

# 지중매설관로의 거동특성 해석을 위한 관·지반 상호작용력의 산정

## Estimation of Pipeline·Soil Interaction Force for the Response Analysis of Buried Pipeline

김 태 옥\*                      임 윤 묵\*\*                      김 문 겸\*\*\*  
Kim, Tae Wook                      Lim, Yun Mook                      Kim, Moon Kyum

### 국문요약

지중매설관로의 거동특성 해석은 수치모형의 적용 및 해석적 관계식의 적용을 통해 주로 수행되며, 이러한 수치모형 및 해석적 관계식에 있어서 관과 지반의 경계면에서 작용하는 관·지반 상호작용력은 핵심적인 요소로서 작용하게 된다. 그러나 기존에 적용되고 있는 관·지반 상호작용력은 기본적으로 비액상지반에 대한 실내/외 실험을 통해 도출되었기에, 액상지반에 대해서는 적용적인 한계성을 다소 가지고 있는 것으로 판단된다. 특히 액상화-영구지반변형을 받는 지중매설관로의 거동특성을 합리적으로 해석하기 위해서는 변형지반의 특성을 고려한 관·지반 상호작용력의 산정이 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 액상지반에서의 지반강성 감소 현상 및 강성감소에 의해 공간적으로 표출되는 지반변형의 형상을 공학적으로 반영할 수 있는, 개선된 형태의 관·지반 상호작용력을 도출하였다. 이를 위해 기존의 상호작용력에 대한 검토를 수행하였으며 국외의 실험적 연구결과들을 참조하였다. 제안된 상호작용력을 종방향 지반변형에 대한 해석적 관계식에 적용하고 비교해석을 수행함으로써 다양한 지반변형의 형상에 따른 매설관로 응답특성의 변화를 확인하였다. 또한, 기존 해석식이 가지고 있는 적용상의 유의점을 규명하였으며, 관의 두께, 매설심도 등의 변화에 따른 매설관로의 거동특성 변화를 분석하였다. 결과적으로 본 연구를 통해서 지중매설관로의 지진해석 및 내진설계에 적용될 수 있는 해석모형의 기초에 대한 확장적 보완이 이뤄질 것으로 사료된다.

**주요어** : 지중매설관로, 관·지반 상호작용력, 액상화-영구지반변형, 영구지반변형의 형상

### 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. When applying these methods, so called interfacial pipeline·soil interaction force plays an dominant part. Currently used interaction force is made up of indispensable mechanical and physical components for the response analysis of buried pipeline. However, it has somewhat limited applicability to the liquefied region since it is based on the experimental results for the non-liquefied region. Therefore, in this study, improved type of pipeline·soil interaction force is proposed based on the existing interaction force and experimental research accomplishments. Above all, proposed interaction force includes various patterns of PGD or spatial distributions of interaction force caused by the decrease of soil stiffness. Through the comparison of numerical results using the proposed and the existing interaction force, relative influences of interaction force on the response of pipeline are evaluated and noticeable considerations in the application of semi-analytical relationship are discussed. Moreover, analyses due to the change of pipe thickness and burial depth are performed.

**Key words** : buried pipeline, pipeline·soil interaction force, PGD due to liquefaction, PGD patterns

## 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 원활하게 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 인해 2차적인 의미에서 막대한 규모의 사회·경제적인 피해가 도출되기 때문인 것으로 판단된다.<sup>(1)</sup> 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 공학적인 지진해석 및 내진설계 기법의 개발에 중점을 두고 다양한 연구를 진행시켜 왔다.

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

\* 일반회원·한국철도기술연구원 퀘드·노반 연구팀, 주임연구원  
(대표저자 : karisma\_2k@yonsei.ac.kr)

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

\*\*\* 정회원·연세대학교 공과대학 사회환경·시스템 공학부 토목전공, 교수  
본 논문에 대한 토의를 2003년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2003. 3. 28 / 심사종료일 : 2003. 4. 24)

반변형 자체에 대한 연구와 함께 영구지반변형을 받는 지중매설관로의 거동 특성에 대한 일반적인 연구가 진행되어 왔는데 현재까지의 연구결과를 간략하게 정리하면 그림 1과 같다.

그림 1을 통해 표현된 현재까지의 연구결과를 개략적으로 살펴보면, 먼저 영구지반변형 자체에 대한 연구는 액상화-영구지반변형의 주요 해석요소라고 이야기할 수 있는 지반변형의 크기 및 형상을 예측하기 위한 경험적, 해석적, 수치적 방법의 정형화를 중심으로 진행되어 왔으며, 의미있는 연구 성과에도 불구하고 영구지반변형 현상 자체의 현상학적인 복잡성으로 인해 설계기준으로 적용될 수 있는 구체적인 연구결과가 아직 확보되지 못하고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 반면, 영구지반변형에 대한 지중매설관로의 거동에 관한 연구는 지반변형에 대한 매설관로의 주축방향(중방향/횡방향 영구지반변형) 및 매설관로의 구조적인 형식(연속관/분절관)에 기준하여 단순한 형태의 해석적 관계식 및 수치해석 모형의 적용을 이용한 기본적인 거동특성 규명을 중심으로 진행되어 왔으나, 다양한 연구성과에도 불구하고 액상지반에 매설된 지중매설관로의 거동특성에 관한 연구가 상당부분 부족한 상태로 진행되어 왔음을 확인할 수 있다.<sup>(3)</sup> 특히 이러한 특징은 기존에 적용되고 있는 관·지반 상호작용력 자체가 주요한 해석적 요소들을 포함하고 있음에도 불구하고 기본적으로 비액상지반에 대한 실내/외 실험을 통해 도출된 바, 액상지반에 대해서는 적용적인 한계성을 다소 가지고 있기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 액상화-영구지반변형을 받는 지중매설관로의 합리적인 거동특성 해석을 위해, 액상지반에서의 지반강성 감소 현상 및 강성감소에 의해 공간적으로 표출되는 지반변형의 형상을 공학적으로 반영할 수 있는 개선된 형태의 관·지반 상호작용력을 제안하였다. 이를 위해 영구지반변형의 현상학적 특징, 기존에 사용되고 있는 관·지반 상호작용력 및 해석적 관계식에 대한 상세한 검토를

수행하였으며 변형지반에서의 강성감소와 관련된 국외의 실험적 연구결과들을 참조하였다. 제안된 상호작용력을 중방향 지반변형에 대한 해석적 관계식에 적용하고 이를 기존의 해석결과와 비교함으로써 해석결과에 미치는 상호작용력의 영향을 정량적으로 평가하였으며, 해석적 관계식의 적용상의 유의점을 규명하였다. 또한, 관의 두께, 매설심도 등의 변화에 따른 매설관로의 거동특성 변화를 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 특징

### 2.1 액상화-영구지반변형의 현상학적 특징 및 주요 해석요소

영구지반변형(Permanent Ground Deformation : 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 지반의 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 피해 사례가 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.<sup>(4)</sup>

그러므로, 이미 1960년대부터 미국 및 일본에서는 액상화-영구지반변형의 발생원인 및 현상학적 규명을 목적으로 다양한 측면에서의 연구가 진행되어 왔는데 이를 간략하게 정리하면 그림 2와 같다.

