매설 천연가스배관의 제반하중에 의한 응력계산용 프로그램 개발

김형식, 김우식, 방인완*, 오규환*
한국가스공사 연구개발원 LNG설비기술연구실
서울대학교 재료공학부*

Development of the computer program calculating the stress induced by various loads for buried natural gas pipeline

H.S. Kim, W.S. Kim, I.W. Bang*, K.W. Oh*

1. 서론

한국가스공사의 매설 천연가스 배관의 총연장은 전국적으로 1,309Km에 이르고 있다. 천연가스는 70kg/cm^{2}으로 직경 26, 30인치의 매설배관에 의해 공급된다. 배관의 두께는 ANSI B31.8의 원주방향응력식에 의해 지역계수가 고려되어 설계되고 있다. 이 지역계수은 0.4~0.8까지 주어지게 되는데, 인간활동이 많은 지역은 내압에 의한 원주방향응력이 재료항복응력의 40%가 작용하도록 설계되며, 인간활동이 적은 지역은 80%가 되도록 설계 된다. 이와같이 내압에 의한 응력을 기준으로 배관의 두께가 산정되기 때문에 이외의 외부 제반하중에 의해 매설배관에 작용하는 응력을 평가해보는 것은 안전성 확보 측면에서 매우 중요한 사항이다. 특히 매설후 도로의 신설, 도시의 확장 등으로 인하여 매설환경이 변화하고 있기 때문에 배관의 유지, 관리 측면에서 이에 의해 부과되는 응력을 재평가 할 필요성이 증대하고 있다.

외부 제반하중에 의한 매설배관의 응력계산에는 해석적 수식을 이용하는 방법과 유한요소법에 의한 해석이 이용되고 있다. 유한요소방법은 배관의 복잡함 또는 매설조건에 구애받지 않고 다양한 조건에 대하여 해석할 수 있는 장점이 있으나 시간적, 경제적 비용이 많이 드는 것이 단점이다. 해석적 수식에 의한 방법은 형상적인 한계가 있지만 단순한 형상에 대하여 공신력을 얻고 있는 수식이 많이 개발되어져 있다. 그러므로 설계단계에서 간단한 형상의 배관에 대해서는 굳이 경제적으로 불리한 유한요소해석을 이용하지 않고 수식을 이용하여 평가하는 경우가 많다.

그러나 이러한 해석식은 복잡하고 개념을 이해하는데 많은 노력이 요구되어 배관 설계자 조차 계산도중 실수할 가능성을 배제하기 어려울 뿐만 아니라, 현장감독자들이 이용하는 것은 거의 불가능하다 할 수 있다.

그러므로 실무자들이 일정 해석범위 안에서 매설조건의 변화에 따른 매설배관의 외부하중에 의한 배관의 응력을 평가함으로서 배관의 유지, 보수를 용이하게 하기위해 응력계산용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 내압, 토하중, 차량하중, 열응력, 지반침하의 하중에 의하여 매설 배관에 발생하는 응력을 해석하는 프로그램으로서, 기본적으로 원형 단면을 가진 충분히 긴 직선 배관을 해석 대상으로 하며 곡관의 효과는 내압에 의한 응력 집중의 효과를 고려하였다.

2. 프로그램 설명

2.1. 프로그램 개요

프로그램은 사용환경의 고급화 추세에 맞추어 윈도우즈 95와 윈도우즈 NT에서 실행되도록 하

였으며, 마이크로소프트사의 Fortran Powerstation 4.0을 사용하여 개발하였다.

그림 1에 프로그램의 플로우차트를 나타내었다. 기작성되어 있는 파일을 사용하거나 대화상자(dialog box)를 통하여 입력 데이터를 작성한 후 해석을 수행한다. 수식을 이용하여 각각의 하중에 의한 응력과 주응력, 유효응력을 구하고, 계산된 응력이 허용 기준을 만족하는지를 검토한다. 해석 결과는 그래프와 텍스트로서 화면에 출력되기 때문에 손쉽게 파악할 수 있다

2.2. 프로그램에 사용한 수식

2.2.1. 내압에 의한 응력

내압에 의하여 직선 배관에 발생하는 원주방향응력은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이 응력을 바로우 응력(Barlow stress)이라 부른다.

