반진동수
51: FB = 2 * pi * AV / WL
  TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
  TMAX = AL / AV + 2 * TH
'계산에 필요한 소요 모드수 산정
  N1 = 1
  nMin = 15
  N2 = 2# * AL / WL + 11
  If N2 > nMin Then
    N2 = N2
  ElseIf N2 < nMin Then
    N2 = nMin
  End If
  For K = 1 To N2
    z = 3
    TMIN = T0
    ACOL = 0#
    BCOL = 0#
    ALK = AL / 2
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
    FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((K - 1) * pi / AL) ^ 2)))
    XI = CT / AM / 2# / FN
    FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
    If DT1 < (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then
      DT2 = DT1
    ElseIf DT1 > (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then DT2 = (2 * pi / (10 * FK(N2)))
    End If
    If DT2 < (2 * pi / (10 * FB)) Then
      DT = DT2
    ElseIf DT2 > (2 * pi / (10 * FB)) Then DT = (2 * pi / (10 * FB))
    End If
    EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
    EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
    G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
    AK = (FB / AV) + (pi * K / AL)
    BK = (FB / AV) - (pi * K / AL)
    N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
    T0 = 0#
    TAU = 0#
    TMIN = 0#
    V(1) = 0#
    VV(1) = 0#
    MaxV = 0#
    MaxVV = 0#
'수치 적분
  For I = 2 To N
    For J = 1 To 3
      TAU = TMIN + (J - 1) * DT
      FT = FB * TAU
      If AL < (AV * TAU) Then
        BL = AL
      Else

```

```

    BL = (AV * TAU)
End If
If (Abs(BK) > 0.000000000000001) Then
    A = (1# - Cos(AK * BL)) / (2# * AK) - (1# - Cos(BK * BL)) / (2# * BK)
    B = Sin(BK * BL) / (2# * BK) - Sin(AK * BL) / (2# * AK)
    Else
        A = ((Sin(FB * BL / AV)) ^ 2) / (2# * (FB / AV))
        B = BL / 2# - (Sin(2# * FB * BL / AV)) / (4# * (FB / AV))
    End If
    p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
    COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
    COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
Next J
ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
If Form3.Option13.Value = True Then
    GoTo 52
Elseif Form3.Option14.Value = True Then
    GoTo 53
Elseif Form3.Option15.Value = True Then
    GoTo 54
'매설관의 축방향 변위
52: V(I) = V(I) + (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(I) = (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    GoTo 55
53: GoTo 65
'매설관의 축방향 변형률
54: V(I) = V(I) + (pi * K / AL) * (Cos(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(I) = (pi * K / AL) * (Cos(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
55: If Form3.Check1.Value = 1 Then
    GoTo 56
    Else: GoTo 58
    End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
56: xAp.worksheets("Mp").cells(z, K).Value = V(I)
    xAp.worksheets("Mp1").cells(z, K).Value = VV(I)
    z = z + 1
'모드수에 따른 최대,최소 변위(변형률) 산정
If Abs(V(I)) <= MaxV Then
    GoTo 57
    End If
MaxV = Abs(V(I))
57: If Abs(VV(I)) <= MaxVV Then
    GoTo 58
    End If
MaxVV = Abs(VV(I))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
58: If Form3.Check2.Value = 1 Then
    GoTo 59
    Else: GoTo 60
    End If
'시간과 변위(변형률) 출력
59: If (K = 15) Then
    R = R + 1
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(I)
    End If
60: TMIN = TAU
    Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
If Form3.Check1.Value = 0 Then
    GoTo 61
    End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
xAp.worksheets("Mp").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp").cells(2, K).Value = MaxV
xAp.worksheets("Mp1").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp1").cells(2, K).Value = MaxVV
61: Next K

```

```

T = 0#
For I = 2 To N
T = T + 2# * DT
If (T <= (AL / AV)) Then
GoTo 62
Else: GoTo 63
End If
62: ABV1 = Abs(V(I))
If (ABV1 < vmax1) Then
GoTo 64
Else: vmax1 = ABV1
End If
GoTo 64
63: ABV = Abs(V(I))
If (ABV < VMAX) Then
GoTo 64
Else: VMAX = ABV
End If
64: Next I
'주기 산정
Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB
If Form3.Option11.Value = True Then
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
End If
'파장, 변위(변형률) 출력
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
If Form3.Option11.Value = True Then
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
End If
If (WL >= WLEND) Then
GoTo 65
End If
WL = WL + 0.1 * AV
AAA = AAA + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 51
65: xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
If (y >= YEND) Then
GoTo 66
End If
y = y + 5
Q = Q + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 50
66: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
'(파장-변위(변형률)-지점)
With xlSheet
-----
'내용 입력부분
-----
End With
'지정한 경로로 저장
xlSheet.SaveAs "E:\논문관련\W박사 논문\W프로그램 작업\WBA를 VB로 변환작업\W외형디자인\Wadata(fx)fx.xls"
xlBook.Close '현재 워크북을 종료
xAp.Quit '엑셀 종료
Set xlSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing

```

```

Set xAp = Nothing
Exit Sub
'*****
Exit Sub
'***** 축방향 (일단고정-일단자유) *****
'파장 범위
70: WL = Form2.wl1.Text
    WLEND = Form2.wiend1.Text
    AAA = 1
'전파 속도
    AV = Form2.av1.Text
'지반 강성
    TK = Form2.tk1.Text
'매설관의 횡단면적
    GI = Form2.gi1.Text
'최대 시간 간격
    DT1 = Form2.dt11.Text
    pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
    EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
    DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
    AM = Form2.am1.Text
'매설관의 길이
    AL = Form2.al1.Text
'첫번째 모드의 감쇠비
    XI = Form2.xi1.Text
'감쇠 계수
    CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
    For KK = 1 To 3000
        FK(KK) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((2 * KK - 1) * pi / (2 * AL)) ^ 2)))
    Next KK
'지반진동수
71: FB = 2 * pi * AV / WL
    TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
    TMAX = AL / AV + 2 * TH
'계산에 필요한 소요 모드수 산정
    N1 = 1
    nMin = 15
    N2 = 2# * AL / WL + 11
    If N2 > nMin Then
        N2 = N2
    ElseIf N2 < nMin Then
        N2 = nMin
    End If
    For K = 1 To N2
        z = 3
        TMIN = T0
        ACOL = 0#
        BCOL = 0#
'Lk는 k에 관계없이 일정
        ALK = AL / 2
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
        FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((2 * K - 1) * pi / (2 * AL)) ^ 2)))
        XI = CT / AM / 2# / FN
        FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
        If DT1 < (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then
            DT2 = DT1
        ElseIf DT1 > (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then DT2 = (2 * pi / (10 * FK(N2)))
        End If
        If DT2 < (2 * pi / (10 * FB)) Then
            DT = DT2
        ElseIf DT2 > (2 * pi / (10 * FB)) Then DT = (2 * pi / (10 * FB))
        End If
        EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
        EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
        G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
        AK = (FB / AV) + (pi * (2 * K - 1) / (2 * AL))
        BK = (FB / AV) - (pi * (2 * K - 1) / (2 * AL))
        N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
        T0 = 0#

```

```

TAU = 0#
TMIN = 0#
V(1) = 0#
VV(1) = 0#
MaxV = 0#
MaxVV = 0#
'수치 적분
For I = 2 To N
  For J = 1 To 3
    TAU = TMIN + (J - 1) * DT
    FT = FB * TAU
    If AL < (AV * TAU) Then
      BL = AL
    Else
      BL = (AV * TAU)
    End If
    If (Abs(BK) > 0.000000000000001) Then
      A = (1# - Cos(AK * BL)) / (2# * AK) - (1# - Cos(BK * BL)) / (2# * BK)
      B = Sin(BK * BL) / (2# * BK) - Sin(AK * BL) / (2# * AK)
    Else
      A = ((Sin(FB * BL / AV)) ^ 2) / (2# * (FB / AV))
      B = BL / 2# - (Sin(2# * FB * BL / AV)) / (4# * (FB / AV))
    End If
    p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
    COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
    COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
  Next J
  ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2) + COLA(3))
  BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2) + COLB(3))
  CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
  DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
If Form3.Option13.Value = True Then
  GoTo 72
Elseif Form3.Option14.Value = True Then
  GoTo 73
Elseif Form3.Option15.Value = True Then
  GoTo 74
'매설관의 축방향 변위
72: V(I) = V(I) + (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
  VV(I) = (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
  GoTo 75
73: GoTo 86
'매설관의 축방향 변형률
74: V(I) = V(I) + ((2 * K - 1) * pi / (2 * AL)) * (Cos((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
  VV(I) = ((2 * K - 1) * pi / (2 * AL)) * (Cos((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
  End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
75: If Form3.Check1.Value = 1 Then
  GoTo 76
Else: GoTo 78
  End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
76: xAp.worksheets("Mp").cells(z, K).Value = V(I)
  xAp.worksheets("Mp1").cells(z, K).Value = VV(I)
  z = z + 1
'모드수에 따른 최대, 최소 변위(변형률) 산정
If Abs(V(I)) <= MaxV Then
  GoTo 77
End If
MaxV = Abs(V(I))
77: If Abs(VV(I)) <= MaxVV Then
  GoTo 78
End If
MaxVV = Abs(VV(I))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
78: If Form3.Check2.Value = 1 Then
  GoTo 79
Else: GoTo 80
  End If
'시간과 변위(변형률) 출력
79: If (K = 15) Then
  R = R + 1
  xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU

```

```

        xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(I)
    End If
80:   TMIN = TAU
    Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
    If Form3.Check1.Value = 0 Then
        GoTo 81
    End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
    xAp.worksheets("Mp").cells(1, K).Value = K
    xAp.worksheets("Mp").cells(2, K).Value = MaxV
    xAp.worksheets("Mp1").cells(1, K).Value = K
    xAp.worksheets("Mp1").cells(2, K).Value = MaxVV
81:   Next K
    T = 0#
    For I = 2 To N
        T = T + 2# * DT
        If (T <= (AL / AV)) Then
            GoTo 82
        Else: GoTo 83
        End If
82:   ABV1 = Abs(V(I))
        If (ABV1 < vmax1) Then
            GoTo 84
        Else: vmax1 = ABV1
        End If
        GoTo 84
83:   ABV = Abs(V(I))
        If (ABV < VMAX) Then
            GoTo 84
        Else: VMAX = ABV
        End If
84:   Next I
'주기 산정
    Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
    'Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB
    If Form3.Option11.Value = True Then
        Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
        Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
    End If
'파장, 변위(변형률) 출력
    xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
    If Form3.Option11.Value = True Then
        xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
        Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
    End If
    If (WL >= WLEND) Then
        GoTo 85
    End If
    WL = WL + 0.1 * AV
    AAA = AAA + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
    For L = 1 To N
        V(L) = 0#
    Next L
    VMAX = 0#
    vmax1 = 0#
    GoTo 71
85:   xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
    If (y >= YEND) Then
        GoTo 86
    End If
    y = y + 5
    Q = Q + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
    For L = 1 To N
        V(L) = 0#
    Next L
    VMAX = 0#
    vmax1 = 0#
    GoTo 70

```

