

단층활동시 매설 파이프라인의 거동에 대한 직접전단 시험모델 수치해석

Numerical Analysis using Direct Shear Test Model for the Behavior of Buried Pipeline by the Fault Motion

장 신 남*
Jang, Shin Nam

Summary

The frequency of earthquake occurrence tends to increase in Korea. Therefore, the stability of pipeline, such as watersupply pipe, gas pipe, and oil pipe etc., across fault zones in Gyoung-sang landmass is very important, especially, in metropolitan area. There were some examples of the construction of buried pipeline across fault zones in Korea. The interaction between the buried pipeline across fault zones and the ground is considered. As well, in the interfaces of them, the direct shear numerical analysis model including elasto-plastic joint element is assumed that the retained dilatancy theory in them, otherwise, Also, the other elements are modeled the ground is nonlinear elastic continuous beam, respectively.

In this study, the maximum shear force point exist inside retained zone(anchored zone)during shear(as fault sliding), and the distribution of pipeline's behavior is all alike them of pipeline buried in landsliding grounds. Since the pipeline is not continuous beam but jointed by steel-pipe segments, practically, on acting of a large bending moment or a shear force, then, those are may be unstable. The research on this point may be new approach.

I. 서 론

상수도관 및 가스관과 같은 생명선(Lifeline)의 건설은 인류의 평안을 위하여 대단히 중요하다. 특히, 대도시를 중심으로 하는 생명선들은 점점

거미줄과 같은 망(Mesh)을 구성하게 되었고 따라서, 만약 이 생명선들이 불안정한 경우는 도시, 산업단지 등의 폐허화를 부를 수 있다. 그러나, 우리나라에서는 이들 생명선의 설계·시공단계에서 안정성을 검토하는 경우는 극히 드문 실정이다.

* 대림대학 토목과

키워드 : 매설파이프라인, 생명선, 탄소성 조인트 모델, 지반-파이프라인의 상호작용, 직접전단 시험모델

그러나, 한반도에서는 기존의 판이론에 근거한 판 이동의 방향과 접촉면에서의 지진발생빈도가 많은 것이 추론되고 있으며 대부분의 경우 지진발생심도는 10km 미만의 다발적인 지진발생 가능성을 포함하고 있다.

또한, 우리 나라는 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록등의 고대사를 통한 지진기록은 한반도의 주요단층이나 지체구조(地體構造)의 경계면에서 주로 발생하고 있다고 할 수 있다. 지반내 매설되는 파이프라인 즉, 상수도 송수관, 기름관 및 가스관 등의 거동 및 안정해석법은 그 설치위치에 따라 여러 가지로 구분되어진다. 특히, 지진 등과 같이 대규모 동적 하중이 작용하는 지반내 또는 지반상에 설치되는 구조물의 안정은 대단히 중요하게 취급되어야만 한다.

따라서, 단층지대를 통과하는 매설 파이프라인 시공지역에 대하여 지진과 같은 일시적 대규모 충격하중에 의해 단층지대가 활동하는 경우는 생명선에 큰 위협을 주게 된다. 이러한 경우를 고려하기 위하여 단순화한 직접전단시험모델을 이용하여 지중매설과 및 지반에 대한 유한요소해석을 실시하고자 한다. 이러한 수치해석모델을 이용하여 지진시 발생되는 단층지반의 변형에 따른 매설 파이프라인의 거동을 고찰하고자 한다. 이때, 지반과 파이프라인의 상호작용은 지반-구조물의 접촉면에서의 Sliding(미끄러짐)모델을 이용한 탄소성조인트 요소를 도입한 경우와 적용하지 않은 탄성 요소를 도입한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 한편, 지반은 일반 토사지반으로 비선형거동을 하는 것으로 가정하였다.

II. 단층지역을 통과하는 매설 파이프라인의 안정해석법

매설 파이프라인에 대한 연구는 통상 지진시 지반 및 파이프라인의 거동을 조사 연구함으로써 대책을 사전에 조사 분석하고자 하는 것이다. 따라서, 이러한 연구는 파전달이론과 영구지반변형이

론의 두 분류로 수행된다. 특히, 이들 이론은 파이프의 변형거동방정식 및 지반의 감쇠현상에 의한 지반-파이프의 상호작용에 대한 연구로 주로 지진 다발지역인 환태평양지역에서 1987년 이후 MCEER(Multidisciplinary Center for Earth-quake Engineering Research)을 중심으로 광범위하게 수행되어 오고 있다(MCEER report 1987~1999). 이의 결과로 많은 이론들이 수립되어 적용되고 있으나 지진과 같은 큰 충격에 의한 거동은 불시적이고 일정한 패턴을 보이지 않으므로 연구방향의 설정은 일정하지 않다고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지진 등에 의한 지반의 충격하중에 대해 발생된 지반의 변위를 고려하여 본 질에서와 같이 단층활동시 발생된 영구지반변형에 대하여 매설 파이프라인의 거동을 조사하고자 한다.

