

## 종방향 영구지반변형 발생시 관·지반 상호작용력의 산정에 관한 연구

### Study on The Estimation of Pipeline · Soil Interaction Force during Longitudinal Permanent Ground Deformation

김태욱\*                      임윤목\*\*                      김문겸\*\*\*  
Kim, Tae Wook              Lim, Yun Mook              Kim, Moon Kyum

---

#### ABSTRACT

The ASCE formula of lifeline · soil interaction force is the basis of semi-analytical relationship for buried pipelines subjected to longitudinal permanent ground deformation due to seismic induced liquefaction. However, since the ASCE formula has been developed based on the stiffness of non-liquefied region, it is needed to modify for the varied stiffness of liquefied region. With this object, the consideration of decreasing effect of soil stiffness in liquefied region is made: i.e. the spatial distributions of pipeline-soil interaction force in liquefied region. It means that the improved formula can reflect various patterns of permanent ground deformation more realistically. Through the comparative analyses using both the improved and ASCE formula, the applicability of the improved and the limitation of the ASCE formula and semi-analytical relationship are discussed. Also, relative influences of various parameters are evaluated for the clarification of behavior of pipeline subjected to longitudinal permanent ground deformation due to liquefaction.

---

#### 1. 서론

대표적 라이프라인 구조물인 지중 매설관로, 즉 파이프라인은 인간의 생활 및 사회의 원활한 기능 수행에 필수 불가결한 요소로서 작용하게 된다. 지중 매설관로의 구조적인 손상은 여러 가지 원인에 의해 야기될 수 있으나 일반적으로 매설지반의 운동과 밀접한 관련성을 갖게 되며 특히 지진 발생시 야기되는 영구지반변형은 지중 매설관로와 같이 비교적 얇은 깊이에 매설된 구조물에 심각한 손상을 발생시키게 된다. 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성을 해석하기 위해서는 무엇보다도 입력하중으로 작용하는 영구지반변형의 현상학적·물리학적 특성에 대한 상세한 이해와 이에 기초한 관·지반 상호작용력의 산정이 수행되어야 한다.

---

\* 한국철도기술연구원 궤도·노반연구팀 주임연구원, 회원

\*\* 연세대학교 토목공학과 부교수, 회원

\*\*\* 연세대학교 토목공학과 교수, 회원

그러나 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성 해석시 주로 사용되고 있는 기존의 해석적 관계식은 영구지반변형에 대한 기본적인 특성만을 내포하고 있고, 비액상 지반에서의 관·지반 상호작용력에 기초하고 있기에 적용적인 한계성을 다소 가지고 있는 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 중방향 영구지반변형을 받는 연속된 매설관로를 대상으로, 영구지반변형의 현상학적 특성, 기존에 사용되고 있는 ASCE 관·지반 상호작용력, 기존에 사용되고 있는 해석적 관계식 등에 대한 상세한 검토와 분석을 수행하고, 이를 토대로 영구지반변형의 물리적 특성 중의 하나인 액상지반에서의 지반강성 감소 현상을 반영할 수 있는 수정된 형태의 관·지반 상호작용력을 제안하고자 한다. 또한 제안된 상호작용력을 이용해서 매설관로의 거동특성을 해석하고 이를 기존의 연구결과와 비교함으로써 기존에 사용되고 있는 관·지반 상호작용력의 한계성을 규명한 후, 주요 인자에 대한 거동특성 분석을 통해 해석인자별 영향정도를 평가하고자 한다. 결과적으로, 본 연구를 통해서 지중 매설관로의 지진해석 및 내진설계에 적용될 수 있는 해석모형의 기초에 대한 확장적 보완이 이뤄질 것으로 사료된다.

