

## 액상화 영구지반변형에 의한 라이프라인 구조물의 횡방향 거동에 관한 연구

### A Study on Transverse Behavior of Lifeline Systems Due to Liquefaction-induced Permanent Ground Displacement

김문겸\*      임윤목\*\*      이강원\*\*\*      조우연\*\*\*\*  
Kim, Moon Kyum    Lim, Yun Mook    Lee, Kang Won    Cho, Woo Yeon

#### ABSTRACT

The purpose of the present study is to analyze the response of pipelines subjected to liquefaction-induced permanent ground displacement and to discuss the failure prediction of domestic waterway pipelines. Initially here, characteristics of liquefaction are reviewed and then permanent ground displacement is investigated based on previous earthquake hazard cases. Next, considering the distribution of the transverse permanent ground displacement and equivalent spring constant effect, formulae obtained by a beam theory are established to analyze continuous pipelines. This analysis was performed without consideration of axial effects. So the finite element analysis was used in order to consider the axial stiffness of soil. As a result, degree of liquefaction, width of deformed ground and axial stiffness are crucial points for evaluating the failure of pipelines subjected to permanent ground displacement.

#### 1. 서론

라이프라인 구조물은 현대사회의 두드러진 특징중의 하나로서 안전, 통신, 상업 등에 필요한 각종 서비스와 자원을 제공해주며 대부분 지중에 매설된 형태로 존재한다. 이러한 라이프라인 구조물에 대해서 큰 변형과 파괴를 유발하는 영구지반변형은 지반의 액상화, 단층운동, 산사태 등으로 인해 발생되며, 특히 지반의 액상화로 인해 야기되는 영구지반변형과 이에 따른 라이프라인의 거동특성은 현재 많은 학자<sup>[1][2][3]</sup>들에 의해 연구되고 있는 분야중의 하나이다.

라이프라인 구조물은 그 특성상 연결부가 반드시 존재하게 되며 연결부의 구조적 형태에 따라 연속관과 분절관으로 나눌수 있다. 연속관은 강관과 같이 연결부가 용접된 관을 의미하며 분절관은 주철관과 같이 연결부가 볼트 등으로 접합되어 거동 특성이 연속되지 않는 관을 의미한다. 또한 액상화의 진행 방향과 관의 위치에 따라 종방향 변형과 횡방향 변형으로 나눌 수 있는데 이에 대한 거동을 그림 1과 2에 나타내었다. 종방향 변형은 관에 압축력이나 인장력을 증가시키고 횡방향 변형은 관의 휨응력을 증가시킨다.

\* 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

\*\* 연세대학교 토목공학과 조교수

\*\*\* 한국가스공사 선임연구원

\*\*\*\* 연세대학교 토목공학과 박사과정

이와같이 관의 특성 또는 액상화의 변형 특성에 따라 관의 거동을 분류할 수 있다. 본 연구에서는 액상화로 인한 횡방향 변형이 작용되는 연속관에 대하여 해석을 우선적으로 수행하고자 한다.

## 2. 액상화에 의한 지반거동 특성

본 장에서는 액상화의 기본적인 내용들을 살펴보고 액상화로 인해 발생된 영구지반변형의 특성에 대해서 고찰하고자 한다.

### 2.1 액상화

액상화(liquefaction)란 용어는 Mogami 와 Kubu (1953) 가 비배수상태의 하중하에서 포화사질토에 일어나는 변형현상과 관련해서 처음으로 사용하였다. 1964 년 발생한 Alaska 지진(M=8.3)과 Niigatta 지진(M =7.5) 이후 액상화에 관한 수많은 연구가 수행되었는데, 일반적으로 액상화는 포화사질토가 비배수상태에서 급속한 재하를 받는 경우, 발생하는 과잉간극수압으로 인한 유효응력의 감소와 전단저항의 감소로 인해 지반이 액체처럼 유동하는 현상을 말한다. 이러한 액상화현상은 유동액상화(flow liquefaction)와 주기운동(Cyclic mobility)으로 크게 구분된다.