1. 단층지역을 통과하는 매설 파이프라인과 지반의 상호작용

단층은 지각 근처에서 발생하는 변위에 의한 변형을 말하며 이러한 변위는 지진이나 장기간의 점층하중에 기인한다. 따라서, 지표부근에서의 붕괴에 따른 단층활동은 단층상에 놓인 구조물이나 단층지역을 통과하는 파이프라인의 안정에 큰 영향을 미치게 되며 지진의 규모와 발생깊이에 영향을 받는다. 단층활동은 단층의 경사 및 주향방향에 따른 활동방향으로 구분할 수 있고 이들 방법 등에 의해 여러 가지가 제안되고 있지만 이들 사례를 정리하여 보면 Fig. 1과 같이 4가지 형태로 구분된다. 즉, 단층활동은 그림에서 보는 바와 같이 주향(走向)과 경사에 따른 단층면에서의 상대이동 방향에 따라 주향방향활동(Fig. 1(a)), 연직방향활동(Fig. 1(b)), 역(逆)연직방향활동(Fig. 1(c)), 그리고 사(斜)방향활동(Fig. 1(d))의 단층으로 구분된다(ASCE,1984). 만약 이러한 단층지역에 생명선, 즉 파이프라인이 매설되는 경우, 단층활동에 의한 파이프라인의 변형거동은 Fig. 2와 같이 단층방향에 따라 두가지로 구분될 수 있다.

이때 매설 파이프라인을 연속체로 가정하는 경우

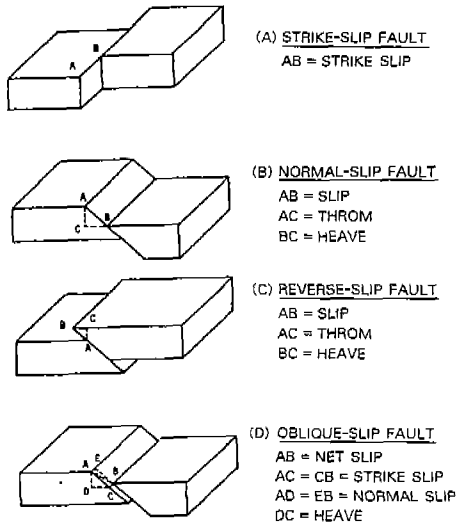


Fig. 1. Types of fault movement (after Krinitzsky, 1974)⁰

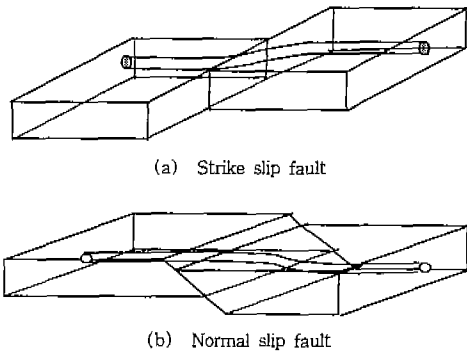


Fig. 2. The deformation shapes of buried pipeline across slip fault(after Meyersohn, 1991, ASCE, 1984)

단층면에서의 지반과 파이프라인의 상호거동을 고려하여 안정을 검토하게 된다.

한편, 매설 파이프라인의 거동은 실제로는 3차원적으로 해석이 되어야 하겠지만 지반의 거동은 2차원 평면변형상태로 고려할 수 있으므로 Fig. 3과 같이 2차원적인 거동모델로 일반화할 수 있고 Fig. 2의 파이프라인의 거동은 Fig. 4와 같이 단순화할 수 있다.

Fig. 3에서와 같이 단층지역에 매설된 파이프라인

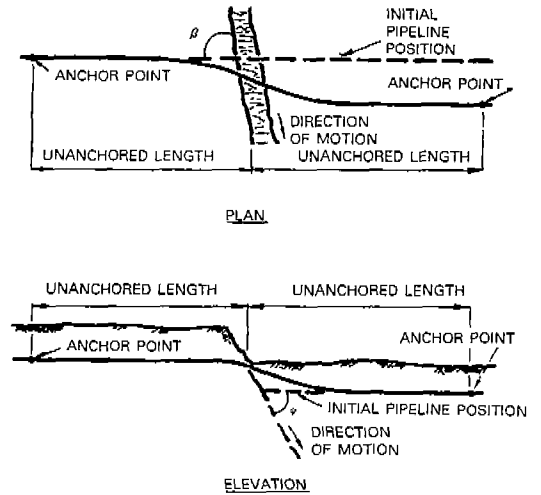


Fig. 3. Pipeline subjected to both normal and strike-slip movement at a fault crossing(ASCE, 1984)

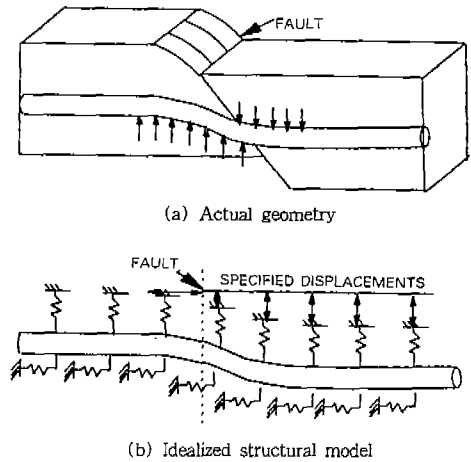


Fig. 4. Structural modeling of pipeline subjected to fault movement(ASCE, 1984)

의 지반과의 상호작용은 Fig. 4에서와 같이 파이프라인의 상부와 하부에서 작용하는 상재하중 및 작용하중에 의해 파이프라인은 구조적으로 탄성보(Elastic beam)로 가정하며 전단력과 휨 그리고 축력이 발생하게 된다. 또한, 지반은 Fig. 4에서와 같이 발생된 단층활동변위에 대하여 탄성지지로 가정하여 해석한다. 그러나, 지반의 경우 비

선형탄성거동을 하게 되므로 지반은 탄성 또는 탄소성지반으로 가정하는 것이 일반적이다(Isenberg etc., 1989). 한편, 지반 및 파이프라인의 거동은 Fig. 1(d)와 같이 주향 및 경사 방향이 동시에 존재하는 형태인 사(斜)방향으로 파이프라인이 매설되는 경우가 대부분이다. 그러나, 이 경우에 대한 해석은 파이프라인의 단층지역에 대한 매설경사를 고려하여야 하므로 간단하지만은 않다. 따라서, 본 논문에서는 Fig. 2(b)에서와 같이 한방향 단층활동인 경우만을 해석대상으로 하고자 한다.

