

매설 천연가스배관의 지반침하에 의한 응력 분석

Analysis of Stresses on Buried Natural Gas Pipeline Subjected to Ground Subsidence

김형식* · 김우식* · 방인완** · 오규환** · 홍성호*

H.S. Kim · W.S. Kim · I.W. Bang · K.H. Oh · S.H. Hong

(1998년 4월 21일 접수, 1998년 5월 2일 채택)

ABSTRACT

This study was initiated to examine the stress and deformation characteristics of the pipelines which were subjected to various environmental conditions in order to confirm their integrity. As the part of them, this paper presents the analysis results for the effect of ground subsidence combined with main loads on buried natural gas pipelines. The ground subsidence which can occur for buried gas pipeline has been classified to the three cases. Finite element method was used to analyze the effect of ground subsidences on pipeline of 26 inch(0.660 m) and 30 inch(0.762 m) diameter used as high pressure (70 kg/cm²(6.86 MPa)) main pipelines of KOGAS.

This paper shows the result of stress analysis for the pipelines subjected to those three case ground subsidence. Comparing these results with safety criterion of KOGAS(0.9 σ_y), maximum allowable settlement and loads have been calculated.

1. 서 론

한국가스공사의 매설된 천연가스 공급용 배관의 총연장은 전국적으로 1,309km에 이르고 있다. 매설 천연가스배관이 눈, 발, 해안가, 도로변,

매립지 등 매우 다양한 지역을 통과하기 때문에 배관이 놓여지는 지반의 상태가 동일하지 않다. 그러므로 지반의 이차압력, 지하수저하에 의한 압력, 차량하중 및 진동, 매립지, 기타공사 등에 의해 지반침하의 요인이 존재하고 있다. 일률적

* 한국가스공사 연구개발원 LNG설비기술연구실

** 서울대학교 재료공학부

인 지반침하에 대하여는 강관의 휘는 성질에 의하여 큰 문제를 발생시키지 않지만, 지반의 불균일성에 의하여 생기는 부등침하는 매설배관 파괴의 주요원인으로 발표되고 있다^{1,2)}.

그러므로 이러한 지반의 불균일성으로 인해 발생하는 길이 방향 하중에 대해 배관의 건전성을 입증하기 위해서는 얼마만한 하중이 침하에 의해 발생할 것인가를 평가하는 것이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 지반반력기반 모델(subgrade reaction foundation model)^{3,4)}에 의한 유한요소법을 이용하여 지반침하에 의해 발생하는 응력을 평가하였다. 그리고 유한요소모델의 적합성을 평가하기 위해 해석적방법에 의한 침하량과 비교하였다.

해석대상으로는 한국가스공사에서 70 kg/cm²으로 천연가스를 공급하고 있는 주배관으로 두께 11.9, 14.3, 17.5mm의 30인치 배관과 10.3, 11.9, 14.3mm의 26인치 배관으로 하였다.

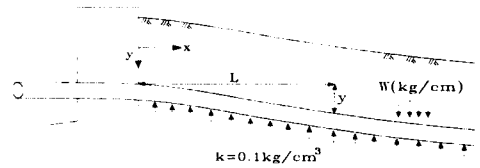
세종류의 침하형태에서 매설깊이와 배관의 직경, 두께 그리고 침하폭에 따른 최대 침하깊이와 최대응력을 계산하였다, 그리고 한국가스공사의 최대허용응력기준인 90% 항복응력이 발생하는 최대 침하량과 하중을 계산하였다.

2. 해석방법

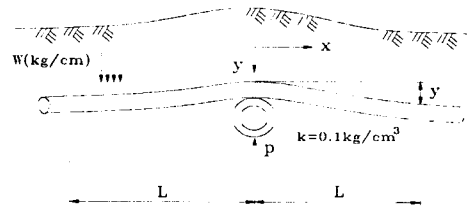
2.1 지반침하

본 연구에서 적용한 세종류(A, B, C)의 지반침하²⁾를 Fig. 1에 나타내었다.

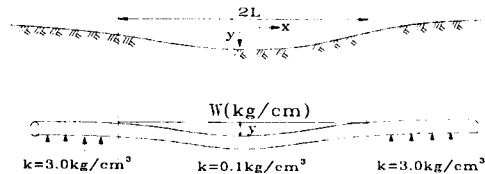
Fig. 1의 (a), (b)는 두종류의 CASE A를 보여준다. (a)는 일단이 고정된 관의 침하로서 배관이 교량 등에 연결되어 있는 경우가 이에 해당하며, (b)는 관 하단부에 고정점(지하구조물)이 있는 경우로 (a)와 (b)의 해석적 해는 2.2절에서 보듯이 동일하다. Fig. 1 (c)의 CASE B는 연약지반을 횡단하는 배관의 침하로서 눈이나 매립지를 통과하는 경우가 이에 해당한다. Fig. 1 (d)의 CASE C는 연약지반의 지반반력이 0이 되는 경우로서, 배관 밑의 지반이 함몰되거나 지진 등에 의해 지반의 액상화가 일어날 때 발생할 수 있는 지반침하이다.