## 2. 영구지반변형

### 2.1 영구지반변형에 따른 지중매설관로의 거동양상

영구지반변형은 지진에 의한 액상화, 단층운동, 산사태 등에 의해 발생하는 대규모의 지반변형으로서 특히 액상화에 의해 발생한 영구지반변형이 지중에 매설된 라이프라인 구조물에 심각한 구조적 손상을 입었다는 사실이 지진피해사태 검토결과 확인되었다<sup>[1]</sup>. 특히 매설관로와 같이 비교적 얇은 깊이에 매설되는 라이프라인 구조물은 매설관로의 주축에 대한 지반변형의 방향에 따라 상이한 파괴형태를 나타내게 되는 특징을 가지고 있다. 그림 1(a)는 라이프라인 구조물의 주축과 지반변형이 직각으로 교차하게 되는 경우로서 이때의 지반변형을 횡방향 영구지반변형으로 정의하며 라이프라인 구조물은 주로 힘을 받게 된다. 반면 라이프라인 구조물의 주축이 지반변형 방향과 평행하게 되는 중방향 영구지반변형을 받는 그림 1(b)의 경우 라이프라인 구조물은 인장, 압축 또는 국부좌굴에 의한 파괴를 보이게 된다. 라이프라인 구조물의 주축과 지반변형이 임의의 각을 가지고 교차하게 되는 일반적인 경우에 비해, 중방향 및 횡방향 지반변형의 경우, 지반의 변형에너지가 상대적으로 집중됨에 따라 라이프라인과 지반 경계면에서의 상호작용력이 극한적인 상황으로 나타나게 된다는 사실을 쉽게 유추할 수 있다.

### 2.2 영구지반변형의 현상학적 특성 : 크기, 길이, 형상

액상화-영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성 해석에 있어서 고려되어야 할 주요 해석요소로서는 발생가능한 영구지반변형의 크기, 길이 및 형상 등을 언급할 수 있다. 먼저 영구지반변형의 크기를 산정하는 작업은 상당한 정도의 불확실성을 수반함에도 불구하고, 일반적으로 영구지반변형의 크기 자체가 지중 매설관로의 거동특성을 분석하는 데 있어서 결정적인 인자로서 작용하기에 영구지반변형의 크기를 예측하는 실험적, 해석적, 경험적인 방법들이 다양한 형태로 제시된 바 있다<sup>[2]</sup>. 실험적인 연구로서는 Ishihara, Yasuda, Yoshida, Dobry, Towhata 등을 들 수 있으며, 해석적인 연구로서는 Byrne, Towhata, Hamada, Yashima 등을, 경험적인 연구로서는 Youd & Perkins, Hamada, Bartlet & Youd, Rauch 등을 들 수 있다. 영구지반변형 현상 자체의 복잡성으로 인해 이론적인 정립이 아직까지는 이뤄지지 못하고 있으나 일반적으로 지진의 강도가 크고 진원과의 거리가 가까울수록 영구지반변형의 크기가 증가한다는 사실을 결론으로 내고 있다. 지반변형이 영향을 미치는 범위를 나타내는 영구지반변형의 길이에 대해서는 Suzuki & Matsuda의 연구결

과, 영구지반변형 발생지역의 길이가 증가함에 따라 지반변형의 크기가 증가한다는 결론이 도출되었으며, 지반변형 크기의 공간적 불균일성으로 인해 나타나는 영구지반변형의 형상에 관해서는 Hamada 등에 의한 종방향 지반변형의 이상화와 T.D.O'Rourke에 의한 수정베타분포 및 Suzuki등에 의한 사인-코사인 분포를 예로 들 수 있다. 본 연구에서는 Hamada 등에 의해 수행된 Nihonkai-Chub지진 관측결과 및 피해분석사례에 기초하여 그림 2에 표시된 것과 같이 관측결과와 20% 이상을 차지하는 Block 형태의 종방향 영구지반변형을 연구 대상으로 설정하였으며 지반변형의 크기와 길이는 해석상의 변수로서 고려하였다.

### 3. 지반강성의 감소를 고려한 관·지반 상호작용력의 수정

#### 3.1 해석적 관계식과 ASCE 관·지반 상호작용력

M.J.O'Rourke와 Nordberg는 Hamada등에 의해 수행된 지진피해사례 분석결과에 기초하여 종방향 영구지반변형에 대한 연속관의 거동특성을 해석할 수 있는 해석적 관계식을 제안한 바 있다<sup>[3]</sup>. 관의 재료적 특성은 탄성으로, 관과 지반의 경계면에서의 거동은 탄·소성으로 가정하였으며 해석적 관계식은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\alpha L}{2L_{em}}, & L < 4L_{em} \\ \frac{\alpha L}{\sqrt{LL_{em}}}, & L > 4L_{em} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$  는 지반변형의 형상을 좌우하는 계수로서 Block 형상의 지반변형을 가정할 경우 1.0의 고정된 상수값을 가지게 되며,  $L$  은 영구지반변형이 발생한 지역의 길이, 즉 영구지반변형의 폭을 의미한다.  $L_{em}$  은 그림 3에 표시된 바와 같이 지반변형과 동일한 관의 변형이 나타나는, 관과 지반의 경계면에서의 상호작용력  $t_u$  가 일정하게 작용하는 구간으로서 다음 식에 의해 결정된다.

