

횡방향 영구지반변형 발생시 관·지반 상호작용력의 산정에 관한 연구

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

김태욱* 임윤목** 김문겸*** 장성희****
Kim, Tae Wook Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum Chang, Sung Hee

ABSTRACT

In this study, the applicability of currently used pipeline · soil interaction force and previously proposed analytical relationship for the response analysis of buried pipeline subjected to transverse permanent ground deformation (PGD) due to liquefaction is evaluated. Based on meaningful contemplation, the improvement of interaction force and proposition of analytical relationship is made. Improved interaction force includes various patterns of PGD or spatial distributions of interaction force caused by the decrease of soil stiffness, and proposed relationship based on improved formula is applicable without regard to the width of PGD. Through the comparison of numerical results by use of commercial FEM program, the rational applicability of proposed relationship is objectively confirmed.

1. 서론

송수, 송전, 송유, 통신 시설은 대부분의 경우 지중매설관로의 형태로 존재하게 되며 인구의 증가 및 생활수준의 향상으로 인하여 그 건설수요가 증가하고 있는 실정이다. 이러한 지중매설관로는 사회 전체 체계의 기본을 구성한다는 측면에서 라이프라인이라는 용어로서 정의되며 지진과 같은 대규모의 자연재해 발생시 국부적인 구성요소의 파괴가 2차적인 경제·사회적 손실을 발생시키는 특성을 갖고 있다. 지중매설관로의 지진 피해 원인을 살펴보면 크게 지진파 전파에 의한 피해와 영구지반변형에 의한 피해로 구분되는데, 광범위한 지역에 걸쳐 발생하는 지진파 전파에 의한 지중매설관로의 피해는 비교적 경미한 데 비해, 국부적인 지역에서 발생하는 영구지반변형의 경우 지중매설관로에 가해지는 구조적인 손상은 매우 심각한 특징을 가지고 있다. 따라서 최근 지진 발생시 주요 시설물에 대한 구조 안정성의 확보 문제가 사회적인 관심사로 대두되면서 미국 및 일본을 중심으로, 특히 액상화-영구지반변형에 대한 지중매설관로의 거동특성 해석과 관련된 다양한 연구가 진행되기 시작했다. 현재까지의 연구를 살펴보면 주로 기초적인 특성에 대한 규명을 중심으로 진행되어 왔다고 이야기할 수 있는데 특히 액상화-영구지반변형 현상 자체의 복잡성과 관·지반 상호작용 특성에 대한 고려의 미비로 인해 지중매설관로의 적절한 해석 모형이 아직 확립되지 못하고 있다.

* 한국철도기술연구원 궤도·노반연구팀 주임연구원, 회원
** 연세대학교 토목공학과 부교수, 회원
*** 연세대학교 토목공학과 교수, 회원
**** 삼보기술단 구조부, 회원

그러므로 본 연구에서는 액상화-횡방향 영구지반변형을 받는 지중매설관로를 대상으로 기존에 사용되고 있는 관·지반 상호작용력 및 해석적 관계식에 대한 상세한 검토를 수행한 후, 액상지반에서의 지반강성 감소효과와 상호작용력의 분포형상과의 연관성을 적극적으로 고려함으로써 다양한 지반변형의 형상 및 그 효과를 반영할 수 있는 수정된 형태의 관·지반 상호작용력을 제안하였으며, 지반변형의 폭에 따라 상이하게 변화하는 매설관로의 거동을 보와 케이블의 복합적인 거동으로 모형화함으로써 지반변형의 폭에 관계없이 적용할 수 있는 일괄된 형태의 해석적 관계식을 제안하였다.

