

지중매설관로의 거동특성을 반영한 개선된 해석적 관계식의 제안

Proposition of Improved Semi-Analytical Relationship considering Response Characteristics of Buried Pipeline

김 태 욱*
Kim, Tae Wook

임 윤 목**
Lim, Yun Mook

김 문 겸***
Kim, Moon Kyum

국문요약

지진 발생시 매립지반과 같은 연약지반에 위치하게 되는 지중매설관로는 액상화-영구지반변형에 의해 심각한 규모의 구조적인 손상이 발생할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이 경우 매설관로의 거동특성 해석은 수치모형 및 해석적 관계식의 적용을 통해 주로 수행되는데, 특히 횡방향 지반변형을 받는 지중매설관로에 대한 해석적 관계식의 경우, 횡방향 지반변형의 폭에 따라서 해석적 관계식 자체가 이원화되는 단점을 가지고 있는 동시에 액상지반의 특징인 지반강성의 감소로 야기되는 다양한 지반변형의 형상을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 본 연구에서는 먼저 기존의 해석적 관계식을 개략적으로 살펴본 후, 유한요소 해석과의 비교를 통해 기존의 해석적 관계식이 가지고 있는 적용적 한계성을 검토하였으며, 전체적인 매설관로의 거동을 케이블과 빔의 조합된 형태로 고려하고 지반변형의 다양한 형상을 반영하는 상호작용 형상계수를 도입함으로써 지반변형의 폭과 무관하게 적용될 수 있는 동시에 다양한 지반변형의 형상을 반영할 수 있는 개선된 형태의 해석적 관계식을 제안하였다. 제안된 해석식의 합리적 적용성과 객관적 타당성을 검증하기 위해 지반변형의 크기와 형상 변화에 따른 수치해석을 수행하고 이를 유한요소 해석결과와 비교하였으며, 지반변형의 크기 및 형상변화에 따른 매설관의 거동특성 변화 및 그 의미를 분석하였다.

키워드 : 지중매설관로, 액상화-영구지반변형, 해석적 관계식, 지반변형의 형상, 상호작용 형상계수

ABSTRACT

Response analysis of buried pipeline subjected to permanent ground deformation(PGD) due to liquefaction is mainly executed by use of numerical analysis or semi-analytical relationship. Especially for the semi-analytical relationship considering transverse PGD, it has somewhat limited applicability : since it has different formula according to the width of PGD and does not reflect various patterns of PGD which is caused by the decrease of soil stiffness. Therefore, in this study, the applicability of existing analytical relationship is closely investigated through the comparison of FEM results at first. And then, based on meaningful contemplation, improved analytical relationship is proposed. The proposed one models the system behavior of buried pipeline as the combination of cable and beam, and thus it is applicable to arbitrary width of PGD. Moreover, it does reflect various patterns of PGD by introducing interaction pattern coefficient. Through the comparison of numerical results using the FEM and the proposed analytical relationship, rational applicability is objectively verified and noticeable considerations are discussed. Moreover, analyses considering the change of PGD magnitude and patterns are performed.

Key words : buried pipeline, permanent ground deformation, analytical relationship, pgd patterns, interaction pattern coefficient

1. 서 론

도로, 교량, 터널, 지하철과 같은 인력 및 자원 운송체계, 전력구, 광통신망 등과 같은 신호통신체계, 상·하수도, 가스, 송유시설 등과 같은 에너지 운송체계 등은 복잡한 현대 사회의 근간을 구성하는 동시에 인간생활의 생명선 역할을 수행한다는 측면에서 이른바 라이프라인(Lifeline)시설로서 정의된다. 라이프라인 시설은 일반적인 사회기반시설과는 달리 단일 구조물로서의 역할보다는 광범위한 지역에 걸쳐 Network 형태로 구성되는 전체 시스템으로서의 기능성을 역할하게 유지하는 측면이 상대적으로 중요하게 평가되고 있다. 이는 지진과 같은 대규모의 자연재해로 인해 개별 라이프라인의 손상이 발생할 경우, 1차적으로 시스템의 기능

이 마비되며, 시스템과 연계된 각종 사회기능의 마비로 인한 2차적인 의미에서 막대한 규모의 사회·경제적인 피해가 도출되기 때문인 것으로 판단된다.⁽¹⁾ 따라서 지진에 의한 사회기반시설의 피해가 빈번하게 발생하는 선진 외국에서는 1980년대 중반 이후 라이프라인 시설의 지진안정성 확보 및 지진대응 전략체계의 구성을 최종목표로 설정한 후, 1차적으로는 대표적 라이프라인 시설의 하나인 지중매설관로에 대한 포괄적인 지진피해 사례분석, 합리적이면서도 과학적인 지진해석 및 내진설계 기법의 개발에 중점을 두고 다양한 연구를 진행시켜 왔다.

지중매설관로를 대상으로 현재까지 수행된 지진피해 사례분석 자료들을 검토한 결과, 지중매설관로의 지진피해의 인을 크게 지진파 전파와 영구지반변형으로 구분할 수 있다. 광범위한 지역에 걸쳐 발생하는 지진파 전파에 의한 지중매설관로의 피해는 비교적 경미한 데 비해, 국부적인 지역에서 발생하는 액상화-영구지반변형에 의한 지중매설관로의 구조적인 손상은 매우 심각한 특징을 가지고 있다.⁽²⁾ 그러므로 비교적 최근 들어 미국 및 일본을 중심으로 액상화-영구

* 한국철도기술연구원 제도·구조 연구그룹, 주임연구원
(대표저자 : karisma2k@krti.re.kr)

** 정회원·연세대학교 공과대학 사회환경·시스템 공학부 토목전공, 부교수

*** 정회원·연세대학교 공과대학 사회환경·시스템 공학부 토목전공, 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 6. 10 / 심사종료일 : 2003. 7. 2)

지반변형 자체에 대한 연구와 함께 영구지반변형을 받는 지중 매설관로의 거동 특성에 대한 일반적인 연구가 진행되어 왔음을 확인할 수 있다.

현재까지의 연구결과를 개략적으로 살펴보면, 먼저 영구지반변형 자체에 대한 연구는 의미있는 연구성과에도 불구하고 영구지반변형 현상 자체의 현상학적인 복잡성으로 인해 설계기준으로 적용될 수 있는 구체적인 연구결과가 아직 확보되지 못하고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 반면, 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동에 관한 연구는 단순한 형태의 해석적 관계식 및 수치해석 모형의 적용을 이용한 기본적인 거동특성 규명을 중심으로 진행되어 왔으나, 특히 횡방향 지반변형을 받는 지중매설관로에 대한 해석적 관계식의 경우, 횡방향 지반변형의 폭에 따라서 해석적 관계식 자체가 이원화되는 단점을 가지고 있는 동시에 비액상 지반을 기준으로 산정된 관·지반 상호작용력을 근간으로 하고 있기에 액상지반의 특징인 지반강성의 감소로 야기되는 다양한 지반변형의 형상을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다는 사실을 확인할 수 있다.^{(3),(4)}