$$L_{em} = \frac{\alpha EA}{t_u} \quad (2)$$

기존의 해석적 관계식을 검토하면 관의 변형률이 결국 관과 지반의 경계면 상호작용력  $t_u$  에 의해 결정된다는 것을 확인할 수 있다. 여기서  $t_u$  는 ASCE Guideline에서 일련의 실험을 통해 제시된 비액상지반에서의 상호작용력으로서 그림 4(a)와 같이 축방향 운동에 대해서 탄·소성 관계식을 가지게 되며 사질토 지반의 경우 식 (3)과 같은 형태로 표현된다<sup>[4]</sup>.

$$t_u = \mu \cdot (\gamma H) \cdot \frac{(1 + K_0)}{2} \cdot (\pi D) \quad (3)$$

$$x_u = (0.2 \sim 0.4) \text{in} = 0.00508 \sim 0.01016 \text{m} \quad (4)$$

여기서,  $x_u$  는 관의 최대상대변위를 의미하며,  $\mu = k \cdot \tan \phi_s$  는 관과 지반의 경계면에서의 마찰계수로서

0.55의 고정된 상수값을,  $\gamma$  는 지반의 단위중량,  $H$  는 매설심도,  $K_0$  는 횡토압계수,  $D$  는 관의 직경을 각각 의미한다. 식 (3)을 상세하게 고찰하면 경계면에서 작용하는 관·지반 상호작용력은 그림 4(b)에 나타낸 바와 같이 관이 위치한 매설심도를 기준으로 관의 단면부에 가해지는 수직 및 수평토압의 평균을 나타내고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 상호작용력은 비액상지반에서의 상호작용 효과만을 나타내고 있으므로 본 연구에서는 영구지반변형이 발생하는 액상지반에서의 강성감소 효과와 이로 인한 상호작용력의 공간적인 분포 즉, 지반변형의 실제적인 형상을 고려함으로써 상호작용력의 수정된 형태를 다음과 같이 제안하였다.

### 3.2 지반강성의 감소를 고려한 관·지반 상호작용력의 수정

Takada, Yoshida, Uematsu, Matsumoto, Yasuda, Tanabe 등의 연구결과 지반변형이 가장 심하게 발생하는 중앙부의 경우, 비액상지반의 지반강성에 비해 액상지반의 지반강성이 약 1/1000~1/3000정도로 감소된다는 결론이 도출된 바 있다. 이는 결국 지반강성으로 표현되는 지반의 구속효과가 액상지반의 중심부에서 최대 1/3000정도로 감소된다는 것을 의미하게 된다. 또한 그들은 지반변형이 발생하지 않는 양 단부에서의 지반강성은 지반변형으로 인한 구속력의 증대 및 중앙부에서의 강성감소로 인해 원 지반강성에 비해 약 두 배 정도 증가된 의사적인 강성을 가지게 된다고 주장한 바 있다<sup>[2][4]</sup>. 특히 Miyajima & Kitaura 등은 모형실험을 통해 액상지반에서의 지반강성의 변화가 유효응력과 직접적으로 연관되며 과잉간극수압에 대해 반비례하는 함수라는 것을 규명하였다. 지반의 액상화와 영구지반변형 자체가 과잉간극수압과 직접적으로 연결되며 과잉간극수압의 발생에 따라 지반강성의 감소가 야기되므로, 본 연구에서는 이러한 지반강성의 감소를 관과 지반의 경계면에서의 상호작용력의 공간적인 분포, 즉 지반변형의 실질적인 형상으로 변환시켜 줌으로써 기존에 사용되고 있는 상호작용력을 영구지반변형이 발생하는 액상지반에 적용될 수 있도록 수정된 형태로 도출하였다.