2. 영구지반변형

2.1 영구지반변형의 특성 및 주요 해석요소

영구지반변형은 지진에 의한 액상화, 단층운동, 산사태 등에 의해 발생하는 대규모의 지반변형으로서, 특히 액상화에 의해 발생된 영구지반변형이 지중에 매설된 라이프라인 구조물에 심각한 구조적 손상을 입혔다는 사실이 지진피해사례 검토결과 확인되었다^[1]. 매설관로의 주축에 대한 영구지반변형의 상대적인 방향성에 따른 매설관로의 파괴양상을 그림 1과 같이 정리할 수 있는데 먼저, 그림 1(a)는 매설관로의 주축과 지반변형이 직각으로 교차하게 되는 경우로서 이때의 지반변형을 횡방향 영구지반변형으로 정의하며 매설관로는 주로 휨을 받게 된다. 반면 매설관로의 주축이 지반변형 방향과 평행하게 되는 종방향 영구지반변형을 받는 그림 1(b)의 경우 매설관로는 인장, 압축 또는 국부좌굴에 의한 파괴를 보이게 된다. 매설관로의 주축과 지반변형이 임의의 각을 가지고 교차하게 되는 일반적인 경우에 비해 횡방향 및 종방향 지반변형의 경우, 지반의 변형에너지가 상대적으로 집중됨에 따라 매설관로와 지반 경계면에서의 상호작용력이 극한적인 상황으로 나타나게 된다는 사실을 쉽게 유추할 수 있다.

영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성 해석시 실질적으로 지반변형의 형상, 크기, 폭 등이 주요한 해석요소로서 고려되어야 하는데, 많은 학자들에 의해 실험적·수치해석적·경험적인 측면에서 다양한 연구가 진행되고 있음에도 불구하고 영구지반변형 자체의 현상학적 복잡성으로 인해 해석 및 설계에 적용될 수 있는 실제적인 기준이 아직 확립되지 못하고 있다. 특히 국내의 경우 계기지진피해사례의 절대적인 부족으로 인해 현재로서는 영구지반변형의 공학적인 추정이 거의 불가능하므로, 본 연구에서는 미국 및 일본의 지진피해사례 분석결과에 기초하여 그림 2와 같은 다양한 지반변형의 형상이 발생하는 것으로 가정하였으며, 지반변형의 크기와 폭은 해석상의 변수로서 고려하였다.

2.2 액상화-영구지반변형 발생시 지반강성의 감소현상

지반진동으로 인한 과잉간극수압의 증가와 액상화 현상의 발생에 따라 지반진동이 종결된 시점을 기준으로 지반의 강성은 원래의 지반강성에 비해 현저하게 감소하게 된다. 이러한 현상을 좀 더 명확하게 살펴보기 위해 Ishihara는 진동대 실험의 수행^[2]을 통해, 그림 3에서 보는 바와 같이 과잉간극수압비의 증가에 따라서 지반의 강성이 감소되는 현상을 규명한 바 있다. 또한 Takada, Yoshida, Uematsu, Matsumoto, Yasuda, Tanabe 등의 많은 학자들은 원지반강성에 대한 상대적인 비로서 액상지반에서의 지반강성값을 도출하기 위해 많은 연구를 수행하였는데, 액상지반의 지반강성이 원지반강성에 비해 1/100에서 최대 1/3000 정도로 감소한다^[3]는 결론을 도출한 바 있다. 이러한 지반강성의 감소는 영구지반변형 발생시 영구지반변형의 형상 및 매설관로에 작용하는 상호작용력의 공간적인 분포형상으로서 나타난다고 이야기할 수 있는 바, 본 연구에서는 각각의 연관성을 공학적으로 반영하고자 노력하였다.