$$(\sigma_\theta)_p = \frac{P(D-t)}{2t}$$

여기서, $(\sigma_\theta)_P$ = 내압에 의한 원주방향 응력

P = 내압, D = 배관외경, t = 배관두께

2.2.2. 토하중과 차량하중에 의한 응력

매설배관의 토하중계산에 사용한 계산식은 다음과 같다.

$$W_e = \gamma H D$$

여기서, W_e = 배관의 단위길이에 작용하는 토양하중, γ = 토양의 단위무게

H = 매설깊이, D = 배관외경

Holl에 의해 제안된 적분식은 차량 바퀴와 같은 집중하중에 의한 하중을 구하는데 사용되며, 그 식은 다음과 같다.

$$W_L = C_s \left(\frac{P_{wheel}\, I}{L}\right)$$

여기서,

W_L = 배관의 단위길이에 작용하는 활하중, C_s = 하중계수

P_{wheel} = 차량바퀴 한 개에 작용하는 하중, I = 충격계수

L = 유효길이(0.9m)

토하중과 차량하중에 의해 배관은 타원형으로 변형되며 수평 방향 배관지름의 증가는 Hoeg의 식에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta D = \frac{\frac{1-\nu_e}{3(3-4\nu_e)}(W_e+W_L)\, r^3}{\frac{E_p I_t}{1-\nu_p^2} + \frac{(3-2\nu_e)(1-2\nu_e)}{12(3-4\nu_e)(1-\nu_e)} r^3 E'_s + \frac{1-\nu_e}{3(3-4\nu_e)} 2Pr^3}$$

여기서, ΔD = 배관의 수평방향 찌그러짐 또는 직경변화량 , ν_e = 채움모래의 포아송비

r = 배관의 평균반경, E_p = 배관의 탄성계수 ,

I_t = 배관의 단위길이당 관성모멘트($t^3/12$), E'_s = 토양반응계수

토하중과 차량하중에 의한 최대 원주방향응력은 타원형 변형을 가정하고 윗식을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(\sigma_\theta)_b = 0.75\, E_p\, (1-\nu_p^2)^{-1}\, (t/r)\, (\Delta D/r)$$

여기서, $(\sigma_\theta)_b$ = 토양과 차량하중에 의해 배관의 찌그러짐에 의한 원주방향 응력
이때 토하중과 차량하중에 의한 총 축방향응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\sigma_x)_b = \nu(\sigma_\theta)_b + \frac{0.322 W_L}{Z_p}\sqrt{\frac{E_p I_p}{kD}}\cos\phi$$

여기서, $(\sigma_x)_\nu$ = 배관의 찌그러짐에 의해 발생하는 축방향 응력
$(\sigma_x)_{Lb}$ = 차량하중에 의해 배관의 굽힘에 의한 축방향 응력
Z_p = 배관의 단면계수, I_p = 배관의 2차관성모멘트, k = 지반반력계수
ϕ = 배관의 하단부에서 반시계방향으로 측정된 각도

2.2.3. 열응력

직선 배관에서는 축방향으로 변형이 구속되므로 온도 변화에 의한 축방향응력이 발생하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\sigma_x)_{th} = E_p \alpha \Delta T = -E\alpha(T_2 - T_1)$$

여기서, α = 배관의 열팽창계수, T_1= 배관설치시의 온도, T_2= 사용중 최소 또는 최대 온도

2.2.4. 지반침하에 의한 응력

지반침하에 의하여 발생하는 배관의 변형과 응력은 보요소와 지반반력기반모델로써 해석적으로 구할 수 있다.

Winkler에 의해 제시된 지반반력기반모델에서는 배관 주위의 지반을 탄성기반으로 모델링한다. 기반이 받는 압력 p는 배관의 수직 변위에 비례한다. 즉

$$p = kw_p$$

여기에서, k = 지반반력계수, w_p = 배관의 수직변위

탄성 기반의 단위 길이당 강성 K(modulus of subgrade reaction, dimensions FL^{-2})는 K = k×D (D=배관 외경)로 나타낼 수 있다.

탄성 기반 위에 놓인 배관의 수직 변형에 관한 일반적인 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^4 w_p}{\partial y^4} + 4\beta^4 w_p = 4\beta^4 w_g = 4\beta^4 \frac{W_e}{K}$$

여기서, w_g = 지반의 수직 변위

그리고 β는 다음과 같이 나타내어지며, 1/β을 soil-pipe stiffness로 칭한다.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4E_pI_p}}$$

윗식을 아래의 지반침하 경우에 적용하면 다음과 같다.