먼저 기존의 상호작용력 대 액상지반에서의 상호작용력의 변화를 그림 5와 같은 Sine곡선의 형상으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 비액상지반의 상호작용력에 대한 상대적인 비율로서 액상지반의 상호작용력을 표현하였으며 액상지반의 중심부에서는 1/3000로, 양 단부에서는 중심부에서 감소된 상호작용력의 집중으로 인해 2배 가까이 상호작용력의 값이 증가하는 것으로 가정하였다. 종방향 영구지반변형의 경우 양 단부에서의 인장 및 압축파괴가 발생된다는 점을 고려할 때 그림 5에서와 같은 상호작용력의 분포는 합리적인 것으로 사료된다. 비액상지반 및 액상지반에서의 상호작용력을 각각  $t_u$ 와  $t_{u-liquefied}$ 로 정의한다면 액상지반에서의 상호작용력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t_{u-liquefied} = 2t_u \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} + \frac{2}{3000\pi}\right) \quad (5)$$

또한 지반의 강성분포와 상호작용력의 공간적인 변화분포가 실제적인 지반의 변형 형상과 유사하다는 점을 고려한다면 보다 실제적인 지반변형의 형상을 반영하기 위해 그림 5에서 보는 바와 같이 다양한 상호작용력의 공간적인 변화분포 즉 지반변형의 다양한 형상을 가정할 수 있으므로 삼각형 형상에 대해서는 식 (6)을, 유연한 사다리꼴 형상에 대해서는 식 (7)을 적용할 수 있다.

$$t_{u-liquefied} = \frac{t_u}{2} \cdot \left(2 + \frac{1}{3000}\right) \quad (6)$$

$$t_{u-liquefied} = 2t_u - \frac{1}{2} \cdot \left(2 - \frac{1}{3000}\right)(1+p) \cdot t_u \approx (1-p) \cdot t_u \quad (7)$$

#### 4. 종방향 지반변형에 대한 매설관로 거동특성 해석

##### 4.1 기존 및 수정된 상호작용력을 이용한 해석결과 비교

먼저 상호작용력의 공간적인 분포형상 즉 다양한 지반변형의 형상이 반영된, 수정된 형태의 관·지반 상호작용력을 이용한 해석을 수행함으로써 기존 해석식의 기초를 구성하고 있는 ASCE 관·지반 상호작용력의 적용적 한계성을 검토하였다. 해석대상으로는 국내에서 사용되고 있는 0.30m 직경의 일반적인 강관을 설정하였으며, 0.1~1.0m의 크기와 400~600m의 폭을 갖는 다양한 형상의 종방향 영구지반변형이 발생하는 것으로 가정하였다. 상세한 해석조건은 표 1과 같다.

그림 6을 살펴보면 상호작용력의 공간적인 분포, 즉 지반변형의 형상이 다양하게 변화하게 됨에 따라 변형률의 차이가 다양하게 나타나고 있는데 먼저 삼각형 형상과 ASCE 관·지반 상호작용력의 결과가 동일하다는 것을 확인할 수 있으며, 유연 사다리꼴의 경우 직선부분을 나타내는 형상계수 P가 증가함에 따라 변형률의 크기가 감소한다는 것과 P=0.27인 유연 사다리꼴이 Sine 형상과 동일한 효과를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 특히 비액상지반을 기준으로 산정된 ASCE 관·지반 상호작용력은 종방향 영구지반변형을 받는 매설관로 변형률의 상한선을 나타내고 있기에 안전측을 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되는 반면, Sine 형상을 기본으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 보이고 있다. 또한 상호작용력을 산정하는 데 있어서 관·지반 경계면에서의 마찰효과를 대표하는 지반의 전단저항각을 변화시켜가면서 해석을 수행한 그림 7을 살펴보면, 지반의 전단저항각이 변화함에 따라 상당한 변형률의 차이가 나타나게 된다는 사실을 확인할 수 있다. 지반의 액상화가 발생할 수 있는 느슨한 지반의 경우 Peck의 연구결과<sup>[2]</sup>에서 볼 수 있듯이 전단저항각 자체가 28도 이하의 낮은 값을 보이게 되므로 마찰계수  $\mu = k \cdot \tan \phi_s$ 를 0.55라는 단일한 상수값으로 고정한 기존의 해석적 관계식은 액상지반에 적용할 경우 세심한 주의를 요구하게 된다.