3. 관·지반 상호작용력의 수정 및 해석적 관계식의 제안

3.1 관·지반 상호작용력

지중 매설관로는 영구지반변형 발생시 지반과 매설관로의 경계면에서의 상호작용에 의해 발생하는 상대적인 변위에 의해 구조적인 손상을 입는다. 즉, 영구지반변형시 발생하는 지반의 변형과 관의 변형 사이의 상대적인 차이가 매설관로의 파괴를 유발시킨다는 것이다. 해석상의 편의를 위해서 영구지반변형 발생시 지반과 매설관로의 경계면에서 발생하는 관·지반 상호작용력은 액상화-영구지반변형을 기준으로 액상화가 발생되지 않는 지반의 경우와 액상화가 발생하는 지반의 경우로 크게 구분할 수 있는데, ASCE에서 액상화가 발생하지 않는 사질토지반에 위치한 매설관로를 대상으로 지반운동의 상대적인 방향성, 즉 종방향과 횡방향에 따라서 제안한 상호작용력은 각각 다음과 같다^[4].

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

$$\text{Transverse} \quad p_u = (\gamma \cdot H) \cdot N_{qh} \cdot (D) \quad (2)$$

여기서, $\mu = k \cdot \tan \phi_s$ 는 경계면 마찰계수, γ 는 지반의 단위중량, H 는 매설심도, K_0 는 횡토압계수, D 는 관의 직경, N_{qh} 는 수평지지력계수를 각각 의미한다. 식 (1)과 (2)를 상세하게 고찰하면 경계면에서 작용하는 관·지반 상호작용력은 그림 4에 나타낸 바와 같이 관이 위치한 매설심도를 기준으로 관의 단면부에 가해지는 수직 및 수평토압의 평균을 나타내고 있다는 사실을 확인할 수 있는 바, 현재 사용되고 있는 상호작용력은 비액상지반에서의 상호작용 효과만을 나타내고 있다고 이야기할 수 있다.

3.2 관·지반 상호작용력의 수정

전술한 바와 같이 Ishihara, Takada, Yoshida, Uematsu, Matsumoto, Yasuda, Tanabe 등의 연구결과 지반변형이 가장 심하게 발생하는 중앙부의 경우, 지반강성으로 표현되는 지반의 구속효과가 액상지반의 중심부에서 최대 1/3000정도로 감소된다는 결론이 도출된 바 있다. 또한 그들은 지반변형이 발생하지 않는 양 단부에서의 지반강성은 지반변형으로 인한 구속력의 증대 및 중앙부에서의 강성감쇠로 인해 원 지반강성에 비해 약 두 배 정도 증가된 의사적인 강성을 가지게 된다고 주장한 바 있다^[3]. 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. 비액상지반 및 액상지반에서의 상호작용력을 각각 IF 와 $IF_{liquefied}$ 로 정의한다면 액상지반에서의 상호작용력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$IF_{liquefied} = 2 \cdot IF \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} + \frac{2}{3000\pi}\right) \quad (3)$$

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 (4)를, 유연한 사다리꼴 형상에 대해서는 식 (5)를 적용할 수 있다.

$$IF_{liquefied} = \frac{IF}{2} \cdot \left(2 + \frac{1}{3000}\right) \quad (4)$$

$$IF_{liquefied} = 2IF - \frac{1}{2} \cdot \left(2 - \frac{1}{3000}\right)(1+p) \cdot IF \approx (1-p) \cdot IF \quad (5)$$

3.3 해석적 관계식의 제안

M.O'Rourke는 몇 가지 현상학적인 가정을 토대로 지반변형의 폭이 넓은 경우와 좁은 경우에 대해서 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같이 매설관로의 거동특성을 해석할 수 있는 간단한 형태의 해석적 관계식을 제안한 바 있다^[3].