2. 단층지반내 매설 파이프라인 해석법

단층지역을 통과하는 상수도관 및 가스관과 같은 매설 파이프라인의 안정 및 거동해석방법에는 Newmark-Hall 방법(ASCE,1984, after 1977), Kennedy 방법(ASCE,1984, after 1975) 및 유한요소법(Gill, et al., 1981, O'Rourke, 1989)의 세가지 방법이 제안·사용되고 있으며 다음과 같다.

먼저, Newmark-Hall의 방법은 파이프라인에 대한 지반의 수평방향 역지력이 제거됨으로써 이탈이 가능하다는 가정아래 파이프라인의 변형률을 하계치로 산정하며 구속영역(Anchored zone)사이의 파이프라인은 직선 변형한다고 가정하고 2차원 평면변형률(인장변형률은 2%~5% 미만으로 고려함)로 고려한다. 또한, 주향방향에 따른 단층활동(Fig. 2(a))은 Fig. 5와 같이 파이프라인의 매설각 β 에 대한 단층활동변위 d_f 는 파이프라인의 발생 인장력의 원인으로 취급하고 앵커부분과 단층사이의 거리를 앵커장 L_2 로 가정하며 축대칭 원호로 해석한다.

한편, O'Rourke(1988)는 단층을 통과하는 파이프라인의 응력-변형률응답모델을 조사하기 위하여 Owen's Paster지역의 3개 시료에 해당하는 지역에 설치된 파이프에 대하여 단층이 Strike-slip이 발생하는 것으로 하는 경우를 가정한 직접전단 시험을 실시하였다. 이에 대한 결과를 Ramberg-Osgood는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 3차선형관계로 재 표현하였으며 이때 제안된 응력-변형률관계

식은 식 (1)과 같이 적용될 수 있다.

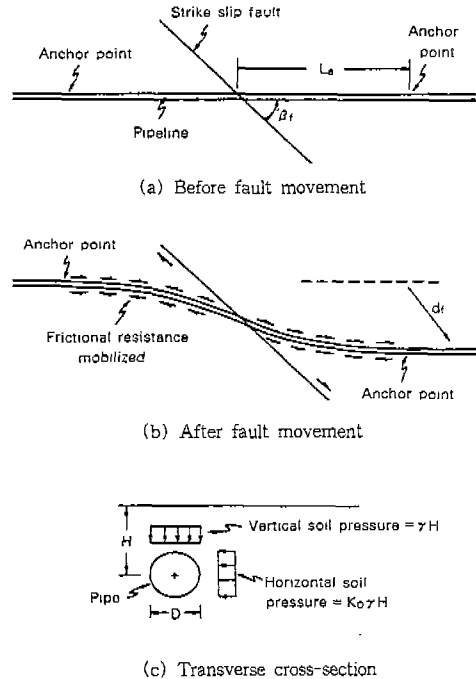


Fig. 5. Plane and sectional view of continuous pipeline envisioned in Newmark-Hall design approach (Isenberg etc.,1989)

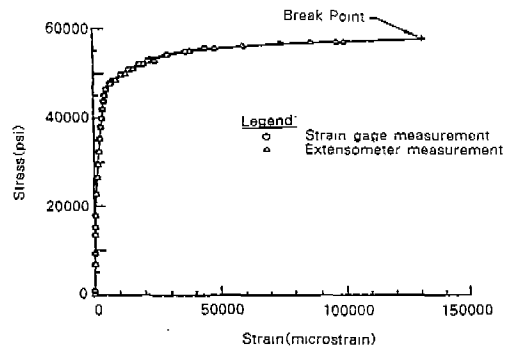


Fig. 6. Tensile stress versus strain for test specimen No. 1(Isenberg, 1989)

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1} \left[1 + \frac{\alpha}{(\tau + 1)} \left(\frac{\sigma}{\sigma_E} \right)^\tau \right] \dots \dots \dots (1)$$

σ, ϵ : 축응력과 축변형률

E_1 : 영률

α, r : Ramberg-Osgood상수

σ_E : 강관의 유효항복응력이다.

Kennedy 등의 방법은 단층영역 근처에서의 휨의 집중, 최대 휨이 발생하는 영역에서의 파이프와 지반사이에서 증가된 마찰저항, 그리고 대규모 인장변형에 의한 강관의 비선형응답을 설명할 수 있도록 제안되었다. 이때 증가된 마찰저항영역은 Fig. 5(c)에서와 같이 파이프라인의 곡률영역에 의존한다. 또한, Newmark-Hall의 가정과 동일하게 두 개의 원호를 갖는 축대칭형태로 변형하며 실제 또는 유효구속점 위치에서 파이프를 따라 축방향 전단응력이 작용하는 것으로 가정한다. 뿐만 아니라 대부분 모델의 가정은 파이프-지반의 접촉면에서의 마찰과 수동 지반저항상수를 고려하고 있다(ASCE, 1984, Isen-berg, 1989).