```

86: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
      (파장-변위(변형률)-지점)
With xlSheet
-----
'내용 입력부분
-----
End With
'지정한 경로로 저장
xlSheet.SaveAs "E:\논문관련\박사 논문\프로그램 작업\WBA를 VB로 변환작업\외형디자인\Wadata(fx.fr).xls"
xlBook.Close '현재 워크북을 종료
xAp.Quit '엑셀 종료
Set xlSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xAp = Nothing
Exit Sub
'*****
Exit Sub
'***** 축적각방향 (양단자유) *****
'매설관의 길이
90: AL = Form2.al1.Text
'BETA*L 의 값
      BBL(1) = 4.73004075133833
      BBL(2) = 7.85320462409585
      BBL(3) = 10.9956078380017
      BBL(4) = 14.1371654912575
      BBL(5) = 17.2787596573995
      BBL(6) = 20.4203522456261
      BBL(7) = 23.5619449020405
      BBL(8) = 26.7035375555082
      BBL(9) = 29.8451302091033
      BBL(10) = 32.9867228626928
'베타값(모드수에 따라 변화)
      For I = 1 To 10
          BB(I) = BBL(I) / AL
      Next I
'파장 범위
91: WL = Form2.wl1.Text
      WLEND = Form2.wlend1.Text
      AAA = 1
'전파 속도
      AV = Form2.av1.Text
'지반 강성
      TK = Form2.tk2.Text
'매설관의 관성모멘트
      GI = Form2.gi2.Text
'최대 시간 간격
      DT1 = Form2.dt11.Text
      pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
      EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
      DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
      AM = Form2.am1.Text
'첫번째 모드의 감쇠비
      XI = Form2.xi1.Text
'감쇠 계수
      CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 지동수 계산
      For KY = 1 To 10
          KK = BB(KY)
          FK(KY) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * KK ^ 4))
      Next KY
'지반 지동수
92: FB = 2 * pi * AV / WL
      TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
      TMAX = AL / AV + 2 * TH
      N2 = 7 '해석에 이용된 모드수
'동적거동에 대한 수치적 접근
      For KY1 = 1 To N2
          K = BB(KY1)
          z = 3 '(모드수에 따른 변위의 변화를 출력하기 필요 : 위치 이동 안됨!!)

```

```

TMIN = T0
ACOL = 0
BCOL = 0
'쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
sinh(K * AL) = (Exp(K * AL) - Exp(-K * AL)) / 2
cosh(K * AL) = (Exp(K * AL) + Exp(-K * AL)) / 2
sinh(2 * K * AL) = (Exp(2 * K * AL) - Exp(-2 * K * AL)) / 2
cosh(2 * K * AL) = (Exp(2 * K * AL) + Exp(-2 * K * AL)) / 2
'L값 산정
M = (Sin(K * AL) - sinh(K * AL)) / (cosh(K * AL) - Cos(K * AL))
XX = (1 / (4 * K)) * (sinh(2 * K * AL) + Sin(2 * K * AL)) + AL + 1 / K * (sinh(K * AL) * Cos(K * AL) + cosh(K * AL) * Sin(K * AL))
YY = (1 / (4 * K)) * (sinh(2 * K * AL) - Sin(2 * K * AL)) + 1 / K * (cosh(K * AL) * Sin(K * AL) - sinh(K * AL) * Cos(K * AL))
ZZ = (1 / K) * (0.25 * cosh(2 * K * AL) - 0.25 * Cos(2 * K * AL) + Sin(K * AL) * sinh(K * AL))
ALK = (M ^ 2) * XX + YY + 2 * M * ZZ
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * K ^ 4))
XI = CT / (AM * 2# * FN)
FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
DT = DT1
EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
T0 = 0#
TAU = 0#
TMIN = 0#
V(1) = 0#
VV(1) = 0#
MaxV = 0#
MaxVV = 0#
'시간에 대한 수치 적분 (Simpson's law 적용)
For I = 2 To N
  For J = 1 To 3
    TAU = TMIN + (J - 1) * DT
    FT = FB * TAU
    If AL < (AV * TAU) Then
      BL = AL
    Else
      BL = (AV * TAU)
    End If
    '쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
    sinh(K * BL) = (Exp(K * BL) - Exp(-K * BL)) / 2
    cosh(K * BL) = (Exp(K * BL) + Exp(-K * BL)) / 2
    A1 = 1 / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * cosh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL) + FB / AV * (sinh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL)) - K)
    A2 = M / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * sinh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL) + FB / AV * (cosh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL)))
    A3 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV + K)) * (M * Sin(FB / AV * BL + K * BL) - Cos(FB / AV * BL + K * BL) + 1)
    A4 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV - K)) * (M * Sin(FB / AV * BL - K * BL) + Cos(FB / AV * BL - K * BL) - 1)
    B1 = 1 / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * cosh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL) - FB / AV * (sinh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL)))
    B2 = M / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * sinh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL) - FB / AV * (cosh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL)) + FB / AV)
    B3 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV + K)) * (M * Cos(FB / AV * BL + K * BL) + Sin(FB / AV * BL + K * BL) - M)
    B4 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV - K)) * (M * Cos(FB / AV * BL - K * BL) - Sin(FB / AV * BL - K * BL) - M)
    A = A1 + A2 + A3 + A4
    B = B1 + B2 - (B3 + B4)
    p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
    COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
    COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
  Next J
  ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
  BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
  CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
  DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
  '쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
  sinh(K * y) = (Exp(K * y) - Exp(-K * y)) / 2
  cosh(K * y) = (Exp(K * y) + Exp(-K * y)) / 2
  '변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
  If Form3.Option13.Value = True Then
    GoTo 93
  ElseIf Form3.Option14.Value = True Then
    GoTo 94
  ElseIf Form3.Option15.Value = True Then
    GoTo 95
  '매설관의 축직각방향 변위
93: V(I) = V(I) + (M * (cosh(K * y) + Cos(K * y)) + sinh(K * y) + Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
  VV(I) = (M * (cosh(K * y) + Cos(K * y)) + sinh(K * y) + Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G

```

```

GoTo 96
'매설관의 축직각방향 곡률
94: V(l) = V(l) + (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) - K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) - K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCCL - DCCCL) * G
    V(l) = (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) - K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) - K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCCL - DCCCL) * G
GoTo 96
'매설관의 축직각방향 휨변형률
95: V(l) = V(l) + (D / 2) * (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) - K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) - K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCCL - DCCCL) * G
    V(l) = (D / 2) * (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) - K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) - K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCCL - DCCCL) * G
End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
96: If Form3.Check1.Value = 1 Then
    GoTo 97
    Else: GoTo 99
End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
97: V(1) = 0#
    xAp.worksheets("Mp").cells(z, KY1).Value = V(l)
    xAp.worksheets("Mp1").cells(z, KY1).Value = VV(l)
    z = z + 1
'모드수에 따른 최대,최소 변위(변형률) 산정
If Abs(V(l)) <= MaxV Then
    GoTo 98
End If
MaxV = Abs(V(l))
98: If Abs(VV(l)) <= MaxVV Then
    GoTo 99
End If
MaxVV = Abs(VV(l))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
99: If Form3.Check2.Value = 1 Then
    GoTo 100
    Else: GoTo 101
End If
'시간과 변위(변형률) 출력
100: If (KY1 = 6) Then
    R = R + 1
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(l)
End If
101: TMIN = TAU
    Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
If Form3.Check1.Value = 0 Then
    GoTo 102
End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
xAp.worksheets("Mp").cells(1, KY1).Value = KY1
xAp.worksheets("Mp").cells(2, KY1).Value = MaxV
xAp.worksheets("Mp1").cells(1, KY1).Value = KY1
xAp.worksheets("Mp1").cells(2, KY1).Value = MaxVV
102: Next KY1
T = 0#
For I = 2 To N
T = T + 2# * DT
If (T <= (AL / AV)) Then
    GoTo 103
    Else: GoTo 104
End If
103: ABV1 = Abs(V(l))
If (ABV1 < vmax1) Then
    GoTo 105
    Else: vmax1 = ABV1
End If
GoTo 105
104: ABV = Abs(V(l))
If (ABV < VMAX) Then
    GoTo 105
    Else: VMAX = ABV
End If
105: Next I
'주기 산정
Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
'Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period

```

```

Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB
If Form3.Option11.Value = True Then
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
    Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
End If
'파장, 변위(변형률) 출력
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
If Form3.Option11.Value = True Then
    xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
    Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
End If
If (WL >= WLEND) Then
    GoTo 106
End If
WL = WL + 0.1 * AV
AAA = AAA + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 92
106: xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
If (y >= YEND) Then
    GoTo 107
End If
y = y + 5
Q = Q + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 91
107: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
'(파장-변위(변형률)-지점)
With xlSheet
-----
'내용 입력부분
-----
End With
'지정한 경로로 저장
xlSheet.SaveAs "E:\논문관련\박사 논문\W프로그램 작업\WVBA를 VB로 변환\작업\외형디자인\WTdata(frfr).xls"
xlBook.Close '현재 워크북을 종료
xAp.Quit '엑셀 종료
Set xlSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xAp = Nothing
Exit Sub
'*****
Exit Sub
'***** 축직각방향 (양단고정) *****
'매설관의 길이
110: AL = Form2.a11.Text
'BETA*L 의 값
BBL(1) = 4.73004075133833
BBL(2) = 7.85320462409585
BBL(3) = 10.9956078380017
BBL(4) = 14.1371654912575
BBL(5) = 17.2787596573995
BBL(6) = 20.4203522456261
BBL(7) = 23.5619449020405
BBL(8) = 26.7035375555082
BBL(9) = 29.8451302091033
BBL(10) = 32.9867228626928
'베타값(모드수에 따라 변화)
For I = 1 To 10
    BB(I) = BBL(I) / AL
Next I
'파장 범위

```