그러므로 본 연구에서는 먼저 횡방향 영구지반변형을 받는 지중매설관로에 관한 기존의 해석적 관계식을 개략적으로 검토한 후, 유한요소 해석과의 비교를 통해 기존의 해석적 관계식이 가지고 있는 적용적 한계성을 규명하였다. 또한, 전체적인 매설관로의 거동을 케이블과 빔의 조합된 형태로 고려하고 지반변형의 다양한 형상을 대변하는 상호작용형상계수를 도입함으로써, 지반변형의 폭과 무관하게 적용될 수 있는 동시에 다양한 지반변형의 형상을 반영할 수 있는 개선된 형태의 해석적 관계식을 제안하였다. 본 연구에서 적용된 상호작용형상계수는 액상지반에서의 지반강성 감소현상과 상호작용력의 공간적 분포 형상 및 지반변형의 다양한 형상 사이의 연관성을 고려하여 도출된 것이다. 제안된 해석식의 합리적 적용성과 객관적 타당성을 검증하기 위해 지반변형의 크기와 형상 변화에 따른 수치해석을 수행하고 이를 유한요소 해석결과와 비교하였으며, 지반변형의 크기에 따라서 매설관의 응답특성이 선형적으로 변화한다는 사실을 확인하고, 지반변형의 형상에 따른 매설관의 거동특성 변화 및 그 의미를 분석하였다. 결과적으로 본 연구를 통해서 지중매설관로의 지진해석 및 내진설계에 적용될 수 있는 해석모형의 기초에 대한 확장적 보완이 이뤄질 것으로 사료된다.

2. 액상화-영구지반변형 현상 및 매설관로의 거동특성 양상

영구지반변형(Permanent Ground Defromation : PGD)은 단층운동(Fault Movement), 산사태(Landsliding) 또는 지반의 액상화(Soil Liquefaction) 등에 의해 발생하는 대규모 지반의 체적변형 및 표층변형을 의미한다. 특히 액상화-영구지반변형은 느슨하게 포화된 사질토 지반에서 지반의 진동으로 인해 발생된 과잉 간극수압이 소산되면서 생겨나는 지반

의 체적변위를 의미하며 반복전단변형(Cyclic Mobility) 또는 유동액상화(Flow Liquefaction)현상과 연관되면서 지층의 경사 유무에 따라 수직 방향의 침하 및 수평 방향의 대규모 지반 이동으로 나타나게 된다. 단층운동 및 산사태에 의해 발생하는 피해사례에 비해, 전세계적으로 매립지반의 사용이 증가하면서 액상화-영구지반변형에 의한 구조물의 피해사례가 빈번하게 관측되기 시작했는데, 1964년의 Niigatta 지진, 1984년의 Nihonkai-Chubu 지진 및 1995년의 Hyogoken-Nanbu 지진피해 사례분석 결과 등에서 볼 수 있는 것처럼 액상화-영구지반변형의 발생으로 인해 연약한 매립지반에 매설된 말뚝기초, 지중매설관로 등에 광범위한 피해가 발생되었던 것을 확인할 수 있다.^{(5),(6)}

그러므로, 이미 1960년대부터 미국 및 일본에서는 액상화-영구지반변형의 발생원인 및 현상학적 규명을 목적으로 다양한 측면에서의 연구가 진행되어 왔음을 확인할 수 있는데 정량적 척도인 지반변형의 크기, 지반변형의 공간적 불균일성에 의해 표출되는 지반변형의 형상, 지반변형의 범위를 나타내는 지반변형의 폭 등 3가지 주요 해석요소와 관련된 의미있는 연구결과에도 불구하고 액상화-영구지반변형의 현상학적인 복잡성으로 인해 설계기준으로 적용될 수 있는 구체적인 연구성과가 아직까지는 도출되지 못하고 있다는 것을 확인할 수 있다.⁽³⁾

영구지반변형의 해석적인 요소와는 별도로 액상화-영구지반변형에 의해 실제로 발생한 지중 매설관로의 파괴양상을 상세하게 살펴보면, 매설관로의 주축을 기준으로 상대적으로 작용하는 지반변형의 방향성에 따라 매설관로의 파괴양상이 확연하게 변화한다는 것을 확인할 수 있다. 실질적으로 지반변형의 방향성에 따른 매설관로의 파괴양상은 그림 1(a)와 그림 1(b)의 두 가지로 크게 구분할 수 있다. 먼저 그림 1(a)는 지중 매설관로의 주축과 영구지반변형의 방향이 직각으로 교차하게 되는 경우를 나타낸 것으로서, 이때의 지반변형을 횡방향 영구지반변형으로 정의하게 되며 이 경우 매설관로의 파괴는 중앙부에서의 과도한 휨에 의해 주로 발생하게 된다. 반면 그림 1(b)는 지중 매설관로의 주축이 영구지반변형의 방향과 평행하게 되는 경우를 나타낸 것으로서 이 때의 지반변형은 종방향 영구지반변형으로 정의되며, 이 경우 매설관로의 파괴는 지반변형 시점부에서의 과도한 인장 및 종결부에서의 과도한 국부압축에 의해 발생하게 된다.

지중매설관로의 주축과 영구지반변형의 방향이 임의의 각을 가지고 교차하게 되는 일반적인 경우에 비해, 종방향 및 횡방향 지반변형의 경우 지반의 변형에너지가 상대적으로 집중됨에 따라 매설관로와 지반 경계면에서의 상호작용력이 극한적인 상황으로 나타나게 된다는 사실을 쉽게 유추할 수 있다.^{(5),(6)}

3. 횡방향 영구지반변형에 대한 기존의 해석적 관계식

그림 1(b) 및 그림 2와 같은 횡방향 영구지반변형의 경우

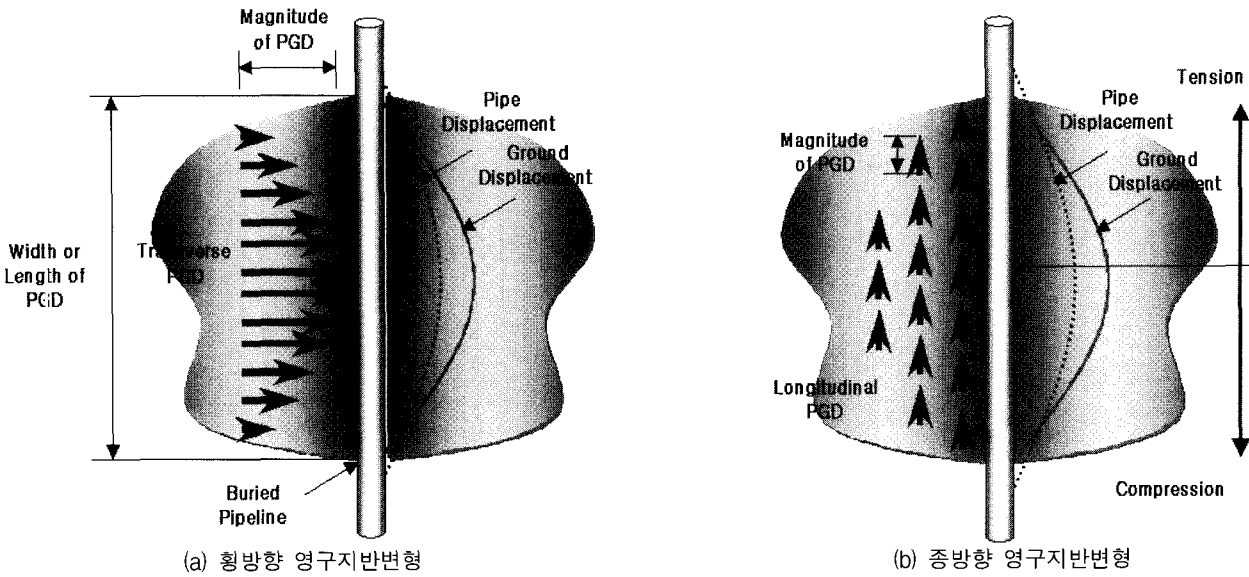


그림 1 지반변형의 방향성에 따른 매설관로 거동특성의 변화

MORourke는 매설관로의 거동특성에 기초한 몇 가지 현상학적 가정을 토대로 지반변형의 폭이 넓은 경우에 대해서는 식 (1)과 같이, 폭이 좁은 경우에 대해서는 식 (2)와 같은 형태로 해석적 관계식을 제안한 바 있다.⁽⁷⁾

