

# 흙의 액화과정에 따른 맨홀이 있는 지하 매설관의 동적해석

## Dynamic Analysis of Buried Pipelines with Manhole during a Soil Liquefaction Process

심 재 수\*  
Shim, Jae Soo

### Abstract

Recently, researches for buried lifelines such as pipelines have been carried out to provide for safe design. One of the major causes to the damage of buried pipelines has been soil liquefaction.

Analytical models have been presented to compare with the results from recent model experiment under a soil liquefaction environment induced by seismic shaking table. The analytical results were more than two times those of experimental measurement.

Thus the objective of this study is to introduce a rigorous nonlinear analysis of equation of motion with more realistic parameters which are dynamic soil and water pressure, dynamic subgrade reaction coefficient, and damping coefficient for soil liquefaction environment.

### 요 지

지진 작용에 대한 지하매설관의 안전설계를 위한 연구가 최근 활발히 진행중이다. 매설관의 파괴원인 중 하나는 관로 주위 흙의 액화영향이다.

최근 셰이킹 테이블로 흙의 액화 현상을 야기하여 매설 관로 모델의 거동에 대한 실험적 연구와 해석적 연구들이 수행되었다. 해석적 연구에서 구한 결과들은 실험치의 2배 이상이었다.

그러므로 본연구는 매설관로의 거동을 파악하기 위하여 흙의 액화과정에 따른 동적 토압 및 수압계수, 감쇄계수 및 동적 지반계수들을 보다 실험에 근사하게 나타내고 비선형 운동 방정식을 작성하여 시간 이력 해석을 한다.

### 1. 서 론

지진 작용에 의한 지하 매설관의 피해가 많았는

데, 건물이나 큰구조물의 연결부위에서의 매설관의 파괴에 대한 주 원인 중 하나는 관로주위 흙의 액화 영향이었다.

\*정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

그러나 이 부문에 대한 자료가 거의 없는 실정이었으나, 최근 실험적으로는 Kuribayashi<sup>(1)</sup>에 의한 셰이킹 테이블에서 흙의 액화에 따른 매설관로의 거동이 연구되었고 해석적으로는 Wang<sup>(2)</sup>에 의해 연구되었으나 간단한 직선 관로가 그 대상이었다.

맨홀이 있는 지하 매설관의 흙의 액화에 따른 실험은 Kuribayashi<sup>(3)</sup>에 의하여 최근 수행되었으나 해석적인 결과는 없었다. 저자가 수행한 연구들<sup>(4, 5)</sup>은 위의 실험결과에 대하여 해석적으로 지하 매설관의 동적 거동을 추적하였다. 해석적인 결과는 실험적인 결과와 비교하면 참고 문헌 4에서는 맨홀이 없는 지하 매설관은 2.3배, 맨홀이 있는 지하 매설관은 2.5배 정도 크며 참고문헌 5에서는 각각 1.6배, 2배 정도 크게 나왔다.

전자의 연구에서는 매설관의 감쇄계수에 대한 자료 부족으로 단순히 5%로 가정하였으며 후자의 연구에서는 Gazetas<sup>(6)</sup>가 제안한 감쇄계수를 적용하였으나, 동적 하중 및 감쇄계수를 안전측으로 적용하였으므로 실험결과에 비하여 최대 변위가 크게 계산되었다. 사용된 모델과 흙이 액화되어가는 과정에서의 동적 토압 및 수압과 구조계의 재료의 감쇄계수(Hysteretic damping coefficient)와 기하학적 감쇄계수(Viscous radiation damping coefficient)에 의하여 해석 결과는 크게 영향이 있으므로 보다 정확한 결과치를 얻기 위하여 본 연구에서는 구조계의 감쇄계수 및 구조 모델을 개선하고 동적 하중을 사실적으로 나타내어 흙의 액화 과정에 따른 맨홀이 있는 지하 매설관의 동적 비선형 거동 해석을 한다.