```

111: WL = Form2.wl1.Text
    WLEND = Form2.wlend1.Text
    AAA = 1
'전파 속도
    AV = Form2.av1.Text
'지반 강성
    TK = Form2.tk2.Text
'매설관의 관성모멘트
    GI = Form2.gi2.Text
'최대 시간 간격
    DT1 = Form2.dt11.Text
    pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
    EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
    DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
    AM = Form2.am1.Text
'첫번째 모드의 감쇠비
    XI = Form2.xi1.Text
'감쇠 계수
    CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
    For KY = 1 To 10
        KK = BB(KY)
        FK(KY) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * KK ^ 4))
    Next KY
'지반진동수
112: FB = 2 * pi * AV / WL
    TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
    TMAX = AL / AV + 2 * TH
    N2 = 6 ' 해석에 이용된 모드수
'동적거동에 대한 수치적 접근
    For KY1 = 1 To N2
        K = BB(KY1)
        z = 3 '(모드수에 따른 변위의 변화를 출력하기 필요 : 위치 이동 안됨!!)
        TMIN = T0
        ACOL = 0
        BCOL = 0
        '쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
        sinh(K * AL) = (Exp(K * AL) - Exp(-K * AL)) / 2
        cosh(K * AL) = (Exp(K * AL) + Exp(-K * AL)) / 2
        sinh(2 * K * AL) = (Exp(2 * K * AL) - Exp(-2 * K * AL)) / 2
        cosh(2 * K * AL) = (Exp(2 * K * AL) + Exp(-2 * K * AL)) / 2
'L값 산정
        M = (Sin(K * AL) - sinh(K * AL)) / (cosh(K * AL) - Cos(K * AL))
        XX = (1 / (4 * K)) * (sinh(2 * K * AL) + Sin(2 * K * AL)) + AL - 1 / K * (sinh(K * AL) * Cos(K * AL) + cosh(K * AL) * Sin(K * AL))
        YY = (1 / (4 * K)) * (sinh(2 * K * AL) + Sin(2 * K * AL)) - 1 / K * (cosh(K * AL) * Sin(K * AL) - sinh(K * AL) * Cos(K * AL))
        ZZ = (0.5 / K) * (sinh(K * AL) - Sin(K * AL)) ^ 2
        ALK = (M ^ 2) * XX + YY + 2 * M * ZZ
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
        FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * K ^ 4))
        XI = CT / (AM * 2# * FN)
        FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
        DT = DT1
        EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
        EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
        G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
        N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
        T0 = 0#
        TAU = 0#
        TMIN = 0#
        V(1) = 0#
        VV(1) = 0#
        MaxV = 0#
        MaxVV = 0#
'시간에 대한 수치 적분 (Simpson's law 적용)
        For I = 2 To N
            For J = 1 To 3
                TAU = TMIN + (J - 1) * DT
                FT = FB * TAU
                If AL < (AV * TAU) Then
                    BL = AL

```

```

Else
  BL = (AV * TAU)
End If
'쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
sinh(K * BL) = (Exp(K * BL) - Exp(-K * BL)) / 2
cosh(K * BL) = (Exp(K * BL) + Exp(-K * BL)) / 2
A1 = 1 / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * cosh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL) + FB / AV * (sinh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL)) - K)
A2 = M / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * sinh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL) + FB / AV * (cosh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL)))
A3 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV + K)) * (M * Sin(FB / AV * BL + K * BL) - Cos(FB / AV * BL + K * BL) + 1)
A4 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV - K)) * (M * Sin(FB / AV * BL - K * BL) + Cos(FB / AV * BL - K * BL) - 1)
B1 = 1 / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * cosh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL) - FB / AV * (sinh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL)))
B2 = M / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * sinh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL) - FB / AV * (cosh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL)) + FB / AV)
B3 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV + K)) * (M * Cos(FB / AV * BL + K * BL) + Sin(FB / AV * BL + K * BL) - M)
B4 = 1 / 2 * (1 / (FB / AV - K)) * (M * Cos(FB / AV * BL - K * BL) - Sin(FB / AV * BL - K * BL) - M)
A = A1 + A2 - A3 - A4
B = B1 + B2 + B3 + B4
p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
Next J
ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
sinh(K * y) = (Exp(K * y) - Exp(-K * y)) / 2
cosh(K * y) = (Exp(K * y) + Exp(-K * y)) / 2
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
If Form3.Option13.Value = True Then
  GoTo 113
  Elseif Form3.Option14.Value = True Then
    GoTo 114
    Elseif Form3.Option15.Value = True Then
      GoTo 115
'매설관의 축직각방향 변위
113: V(I) = V(I) + (M * (cosh(K * y) - Cos(K * y)) + sinh(K * y) - Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
  VV(I) = (M * (cosh(K * y) - Cos(K * y)) + sinh(K * y) - Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
  GoTo 116
'매설관의 축직각방향 곡률
114: V(I) = V(I) + (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) + K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) + K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
  VV(I) = (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) + K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) + K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
  GoTo 116
'매설관의 축직각방향 횡변형률
115: V(I) = V(I) + (D / 2) * (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) + K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) + K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
  VV(I) = (D / 2) * (M * (K ^ 2 * cosh(K * y) + K ^ 2 * Cos(K * y)) + K ^ 2 * sinh(K * y) + K ^ 2 * Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
116: If Form3.Check1.Value = 1 Then
  GoTo 117
  Else: GoTo 119
End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
117: xAp.worksheets("Mp").cells(z, KY1).Value = V(I)
  xAp.worksheets("Mp1").cells(z, KY1).Value = VV(I)
  z = z + 1
'모드수에 따른 최대, 최소 변위(변형률) 산정
If Abs(V(I)) <= MaxV Then
  GoTo 118
End If
MaxV = Abs(V(I))
118: If Abs(VV(I)) <= MaxVV Then
  GoTo 119
End If
MaxVV = Abs(VV(I))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
119: If Form3.Check2.Value = 1 Then
  GoTo 120
  Else: GoTo 121
End If
'시간과 변위(변형률) 출력
120: If (KY1 = 6) Then
  R = R + 1
  xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
  xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(I)

```

```

End If
121: TMIN = TAU
Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
If Form3.Check1.Value = 0 Then
GoTo 122
End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
xAp.worksheets("Mp").cells(1, KY1).Value = KY1
xAp.worksheets("Mp").cells(2, KY1).Value = MaxV
xAp.worksheets("Mp1").cells(1, KY1).Value = KY1
xAp.worksheets("Mp1").cells(2, KY1).Value = MaxVV
122: Next KY1
T = 0#
For i = 2 To N
T = T + 2# * DT
If (T <= (AL / AV)) Then
GoTo 123
Else: GoTo 124
End If
123: ABV1 = Abs(V(i))
If (ABV1 < vmax1) Then
GoTo 125
Else: vmax1 = ABV1
End If
GoTo 125
124: ABV = Abs(V(i))
If (ABV < VMAX) Then
GoTo 125
Else: VMAX = ABV
End If
125: Next I
'주기 산정
Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB
If Form3.Option11.Value = True Then
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
End If
'파장, 변위(변형률) 출력
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
If Form3.Option11.Value = True Then
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
End If
If (WL >= WLEND) Then
GoTo 126
End If
WL = WL + 0.1 * AV
AAA = AAA + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 112
126: xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
If (y >= YEND) Then
GoTo 127
End If
y = y + 5
Q = Q + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 111
127: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."

```

```

***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
      (파일-변위(변형률)-지정)
      With xlSheet
-----
'내용 입력부분
-----
      End With
      '지정한 경로로 저장
      xlSheet.SaveAs "E:\논문관련\박사 논문\프로그램 작업\VB를 VBA로 변환작업\외형디자인\WTdata(fx).xls"
      xlBook.Close '현재 워크북을 종료
      xAp.Quit '엑셀 종료
      Set xlSheet = Nothing
      Set xlBook = Nothing
      Set xAp = Nothing
      Exit Sub
*****
Exit Sub
***** 축적각방향 (일단고정-일단자유) *****
'매설관의 길이
130: AL = Form2.al1.Text
'BETA*L 의 값
      BBL(1) = 1.875105
      BBL(2) = 4.6940912
      BBL(3) = 7.85475744
      BBL(4) = 10.995540735
      BBL(5) = 14.13716839105
      BBL(6) = 17.278759532088
      BBL(7) = 20.42035225109
      BBL(8) = 23.5619449018064
      BBL(9) = 26.703537555183
      BBL(10) = 29.8451302091028
'베타값(모드수에 따라 변화)
      For l = 1 To 10
          BB(l) = BBL(l) / AL
      Next l
'파일 범위
131: WL = Form2.wl1.Text
      WLEND = Form2.wlend1.Text
      AAA = 1
'전파 속도
      AV = Form2.av1.Text
'지반 강성
      TK = Form2.tk2.Text
'매설관의 관성모멘트
      GI = Form2.gi2.Text
'최대 시간 간격
      DT1 = Form2.dt11.Text
      pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
      EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
      DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
      AM = Form2.am1.Text
'첫번째 모드의 감쇠비
      XI = Form2.xi1.Text
'강쇠 계수
      CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
      For KY = 1 To 10
          KK = BB(KY)
          FK(KY) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * KK ^ 4))
      Next KY
'지반진동수
132: FB = 2 * pi * AV / WL
      TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
      TMAX = AL / AV + 2 * TH
      N2 = 6 '해석에 이용된 모드수
'동적거동에 대한 수치적 접근
      For KY1 = 1 To N2
          K = BB(KY1)
          z = 3 '(모드수에 따른 변위의 변화를 출력하기 필요 : 위치 이동 안됨!!)
          TMIN = T0

```