$$\text{Broad Zone} : \epsilon = \epsilon_b + \epsilon_a = \pm \frac{\pi^2 \delta D}{W^2} + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{\delta}{W}\right)^2 \quad (1)$$

$$\text{Narrow Zone} : \epsilon = \epsilon_b = \pm \frac{p_u W}{3\pi EtD^2} \quad (2)$$

여기서 ϵ_b 는 휨변형률, ϵ_a 는 축변형률을 각각 의미하며, δ 는 지반변형의 크기, W 는 영구지반변형의 폭, D 는 매설관로의 직경, E 는 관의 탄성계수, t 는 관의 두께를 표시한다. 각 식이 가정하고 있는 사항들을 상세하게 살펴보면, 먼저 지반변형의 폭이 넓은 경우에 대한 식 (1)은 그림 2에 표시된 바와 같이 관의 변위를 지반의 변위와 거의 동일한 것으로 고려한 상태에서 유도된 것이며, 지반변형의 폭이 증가함에 따라 매설관로의 응답이 감소하게 되는 특징을 가지고

있다. 반면 지반변형의 폭이 좁은 경우에 대한 식 (2)는 역시 그림 2에 표시된 바와 같이 관의 변위를 지반의 변위보다 훨씬 작은 것으로 고려한 상태에서 유도된 것이며, 식 (1)과는 달리 지반변형의 폭이 증가함에 따라서 매설관로의 응답이 증가하게 되는 특징을 가지고 있다.

지반변형의 폭에 따라서 상반된 거동특성을 식 (1)과 식 (2)가 나타내고 있으나, 현재로서는 각 식의 적용기준이 되는 지반변형의 폭 및 범위가 적절하게 설정되어 있지 않으며 두 식 모두 ASCE에서 비액상 지반을 기준으로 제시한^{(8),(9)} 관·지반 상호작용력 p_u 에 기초하고 있기에 액상지반의 특징인 지반강성의 감소현상으로 나타나는 지반변형의 다양한 형상을 반영하고 있지 못하는 것으로 판단된다.

지반변형의 다양한 형상과 관련된 기존 해석식의 적용적 한계성을 보다 명확하게 살펴보기 위해서 그림 3에 나타낸 바와 같이 액상지반에서 실제로 나타날 수 있는 Sine, Triangle, Smooth Trapezoidal 형상 각각을 대상으로 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 식 (1)에 의한 해석결과와 비교하였다. 입력하중인 영구지반변형의 크기는 국내 계기 지진피해사례의 절대적인 부족으로 인해 국외 연구자들의

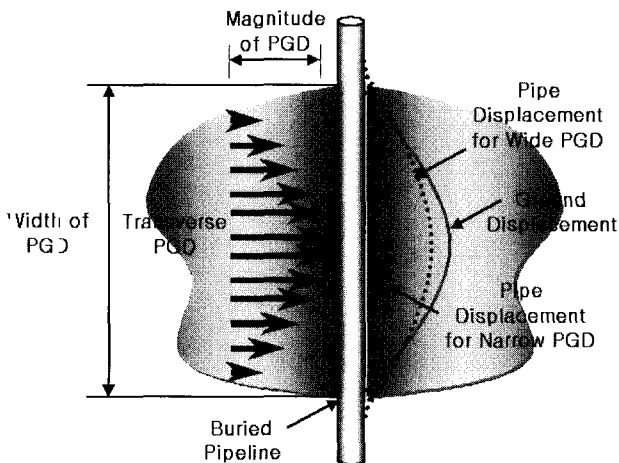


그림 2 횡방향 영구지반변형에 대한 M.O'Rourke 해석식의 개념도

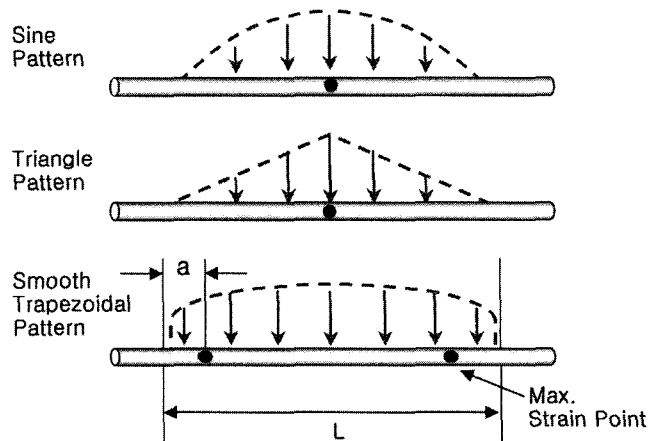


그림 3 액상지반에서 발생할 수 있는 다양한 지반변형의 형상

경험식⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾을 참조하여 국내 액상화 평가기준인 Mw 6.5를 기준으로 최대 1.0m 정도의 영구지반변형이 발생하는 것으로 가정하였다. 미국 및 일본의 강진자료에 기초하여 산정된 수치이긴 하나 영구지반변형 현상 자체의 불확실성을 고려하고 해석결과의 보수성을 확보한다는 차원에서 본 연구에서는 이를 적용하였다. 실제적으로 미국 및 일본 등과 같은 강진지역에서 관측된 영구지반변형의 크기는 10m 이상의 큰 수치를 보이고 있으므로, 본 연구에서 가정된 지반변형의 크기는 상대적인 합리성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 또한, 영구지반변형의 폭은 상대적으로 큰 폭에 대해 적용되는 식 (1)에 기준하여 200~600m로 가정하였고, 매설관은 국내에서 일반적으로 사용되는 수도용 강관을 해석대상으로 설정하였으며 제반 입력조건으로 사용된 관의 제원과 물성 및 주변지반의 조건은 표 1과 같다.