유동액상화는 토체(soil mass) 내의 정적평형상태의 전단응력(정적전단응력)이 액상화 상태의 흙의 전단강도보다 큰 경우에 발생하는 현상으로서 이로 인한 대규모 변형은 실제로 정적전단응력에 의해서 일어난다. 이 유동액상화는 모든 액상화 관련 현상 중에서 유동파괴(flow failure)라고 하는 가장 중대한 결과를 가져온다. 1925년과 1971년에 일어난 Sheffield Dam 과 Lower San Fernando Dam 의 유동활동파괴(flow slide failure)는 유동액상화의 대표적인 예이다.

Cyclic mobility 는 포화사질토가 일정한 함수비에서 반복하중을 받아서 일어나는 진행성 연화현상으로서 1969년 Casagrande에 의해서 처음으로 사용된 용어이다. 이는 유동액상화와는 달리 정적전단응력이 액상화토의 전단강도보다 적은 상태에서 일어나며 변형은 정적전단응력과 진동전단응력 모두에 의해서 일어난다. 측방퍼짐(lateral spreading)이라고 부르는 이러한 변형은 물에 인접한 평지나 대단히 완만한 경사지반에서 발생하고, 구조물의 경우 큰 피해를 줄 수 있다.

### 2.2 액상화에 의한 영구지반변형

라이프라인 구조물의 거동은 영구지반변형의 크기, 영구지반변형 지역의 공간적인 규모 및 구조물방향에 대한 지반운동의 형태 등의 함수로 표현될 수 있다. Youd 와 Perkins 는 지진으로 인해 발생된 액상화의 크기를 정량화하기 위해 지진의 강도와 진앙으로부터의 거리의 함수로 표현되는 LSI (Liquefaction Severity Index) 라는 개념을 설정하였고 이를 이용하여 액상화로 인한 재해도를 예측하였다. LSI 에 의하면 지진의 진도가 5.2의 천발지진인 경우 최대 1m 의 액상화-지반변형이 발생되게 된다. 1964 년 Niigata 지진과 1983 년 Nihonkai Chubu 지진 자료로부터 Suzuki 와 Masuda (1991) 는 몇 개의 영구지반변형 형태를 결정하였다. 그림 1 은 종방향 영구지반변형의 전형적인 형태로서 이러한 변위로 인해 라이프라인 구조물은 측방방향의 압축 및 인장 거동을 하며 이로 인하여 국부적인 좌굴 또는 인장파괴가 발생되기도 한다. 그림 2 는 횡방향 영구지반변형의 전형적인 형태로서 이러한 변위로 인해 라이프라인 구조물은 휨거동을 하게 된다. 그림 3은 횡방향 영구지반변형의 폭  $W$ 와 크기  $\delta$ 의 관측값들을 보여준다. 그림에서 관측된 최소폭은 80 m 이며  $\delta/W$ 는  $1/1000 \leq \delta/W \leq 1/100$ 의 범위를 가지며 평균값은 1/350 정도임을 알 수 있다.

### 3. 라이프라인의 거동특성

횡방향 영구지반변형에 대한 관의 기하학적인 거동 특성은 그림 4와 같이 단순화할 수 있다. 따라서 이에 대한 거동 특성을 분석하고자 한다.

#### 3.1 횡방향 영구지반변형에 대한 라이프라인의 거동특성

횡방향 영구지반변형에 대한 최초의 접근으로서 그림 4에 나타난 횡지반변위를 사인(sine)형태의 함수로서 모형화 할 수 있다<sup>[3]</sup>. 비액상화 지반의 완만한 경사부에 위치한 느슨한 모래층에서 균일한 액상화가 발생할 때 이러한 형태의 변위가 나타나는데 그림 5와 같은 지반에 놓인 라이프라인 구조물의 경우 가정된 변위형태에 따라 기본적인 지배방정식을 식 (1) 와 같이 표현할 수 있다.