한편, 유한요소해석법을 이용하여 단층지역을 통과하는 매설 파이프라인의 거동을 해석하기 위하여는 일반적으로 파이프라인은 비탄성구조물, 지반은 비선형거동을 하는 것으로 가정되지만 대부분의 경우 실제로는 대규모 지반변위가 발생된 경우가 검토대상이 되므로 지반의 변위모델보다는 파이프라인의 거동에 관점을 집중시켜 해석을 수행한다.

III. 파이프라인 매설지반의 유한요소해석 모델링

지반내 파이프라인이 매설되어 있는 경우 지반과 파이프사이, 암반과 지반사이의 거동은 상호영향을 미치게 된다. 따라서, 접촉면에서의 해석모델링은 해석대상의 영향을 보다 합리적으로 평가할 수 있는 자료를 제공하게 되며, 본 장에서는 접촉면의 해석을 탄성 및 탄소성요소로 구분하여 해석하고 해석모델로 적용된 탄소성조인트 요소에 대하여 기술하였다.

1. 직접전단시험에 의한 접촉면에서의 구속다이라턴시 거동

토사지반이나 암반지반에 대한 불연속면 및 지반내 설치된 구조물과 지반과의 접촉면에서 힘을 전달하는 상태에 대한 문제해결을 위하여 불연속면의 변형상태를 작용하중과 응력상태에 따라 현실에 충실하도록 역학모델을 가정하는 경우 불연속면에서 인장력은 고려하지 않는 것으로 가정하여 조인트요소해석법이 도입·사용되고 있다(Goodman, 1972).

지반내 생명선과 같은 파이프라인이 매설되는 경우 파이프라인과 지반의 접촉면에서는 마찰저항이 발생하고 파이프라인에는 구속영역(Anchored zone)이 발생하여 지지되는 구속현상이 발생된다. 따라서, 매설된 파이프라인과 지반의 접촉면에서 구속다이라턴시효과는 지반과 파이프라인의 상호작용에 중요한 역할을 수행한다. 이러한 효과를 해결하기 위하여 조인트요소를 도입하여 단층활동 동안 즉, 직접전단시 연직응력에 의한 구속을 고려하여 해석을 수행하고자 한다(한중근,1997). 이를 위하여 접촉면은 조인트활동을 고려한 탄소성법을 이용하여 지반은 Duncan-Chang의 비선형탄성모델을, 파이프라인은 보(Beam)요소를 적용하여 유한요소해석을 실시하였다.

Goodman & Dubois(1972)는 자연의 조인트시료에 대하여 직접전단시험으로 Fig. 8과 같이 전단하중-전단변위 및 전단하중-연직변위의 관계를 나타내었다. 그림에서 OA는 탄성영역이며 A점부터 영구변형이 나타나기 시작하므로 항복응력이라고 AB영역은 탄소성영역이다. 변형률경화는 변형에 대한 접촉면재료의 항복응력으로 간주되므로 OB는 탄성영역이고 B점이후는 한계평형상태가 된다. 따라서, 조인트에서의 구속다이라턴시를 이상화하여 Coulomb의 항복규준이 적용되면 Fig. 7과 같이 특성지어지며 응력은 항복 후 파괴선을 따라 전달된다.

3. 탄소성조인트 요소의 응력-변형률 관계

파이프-지반의 접촉면에서의 탄소성 요소는 Matsui 등(1989)이 제안한 탄소성응력변형률 관계를 Coulomb의 항복합수와 관련흐름법칙에 따라 식 (2)와 식 (3)과 같이 가정하였다.

$$f = \tau^2 - (\sigma \tan \phi + c)^2 \dots \dots \dots (2)$$

$$\delta \epsilon_p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, σ : 연직응력

ϕ : 지반의 내부마찰각

c : 지반의 점착력

f : 항복합수

λ : 양의 스칼라계수

$\delta \epsilon_p$: 정상흐름법칙상태에서의 소성변형률 증분벡터이다.

전체변형률증분 $d\epsilon$ 는 탄성변형률증분 $d\epsilon_e$ 와 소

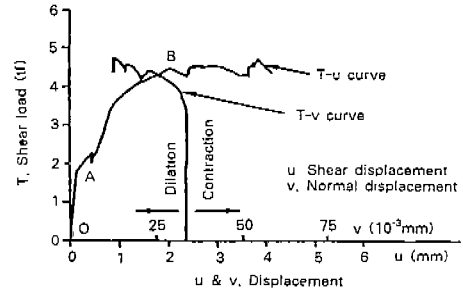


Fig. 8. Dilatancy of joint specim(Goodman, 1972)

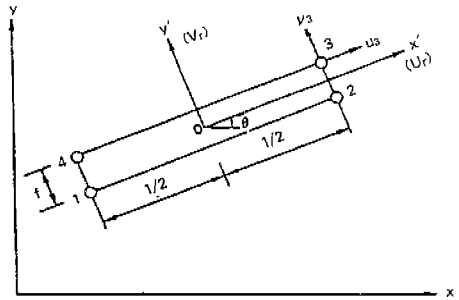


Fig. 9. Joint element(Goodman, 1972)

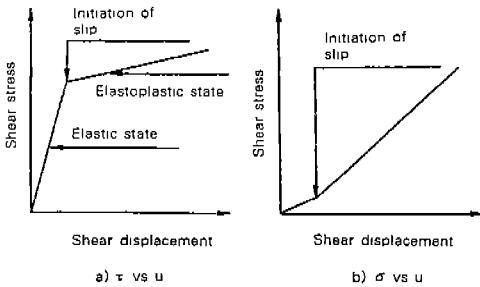


Fig. 7. Retained dilatancy specification and stress path at interface(Matsui etc.,1989)