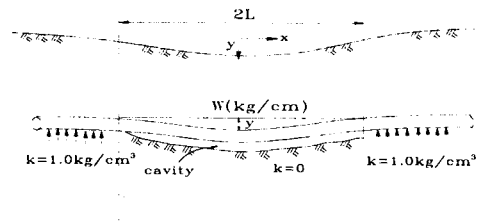
(a) The subsidence of pipeline fixed at one end (CASE A)



(b) The subsidence of pipeline under which there is fixing point (CASE A)



(c) The subsidence of pipeline crossing the soft ground at which some degree of ground reaction force is anticipated (CASE B)



(d) The subsidence of pipeline crossing the soft ground at which no ground reaction force is anticipated (CASE C)

Fig. 1 Schematic diagrams of the subsidence types for pipeline

2.2 해석적방법에 의한 응력해석

지반침하에 의하여 발생하는 배관의 변형과 응력은 배관을 보요소로 보고, 지반반력기반 모델로써 해석적으로 구할 수 있다.

Winkler에 의해 제시된 지반반력기반 모델에서는 배관주위의 지반을 탄성 기반(elastic foundation)으로 모델링한다³⁾. 즉, 배관과 주위지반의 관계를 스프링의 관계로 설정하여 배관의 변형에 따른 지반 거동을 지반반력으로 모델링하였다(Fig. 2). 지반이 받는 압력 p는 배관의 수직 변위에 비례한다.

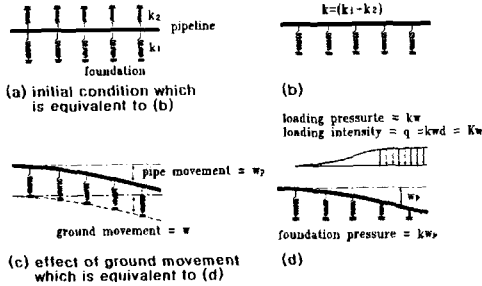


Fig. 2 Schematic diagram of Subgrade reaction foundation model

즉,

$$p = kw_p \dots\dots\dots (1)$$

여기에서, k는 지반반력계수(coefficient of subgrade reaction, dimension: FL⁻³)이고, w_p는 배관의 수직변위이다. 지반반력계수 k는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{0.65}{D} \left(\frac{E_g D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \left(\frac{E_g}{1 - \nu_g^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

E_p = Young's modulus of the pipe

I_p = second moment of inertia of the pipe

E_g = elastic modulus of the foundation

ν_g = Poisson's ratio of the foundation

D = pipe outside diameter

탄성 기반의 단위 길이당 강성 K(modulus of subgrade reaction, dimension: FL⁻²)는 K=k×D로 나타낼 수 있다.

탄성 기반 위에 놓인 배관의 수직 변형에 관

한 일반적인 미분방정식은 다음과 같다⁵⁾.

$$\frac{\partial^4 w_p}{\partial y^4} + 4\beta^4 w_p = 4\beta^4 w_g = 4\beta^4 \frac{W}{K} \dots (3)$$

여기서, w_p와 w_g는 각각 배관과 지반의 수직 변위이며, K는 탄성 기반의 강성, W는 배관에 작용하는 단위길이당 하중이다. β는 다음과 같이 나타내어지며, 1/β을 토양-배관 강성도(soil-pipe stiffness)로 칭한다.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4E_p I_p}} \dots\dots\dots (4)$$

식(3)을 일반적으로 고려하는 지반침하의 경우에 적용하면 다음과 같다.

① CASE A: 일단이 고정된 관의 침하

배관의 수직 변위 y는 다음과 같이 나타내어진다(Fig. 1 (a)).

$$y = -\frac{W}{K} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) + \frac{W}{K} \dots (5)$$

식(5)로 부터 최대침하량과 최대굽힘모멘트는 다음과 같다.

$$y_{max} = \frac{W}{K} (1 + e^{-\pi}) \text{ at } x = \frac{\pi}{\beta} \dots\dots\dots (6)$$

$$M_{max} = E_p I_p \frac{2\beta^2 W}{K} \text{ at } x=0 \dots\dots\dots (7)$$

최대축방향응력은 다음과 같다

$$\sigma_x = \frac{M_{max} D}{2I_p} \text{ at } x=0 \dots\dots\dots (8)$$

지하에 고정점(지하구조물)이 있는 관의 침하의 경우에 배관의 수직 변위 y는 다음과 같이 나타내어진다(Fig. 1 (b)).

$$y = -\frac{W}{K} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) + \frac{W}{K} \dots (9)$$

고정점에서의 반력: P = $\frac{2W}{\beta}$

식(9)로 부터 최대침하량과 최대굽힘모멘트는 다음과 같다.

$$y_{max} = \frac{W}{K} (1 + e^{-\pi}) \text{ at } x = \frac{\pi}{\beta} \dots\dots\dots (10)$$

$$M_{max} = E_p I_p \frac{2\beta^2 W}{K} \text{ at } x=0 \dots\dots\dots (11)$$

최대축방향응력은 다음과 같다.

$$\sigma_x = \frac{M_{max} D}{2I_p} \text{ at } x=0 \dots\dots\dots (12)$$

따라서 지하에 고정점이 있는 경우의 침하는 일단이 고정된 관의 침하와 동일하다.