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_a = \pm \frac{\pi^2 \delta D}{W^2} + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{\delta}{W}\right)^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \pm \frac{p_u W}{3\pi E t D^2} \quad (7)$$

그는 그림 6과 같이 지반변형의 폭이 넓은 경우 관의 거동을 상대적으로 유연한 거동으로, 관의 변위를 지반의 변위와 거의 동일한 것으로 고려한 반면, 지반변형의 폭이 좁은 경우에 대해서는 관의 거동을 강성거동으로, 관의 변위는 지반의 변위에 비해 상대적으로 작은 것으로 고려하였다. 그러나 위 식들은 각 식의 적용범위를 결정하는 한계지반변형의 폭을 적절하게 제시하지 못했으며 지반강성의 감소에 따라서 발생하는 다양한 지반변형의 형상을 합리적으로 반영하지 못한다는 점에서 제한적인 적용성을 가지고 있다고 이야기할 수 있다. 이러한 특성을 보다 명확하게 살펴보기 위해서 그림 2에서 표현된 다양한 지반변형의 형상을 대상으로 유한요소해석을 수행하였으며 이를 식 (6)에 의한 해석결과와 비교하였다. 지반변형의 크기는 1.0m로 지반변형의 폭은 200~600m로 변화하는 것으로 고려하였으며 해석대상의 제원 및 물성치는 표 1과 같다. 해석결과인 그림 7을 살펴보면 지반변형의 형상에 따라서 다양한 응답특성의 차이가 나타난다는 점을 확인할 수 있는데, 특히 기존 해석식의 해석결과와 $a=0.15L$ 인 유연사다리꼴 형상에 대한 해석결과가 거의 일치한다는 것을 고려한다면 기존의 해석적 관계식은 특정한 지반변형의 형상에 대한 응답특성만을 반영하고 있다는 결론을 얻을 수 있다.

전술했던 해석적 관계식의 적용적 한계성을 효율적으로 극복하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 방식으로 해석적 관계식을 제안하였다. 지중매설관로의 거동을 케이블의 거동과 빔의 거동으로 분리해서 생각하되 전체 변형률을 산정하는 데 있어서는 두 가지 거동의 조합효과를 고려하였으며, 상호작용 형상계수 β 를 적용함으로써 지반변형의 다양한 형상을 반영할 수 있도록 하였다. 먼저 케이블 거동의 경우 중간부분

W/2를 축방향 인장력에 의한 변형률이 발생하는 부분으로 고려하고, 양 단부 W/2를 내적 인장 변형률이 발생하는 부분으로 고려함으로써 다음과 같이 식을 구성하였다.

$$\epsilon_{cable} = \epsilon_{axial} + \epsilon_{inward} = \frac{IF}{\delta} \cdot \frac{W^2}{16EA} + \mu \cdot \delta \cdot \sqrt{\frac{W}{10}} \quad (8)$$

반면, 빔의 경우 양단이 고정된 빔이 상호작용력으로 표현되는 등분포하중을 받는 것으로 고려하였으며 탄성론에 의거하여 다음과 같이 식을 구성하였다.

$$\epsilon_{beam} = \frac{M_{max}}{EI} \cdot C = \frac{8\delta D}{EW^2} \quad (9)$$

케이블에서 구한 축방향 변형률과 빔에서 구한 휨변형률을 단지 산술적으로 조합하는 것은 문제가 있으며, 영구지반변형의 폭에 따라 어느 한 가지의 변형률 산정방법만을 적용하는 것도 다른 쪽의 영향을 무시하게 되어 전체 변형률을 과소평가할 수 있는 가능성을 내포하고 있기에 본 연구에서는 다음과 같은 형태로 최종적인 해석적 관계식을 제안하였다.

$$\epsilon_{total} = \frac{\beta}{1/\epsilon_{cable} + 1/\epsilon_{beam}} \quad (10)$$

4. 횡방향 영구지반변형에 대한 매설관로 거동특성 해석

전술했던 해석적 관계식의 적용성을 객관적으로 검증하기 위하여 유한요소 해석프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 관-지반 상호작용 모형은 그림 8과 같이 종방향 및 횡방향 지반 스프링이 빔요소로 표현된 매설관로의 각 절점에 연결되어 있는 것으로 구성하였으며 이 경우 각 방향의 지반강성계수는 ASCE Guideline에서 제시한 식^[4]을 사용하였다. 전체 해석영역은 매설관로 양 단부에서의 구속효과를 상쇄시키기 위하여 매설관로 양 단부를 기준으로 2L씩 증가시켜 전체 5L로 설정하였다. 수치해석과 해석적 관계식에 사용된 매설관로의 제원 및 지반의 조건은 표 1과 같고 지반변형의 크기는 0.1~0.3m로, 지반변형의 폭은 10m에서 150m로 설정하였다.

