

종방향 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성 해석

Response Analysis of Buried Pipeline Subjected to Longitudinal Permanent Ground Deformation

김 문 겸*
Kim, Moon Kyum

임 윤 목**
Lim, Yun Mook

김 태 옥***
Kim, Tae Wook

박 종 헌***
Park, Jong Heon

국문요약

본 연구에서는 액상화-종방향 영구지반변형에 대한 지중매설관로의 거동특성을 해석하기 위하여 수치해석 알고리즘을 개발하였다. 기존의 연구결과가 간략한 해석식의 제안을 중심으로 진행되어 왔으며 영구지반변형의 형상과 폭에 따라 해석방법이 달라지는 단점을 가지고 있었던 것을 고려한다면, 개발된 수치해석 기법은 다양한 영구지반변형의 형상과 폭을 단일한 알고리즘 내에서 처리할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 연속관 형태의 지중매설관로와 주변지반을 보요소와 등가지반강성으로 표현되는 탄-소성 지반 스프링을 이용하여 모형화하였으며, 지진발생시 실측된 지반변형에 기초하여 영구지반변형의 형상을 5가지의 대표적인 형태로 이상화하여 고려하였다. 국내 계기지진피해사례의 부족으로 인하여 영구지반변형의 크기와 지반변형의 폭은 기존의 연구결과를 참조하여 설정하였으며, 국내에서 사용되는 일반적인 강관을 대상으로 지반변형의 형상과 크기 및 폭, 매설관로의 관경, 관 두께 등을 변화시켜 가면서 다양한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동에 미치는 주요 인자들의 영향정도를 평가할 수 있었다.

주요어 : 지중매설관로, 수치해석, 등가지반강성, 영구지반변형의 형상, 영향정도

ABSTRACT

In this research, a numerical algorithm is developed for the response analysis of buried pipelines considering longitudinal permanent ground deformation(PGD) due to liquefaction induced lateral spreading. Buried pipelines and surrounding soil are modeled as continuous pipelines using the beam elements and a series of elasto-plastic springs represented for equivalent soil stiffness, respectively. Idealized various PGD patterns based on the observation of PGD are used as a loading configuration and the length of the lateral spread zone is considered as a loading parameter. Numerical results are verified with other research results and efficient applicability of developed procedure is shown. Analyses are performed by varying different parameters such as PGD pattern, pipe diameter and pipe thickness. Through these procedures, relative influences of various parameters on the response of buried pipeline subject to longitudinal PGD are investigated.

Key words : buried pipeline, numerical analysis, equivalent soil stiffness, PGD pattern, relative influence

1. 서 론

라이프라인(lifeline)으로 정의되는 상·하수도, 전력, 가스, 송유, 통신 시설 등은 대부분의 경우 지중 매설관로의 형태로 존재하게 되며 사회 규모의 증가로 인하여 그 건설수요가 매년 증가하고 있는 실정이다. 광역적 의미에서는 도로, 터널, 교량 및 지하운송수단 등을 포괄하는 라이프라인 시설은 단일구조물의 형태로 존재하지 않고 광범위한 지역에 분포되어 관망체계의 형태를 나타내게 된다. 따라서 지진과 같은 대규모 자연재해의 발생시 야기되는 라이프라인 시설의 구조적인 손상은 전체 시스템의 기능 상실로 연계되면서, 2차적으로는 막대한 사회적, 경제적 손실을 가져올 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러므로 1980년대 중반 이후부터 선진 각국에서는 지중 매설관로를 중심으로 라이프라인의 지진피해 사례분석이 활발하게 이뤄지기 시작했으며, 이에 기초한 지진해석 및 내진설계 기법의 개발이 지속적으로 추진되어 왔다.⁽¹⁾

과거의 지진피해사례를 검토하면 지진발생시 매설관로의 피해원인을 크게 지진파 전파와 영구지반변형으로 구분할 수 있는데 광범위한 지역에 걸쳐 발생하는 지진파 전파에 의한 지중 매설관로의 피해는 비교적 경미한 데 비해, 국부적인 지역에서 발생하는 액상화-영구지반변형의 경우 지중 매설관로에 가해지는 구조적인 손상은 매우 심각한 특징을 가지고 있다.⁽²⁾ 그러므로 비교적 최근 들어 미국 및 일본을 중심으로 액상화-영구지반변형 자체에 대한 연구와 함께 영구지반변형을 받는 지중 매설관로의 거동 특성에 대한 일반적인 연구가 진행되어 왔다. 현재까지의 연구결과를 살펴보면 영구지반변형 자체에 대한 연구는 영구지반변형의 발생 가능한 크기를 예측하기 위한 경험적, 해석적, 수치적 방법의 정형화를 중심으로 진행되어 왔으나 영구지반변형 현상 자체의 복잡성으로 인해 그 이론적인 정립이 아직 확고하게 이뤄지지 못한 상황이다. 반면, 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동에 관한 연구는 지반변형에 대한 매설관로의 주축방향을 기준으로 종방향 및 횡방향 영구지반변형에 대한 기초적인 거동특성 규명을 중심으로 진행되어 왔다. 이를 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

먼저 횡방향 영구지반변형의 경우 1989년 Miyajima와 Kitaura⁽³⁾, 그리고 O'Rourke 등⁽⁴⁾은 해석적인 방법에 의해, 1989년

* 정회원 · 연세대학교 공과대학 사회환경 · 건축 공학부 토목전공, 교수
(대표지자 : applymkk@yonsei.ac.kr)

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

*** 학회회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 응용역학 연구실, 박사과정
본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 2. 2 / 심사종료일 : 2002. 3. 15)

Kobayashi 등⁽⁵⁾은 수치적인 방법에 의해 일련의 연구를 수행하였다. 보다 최근에는 해석적인 방법과 수치적인 방법을 이용하여 1997년 Liu 등⁽⁶⁾이 매설관로의 거동특성을 분석하였으며, 국내에서는 1999년 김태욱⁽⁷⁾이 수치적인 방법을 이용하여 매설관로의 동적 해석을 수행한 바 있다. 반면, 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성에 관한 연구는 주로 O'Rourke에 의해 수행되어 왔음을 확인할 수 있다. 1991년과 1992년 O'Rourke와 Nordberg⁽⁸⁾는 해석적인 방법으로 매설관로의 거동특성을 연구하였으며, 1995년에는 O'Rourke와 Liu⁽⁹⁾가 종방향 영구지반변형에 의한 매설관로의 국부좌굴에 대해서 연구를 수행하였다. 국내에서는 2000년 장재원⁽¹⁰⁾이 수치적인 방법을 이용하여 매설관로의 거동특성을 규명한 바 있으며 본 논문은 이 연구결과에 기초하고 있다.

지금까지 살펴본 연구동향을 지반변형의 방향성, 매설관의 구조적인 형식, 매설관로의 매설위치를 기준으로 재구분할 수 있는데 지반변형의 방향성(종방향 및 횡방향 영구지반변형)과 매설관의 구조적인 형식(연속관과 분절관)에 따라 상이한 해석기법에 근거하여 매설관로의 거동 및 파괴양상을 규명하려는 노력이 지속적으로 진행되어 왔다는 점을 확인할 수 있다. 특히 매설위치의 경우 거의 모든 연구가 매설위치 하부에서 영구지반변형이 발생하는 경우로 제한되어 왔다는 사실을 알 수 있는데, 이는 실질적으로 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성을 해석하는 데 있어서 가장 중요한 관-지반 상호작용력의 정형화가 지반변형이 발생하지 않는 지반에 대해서는 체계적으로 이뤄져 온 반면, 지반변형이 발생한 지반에 대해서는 많은 연구에도 불구하고 의견의 일치가 아직 이뤄지지 못한 상황이기 때문인 것으로 판단된다. 위에서 언급했던 다양한 요소들을 종합적으로 고려한다는 것은 실질적으로 불가능하며 매설위치 자체에서 지반변형이 발생할 경우 관-지반 상호작용력의 산정 자체가 상당한 불확실성을 내포할 수 있기에, 본 연구에서는 매설관의 하부지반에서 발생한 종방향의 영구지반변형을 받는 연속된 매설관로를 주요 해석대상으로 설정하였다.