성변형률증분 $d\epsilon_p$ 으로 구성된다. 이들 구성요소를 이용하여 Fig. 9와 같은 조인트 요소에 대하여 상대연직변위 du_r , 상대접선변위 dv_r 은 절점변위 u 와 v

를 고려하며 두 개의 변형률 요소에 대한 상대변위를 연직변형률 $d\epsilon = du_r/t$, 전단변형률 $d\lambda = dv_r/t$ 로 가정하여 강성 Matrix K 를 식 (4)와 같이 고려한다.

$$K = \int_v B^T D_{ep} B \, d(v) \dots \dots \dots (4)$$

여기서, D_{ep} 는 탄소성응력-변형률관계의 Matrix 이며 식 (5)와 같이 된다.

$$D_{ep} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & \tau \end{bmatrix} - \frac{G}{\tau^2 G + s^2 E} \begin{bmatrix} \tau^2 & \tau s \\ \tau s & s^2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

여기서, $E = k_n t$, $s = (\sigma \tan \phi + c) \tan \phi$, $G = k_n t$, 이고 $|\tau| = \sigma \tan \phi + c$ 이다.

4. 파이프라인 매설지반의 수치해석모델링

파이프라인이 매설되는 지반은 일반적으로 표토 층에 가깝게 존재하므로 밀도가 중간 이상인 토사

중으로 모델링할 수 있으므로 Duncan-Chang (1970)이 제시한 쌍곡선 비선형모델을 적용하였으며 식 (6)과 같다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_i \left[1 - \frac{R(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]} \dots\dots\dots(6)$$

이때, 응력-변형률관계는 구속응력에 따라 변화하므로 초기접선계수를 고려하여 극한상태에서 파괴비에 따라 Mohr-Coulomb의 포락선으로부터 구하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_i \left[1 - \frac{R(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi} \right]} \dots\dots\dots(7)$$

여기서, $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 주응력차
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 파괴시의 주응력차
 ε : 축변형률

K : 변형계수

$R_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: 파괴비

$E_i = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$: 초기접선계수(구속압에 관계)

P_a : 대기압

σ_3 : 최소주응력

n : 변형계수이다.

IV. 우리나라에서의 지진발생특성과 파이프라인매설 사례

1. 우리나라에서의 지진발생특성

한반도에서 발생하는 지진의 경우는 이웃한 일본의 경우와는 사뭇 다르다. 일본의 경우 태평양 지진대에 인접해 있고 태평양쪽은 저심도, 동해쪽은 심발심도의 지진발생 빈도가 많은 것으로 알려져 있다. 또한, 심발지진발생과 변성암류의 해성층에서 발생하는 해양성특성을 지니고 있다. 그러나, 한반도의 경우는 화강암류의 단독지괴를 갖는 대

륙성특성과 심도 10km 미만의 저심도지진발생특성이 있다(안종필, 1988).

한반도에서 발생한 지진발생기록을 보면 Table 1에서 보는 바와 같이 A.D 2세기 ~ 1986년까지의 지진기록을 보면 1988회로 보고되고 있다. 그러나, 실제 발생빈도는 더욱 많을 것으로 예상되며 일본 기상청진도계급 분류기준 JMA(8단계로 구분)에 의하면 우리나라의 유감(有感)지진주기는 JMA 진도Ⅲ 이상이 26.9년, JMA 진도Ⅳ 이상이 76.5년 주기로 발생하며 1905년 지진계설치 이후는 JMA 진도Ⅲ 이상이 2.6년, JMA 진도Ⅳ 이상이 27.3년 주기로 점차 발생주기는 감소하고 발생회수는 증가하고 규모는 대형화되고 있다.

Table 1. Frequency of earthquake in Korea

Frequency Periods	JMAⅢ above	JMAⅣ above
AD 2~1986	1988/74 = 26.9	1988/26 = 76.5
1905~1986	82/32 = 2.6	82/3 = 27.3

2. 단층지역을 통과하는 매설 상수도강관의 국내 사례

Ⅲ. 1절에서 설명된 바와 같이 우리 나라에서 발생하는 지진의 규모 및 발생빈도는 점차 증가추세에 있고 그중에서도 경상지괴에서의 발생빈도는 더욱 많다. 따라서, 경상지괴내에 존재하고 있는 단층지대는 지진발생시 대규모활동을 할 수 있는 가능성을 지니고 있으며 지금은 휴지기가 할지라도 대규모 하중 변화에 따른 지괴이동 등이 작용할 수 있는 가능성이 있다고 할 수 있다. 그러므로, 경상지괴내의 대도시를 연결하는 생명선(파이프라인), 즉, 상수도 송수관, 가스관 및 송유관 등과 같은 파이프라인의 안정점도를 위하여 단층활동가능지역 사례를 조사하여 이들 중 한 사례로 부산광역시를 연결하는 상수도 파이프라인의 배치를 수치 해석을 위한 기본모델로 간주하였으며 그 사례배치는 Fig. 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 상수원에 대한 취수 및 정수장을 잇는 파이프라인의