해석결과인 그림 4를 살펴보면 지반변형의 형상에 따라서 실질적으로 매설관로의 응답특성이 다양하게 변화함을 확인할 수 있다. 유연사다리꼴의 형상 변화부분 a의 증가에 따른 관 변형률의 감소 경향이 나타나고 있으며, 삼각형의 지반변형 형상과 a가 0.3L인 경우의 지반변형 형상이 매설관로에 대해 동일한 효과를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 특히 a가 0.15L인 경우의 지반변형 형상이 기존 해석식의 해석결과와 가장

표 1 관의 제원 및 지반의 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	9.50	mm
지 반 물 성	단위중량	γ	18.70	kN/m ³
	매설심도	H	1.20	m
	축방향강성	K_{axial}	12.6	MPa
	횡방향강성	$K_{lateral}$	4.50	MPa

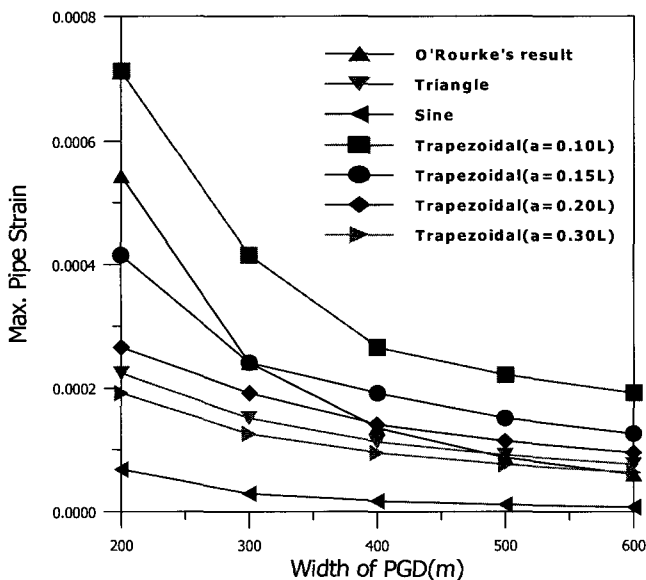


그림 4 지반변형의 형상에 대한 기존 해석식의 적용성 평가

근접한 결과를 도출하게 된다는 사실을 고려한다면 M.O'Rourke가 제안한 기존의 해석식은 동일한 지반변형의 크기에 대해서 관 변형률의 상한선을 발생시킬 수 있는 특정한 형상의 지반변형만을 고려하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

그러므로, 기존의 해석적 관계식은 식 적용의 기준이 되는 한계지반변형의 폭을 적절하게 제시해주지 못하는 동시에 다양한 지반변형의 형상에 따른 응답특성의 차이를 반영할 수 없으며, 안전측을 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되는 반면 Sine 형상의 영구지반변형을 기본 형상으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 가지고 있다는 결론을 얻을 수 있다.⁽¹³⁾

4. 횡방향 영구지반변형에 대한 해석적 관계식의 제안

4.1 해석적 관계식의 형성

기존의 해석식이 가지고 있는 적용적 한계성-지반변형의 폭에 따른 해석식의 이원화-을 효율적으로 극복하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 방식으로 해석적 관계식을 제안하였다. 좁은 폭의 지반변형에 대해서는 케이블의 거동이 매설관로의 거동을 지배하는 것으로, 넓은 폭의 지반변형에 대해서는 빔의 거동이 매설관로의 거동을 지배하는 것으로 각각을 분리해서 생각하되 전체 변형률을 산정하는 데 있어서는 두 가지 거동의 조합효과를 고려하였다.

먼저 그림 5와 같이 양단이 힌지로 지지되는 케이블 거동의 경우 전체적으로 내적 인장 변형률이 발생하며, 중간부분 (W/2)에 축방향 인장력에 의한 변형률이 추가적으로 발생하는 것으로 고려함으로써 다음과 같이 식을 구성하였다.

$$\epsilon_{cable} = \epsilon_{axial} + \epsilon_{inward} = \frac{IF}{\delta} \cdot \frac{W^2}{16EA} + \mu \cdot \delta \cdot \sqrt{\frac{W}{10}} \quad (3)$$

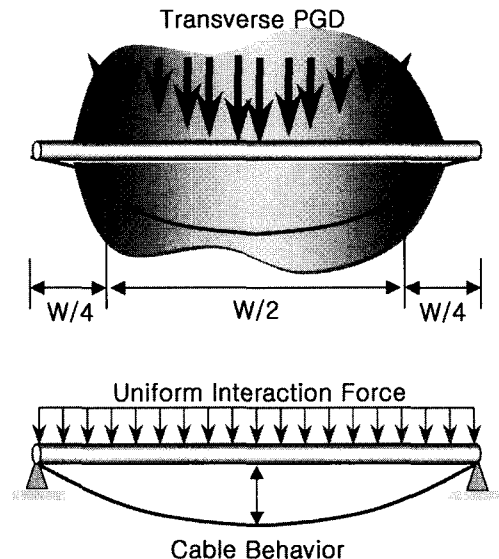


그림 5 케이블 거동에 대한 해석적 관계식의 개념도

여기서, ϵ_{axial} 은 축방향 변형률을, ϵ_{inward} 는 내적인장변형률을 각각 의미하며, IF 는 관·지반 상호작용력으로서 ASCE에서 제안한 상호작용력을 이용할 경우에는 식 (6)과 (7)을 수정된 형태의 상호작용력을 이용할 경우에는 식 (8), (9), (10)을 가정된 지반변형의 형상에 따라서 각각 적용하게 된다. 또한 W 는 지반변형의 폭, EA 는 관의 축방향 강성을 나타내며, μ 는 탄성계수와 내적 인장 변형률과의 관계를 나타내는 계수이다.

반면, 그림 6과 같은 빔 거동의 경우 양단이 고정된 빔이 상호작용력 IF 로 표현되는 등분포하중을 받는 것으로 고려하였으며 탄성론에 의거하여 다음과 같이 식을 구성하였다. 여기서 D 는 관경을 의미한다.

$$C_{beam} = \frac{M_{max}}{EI} \cdot C = \frac{8\delta D}{EW^2} \quad (4)$$

키이클에서 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. 최종적으로 제안된 식 (5)는 축방향 변형률과 휨변형률의 산술평균 형태로 나타나게 되며 이는 일본 수도협회에서 적용되고 있는 해석식의 개념^{(20),(21)}을 적용한 것이다.

$$\epsilon_{total} = \frac{1}{1/\epsilon_{cable} + 1/\epsilon_{beam}} \quad (5)$$

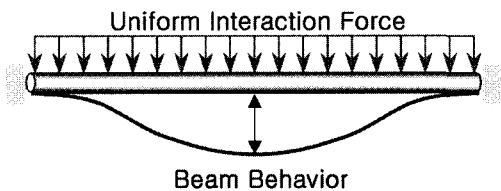


그림 6 빔 거동에 대한 해석적 관계식의 개념도

4.2 해석적 관계식을 위한 상호작용 형상계수의 도출 및 적용

또한 본 연구에서는 기존의 해석식이 고려하지 못하고 있는 지반변형의 다양한 형상을 합리적으로 반영하기 위해 비액상지반의 상호작용력과 액상지반의 상호작용력의 비로 표현되는 상호작용 형상계수를 도출하고 이를 제안된 해석적 관계식에 적용하였다.

이를 위해 먼저 기존의 관·지반 상호작용력을 토대로 지반강성의 감소 현상 및 상호작용력의 공간적 분포 형상, 이로 인해 공간적으로 표출되는 다양한 지반변형의 형상을 표현할 수 있는 수정된 형태의 관·지반 상호작용력을 산정하였으며, 두 상호작용력의 비교 해석을 통해 제안된 관·지반 상호작용력의 적용성을 합리적으로 검증한 후 각 형상에 대한 상호작용 형상계수를 도출하였다.