그림 2를 통해 표현된 현재까지의 연구결과를 개략적으로 살펴보면, 먼저 영구지반변형을 받는 지중매설관로의 거동 특성을 분석하는 데 있어서 결정적인 인자로서 작용하는 지반변형의 크기와 관련하여 실험적, 경험적, 해석적인 측면에서 각각 다양한 연구가 진행되어 왔다는 것을 알 수 있다. 반면, 지반변형의 공간적 불균일성으로 인해 나타나는 지반변형의 형상과 관련해서는 매설관로에 대한 지반변형의 상대적인 방향성을 기준으로 실측자료에 근거하여 지반변형의 형상을 수학적으로 이상화시켜 표현하려는 노력이 진행되어 왔다는 것을 확인할 수 있다. 또한 지반변형의 범위를 나타내는 지반변형의 폭에 대해서는 지반변형의 크기와 폭 사이에 비례적인 관계가 성립한다는 일반적인 결과가 도출된 바 있다.<sup>(5)</sup>

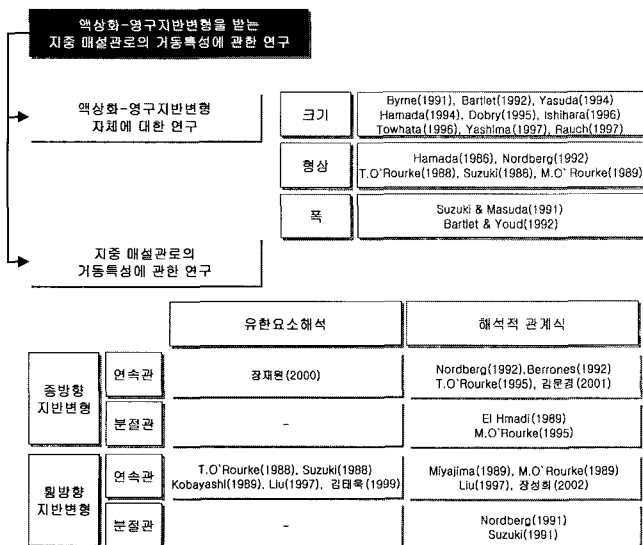


그림 1 액상화-영구지반변형 및 매설관로 거동특성에 대한 국내/외 연구동향

액상화-영구지반변형에 대한 국외 연구동향

액상화-영구지반변형의 크기 추정	
Laboratory	Dobry(1995) : Centrifuge Modeling Towhata(1996/97), Kokusho(1998) : Shaking Table
Analytical	Yegian(1991), Baziar(1992), Jibson(1993), Byrne(1991) : Newmark Block Model Towhata(1997) : Minimum Potential Energy Model Hamada(1994), Yashima(1997) : Viscous Model Herman(1982), Pastor(1985), Bardet(1986), Oka(1982), Taguchi(1995) Scott(1993), Bardet(1993), Smith(1994), Zienkiewicz(1990) : Constitutive Model
Empirical	Youd & Perkins(1987) : Liquefaction Severity Index Hamada(1986) : Simple Relationship Bartlett & Youd(1992) : Multi Linear Regression Model Rauch(1997) : Modified Multi Linear Regression Model
액상화-영구지반변형의 형상 추정	
Longitudinal	Hamada(1986), Nordberg(1992) : Block, Ramp, Ramp Step, Ridge
Transverse	T.O'Rourke(1988) : Cosine Suzuki(1988), M.O'Rourke(1989) : Modified Beta
액상화-영구지반변형의 폭 추정	
	Suzuki & Masuda(1991) Bartlett & Youd(1992)

그림 2 액상화-영구지반변형 현상에 대한 국외 연구결과

결론적으로 현재까지의 연구결과를 기준으로 할 때, 영구지반변형에 대한 지중매설관로의 거동특성 해석시 중요하게 고려되어야 할 영구지반변형의 해석적인 요소는 지반변형의 크기, 형상 및 폭의 세 가지로 축약될 수 있다.

2.2 지반변형의 방향성에 따른 매설관로의 거동특성 변화

영구지반변형의 해석적인 요소와는 별도로 액상화-영구지반변형에 의해 실제적으로 발생한 지중매설관로의 파괴 양상을 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 3(a)와 그림 3(b)의 두 가지로 크게 구분할 수 있다. 먼저 그림 3(a)는 지중매설관로의 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 3(b)는 지중매설관로의 주축이 영구지반변형의 방향과 평행하게 되는 경우를 나타낸 것으로서 이 때의 지반변형은 종방향 영구지반변형으로 정의되며, 이 경우 매설관로의 파괴는 지반변형 시점부에서

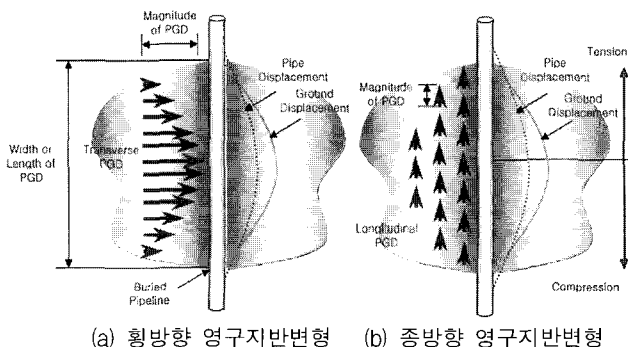


그림 3 지반변형의 방향성에 따른 매설관로 거동특성의 변화

의 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.<sup>(6)</sup>

2.3 액상화-영구지반변형의 발생에 따른 지반강성의 감소

액상화-영구지반변형은 과잉간극수압의 증가에 따른 유효응력의 상실로 인해 나타나는 현상이라고 말할 수 있는데, 특히 액상화 발생시 과잉간극수압의 증가와 동시에 지반의 강성이 현저하게 감소되는 점에 주의할 필요가 있다. 즉, 액상화 가능성이 큰 토질로 퇴적된 지반은 지진의 시작단계에서는 원래의 강성을 유지하지만 지진이 끝날 즈음에는 초기의 강성에 비해 매우 낮은 강성을 보이게 된다는 것이다. 이러한 지반강성의 감소 현상을 정량화하기 위해 많은 연구자들 - Yoshida & Uematsu<sup>(7)</sup>(1978), Takada<sup>(8)</sup>(1987), Matsumoto<sup>(9)</sup>(1987), Yasuda<sup>(10)</sup>(1987), Takada & Tanabe<sup>(11)</sup>(1988) - 에 의해 비액상지반의 강성에 대한 비로서 액상화된 지반의 강성을 산정하려는 연구가 수행되어 왔는데, 다년간의 연구를 통해 액상화 종결 후를 기준으로 액상지반의 지반강성이 최소 1/100에서 최대 1/3000 정도로 감소한다는 주장이 도출된 바 있다.

이러한 주장의 유효성과 지반강성 감소범위의 최대값을 실질적으로 확인하기 위해서 본 논문에서는 Ishihara가 수행한 대규모 진동대 실험결과<sup>(12)</sup>를 주로 참조하였다. 사용된 시료는 Toyora Sand로서 시료의 물성은 표 1과 같다. 수행된 진동대 실험의 개략도는 그림 4와 같고 0.20g의 가속도로 15초 간격으로 3Hz의 진동하중을 sine 파 형태로 재하함으로써 액상화 현상을 유발하였으며 그림 5와 같은 지반강성비의 변화곡선을 도출하였다.