$$EI \frac{d^4 v_1}{dx^4} + K_1 v_1 = K_1 \delta \left(1 - \sin \frac{\pi x}{2l}\right) \quad 0 \leq x \leq l \quad (1a)$$

$$EI \frac{d^4 v_2}{dx^4} + K_2 v_2 = 0 \quad l \leq x \quad (1b)$$

여기서  $E$  는 Young 탄성계수,  $I$  는 관의 관성 2 차 모멘트,  $v_1, v_2$  는 각 영역에서의 관의 변위,  $K_1, K_2$  는 지반의 액상화정도에 좌우되는 변형지반 및 비변형지반의 등가지반스프링상수,  $\delta$  는 최대영구지반변형의 크기,  $l$  은 관방향의 영구지반변형의 1/2 ( $2l = W$ ) 이다. 제안된 변위의 형태에 따른 지배방정식을 풀기 위한 경계조건은  $x$  의 위치에 따라 식 (2) 와 같다.

$$x = 0 \text{ 일 때} \quad \frac{dv_1}{dx} = 0, \quad \frac{d^3 v_1}{dx^3} = 0 \quad (2a)$$

$$x = l \text{ 일 때} \quad \frac{dv_1}{dx} = \frac{dv_2}{dx}, \quad \frac{d^2 v_1}{dx^2} = \frac{d^2 v_2}{dx^2} \quad (2b)$$

$$\frac{d^3 v_1}{dx^3} = \frac{d^3 v_2}{dx^3}, \quad v_1 = v_2$$

그리고,  $x$  가 무한대로 갈수록 식 (3) 과 같이 비액상화지역의 횡방향 변위는 0 으로 수렴해야 한다.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} v_2 = 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{dv_2}{dx} = 0 \quad (3)$$

식 (2) 와 식 (3) 에 나타낸 바와 같은 경계조건을 사용하여 식을 풀면 영구지반변형에 의한 라이프라인 구조물의 횡방향 변위는 식 (4) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_1 = \exp(\beta_1 x)(A_1 \cos \beta_1 x + A_2 \sin \beta_1 x) + \exp(-\beta_1 x)(A_3 \cos \beta_1 x + A_4 \sin \beta_1 x) + v_0 \quad (4a)$$

$$v_2 = \exp(-\beta_2 x)(A_5 \cos \beta_2 x + A_6 \sin \beta_2 x) \quad (4b)$$

여기서  $v_0$  및  $A_1 \sim A_6$  는 경계조건에서부터 얻어지는 적분상수이며  $\beta_1$  과  $\beta_2$  는 다음과 같이 식 (5) 로 나타낼 수 있다.

$$\beta_1^4 = \frac{K_1}{4EI}, \quad \beta_2^4 = \frac{K_2}{4EI} \quad (5)$$

이와 같은 방법을 통해 사인(sine)형태로 가정된 횡방향 영구지반변형의 거동을 해석할 수 있다.

### 3.2 축방향력을 고려한 거동특성

앞 절에서 언급한 탄성지지보 해석은 축방향력을 고려하지 않은 해석방법이다. 축방향력을 고려하게 될 경우 다음 식과 같은 마찰에 의한 축방향 지반반력계수를 사용하게 된다<sup>[4]</sup>

$$K_x \simeq 2.0 G \quad (6)$$

여기서  $G$ 는 동적전단탄성계수이고 다음과 같은 식에 따라 결정된다.

$$G = 1000 K_2 \sqrt{\gamma H \frac{(1 + 2 K_0)}{3}} \quad (7)$$

여기서  $K_2$  는 흙의 상대밀도와 관계되는 상수이고  $\gamma$ ,  $H$ ,  $K_0$  는 각각 지반의 상대밀도, 관의 매설깊이, 흙의 정지토압계수이다.

이와 같이  $K_x$  를 고려하여 축방향력을 포함한 거동특성을 파악할 수 있다. 또한 축방향 지반반력계수  $K_x$  가 클수록 관을 구속하는 힘이 크다는 것을 의미하기 때문에 관과 지반사이의 마찰력이 증가하게 된다. 따라서 축방향력을 고려한 해석을 수행하기 위해서는  $K_x$ 의 영향을 분석하는 것이 필요하다.

### 4. 수치해석결과 및 분석

영구지반변형에 의해 라이프라인에 발생할 수 있는 재해의 양상을 예측하기 위해 횡방향 영구지반변형에 의한 관의 거동을 고찰하였다. 우선 이론식을 통해 탄성지지보 모형의 적용으로 액상화 발생 폭 및 지반 스프링 상수의 변화로 인한 라이프라인 구조물의 거동을 살펴보았다. 다음으로 3.2 절에서 언급되었듯이 횡방향 영구지반변형에 의해 발생될 수 있는 축방향 지반반력을 고려한 거동을 고찰하기 위해 3차원 유한요소해석을 적용하였다.