4.2.1 지반변형의 형상을 고려한 관·지반 상호작용력의 수정

ASCE에서는 액상화가 발생하지 않는 사질토지반에 위치한 매설관로를 대상으로 다년간의 실내/외 실험에 기초하여 지반운동의 상대적인 방향성, 즉 종방향과 횡방향에 대한 관·지반 상호작용력을 각각 다음과 같이 제안한 바 있다.^{(8),(9)}

$$\text{Longitudinal } t_u = \mu \cdot (\gamma H) \cdot \frac{(1 + K_0)}{2} \cdot (\pi D) \quad (6)$$

$$\text{Transverse } p_u = (\gamma \cdot H) \cdot N_{qs} \cdot (D) \quad (7)$$

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_{qs} 는 수평지지력계수를 각각 의미한다. 식 (6)과 식 (7)을 상세하게 고찰하면 경계면에서 작용하는 관·지반 상호작용력은 그림 7에 나타낸 바와 같이 관이 위치한 매설심도를 기준으로 관의 단면부에 가해지는 수직, 수평토압 및 마찰효과만을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

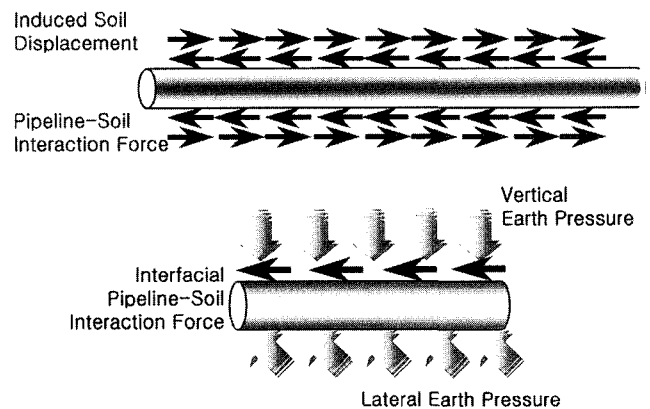


그림 7 기존 관·지반 상호작용력의 개념도

그러나 Ishihara⁽¹⁴⁾, Takada^{(15),(16)}, Yoshida⁽¹⁷⁾, Uematsu⁽¹⁸⁾, Matsumoto⁽¹⁸⁾, Yasuda⁽¹⁹⁾, Tanabe^{(15),(16)} 등에 의해 연구된 바와 같이 액상화된 지반에서의 지반강성은 원 지반의 지반강성에 비해 최소 1/100, 최대 1/3000 정도까지 감소되며, 액상지반 전체에 대해서 지반강성의 변화는 공간적으로 특정한 분포형상을 가지게 된다는 결론이 도출된 바 있다. 또한 그들은 지반변형이 발생하지 않는 양 단부에서의 지반강성은 지반변형으로 인한 구속력의 증대 및 중앙부에서의 강성감소로 인해 원 지반강성에 비해 약 두 배 정도 증가된 의의적인 강성을 가지게 된다고 주장한 바 있다.

지반의 액상화와 영구지반변형 자체가 과잉간극수압의 발생에 따른 지반강성의 감소현상과 직접적으로 연결되며, 공간적으로 나타나는 지반강성의 분포는 상호작용력의 분포 형상 및 지반변형의 다양한 형상으로 표현된다고 이야기할 수 있기에, 본 연구에서는 이러한 상호연관성(지반강성의 공간적인 분포 형상=상호작용력의 공간적인 분포 형상=지반변형의 다양한 형상)을 적극적으로 고려함으로써 기존에 사용되고 있는 상호작용력을 영구지반변형이 발생하는 액상지

반에 적용될 수 있도록 수정된 형태로 도출하였다.

먼저 기존의 상호작용력 대 액상지반에서의 상호작용력의 변화를 그림 8과 같은 Sine곡선의 형상으로 나타내었다.

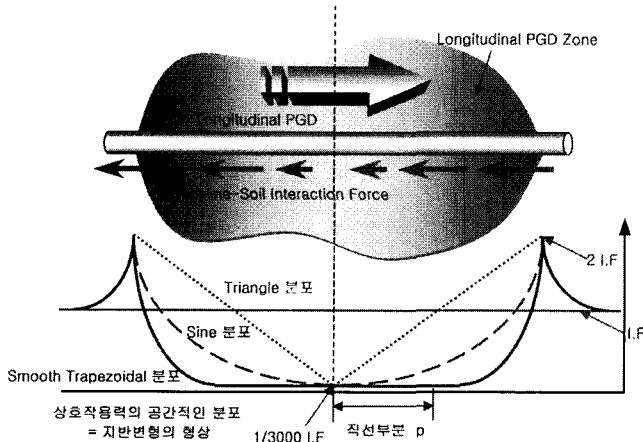


그림 8 제안된 관·지반 상호작용력의 개념도

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. 즉, 상호작용력의 공간적인 분포를 액상지반에서의 지반강성의 변화와 동일한 것으로 고려하였다. 따라서 이 경우, 비액상지반 및 액상지반에서의 상호작용력을 각각 IF 와 $IF_{liquefied}$ 로 정의한다면 액상지반에서의 상호작용력은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 비액상지반의 상호작용력 IF 는 종방향에 대해서는 t_u 로, 횡방향에 대해서는 p_u 로 표현된다.

$$IF_{liquefied} = 2 \cdot IF \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} + \frac{2}{3000\pi}\right) \quad (8)$$

또한 지반의 강성분포와 상호작용력의 공간적인 변화분포가 실제적인 지반의 변형 형상과 유사하다는 점을 고려한다면 그림 3에서 보는 바와 같이 다양한 상호작용력의 공간적인 변화분포, 즉 지반변형의 다양한 형상을 가정할 수 있으므로 삼각형 형상에 대해서는 식 (9)를, 유연한 사다리꼴 형상에 대해서는 식 (10)을 적용할 수 있다. 식 (10)에서 p는 유연사다리꼴의 평탄부를 나타내는 형상계수이다.

$$IF_{liquefied} = \frac{IF}{2} \cdot \left(2 + \frac{1}{3000}\right) \quad (9)$$

$$IF_{liquefied} = 2IF - \frac{1}{2} \cdot \left(2 - \frac{1}{3000}\right)(1 + p) \cdot IF \approx (1 - p) \cdot IF \quad (10)$$

4.2.2 제안된 관·지반 상호작용력의 적용성 평가

제안된 상호작용력을 횡방향 지반변형을 받는 지중매설관로의 해석적 관계식 (1)에 적용하고 이를 기존의 상호작용

력을 이용한 해석결과와 비교함으로써 제안된 상호작용력의 적용성을 수치적으로 평가하였다. 입력지반변형은 1.0m로 가정하였으며 영구지반변형의 폭은 상대적으로 큰 폭에 대해 적용되는 식 (1)에 기준하여 200~600m로 가정하였고, 제반 입력조건으로 사용된 관의 제원과 물성 및 주변지반의 조건은 표 1과 같다.