##### 4.2 영향인자별 거동특성 분석

P=0.15를 갖는 유연한 사다리꼴의 지반변형 형상에 대해서 산정된 상호작용력을 이용하고 관의 두께와 매설심도를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 관의 두께를 6.5, 13.5, 19.5mm로 변화시켜 가면서 해석을 수행한 결과 그림 8 및 그림 9에서 볼 수 있듯이 관의 두께가 증가함에 따라 변형률의 감소가 나타난다는 것을 확인할 수 있으며 이는 관의 두께 증가가 관 강성의 증가와 직결되기 때문인 것으로 판단된다. 반면 관의 매설심도를 1, 1.5, 2m로 변화시켜 가면서 해석을 수행한 결과, 그림 10과 그림 11에서 볼 수 있듯이 매설심도의 증가에 따른 변형률의 증가현상을 확인할 수 있는데 이는 매설심도의 증가에 따른 상호작용력의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

그림 8~그림 11을 통해서 지반변형의 폭이 증가함에 따라 매설관로에 발생하는 변형률이 일정해지는, 즉 매설관로와 지반의 경계면에서의 미끄러짐을 유발시키는 한계지반변형의 크기가 증가한다는 것을 볼 수 있는데, 이를 지반변형 폭의 증가에 따라 분석한 그림 12와 그림 13을 통해 살펴보면 다음과 같은 결론을 얻

을 수 있다. 매설심도가 증가할수록 변형률 및 한계지반변형이 증가하게 되는 반면, 일정한 길이 이하의 지반변형에 대해서는 관의 두께와는 무관하게 한계지반변형이 동일하게 나타나므로, 동일한 관경을 갖는 매설관로에 대해 항복변형률 이하의 변형률에서 경계면 미끄러짐을 유도하기 위해서는 매설심도는 알게 하되, 관의 두께에 대해서는 변형률 뿐만 아니라 한계지반변형에 대한 검토가 동시에 이뤄져야 한다고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구를 통해 종방향의 영구지반변형이 발생하는 액상화 지반에서 적용될 수 있는 관·지반 상호작용력의 수직식이 정형화된 형태로 도출하였으며, 제안된 식을 이용한 매설관로 거동특성 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

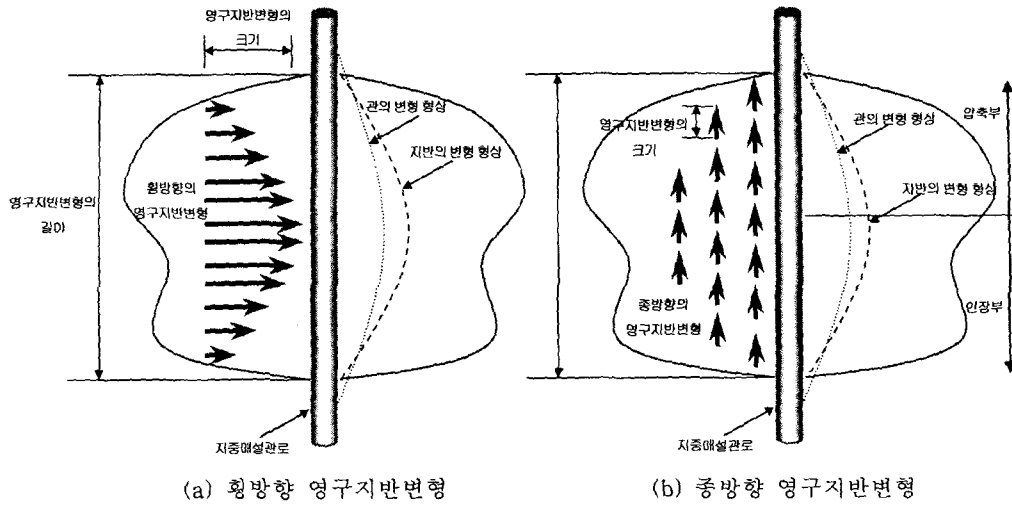
- (1) 비액상지반을 기준으로 산정된 ASCE 관·지반 상호작용력은 종방향 영구지반변형을 받는 매설관로 변형률의 상한선을 나타내고 있기에 안전축출 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되는 반면, Sine 형상을 기본으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 보이고 있다.
- (2) 지반의 액상화가 발생할 수 있는 느슨한 지반의 경우 전단저항각 자체가 28도 이하의 낮은 값을 보이게 되므로 마찰계수  $\mu = k \cdot \tan \phi_s$ 를 0.55라는 단일한 상수값으로 고정된 기존의 해석적 관계식은 액상지반에 적용할 경우 세심한 주의를 요구하게 된다.
- (3) 일정한 길이 이하의 지반변형에 대해서는 관의 두께와는 무관하게 한계지반변형이 동일하게 나타나므로, 동일한 관경을 갖는 매설관로에 대해 항복변형률 이하의 변형률에서 경계면 미끄러짐을 유도하기 위해서는 매설심도는 가능한 알게 하되, 관의 두께에 대해서는 변형률 뿐만 아니라 한계지반변형에 대한 검토가 동시에 이뤄져야 한다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(Korea Earthquake Engineering Research Center) 2단계 사업의 일환인 4-4 과제 「지반변형 발생시 지반-라이프라인 상호작용력 산정」의 일부로서 본 연구를 가능하게 한 지진공학연구센터의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Hamada, M. and O'Rourke, T.D., Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes, *Technical Report, NCEER-92-0011*, Vol.1, 1992.
2. Bardet, J.P., Mace, N. and Tobit, T., Liquefaction-induced Ground Deformation and Failure, *Technical Report to PEER/PG&E*, University of Southern, 1999.
3. O'Rourke, M. and Nordberg, G., Behavior of buried pipelines subject to permanent ground deformation, *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, July 19-24, Vol.9, 1988, pp.5411-5416.
4. O'Rourke, M.J. and Liu, X., Response of buried pipelines subject to earthquake engineering, *MCEER Monograph No.3*, 1999.