## 2 동적 거동 해석

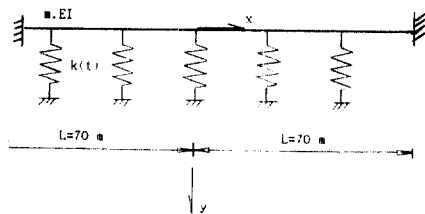
### 2.1 운동방정식 유도

그림 1에 보이는 지하 매설관로의 동적 해석은 Rayleigh 방법에 의하여 결정된 형상함수  $\phi(x)$ 와 일반 좌표계(Generalized coordinate)  $Z(t)$ 를 도입하여 가상변위법을 적용하면 유도된 비선형 운동방정식은 다음과 같다.

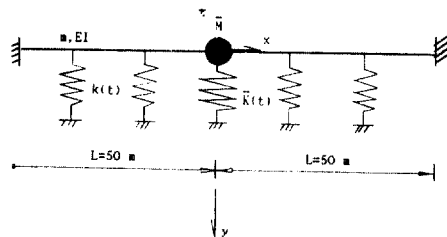
$$M\ddot{Z}(t) + C(t)\dot{Z}(t) + K(t)Z(t) = F_1(t) + F_2(t) \quad (1)$$

또는

$$\ddot{Z}(t) + 2\xi(t)\omega_n(t)\dot{Z}(t) + \omega_n^2(t)Z(t)$$



(a) Pipe without manhole



(b) Pipe with manhole

그림 1. Dynamic structural model for horizontal response

$$= (F_1(t) + F_2(t))/M \quad (2)$$

여기서  $M$ ,  $C(t)$ ,  $K(t)$ 는 일반화된 질량, 감쇄 및 강도계수이고,  $F_1(t)$ 는 지반진동에 의한 관성 하중이고  $F_2(t)$ 는 진동에 의하여 형성되는 동적 토압과 동적수압의 합이다.

$\xi(t)$ 는 2.2.3에서 정의되는 유효 감쇄계수이며,  $\omega_n(t)$ 는 구조물의 고유 진동수인데 구조물의 강도  $K(t)$ 는 시간에 따라 완만히 변화하므로 다음으로 가정하였다.

$$\omega_n(t) = \sqrt{K(t)/M} \quad (3)$$

그림 1(a)에 있는 맨홀이 없는 관로 구조계의  $M$ ,  $K(t)$ 는 각각 다음과 같다.

$$M = \int_{-L}^L m\phi^2(x)dx \quad (4)$$

$$K(t) = \int_{-L}^L EI[\phi''(x)]^2 dx + \int_{-L}^L K(t)\phi^2(x)dx \quad (5)$$

여기서  $EI$ 는  $134,466,000\text{g}/\text{cm}^2/\text{cm}$ 이고  $m$ 은

0.065127g/cm이며  $L$ 은 70cm이며 형상함수  $\Phi(x)$ 는 다음과 같다.

$$\Phi(x) = ax^4 + bx^2 + c \quad (6)$$

여기서  $a, b, c$ 는 각각  $1/70^4, -2/70^2, 1$  이다.

동적 지반 반력 계수(Dynamic subgrade reaction factor),  $k(t)$ 는 2.2.1에 정의 되어 있다.

하중항  $F_1(t)$ 와  $F_2(t)$ 는 각각 다음과 같다.

$$F_1(t) = -\dot{Y}_B(t) \int_{-L}^L m\Phi(x)dx \sin\omega(t)t \quad (7)$$

$$F_2(t) = -P_1(t) \int_{-L}^L m\Phi(x)dx \sin\omega(t)t \quad (8)$$

여기서  $\dot{Y}_B(t)$ 는 지반 가속도의 포락선의 값이고  $\omega(t)$ 는 각속도이며,  $P_1(t)$ 는 단위 길이당 동적 토압과 동적 수압의 합인데 2.2.2에서 정의된다.