#### 4.1 축방향 지반반력을 고려하지 않은 탄성지해보해석

국내에서 주요 상수도관으로 사용되는 연속된 강관 형태의 라이프라인 구조물에 대해 영구지반 변형 해석을 실시하였다. 대상 상수도관은 용접된 형태로서 연속된 구조물로 고려하고 액상화 현상으로 인해 1 m의 횡방향 영구지반변형을 받고 있다고 가정하였다. 그 밖의 강관의 제원 및 최대 영구지반변형은 표 1에 나타나 있다. 그림 5는 액상화지역에 놓인 라이프라인 구조물의 거동하는 나타낸 것이다. 해석에 필요한 지반의 물성은 액상화가 발생한 지역과 액상화가 발생하지 않은 지역의 등가지반스프링상수의 비율로서 나타낼 수 있다.

그림 6은 관의 최대휨응력과 액상화영역의 폭 사이의 관계를 나타낸다. 이 그림으로부터 등가스프링상수의 비가 작아질수록 즉, 액상화정도가 심해질수록 관의 최대 휨응력 값이 작아진다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 라이프라인 구조물에 작용하는 지반변위로 인한 힘의 감소와 라이프라인과 액상화지반 사이의 미끄러짐으로 설명될 수 있다. 폭 0 m 부근의 지역을 제외하고는 150 m 미만의 액상화영역에 대해서 휨응력값은 ( $K_1/K_2=0.1$ ) 강관의 허용휨응력 ( $4200 \text{ kgf/cm}^2$ ) 보다 커지게 된다. 따라서 라이프라인의 파괴확률은 등가지반스프링상수의 비가 커질수록 높아지게 된다. 라이프라인의 반응이 액상화영역의 폭이 300 m 이상의 경우에 대해서는 뚜렷하게 변화하지 않는다. 이러한 결과는 영구지반변형을 받는 라이프라인 구조물의 반응이 등가지반스프링상수에 매우 민감하다는 것을 제시해준다.

#### 4.2 축방향 지반반력을 고려한 유한요소해석

라이프라인 구조물의 축방향 지반반력을 고려하기 위해 유한요소해석법을 도입하여 표 1에 나타난 바와 같이 길이 120m, 내경 1m, 두께 8mm인 강관을 모형화했다. 영구지반변형은 4.1절에서와 동일하게 최대 1m의 크기로 발생하며 Sine 함수의 형태로 모형화되었고 액상화지역의 폭은 관측된 최소폭(80m)보다 작은 중심부 40m( $l=20\text{m}$ )라고 가정하였다. 왜냐하면 그림 6에 나타난 바와같이 같은 액상화 정도에 대해서도 액상화 폭이 작을수록 보다 위험하게 작용할 수 있기 때문이다.

그림 7은 축방향 지반반력을 고려하지 않은 모형에 대한 해석결과를 도시한 것이다. 나타난 값들은 관의 상단부의 값이며 그림 7(a)에는 축방향 지반반력을 고려되지 않은 탄성지해보해석에 의한 결과가 점선으로 나타나 있고 유한요소해석결과와 비교되었다. 두가지 해석결과에서 오차 5% 이내로서 최대변위 및 변형형상이 매우 유사하게 나타났고 이를 통해 유한요소해석 모형의 타당성을 보일 수 있었다. 또한 액상화가 발생하는 지역에서의 횡방향 등가지반스프링상수  $K_1$  과 액상화가 발생하지 않는 지역에서의 횡방향 등가지반상수  $K_2$  와의 비율을  $10^{-1} \sim 10^3$  까지 변화시키면서 횡방향 변위를 고찰하였다. 그 결과 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 최대 횡방향 변위는  $K_1/K_2$  가 작아질수록 점차 작아지는 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 7(b)는 축방향 응력을 도시한 것으로 액상화 중심부에서  $K_1/K_2$  가 감소함에 따라 응력감소가 현저하게 나타남을 알 수 있다.