② CASE B: 연약지반을 횡단하는 관의 침하 (연약지반의 지반반력을 약간 기대할 수 있는 경우)

연약지반과 견고지반의 지반반력계수가 다르고, 연약지반의 폭이 변하게 되므로 해석적인 해를 구하기가 어렵다(Fig. 1 (c)).

③ CASE C: 연약지반을 횡단하는 관의 침하 (연약지반의 지반반력을 기대할 수 없는 경우)

최대침하량과 최대모멘트는 다음과 같이 주어진다(Fig. 1 (d)).

$$y_{\max} = \frac{1}{48} \cdot \frac{WL^4}{E_p I_p} \cdot \frac{(1 + \beta L)(3 + 6\beta L + 2\beta^2 L^2)}{\beta^3 L^3} \quad \text{at } x=0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{6} \cdot WL^2 \cdot \frac{3 + 3\beta L + \beta^2 L^2}{\beta L(1 + \beta L)} \quad \text{at } x=0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

최대축방향응력은 다음과 같다.

$$\sigma_x = \frac{M_{\max} D}{2I_p} \quad \text{at } x=0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

2.3 유한요소법에 의한 응력해석

배관을 ABAQUS에서 제공하는 PIPE31H 요소로 모델링하였다⁶⁾. 이 요소는 내압과 굽힘의 영향을 동시에 고려할 수 있는 3차원 보요소로서 지반침하와 같은 큰 변형을 받는 배관의 거동을 정확하게 모사할 수 있는 장점을 지니고 있다. 계산에 사용한 배관의 기계적성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of pipeline

Material	Elastic Modules (GPa)	Poisson's ratio	YS (MPa)	UTS (MPa)
API 5L X65	207	0.3	448	530

배관 주위의 지반은 Winkler에 의해 제시된 지반반력기반 모델을 이용하여 탄성 기반으로 모델링하였다. 지반반력계수 k의 값은 지반의 탄

성계수에 비례하는데, 연약지반의 경우에는 0.1 kg/cm³, 견고한 지반은 3.0kg/cm³, 보통 지반은 1.0kg/cm³의 값을 널리 사용하며, 이번 계산에서도 위의 값을 사용하였다. 기반모델을 이용하면 배관 주위 지반을 따로 요소화하지 않고 지반반력으로 모델링할 수 있기 때문에, 지반침하에 의한 배관의 문제를 배관만 요소화하여 모델링할 수 있다. 따라서 계산 시간을 상당히 단축시킬 수 있으며 많은 분야에 성공적으로 적용되고 있다.

내압(70kg/cm²)과 배관의 자중에 의한 하중을 먼저 가하여 토하중에 의한 지반침하가 일어나기 전의 초기조건으로 설정하였으며, 토하중을 6m의 매설깊이에 해당하는 값까지 적용하여 토하중의 증가에 따른 지반침하의 전개를 살펴 보았다. 토하중의 크기는 사각기둥하중(Prism load)⁷⁾를 사용하였다. 단위 체적당 흙의 무게는 2000kg/m³의 값을 사용하였다.

CASE A의 경우 배관의 길이를 50m로 하여 해석하였고, CASE B와 CASE C의 경우에는 침하폭에 따른 영향을 파악하기 위하여 침하폭을 변화시키며 계산하였다.

3. 해석결과

3.1 일단이 고정된 관의 침하

Fig. 3에 기반모델과 보요소에 근거한 해석해와 유한요소법에 의해 구해진 CASE A의 지반침하에 의한 배관의 수직 변위를 나타내었다. Fig. 3에서 X는 배관의 길이방향에 해당된다. 그림에서 보듯이 두 결과가 서로 잘 일치하고 있으며 따라서 해석이 적절하게 이루어졌음을 알 수 있다.

Fig. 4에 지반침하에 의한 배관의 응력분포를 나타내었다. X=0인 지점에서 배관이 고정되어 있고 토하중에 의해 수직 방향으로 변형되므로 고정부의 상단부(crown)는 인장 축방향응력(하단부(invert)에서는 압축 축방향응력)이 발생하였는데 고정부의 상단부에서 최대 응력이 발생하는데, 6m의 매설깊이에 의해 발생하는 응력의 크기는 축방향응력과 유효응력이 모두 허용치를 초과하는 큰 값을 나타낸다. 또한 지반침하에

의한 영향은 배관의 굽힘 변형에 의한 축방향응력의 증가가 주된 것이기 때문에 원주방향응력의 증가에 비해 축방향응력의 증가가 훨씬 크게 나타났다. 이러한 큰 축방향응력의 증가에 의해

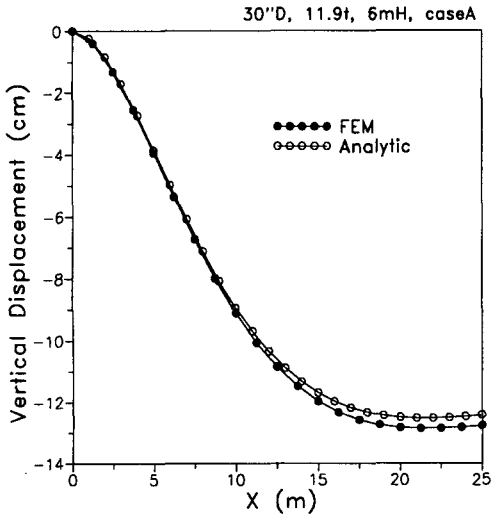


Fig. 3 Vertical displacement variations along the pipeline for CASE A (Fig. 1 (a))