그림 1(b)에 보이는 맨홀이 있는 관로 구조계의  $M, K(t), F_1(t)$ 와  $F_2(t)$ 는 다음과 같다.

$$M = \int_{-L}^L m\Phi^2(x)dx + \bar{M}\Phi^2(0) \quad (9)$$

$$K(t) = \int_{-L}^L EI[\Phi''(x)]^2 dx + \int_{-L}^L k(t)\Phi^2(x)dx + \bar{K}\Phi^2(0) \quad (10)$$

$$F_1(t) = -\dot{Y}_B(t) \left[ \int_{-L}^L m\Phi(x)dx + \bar{M}\Phi(0) \right] \sin\omega(t)t \quad (11)$$

$$F_2(t) = -[P_2(t) \int_{-L}^L \Phi(x)dx + \bar{P}(t)\Phi(0)] \sin\omega(t)t \quad (12)$$

여기서  $\bar{M}, \bar{K}, \bar{P}$ 는 각각 맨홀에 대한 집중 질량, 집중 강도 및 동적 토압과 수압의 합인 집중 하중이다.

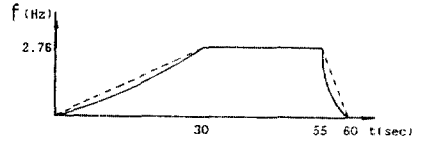
매설관로의  $m, EI$ 는 맨홀이 없는 관로의 값과 같고  $L$ 은 50cm이며 형상함수  $\Phi(x)$ 는 다음과 같다.

$$\Phi(x) = ax^4 + bx^2 + c \quad (13)$$

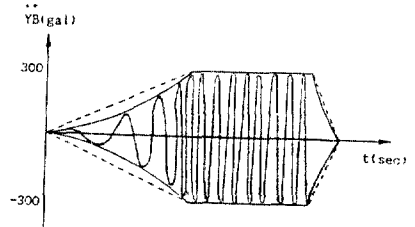
여기서  $a, b, c$ 는 각각  $1/50^4, -1/50^2, 1$  이다.

$P_2(t)$ 는 관로의 단위길이당 작용하는 동적 토압과 동적 수압의 합이다.

하중항  $F_1(t)$ 와  $F_2(t)$ 는 그림 2에 있는데 실선



(a) Frequency



(b) Acceleration

그림 2. Measured and input forcing functions

은 실험에서 측정된 것이고 점선은 해석용이다.

## 2.2 동적 특성치 결정

쉐이킹 테이블에서의 실험

실험에 관한 자료는 인용문헌 3, 5에 상세히 있어 본 논문에서는 간략히 기술한다.

실험 모델은 실제 거동에 대응하도록 1/20스케일로 되어 있으며 하나는 맨홀이 없는 연속 관로이며 다른 하나는 중앙부에 맨홀이 있는 관로이다.

관로의 재료는 콘크리트와 폴리에스터가 혼합되어 비중이 1.9, 탄성계수는  $3300\text{kg/cm}^2$ 이다. 사용된 흙은 포화된 모래이며 평균입자 크기( $D_{50}$ )는  $0.38\text{mm}$ , 균등계수( $D_{60}/D_{10}$ )는 2.7, 비중이 2.65이며 최대 간극비( $e_{max}$ ), 최소 간극비( $e_{min}$ )는 각각 0.86과 0.61이다. 설치된 관로와 직각방향으로 진동하도록 0Hz에서 2.76Hz까지 진동수를 증가시켰으며, 대응하는 가속도는 0에서 30초 후에 300gal로 증가되었고, 이때 흙의 전단 변형율이 약 1%로 되어 액화 상태로 되었으며, 55초까지는 300gal로 유지하고 60초에 0gal로 감소되었다. 실험과정의 지반 가속도, 간극수압과 흙의 전단 변형율은 그림 3에 있다.

이로부터 액화현상의 관정을 가속도의 함수로 하여 다음과 같이 세 상태영역으로 구분하였다.