```

ACOL = 0
BCOL = 0
'쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
sinh(K * AL) = (Exp(K * AL) - Exp(-K * AL)) / 2
cosh(K * AL) = (Exp(K * AL) + Exp(-K * AL)) / 2
sinh(2 * K * AL) = (Exp(2 * K * AL) - Exp(-2 * K * AL)) / 2
cosh(2 * K * AL) = (Exp(2 * K * AL) + Exp(-2 * K * AL)) / 2
'로그 산정
M = (Sin(K * AL) + sinh(K * AL)) / (cosh(K * AL) + Cos(K * AL))
XX = (1 / (4 * K)) * (sinh(2 * K * AL) + Sin(2 * K * AL)) + AL - 1 / K * (sinh(K * AL) * Cos(K * AL) + cosh(K * AL) * Sin(K * AL))
YY = (1 / (4 * K)) * (sinh(2 * K * AL) - Sin(2 * K * AL)) - 1 / K * (cosh(K * AL) * Sin(K * AL) - sinh(K * AL) * Cos(K * AL))
ZZ = (1 / (2 * K)) * (sinh(K * AL) - Sin(K * AL)) ^ 2
ALK = (M ^ 2) * XX + YY - 2 * M * ZZ
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * K ^ 4))
XI = CT / (AM * 2# * FN)
FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
DT = DT1
EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
TO = 0#
TAU = 0#
TMIN = 0#
V(1) = 0#
VV(1) = 0#
MaxV = 0#
MaxVV = 0#
'시간에 대한 수치 적분 (Simpson's law 적용)
For I = 2 To N
  For J = 1 To 3
    TAU = TMIN + (J - 1) * DT
    FT = FB * TAU
    If AL < (AV * TAU) Then
      BL = AL
    Else
      BL = (AV * TAU)
    End If
    '쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
    sinh(K * BL) = (Exp(K * BL) - Exp(-K * BL)) / 2
    cosh(K * BL) = (Exp(K * BL) + Exp(-K * BL)) / 2
    A1 = (1 / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2)) * (K * cosh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL) + FB / AV * sinh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL) - K)
    A2 = (M / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2)) * (K * sinh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL) + FB / AV * (cosh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL)))
    A3 = 0.5 * (1 / (FB / AV + K)) * (M * Sin(FB / AV * BL + K * BL) + Cos(FB / AV * BL + K * BL) - 1)
    A4 = 0.5 * (1 / (FB / AV - K)) * (M * Sin(FB / AV * BL - K * BL) - Cos(FB / AV * BL - K * BL) + 1)
    B1 = 1 / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * cosh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL) - FB / AV * (sinh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL)))
    B2 = M / (K ^ 2 + (FB / AV) ^ 2) * (K * sinh(K * BL) * Sin(FB / AV * BL) - FB / AV * (cosh(K * BL) * Cos(FB / AV * BL)) + FB / AV)
    B3 = 0.5 * (1 / (FB / AV + K)) * (M * Cos(FB / AV * BL + K * BL) - Sin(FB / AV * BL + K * BL) - M)
    B4 = 0.5 * (1 / (FB / AV - K)) * (M * Cos(FB / AV * BL - K * BL) + Sin(FB / AV * BL - K * BL) - M)
    A = A1 - A2 + A3 + A4
    B = B1 - B2 - B3 - B4
    p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
    COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
    COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
  Next J
  ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
  BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
  CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
  DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'쌍곡선 함수를 지수함수로 대체
sinh(K * y) = (Exp(K * y) - Exp(-K * y)) / 2
cosh(K * y) = (Exp(K * y) + Exp(-K * y)) / 2
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택할
If Form3.Option13.Value = True Then
  GoTo 133
Elseif Form3.Option14.Value = True Then
  GoTo 134
Elseif Form3.Option15.Value = True Then
  GoTo 135
'매설관의 축직각방향 변위
133: V(I) = V(I) + (-M * (cosh(K * y) - Cos(K * y)) + sinh(K * y) - Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
VV(I) = (-M * (cosh(K * y) - Cos(K * y)) + sinh(K * y) - Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
GoTo 136

```

```

'매설관의 축직각방향 곡률
134: V(I) = V(I) + (K ^ 2) * (-M * (cosh(K * y) + Cos(K * y)) + sinh(K * y) + Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
      VV(I) = (K ^ 2) * (-M * (cosh(K * y) + Cos(K * y)) + sinh(K * y) + Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
      GoTo 136
'매설관의 축직각방향 휨변형률
135: V(I) = V(I) + (DI / 2) * (K ^ 2) * (-M * (cosh(K * y) + Cos(K * y)) + sinh(K * y) + Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
      VV(I) = (DI / 2) * (K ^ 2) * (-M * (cosh(K * y) + Cos(K * y)) + sinh(K * y) + Sin(K * y)) * (CCOL - DCOL) * G
      End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
136: If Form3.Check1.Value = 1 Then
      GoTo 137
      Else: GoTo 138
      End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
137: xAp.worksheets("Mp").cells(z, KY1).Value = V(I)
      xAp.worksheets("Mp1").cells(z, KY1).Value = VV(I)
      z = z + 1
'모드수에 따른 최대,최소 변위(변형률) 산정
      If Abs(V(I)) <= MaxV Then
          GoTo 138
      End If
      MaxV = Abs(V(I))
138: If Abs(VV(I)) <= MaxVV Then
          GoTo 139
      End If
      MaxVV = Abs(VV(I))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
139: If Form3.Check2.Value = 1 Then
      GoTo 140
      Else: GoTo 141
      End If
'시간과 변위(변형률) 출력
140: If (KY1 = 6) Then
      R = R + 1
      xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
      xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(I)
      End If
141: TMIN = TAU
      Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
      If Form3.Check1.Value = 0 Then
          GoTo 142
      End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
      xAp.worksheets("Mp").cells(1, KY1).Value = KY1
      xAp.worksheets("Mp").cells(2, KY1).Value = MaxV
      xAp.worksheets("Mp1").cells(1, KY1).Value = KY1
      xAp.worksheets("Mp1").cells(2, KY1).Value = MaxVV
142: Next KY1
      T = 0#
      For I = 2 To N
          T = T + 2# * DT
          If (T <= (AL / AV)) Then
              GoTo 143
          Else: GoTo 144
          End If
143: ABV1 = Abs(V(I))
          If (ABV1 < vmax1) Then
              GoTo 145
          Else: vmax1 = ABV1
          End If
          GoTo 145
144: ABV = Abs(V(I))
          If (ABV < VMAX) Then
              GoTo 145
          Else: VMAX = ABV
          End If
145: Next I
'주기 산정
      Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
      Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
      Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
      Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB

```

```

If Form3.Option11.Value = True Then
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
End If
'파장, 변위(변형률) 출력
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
If Form3.Option11.Value = True Then
    xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
End If
If (WL >= WLEND) Then
    GoTo 146
End If
WL = WL + 0.1 * AV
AAA = AAA + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 132
146: xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
If (y >= YEND) Then
    GoTo 147
End If
y = y + 5
Q = Q + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 131
147: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
'파장-변위(변형률)-지점)
With xlSheet
-----
'내용 입력부분
-----
End With
'지정한 경로로 저장
xlSheet.SaveAs "E:\논문관련\박사 논문\프로그램 작업\VB로 변환\작업\의형디자인\WTdata(fxfr).xls"
xlBook.Close '현재 워크북을 종료
xAp.Quit '엑셀 종료
Set xlSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xAp = Nothing
Exit Sub
'***** 축직각방향 (양단틀리) *****
Exit Sub
'파장 범위
150: WL = Form2.wl1.Text
WLEND = Form2.wlend1.Text
AAA = 1
'전파 속도
AV = Form2.av1.Text
'축직각방향 지반 강성
TK = Form2.tk2.Text
'매설관의 관성모멘트
GI = Form2.gi2.Text
'최대 시간 간격
DT1 = Form2.dt11.Text
pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
AM = Form2.am1.Text
'매설관의 길이

```

```

AL = Form2.al1.Text
첫번째 모드의 감쇠비
XI = Form2.xi1.Text
'감쇠 계수
CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
For KK = 1 To 3000
    FK(KK) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((KK - 1) * pi / AL) ^ 4)))
Next KK
'지반진동수
151: FB = 2 * pi * AV / WL
    TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
TMAX = AL / AV + 2 * TH
'계산에 필요한 소요 모드수 산정
N1 = 1
nMin = 15
N2 = 2# * AL / WL + 11
If N2 > nMin Then
    N2 = N2
Elseif N2 < nMin Then
    N2 = nMin
End If
For K = 1 To N2
    z = 3
    TMIN = T0
    ACOL = 0#
    BCOL = 0#
'Lk는 k에 관계없이 일정
If (K - 1) = 0 Then ALK = AL Else ALK = AL / 2
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((K - 1) * pi / AL) ^ 4)))
XI = CT / AM / 2# / FN
FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
If DT1 < (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then
    DT2 = DT1
Elseif DT1 > (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then DT2 = (2 * pi / (10 * FK(N2)))
End If
If DT2 < (2 * pi / (10 * FB)) Then
    DT = DT2
Elseif DT2 > (2 * pi / (10 * FB)) Then DT = (2 * pi / (10 * FB))
End If
EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
AK = (FB / AV) + (pi * (K - 1) / AL)
BK = (FB / AV) - (pi * (K - 1) / AL)
N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
T0 = 0#
TAU = 0#
TMIN = 0#
V(1) = 0#
VV(1) = 0#
MaxV = 0#
MaxVV = 0#
'수치 적분
For I = 2 To N
    For J = 1 To 3
        TAU = TMIN + (J - 1) * DT
        FT = FB * TAU
        If AL < (AV * TAU) Then
            BL = AL
        Else
            BL = (AV * TAU)
        End If
        If (Abs(BK) > 0.000000000000001) Then
            A = Sin(BK * BL) / (2# * BK) + Sin(AK * BL) / (2# * AK)
            B = (1# - Cos(AK * BL)) / (2# * AK) + (1# - Cos(BK * BL)) / (2# * BK)
        Else
            A = BL / 2# + (Sin(2# * FB * BL / AV)) / (4# * (FB / AV))
            B = ((Sin(FB * BL / AV) ^ 2) / (2# * (FB / AV)))
        End If
        p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
        COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
    