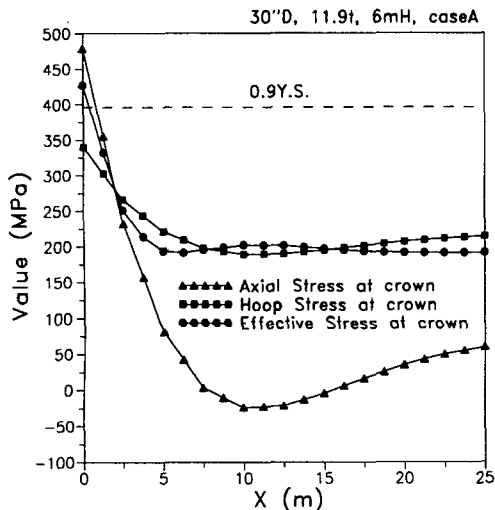


Fig. 4 The stress distributions along the pipeline for CASE A in Fig. 1 (a)

유효응력도 크게 증가하는 것을 그림으로부터 파악할 수 있다.

Fig. 5에 매설깊이의 변화에 따른 배관의 최대 침하량을 나타내었다. 26, 30인치 배관 모두에서 최대 침하량은 매설깊이에 비례하여 증가하며, 거의 같은 변화를 나타내었다.

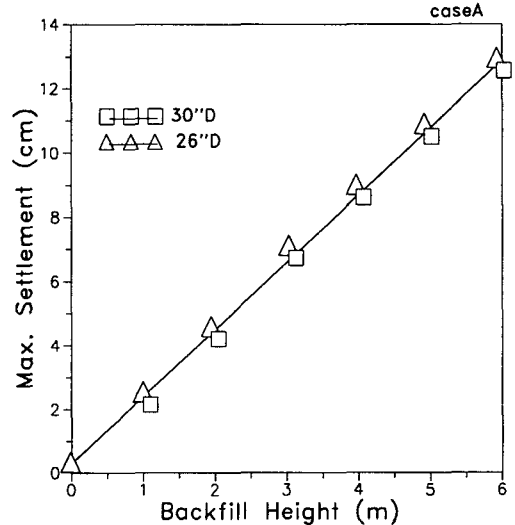


Fig. 5 Variations of maximum settlement according to the change of backfill height

Fig. 6~8에 배관의 최대 침하량에 따른 최대 축방향응력과 최대 유효응력의 변화를 나타내었다.

두께가 적은 배관일수록 내압에 의한 응력이 크고 휨강성이 적기 때문에 축방향응력이 더 크게 발생하고 침하량의 증가에 따른 축방향응력의 변화도 더 큰 것을 알 수 있다. 축방향응력은 최대 침하량의 증가에 따라 비례하여 증가하며, 유효응력은 침하량이 큰 경우가 적은 경우에 비해 더 많이 증가함을 알 수 있다. 30" D 11.9t, 26" D 10.3t 배관의 경우 13cm 정도의 침하량이 발생하면 허용 응력에 해당하는 유효응력이 발생함을 알 수 있다

3.2 지반반력이 약간 기대되는 연약지반을 횡단하는 관의 침하

Fig. 9에 약간의 지반반력을 기대할 수 있는 연약지반을 횡단하는 배관(침하폭=40m)에 지반 침하에 의해 발생하는 배관의 수직 변위를 나타

내었다. 6m의 매설깊이에 의해 연약지반의 중심부에서 13cm 정도의 지반침하가 발생함을 알 수 있다.

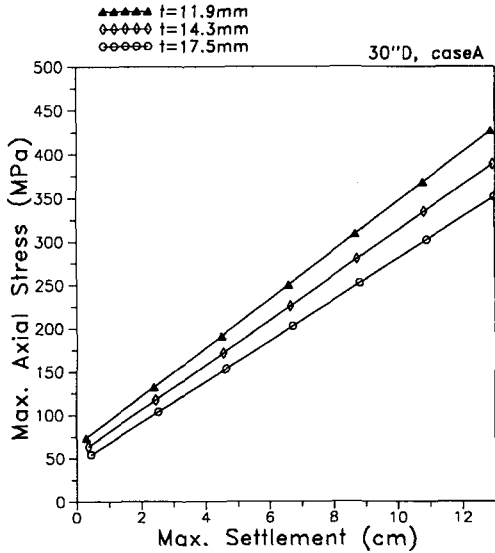


Fig. 6 The variations of axial stress according to maximum settlement for 30 inch pipeline

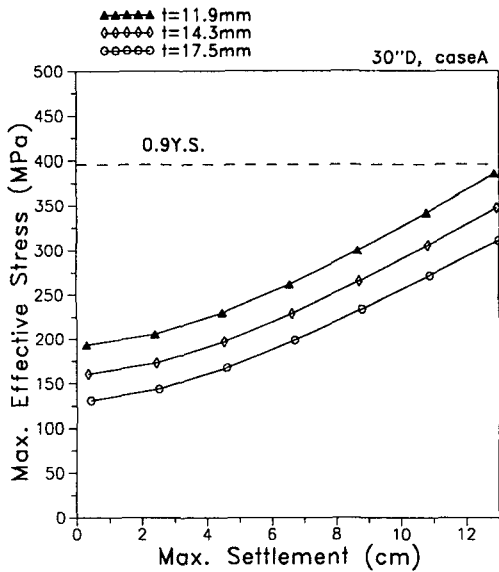


Fig. 7 The variations of effective stress according to maximum settlement for 30 inch pipeline