지반 가속도의 크기가  $0.1g$ ( $g$ 는 중력가속도,  $980\text{cm/sec}^2$ )이하에서는 간극수압이 형성되지 않음

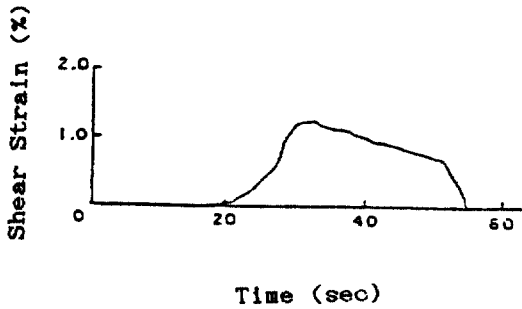
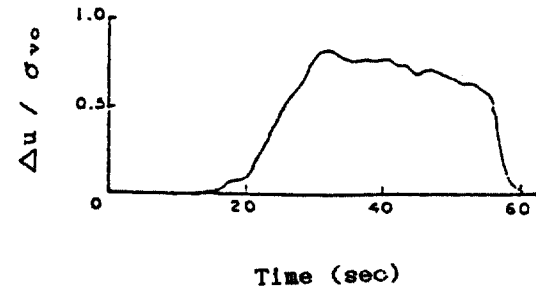
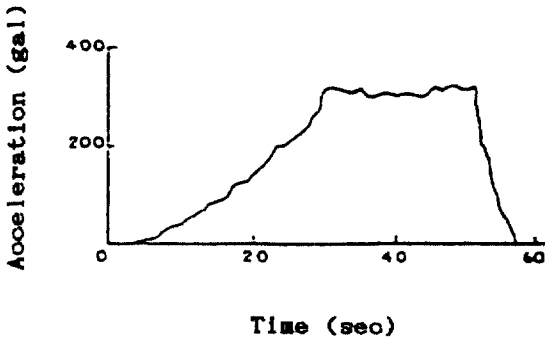


그림 3. Experiment measurement of a pipe model with a manhole

므로 액화가 안된(No liquefaction)상태 영역이라고 하고, 가속도가 0.3g에서는 간극수압이 커져 액화된(total liquefaction) 상태 영역이라 하고, 가속도가 0.1에서 0.3사이에는 액화가 진행되는 약화 과정인(transition) 상태 영역이라고 하였다.

지반 가속도와 중력가속도와의 비인 지진계수(seismic coefficient)  $K_h$ 에 대한 동적변수들의 변화상태와 영역구분은 그림 4에 있다.

2.2.1 동적 지반 반력 계수(subgrade reaction factor),  $k(t)$

동적 지반 반력 계수,  $k(t)$ 는 다음과 같다.

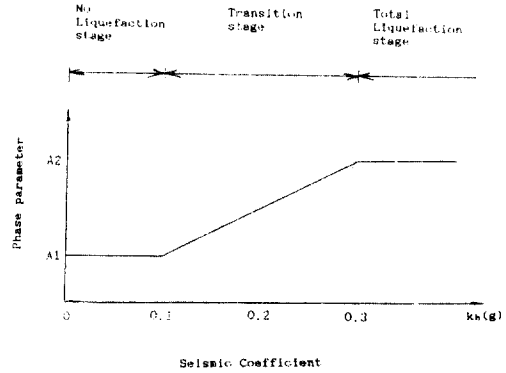


그림 4. Phase parameter during liquefaction process

$$k(t) = B K_0 \quad (0 \leq k_h \leq 0.1) \quad (14)$$

$$k(t) = -B K_0 (5k_h - 1.5) \quad (0.1 \leq k_h \leq 0.3) \quad (15)$$

여기서 B의 값은 관로에 대하여는 6.15, 맨홀에 대하여는 18.5이며  $k_0$ 은  $1000g/cm^3$ 로 선정되었다.<sup>(5)</sup>

2.2.2 동적 토압 및 동적 수압(Dynamic soil and water pressure)