표 1 Ishihara의 대규모 진동대 실험시 사용 시료<sup>(12)</sup>

구분	비중	최소간극비	최대간극비	유효입경	균등계수
단위	G <sub>s</sub>	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	D <sub>10</sub>	C <sub>u</sub>
물성치	2.65	0.63	0.96	0.16	1.50

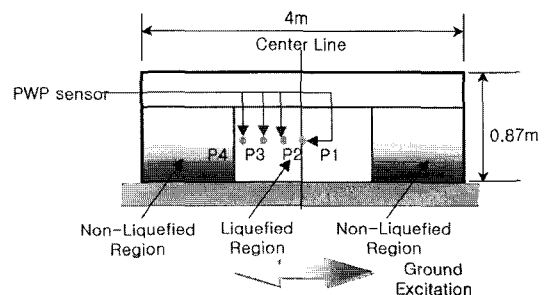


그림 4 Ishihara의 대규모 진동대 실험 개요도

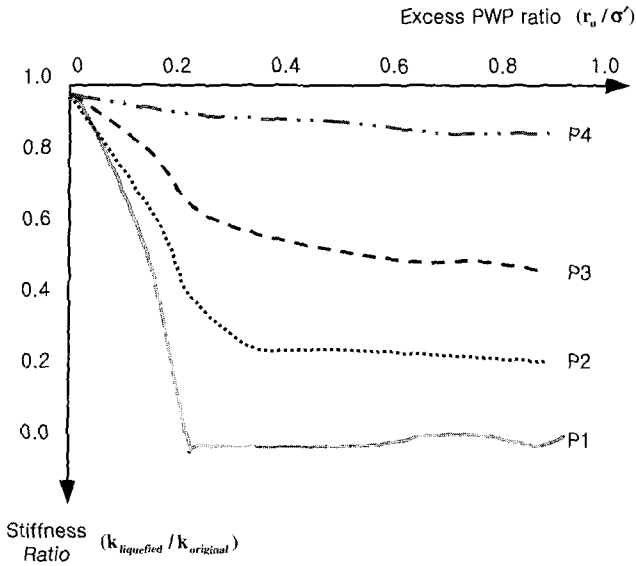


그림 5 진동대 실험결과에 의한 지반강성비 변화곡선

그림 5를 보면 진동하중 재하 후 시료의 중심부에 가까울수록 과잉간극수압비의 증가에 따라 급격하게 지반의 강성이 감소한다는 것을 확인할 수 있다. Ishihara는 여러 차례의 반복적인 실험결과를 토대로 액상지반에서 나타나는 지반강성의 감소는 액상지반의 중심부에서 최대 1/3000 정도로 나타나며, 비액상지반의 경계층에 인접하게 될수록 지반강성의 변화율이 감소한다는 결론을 도출해냈다.

따라서 현재까지의 연구결과를 종합하면 액상화된 지반에서의 지반강성은 원 지반의 지반강성에 비해 최소 1/100, 최대 1/3000 정도까지 감소가 가능한 것으로 사료되며, 특히 액상지반의 중심부에서 멀어질수록 나타나는 지반강성 감소율의 차이를 고려했을 때 액상지반 전체에 대해서 지반강성의 변화는 공간적으로 특정한 분포형상을 가지게 되는 것으로 판단된다.<sup>(11),(12)</sup>

### 3. 관·지반 상호작용력의 제안

액상화-영구지반변형을 받는 지중매설관로의 거동특성 해석은 수치모형의 적용 및 해석적 관계식의 적용을 통해 주로 수행되므로 이들 각각에 대해 간략하게 살펴보고, 수치모형 및 해석적 관계식에 있어서 핵심적인 요소로서 작용하게 되는 관·지반 상호작용력을 집중적으로 검토한 후, 기존에 사용되고 있는 관·지반 상호작용력의 적용적 한계성을 개선할 수 있는 수정된 형태의 관·지반 상호작용력을 도출하였다.

#### 3.1 수치해석 모형의 구성 및 적용에 대한 상호작용력의 영향

먼저 수치해석 모형에 대해 살펴보면, 그림 6과 같이 표현되는 매설관로 시스템을 탄성지반 위에 지지된 보로서 모형화하는 방법이 일반적으로 이용되며 해석상의 편의를 위해 매설관로는 영구지반변형이 발생하는 지역과 영구지반변형이 발생하지 않는 지역을 동시에 통과하는 것으로 고려하게 된다. 이 경우 일반적으로 매설관로는 그림 7과 같이 Beam

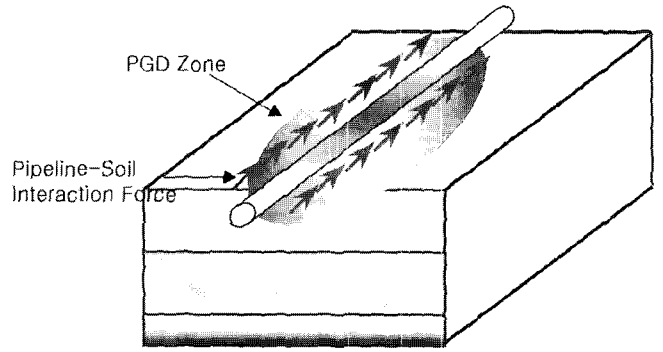


그림 6 영구지반변형을 받는 지중매설관로 시스템

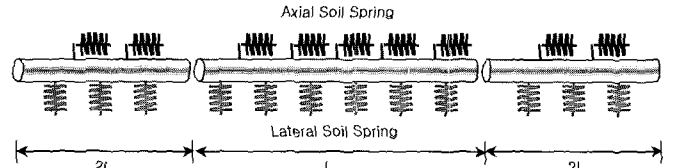


그림 7 영구지반변형을 받는 지중매설관로 시스템의 기본적인 수치해석 모형

또는 Shell 유한요소로서 표현되는 반면, 주변지반의 구속효과는 등가지반강성(Equivalent Soil Stiffness)을 갖는 지반스프링으로서 표현된다.<sup>(13),(14)</sup>

매설관로 자체에 대한 모형화 방법이 전체 해석결과에 미치는 영향이 상대적으로 미비하다는 점을 고려한다면, 영구지반변형을 받는 매설관로의 거동특성 해석시 등가지반강성의 산정이 상당히 중요한 문제로 작용한다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 ASCE에서는 이 문제의 해결을 위해 TCLEE (Technical Committee on Lifeline Earthquake Engineering)와 CGLFL(Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines)의 협조 하에 다년간의 실내/외 실험을 수행하였으며, 그림 8과 같이 표현되는 탄·소성 하중-변위 곡선에 근거하여 매설관로의 축방향과 횡방향에 대한 등가지반강성을 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같은 형태로 제안한 바 있다.<sup>(15)</sup>

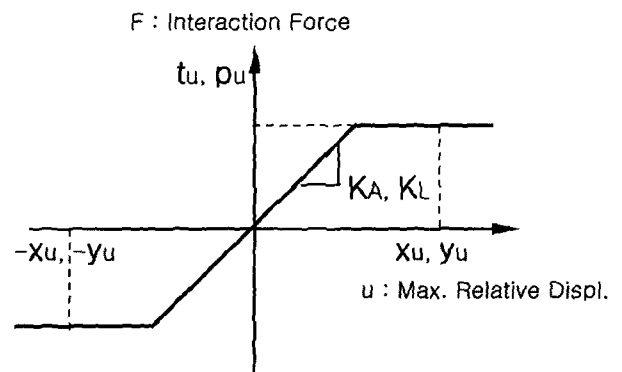


그림 8 ASCE에서 제시한 등가지반강성의 개념도

$$K_{axial} = 2 \cdot t_u / x_u ; x_u = 2.54 \sim 5.08 \cdot 10^{-3} m \quad (1)$$

$$K_{lateral} = 2.7 \cdot p_u / y_u ; y_u = (0.02 \sim 0.10) \cdot (H + D/2) \quad (2)$$