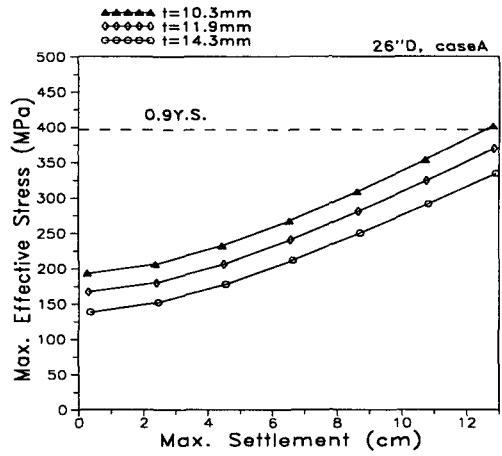


Fig. 8 The variations of effective stress according to maximum settlement for 26 inch pipeline

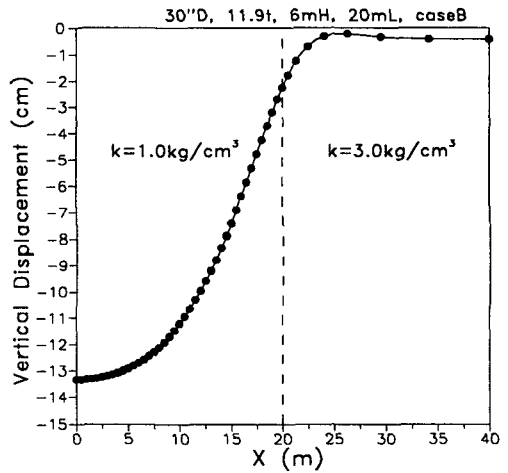


Fig. 9 Vertical displacement variation along the pipeline for CASE B ground subsidence

이 침하량은 Fig. 3에 나타낸 CASE A의 침하량과 비슷한 크기이다. Fig. 10은 침하폭 40m에서 배관 길이 방향으로의 축방향, 원주방향, 유효 응력의 분포를 나타낸 것으로 Fig. 7과 10을 비교하면 CASE B의 경우가 CASE A의 경우에 비해 지반침하에 의해 배관에 발생하는 응력이 훨씬 적다는 것을 알 수 있다. 이는 연약지반의 침하시에 견고지반도 어느 정도 함께 변형되어 응력이 덜 집중되기 때문이다. 응력 분포는 연

약지반과 견고지반의 경계부 근처에서 배관의 크라운에 최대 응력이 발생하며, 이는 CASE A 의 경우와 유사하다.

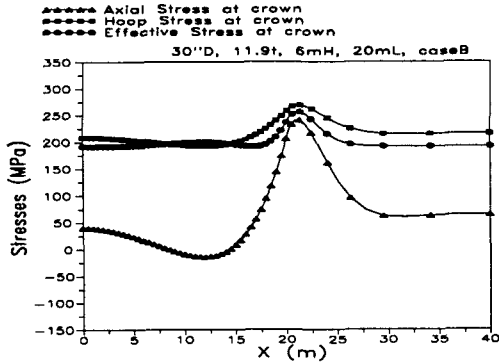


Fig. 10 The stress distributions along the pipeline for CASE B in Fig. 1 (c)

지반침하폭의 변화에 따른 배관의 최대 침하량과 최대 축방향응력, 유효응력의 변화를 Fig. 11, 12에 나타내었다. 그림에서 최대 침하량과 최대 응력의 변화는 침하폭에 따라 증가하는 것이 아니고, 일정한 침하폭 이상에서는 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. 그림에 나타난 외경 30인치, 두께 11.9mm, 매설깊이 6m의 경우에는 최대 침하량은 L=20m, 최대 축방향응력, 유효응력은 L=12.5m에서 최대값을 나타내며, 침하폭이 더욱 증가하게 되면 그 값들은 거의 일정하거나 완만하게 감소함을 알 수 있다.

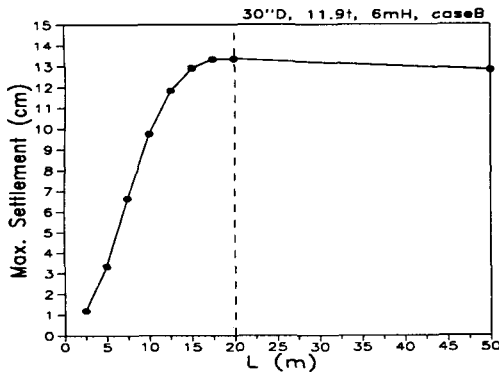


Fig. 11 Variations of maximum settlement according to subsidence width (2L)