특히 이 부분에 대해서는 기존의 연구결과⁽⁶⁾가 간략한 해석식의 제안을 중심으로 진행되어 왔으며 영구지반변형의 형상과 폭에 따라 해석방법이 달라지는 단점을 가지고 있었던 것을 고려하여, 다양한 영구지반변형의 형상과 폭을 단일한 알고리즘 내에서 처리할 수 있는 일반적인 수치해석 기법의 개발을 본 연구의 주요 목표로 설정하였다. 이를 위해 본 연구에서는 연속관 형태의 지중매설관로와 주변지반을 보요소와 등가지반강성으로 표현되는 탄-소성 지반 스프링을 이용하여 모형화하였으며, 지진발생시 실측된 지반변형에 기초하여 영구지반변형의 형상을 5가지의 대표적인 형태로 이상화하여 고려하였다. 국내 계기지진피해사례의 부족으로 인하여 영구지반변형의 크기와 폭은 기존의 연구결과를 참조하여 설정하였으며, 국내에서 사용되는 일반적인 강관을 대상으로 지반변형의 형상과 크기 및 폭, 매설관로의 관경, 관 두께 등을 변화시켜 가면서 다양한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, 종방향 영구지반변형에 대한 매설

관로의 거동에 미치는 주요 인자들의 영향정도를 평가할 수 있었다.

2. 영구지반변형 현상과 주요 해석요소

영구지반변형은 대규모의 지반체적변형을 지칭하는 말로서 직접적인 발생원인은 단층운동, 산사태, 지반의 액상화 등으로 구분된다. 단층운동 및 산사태에 의한 영구지반변형에 비해 지진동에 의해 나타나는 액상화-영구지반변형은 느슨하게 포화된 사질토 지반에서 지반의 진동으로 인해 발생한 과잉 간극수압이 소산되면서 생겨나는 지반의 체적변위를 의미하며 지반변형이 발생하는 지층의 경사 유무에 따라 수직 방향의 침하 및 수평 방향의 대규모 지반이동으로 나타나게 된다.⁽¹⁰⁾ 특히 비교적 얇은 지층에 매설되는 지중 매설관로의 경우 실제적으로 액상화-영구지반변형에 의해 상당한 정도의 구조적인 손상을 받는다는 사실이 여러 차례 확인되었다.⁽⁹⁾ 그러므로 본 장에서는 액상화로 인한 영구지반변형의 개략적인 특징을 고찰하고 지중 매설관로의 거동특성을 해석하는 데 있어서 고려되어야 할 주요 해석요소들을 살펴보고자 한다.

2.1 액상화-영구지반변형 현상⁽¹¹⁾

일반적으로 액상화는 포화사질토가 비배수 상태에서 급속한 재하를 받을 경우, 과잉간극수압의 발생과 동시에 유효응력이 감소되면서 전단저항의 급격한 상실로 인하여 지반이 마치 액체처럼 유동하는 현상을 말한다. 이로 인해서 일어나는 액상화 현상은 크게 유동액상화(flow liquefaction)와 반복전단변형(cyclic mobility)의 두 종류로 나눌 수 있다. 먼저 유동액상화는 토체 내 정적평형상태의 전단응력(정적전단응력)이 액상화 상태의 흙의 전단강도보다 큰 경우에 발생하는 현상으로서 모든 액상화 관련 현상 중에서 유동파괴(flow failure)라고 하는 현상을 초래하며, 인접 구조물 하부의 전반적인 파괴를 발생시키게 된다. 1925년과 1971년에 각각 발생한 Sheffield 댐과 Lower San Fernando 댐의 유동활동파괴(flow slide failure)는 유동액상화 현상의 대표적인 예이다.

반면, 반복전단변형은 포화사질토가 일정한 함수비에서 반복하중을 받을 경우 발생하는 진행성 연화현상으로서 정적전단응력이 액상화토의 전단강도보다 적은 상태에서 일어나며 이 경우 영구지반변형은 정적전단응력과 진동전단응력 모두에 의해서 일어난다. 지진이 계속되는 동안에 변형의 크기가 점진적으로 증가하면서 일어나게 되는 이러한 변형을 지반의 측방유동(lateral spreading)형태의 영구지반변형이라고 한다.

2.2 액상화-영구지반변형의 주요 해석요소

액상화-영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성 해석에 있어서 고려되어야 할 주요 해석요소로서는 발생가능한 영구지반변형의 크기, 폭 및 형상 등을 언급할 수 있다.

세 가지 모두 근세 이후 강진에 의한 지진피해사례가 절대적으로 부족한 국내의 경우 합리적인 정량화가 다소 어려운 상태이나, 본 연구에서는 미국 및 일본의 최신 연구결과를 참조함으로써 개략적인 범위를 설정하고 지중 매설관로의 거동특성 해석에 이를 적용하였다.

2.2.1 영구지반변형의 크기

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 경험적, 해석적인 방법들이 다양한 형태로 제시된 바 있다. 경험적인 방법으로서 1986년 Hamada 등⁽¹²⁾은 Niigata 지진 등의 데이터를 이용하고 다중회귀분석을 통해서 영구지반변형의 크기를 추정할 수 있는 회귀식을 제안하였다. 이후, 1992년 Bartlett와 Youd⁽¹³⁾는 San Francisco 지진 등의 자료를 이용하여 완만한 경사를 가진 지반과 자유면에 대해 로그함수 형태의 경험식을 제안하였다. 반면 해석적 방법의 경우, 1991년 Baziar⁽¹⁴⁾는 Newmark 슬라이딩 블록 모델을 이용하여 영구지반변형의 크기를 산정하였으며, Towhata 등⁽¹⁵⁾은 액상화로 인한 영구지반변형의 크기를 예측하기 위해 변분원리를 이용한 해석식을 제안하였다.

그림 1을 보면 Baziar의 연구결과가 Youd의 연구결과와 비교되어 나타나고 있는데⁽¹¹⁾ 국내 액상화 평가기준인 Mw 6.5를 기준으로 진앙거리 5km를 가정할 경우 최대 1.0m 정도의 영구지반변형이 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

미국 및 일본의 강진자료에 기초하여 산정된 수치이긴 하나 영구지반변형 현상 자체의 불확실성을 고려하고 해석결과와의 보수성을 확보한다는 차원에서 본 연구에서는 이를 적용, 발생가능한 영구지반변형의 크기를 최대 0.7m로 제한하였다. 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.

2.2.2 영구지반변형의 형상 및 폭

영구지반변형 발생지역의 폭은 지반변형이 영향을 미치는 범위를 결정해주는 주요 인자로서 이에 대해서는 Suzuki와 Matsuda⁽¹⁶⁾가 1964년 Niigata 지진과 1983년 Nihonkai-Chubu 지진 자료를 이용하여 폭과 크기에 대한 일련의 관계식을 제안한 바 있는데, 80m와 600m의 범위 이내에서 영구지반변형의 크기가 영구지반변형 발생지역의 폭이 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보인다는 사실을 입증한 바 있다. 반면, 지반변형 크기의 공간적 불균일성으로 인해 나타나는 영구지반변형의 형상에 대해서는 1988년 Elhamdi⁽¹⁷⁾가 제시한 수정 베타 분포나 1988년 Suzuki 등⁽¹⁸⁾에 의한 사인 및 코사인 분포가 사용된 바 있다.

본 연구에서는 1986년 Hamada 등⁽¹⁹⁾이 수행한 지진피해 사례 분석결과에 의거하고 그림 2와 같은 1964년 Niigata 지진과 1983년 Nihonkai-Chubu 지진시 취합된 영구지반변형의 실측자료를 기초로, 그림 3과 같이 4가지 형태의 이상화된 종방향 영구지반변형의 형상 및 상응하는 폭을 지중 매설관로의 거동특성 해석에 적용하였다.