먼저, 그림 9는 Sine 형상의 공간적 분포를 갖는 수정된 관·지반 상호작용력을 기존의 해석적 관계식에 적용한 해석결과와 비액상 지반을 기준으로 산정된 기존의 관·지반 상호작용력을 이용한 해석결과를 비교한 것이다. 지반변형의 폭이 증가함에 따라서 변형률이 감소하는 현상은 동일하게 나타나는 반면, 기존의 상호작용력을 이용하여 산정된 관의 변형률이 수정된 관·지반 상호작용력을 이용하여 산정된 관의 변형률에 비해 상당히 큰 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

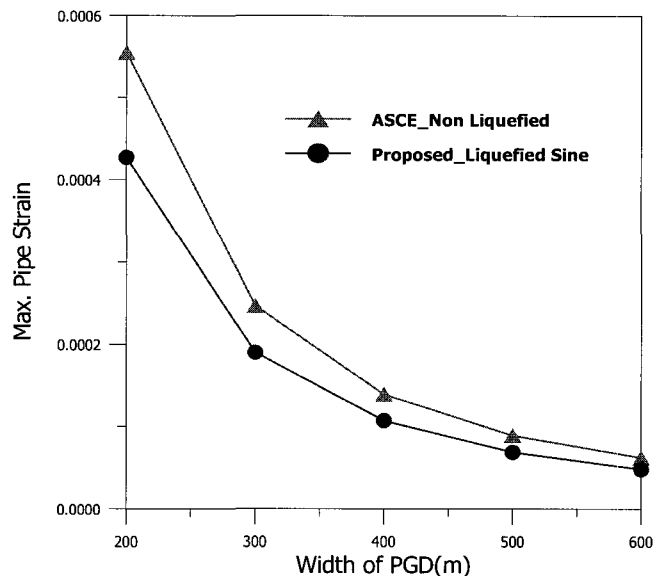


그림 9 제안된 관·지반 상호작용력을 이용한 비교해석

관·지반 상호작용력에 따른 응답특성의 차이를 보다 명확하게 살펴보기 위해, 동일한 관과 지반 및 영구지반변형을 대상으로 상호작용력의 다양한 공간적인 분포, 즉 다양한 지반변형의 형상을 고려하면서 매설관로의 거동특성을 해석하고 이를 그림 10으로 나타냈다. 그림 10을 살펴보면 상호작용력의 공간적인 분포, 즉 지반변형의 형상이 다양하게 변화함에 따라 변형률의 차이가 나타나고 있음을 알 수 있는데 먼저 삼각형 형상과 비액상 지반을 기준으로 산정된 기존의 관·지반 상호작용력을 적용한 해석결과가 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 유연 사다리꼴의 경우 직선부분을 나타내는 형상계수 p가 증가함에 따라 변형률의 크기가 감소한다는 것과 p=0.27인 유연 사다리꼴 형상이 Sine 형상과 동일한 효과를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 그림 9와 그림 10을 통해서, 수정된 형태의 관·지반 상호작용력은 기존의 관·지반 상호작용력이 나타내고 있는 한정된 지반변형 형상을 포괄하는 동시에 다양한

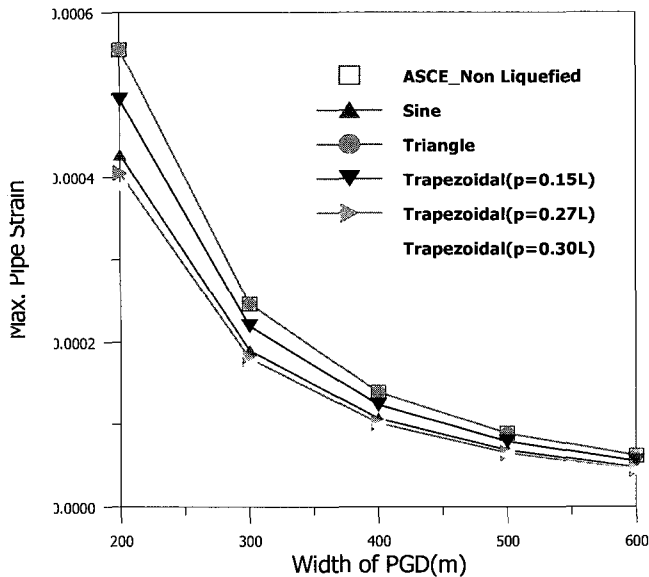


그림 10 지반변형의 형상에 대한 제안된 상호작용력의 적용성 평가

지반변형의 형상을 반영할 수 있다는 것을 우선적으로 확인하였다. 반면, 기존의 관·지반 상호작용력은 횡방향 영구지반변형을 받는 매설관로 변형률의 상한선을 나타내고 있기에 안전측을 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되지만, 다양한 지반변형의 형상에 따른 응답특성의 차이를 반영할 수 없고 Sine 형상의 지반변형을 기본으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 가지고 있는 것으로 판단된다.

4.2.3 상호작용 형상계수의 도출 및 적용

수정된 형태의 관·지반 상호작용력 $IF_{liquefied}$ 에 기초하여 다음과 같은 방식으로 상호작용 형상계수 β 를 정의하였다.

$$\beta = \frac{IF_{liquefied}}{IF} \quad (11)$$

식 (11)에서 볼 수 있는 바와 같이 상호작용 형상계수 β 는 수정된 상호작용력 $IF_{liquefied}$ 와 기존의 상호작용력 IF 의 비를 나타내는 계수로서 그림 3과 같은 지반변형의 형상에 따라 구분되며 실제적인 값은 표 2와 같다.

표 2 상호작용 형상계수

비객상 지역	액상지역에서의 지반변형 형상에 따른 상호작용 형상계수(Proposed $IF/ASCE IF$)				
ASCE IF	Sine	Triangle	Trapezoidal (p=0.15)	Trapezoidal (p=0.27)	Trapezoidal (p=0.30)
1.000	0.727	1.000	0.890	0.730	0.700

따라서 횡방향 지반변형을 받는 매설관로의 거동특성을 위해 제안된 해석적 관계식 (5)가 기존의 관·지반 상호작용력 IF 에 기초하여 유도된 것임을 고려한다면 지반변형의 형상에 따라 변화하는 상호작용 형상계수 β 를 추가시켜줌으로

써 최종적인 해석적 관계식을 식 (12)와 같은 형태로 변환시킬 수 있으며, 식 (12)는 지반변형의 폭과 무관하게 적용될 수 있는 동시에 지반변형의 다양한 형상을 반영할 수 있는 특징을 가지게 된다.

$$\epsilon_{total} = \frac{\beta}{1/\epsilon_{cable} + 1/\epsilon_{beam}} \quad (12)$$

4.3 제안된 해석식의 적용성 및 타당성 검토

본 연구를 통해 제안된 해석적 관계식의 적용성을 객관적으로 검증하기 위해 유한요소 해석프로그램을 이용하여 Sine 형상의 횡방향 지반변형에 대한 수치해석을 수행하였다. 관·지반 상호작용 모형은 종방향 및 횡방향 지반 스프링이 범요소로 표현된 매설관로의 각 절점에 연결되어 있는 것으로 구성하였으며, 이 경우 각 방향의 지반강성계수는 ASCE Guideline에서 제시한 식^{(8),(9)}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 좁은 폭과 넓은 폭에서의 거동양상을 모두 살펴보기 위해 10m에서 150m로 설정하였다.