식 (1) 및 식 (2)를 상세하게 고찰하면 축방향 지반강성

$K_{axial}$ 은 관의 축방향 최대상대변위  $x_u$ 와 축방향 관·지반 상호작용력  $t_u$ 에 의해 결정되며, 횡방향 지반강성  $K_{lateral}$  역시 이와 유사하게 관의 횡방향 최대상대변위  $y_u$ 와 횡방향 관·지반 상호작용력  $p_u$ 에 의해 결정된다는 것을 확인할 수 있다. 각 방향에 대해 최대상대변위값의 범위가 이미 자체적으로 설정되어 있기에, 각 방향의 등가지반강성은 전적으로 경계면 관·지반 상호작용력에 의해 결정된다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 영구지반변형을 받는 매설관로 거동특성 해석에 있어서 주요한 해석요소로 작용하는 등가지반강성의 합리적인 산정을 위해서는 1차적으로 관·지반 상호작용력에 대한 객관적인 정량화 작업이 요구된다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 해석적 관계식에 대한 상호작용력의 영향

M.O'Rourke와 Nordberg<sup>(16)</sup>는 Hamada등<sup>(17),(18)</sup>에 의해 수행된 지진피해사례 분석결과에 기초하여 종방향 영구지반변형에 대한 연속관의 거동특성을 해석할 수 있는 해석적 관계식을 제안한 바 있다. 제안된 해석적 관계식은 관의 재료적 특성은 탄성으로, 관과 지반의 경계면에서의 거동은 탄소성으로 가정된 상태에서, 전체 해석영역을 지반과 매설관의 상대변위가 일정한 구간과 지반과 매설관의 상대변위가 선형적으로 변하는 구간으로 구분한 후, ASCE 관·지반 상호작용력의 균등한 분포를 가정하고, 각 영역 경계에서의 연속조건과 평형조건을 이용하여 매설관로에 발생하는 최대 축방향 변형률을 산정한 것이다.

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\alpha L}{2L_{em}}, & L < 4L_{em} \\ \frac{\alpha L}{\sqrt{LL_{em}}}, & L > 4L_{em} \end{cases} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 지반변형의 형상을 좌우하는 계수로서 지진피해사례 관측결과와 대부분을 차지하는 Block 형상의 지반변형(그림 9)에 대해 1.0의 고정된 상수값을 가지게 되며,  $L$ 은 영구지반변형이 발생한 지역의 길이, 즉 영구지반변형의 폭을 의미한다. 반면,  $L_{em}$ 은 그림 10에 표시된 바와 같이 지반변형과 동일한 관의 변형이 나타나는, 관과 지반의 경계면에서의 상호작용력  $t_u$ 가 일정하게 작용하는 구간으로서

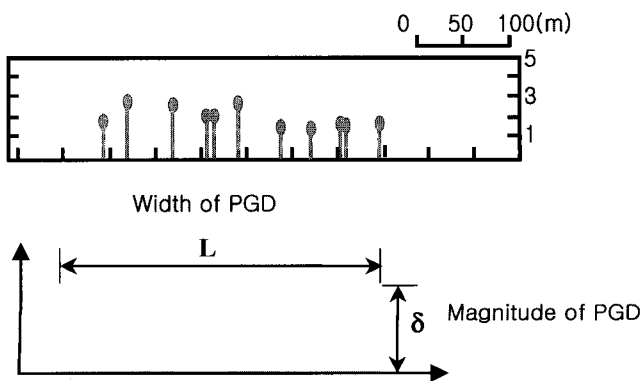


그림 9 Block 형상의 종방향 영구지반변형

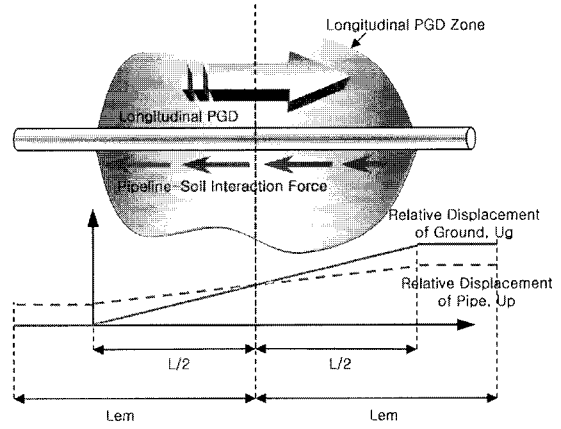


그림 10 M.O'Rourke 해석식의 개념도

관의 축방향 강성  $EA$ 와 상호작용력  $t_u$ 에 의해 식 (4)와 같이 표현된다.

$$L_{em} = \frac{EA}{t_u} \quad (4)$$

따라서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 영구지반변형을 받는 매설관로의 거동특성을 해석할 경우, 실질적인 매설관의 응답은 관·지반 상호작용력에 의해서 결정된다는 사실을 쉽게 유추할 수 있다.

3.3 기존 관·지반 상호작용력의 적용적 한계성

전술했던 바와 같이 액상화-영구지반변형을 받는 지중매설관로의 거동특성 해석시 주로 이용되는 수치모형 및 해석적 관계식의 경우, 매설관로의 응답은 실질적으로 관·지반 상호작용력  $t_u$  또는  $p_u$ 에 의해 결정된다. 해석상의 편의를 위해 영구지반변형 발생시 지반과 매설관로의 경계면에서 작용하는 관·지반 상호작용력은 액상화-영구지반변형을 기준으로 액상화가 발생되지 않는 지반의 경우와 액상화가 발생하는 지반의 경우로 크게 구분할 수 있는데, 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.<sup>(19),(20)</sup>

$$\text{Longitudinal } t_u = \mu \cdot (\gamma H) \cdot \frac{(1 + K_0)}{2} \cdot (\pi D) \quad (5)$$

$$\text{Transverse } p_u = (\gamma \cdot H) \cdot N_{qh} \cdot (D) \quad (6)$$

여기서,  $\mu = k \cdot \tan \phi_s$ 는 경계면 마찰계수,  $\gamma$ 는 지반의 단위 중량,  $H$ 는 매설심도,  $K_0$ 는 횡토압계수,  $D$ 는 관의 직경,  $N_{qh}$ 는 수평지력계수를 각각 의미한다. 식 (5)와 (6)을 상세하게 고찰하면 경계면에서 작용하는 관·지반 상호작용력은 그림 11에 나타난 바와 같이 관이 위치한 매설심도를 기준으로 관의 단면부에 가해지는 수직, 수평토압 및 마찰효과만을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

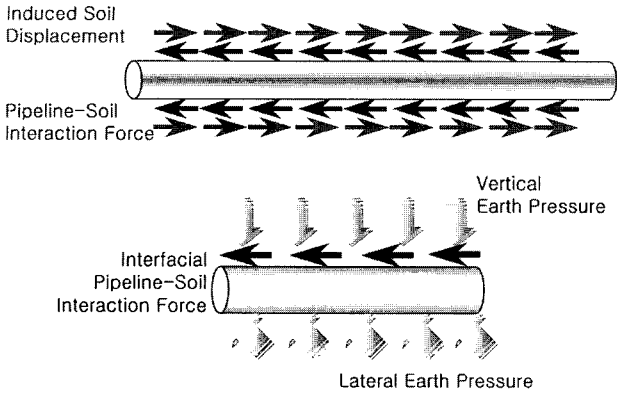


그림 11 기존 관·지반 상호작용력의 개념도

결론적으로 기존의 관·지반 상호작용력은 근본적으로 비액상 지반에 대한 실내/외 실험결과에 기초하고 있기에 액상지반에 대해서는 적용상의 한계성을 다소 가지고 있는 것으로 판단되는 바, 본 연구에서는 2.3에서 전술했던 국외의 실험적 연구결과에 기초하여 액상지반에서의 지반강성 감소 현상 및 강성감소에 의해 공간적으로 표출되는 지반변형의 형상을 적극적으로 반영할 수 있는, 개선된 형태의 관·지반 상호작용력을 다음과 같은 과정을 통해 도출하였다.