축방향 지반반력을 고려한 유한요소해석을 위해 축방향 등가지반스프링상수가 3.2절에 제시된 방법에 의해서 산정되었다. 일반적으로 액상화에 의해 축방향 지지력은 약 1/10로 감소하게 되므로<sup>[5]</sup> 산정된 값의 10%를 기준으로 축방향 지지력이 없을 때와 축방향 지지력을 상실하지 않았을 때를 구분하여 비교하였다. 그림 8은 횡방향 등가지반스프링상수비  $K_1/K_2$  가 0.001 일 때 축방향 지반반력을 고려한 유한요소해석결과이다. 그림 8(a)에서 수직변위는 축방향 지지력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며 그림 8(b)에 표현된 축방향 응력도 축방향 지지력의 증가에 따

라 감소하였다. 이는 지반의 지지력이 구조물에 구속효과로 작용한 결과로 판단된다. 따라서 축방향 지반반력을 무시할 경우 실제 거동과는 상당한 차이를 발생시키며 설계에 반영시 비경제적인 요인으로 작용할 수 있다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 지진에 의해 발생될 수 있는 영구지반변형이 라이프라인 구조물에 미치는 피해에 대한 사례조사를 통해 재해형태를 분석하였다. 또한 해석적 방법을 통해 탄성지지보의 형태로 영구지반변형이 라이프라인 구조물에 미칠 수 있는 거동을 예측할 수 있는 방법을 고찰하였다. 기존의 해석적 방법으로는 축방향 지반반력을 고려할 수 없으므로 유한요소해석을 통해 축방향 지반반력을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액상화로 인해 발생하는 영구지반변형에 대한 라이프라인 구조물의 반응식이 보(beam) 이론에 기초하여 제안되었다. 공식의 적용을 통해 횡방향 영구지반변형에 대한 구조물의 파괴확률은 좁은 폭을 갖는 액상화 지반영역의 경우 매우 높다는 사실을 알 수 있었다.
2. 영구지반변형의 크기와 액상화 정도 및 변형지반의 폭 사이의 관계는 영구지반변형을 받고 있는 관망의 파괴를 평가하는 데 있어 중요한 인자중의 하나임을 알 수 있었다.
3. 마찰에 의한 축방향 지반반력을 고려한 해석과 고려하지 않은 해석의 비교를 통해 축방향 지반반력은 거동을 지배하는 중요한 요소임을 알 수 있었다. 따라서 축방향 지반반력이 무시된 영구지반변형에 대한 해석보다 축방향 마찰을 고려한 해석이 실제 거동에 가까운 해석이라는 결론을 얻을 수 있었다.
4. 마찰에 의한 축방향 지반반력이 중요한 요소이므로 정확한 값을 산정하여 해석에 적용할 수 있도록 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술정책관리연구소(STEPI)의 지진재해 대응기술 개발사업 과제로 한국가스공사와 협조하에 수행된 내용의 일부이며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1. Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K., "Observation of Permanent Ground Displacements Induced by Soil Liquefaction, " *Proceedings of JSCE*, No.376, 1986, pp.211-220.
2. Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K., "Study on Liquefaction-Induced Permanent Ground Displacements and Earthquake Damage," *Proceedings of JSCE*, No.376, 1986, pp.221-229.
3. Kitaura, M. and Miyajima, M., "Study on Behavior of Buried Pipelines due to Lateral Spreading Induced by Soil Liquefaction," *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol. 33A, 1987, pp.679-686.
4. Elhmedi, K. and O'Rourke, M.J., "Seismic Wave Propagation Effects on Straight Jointed Buried Pipelines," *Technical Report NCEER-89-0022*, 1989.
5. Port and Harbour Research Institute, *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1997.