영구지반변형의 형태가 그림 2에서와 같이 관측된 지역에 따라 다양하고 복잡하므로 본 연구에서는 이를 그림 3에 나타낸 바와 같이 각각 block 형태, ramp 형태, ramp-step 형태, ridge 형태로 이상화시켜 표현하였다. 여기서 L 은 종방향 영구지반변형이 발생된 지역의 길이 즉, 영구지반변형의 폭을, δ 는 영구지반변형의 크기를 나타낸다. 본 연구에서는 영구지반변형의 폭과 지반변형의 크기 사이에 존재하는 비례적인 특성을 고려하고 일본 및 미국의 실측결과에 기초⁽¹⁶⁾하여 이러한 형상의 영구지반변형이 200m에서 600m 정도의 폭을 가지고 발생하는 것으로 가정하였다.

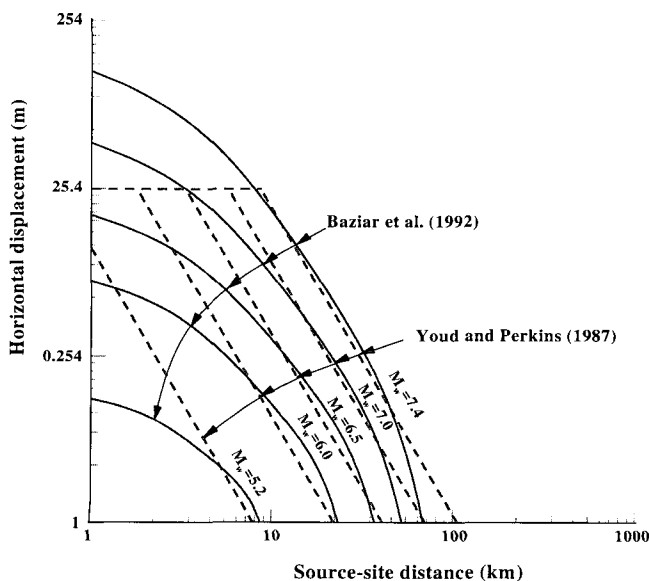


그림 1 영구지반변형의 크기에 관한 기존의 연구결과

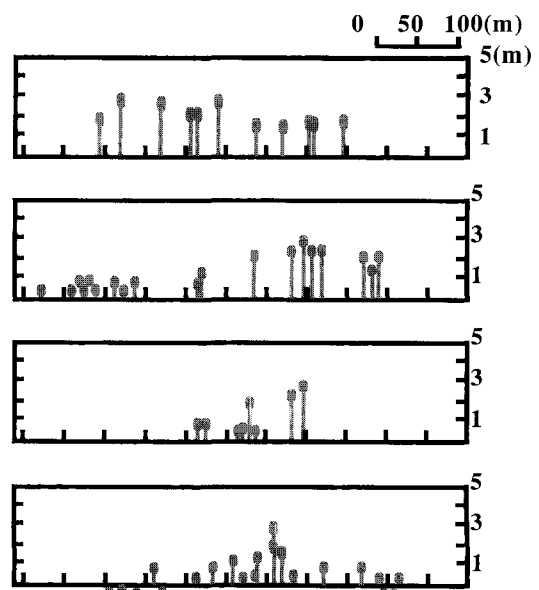


그림 2 영구지반변형의 실측자료

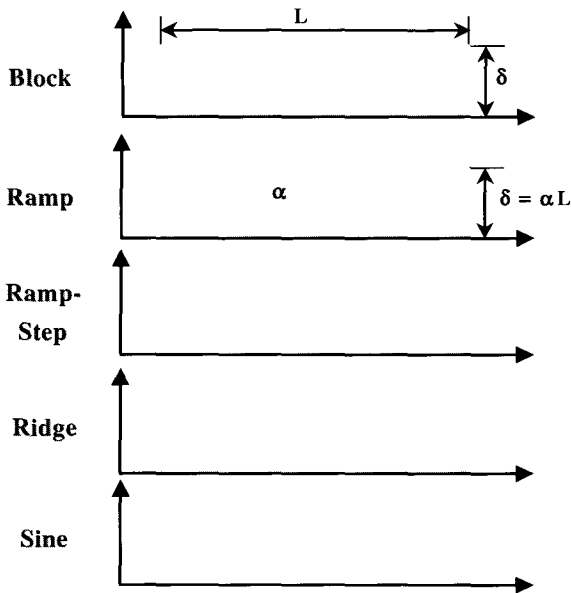


그림 3 이상화된 영구지반변형의 형상

3. 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성과 관-지반 상호작용력

3.1 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성

영구지반변형에 의한 매설관로의 거동 양상은 지반변형이 발생하는 영역 내에서 매설관로의 주축방향이 지반의 운동 방향에 대해 상대적으로 어떤 방향으로 위치하게 되는가에 따라 크게 좌우된다. 그림 4는 이러한 방향성과 그에 따른 매설관로의 거동 양상을 표현하는 개념도로서 기존의 연구결과들을 이용하여 재작성한 그림이다.

그림 4(a)는 가장 일반적인 경우로서 지반변형 방향에 대해서 관로의 주축이 임의의 각을 가지고 위치하게 되는 경우를 나타내고 있는데 이 경우 관로의 변형은 단층운동에 의해 발생하는 변형과 유사한 양상을 갖게 되며 휨, 압축 및 인장력을 동시에 받게 된다.

지반변형에 의해 관에 발생하는 변형이 가장 극단적인 경우를 그림 4(b), 그림 4(c)와 같이 가정할 수 있는데, 그림 4(b)와 같이 지반변형방향에 직각방향으로 관로의 주축이 위치하는 경우의 지반변형을 횡방향 영구지반변형이라고 정의하며, 그림 4(c)와 같이 지반변형방향에 평행하게 관로의 주축이 위치하는 경우의 지반변형을 종방향 영구지반변형이라고 정의한다. 횡방향 영구지반변형이 발생할 경우 매설관로는 과도한 인장력 및 휨을 받게 되며 단부에서의 인장파괴 또는 중앙부에서의 휨과괴 양상을 나타내게 된다. 반면 종방향 영구지반변형에 대해서는 지반변형이 시작되는 부분에서는 인장력을, 지반변형이 종결되는 부분에서는 압축력을 받게되고 그 결과, 시점부에서는 인장파괴(rupture)가 종결부에서는 과도한 압축력에 의한 국부좌굴(local buckling) 파괴가 발생하게 된다.