3.4 지반강성의 감소를 고려한 관·지반 상호작용력의 제안

2.3에서 전술한 바와 같이 Ishihara, Takada, Yoshida, Uematsu, Matsumoto, Yasuda, Tanabe 등의 연구결과 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 의사적인 강성을 가지게 된다고 주장한 바 있다.<sup>(9),(12)</sup>

지반의 액상화와 영구지반변형 자체가 과잉간극수압의 발생에 따른 지반강성의 감소현상과 직접적으로 연결되며, 공간적으로 나타나는 지반강성의 분포는 상호작용력의 분포형상 및 지반변형의 다양한 형상으로 표현된다고 이야기할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 상호연관성(지반강성의 공간적인 분포형상=상호작용력의 공간적인 분포형상=지반변형의 다양한 형상)을 적극적으로 고려함으로써 기존에 사용되고 있는 상호작용력을 영구지반변형이 발생하는 액상지반에 적용될 수 있도록 수정된 형태로 도출하였다. 먼저 기존의 상호작용력 대 액상지반에서의 상호작용력의 변화를 그림 12와 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. 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 (7)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 비액상지반의 상호작용력  $IF$ 는 종방향에 대해서는  $t_u$ 로, 횡방향에 대해서는  $p_u$ 로 표현된다.

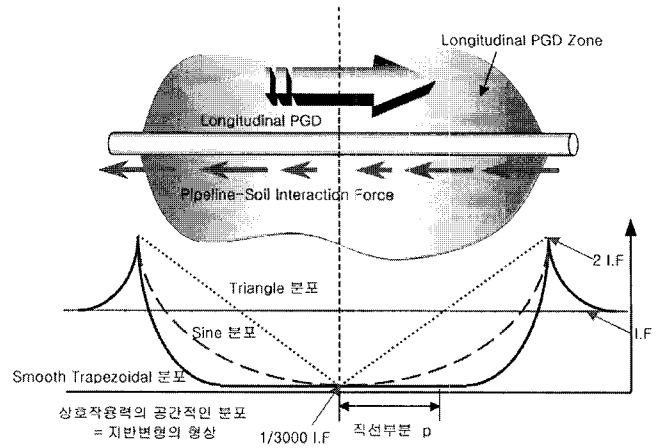


그림 12 제안된 관·지반 상호작용력의 개념도

또한 지반의 강성분포와 상호작용력의 공간적인 변화분포가 실제적인 지반의 변형 형상과 유사하다는 점을 고려한다면 보다 실제적인 지반변형의 형상을 반영하기 위해 그림 13에서 보는 바와 같이 다양한 상호작용력의 공간적인 변화분포, 즉 지반변형의 다양한 형상을 가정할 수 있으므로 삼각형 형상에 대해서는 식 (8)을, 유연한 사다리꼴 형상에 대해서는 식 (9)를 적용할 수 있다. 식 (9)에서  $p$ 는 유연사다리꼴의 평탄부를 나타내는 형상계수이다.

$$IF_{liquefied} = 2 \cdot IF \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} + \frac{2}{3000\pi}\right) \tag{7}$$

또한 지반의 강성분포와 상호작용력의 공간적인 변화분포가 실제적인 지반의 변형 형상과 유사하다는 점을 고려한다면 보다 실제적인 지반변형의 형상을 반영하기 위해 그림 13에서 보는 바와 같이 다양한 상호작용력의 공간적인 변화분포, 즉 지반변형의 다양한 형상을 가정할 수 있으므로 삼각형 형상에 대해서는 식 (8)을, 유연한 사다리꼴 형상에 대해서는 식 (9)를 적용할 수 있다. 식 (9)에서  $p$ 는 유연사다리꼴의 평탄부를 나타내는 형상계수이다.

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

$$IF_{liquefied} = 2IF - \frac{1}{2} \cdot \left(2 - \frac{1}{3000}\right) (1 + p) \cdot IF \approx (1 - p) \cdot IF \tag{9}$$

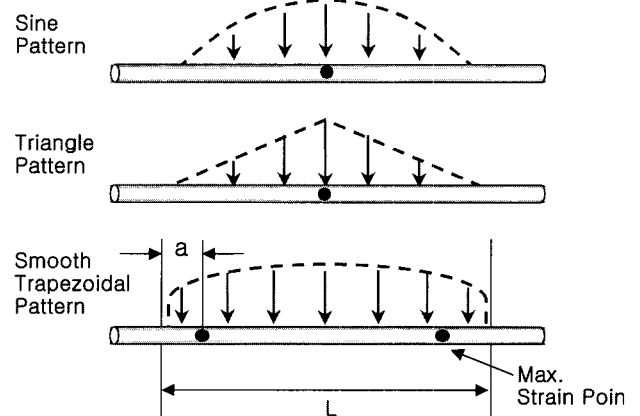


그림 13 강성감소의 공간분포에 의한 다양한 지반변형의 형상

#### 4. 제안된 관·지반 상호작용력을 이용한 매설관로의 거동 특성 해석

제안된 상호작용력을 종방향 지반변형에 대한 해석적 관계식에 적용하고 이를 기존의 해석결과와 비교함으로써 해석결과에 미치는 상호작용력의 영향을 정량적으로 평가하였으며, 해석적 관계식의 적용상의 유의점을 규명하였다. 또한, 관의 두께, 매설심도 등을 다양하게 변화시켜가면서 해석을 수행함으로써 각각의 해석인자가 매설관로의 거동특성에 미치는 영향정도 등을 살펴보았다.

##### 4.1 해석대상 및 해석조건

입력하중인 영구지반변형의 크기는 국내 계기지진피해사례의 절대적인 부족으로 인해 그림 14에 나타난 바와 같은 국외 연구자들의 경험식<sup>(21)-(23)</sup>을 참조하여 국내 액상화 평가기준인 Mw 6.5와 단층거리 10km 이상을 기준으로 최대 1.0m 정도의 영구지반변형이 발생하는 것으로 가정하였다.

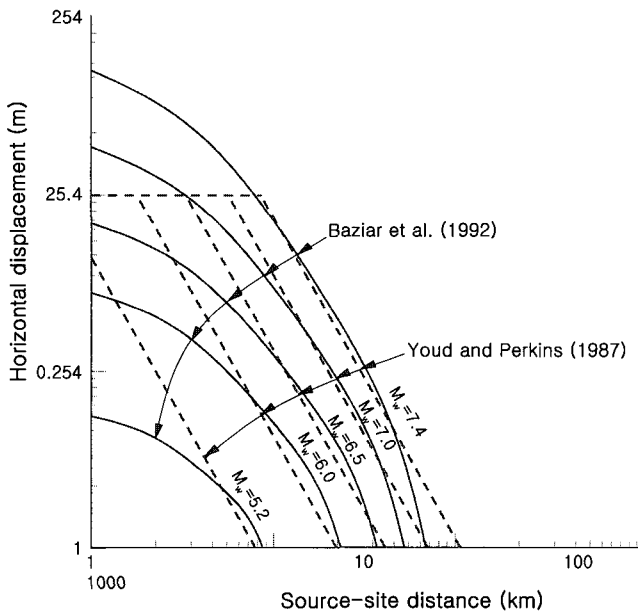


그림 14 액상화-영구지반변형의 크기 추정

미국 및 일본의 강진자료에 기초하여 산정된 수치이긴 하나 영구지반변형 현상 자체의 불확실성을 고려하고 해석결과와 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 매설관로의 내진안정성을 확보한다는 측면에서는 상대적인 합리성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

또한, 영구지반변형의 폭은 200~600m로, 영구지반변형의 형상은 그림 13에서 나타난 바와 같이 sine, triangle, smooth trapezoidal의 다양한 형상을 갖는 것으로 가정하였다. 반면, 매설관은 국내에서 일반적으로 사용되는 수도용 강관을 해석대상으로 설정하였으며 제반 입력조건으로 사용된 관의

표 2 관의 제원 및 지반 물성

내용		입력치	
관 제원	탄성계수	$E$	100 GPa
	항복응력	$\sigma_y$	300 MPa
	외경	$D$	0.30 m
	두께	$t$	6.5, 13.5, 19.5 mm
지반 물성	단위중량	$\gamma$	16.10 kN/m <sup>3</sup>
	매설심도	$H$	1.0, 1.5, 2.0 m
	축방향강성	$K_A$	7.25 MPa
	축방향저항력	$f'_x$	7.40 kN/m

제원과 물성 및 주변지반의 조건은 표 2와 같다.