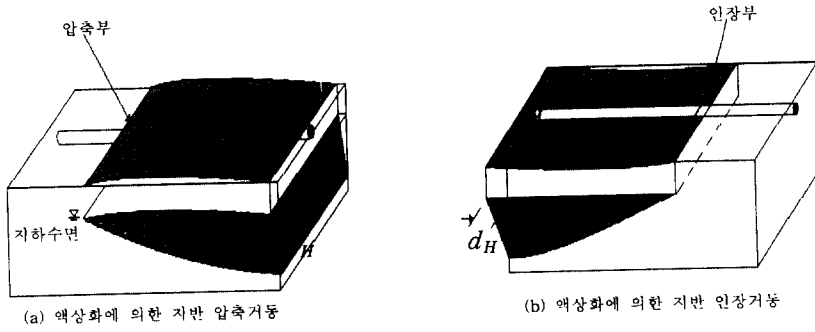


그림 1. 액상화 지반의 라이프라인 구조물의 종방향 거동양상

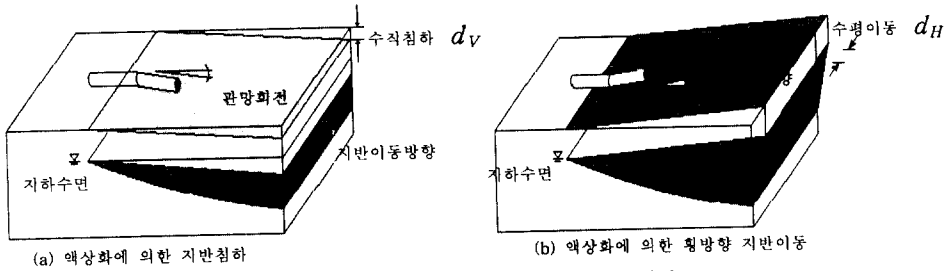


그림 2. 액상화 지반의 라이프라인 구조물의 횡방향 거동양상

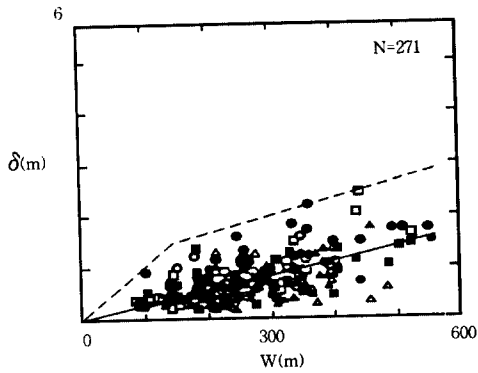


그림 3. 횡방향 영구지반변형과 길이의 상관관계

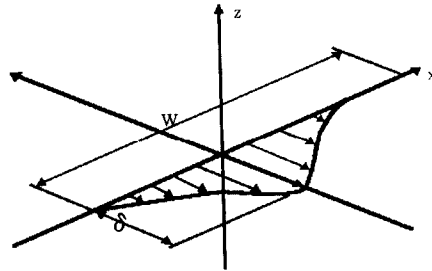


그림 4. 횡방향 영구지반변형의 기하형상

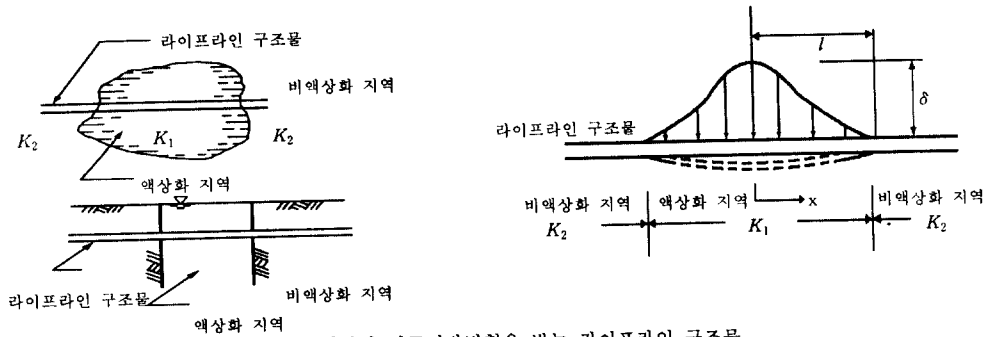


그림 5. 횡방향 영구지반변형을 받는 라이프라인 구조물

표 1. 강관의 물성 및 최대 영구지반변형

물성	기호	단위	물성치
외경	$d$	cm	100.00
두께	$t$	cm	0.80
Young 탄성계수	$E$	kgf/cm <sup>2</sup>	$2.10 \times 10^8$
관성 2차 모멘트	$I$	cm <sup>4</sup>	$3.14 \times 10^5$
허용휨응력	$\sigma_{allow}$	kgf/cm <sup>2</sup>	4200.00
최대 영구지반변형	$\delta$	cm	100.00