3.2 관-지반 상호작용력

지중 매설관로는 영구지반변형 발생시 지반과 매설관로

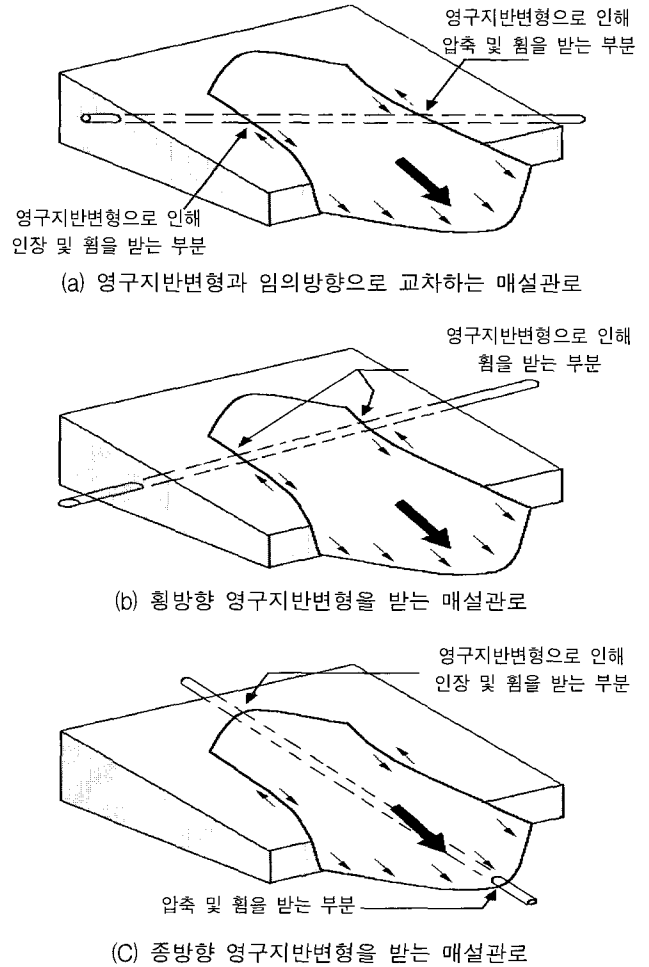


그림 4 영구지반변형의 방향성에 따른 매설관로의 거동양상

의 경계면에서의 상호작용에 의해 발생하는 상대적인 변위에 의해 구조적인 손상을 입는다. 그러므로 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성 해석을 위해서는 영구지반변형 자체에 대한 이해와 함께 관과 지반의 경계면에서 발생하는 상호작용력에 대한 정량화 작업이 선행되어야 하며 실제적으로 이 부분이 가장 중요한 해석 요소로서 고려되어야 한다. 영구지반변형 발생시 지반과 매설관로의 경계면에서 발생하는 상호작용력은 액상화-영구지반변형을 기준으로 지반변형이 발생되지 않는 지반의 경우와 지반변형이 발생되는 지반의 경우로 크게 구분할 수 있다. 지반변형이 발생되지 않는 지반의 경우 종방향 운동과 수평면상 횡방향, 연직상향 및 연직하향 운동에 대해 ASCE⁽²⁰⁾에서 실험을 통해 제안한 관계식들을 적용시킬 수 있으며, 등가지반강성(equivalent soil stiffness)을 활용할 수도 있다. 반면 지반변형이 발생하는 지반의 경우에는 지반변형이 발생되지 않는 지반에 대한 상대적인 지반강성의 비로서 상호작용력을 정의할 수 있다. 그러나 이 부분에 대해서는 많은 연구결과에도 불구하고 현재까지 확고한 의견의 일치가 이뤄지지 못한 상황이다.

그러므로 본 연구에서는 매설관의 하부지반에서 발생된 종방향의 영구지반변형을 받는 연속된 매설관로를 주요 해석대상으로 설정한 후 매설관로의 축방향과 횡방향 지반강

성으로서 ASCE에서 제안한 등가지반강성을 이용하여 관-지반 상호작용력을 고려하였다.

$$K_A = 2 \frac{t_u}{x_u} \quad (3)$$

3.2.1 축방향의 등가지반강성

지중매설관로의 축방향과 평행한 방향의 상대적인 지반 운동이 발생될 경우 매설관로와 지반의 경계면에서는 축방향의 힘이 가해진다. 이와 관련하여 ASCE에서는 매설관로의 매립토로 주로 사용되는 사질토에 대해 다음과 같은 일련의 관계식을 제안한 바 있다.⁽²⁰⁾

$$t_u = \frac{\pi}{2} D \bar{\gamma} H (1 + k_0) \tan k\phi \quad (1)$$

$$x_u = (0.1 \sim 0.2) in. = (2.54 \sim 5.08) \times 10^{-3} meter \quad (2)$$

여기서, t_u 는 관과 지반의 경계면에서 작용하는 관-지반 상호작용력의 극한값이며, D 는 관의 직경, $\bar{\gamma}$ 는 지반의 단위 중량, H 는 매설관로의 중심선을 기준으로 한 매설깊이, ϕ 는 지반의 전단저항각, k_0 는 횡방향 정지토압계수이다. O'Rourke 등은 대부분의 지중매설관로에 있어서 안전축을 위해 k_0 의 값을 1.0으로 사용할 것을 제안한 바 있다.⁽²⁰⁾ 또한, k 값은 관 외부표면의 특성 및 정도에 좌우되는 감소계수로서 콘크리트관, 강관 및 주철관의 경우 1.0, 연철관 및 상대적으로 강성 코팅재를 사용한 관의 경우 0.5에서 0.7사이의 값을 적용하는 것이 제안된 바 있다.

등가지반강성을 실질적으로 적용하기 위해 ASCE에서는 그림 5와 같은 이상화된 탄소성 모형을 제시한 바 있다.⁽²⁰⁾

제시된 탄소성 모형은 두 가지 인자에 의해서 특성화된다. 즉, 수평면상에서의 축방향 극한 상호작용력 t_u , 수평면상에서의 횡방향 극한 상호작용력 p_u , 수직면상에서의 횡방향 극한 상호작용력 q_u 와 각 방향에 대한 최대 탄성변위 x_u, y_u, z_u 이다. 여기서 각 방향에 대한 최대 탄성변위는 관의 상대변위를 의미한다는 점에 유의할 필요가 있다. 두 가지 인자를 통해 산정되는 등가지반강성은 각 방향의 최대 저항력을 최대 탄성변위의 1/2값으로 나누어 준 값으로서 수평면상에서의 축방향을 고려할 경우 $2t_u/x_u$ 로서 표현된다. 즉 축방향의 등가지반강성은 다음과 같다.

등가지반강성은 최대 탄성변위 이하의 변위에서만 유효하며 상대변위 자체가 최대 탄성변위를 초과하게 될 경우 고정된 상수값을 갖게 된다. 관의 상대변위가 최대 탄성변위를 초과한다는 것은 관과 지반의 경계면에서의 미끄러짐 (slippage)이 발생되는 것으로 해석될 수 있으며, 등가지반강성이 상수로 설정되는 이 부분에서부터는 관-지반 상호작용력이 극한 상호작용력으로 고정되게 됨에 따라 관 변형률의 증가율이 감소하거나 일정한 양상으로 변화할 것으로 판단된다.

3.2.2 횡방향의 등가지반강성

수평면상에서의 측면변위에 대해서 Audibert와 Nyman은 관과 지반의 상호작용을 모형화하기 위해서 세 가지 형태의 지반강성계수를 제안한 바 있다. 반면, Thomas는 큰 크기의 측면 지반변위에 대해서 식 (4)와 같은 형태의 지반강성계수를 제안하였다.⁽²⁰⁾ 여기서 p_u 는 수평면상에서의 측면변위에 대한 극한 상호작용력이며 y_u 는 수평면상에서 측면방향에 대한 관의 최대 탄성변위로서 ASCE⁽²⁰⁾에서 실험을 통해 산정된 값들을 이용하여 결정될 수 있다. 본 연구에서 사용된 횡방향의 등가지반강성은 다음과 같다.

$$K_L = 2.7 \cdot \frac{p_u}{y_u} \quad (4)$$

4. 해석모형의 설정 및 알고리즘의 구성

본 장에서는 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동특성 해석을 수행하는 데 있어서 적용된 매설관로의 해석모형과 수치해석 프로그램에 대해서 소개하고자 한다. 그림 6과 같이 영구지반변형이 발생하는 지층 상부에 매설된 매설관로를 기본적으로 탄성지반 위에 지지된 보로서 모형화하며 매설관로는 영구지반변형이 발생하는 지역과 영구지반변형이 발생하지 않는 지역을 동시에 통과하는 것으로 고려한다. 또한 그림 6과 같은 연속된 매설관로의 해석모형을 그림 7과 같