##### 4.2 관·지반 상호작용력의 영향 평가 및 해석적 관계식의 적용상 유의점

그림 15는 sine 형상의 공간적 분포를 갖는 수정된 관·지반 상호작용력을 기존의 해석적 관계식에 적용한 해석결과를 비액상 지반을 기준으로 산정된 기존의 관·지반 상호작용력을 이용한 해석결과와 비교한 것이다. 지반변형의 크기가 증가함에 따라 변형률이 증가하는 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.

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 16으로 나타냈다. 그림 16을 살펴보면 상호작용력의 공간적인 분포, 즉 지반변형의 형상이 다양하게 변화하게 됨에 따라 변형률의 차이가 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있는데 먼저 삼각형 형상과 비액상 지반을 기준으로

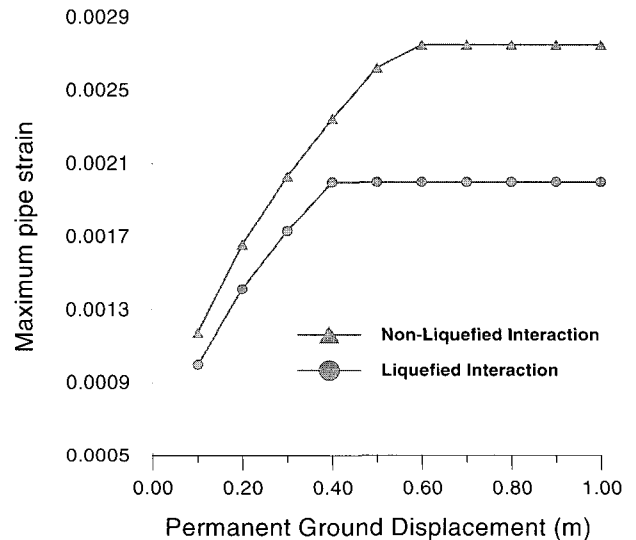


그림 15 제안된 관·지반 상호작용력을 이용한 비교해석

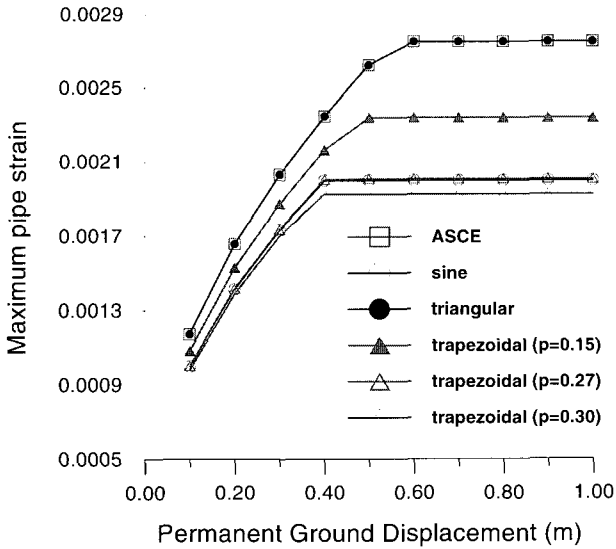


그림 16 지반변형의 형상에 따른 매설관로 거동특성 해석

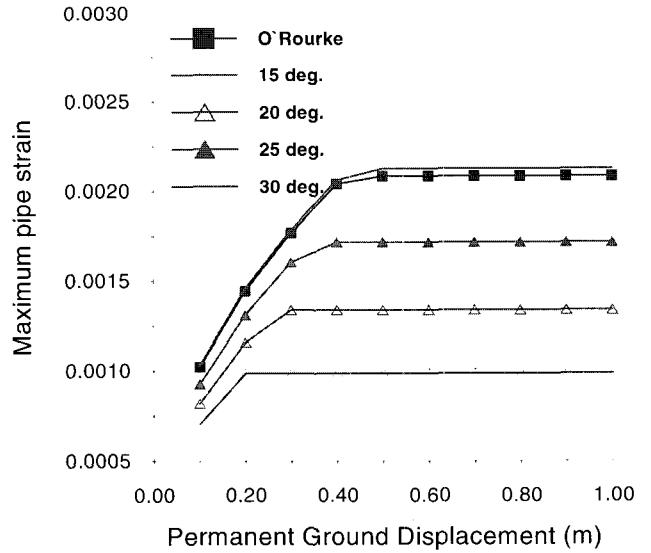


그림 17 전단저항각의 변화에 따른 매설관로 거동특성 해석

산정된 기존의 관·지반 상호작용력을 적용한 해석결과가 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 유연 사다리꼴의 경우 직선부분을 나타내는 형상계수  $p$ 가 증가함에 따라 변형률의 크기가 감소한다는 것과  $p=0.27$ 인 유연 사다리꼴 형상이 sine 형상과 동일한 효과를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

특히 그림 15와 그림 16을 통해서 비액상지반을 기준으로 산정된 기존의 관·지반 상호작용력은 종방향 영구지반변형을 받는 매설관로 변형률의 상한선을 나타내고 있기에 안전축을 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되는 반면, 다양한 지반변형의 형상에 따른 응답특성의 차이를 반영할 수 없으며 sine 형상의 영구지반변형을 기본으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 보이고 있다는 결론을 얻을 수 있다.

그림 17은 관·지반 상호작용력을 산정하는 데 있어서 관과 지반의 경계면에서의 마찰효과를 대표하는 지반의 전단저항각을 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과로서 지반의 전단저항각이 변화함에 따라 매설관로의 응답이 확연하게 변화한다는 사실을 확인할 수 있다.

기존의 해석적 관계식은 마찰계수  $\mu = k \cdot \tan \phi$ 를 단일한 상수값인 0.55로 고정하였기에 전단저항각의 변화에 따른 매설관로 응답특성의 변화를 적절하게 고려하지 못한 결과를 가져다 주는 것으로 판단된다. 특히, 지반의 액상화가 발생할 수 있는 느슨한 지반의 경우, 표 3에 나타난 Peck<sup>(21),(24)</sup>의 연구결과에서 볼 수 있듯이 전단저항각 자체가 28.5도 이

표 3 사질토의 조밀도에 따른 전단저항각의 변화

상대밀도	전단저항각 ( $\phi$ )	
	Peck	Meyerhof
very loose	< 28.5	< 30
loose	28.5~30	30~35
medium	30~36	35~40
dense	36~41	40~45
very dense	41 <	45 <

하의 낮은 값을 보이게 되므로, 기존의 해석적 관계식은 액상지반에 적용할 경우 매설관로가 위치하는 지반의 전단저항각에 대한 정확한 반응이 요구된다는 결론을 얻을 수 있다.