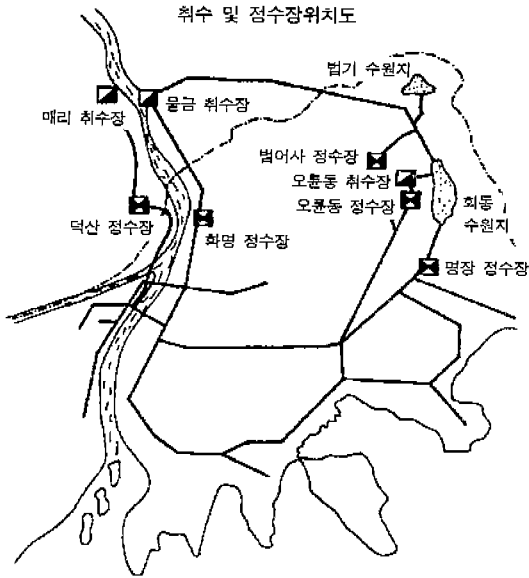


Fig. 10. Mesh of watersupply pipeline in South-Eastern Part of Korean Peninsula

송수관망은 강관, Ductile 주철관 그리고 터널 등으로 연결되어 있다. 그러나, Fig. 11에서 보는 바와 같이 단층지대가 부산에서 영덕만쪽 동북방향으로 다수 분포하고 있어 상수도 파이프라인은 이들 단층영역을 통과하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 2장에서 제시한 바와 같이 단층지대를 통과하는 파이프라인은 단층활동에 따른 안정검토를 시공전에 혹은 설계단계에서 미리 고려되어야

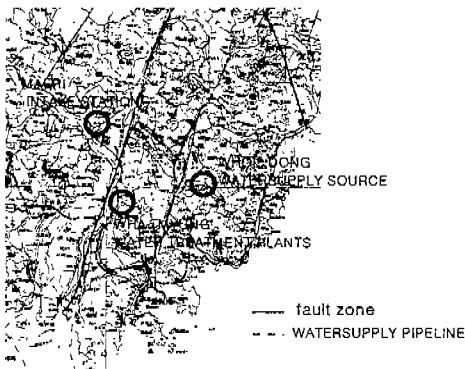


Fig. 11. The distribution of faults zone in South-Eastern part of Korean Peninsula

할 것이며 이미 설치된 파이프라인의 합리적인 안정검토 방법을 제시하여야만 할 것이다.

V. 직접전단모델링을 통한 매설 파이프라인의 거동예측

1. 직접전단수치해석 모델링 및 재료정수산정

단층지역을 통과하는 파이프라인의 단층활동시 안정해석을 위하여 Fig. 10 및 Fig. 11과 같은 현장사태를 검토하여 보고자 Fig. 12와 같이 직접전단시험모델로 가정하여 30m×18m의 유한요소망을 형성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 단층지역과 구조물과 지반의 접촉면을 조인트 요소로 가정하였으며 지반의 활동이 지진등에 의해 충격하중으로 작용하는 경우를 고려하여 단층활동 가능영역에 매설심도 깊이에 해당하는 상재하중 이상의 하중을 가하도록 하였다. 또한, 단층활동지역내 설치된 파이프라인은 전단력, 휨응력 및 축방향변형을 받게 되므로 보요소로 가정한다.

한편, 해석에 사용된 재료정수는 Table 2와 같다.

Table 2. Parameters on sand and steel pipe

Material constants	Sand	Steel pipe
Elastic modulus E (tf/m ²)	2×10^3	2.1×10^7
Internal diameter (mm)	-	1,100
Unit weight γ (t/m ³)	1.54	-
Poisson ratio ν	0.3	-
Internal friction angle ϕ (DEG)	31.70	-

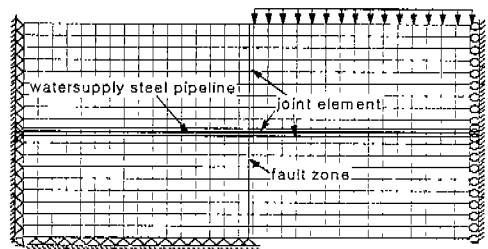


Fig. 12. The mesh to FEM analysis of buried pipeline steel-pipe across fault zone

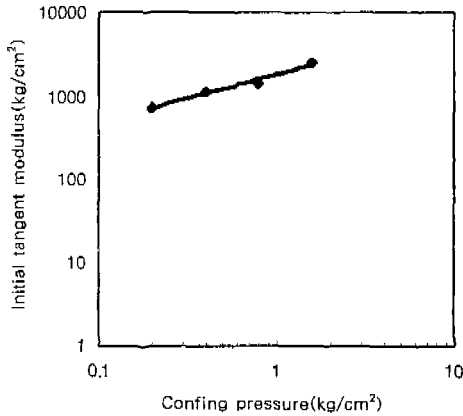


Fig. 13. Variation of initial tangent modulus with confining pressure under draining triaxial test conditions

또한, 지반은 파이프라인이 매설되는 위치가 비교적 표토층에 가까이 있고 사질토성분이 많은 지반이 대부분이므로 해석대상지반은 상대밀도 51%인 모래지반으로 가정하였다. 이러한 비선형거동 지반에 대한 재료정수를 산정하기 위하여 배수삼축 시험을 실시하여 초기접선계수 (E_i)와 축압 (σ_3) 관계를 통해 변형계수(K) 및 지수(n)를 Fig. 13과 같이 구하였으며 각각 $K=1803.8$, $n=0.5786$ 을 적용하였다. 조인트 요소에 대한 연직강성계수 K_s 와 전단강성계수 K_n 는 각각 1.5×10^4 , 점착력과 내부마찰각은 각각 1 tf/m^2 , $\phi=30^\circ$, 파괴비는 $R_f=0.9$ 로 가정하였다. 한편, 부산지역(Fig. 10 참조)에 매설된 상수도파이프라인은 지름 800mm~2,400mm의 강관, Ductile 주철관, 흙관 및 터널 등으로 총연장은 1997년 현재 74,856m로 매설되어 있다. 이들중 매설 상수도파이프라인은 강관이 대부분이므로 본 해석에는 강관 STW41A에 대한 재료정수를 Table 2와 같이 적용하였다.