(a) 횡방향 영구지반변형 (b) 종방향 영구지반변형  
 그림 1. 영구지반변형의 방향에 따른 매설관로 거동특성

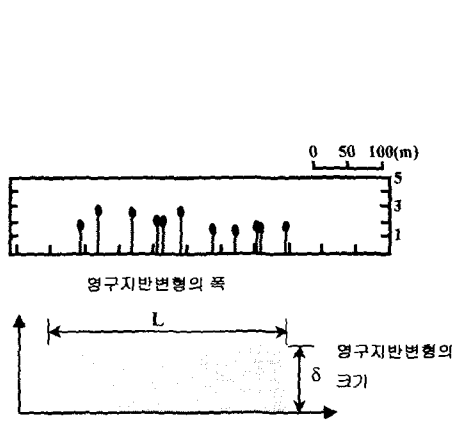


그림 2. Block 형상의 종방향 영구지반변형

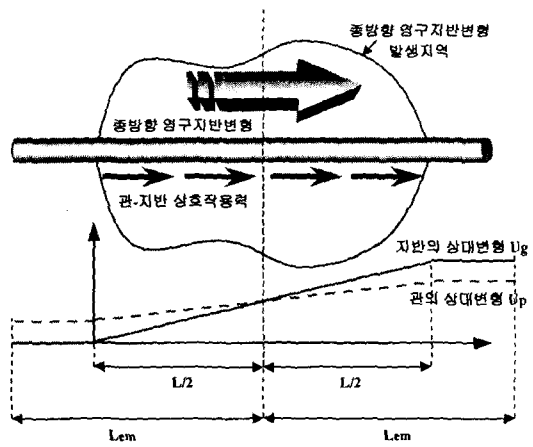
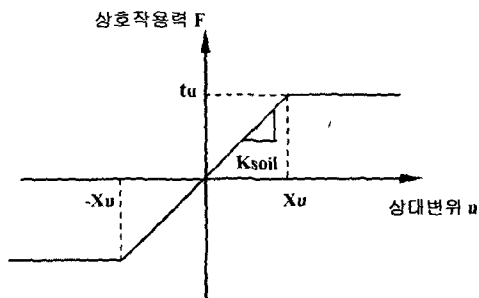
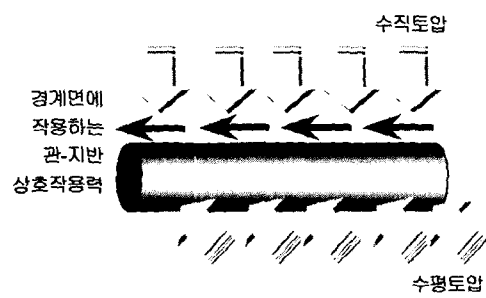