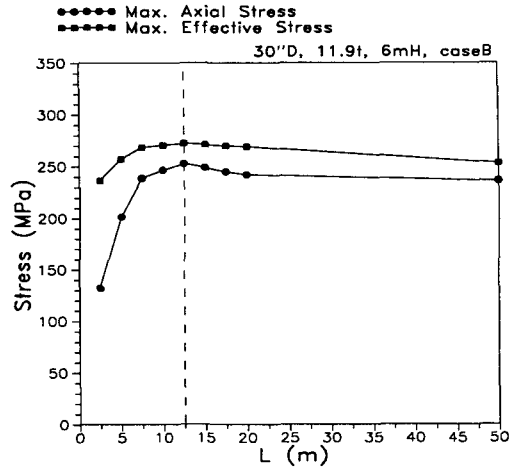


Fig. 12 Variations of axial stress and effective stress according to settlement width (2L)

따라서, 최대응력이 발생하는 침하폭을 구하기 위하여 침하폭의 크기를 세분하여 해석을 수행하여 최대응력을 발생시키는 침하폭의 크기를 구하였다. 외경 30inch 배관의 경우는 모든 두께에 대해 L=12.5m에서 최대값을 나타내지만, 외경과 두께가 감소할수록 최대응력이 유발되는 침하폭의 크기는 감소하는 경향을 나타내었다³⁾.

Fig. 13~15에 토하중의 증가(매설깊이의 증가)

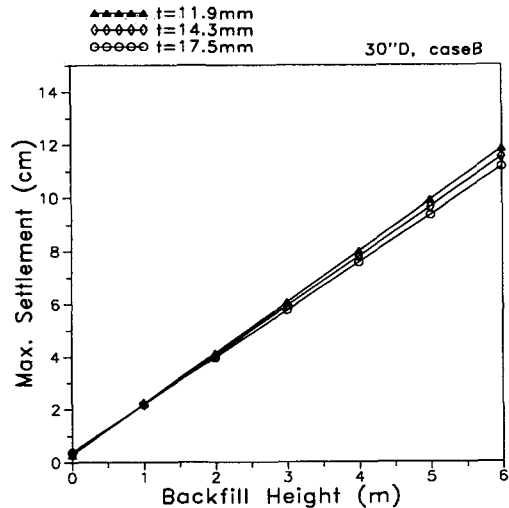


Fig. 13 Variations of maximum settlement according to change of backfill height

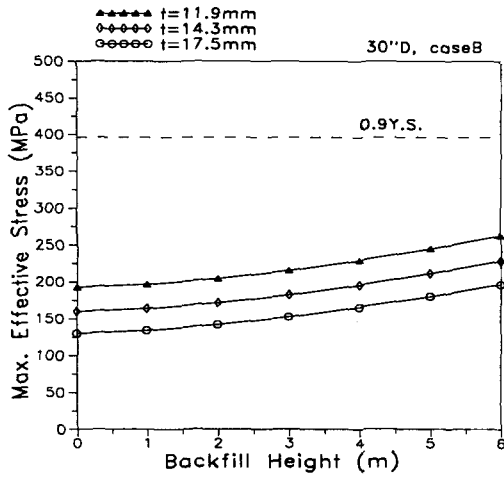


Fig. 14 Variations of maximum effective stress according to change of backfill height

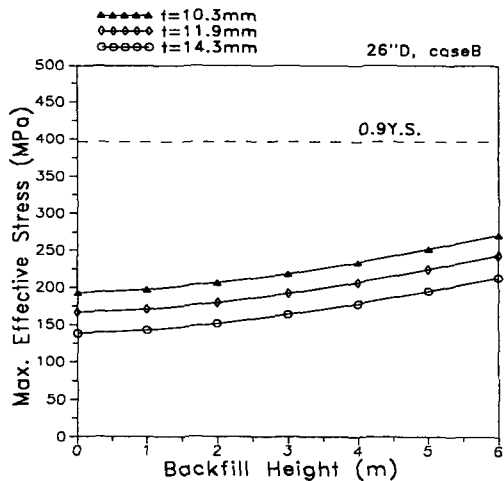


Fig. 15 Variations of maximum effective stress according to change of backfill height

에 따른 배관의 최대 침하량과 최대 축방향응력, 유효응력의 변화를 각 외경에 대해 두께를 달리 하여 해석한 결과를 나타내었다. CASE A에 비해 응력값이 적고 토하중의 증가에 따른 응력의 증가량도 적다

3.3 지반반력을 기대할 수 없는 연약지반을 통과하는 배관의 침하

Fig. 16에 지반반력을 기대할 수 없는 연약지반을 횡단하는 배관(침하폭=40m)에 지반침하에 의해 발생하는 배관의 수직 변위를 나타내었다.

이 경우의 매설 깊이는 2m로서 CASE B의 1/3에 해당하는 토하중이 작용하지만, 이 하중에 의한 배관의 최대변위는 105cm 정도로서 CASE B에 비해 8배나 큰 침하가 일어난다. 따라서, 지반반력이 없는 경우의 지반침하는 매우 심각하다는 것을 알 수 있다.