2. 유한요소해석에 의한 파이프라인의 거동 예측

가. 비선형탄성해석에 의한 파이프라인의 거동 예측

Fig. 12와 같이 매설상수도강관의 직접전단수치

모델에 대한 유한요소망에 대한 Fig. 14와 같이 단층활동에 의한 지반변형시 지반과 파이프라인의 상호거동을 접촉면에서의 비선형탄성거동에 대하여 Fig. 14와 같이 해석결과를 파이프라인의 축력, 전단력 및 휨응력으로 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 접촉면에서의 최대전단력 및 최대축력은 단층활동면에서 최대가 되지만 최대휨응력의 발생지점은 파이프라인을 지지하고 있는 구속영역

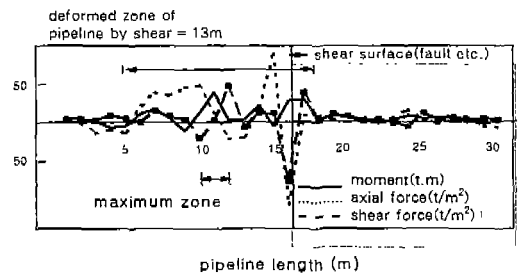


Fig. 14. The behavior of buried pipeline steel-pipe across fault sliding by the non-linear elastic FE analysis

내의 약 4~5m지점에 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한, 전단에 의해 발생하는 파이프라인의 변형구간은 약 13m이며 전체파이프라인의 변형중 약 80%는 변형이 발생하지 않은 지지지반내에서 발생하고 있으며 활동하고 있는 지반내 파이프라인의 거동은 거의 전단면부근을 제외하고는 거의 발생하지 않고 있다.

나. 탄소성해석에 의한 파이프라인의 거동예측

탄소성조인트를 포함한 파이프라인과 지반에 대한 상호작용의 유한요소해석결과는 Fig. 15와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 최대휨응력 및 최대전단력의 작용점은 전단면에서부터 약 3~5m 떨어진 지지지반내에 존재하며 특히 최대전단력은 전단면에서가 아니라 구속영역인 지지지반내임을 알 수 있다. 또한, 전단에 의해 발생하는 파이프라인의 거동구간은 약 11m가 되며 탄성해석시보다 거동의 특성을 보다 확실히 파악할 수 있다.

한편, 파이프라인에 발생하는 축력도 최대응력 발생지점에서 음양의 반전현상이 발생하고 있어

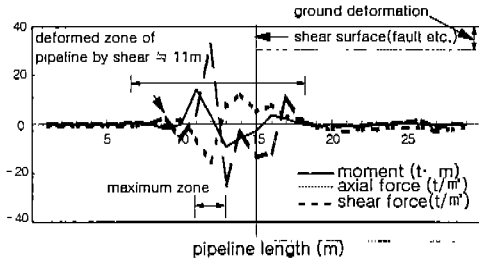


Fig. 15. The behavior of buried pipeline steel-pipe across fault sliding by the FE analysis elastoplastic joint element

단층활동시 파이프라인에 발생하는 응력의 분포는 전단면에서 보다 최대응력발생지점을 중심으로 거의 대칭되는 경향을 보이고 있다.

다. 수치해석결과의 비교고찰

기존연구해석에서 가정된 파이프라인의 거동은 활동전단면에서의 대칭적으로 고려되어 왔다. 그러나, 탄성 및 탄소성조인트에 대한 해석결과 Fig. 14와 Fig. 15에서 보는 바와 같이 전단면보다는 파이프라인을 구속하고 있는 지지지반내 약 4m 지점에서 최대응력이 발생하고 있으며 이 부분을 중심으로 대칭적인 거동결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 파이프라인의 거동에 대한 구속 영역은 기존연구에서와 같이 활동면으로부터 대칭되는 거리로 산정되기 보다는 단층활동면으로부터 파이프라인의 거동에 따라 구속상태를 고려하는 것이 타당할 것이다. 즉, 파이프라인을 지지하고 있는 지지반영역에서는 단층활동에 대한 파이프라인의 거동에 더 넓은 범위까지가 영향범위가 되며 오히려 활동지반에 속한 파이프라인은 일정하중 작용시 파이프라인의 거동이 비교적 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다. 이는 활동시 파이프라인의 안정범위를 산정하는 경우 보강범위를 예측할 수 있는 자료로 활용가능하다. 또한, 탄성 및 탄소성 해석결과는 거의 비슷한 구속영역으로 보이고 있으나 파이프라인의 거동을 조사하기 위하여는 Fig. 14 및 Fig. 15에서 보는 바와 같이 탄소성 해석결과가 보다 명확한 거동결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

한편, 파이프라인에 작용하는 축력은 탄성해석 시에는 전단발생면에서 최대가 되고 영향범위가 지지반대로 최대한 크게 확대되지만 탄소성조인트 해석결과는 발생응력의 형태와 거의 같고 영향범위도 거의 일정하게 고려될 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 탄소성해석결과에 의하면 탄성해석결과에 의한 파이프라인의 거동을 예측하는 경우보다 일관적인 거동형태를 보이고 있어 응력 및 축력의 발생형태를 합리적으로 예측할 수 있게 되었다.