그림 3. O'Rourke 해석식의 개념도



(a) 등가지반강성으로 표현된 상호작용력



(b) ASCE 관·지반 상호작용력의 개념도

그림 4. 관·지반 상호작용력

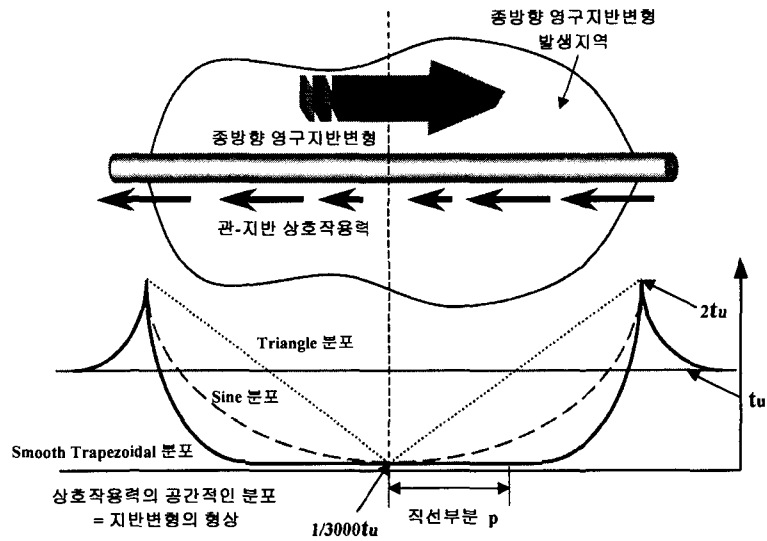


그림 5. 지반강성 감소를 반영한 관·지반 상호작용력의 산정

표 1. 해석대상 관의 제원 및 지반 물성

내 용		입 력 치
관 제 원	탄성계수 ( $E$ )	100 GPa
	항복응력 ( $\sigma_y$ )	300 MPa
	외경 ( $D$ )	0.30 m
	두께 ( $t$ )	6.5 mm, (13.5 mm, 19.5 mm)
	요소길이 ( $L$ )	0.50 m
지 반 물 성	단위중량 ( $\gamma$ )	16.10 kN/m <sup>3</sup>
	매설심도 ( $H$ )	1.0 m, (1.5m, 2.0m)
	축방향강성 ( $K_A$ )	7.25 MPa
	축방향저항력 ( $f'_x$ )	7.40 kN/m

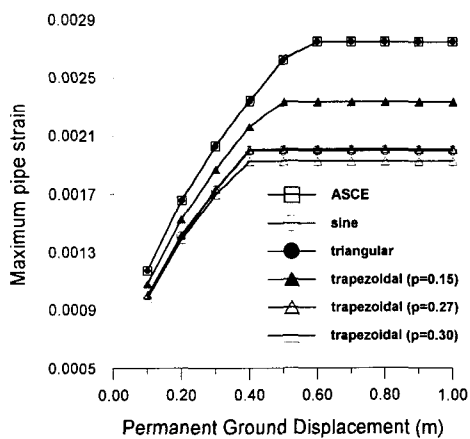


그림 6. 수정된 상호작용력을 이용한 비교해석

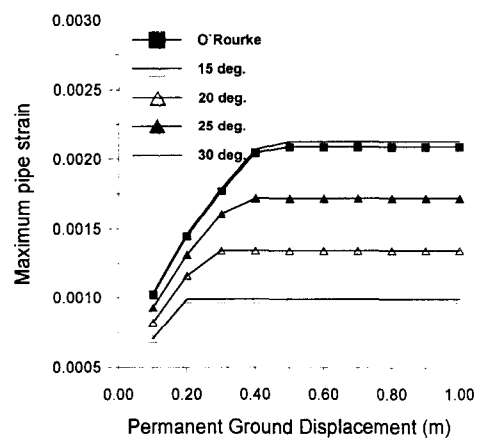


그림 7. 전단저항각 변화에 따른 해석



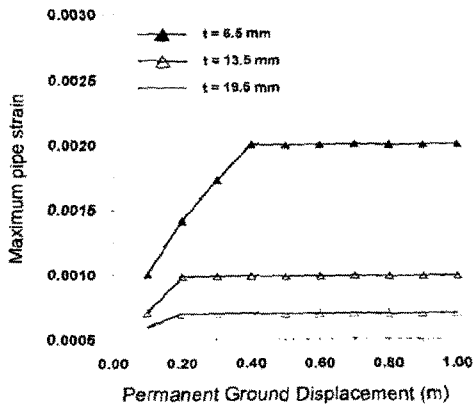


그림 8. 두께변화에 따른 해석(L=400m)