동적 토압 및 동적 수압은 흙의 액화상태에 따라 다음과 같다.<sup>(7, 8, 9)</sup>

액화가 안된(no liquefaction)상태 영역

$$P(t) = \Delta P_{soil}(t) + 2\Delta P_{water}(t) \quad (16)$$

$$\Delta P_{soil} = r_{soil} \cdot H \cdot \Delta K_{dynamic} \int_{y_1}^{y_2} dy \quad (17)$$

$$\Delta K_{dynamic} = 0.15k_h \quad (0 \leq k_h \leq 0.3) \quad (18)$$

여기서  $r_{soil}$ 은 흙의 수중 단위중량이고 H는 웨이킹 테이블에서의 흙의 깊이이며  $\Delta K_{dynamic}$ 은 Rigid 벽체에 대한 진동하는 토압의 진폭계수이다.

$$\Delta P_{water} = Ck_h r_w \frac{7}{8} \int_{y_1}^{y_2} \sqrt{H_w y} dy \quad (19)$$

여기서  $H_w$ 는 수조의 깊이인데 H와 같고, C는 보정계수인데 0.88이다.

액화가 안된(no liquefaction)상태에서의 동적 토압과 수압의 깊이에 따른 분포는 그림 5에 있다. 식(8)의  $P_1(t)$  및 식(12)의  $P_2(t)$ 는 식(16)으로

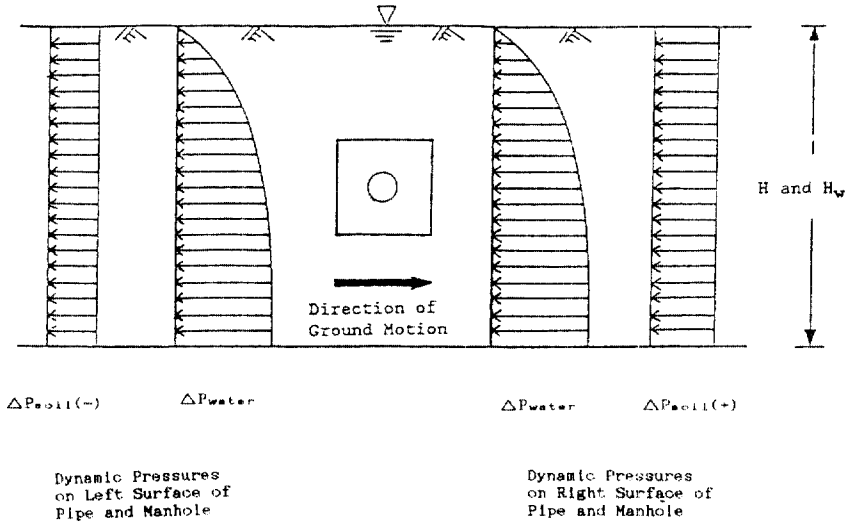


그림 5. Dynamic soil and water pressures(No liquefaction stage)

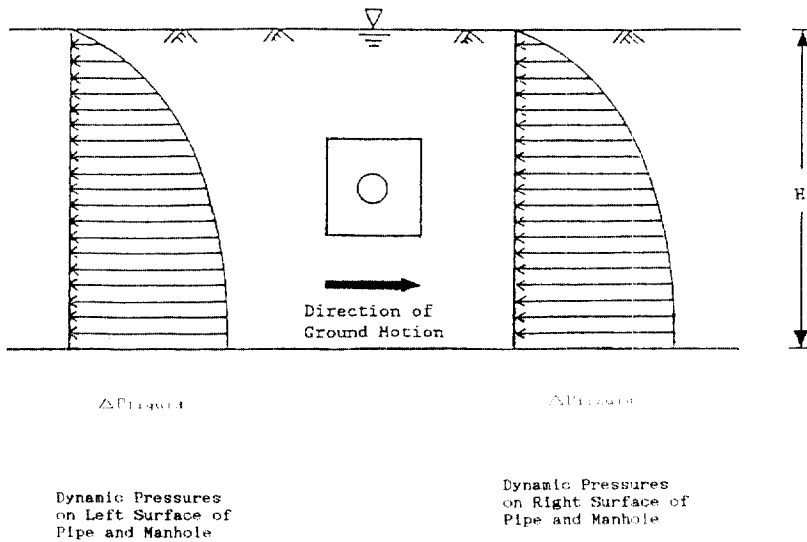


그림 6. Dynamic liquid pressure(Total liquefaction)