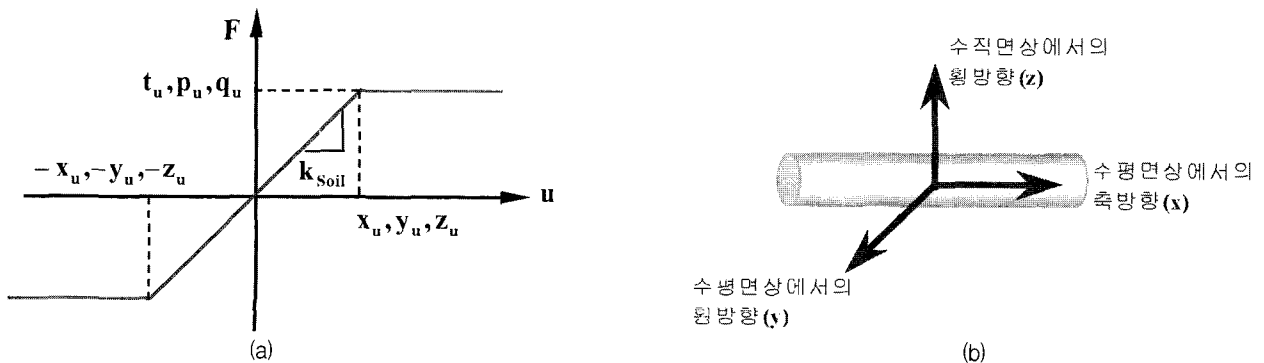


그림 5 ASCE에서 제안된 탄-소성 지반강성 모형

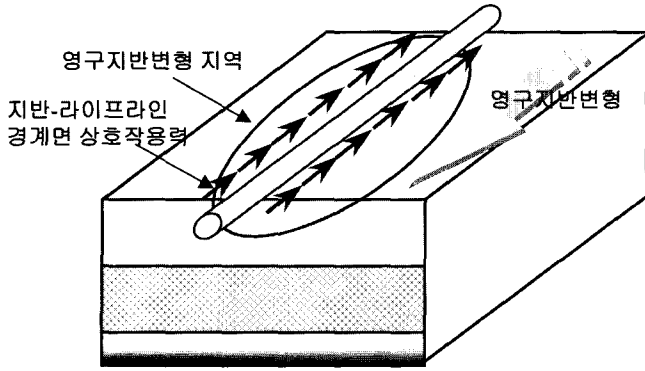


그림 6 종방향 영구지반변형을 받는 연속된 지중 매설관로

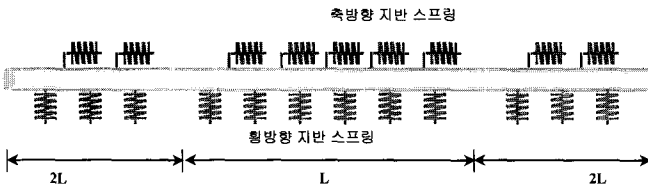


그림 7 축방향 및 횡방향 지반 스프링으로 연결된 매설관로의 해석 모형

이 연속적인 축방향과 횡방향 지반 스프링으로 연결된 보요소로 고려한다. 본 연구에서는 지반변형이 발생하지 않는 양 단부에서의 구속 효과를 상쇄시키기 위해서 영구지반변형의 폭이 L 인 경우 전체 해석영역을 $5L$ 로 확장시켰다.

전체 좌표계를 기준으로 축방향과 횡방향에 각각 x 와 z 로 표시되는 모형에서 매설관의 축방향 변위를 u 로, 그림 3과 같은 형상과 크기를 갖는 영구지반변형을 u_g 로 나타내면, 지반에 대한 매설관의 상대변위 Δu 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 식 (6)으로 표현되는 등가지반강성의 곱이 지반과 매설관의 경계면에 가해지는 상호작용력으로서 작용하게 된다.

$$\Delta u(x) = u(x) - u_g(x) \quad (5)$$

$$F = K_A \cdot u_g(x) \quad (6)$$

본 연구를 통해 개발된 매설관로 해석프로그램의 전체적인 개요는 그림 8과 같고 이를 간략하게 설명하면 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

먼저 영구지반변형의 크기 및 형상을 설정하고 관과 지반의 요소 강성도 행렬과 전체 강성도 행렬을 이용하여 지반과 관로의 경계면에서 발생하는 관의 상대변위를 산정한다. 산정된 상대변위 또는 경계면 상호작용력이 등가지반강성의 탄성영역내에 포함된다면 그 자체로 해석을 종결하고 산정된 상대변위를 이용하여 매설관로의 변형률을 결정하지만, 상호작용력 또는 상대변위가 극한 상호작용력 t_u 또는 최대 탄성변위 x_u 를 상회한다면 등가지반강성을 상수로 설정하고 재해석을 수행하여 변형률이 일정한 값으로 수렴할 때까지 반복적인 계산을 통해 수정된 상대변위와 변형률을 결정한다.

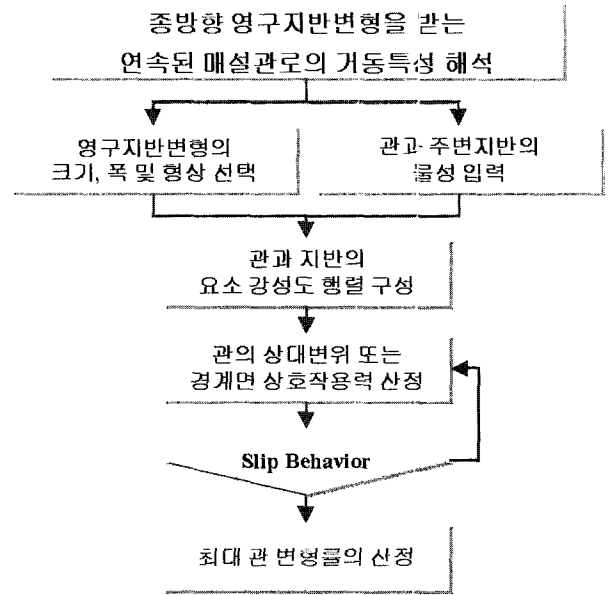


그림 8 종방향 영구지반변형을 받는 매설관로의 수치해석 프로그램 개요

5. 수치해석 및 결과분석

5.1 수치해석기법의 검증

개발된 수치해석 프로그램을 이용하여 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 응답을 산정하고, 이를 기존의 연구결과와 비교하였다. 비교대상인 O'Rourke의 해석결과⁽⁸⁾는 해석영역 전체를 지반과 매설관의 상대변위가 탄성영역인 구간과 지반과 매설관의 상대변위가 비탄성영역인 구간으로 구분한 후, 각 영역의 경계에서의 연속조건과 평형조건을 이용하여 매설관의 최대 변형률을 구한 것이다. Block형상의 지반변형에 대한 O'Rourke의 해석적 관계식⁽⁸⁾은 다음과 같다.

$$\epsilon_p = \frac{aL}{2L_{em}}, \quad L < 4L_{em} \quad (7)$$

$$\epsilon_p = \frac{aL}{\sqrt{LL_{em}}}, \quad L \geq 4L_{em} \quad (8)$$

여기서 a 는 지반변형의 형상을 좌우하게 되는 계수로서 그림 3에 표현한 block형상의 지반변형을 가정할 경우 1.0의 고정된 상수값을 가지게 되며, L 은 영구지반변형이 발생한 지역의 길이, 즉 영구지반변형의 폭을 의미한다. L_{em} 은 그림 9에 표시된 바와 같이 지반변형과 동일한 관의 변형이 나타나는, 관과 지반의 경계면에서의 상호작용력 t_u 가 일정하게 작용하는 구간으로서 다음 식에 의해 결정된다.