```

```

        COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
    Next J
    ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
    BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
    CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
    DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
    If Form3.Option13.Value = True Then
        GoTo 152
    ElseIf Form3.Option14.Value = True Then
        GoTo 153
    ElseIf Form3.Option15.Value = True Then
        GoTo 154
'매설관의 축직각방향 변위
152: V(l) = V(l) + (Cos((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(l) = (Cos((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    GoTo 155
'매설관의 축직각방향 곡률
153: V(l) = V(l) - ((pi * (K - 1) / AL) ^ 2) * (Cos((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(l) = -((pi * (K - 1) / AL) ^ 2) * (Cos((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    GoTo 155
'매설관의 축직각방향 횡변형률
154: V(l) = V(l) - (DI / 2) * ((pi * (K - 1) / AL) ^ 2) * (Cos((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(l) = -(DI / 2) * ((pi * (K - 1) / AL) ^ 2) * (Cos((K - 1) * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
155: If Form3.Check1.Value = 1 Then
        GoTo 156
    Else: GoTo 158
    End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
156: xAp.worksheets("Mp").cells(z, K).Value = V(l)
    xAp.worksheets("Mp1").cells(z, K).Value = VV(l)
    z = z + 1
'모드수에 따른 최대,최소 변위(변형률) 산정
    If Abs(V(l)) <= MaxV Then
        GoTo 157
    End If
    MaxV = Abs(V(l))
157: If Abs(VV(l)) <= MaxVV Then
        GoTo 158
    End If
    MaxVV = Abs(VV(l))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
158: If Form3.Check2.Value = 1 Then
        GoTo 159
    Else: GoTo 160
    End If
'시간과 변위(변형률) 출력
159: If (K = 15) Then
        R = R + 1
        xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
        xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(l)
    End If
160: TMIN = TAU
    Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
    If Form3.Check1.Value = 0 Then
        GoTo 161
    End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
    xAp.worksheets("Mp").cells(1, K).Value = K
    xAp.worksheets("Mp").cells(2, K).Value = MaxV
    xAp.worksheets("Mp1").cells(1, K).Value = K
    xAp.worksheets("Mp1").cells(2, K).Value = MaxVV
161: Next K
    T = 0#
    For I = 2 To N
        T = T + 2# * DT
        If (T <= (AL / AV)) Then
            GoTo 162
        Else: GoTo 163
    End If
162: ABV1 = Abs(V(l))

```

```

        If (ABV1 < vmax1) Then
            GoTo 164
            Else: vmax1 = ABV1
        End If
        GoTo 164
163: ABV = Abs(V(I))
        If (ABV < VMAX) Then
            GoTo 164
            Else: VMAX = ABV
        End If
164: Next I
'주기 산정
    Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB
    If Form3.Option11.Value = True Then
        Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
        Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
    End If
'파장, 변위(변형률) 출력
    xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
    If Form3.Option11.Value = True Then
        xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
        Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
    End If
    If (WL >= WLEND) Then
        GoTo 165
    End If
    WL = WL + 0.1 * AV
    AAA = AAA + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
    For L = 1 To N
        V(L) = 0#
    Next L
    VMAX = 0#
    vmax1 = 0#
    GoTo 151
165: xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
    If (y >= YEND) Then
        GoTo 166
    End If
    y = y + 5
    Q = Q + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
    For L = 1 To N
        V(L) = 0#
    Next L
    VMAX = 0#
    vmax1 = 0#
    GoTo 150
166: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
'      (파장-변위(변형률)-지점)
With xlSheet
-----
'내용 입력부분
-----
End With
'자정한 경로로 저장
xlSheet.SaveAs "E:\논문관련\박사 논문프로그램 작업\VBBA를 VB로 변환작업\외형디자인\WTdata(rr).xls"
xlBook.Close '현재 워크북을 종료
xAp.Quit '엑셀 종료
Set xlSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xAp = Nothing
Exit Sub
'***** 축적각방향 (양단한지) *****
Exit Sub
'파장 범위
170: WL = Form2.wl1.Text
    WLEND = Form2.wlend1.Text

```

```

AAA = 1
'전파 속도
AV = Form2.av1.Text
'축직각방향 지반 강성
TK = Form2.tk2.Text
'매설관의 관성모멘트
GI = Form2.gi2.Text
'최대 시간 간격
DT1 = Form2.dt11.Text
pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
AM = Form2.am1.Text
'매설관의 길이
AL = Form2.al1.Text
'첫번째 모드의 감쇠비
XI = Form2.xi1.Text
'감쇠 계수
CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
For KK = 1 To 3000
    FK(KK) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((KK - 1) * pi / AL) ^ 4)))
Next KK
'지반진동수
171: FB = 2 * pi * AV / WL
    TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
TMAX = AL / AV + 2 * TH
'계산에 필요한 소요 모드수 산정
N1 = 1
nMin = 15
N2 = 2# * AL / WL + 11
If N2 > nMin Then
    N2 = N2
ElseIf N2 < nMin Then
    N2 = nMin
End If
For K = 1 To N2
    z = 3
    TMIN = T0
    ACOL = 0#
    BCOL = 0#
'Lk는 k에 관계없이 일정
ALK = AL / 2
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((K - 1) * pi / AL) ^ 4)))
XI = CT / AM / 2# / FN
FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
If DT1 < (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then
    DT2 = DT1
ElseIf DT1 > (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then DT2 = (2 * pi / (10 * FK(N2)))
End If
If DT2 < (2 * pi / (10 * FB)) Then
    DT = DT2
ElseIf DT2 > (2 * pi / (10 * FB)) Then DT = (2 * pi / (10 * FB))
End If
EX1 = Exp(-2# * XI * FN * DT)
EX2 = 4# * Exp(-XI * FN * DT)
G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
AK = (FB / AV) + (pi * K / AL)
BK = (FB / AV) - (pi * K / AL)
N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
T0 = 0#
TAU = 0#
TMIN = 0#
V(1) = 0#
VV(1) = 0#
MaxV = 0#
MaxVV = 0#
'수치 적분
For I = 2 To N

```

```

For J = 1 To 3
    TAU = TMIN + (J - 1) * DT
    FT = FB * TAU
    If AL < (AV * TAU) Then
        BL = AL
    Else
        BL = (AV * TAU)
    End If
    If (Abs(BK) > 0.000000000000001) Then
        A = (1# - Cos(AK * BL)) / (2# * AK) - (1# - Cos(BK * BL)) / (2# * BK)
        B = Sin(BK * BL) / (2# * BK) - Sin(AK * BL) / (2# * AK)
    Else
        A = ((Sin(FB * BL / AV)) ^ 2) / (2# * (FB / AV))
        B = BL / 2# - (Sin(2# * FB * BL / AV)) / (4# * (FB / AV))
    End If
    p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
    COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
    COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
Next J
ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
If Form3.Option13.Value = True Then
    GoTo 172
Elseif Form3.Option14.Value = True Then
    GoTo 173
Elseif Form3.Option15.Value = True Then
    GoTo 174
'매설관의 축직각방향 변위
172: V(I) = V(I) + (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(I) = (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    GoTo 175
'매설관의 축직각방향 곡률
173: V(I) = V(I) - ((pi * K / AL) ^ 2) * (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(I) = -((pi * K / AL) ^ 2) * (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    GoTo 175
'매설관의 축직각방향 휨변형률
174: V(I) = V(I) - (DI / 2) * ((pi * K / AL) ^ 2) * (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    VV(I) = -(DI / 2) * ((pi * K / AL) ^ 2) * (Sin(K * pi * y / AL)) * (CCOL - DCOL) * G
    End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
175: If Form3.Check1.Value = 1 Then
    GoTo 176
Else: GoTo 178
    End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
176: xAp.worksheets("Mp").cells(z, K).Value = V(I)
    xAp.worksheets("Mp1").cells(z, K).Value = VV(I)
    z = z + 1
'모드수에 따른 최대,최소 변위(변형률) 산정
If Abs(V(I)) <= MaxV Then
    GoTo 177
End If
MaxV = Abs(V(I))
177: If Abs(VV(I)) <= MaxVV Then
    GoTo 178
End If
MaxVV = Abs(VV(I))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
178: If Form3.Check2.Value = 1 Then
    GoTo 179
Else: GoTo 180
    End If
'시간과 변위(변형률) 출력
179: If (K = 15) Then
    R = R + 1
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(I)
    End If
180: TMIN = TAU
Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택

```

```

    If Form3.Check1.Value = 0 Then
        GoTo 181
    End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
xAp.worksheets("Mp").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp").cells(2, K).Value = MaxV
xAp.worksheets("Mp1").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp1").cells(2, K).Value = MaxVV
181: Next K
    T = 0#
    For I = 2 To N
        T = T + 2# * DT
        If (T <= (AL / AV)) Then
            GoTo 182
        Else: GoTo 183
        End If
182: ABV1 = Abs(V(I))
        If (ABV1 < vmax1) Then
            GoTo 184
        Else: vmax1 = ABV1
        End If
        GoTo 184
183: ABV = Abs(V(I))
        If (ABV < VMAX) Then
            GoTo 184
        Else: VMAX = ABV
        End If
184: Next I
'주기 산정
Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = WL
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = FB
If Form3.Option11.Value = True Then
    Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = vmax1
    Else: Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 4) = VMAX
End If
'파장, 변위(변형률) 출력
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
If Form3.Option11.Value = True Then
    xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
    Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
End If
If (WL >= WLEND) Then
    GoTo 185
End If
WL = WL + 0.1 * AV
AAA = AAA + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 171
185: xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
    If (y >= YEND) Then
        GoTo 186
    End If
    y = y + 5
    Q = Q + 1
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 170
186: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
'({파장-변위(변형률)-지점)
With xlSheet

```

'내용 입력부분

```
End With
'지정한 경로로 저장
xlSheet.SaveAs "E:\논문관련W박사 논문W프로그램 작업WVBA를 VB로 변환작업W외형디자인WTdata(hh).xls"
xlBook.Close '현재 워크북을 종료
xAp.Quit '엑셀 종료
Set xlSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xAp = Nothing
Exit Sub
'*****
Exit Sub
'***** 축적각방향 (일단힌지-일단틀리) *****
'파장 범위
190: WL = Form2.wl1.Text
WLEND = Form2.wlend1.Text
AAA = 1
'전파 속도
AV = Form2.av1.Text
'축적각방향 지반 강성
TK = Form2.tk2.Text
'매설관의 관성모멘트
GI = Form2.gi2.Text
'최대 시간 간격
DT1 = Form2.dt11.Text
pi = 4 * Atn(1)
'매설관의 탄성계수
EP = Form2.ep1.Text
'매설관의 직경
DI = Form2.di1.Text
'매설관의 단위길이당 질량
AM = Form2.am1.Text
'매설관의 길이
AL = Form2.al1.Text
'첫번째 모드 감쇠비
XI = Form2.xi1.Text
'감쇠 계수
CT = 2 * XI * Sqr(TK * AM)
'KK 모드의 진동수 계산
For KK = 1 To 350
FK(KK) = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((2 * KK - 1) * pi / (2 * AL)) ^ 4)))
Next KK
'지반진동수
191: FB = 2 * pi * AV / WL
TH = 2# * pi / FB
'해석 시간
TMAX = AL / AV + 2 * TH
'계산에 필요한 소요 모드수 산정
N1 = 1
nMin = 15
N2 = 2# * AL / WL + 11
If N2 > nMin Then
N2 = N2
Elseif N2 < nMin Then
N2 = nMin
End If
For K = 1 To N2
z = 3
TMIN = T0
ACOL = 0#
BCOL = 0#
'Lk는 k에 관계없이 일정
ALK = AL / 2
'시간에 대해 적분시 시간간격 결정 (지반 진동과 고유 진동 사이의 주기를 비교하여 결정)
FN = Sqr((TK / AM) * (1 + (EP * GI / TK) * (((2 * K - 1) * pi / (2 * AL)) ^ 4)))
XI = CT / AM / 2# / FN
FX = FN * Sqr(1 - XI ^ 2)
If DT1 < (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then
DT2 = DT1
Elseif DT1 > (2 * pi / (10 * FK(N2))) Then DT2 = (2 * pi / (10 * FK(N2)))
End If
If DT2 < (2 * pi / (10 * FB)) Then
DT = DT2
```