그림 9는 영구지반변형의 크기가 0.1m일 때의 해석결과로서 지반변형의 폭이 30m일 때를 기점으로 영구지반변형의 폭이 증가함에 따라 매설관로의 최대 변형률이 증가하다가 감소하는 경향을 보이는데, 영구지반변형의 폭이 30m 이전에서는 매설관로가 축방향 변형률에, 30m 이후에서는 휨변형률에 영향을 받기 때문에 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 그림 10은 영구지반변형의 크기가 0.2m일 때, 그림 11은 0.3m일 때의 해석결과로서, 지반변형의 크기가 증가함에 따라서 관의 최대 변형률이 선형적으로 증가한다는 것을 볼 수 있으며 전체적으로 최대 오차가 5% 미만인 것을 고려할 때 본 연구를 통해 제안된 해석적 관계식의 타당성은 합리적으로 검증된 것으로 판단된다.

그림 12는 상호작용력의 공간적인 분포, 즉 지반변형의 형상을 다양하게 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 먼저 지반변형의 형상 변화에 따라서 매설관로의 응답이 확연하게 변화한다는 것을 확인할 수 있다. 특히 지반변형의 일반적인 형상으로 사용되고 있는 Sine 형상에 의한 해석결과가 전체 변형

률의 하한선에 가까운 값을 나타내고 있으며, 실제적으로 Sine 형상과 같은 이상적인 형태의 지반변형이 나타나기 어렵다는 점을 고려한다면 지반변형 발생시 매설관로의 구조적인 안정성을 확보하기 위해서는 각 부지조건에 따라 발생가능한 지반변형의 형상을 가능한 한 정확하게 추정함으로써 변형률의 상한선을 결정하는 작업이 요구되는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통해 액상화-영구지반변형이 발생된 지반에 위치한 지중매설관로를 대상으로 횡방향의 영구지반변형이 발생할 경우 적용될 수 있는 관·지반 상호작용력 및 해석적 관계식이 제안되었다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

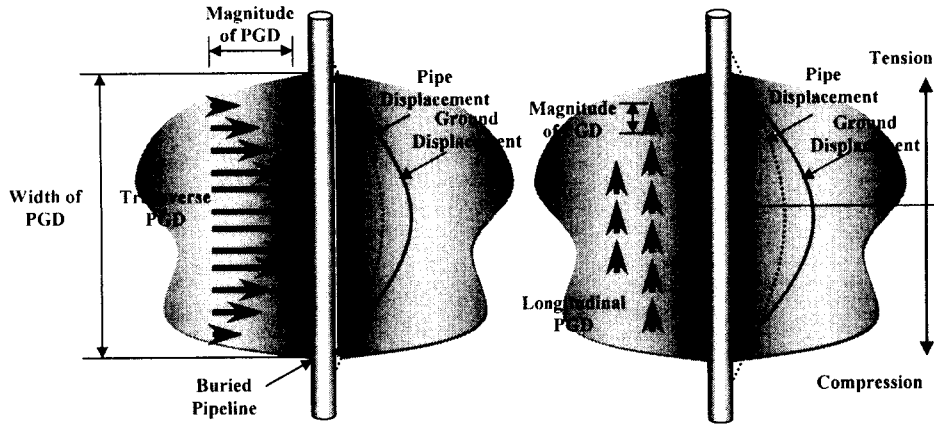
- (1) 기존의 관·지반 상호작용력은 액상지반에서 발생하는 지반강성의 감소효과 및 지반변형의 다양한 형상을 적절하게 반영하지 못하고 있으며, 기존의 해석적 관계식은 각 식의 적용범위를 결정하는 한계지반변형의 폭을 제시하지 못하는 적용적인 한계성을 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 한계성을 효율적으로 극복하기 위해 다양한 실험결과 및 현상학적 가정에 기초하여 개선된 형태의 관·지반 상호작용력 및 해석적 관계식을 제안하였다.
- (2) 제안된 해석적 관계식을 이용하고, 상호작용력의 공간적인 분포 즉 지반변형의 형상을 다양하게 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과, 지반변형의 일반적인 형상으로 사용되고 있는 Sine 형상에 의한 해석결과가 전체 변형률의 하한선에 가까운 값을 나타내고 있으며, 실제적으로 Sine 형상과 같은 이상적인 형태의 지반변형이 나타나기 어렵다는 점을 고려한다면 지반변형 발생시 매설관로의 구조적인 안정성을 확보하기 위해서는 각 부지조건에 따라 발생가능한 지반변형의 형상을 가능한 한 정확하게 추정함으로써 변형률의 상한선을 결정하는 작업이 요구되는 것으로 판단된다.