계산되며,  $P_1(t)$ 에 대하여는  $y_1, y_2$ 는 각각 5.11 및 5cm이고  $P_2(t)$ 에 대하여는  $y_1, y_2$ 는 각각 6.68 및 12.83cm이다.

식(12)의  $\bar{P}(t)$ 는  $y_1, y_2$ 는 0.5 및 19.0cm를 이용

하여 식(16)으로부터 계산된 후, 맨홀의 길이를 곱한 값이다.

액화된(total liquefaction) 상태 영역

$$P_2(t) = 2 \Delta P_{\text{liquid}}(t) \quad (20)$$

$\Delta P_{\text{liquid}}$ 는 식(19)의  $I_w$ 대신  $I_{\text{liquid}}$ 를 사용하며 값은 1.94이다.

동적 수압의 깊이에 따른 분포는 그림 6에 있다.

액화 과정의(transition) 상태 영역

그림 4를 이용하면  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $\dot{P}(t)$ 는 결정된다.

### 2.2.3 감쇠 계수(Damping coefficient) $\xi(t)$

감쇄력이나 감쇄계수에 대한 자료는 실험결과에 없었으므로 본 연구에서는 Gazetas의 연구결과를 이용하여 감쇄계수를 적용한다.

감쇄계수,  $\xi(t)$ 는 기하학적(geometric, or radiation)감쇄계수,  $\beta(t)$ 와 재료의(material, hysteretic)감쇄계수,  $\lambda(t)$ 의 합수이며 다음과 같다.

$$\xi(t) = \lambda(t) + \beta(t) \quad (\omega(t)/\omega_n(t)) \quad (21)$$

기하학적 감쇄계수,  $\beta(t)$ 는 원형기초에 대한 다음식으로 부터 계산된다.

$$\beta(t) = 0.85(\sqrt{\rho}/\sqrt{1-\nu(t)}) (R^{1.5}/\sqrt{m}) \quad (22)$$

여기서  $\rho$ 는 흙의 단위 체적당 질량,  $\nu(t)$ 는 흙의 포와송비,  $m$ 은 기초의 질량,  $R$ 은 원형기초의 반경이다.

매설관은 원형이 아니므로 같은 면적인 원형으로 치환한 반경이다.

포와송비는 액화가 안된 상태 영역에서 0.3, 액화된 상태 영역에서는 0.5이며 액화과정의 상태영역에서의 변화는 그림 4로 부터 결정된다.

재료의 감쇄계수,  $\lambda(t)$ 는 다음식으로 표시된다<sup>(10,11)</sup>.

$$\lambda(t) = 0.195(G(t)/G_{\max})^2 - 0.515(G(t)/G_{\max}) + 0.333 \quad (23)$$

여기서  $G(t)$ 는, 흙의 동적 전단 변형도  $\gamma(t)$ 에 대응하는, 동적 전단 탄성 계수이며  $G_{\max}$ 는 최대 동적 전단 탄성 계수이다.

또한  $G(t)/G_{\max}$ 는 다음과 같다.

$$G(t)/G_{\max} = A(\gamma) \sigma^B(\gamma) \quad (24)$$

상수  $A$ ,  $B$ 는 각각 다음과 같다.

$$A(\gamma(t)) = 0.5[1 + \tanh\{\ln[0.000102/\gamma(t)]^{0.492}\}] \quad (25)$$

$$B(\gamma(t)) = 0.272[1 - \tanh\{\ln[0.000556/\gamma(t)]^{0.4}\}] \quad (26)$$

$\sigma$ 는 관로 높이의 중점에서 유효 평균 구속 응력(confining stress)에서 초과 간극 수압(excess pore water pressure,  $\Delta u$ )을 뺀 값이다.