상기와 같은 유한요소해석 결과, 단층활동방향에 의한 전단파괴 혹은 휨파괴는 파이프의 강성과 관련하여 상하수직으로 활동하게 되고 기존의 탄성해석에만 의존하거나 파이프라인이 본 연구에서와 같이 연속보로서 간주하게 되면 실제 지반에 매설된 파이프라인의 거동은 사뭇 다른 결과를 초래할 수 있다. 즉, 일반적으로 사용되는 파이프라인은 약 6m 혹은 12m의 강관들이 서로 용접 등에 의해 연결되어 있는 연속체이므로 파이프라인의 축방향 인장력에 의한 접합부에서의 파단파괴를 예측할 수 있게 된다. 따라서, 이러한 파괴는 연결부의 약화 혹은 균열 등이 발생하는 원인이 되고 이로 인하여 식수 등은 오염되는 등 생명선의 안정에 막대한 지장을 나타낼 수 있다. 또한, 관내부의 송수압과 외압의 차에 의해 송수관내에 이물질 등이 유입될 수 있어 생명선에 대한 많은 피해가 예상될 수 있다. 이러한 특징은 파이프라인의 특징에 영향을 받으므로 본 고찰에서는 제외하였다.

VI. 결 론

단층지대를 통과하는 파이프라인의 안정은 인류의 평화로운 삶을 영위하는데 필연적이다. 따라서, 상수도 송수관, 가스관, 그리고 송유관 등의 생명선들이 단층지대를 통과하는 경우에 대한 거동을 조사하기 위하여 국내시공사례를 조사하고 이 사례에 대하여 해석모델로서 직접전단시험모델을 선정하여 탄성 및 탄소성조인트를 포함한 유한요소 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 또한, 지반은 비선형탄성모델을 적용하였으며 파이프

프라인은 탄성보(Beam)으로 가정하였다.

1) 단층지역을 통과하는 파이프라인의 거동연구에 대한 적용성을 위하여 국내적용 일례를 선정하였으며 파이프라인이 매설된 지반과 파이프라인의 접촉면에서의 거동을 탄성 및 탄소성요소가 포함된 유한요소해석을 수행하여 상호작용을 비교검토할 수 있었다. 특히, 구속 다이러턴시를 고려한 탄소성조인트 요소를 포함한 직접전단시험수치모델의 적용성을 확인할 수 있었다.

2) 파이프라인과 지반의 접촉면에서의 거동이 탄성 혹은 탄소성해석결과 발생형태는 유사하지만 탄소성해석결과를 이용하면 응력 및 축력의 발생형태를 보다 명확히 예측할 수 있었다.

3) 최대전단력 및 최대휨응력이 발생하는 지점이 전단면보다는 파이프라인을 지지하고 있는 구속영역 내의 약 4~5m 지점에 존재하고 있었으며 이 부분을 중심으로 거의 대칭형태를 보이고 있어 기존연구에서 제시되고 있는 전단면에서의 대칭형태와는 약간 다른 결과를 보였다.

4) 탄성 및 탄소성해석을 통해 파이프라인에 발생하는 축력의 발생패턴은 파이프라인의 자체안정에 크게 영향을 미치게 된다. 즉, 파이프라인의 구속영역 범위 규모에 따라 파이프라인의 결합부 위치를 조정하거나 결합하는 구성방법 등의 안정성에 대한 영향을 고려하여야 하는 문제점을 제기할 수 있을 것이다.

5) 상기 결과를 통하여 단층활동에 따른 매설 파이프라인의 거동을 예측하며 그 결과를 설계단계에 미리 적용한다면 생명선의 안정을 더욱 증가할 수 있는 방안을 제시할 수 있을 것이다.

본 연구의 수행을 위해 아낌없이 도움을 준 대림학원의 학술연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박중현, 1997, 심층지하공간을 활용한 도심도 수도시설의 구상, 물학술발표회 및 심포지엄논문집, 사단법인 한국물학술단체연합회, pp. 45~72.
2. 안종필, 1988, 최신토목지질학, 구미서관.
3. 한중근, 1997, 역지말뚝을 이용한 사면의 안정 해석 및 설계, 중앙대학교 대학원 박사학위논문.
4. ASCE, 1984, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems.
5. Duncan, J.M. and Chang, C.Y., 1970, Nonlinear analysis of Stress and Strain in Soils, Jour. Geo. Eng. Div. ASCE, Vol.95, No.SM5, pp. 1629~1653.
6. Goodman, R.E. and Dubois, T., 1972, Duplication of Dilatancy in analysis in Jointed Rocks, Jour. Geo. Eng. Div. ASCE, Vol.98, No.SM4, pp. 399~422.
7. Isenberg, J. Richardson, E. and O'Rourke, T.D., 1989, Experiment on Performance of Buried Pipelines Across San Andreas Fault, Technical Report, NCEER-89-0005.
8. Kennedy, R.P., Chow, A.W., and Williamson, R.A., 1977, Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline, Jour. of the Trans. Engng. Div. ASCE, May, Vol. 103, No.TE5, pp. 617~633.
9. Matsui, T., and San, K.C., 1989, AN Elasto-plastic joint element with its application to reinforced slope cutting, Soils and Foundations, v\Vol.29, No.3, pp. 95~104.
10. Moser, A.P. 1990., Buried Pipe Design, McGraw-Hill.
11. Newmark, N.M. and Hall, W.J. 1975, Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement, Proc., of the 1975 U.S. National Conf. on Earthquake Engng. Ann Arbor, Michigan, pp. 416~425.
12. O'Rourke, M.J. and Nordberg, C, 1992., Longitudinal Permanent Gound Deformation effects on Buried Continuous Pipelines, Technical Report, NCEER- 92-0014.
1. 박중현, 1997, 심층지하공간을 활용한 도심도 수도시설의 구상, 물학술발표회 및 심포지엄논문