그림 11은 영구지반변형의 크기가 0.1m일 때의 해석결과로서 지반변형의 폭이 30m일 때를 기점으로 영구지반변형의 폭이 증가함에 따라 매설관로의 최대 변형률이 증가하다가 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 영구지반변형의 폭이 30m 이전에서는 매설관로가 축방향 변형률에, 30m 이후에서는 휨변형률에 영향을 받기 때문에 나타나는 현상인 것으로 판단되는 바 해석적 관계식을 제안하는데 있어서 설정된 가정이 유효하게 반영되었다고 이야기할 수 있다.

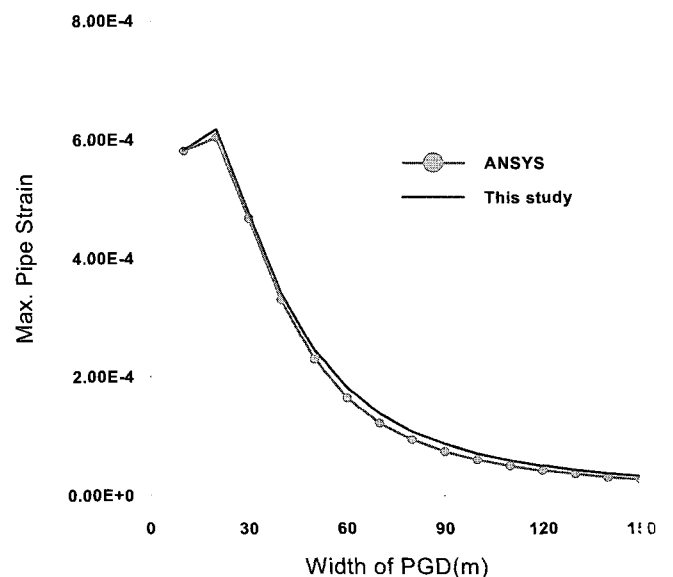


그림 11 영구지반변형 크기 0.1m에 대한 해석결과

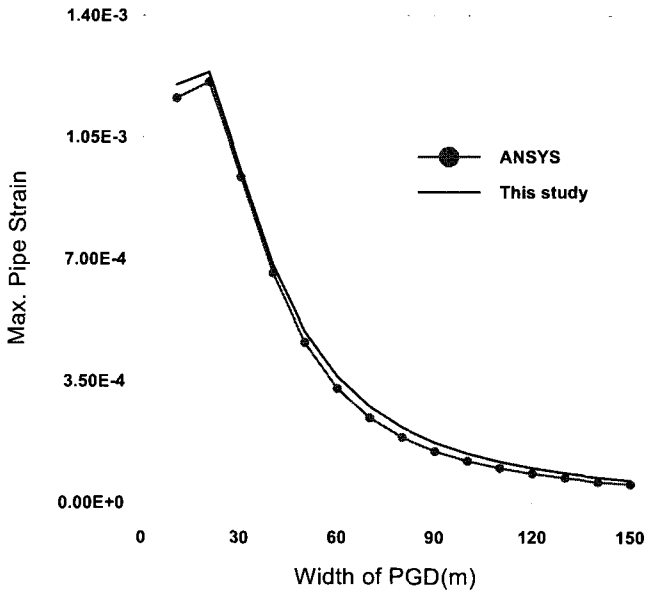


그림 12 영구지반변형 크기 0.2m에 대한 해석결과

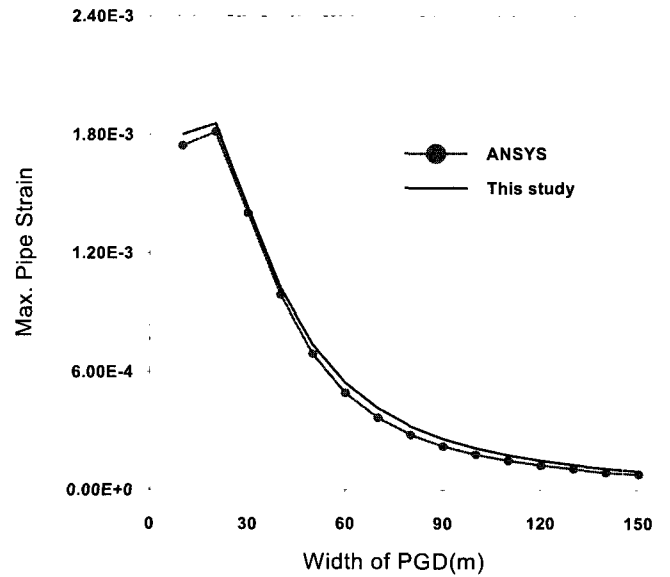


그림 13 영구지반변형 크기 0.3m에 대한 해석결과

또한 지반변형의 크기를 변화시켜가면서 해석을 수행하였는데, 그림 12는 영구지반변형의 크기가 0.2m일 때, 그림 13은 0.3m일 때의 해석결과를 각각 나타내고 있다. 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. 특히 기존의 상용 유한요소해석프로그램을 이용한 해석시 경계조건의 변화와 해석영역 및 지반강성계수의 설정방법에 따라 해석결과 상에서 상당한 차이가 나타날 수 있다는 것을 고려한다면 본 연구를 통해 제안된 해석식은 비교적 단순한 해석과정을 통해 유한요소해석의 수준과 동일한 해석결과를 얻을 수 있는 특징을 가지고 있는 것으로 판단된다.

반면, 그림 14는 상호작용력의 공간적인 분포, 즉 지반변형의 형상을 다양하게 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 먼저 지반변형의 형상 변화에 따라서 매설

관로의 응답특성이 확연하게 변화한다는 것을 확인할 수 있다.

이는 지반변형의 형상에 따라 실질적으로 매설관로에 작용하는 입력하중이 변화하면서 나타나는 현상인 것으로 판단되며 특히 지반변형의 형상에 따른 응답특성의 차이가 상당한 정도라는 데 주목할 필요가 있다. 그러므로 영구지반변형의 현상학적 복잡성에도 불구하고 각 부지조건에 따라 발생가능한 지반변형의 형상을 가능한 한 정확하게 추정함으로써 변형률의 상한선을 결정하는 작업이 요구된다는 결론을 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 먼저 횡방향 영구지반변형을 받는 지중매설관로에 관한 기존의 해석적 관계식을 개략적으로 검토한 후, 유한요소 해석과의 비교를 통해 기존의 해석적 관계식이 가지고 있는 적용적 한계성을 규명하였다. 또한, 전체적인 매설관로의 거동을 케이בל과 빔의 조합된 형태로 고려하고 지반변형의 다양한 형상을 대변하는 상호작용 형상계수를 도입함으로써, 지반변형의 폭과 무관하게 적용될 수 있는 동시에 다양한 지반변형의 형상을 반영할 수 있는 개선된 형태의 해석적 관계식을 제안하였다. 제안된 해석식의 합리적 적용성과 객관적 타당성을 검증하기 위해 유한요소 해석결과와 비교하였으며, 지반변형의 크기 및 형상 변화에 따른 매설관의 거동특성 변화 및 그 의의를 분석하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