#### 4.3 주요 인자의 변화에 따른 매설관로의 거동특성 해석

Sine 형상을 갖는 종방향 영구지반변형에 대해서 본 연구를 통해 제안된 상호작용력을 이용하고, 매설관로의 제원 및 매설조건을 대표하는 매설관의 두께와 매설심도를 변화시켜가면서 해석을 수행한 후 그에 따른 거동특성의 변화를 살펴본다. 제반 입력조건으로 사용된 관의 제원과 물성 및 주변지반의 조건은 표 2와 같다.

그림 18과 그림 19는 각각 영구지반변형 발생 지역의 길이가 400m와 600m일 때, 관의 두께를 변화시켜가면서 그에 따른 매설관의 변형률 변화를 나타낸 것이다. 그림 18과 그림 19를 통해 관의 두께가 감소함에 따라 매설관로에 발생하는 최대변형률이 증가한다는 사실을 확인할 수 있는데 이는 동일한 관경 즉, 동일한 상호작용력 하에서는 관의 두께 감소가 관 강성의 감소와 직결되기 때문에 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 또한 영구지반변형 발생지역의 길이가 600m로 증가함에 따라 관과 지반의 경계면에서의 미끄러짐을 발생시키는 한계 지반변형의 크기가 다소 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

반면, 그림 20과 21은 각각 영구지반변형 발생지역의 길이가 400m와 600m일 때, 관의 매설심도를 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과이다. 그림 20과 그림 21을 통해 매설심도가 증가함에 따라 관의 최대변형률이 증가한다는 사실을 확인할 수 있는데, 이는 매설심도의 증가에 따른 경계면 상호작용력의 증가에 기인한 현상인 것으로 판단된다.

또한 영구지반변형 발생 지역의 길이가 600m로 증가함에 따라 관과 지반의 경계면에서의 미끄러짐을 발생시키는 한계 지반변형의 크기가 증가하게 되는데, 이를 지반변형 폭의 증가에 따라 분석한 그림 22와 그림 23을 통해 살펴보면 다



음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 먼저 한계지반변형의 크기는 지반변형의 폭에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 나

타내며, 매설심도가 증가할수록 변형률 및 한계지반변형이 증가하게 되는 반면, 일정한 길이 이하의 지반변형에 대해서

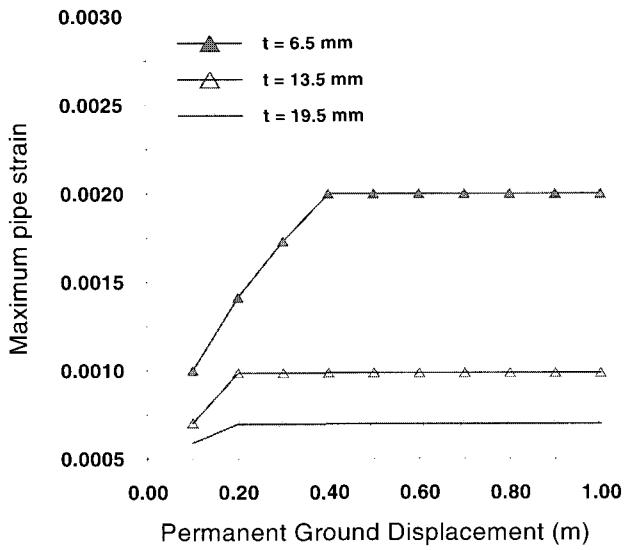


그림 18 관의 두께변화에 따른 매설관로 거동특성 해석(L=400m)

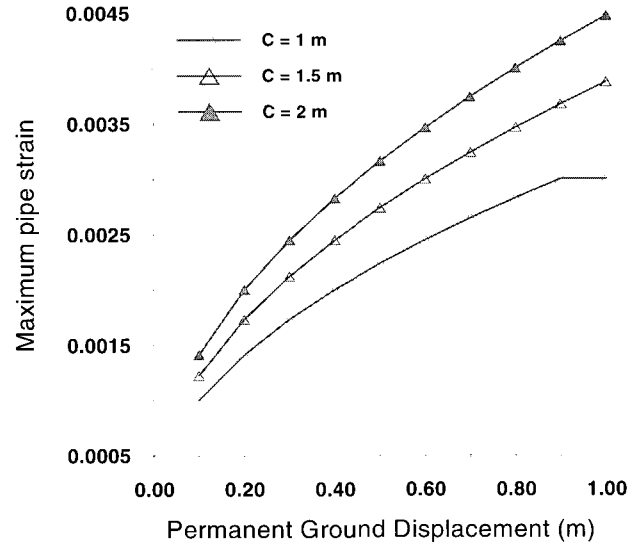


그림 21 매설심도의 변화에 따른 매설관로 거동특성 해석(L=600m)

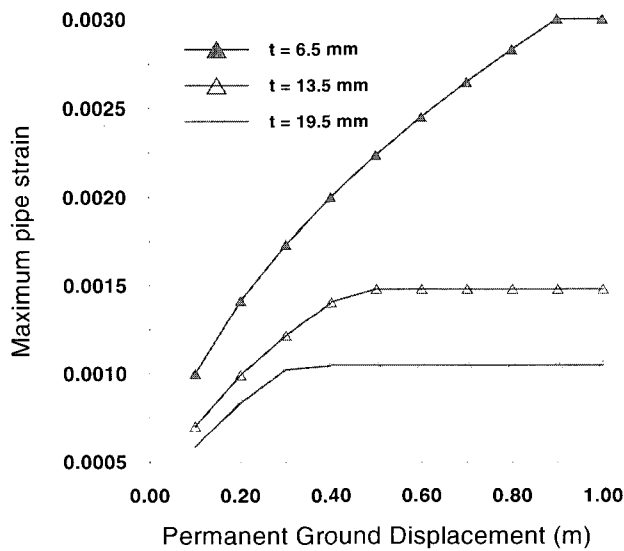


그림 19 관의 두께변화에 따른 매설관로 거동특성 해석(L=600m)

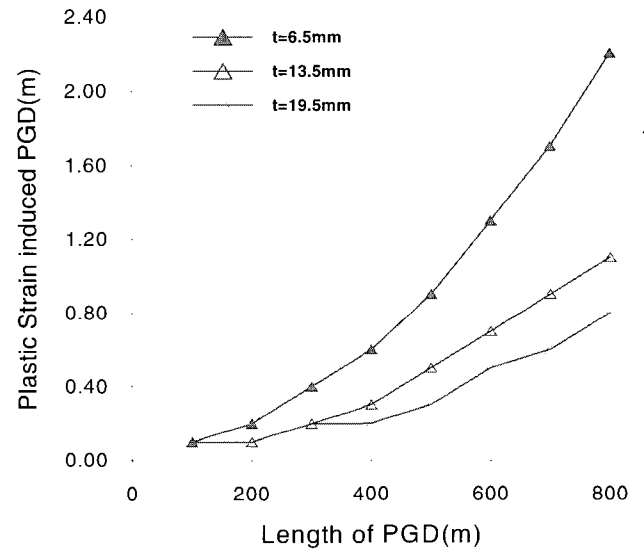


그림 22 관 두께에 따른 한계지반변형의 변화

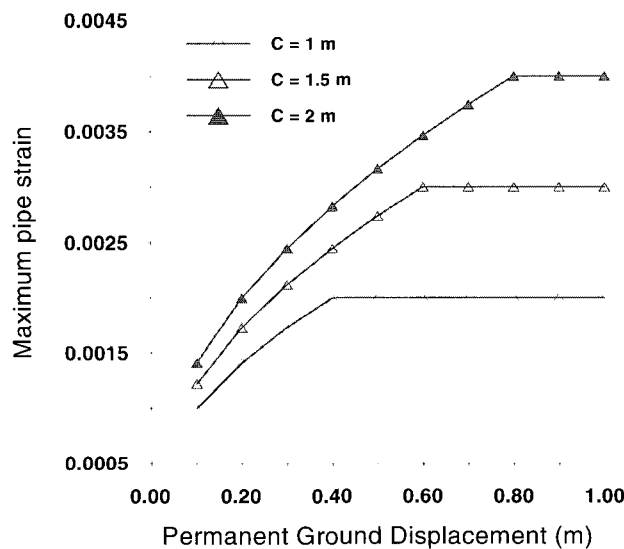


그림 20 매설심도의 변화에 따른 매설관로 거동특성 해석(L=400m)