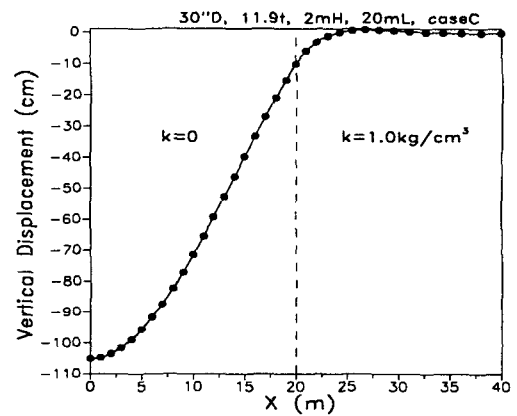


Fig. 16 Vertical displacement variation along the pipeline for CASE C ground subsidence when the subsidence width (2L) is 40m

Fig. 17에 지반침하에 의한 배관의 응력분포를 나타내었다. Fig. 10의 CASE B와는 달리 연약지반과 견고지반의 경계에서 뿐만 아니라 연약지반의 중심부에서도 매우 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 이는 급격한 지반침하에 의해 연약지반의 중심부에서 배관의 하단부에 매우 큰 굽힘과 이에 따른 인장 축방향응력이 발생하기 때문이며, 이에 의한 유효응력의 크기는 재료의 항복강도에 도달하여 배관에 소성변형이 발생하게 된다.

지반침하폭의 변화에 따른 배관의 최대 침하량과 최대축방향응력, 유효응력의 변화를 Fig. 18, 19에 나타내었다. 그림에서 배관의 최대침하량은 침하폭의 증가에 따라 급격하게 증가하며, 해석해와도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 최대축방향응력과 유효응력의 증가도 지반침하폭

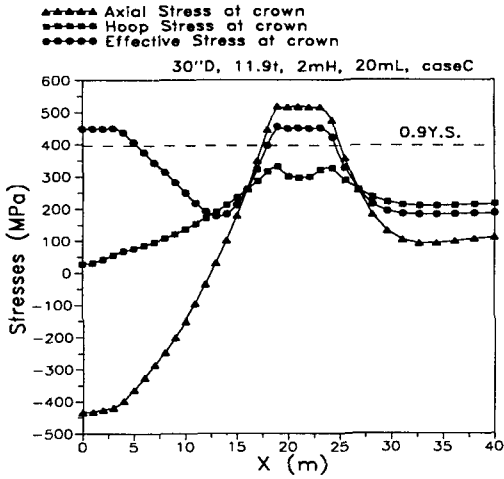


Fig. 17 Stress distribution along the pipeline for CASE C

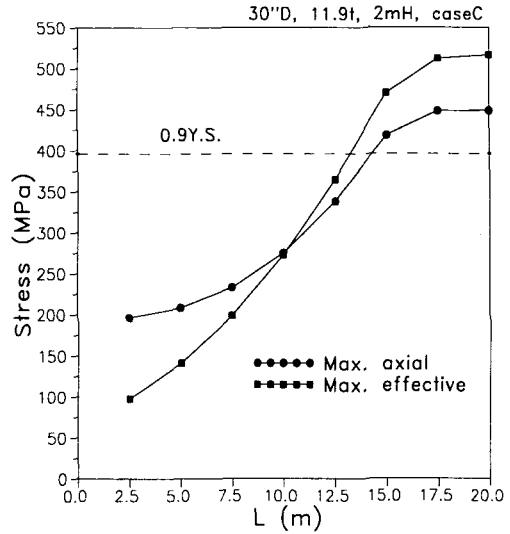


Fig. 19 Variation of maximum axial stress and effective stress according to change of subsidence width (2L)

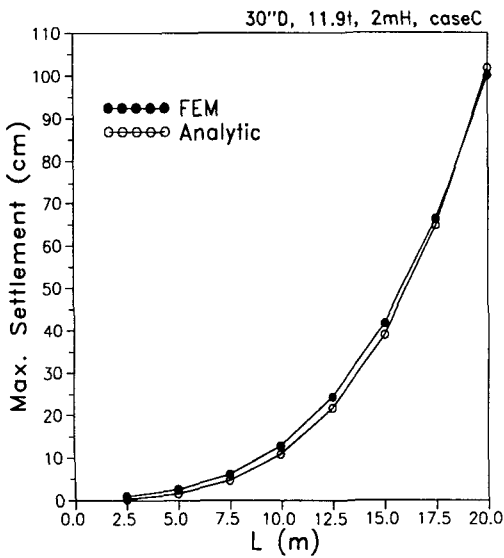


Fig. 18 Variation of maximum settlement according to change of subsidence width (2L)

의 증가에 따라 급격하게 증가하는 것을 알 수 있으며, L=15m 이상의 침하구간에서는 허용 응력을 초과하는 유효응력이 발생하였다.

Fig. 20~22에 토하중의 증가(매설깊이의 증가)에 따른 배관의 최대 침하량과 최대 축방향 응력, 유효응력의 변화를 나타내었다.

침하폭 20m, 30" D 11.9t 배관의 경우 4m의 토하중에서 허용 응력을 초과하며, 17.5t 배관의 경우 6m의 토하중에서 허용 응력을 초과한다. 관경이 26" D로 감소하면 더 낮은 매설 깊이에서 큰 응력이 발생하는 것을 Fig. 22에서 확인할 수 있으며, 따라서 관경과 두께가 적은 배관일 수록 지반침하의 영향이 크다고 할 수 있다.