$$L_{em} = \frac{aEA}{t_u} \quad (9)$$

O'Rourke의 해석식은 결국 식 (1)로 표현되는 경계면 상호작용력 t_u 에 기초하여 식 (7), (8), (9)를 이용하여 관의 변형

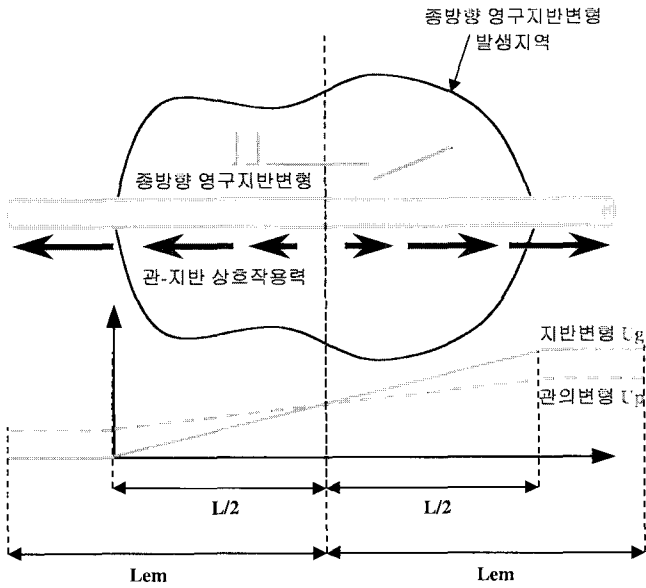


그림 9 O'Rourke 해석식의 개념도

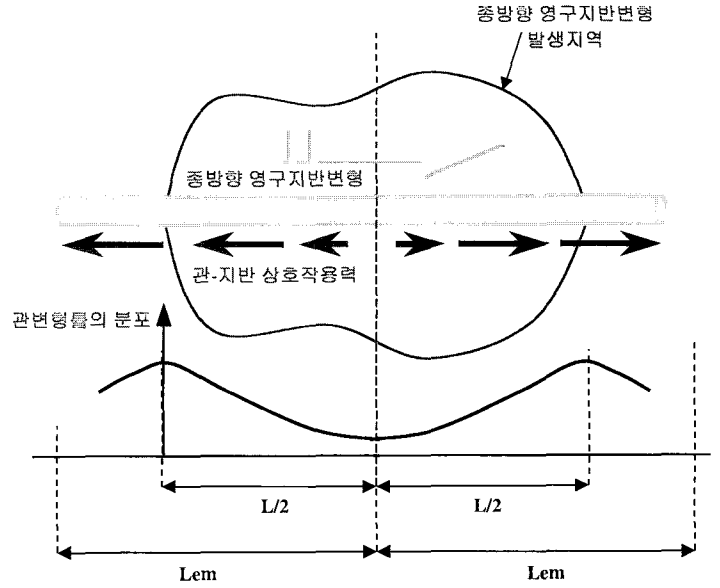


그림 10 매설관로의 길이방향 변형률 분포

를을 산정하도록 구성되어 있다. 그러나 이러한 해석식은 전술했던 바와 같이 지반변형의 형상과 폭에 따라서 그 유도 과정 및 형태가 달라지는 단점을 가지고 있기에 본 연구에서는 이를 단일한 알고리즘 내에서 처리하도록 유도하였다.

1차적으로 검증에 사용된 영구지반변형의 형태는 block 형태의 영구지반변형이며, 해석 대상은 영구지반변형이 발생된 지층 상부에 위치한 매설깊이가 0.91m인 매설관로이다. 매설관과 지반의 제원 및 물성은 표 1과 같고 표에 제시된 관의 물성은 국내에서 많이 사용되는 Grade B 강관과 동일하다. 그림 10은 매설관의 길이방향에 따른 변형률의 개괄적인 형상이며 그림 11은 200m부터 600m의 범위를 갖는 영구지반변형 발생 지역에 대해 0.1m부터 0.7m 사이의 종방향 영구지반변형이 발생될 경우 매설관로의 최대 축방향 변형률을 산정한 결과이다.

그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 매설관의 양 단부, 즉 지반변형의 시점부와 종점부에서 각각 최대 변형률이 발생한다는 사실을 확인할 수 있다. 해석결과인 그림 11을 살펴보면 영구지반변형 발생 지역의 길이가 200m와 400m인 경우, 지반변위가 증가함에 따라 매설관의 최대 변형률은 증가하게 되나 어느 정도 이상의 지반변위가 발생하게 될 경우

최대 변형률은 일정하게 되는 특성이 나타나게 된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 지반과 매설관로의 상대변위가 최대 탄성변위 x_u 를 상회하게 될 경우 등가지반강성이 상수로 고정됨에 따라 변형률의 증가가 더 이상 발생되지 않는다는 것을 의미하며 매설관로와 지반 경계면에서의 미끄러짐 (slippage)이 발생하는 것으로도 해석될 수 있다. 이러한 미끄러짐 현상은 관 변형률의 추가적인 증가를 억제한다는 측면에서 영구지반변형이 발생할 수 있는 지역에 매설된 매설관로의 내진안정성을 증가시키는 효과를 가져올 수 있을 것으로 사료된다. 반면, 영구지반변형 발생 지역이 600m일 경우 이러한 현상이 가시적으로 나타나지는 않으나 지반변위가 증가하게 되면 동일한 결과가 나타날 것으로 사료된다. 전체적으로 영구지반변형의 폭 또는 지반변형의 크기가 증가할수록 매설관로의 변형률이 증가한다는 사실을 확인할 수 있다.

본 연구에서 개발된 수치해석 프로그램을 이용한 해석 결

표 1 매설관과 지반의 제원 및 물성

내 용		입 력 치
관 제 원	탄성계수 (E)	100GPa
	항복응력 (σ_y)	300MPa
	외경 (D)	0.30m(0.75m, 1.00m)
	두께 (t)	6.5mm(13.0mm, 19.5mm)
	요소길이 (l)	0.50m
지 반 물 성	단위중량 (γ)	16.10kN/m ³
	매설심도 (H)	0.91m
	축방향강성 (K_A)	7.25MPa
	축방향저항력 (f_x^u)	7.40kN/m

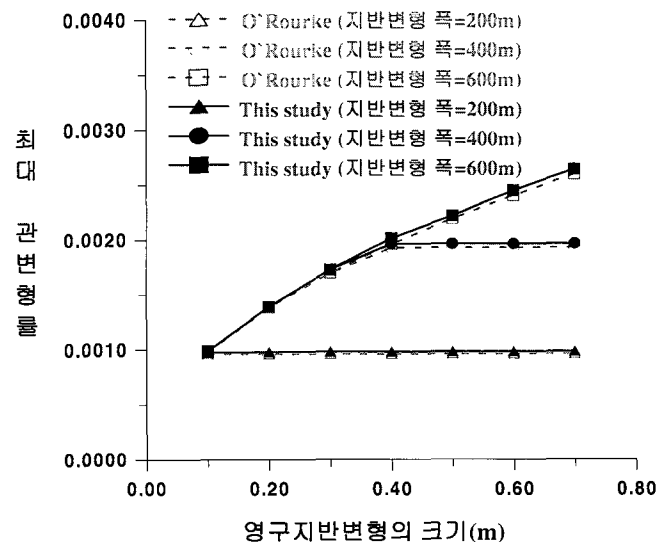


그림 11 수치해석과 O'Rourke 해석식의 결과비교(매설심도 0.91m)

과를 O'Rourke의 해석결과와 비교해 보면 전반적인 영구지반변형 발생지역의 폭과 영구지반변형의 크기에 따른 최대 변형률의 변화 양상이 상당히 잘 일치한다는 사실을 확인할 수 있다. 변형률의 크기 상에서 발생하는 오차는 해석과정 내에서 자체적으로 발생하는 것으로 판단되며 오차의 범위가 미소하다는 점을 고려한다면 본 연구에서 개발된 해석 프로그램의 적용성이 합리적으로 검증된 것으로 사료된다.

5.2 매설관로의 거동특성 해석

개발된 해석프로그램을 이용하여 영구지반변형의 형상 및 매설관의 제원 변화에 따른 거동특성을 파악하였다. 영구지반변형의 형상은 그림 3에 표시한 4가지 형상을 사용하였으며, 실제 발생하는 block 형태의 영구지반변형 형상을 보다 실질적으로 표현하기 위해 sine 형상에 대한 해석을 추가적으로 수행하였다. 또한 매설관의 제원 변화에 대한 거동특성을 살펴보기 위해서 매설관의 제원을 대표하는 관경과 관 두께를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 관 두께의 변화는 관의 단면적 변화 및 이로 인한 관 강성의 변화로 반영되었다. 해석에 사용된 관과 지반의 물성 및 제원은 표 1과 같고 영구지반변형 발생지역의 길이는 각각에 대해 200m와 400m로 제한하였다.