```

Elseif DT2 > (2 * pi / (10 * FB)) Then DT = (2 * pi / (10 * FB))
End If
EX1 = Exp(-2# * X1 * FN * DT)
EX2 = 4# * Exp(-X1 * FN * DT)
G = DT / (AM * ALK * FX * 3#)
AK = (FB / AV) + (pi * (2 * K - 1) / (2 * AL))
BK = (FB / AV) - (pi * (2 * K - 1) / (2 * AL))
N = (TMAX / (2# * DT)) + 1
T0 = 0#
TAU = 0#
TMIN = 0#
V(1) = 0#
VV(1) = 0#
MaxV = 0#
MaxVV = 0#
'수치 적분
For I = 2 To N
  For J = 1 To 3
    TAU = TMIN + (J - 1) * DT
    FT = FB * TAU
    If AL < (AV * TAU) Then
      BL = AL
    Else
      BL = (AV * TAU)
    End If
    If (Abs(BK) > 0.000000000000001) Then
      A = (1# - Cos(AK * BL)) / (2# * AK) - (1# - Cos(BK * BL)) / (2# * BK)
      B = Sin(BK * BL) / (2# * BK) - Sin(AK * BL) / (2# * AK)
    Else
      A = ((Sin(FB * BL / AV)) ^ 2) / (2# * (FB / AV))
      B = BL / 2# - (Sin(2# * FB * BL / AV)) / (4# * (FB / AV))
    End If
    p(J) = A * (FB * CT * Cos(FT) + TK * Sin(FT)) + B * (CT * FB * Sin(FT) - TK * Cos(FT))
    COLA(J) = p(J) * Cos(FX * TAU)
    COLB(J) = p(J) * Sin(FX * TAU)
  Next J
  ACOL = EX1 * (ACOL + COLA(1)) + EX2 * (COLA(2)) + COLA(3)
  BCOL = EX1 * (BCOL + COLB(1)) + EX2 * (COLB(2)) + COLB(3)
  CCOL = Sin(FX * TAU) * ACOL
  DCOL = Cos(FX * TAU) * BCOL
'변위, 변형률, 곡률 중 하나 택일
If Form3.Option13.Value = True Then
  GoTo 192
Elseif Form3.Option14.Value = True Then
  GoTo 193
Elseif Form3.Option15.Value = True Then
  GoTo 194
'매설관의 축직각방향 변위
192: V(I) = V(I) + (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
      W(I) = (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
      GoTo 195
'매설관의 축직각방향 곡률
193: V(I) = V(I) - (((2 * K - 1) * pi / (2 * AL))) ^ 2 * (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
      W(I) = -(((2 * K - 1) * pi / (2 * AL))) ^ 2 * (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
      GoTo 195
'매설관의 축직각방향 변형률
194: V(I) = V(I) - (D / 2) * (((2 * K - 1) * pi / (2 * AL))) ^ 2 * (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
      W(I) = -(D / 2) * (((2 * K - 1) * pi / (2 * AL))) ^ 2 * (Sin((2 * K - 1) * pi * y / (2 * AL))) * (CCOL - DCOL) * G
      End If
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
195: If Form3.Check1.Value = 1 Then
      GoTo 196
    Else: GoTo 198
  End If
'모드수에 따른 변위(변형률) 출력
196: V(1) = 0#
      xAp.worksheets("Mp").cells(z, K).Value = V(I)
      xAp.worksheets("Mp1").cells(z, K).Value = VV(I)
      z = z + 1
'모드수에 따른 최대,최소 변위(변형률) 산정
If Abs(V(I)) <= MaxV Then
  GoTo 197
End If
MaxV = Abs(V(I))

```

```

197: If Abs(VV(I)) <= MaxVV Then
    GoTo 198
End If
MaxVV = Abs(VV(I))
'시간-변위(변형률) 해석 선택
198: If Form3.Check2.Value = 1 Then
    GoTo 199
    Else: GoTo 200
End If
'시간과 변위(변형률) 출력
199: If (K = 15) Then
    R = R + 1
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 1).Value = TAU
    xAp.worksheets("Tp").cells(R, 2).Value = V(I)
End If
200: TMIN = TAU
Next I
'모드수-변위(변형률) 해석 선택
If Form3.Check1.Value = 0 Then
    GoTo 201
End If
'모드수에 따른 최대 변위(변형률) 산정
xAp.worksheets("Mp").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp").cells(2, K).Value = MaxV
xAp.worksheets("Mp1").cells(1, K).Value = K
xAp.worksheets("Mp1").cells(2, K).Value = MaxVV
201: Next K
T = 0#
For I = 2 To N
    T = T + 2# * DT
    If (T <= (AL / AV)) Then
        GoTo 202
        Else: GoTo 203
    End If
202: ABV1 = Abs(V(I))
    If (ABV1 < vmax1) Then
        GoTo 204
        Else: vmax1 = ABV1
    End If
    GoTo 204
203: ABV = Abs(V(I))
    If (ABV < VMAX) Then
        GoTo 204
        Else: VMAX = ABV
    End If
204: Next I
'주기 산정
Period = 2 * pi / FB
'MSflexgrid에 데이터 출력
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 0) = Period
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 1) = WL
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 2) = FB
Form1.Grid1.TextMatrix(AAA, 3) = VMAX
'파장, 변위(변형률) 출력
xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, 1).Value = WL
If Form3.Option11.Value = True Then
    xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = vmax1
    Else: xAp.worksheets("Pp").cells(AAA + 1, Q + 1).Value = VMAX
End If
If (WL >= WLEND) Then
    GoTo 205
    WL = WL + 0.1 * AV
End If
'매설관에 발생한 변위(변형률) 초기화
For L = 1 To N
    V(L) = 0#
Next L
VMAX = 0#
vmax1 = 0#
GoTo 191
205: xAp.worksheets("Pp").cells(1, Q + 1).Value = y
    If (y >= YEND) Then
        GoTo 206
    End If

```

```

        y = y + 5
        Q = Q + 1
'매셀관에 발생한 변위(변형률) 초기화
        For L = 1 To N
            V(L) = 0#
        Next L
        VMAX = 0#
        vmax1 = 0#
        GoTo 190
206: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."
        Screen.MousePointer = 0
'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
        '(파장-변위(변형률)-지점)
        With xlSheet
'-----
'내용 입력부분
'-----
        End With
        '지정한 경로로 저장
        xlSheet.SaveAs "C:\외형디자인\데이터 저장\WTdata(hr).xls"
        xlBook.Close '현재 워크북을 종료
        xAp.Quit '엑셀 종료
        Set xlSheet = Nothing
        Set xlBook = Nothing
        Set xAp = Nothing
    Exit Sub
'*****
Exit Sub
End Sub
Private Sub Command5_Click()
    Dim I As Integer, J, M, N As Integer
    Dim ycor As Double, xcor As Double
    Dim nrow As Integer, ncol As Integer
    Dim nrows As Integer, ncols As Integer
    Dim x As Integer, y As Integer
    Dim YY(3000) As Double, XX(3000) As Double
    Dim XMax, YMAX As Double, K As Integer
    Dim NSeries, npoints As Integer
'차트 초기화
    ChartFX1.OpenDataEx COD_VALUES, 0, 1
    ChartFX1.CloseData COD_REMOVE
    ChartFX1.CloseData COD_VALUES
    M = 1
    Do Until Form1.Grid1.TextMatrix(M, 1) = ""
        M = M + 1
    Loop
'열에서 최대값 찾기
    XMax = Form1.Grid1.TextMatrix(1, 0)
    YMAX = Form1.Grid1.TextMatrix(1, 1)
    For K = 1 To M - 1
        If XMax <= Form1.Grid1.TextMatrix(K, 0) Then
            XMax = Form1.Grid1.TextMatrix(K, 0)
        Else: XMax = XMax
        End If
        If YMAX <= Form1.Grid1.TextMatrix(K, 1) Then
            YMAX = Form1.Grid1.TextMatrix(K, 1)
        Else: YMAX = YMAX
        End If
    Next K
'그래프에 데이터 옮기기
    Form1.ChartFX1.OpenDataEx COD_VALUES, NSeries, npoints
    Form1.ChartFX1.OpenDataEx COD_XVALUES, NSeries, npoints
    NSeries = 1
    npoints = M
    For nrow = 0 To M - 1
        YY(nrow) = Val(Form1.Grid1.TextMatrix(nrow, 1))
        XX(nrow) = Val(Form1.Grid1.TextMatrix(nrow, 0))
    Next nrow
    For I = 0 To NSeries - 1
        For J = 0 To npoints - 1
            Form1.ChartFX1.ValueEx(I, J) = YY(J)
            Form1.ChartFX1.XValueEx(I, J) = XX(J)
        Next J
    Next I

```

```
'x,y축 자동조절
Form1.ChartFX1.Axis(Axis_X).Max = 1.1 * XMax
Form1.ChartFX1.Axis(Axis_Y).Max = 1.1 * YMAX
Form1.ChartFX1.Axis(Axis_X).AdjustScale
Form1.ChartFX1.Axis(Axis_Y).AdjustScale
Form1.ChartFX1.CloseData COD_VALUES
Form1.ChartFX1.CloseData COD_XVALUES
End Sub
```

2. 데이터 입력 창

```
Option Explicit
Private Sub check1_Click()
Dim GI As Double, CT As Double, XI As Double, TK As Double, AM As Double