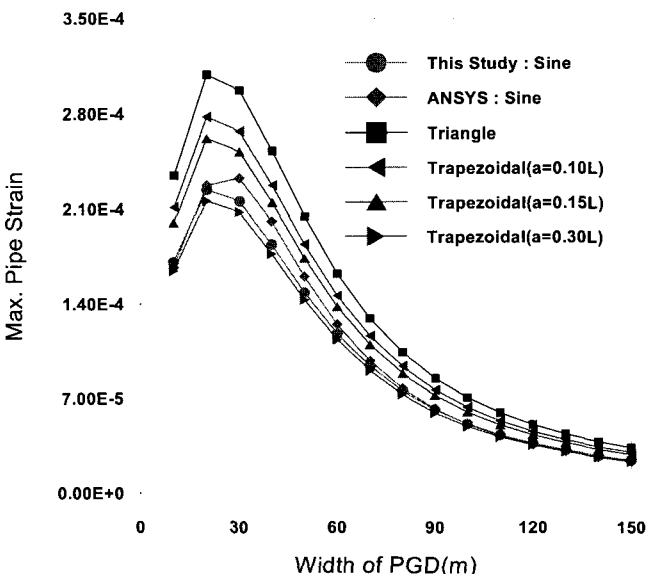


그림 14 영구지반변형의 형상에 대한 해석결과

(1) 기존의 해석적 관계식은 동일한 지반변형의 크기에 대해서 관 변형률의 상한선을 발생시킬 수 있는 특정한 형상의 지반변형만을 고려하고 있다는 것을 확인하였다. 또한, 기존의 해석적 관계식은 안전축을 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되는 반면, 다양한 지반변형의 형상에 따른 응답특성의 차이를 반영할 수 없으며 Sine 형

상의 영구지반변형을 기본으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 가지고 있음을 규명하였다.

- (2) 상호작용 형상계수의 도출을 위해 지반강성 감소현상과 지반변형 형상과의 연관성을 고려하여 수정된 형태의 관·지반 상호작용력을 도출하고 기존의 관·지반 상호작용력과의 비교해석을 수행한 결과, 비액상지반을 기준으로 산정된 기존의 관·지반 상호작용력은 횡방향 영구지반변형을 받는 매설관로 변형률의 상한선을 나타내고 있기에 안전축을 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되는 반면, 다양한 지반변형 형상을 반영할 수 없는 동시에 Sine 형상의 영구지반변형을 기본으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 가지고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 횡방향 지반변형을 받는 매설관로의 거동을 해석할 수 있는 해석적 관계식을 개선된 형태로 제안한 후 제안된 해석식의 합리적 타당성을 유한요소해석과의 비교분석을 통해 검증하였으며, 횡방향 지반변형을 받는 매설관로의 거동이 일정한 지반변형의 폭을 기준으로 확연하게 변화한다는 것을 확인하였다. 또한 지반변형의 형상에 따라 실질적으로 매설관로에 작용하는 입력하중이 변화하면서 상당한 정도의 응답특성의 차이가 나타난다는 것을 규명하였다. 따라서 영구지반변형의 현상학적 복잡성에도 불구하고 각 부지조건에 따라 발생가능한 지반변형의 형상과 크기 및 폭 등을 가능한 한 정확하게 추정함으로써 변형률의 상한선을 결정하는 작업이 요구되는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(Korea Earthquake Engineering Research Center) 2단계 사업의 일환인 4-3과제(R11-1997-045-10/004-00) 「지반변형 발생시 지반-라이프라인 상호작용력 산정」의 일부로서 본 연구를 가능하게 한 지진공학연구센터의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. O'Rourke, T. D., Grigoriu, M. D., and Khater, M.M., "A State of the Art Review: Seismic Response of Buried Pipelines," *Decade of Progress in Pressure Vessel Technology*, ASME, 1985.
2. O'Rourke, T. D., "Critical Aspects of Soil-Pipeline Interaction for Large Ground Deformation," *Proceedings of the First Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline*, Technical Report, 1988, pp. 118-126.
3. 김태욱, 임윤목, 김문겸, "지중매설관로의 거동특성 해석을 위한 관·지반 상호작용력의 산정," 지진공학회 논문

- 집, Vol., No., 2003, pp.
4. O'Rourke, M. J. and Liu, X., "Response of Buried Pipelines subject to Earthquake Effects," MCEER Monograph No. 3, 1999. pp. 77-87.
5. Hamada, M. and O'Rourke, T. D., "Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes," Technical Report, NCEER-92-0001, Vol. 1, 1992.
6. Hamada, M., Yasuda, S., and Emoto, K., "Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacements," *Association for the Development of Earthquake prediction*, Japan, 1986, 87 pp.
7. O'Rourke, M. J., "Approximate Analysis Procedures for Permanent Ground Deformation Effects on Buried Pipelines," *Proceedings from the Second Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline*, Technical Report NCEER-89-0032, 1989, pp. 336-347.
8. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, ASCE, New York, 1984.
9. O'Rourke, M. J. and Nordberg, G., "Analysis Procedures for Buried Pipelines Subject to Longitudinal and Transverse Permanent Ground Deformation," *Proceedings from the Third Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, Technical Report NCEER-91-0001, 1991, pp. 439-453.
10. Bardet, J. P., Mace, N., and Tobit, T., "Liquefaction-induced Ground Deformation and Failure," Technical Report to PEER/PG&E, University of Southern, 1999.
11. Bartlett, S. F. and Youd, T. L., "Empirical Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 4, 1995, pp. 316-327.
12. Baziari, M., "Engineering Evaluation of Permanent Ground Deformation Due to Seismically-Induced Liquefaction," Dissertation for Ph.D. in Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, 1991, 27 pp.
13. 김문겸, 임윤목, 김태욱, "횡방향 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 해석모형 및 거동특성에 대한 연구," 대한토목학회 논문집, 제22권, 제3-A호, 2002, pp. 519-531.
14. Ishihara, K., Taguchi, Y., and Kato, S., "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, 1992, pp. 639-653.
15. Takada, S., Tanabe, K., Yamajyo, K., and Katagiri, S.

- "Liquefaction Analysis for Buried Pipelines," *Proceedings of the Third International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1987.
16. Takada, S. and Tanabe, K., "Estimation of Earthquake Induced Settlements for Lifeline Engineering," *Proceedings of the Ninth Conference Earthquake Engineering*, Vol. 7, 1988, pp. 109-114.
17. Yoshida, T. and Uematsu, M., "Dynamic Behavior of a Pile in Liquefaction Sand," *Proceedings of the Fifth Japan Earthquake Engineering Symposium*, 1978, pp. 657-663.(in Japanese)
18. Matsumoto, H., Sasaki, Y., and Kondo, M., "Coefficient of Subgrade Reaction on Pile in Liquefied Ground," *Proceedings of the Second National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1987, pp. 827-828.(in Japanese)
19. Yasuda, S., Saito, K., and Suzuki, N., "Soil Spring Constant on Pile in Liquefied Ground," *Proceedings of the 19th JSCE Conference on Earthquake Engineering*, 1987, pp. 189-192.(in Japanese)
20. 일본가스협회, "가스도관내진설계지침", 1982.
21. 일본수도협회, "수도시설내진공법지침·해설", 1997.