초과 간극 수압과 동적 전단 변형도는 그림 3에 있다.

액화 과정의 상태 영역에 대한  $\gamma(t)$ ,  $\Delta u(t)$  값은 그림 4로부터 결정된다.

### 2.3 비선형 운동 방정식의 해석

식(2)의 비선형 운동 방정식 해석은 시간 영역에서의 직접 중분 적분법을 이용한다<sup>(12)</sup>.

이 방법은 선형 운동 방정식 해석법인 Newmark method와 달리 시간구간( $\Delta t$ )내에서 동적 평형 조건을 만족시키기 위하여 점도 및 반복 계산 과정이 추가되어 있다.

그러나  $K(t)$ ,  $C(t)$ ,  $F_1(t)$  및  $F_2(t)$ 가 완만히 변화하므로 시간구간내에서는 일정한 상수라고 가정하여 선형 해석법을 이용하면  $\Delta t$ 가 약 0.001초 이하이면 거의 같은 정도의 결과를 얻는다.

맨홀이 없는 매설 관로와 맨홀이 있는 매설 관로의 중점에서 최대 변위의 시간력(time history) 동적 거동은 그림 7에 있으며, 최대 변위는 각각 0.76cm, 0.78cm이며 실험결과와의 비교는 표 1에 있다.

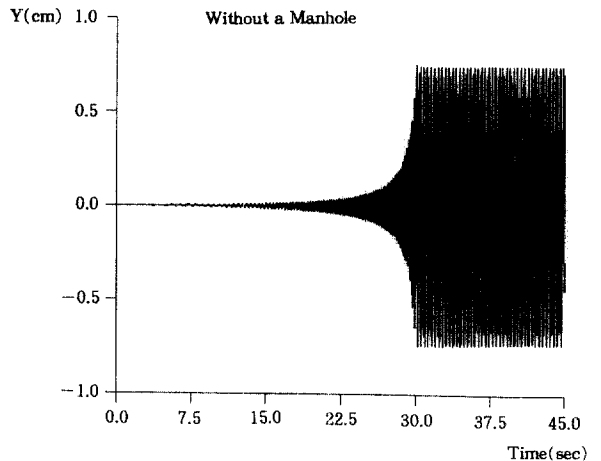


그림 7(a). Dynamic horizontal responses of buried pipes without a manhole

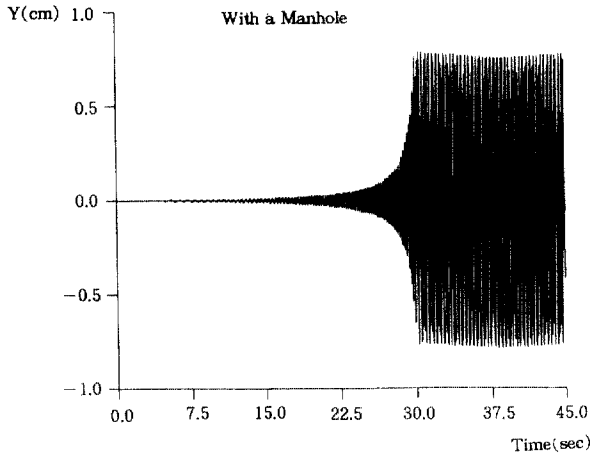


그림 7(b). Dynamic horizontal responses of buried pipes with a manhole

표 1. Maximum horizontal displacement.

	Analysis	Experiment
Pipeline without manhole	1.17cm (4) 0.79cm (5) 0.76cm	0.5cm
Pipeline with manhole	1.86cm (4) 1.47cm (5) 0.78cm	0.75cm

### 3. 결 론

비선형 운동 방정식의 거동 해석 결과는 참고 문헌 4, 5의 결과에 비하여 개선되었다(표 1).