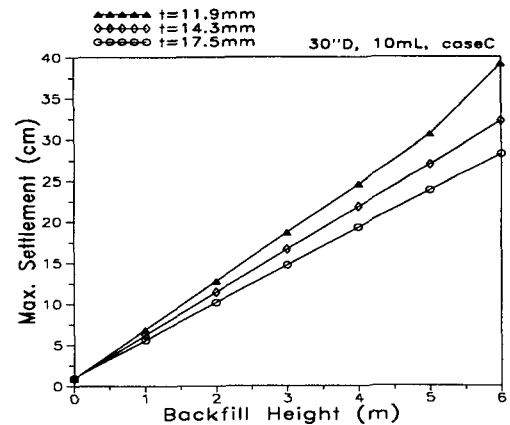


Fig. 20 Variation of maximum settlement for 30 inch pipeline according to change of backfill height

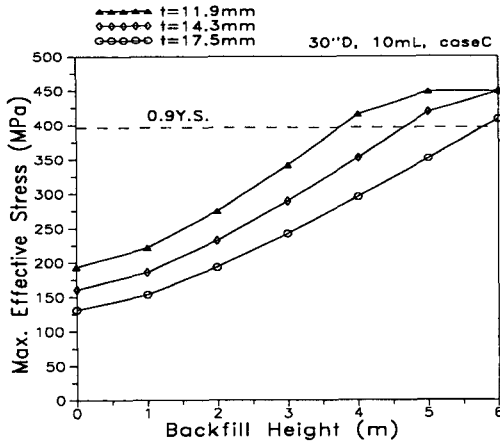


Fig. 21 Variations of maximum effective stress for 30 inch pipeline according to change of backfill height

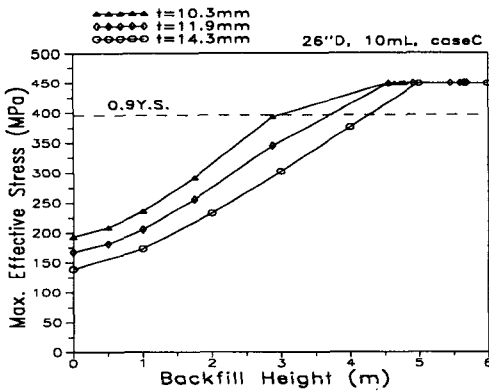


Fig. 22 Variations of maximum effective stress for 26 inch pipeline according to change of backfill height

4. 결 론

매설천연가스배관의 세종류의 지반침하 형태에 대한 응력해석결과 다음과 같은 주요 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) CASE A(일단이 고정된 관의 침하)
 - 26, 30인치 배관에서의 최대침하량은 두께에 무관하게 매설깊이에 비례하였다.
 - 두께 11.9mm의 30인치 배관과 두께 11.9mm의 26인치 배관의 경우 매설깊이 6m에

서 최대허용하중이 초과되었다.

- 2) CASE B(약간의 지반반력이 기대되는 지역의 통과)

- 최대침하량과 매설깊이가 비례하여 증가하였다. 그러나 CASE C와는 달리 침하폭에는 비례하지 않았고, 30인치 두께 11.9mm, 매설깊이 6m 조건에서 $L=20$ 을 초과하면 침하량이 더 이상 증가하지 않고 천천히 감소하는 경향을 보였다.
- 두께 11.9mm의 30인치 배관의 경우 매설깊이 6m에서 침하폭이 12.5m일 때 최대응력이 발생하였으며 그 값은 280Mpa였다.
- 최대유효응력은 배관직경이 감소함에 따라 감소하는 경향을 보였다.
- 모든 해석대상 배관에서 매설깊이 6m까지 최대유효응력이 최대허용하중을 초과하지 않았다.

- 3) CASE C(지반반력을 기대할 수 없는 지역의 통과)

- 최대침하량이 매설깊이와 침하폭에 비례하였다.
- 두께 11.9mm의 30인치배관의 경우 침하폭이 20m일 때 매설깊이 4m에서 최대응력이 최대허용하중을 초과하였다.
- 동일 침하폭에서 배관의 직경이 감소할 수록 최대유효응력이 증가하는 경향을 보였다.

참 고 문 헌

- 1) O.C. Young, "Buried Rigid Pipes", Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1984.
- 2) Attewell, "Ground Movements and Their Effects on Structures", Blackie & son Ltd, 1984.
- 3) Winkler, "Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit (on Elasticity and Flexibility) Prague, 1867.
- 4) Vesic', A.S., Jou. Eng. Mech. Division, ASCE, Vol. 87, EM2, pp. 35~53, April, 1961.
- 5) Hetenyi, M. "Beams on Elastic Foundation", University of Michigan Press, An

- Arbor, 1946.
- 6) ABAQUS Version 5-6 User's Manual, Hibbitt Karlsson and Sorensen, Inc, Providence, R.I, 1996.
- 7) A.P. Poster, Ph.D., "Buried Pipe Design", McGraw-Hill, 1990.
- 8) 김우식, 양영철, 김형식, "환경변화에 따른 배관변형 특성연구", 한국가스공사 연구개발원 과제보고서 (KA-PI-102-95069708), August, 1997.
-