그림 12(a)와 그림 12(b)는 다양한 영구지반변형의 형상에 따른 관경 0.3m, 두께 6.5mm 매설관의 거동 특성을 나타내고 있다. 그림 12(a)를 보면 block 형상의 영구지반변형에 대해서 가장 큰 최대 변형률이 발생되며 sine 형태, ramp 형태, ramp-step 형태, ridge 형태의 순으로 매설관의 최대 변형률이 발생한다는 사실을 확인할 수 있다. 영구지반변형의 폭과 크기의 곱을 변형에너지로 가정할 경우 이는 변형에너지의 크기 순서에 따른 당연한 결과로도 해석될 수 있다. 또한 그림 12(a)를 통해 동일한 조건인 경우, block 형상의 지반변형이 매설관로에 가장 큰 피해를 발생시킬 수 있다는 결론을 도출할 수 있으며 이는 실제 관측된 지진피해사례결과와

도 일치하는 것이다. 반면 영구지반변형 발생지역의 폭이 400m인 그림 12(b)의 경우, 역시 변형에너지의 증가로 인해 영구지반변형 발생지역의 폭이 200m인 그림 12(a)에 비해 변형률의 크기가 증가한다는 것과 함께 지반변형의 형상에 따른 변형률의 차이는 그림 12(a)와 유사하게 나타난다는 사실을 확인할 수 있다.

Block 형상의 지반변형을 대상으로 그림 13(a)와 그림 13(b)는 관경의 변화에 따른 거동특성을, 그림 14(a)와 그림 14(b)는 관두께의 변화에 따른 거동특성을 각각 나타내고 있다. 그림 13(a)와 그림 13(b)를 통해 관경이 증가함에 따라서 매설관로에 발생하는 최대변형률이 증가한다는 사실을 확인할 수 있다. 물론 관경의 증가는 극한 상호작용력 t_u 의 증가와 동시에 관 강성의 증가를 가져오지만 관경의 증가에 따른 변형률의 증가가 나타나는 것을 볼 때 극한 상호작용력 t_u 의 증가에 따른 축방향 등가지반강성 K_A 의 증가와 결과적으로 나타나는 경계면 상호작용력의 증가가 관 강성의 증가를 상회하기 때문에 이러한 결과가 나타나는 것으로 사료된다. 또한 영구지반변형의 폭이 200m인 그림 13(a)에서 약 0.20m 이상의 지반변형이 발생하는 경우 변형률이 일정하게 되는 반면, 지반변형의 폭이 400m인 그림 13(b)에서는 변형률을 일정하게 만드는, 즉 관의 미끄러짐을 발생시키는 지반변형의 크기가 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 14(a)와 14(b)를 통해 관의 두께가 감소함에 따라서 매설관로에 발생하는 최대변형률이 증가한다는 사실을 확인할 수 있는데 이는 동일한 관경 즉, 동일한 극한 상호작용력 하에서는 관의 두께 감소가 관 강성의 감소와 직결되기 때문에 나타나는 현상인 것으로 판단된다.

그림 13(a)와 그림 14(a), 그림 13(b)와 그림 14(b)를 비교한다면 관경과 관두께가 동일한 조건하에서 배로 증가할 경우 매설관로 변형률의 증감은 관두께에 상대적으로 더 많은 영향을 받게 된다는 특징이 나타나게 된다. 즉, 동일한 조건의 경우 종방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 응답특성

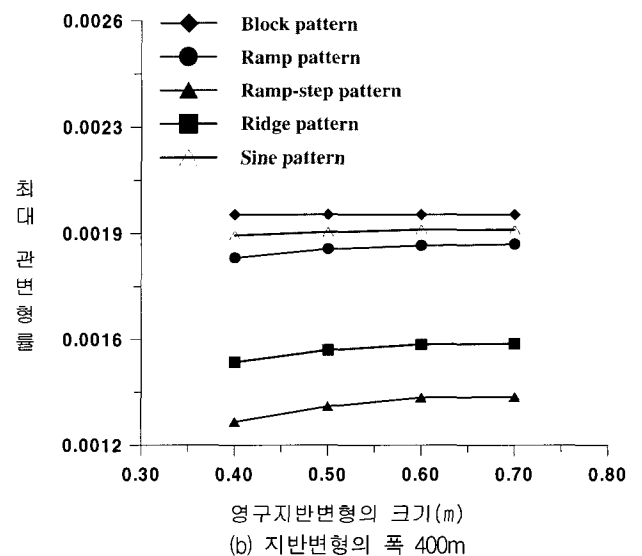
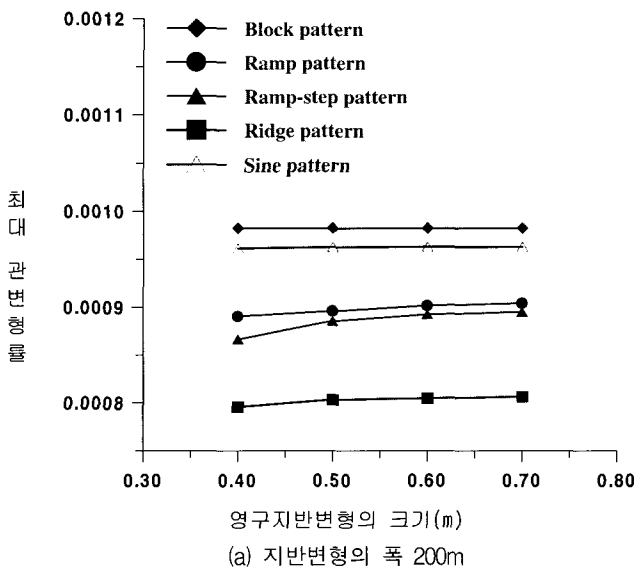