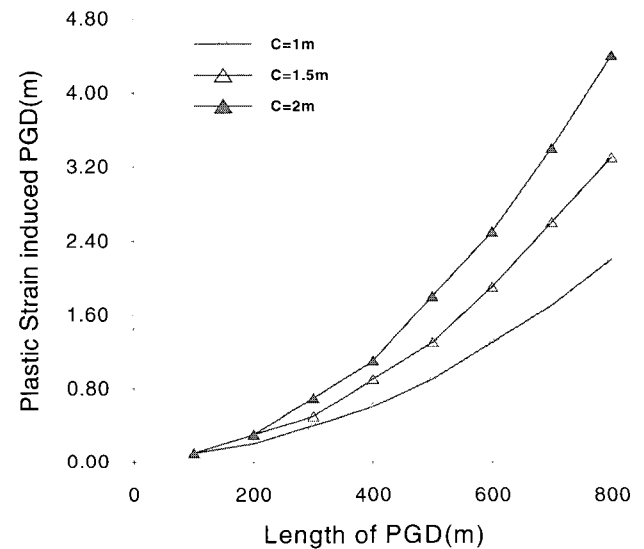


그림 23 매설심도에 따른 한계지반변형의 변화

는 관의 두께와는 무관하게 한계지반변형이 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 그러므로, 동일한 관경을 갖는 매설관로에 대해 항복변형률 이하의 변형률에서 경계면 미끄러짐을 유도하기 위해서는 매설심도는 얇게 하되, 관의 두께에 대해서는 변형률 뿐만 아니라 한계지반변형에 대한 검토가 동시에 이뤄져야 한다고 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 액상화-영구지반변형을 받는 지중매설관로의 합리적인 거동특성 해석을 위해, 액상지반에서의 지반강성 감소 현상 및 강성감소에 의해 공간적으로 표출되는 지반변형의 형상을 공학적으로 반영할 수 있는 개선된 형태의 관·지반 상호작용력을 제안하였다. 이를 위해 영구지반변형의 현상학적 특징, 기존에 사용되고 있는 관·지반 상호작용력 및 해석적 관계식에 대한 상세한 검토를 수행하였으며 변형지반에서의 강성감소와 관련된 국외의 실험적 연구결과들을 참조하였다. 제안된 상호작용력을 종방향 지반변형에 대한 해석적 관계식에 적용하고 이를 기존의 해석결과와 비교함으로써 해석결과에 미치는 상호작용력의 영향을 정량적으로 평가하였으며, 다양한 거동특성 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제안된 상호작용력을 이용, 다양한 지반변형의 형상을 고려하여 해석을 수행한 결과, 지반변형의 형상에 따라 매설관로 응답특성의 차이가 명확하게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 비액상지반을 기준으로 산정된 기존의 관·지반 상호작용력은 지반변형의 다양한 형상에 의해 나타나는 매설관로 응답특성의 변화를 반영할 수 없는 단점을 가지고 있는 것으로 판단된다.
- (2) 비액상지반을 기준으로 산정된 기존의 관·지반 상호작용력은 종방향 영구지반변형을 받는 매설관로 변형률의 상한선을 나타내고 있기에 안전축을 기본으로 하는 내진설계 개념에는 부합되는 반면, sine 형상의 영구지반변형을 기본으로 하는 액상지반에 대해서는 다소 비경제적인 설계효과를 가져올 수 있는 단점을 가지고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 경계면 마찰효과를 대표하는 지반의 전단저항각을 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과, 전단저항각의 변화에 따른 매설관로 응답특성의 차이가 명확하게 나타나는 것을 확인하였다. 특히 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 고정한 기존의 해석적 관계식은 액상지반에 적용할 경우 매설관로가 위치하는 지반의 전단저항각에 대한 정확한 반영이 요구되는 것으로 판단된다.
- (4) 관의 두께와 매설심도를 변화시켜가면서 해석을 수행한 결과, 관 두께의 증가에 대해서는 관 강성의 증가로 인해 변형률이 감소하는 반면, 매설심도의 증가에 대해서

는 상호작용력의 증가로 인해 변형률이 증가한다는 것을 확인하였다.

- (5) 매설심도가 증가할수록 관의 변형률 및 경계면 미끄러짐을 유발하는 한계지반변형이 증가하게 되는 반면, 일정한 길이 이하의 지반변형에 대해서는 관의 두께와는 무관하게 한계지반변형이 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 그러므로, 동일한 관경을 갖는 매설관로에 대해 항복변형률 이하의 변형률에서 경계면 미끄러짐을 유도하기 위해서는 매설심도는 얇게 하되, 관의 두께에 대해서는 변형률 뿐만 아니라 한계지반변형에 대한 검토가 동시에 이뤄져야 하는 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(Korea Earthquake Engineering Research Center) 2단계 사업의 일환인 4-3과제(R11-1997-045-100004-00) 「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. O' Rourke, M. J. and Liu, X., Response of Buried Pipelines subject to Earthquake Effects, MCEER Monograph No. 3, 1999, pp. 77-87.
4. 김문겸, 임윤목, 김태욱, "종방향 영구지반변형에 대한 지중매설관로의 거동특성 해석", 지진공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, 2002, pp. 51-61.
5. Bardet, J. P., Mace, N., and Tobit, T., "Liquefaction-induced ground deformation and failure," Technical Report to PEER/PG&E, University of Southern, 1999.
6. 김문겸, 임윤목, 김태욱, "횡방향 영구지반변형에 대한 지중매설관로의 해석모형 및 거동특성에 대한 연구", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제3-A호, 2002, pp. 519-531.
7. 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)
8. 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.
9. 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)
  10. 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)
  11. 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.
  12. 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.
  13. Liu, X. and O'Rourke, M. J., "Behavior of continuous pipeline subject to transverse PGD," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 1997, pp. 989-1003.
  14. Miyajima, M. and Kitaura, M., "Effects of liquefaction-induced ground movement on pipeline," *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. 386-400.
  15. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, ASCE, New York, 1984.
  16. 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.
  17. 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.
  18. Hamada, M., Yasuda, S., and Emoto, K., "Study on liquefaction induced permanent ground displacements," Association for the Development of Earthquake prediction, Japan, 1986, p. 87.
  19. 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.
  20. O'Rourke, M. J. and Elhamdi, K., "Analysis of continuous buried pipelines for seismic wave effects," *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, 1988, pp. 917-929.
  21. Kramer, S. L, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996.
  22. 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.
  23. Baziar, M., "Engineering evaluation of permanent ground deformation due to seismically-induced liquefaction," Dissertation for Ph.D. in Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, 1991, p. 27.
  24. 한국지반공학회, "지반조사결과와 해석 및 이용", 한국지반공학회, 1997.