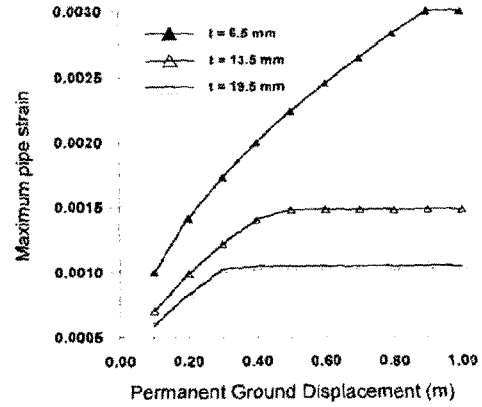


그림 9. 두께변화에 따른 해석(L=600m)

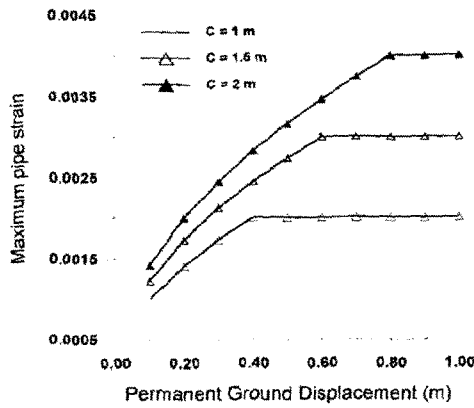


그림 10. 매설심도에 따른 해석(L=400m)

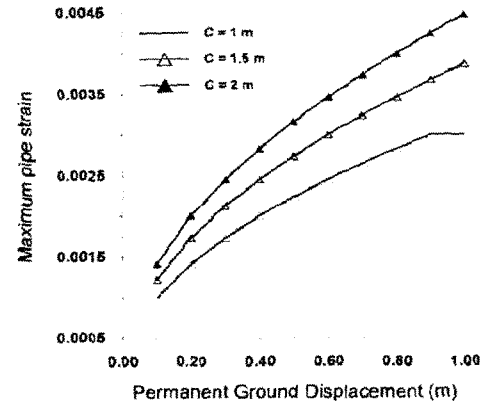


그림 11. 매설심도에 따른 해석(L=600m)

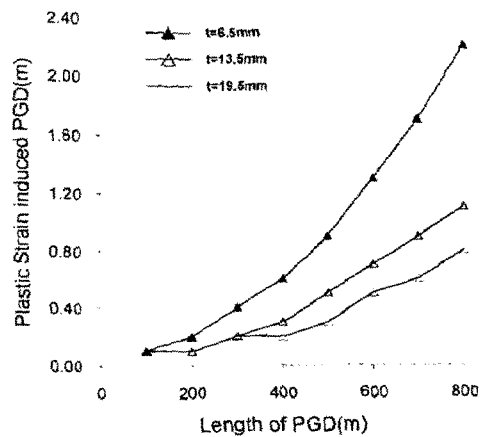


그림 12. 두께에 따른 한계지반변형의 변화

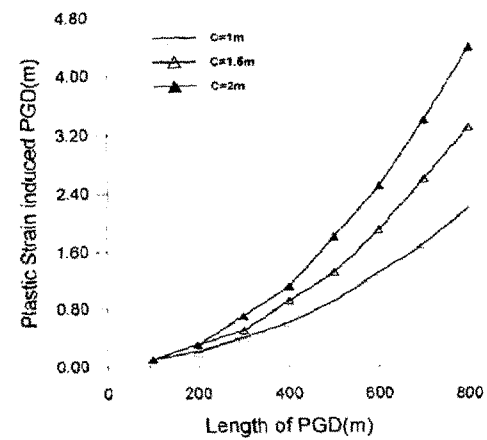


그림 13. 매설심도에 따른 한계지반변형의 변화