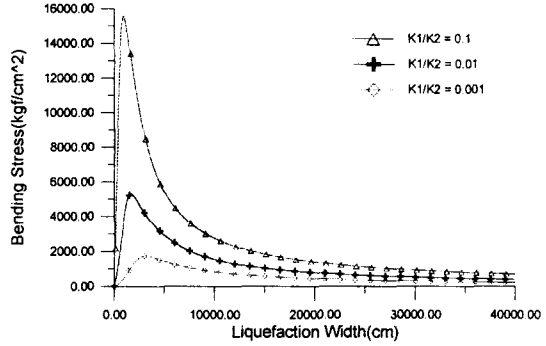
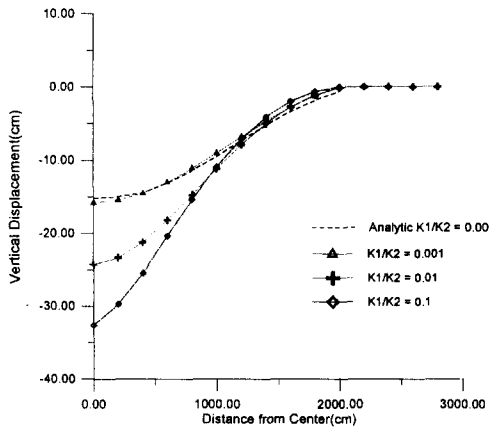
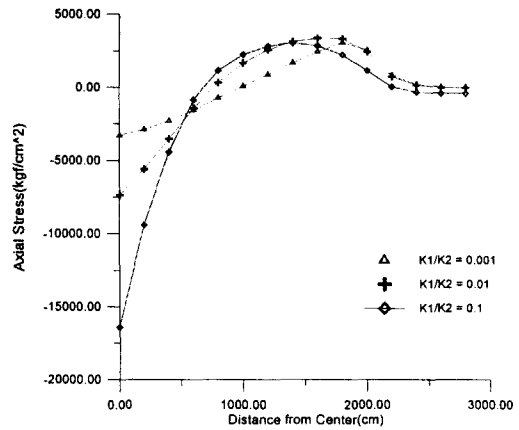


그림 6. 액상화 길이 L의 변화에 따른 휨응력변화

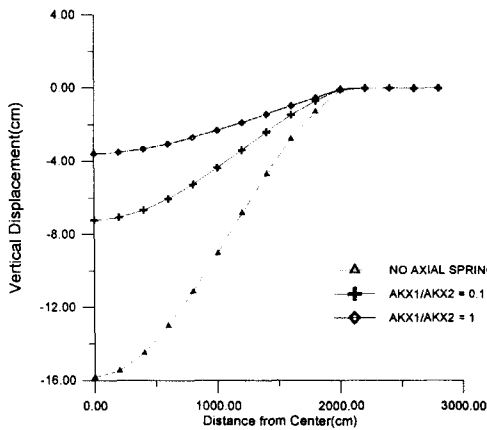


(a) 수직변위

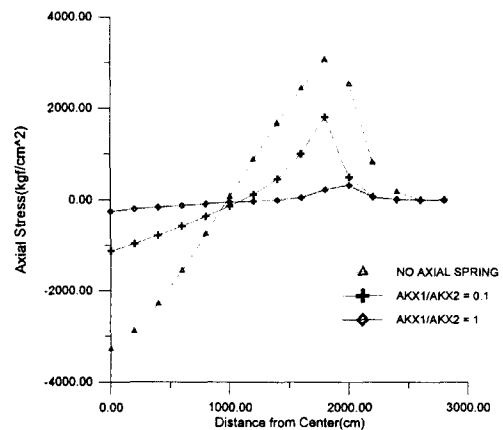


(b) 축방향 응력

그림 7. 축방향 지반반력을 고려하지 않은 유한요소해석



(a) 수직변위



(b) 축방향 응력

그림 8. 축방향 지반반력을 고려한 유한요소해석