맨홀이 없는 매설관로의 해석적 변위(0.76cm)는 실험치(0.5cm)보다 52% 크며, 맨홀이 있는 매설관로의 해석적 결과(0.78cm)는 실험결과(0.75cm)보다 약 5%정도 크다.

이는 지하 매설관로의 해석 모델과 동적 지반 반력 계수, 동적 토압 및 동적 수압과 감쇄계수를 실험자료에 보다 근사하게 산정하였기 때문이다.

그러나 맨홀 유, 무에 따라 서로 약 47%의 차이는 동적 계계수들이 실제와 적합하지 않다고 생각되어 진다.

그러므로 실험 상황에 적합한 동적 토압, 동적

수압과 감쇄계수, 동적 지반 반력 계수 등의 연구와 또한 액화 과정 상태와 액화된 상태에서의 유체 구조물의 상호 작용을 고려한 연구가 필요하다.

### 감사의 말

본 연구는 1989년도 한국 과학 재단 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 동 재단에 감사를 표한다.

### 참 고 문 헌

1. Kuribayashi, E., Kawamura, Ieda, R., Aida, M., and Yui, Y., An Experimental Behavior of Buried Pipes During Liquefaction of Saturated Sandy Soil, *Proc. of 1985. Pressure Vessels and Piping Conference*, ASME Publication, PVP-Vol. 98-4. p. 3-10(1985)
2. Yeh, Y. H., and Wang, L. R. L., Combined Effects of Soil Liquefaction and Ground Displacement to Buried Pipeline, *Proc. of 1985 Pressure Vessels and Piping Conference*, ASME Publication, PVP-Vol. 98-4, pp. 43-52(1985)
3. Kuribayashi, E., Ieda, R., Kawamura, M., Tsuchiyama, S., and Yamanaka, S., Behavior of Buried Pipelines with Manholes During Liquefaction(in Japanese), *Proc. of the 21st Annual Meeting of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sapporo, Japan(1986)
4. Wang, L. R. L., Shim, J. S., and Ishibashi, I., *Responses of Buried Pipelines Including Manholes in a Soil Liquefaction Environment. Structures and Stochastic Methods*, A. S. Cakmak, editor, Elsevier, pp. 199-213(1987)
5. Wang, L. R. L., Shim, J. S., Ishibashi, I., Wang, Y., Dynamic Responses of Buried Pipelines with manholes During Liquefaction Process, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*(1990)
6. Gazetas, G., Analysis of Machine Foundation Vibration: State-of-the-Art, *International Journal of Soil Mechanics and Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 2-42(1983)
7. Ishibashi, I., Matsuzawa, H., and Kawamura,

- M., Generalized Apparent Seismic Coefficient for Dynamic Lateral Earth Pressure Determination, *Proc. of the 2nd International Conference on Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, pp. 6.33–6.42(1985)
8. Matsuzawa, H., Ishibashi, I., and Kawamura, M., Dynamic Soil and Water Pressure of Submerged Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 10, pp. 1161–1176(1985)
9. Sherif, M. A., Ishibashi, I., and Lee, C. D., Earth Pressures Against Rigid Retaining Walls, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 108, No. GT5, pp. 679–694(1982)
10. Tatsuoka, F., Iwasaki, T., and Takagi, Y., Hysteretic Damping of Sand Under Cyclic Loading and Its Relation to Shear Modulus, Soils and Foundations, *Journal of JSSMFE*, Vol. 18, No. 2, pp. 25–40(1978)
11. Ishibashi, I., Dynamic Soil Properties, *Proceeding of the Joint U. S.–P. R. C. Microzonation Workshop*, Harbin, China, pp. (16–1)–(16–21)(1981)
12. Newmark, N. M., A Method of Computation for Structural Dynamics, *Transaction ASCE*. Vol. 127, pp. 1406–1435(1962)

(接受：1990. 3. 9)