' 자동입력이벤트
Form2.wl1.Text = "62.8"
Form2.wlend1.Text = "62.8"
Form2.dt11.Text = "0.001"
Form2.ep1.Text = "20700000000"
Form2.di1.Text = "2"
Form2.al1.Text = "100"
Form2.am1.Text = "2073.5"
Form2.tk1.Text = "93400000"
Form2.tk2.Text = "140100000"
Form2.y1 = "50"
Form2.yend1 = "50" 'al1
Form2.xi1.Text = "0.8"
Form2.gi1 = "0.94248"
Form2.gi2 = "0.47389"

End Sub

Private Sub Command1_Click()
Form2.Hide
End Sub

Private Sub input1_Click(Index As Integer)
Form3.Show
End Sub

Private Sub input2_Click(Index As Integer)
Form4.Show
End Sub
```

3. 해석조건 창

```
Private Sub Command1_Click()  
    If Form3.Option1.Value = Form3.Option2.Value = Form3.Option3.Value = Form3.Option4.Value =  
    Form3.Option5.Value = Form3.Option6.Value = Form3.Option7.Value = Form3.Option8.Value =  
    Form3.Option9.Value = False Then  
        MsgBox "해석 조건이 입력되지 않았습니다."  
    End If  
  
    Form3.Hide  
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()  
    Form3.Hide  
End Sub
```

4. 데이터 선택 창

Option Explicit

Private Sub Command1_Click()

```
Form4.Hide

Dim xlApp As Object
Dim l, J, K, L As Long
Dim p As Double
Dim Mp As String, Tp As String, Pp As String
Dim D_FILE_NM As String

'Form1.Grid1.Rows = 1

' CancelError를 True로 설정합니다.
CommonDialog1.CancelError = True
' 플래그를 설정합니다.
CommonDialog1.Flags = cdlOFNHideReadOnly
' 필터를 설정합니다.
CommonDialog1.Filter = "All Files (*.*)|*.xls|Excel Files" & _
"(*.xls)|*.xls|Batch Files (*.bat)|*.bat"
' 기본 필터를 지정합니다.
CommonDialog1.FilterIndex = 2
' [열기] 대화 상자를 표시합니다.
CommonDialog1.ShowOpen
' 선택된 파일 이름을 표시합니다.
MsgBox CommonDialog1.FileName
D_FILE_NM = CommonDialog1.FileName

Set xlApp = CreateObject("excel.application")
' 사용자가 응용 프로그램을 보길 원하는 경우, Visible 속성을 True로 지정할 수도 있습니다.
xlApp.Workbooks.Open D_FILE_NM

Form1.Grid1.Redraw = False '그리드에 자료 뿌려질때 한꺼번에 뿌리기위해

'기존의 그리드 데이터를 지움
Form1.Grid1.Clear

J = 1

'각 그래프 조건에 맞는 데이터를 그리드에 뿌리기
If Form4.Option1.Value = True Then
    GoTo 10
Elseif Form4.Option2.Value = True Then
    GoTo 20
Elseif Form4.Option3.Value = True Then
    GoTo 30
Elseif Form4.Option4.Value = True Then
    GoTo 40
Elseif Form4.Option5.Value = True Then
    GoTo 50
Elseif Form4.Option6.Value = True Then
    GoTo 60
Elseif Form4.Option7.Value = True Then
    GoTo 70
Elseif Form4.Option8.Value = True Then
    GoTo 80
End If
10: K = xlApp.worksheets("Tp").UsedRange.Rows.Count
Do Until J = K
    Form1.Grid1.Row = J - 1
    Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Tp").cells(J, 1).Value
    Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Tp").cells(J, 2).Value
    J = J + 1
Loop
GoTo 90
20: K = xlApp.worksheets("Mp").UsedRange.Columns.Count
Form1.Grid1.TextMatrix(0, 0) = "모드수"
Form1.Grid1.TextMatrix(0, 1) = "누적 범위(변형률)"
Do Until J = K
    Form1.Grid1.Row = J
```

```

        Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Mp").cells(1, J).Value
        Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Mp").cells(2, J).Value
        J = J + 1
    Loop

    GoTo 90
30: K = xlApp.worksheets("Mp1").UsedRange.Columns.Count
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 0) = "모드수"
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 1) = "변위(변형률)"
    Do Until J = K
        Form1.Grid1.Row = J
        Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Mp1").cells(1, J).Value
        Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Mp1").cells(2, J).Value
        J = J + 1
    Loop
    GoTo 90
40: K = xlApp.worksheets("Pp").UsedRange.Columns.Count
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 0) = "지점"
    Form1.Grid1.TextMatrix(0, 1) = "변위(변형률)"
    Do Until J = K
        Form1.Grid1.Row = J
        Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Pp").cells(1, J).Value
        Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("Pp").cells(2, J).Value
        J = J + 1
    Loop
    GoTo 90
50: K = xlApp.worksheets("sheet1").UsedRange.Rows.Count

    Do Until J = K + 1
        Form1.Grid1.Row = J - 1
        Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("sheet1").cells(J, 1).Value
        Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("sheet1").cells(J, 2).Value
        J = J + 1
    Loop
    GoTo 90
60: K = xlApp.worksheets("acc-spec").UsedRange.Rows.Count

    Do Until J = K + 1
        Form1.Grid1.Row = J - 1
        Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("acc-spec").cells(J, 1).Value
        Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("acc-spec").cells(J, 2).Value
        J = J + 1
    Loop
    GoTo 90
70: K = xlApp.worksheets("vel-spec").UsedRange.Rows.Count

    Do Until J = K + 1
        Form1.Grid1.Row = J - 1
        Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("vel-spec").cells(J, 1).Value
        Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("vel-spec").cells(J, 2).Value
        J = J + 1
    Loop
    GoTo 90
80: K = xlApp.worksheets("dis-spec").UsedRange.Rows.Count

    Do Until J = K + 1
        Form1.Grid1.Row = J - 1
        Form1.Grid1.Col = 0: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("dis-spec").cells(J, 1).Value
        Form1.Grid1.Col = 1: Form1.Grid1.Text = xlApp.worksheets("dis-spec").cells(J, 2).Value
        J = J + 1
    Loop
    GoTo 90
90: Form1.Grid1.Redraw = True
    xlApp.Quit ' 사용자가 종료할 때, Quit 메시지를 사용하여
    Set xlApp = Nothing ' 응용 프로그램을 종료한 후 참조를 해제합니다

End Sub

Private Sub Command2_Click()
Form4.Hide
End Sub

```

5. 응답스펙트럼 창

Option Explicit

```
Private Sub Command1_Click()
Form5.Hide
```

```
-----파일볼러오기-----
Dim xlApp As Object, D_FILE_NM As String

' CancelError를 True로 설정합니다.
CommonDialog1.CancelError = True
' 플래그를 설정합니다.
CommonDialog1.Flags = cdlOFNHideReadOnly
' 필터를 설정합니다.
CommonDialog1.Filter = "All Files (*.*)|*.*|Excel Files" & _
"(*.xls)|*.xls|Batch Files (*.bat)|*.bat"
' 기본 필터를 지정합니다.
CommonDialog1.FilterIndex = 2
' [열기] 대화 상자를 표시합니다.
CommonDialog1.ShowOpen
' 선택된 파일 이름을 표시합니다.
' MsgBox CommonDialog1.FileName
D_FILE_NM = CommonDialog1.FileName

Set xlApp = GetObject("", "Excel.Application")
' 사용자가 응용 프로그램을 보길 원하는 경우,Visible 속성을 True로 지정할 수도 있습니다.
xlApp.Visible = False
xlApp.Workbooks.Open D_FILE_NM

-----
***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
Dim xApp As Object '생성될 엑셀 개체
Dim xlBook As Object
Dim xlSheet As Object
Dim Sh_Name, Sh_Name1, Sh_Name2 As String
Sh_Name = "acc-spec"
Sh_Name1 = "vel-spec"
Sh_Name2 = "dis-spec"
'개체 생성
Set xApp = CreateObject("Excel.Application")
'사용자가 응용 프로그램을 보길 원하는 경우,Visible 속성을 True로 지정할 수도 있습니다.
'xAp.Visible = True
'새 통합 문서를 추가한다.
Set xlBook = xApp.Workbooks.Add
Set xlSheet = xApp.sheets.Add
xApp.worksheets("sheet4").Name = Sh_Name
xApp.worksheets("sheet1").Name = Sh_Name1
xApp.worksheets("sheet2").Name = Sh_Name2
-----변위 응답 스펙트럼-----
'선연구문
Dim H As Double, T As Double, ActV, strain, DDYMAX As Double, DYMAX As Double, YMAX As Double
Dim TEND As Double, KK As Double, BSC As Double, R As Double, DT As Double, NN As Double
Dim DDX As String, DX As Double, x As Double, M As Double, E As Double, F As Double
Dim A As Double, B As Double, ACCMAX As Double, VELMAX As Double, DISMAX As Double
Dim DDY(500) As Double, DY(500) As Double, TT(500) As Double, y(500) As Double, W As Double, K
As Double

A = 1
B = 2

Screen.MousePointer = 11

'고유주기
T = Form5.T1.Text
TEND = 10
K = TEND / 0.1

'감쇠상수
H = Form5.H1.Text

'시간간격
DT = Form5.DT1.Text
```

```

'데이터총수
  NN = Form5.NN1.Text

'최대입력가속도
  'DDYMAX = 0,319

'가속도 이력
  For KK = 2 To 401
    DDY(KK - 1) = xApp.worksheets("Sheet1").cells(KK, 2).Value * 980
  Next KK

  DY(1) = DDY(1) * DT
  y(1) = 0#
  DYMAX = Abs(DY(1))
  YMAX = 0#
  TT(1) = DT

  xApp.worksheets("acc-spec").cells(B, 3).Value = TT(1)
  xApp.worksheets("vel-spec").cells(B, 3).Value = TT(1)
  xApp.worksheets("dis-spec").cells(B, 3).Value = TT(1)
  xApp.worksheets("acc-spec").cells(B, 4).Value = DDY(1)
  xApp.worksheets("vel-spec").cells(B, 4).Value = DY(1)
  xApp.worksheets("dis-spec").cells(B, 4).Value = y(1)