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.(1992), *Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes*, Technical Report, NCEER-92-0001, Vol.1.
2. Ishihara, K., Taguchi, Y. and Kato, S.(1992), Experimental Study on Behavior of the Boundary between Liquefied and Non-liquefied Ground, *Proceedings from the Third Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline*, Technical Report, NCEER-92-0032, pp.639-653.
3. O'Rourke, M.J. and Liu, X.(1999), *Response of Buried Pipelines subject to Earthquake Effects*, MCEER Monograph, No.3, pp.77-87.
4. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines(1984), *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, ASCE, New York.



(a) 횡방향 영구지반변형

(b) 종방향 영구지반변형

그림 1. 영구지반변형의 방향에 따른 매설관로 거동특성

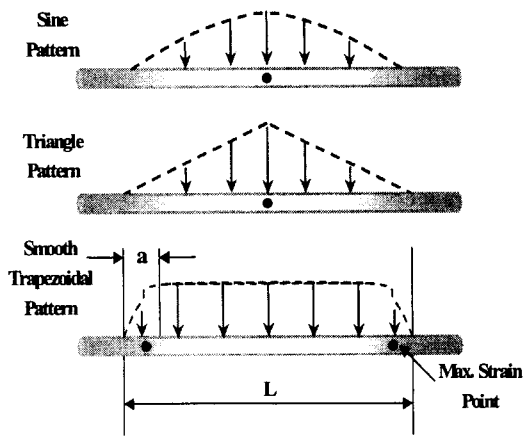


그림 2. 다양한 형상의 횡방향 영구지반변형

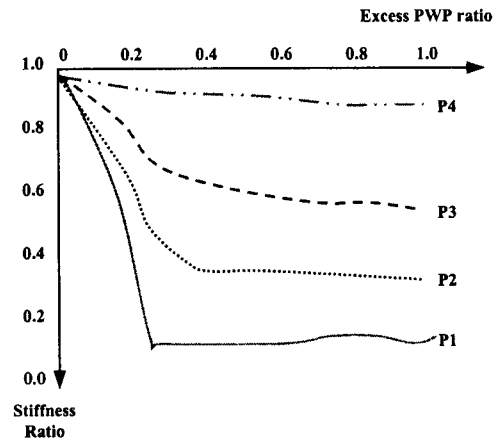


그림 3. 과잉간극수압에 따른 지반강성의 감소

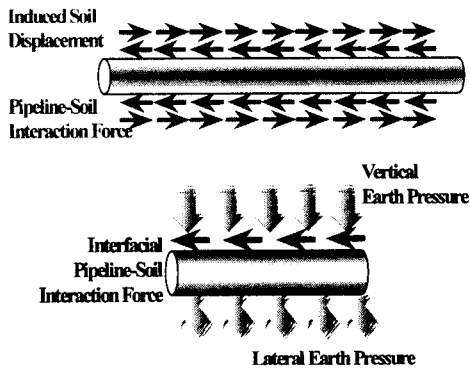


그림 4. ASCE 관·지반 상호작용력의 개념도

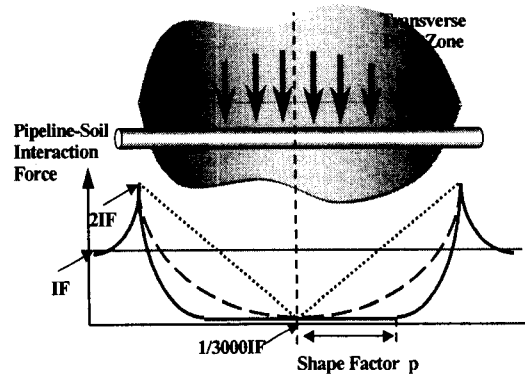


그림 5. 제한된 관·지반 상호작용력의 개념도

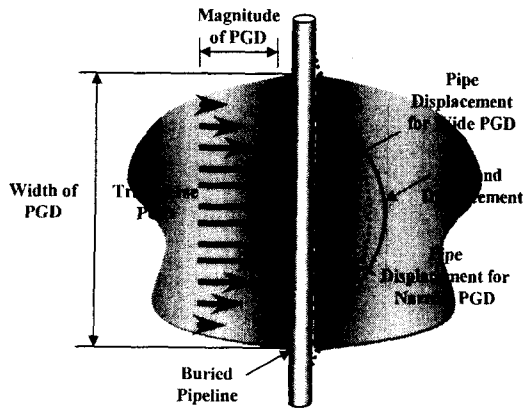


그림 6. 해석적 관계식의 개념도

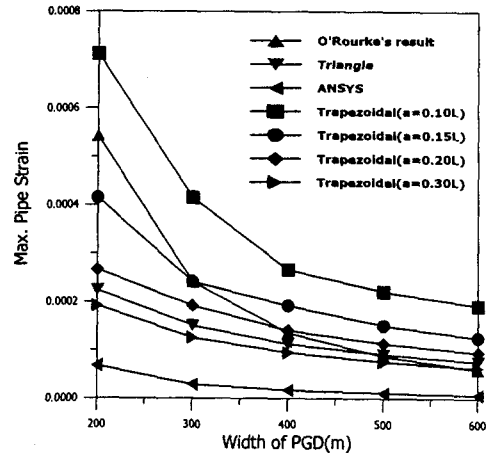


그림 7. FEM 비교해석 결과

표 1. 해석대상 관의 제원 및 지반 물성

내 용		입 력 치	
관 제 원	탄성계수	E	210 GPa
	항복응력	σ_y	300 MPa
	외경	D	0.61 m
	두께	t	6.50 mm
	요소길이	l	1.00 m
지 반 물 성	단위중량	γ	18.70 kN/m ³
	매설심도	H	1.20 m
	축방향강성	K_A	12,600 kN/m ²
	횡방향강성	K_L	4,500 kN/m ²