그림 12 지반변형 형상에 따른 해석

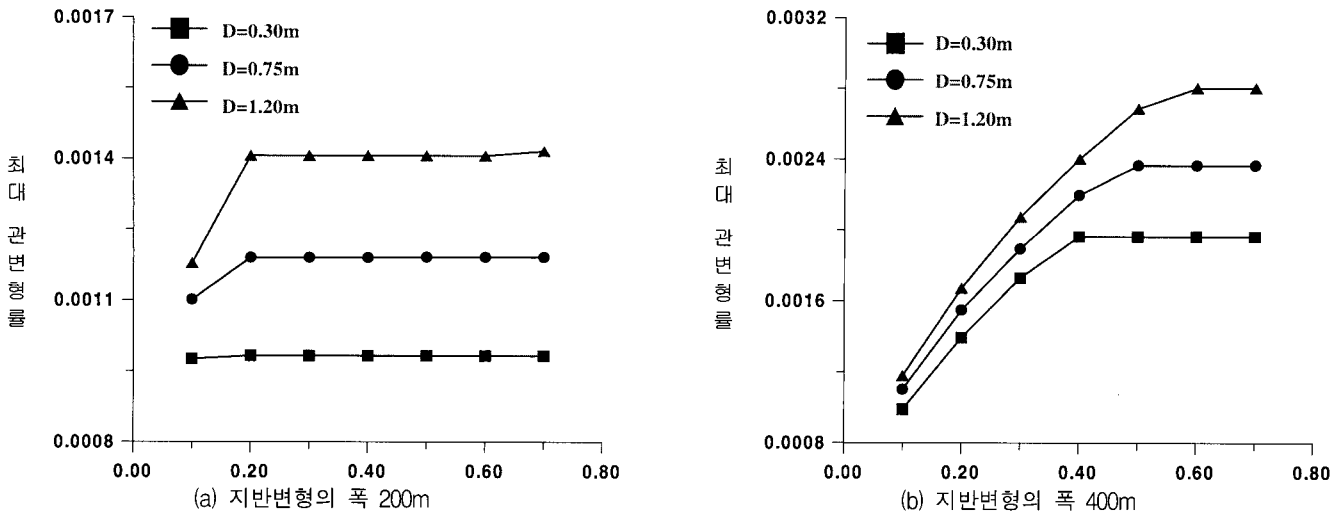


그림 13 관경변화에 따른 해석

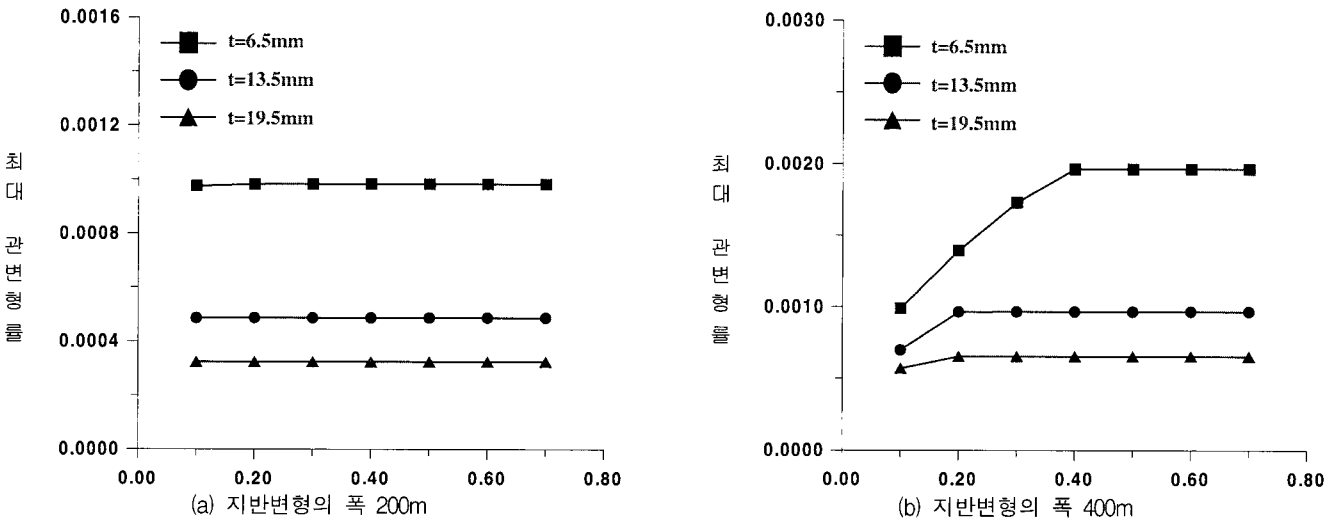


그림 14 관의 두께 변화에 따른 해석

은 관경보다는 관의 두께에 더 큰 영향을 받는다는 것이다. 또한 관의 미끄러짐 현상이 영구지반변형의 폭 및 관경이 증가하거나 관의 두께가 감소할수록 확연하게 나타난다는 점을 고려했을 때 영구지반변형이 발생가능한 지역에 위치하는 매설관로의 구조적 안정성을 위해서는 관경과 관 두께 설정에 있어서 영구지반변형의 주요 해석요소들을 신중하게 고려해야 하며 영구지반변형의 현상학적인 복잡성에도 불구하고 국내 제반조건을 고려한 영구지반변형의 설계 및 해석값의 합리적인 설정이 필요한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 액상화-중방향 영구지반변형에 대한 지중 매설관로의 거동특성을 해석할 수 있는 수치해석 기법을 개발하였다. 기존의 연구결과⁽⁶⁾가 간략한 해석식의 제안을 중심으로 진행되어 왔으며 영구지반변형의 형상과 폭에 따라 해석방법이 달라지는 단점을 가지고 있었던 것을 고려했을 때, 개발된 수치해석 기법은 다양한 영구지반변형의 형상과 폭을 단일한 알고리즘 내에서 처리할 수 있는 장점을 가지

고 있는 것으로 판단된다. 개발된 해석 기법을 이용하여 국내에서 사용되는 일반적인 강관을 대상으로 이상화된 지반변형의 형상과 크기 및 폭, 매설관로의 관경 및 관 두께 등을 변화시켜가면서 다양한 해석을 수행하였으며 중방향 영구지반변형에 대한 매설관로의 거동에 미치는 주요 인자들의 영향정도를 평가할 수 있었다. 이러한 과정을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 영구지반변형 발생지역의 폭 및 지반변형의 크기가 증가함에 따라 매설관의 최대 변형률이 증가한다는 것을 규명하였으며 기존의 해석적 연구결과와의 비교를 통해 본 연구에 사용된 수치해석 기법의 타당성을 검증하였다.
- (2) 영구지반변형 발생지역의 폭 및 지반변형이 증가함에 따라 최대 변형률은 증가하게 되나, 어느 정도 이상의 지반변형에 대해서는 변형률의 증가가 더 이상 발생되지 않는다는 것을 확인하였다. 이는 매설관로와 지반 경계면에서의 미끄러짐이 발생한다는 것을 의미하며, 관 변형률의 추가적인 증가를 억제한다는 측면에서 매설관로의 내진안정성을 증가시키는 효과를 가져올 수 있을 것으로

사료된다.

- (3) 실측지진자료를 이용하여 영구지반변형의 형상을 4가지의 대표적인 형태로 이상화시키고 실제적인 변형 형상을 표현하기 위해 sine 형상을 추가적으로 고려한 후 해석을 수행한 결과, 지반변형의 형상에 따른 변형률의 차이가 존재한다는 것과 실측결과에서도 나타났던 것과 같이 block 형상의 영구지반변형이 가장 큰 변형률을 발생시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 지반변형의 폭과 크기의 곱을 변형에너지로 가정할 경우, 형상에 따른 변형률의 차이는 이러한 변형에너지의 차이로도 설명될 수 있다.
- (4) 매설관의 제원을 대표하는 관경과 관두께를 변화시켜 가면서 해석을 수행한 결과 관경이 증가함에 따라서는 관강성의 증가를 상회하는 경계면 상호작용력의 증가로 인해 관의 변형률이 증가한다는 것을 확인하였으며, 관두께가 증가함에 따라서는 직접적으로 연관되는 관강성의 감소로 인해 관의 변형률이 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 관경과 관두께가 동일한 조건하에서 각각 배로 증가할 경우, 매설관로 최대 변형률의 증감 및 감소는 관두께의 변화에 상대적으로 더 많은 영향을 받게 된다는 결론을 도출할 수 있었다.
- (5) 관 변형률의 추가적인 증가를 억제할 수 있는 경계면에서의 미끄러짐 현상은 영구지반변형의 폭 및 관경이 증가하거나 관의 두께가 감소할수록 확연하게 나타나게 된다. 그러므로 영구지반변형이 발생할 수 있는 지역에 위치하는 매설관로의 관경과 관 두께 설정에 있어서 영구지반변형의 주요 해석요소들을 신중하게 고려해야 하며, 영구지반변형의 현상학적인 복잡성에도 불구하고 국내 제반조건을 고려한 영구지반변형의 설계 및 해석값의 합리적인 설정이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

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. 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.
4. 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.
5. Kobayashi, T., Nakane, H., Suzuki, N., and Ishikawa, M., "Parametric study on flexibility of buried pipeline subject to large ground displacement," *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. 348-362.
6. 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.
7. 김태욱, "횡영구지반변형에 의한 라이프라인 구조물의 동적 거동 해석", 석사학위논문, 연세대학교, 1999.
8. 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.
9. O'Rourke, M. J., Liu, X., and Florens-Berrones, R., "Steel pipe wrinkling due to longitudinal permanent ground deformation," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 121, No. 5, 1995, pp. 443-451.
10. 장재원, "종방향 영구지반변형에 의한 매설관로의 거동 특성 해석", 석사학위논문, 연세대학교, 2000.
11. Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Towhata, I., Tokida, K., Tamari, Y., Matsumoto, H.,

- and Yamada, K., "Prediction of permanent lateral displacement of liquefied ground by means of variational principle," *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. 237-252.
16. Suzuki, N. and Matsuda, N., "Idealization of permanent ground movement and strain estimation of buried pipes," *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. 455-469.
 17. 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.
 18. Suzuki, H., "Damage to buried pipes caused by large ground displacement," *Proceedings of the First Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline*, Technical Report, 1988, pp. 127-132.
 19. 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.
 20. O'Rourke, M. J. and Liu, X., *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*, MCEER Monograph No. 3, 1999. pp. 77-87