  For M = 2 To NN
    B = B + 1
    DY(M) = DY(M - 1) + (DDY(M - 1) + DDY(M)) / 2# * DT
    y(M) = y(M - 1) + DY(M - 1) * DT + (DDY(M - 1) / 3# + DDY(M) / 6#) * DT ^ 2
    TT(M) = M * DT
    xApp.worksheets("acc-spec").cells(B, 3).Value = TT(M)
    xApp.worksheets("vel-spec").cells(B, 3).Value = TT(M)
    xApp.worksheets("dis-spec").cells(B, 3).Value = TT(M)
    xApp.worksheets("acc-spec").cells(B, 4).Value = DDY(M)
    xApp.worksheets("vel-spec").cells(B, 4).Value = DY(M)
    xApp.worksheets("dis-spec").cells(B, 4).Value = y(M)

    If DDYMAX >= Abs(DDY(M)) Then DDYMAX = DDYMAX Else DDYMAX = Abs(DDY(M))
    If DYMAX >= Abs(DY(M)) Then DYMAX = DYMAX Else DYMAX = Abs(DY(M))
    If YMAX >= Abs(y(M)) Then YMAX = YMAX Else YMAX = Abs(y(M))
  Next M

  xApp.worksheets("acc-spec").cells(A, 5).Value = "DDYMAX"
  xApp.worksheets("vel-spec").cells(A, 5).Value = "DYMAX"
  xApp.worksheets("dis-spec").cells(A, 5).Value = "YMAX"
  xApp.worksheets("acc-spec").cells(A, 6).Value = DDYMAX
  xApp.worksheets("vel-spec").cells(A, 6).Value = DYMAX
  xApp.worksheets("dis-spec").cells(A, 6).Value = YMAX

  xApp.Quit ' 사용자 종료할 때, Quit 메서드를 사용하여
  Set xApp = Nothing ' 응용 프로그램을 종료한 후 참조를 해제합니다

  xApp.worksheets("acc-spec").cells(A, 1).Value = "주기"
  xApp.worksheets("vel-spec").cells(A, 1).Value = "주기"
  xApp.worksheets("dis-spec").cells(A, 1).Value = "주기"
  xApp.worksheets("acc-spec").cells(A, 2).Value = "ACCMAX"
  xApp.worksheets("vel-spec").cells(A, 2).Value = "VELMAX"
  xApp.worksheets("dis-spec").cells(A, 2).Value = "DISMAX"

'초기화
150: If (T = 0) Then GoTo 120 Else If (T <> 0) Then GoTo 130

'각 진동수
120: ACCMAX = DDYMAX
  VELMAX = 0
  DISMAX = 0
  GoTo 140

'절점의 가속도 응답
130: W = 6.283185 / T
  R = 1# + H * W * DT + ((W * DT) ^ 2 / 6)

'절점의 가속도 응답

```

```

DDX = (2# * H * W * DT - 1#) * DDY(1)

'점의 속도 응답
DX = -DDY(1) * DT
x = 0
ACCMAX = Abs(DDX + DDY(1))
VELMAX = Abs(DX)
DISMAX = 0

'응답 계산
For M = 2 To NN
    E = DX + DDX * DT / 2
    F = x + DX * DT + DDX * (DT ^ 2) / 3
    DDX = -(DDY(M) + 2 * H * W * E + (W ^ 2) * F) / R
    DX = E + DDX * DT / 2
    x = F + DDX * (DT ^ 2) / 6
    If ACCMAX >= Abs(DDX + DDY(M)) Then ACCMAX = ACCMAX Else ACCMAX = Abs(DDX + DDY(M))
    If VELMAX >= Abs(DX) Then VELMAX = VELMAX Else VELMAX = Abs(DX)
    If DISMAX >= Abs(x) Then DISMAX = DISMAX Else DISMAX = Abs(x)
Next M

140: strain = Form1.Grid1.TextMatrix(A, 4)
ActV = strain * DISMAX
Form1.Grid1.TextMatrix(A, 5) = DISMAX
Form1.Grid1.TextMatrix(A, 1) = ActV
Form1.Grid1.TextMatrix(A, 3) = T
A = A + 1

'엑셀파일에 데이터부터 저장하기
    xApp.worksheets("acc-spec").cells(A, 1).Value = T
    xApp.worksheets("vel-spec").cells(A, 1).Value = T
    xApp.worksheets("dis-spec").cells(A, 1).Value = T
    xApp.worksheets("acc-spec").cells(A, 2).Value = ACCMAX
    xApp.worksheets("vel-spec").cells(A, 2).Value = VELMAX
    xApp.worksheets("dis-spec").cells(A, 2).Value = DISMAX

T = T + 0.1

If (T > TEND) Then GoTo 133
GoTo 150

133: MsgBox "모든 계산이 끝났습니다."

Screen.MousePointer = 0

'***** 계산값 엑셀 파일로 저장 *****
'(파장-변위(변형률)-지점)
With xISheet
-----
'내용 입력부분
-----
End With

'지정한 경로로 저장
xISheet.SaveAs "E:\논문관련\박사 논문\프로그램 작업\VB를 VB로 변환\작업\외형디자인\WSpectrum.xls"

xIBook.Close '현재 워크북을 종료
xApp.Quit '엑셀 종료

Set xISheet = Nothing
Set xIBook = Nothing
Set xApp = Nothing
Exit Sub

End Sub
-----

```

감사의 글

지금까지 지내온 날들과 앞으로 살아갈 저의 일생에서 가장 소중한 기억으로 남고 길고도 짧았던 10년여 학교생활에서 저에게 아낌없는 사랑과 도움을 주신 분들께 미약하나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

항상 지식보다 삶을 살아가는 자세를 더 중요하게 가르쳐 주시고 이 한편의 논문이 완성되기까지 아낌없는 사랑과 항상 밝은 미소와 낮은 목소리로 세심하게 지도하여 주신 정진호 교수님께 깊이 고개를 숙여 감사를 드립니다.

바쁘신 연구중에도 먼 곳까지 왕림하시면서 세심하게 심사하여 더욱 좋은 논문이 되도록 지도해주신 서울대학교 김명모 교수님, 부산대학교 김진만 교수님, 부경대학교 해양공학과 김윤태 교수님께 감사드립니다. 또한 따뜻한 충고와 자상한 가르침으로 본 논문심사와 토목인으로써의 자세를 가르쳐 주신 국승규 교수님께 감사드립니다.

학부과정부터 토목의 산지식을 심어주신 김종수 교수님, 장희석 교수님, 손인식 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 김명식 교수님, 김수용 교수님, 이환우 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님께 깊이 감사드리며, 2004년 8월에 정년퇴임하신 김상용 명예교수님께 감사드립니다.

아울러 항상 친구처럼, 형제처럼, 끈끈한 정을 나눈 지반공학연구실 임창규 형님, 장봉현, 김성반, 김춘진, 김종식, 지환준 후배님들께 진심으로 고마움을 전하며, 본인께서 가지고 계신 꿈을 힘껏 펼치시길 기원드립니다. 그리고 학부 및 대학원생활과 동문회 활동에 있어 늘 도움을 주신 한상숙총장님, 부경대학교 토목공학과 동문회 옥치남회장님, 정수일부회장님, 조형래총무님, 신중옥총무님, 동래구청 박병호국장님, 한진개발공사 김근수이사님, 한성개발공사 권장영단장님, 롯데건설 권오성소장님, 부산·진해 경제자유구역청 이동기계장님, 부경기술단 이영수부장님, 동아지질 정경환사장님, 허문석형님, 최태경형님, 아남컨설턴트 박철중형님, 시설관리공단 오해중형님 그리고 지우회 및 부경대학교 토목공학과 동문회 선후배님 그리고 부경대학교 조교선생님들, 공과대학 행정실 선생님들께 진심으로 감사드립니다.

대학원 동기이면서 먼저 학위를 취득하시고 항상 밝은 웃음으로 마음의 동료인 서동주 박사님, 서정훈 박사님, 정인주 박사, 장호식 박사에게 깊은 감사를 드리며, 부경대학교 토사모 선후배님 그리고 제13대 토목공학과 학생회 동

기인 재범, 상명, 필보, 태진, 준광이형, 수용이형, 재혁이 그리고 손녕득 후배에게 고마움을 전하며, 논문심사 중에 학부사무실 조교업무의 소홀함에 선배의 따뜻한 마음으로 지켜봐주신 박사과정 백동일 조교선생님께 깊은 감사를 드리며 좋은 논문을 쓰시길 진심으로 기원드립니다. 또한 자주는 못 만나지만 마음은 항상 함께 있는 나의 친한 친구 한국해양대학교 한주섭박사에게도 감사를 드립니다.

항상 부족한 저에게 가르침의 길을 마련해 주시고 그 길을 올바르게 걸을 수 있도록 용기와 격려를 아끼지 않으신 수리과학부 신준용 교수님, 동아대학교 정성교 교수님, 남해대학 김차겸 교수님, 박출재 교수님, 안광열 교수님, 양산대학 차성렬 교수님께 감사드립니다.

사위로써 제대로 모시지도 못한 저를 항상 따뜻한 말씀과 대견해 하시며 자신감을 북돋아 주신 장인어른, 장모님께 감사의 마음을 전하며, 셋째 시위로서 역할의 부족함을 채워주신 큰형님 내외와 작은형님 내외, 그리고 큰처제, 작은 처제에게 고마움을 전합니다.

2004년 1월에 결혼하여 신혼의 달콤한 맛을 채워주지 못한 나를 예쁜 마음으로 항상 남편의 그늘에서 힘이 되어준 아내 김정임과 이 기쁨을 나누고 싶으며 논문심사 중에 태어난 아들 동욱(東昱)이에게 고마움을 전하며 동욱(東昱)이가 건강하게 자라기를 바라며, 아들에게 한결같은 모습과 부끄럽지 않은 모습을 보이도록 노력하겠습니다.

형을 자기의 이상으로 여기며, 소홀함에도 내색하지 않은 동생 영길이에게도 고마움을 전하며, 믿음으로 손자를 지켜봐주신 할아버지와 할머니께 깊이 감사를 드립니다. 또한 평생 고생하시며 오직 지식 잘되기만 바라시면서, 항상 아들을 위해 몸과 마음을 아끼지 않으시고 사랑으로 보살펴 주신 아버님과 어머님께 무한한 감사를 드리며, 이 한편의 논문으로 작은 보답이 될 수 있다면 그지없이 기쁘겠습니다.

끝으로, 이 자리에 서기까지 관심을 아끼지 않고 많은 도움을 주신 모든 분들께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

2005년 1월 1일

희망찬 乙酉年 새해를 맞이하면서
李 炳 佶