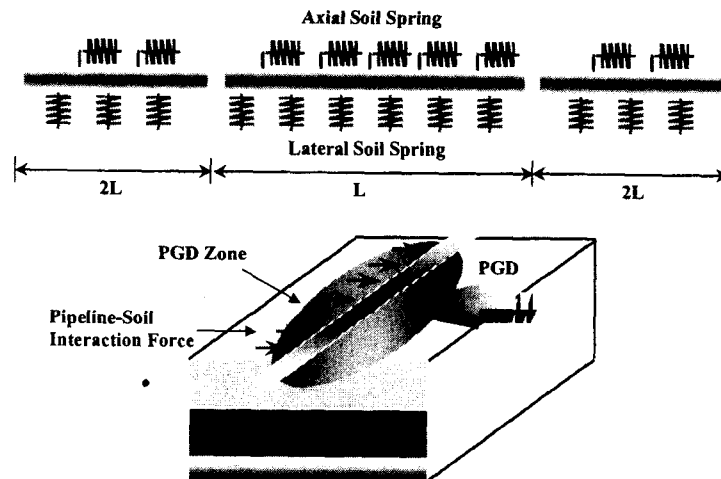


그림 8. 수치해석 모형

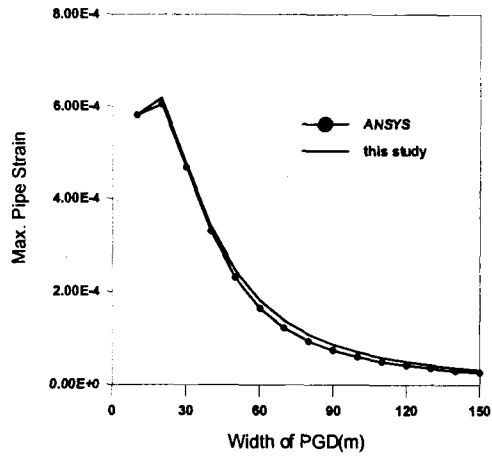


그림 9. 지반변형 0.1m에 대한 해석결과

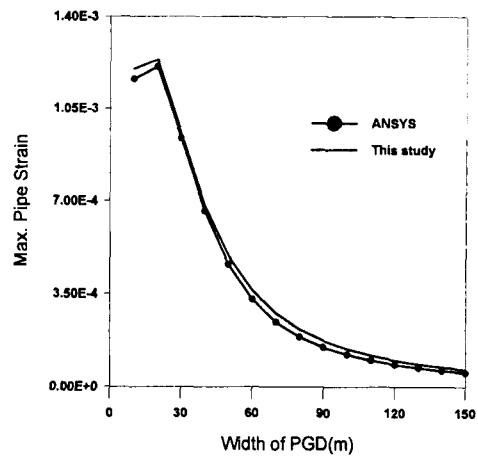


그림 10. 지반변형 0.2m에 대한 해석결과

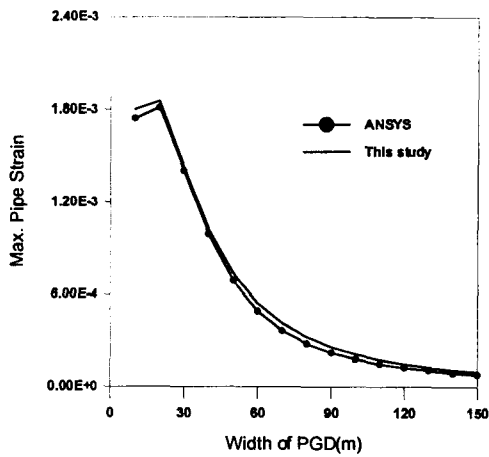


그림 11. 지반변형 0.3m에 대한 해석결과

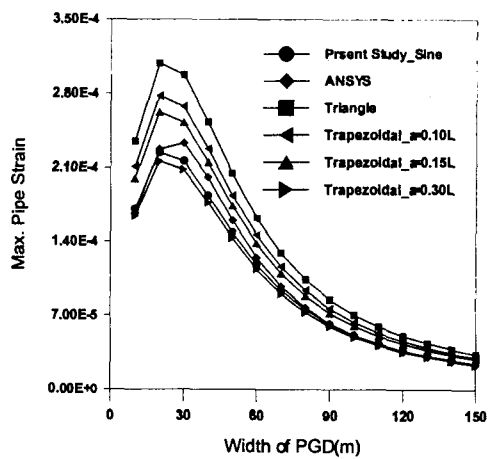


그림 12. 지반변형 형상에 대한 해석결과