◆ 일단이 고정된 관의 침하(case 1)

그림 2와 같이 일단이 고정된 관의 침하에 대해서 최대 굽힘모멘트는 아래와 같다.

$$M_{max} = E_pI_p\frac{2\beta^2 W_e}{K} \qquad at \quad x = 0$$

이때 축방향응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_x)_{sb1} = \frac{M_{max}D}{2I_p} \qquad at \quad x = 0$$

그리고 이축방향응력에 의해 배관의 포아송비 만큼 원주방향 응력이 작용한다.

$$(\sigma_\theta)_{sb1} = \upsilon_p(\sigma_x)_{sb1}$$

◆ 연약지반을 횡단하는 관의 침하 (case 2)

그림 3과 같은 지반반력을 약간 기대할 수 있는 연약지반을 통과하는 배관의 응력계산의 경우 연약지반과 견고지반의 지반반력계수가 다르고, 연약지반의 폭이 변하게 되므로 해석적인 해를 구하기가 어렵다

그래서 연약지반의 폭을 다양하게 변화시키면서 유한요소 해석한 결과를 이용하여 최대 모멘트 M_{max}/W_e와 βL 간의 그래프를 작성한후, 프로그램실행시 여기에서 M_{max}값을 구하여 아래의 식들에 의해 축방향응력과 원주방향 응력을 계산하였다. 30inch 배관을 연약지반의 침하를 달리하며 해석한 결과를 그림 4에 나타내었다. 이로부터 모멘트를 구하여 축방향응력을 계산 하였다.

M_{max} = value from figure 4

이때 축방향응력과 원주방향응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_x)_{sb2} = \frac{M_{max}D}{2I_p} \qquad at \quad x = 0\ ,\ (\sigma_\theta)_{sb2} = \upsilon_p(\sigma_x)_{sb2}$$

◆ 연약지반을 횡단하는 관의 침하(Case 3)

그림 5와 같이 연약지반의 지반반력을 기대할 수 없는 경우의 배관에 작용하는 최대모멘트는 다음과 같다.

$$M_{max} = \frac{1}{6}\cdot W_e l^2 \cdot \frac{3+3\beta l+\beta^2 l^2}{\beta l\,(1+\beta l)} \qquad at\ x = 0$$

그리고 최대축방향 응력과 원주방향 응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_x)_{sb3} = \frac{M_{max} D}{2 I_p} \quad \text{at} \quad x = 0, \quad (\sigma_\theta)_{sb3} = \upsilon_p (\sigma_x)_{sb3}$$

◆ 타공사의 영향(Case 4)

타공사의 영향에서는 그림 6과 같이 매설배관의 인근에 타공사를 위한 트렌치가 굴착되었을 때 배관에 작용하는 하중을 구하였다.

배관에 작용하는 응력은 그림 7의 그래프를 이용하여 프로그램의 입력값인 인근 트렌치의 길이 및 토양물성에 의해 결정되는 βL에 대하여 최대굽힘계수 A값을 구하여 아래의 식에 의해 최대 축방향 응력과 원주방향응력을 구한다.

$$M_{max} = 2A(\text{value from Fig. 7}) E_p I_p \beta^2 \delta, \quad \delta = \frac{0.25 \gamma K_{oT}}{E_g} \frac{TH^2}{(x^2 + H^2)}$$

$$(\sigma_x)_{sb4} = \frac{M_{max} D}{2 I_p}, \quad (\sigma_\theta)_{sb4} = \upsilon_p (\sigma_x)_{sb4}$$

여기서 A: 최대굽힘계수, δ: 근접 트렌치에 의한 배관의 수직 이동량

K_{oT}: 토하중계수(at rest earth pressure coefficient),

x: 트렌치 가장자리에서 배관의 중심까지 거리, TH : 근접 트렌치의 깊이

3. 프로그램 실행

매설조건에 따른 수식의 계산에 필요한 데이터 입력을 마치면 해석이 수행되며, 해석이 끝나면 그림 8과 같은 그래프와 텍스트가 해석 결과로서 화면에 출력된다. 화면에 표시되는 출력 그림은 비트맵 파일로 저장이 가능하다.

최대 원주방향응력, 최대 축방향응력, 유효응력이 막대 그래프로 표시되며, 해석에서 고려한 각각의 하중이 나타내는 응력을 함께 파악할 수 있도록 하였다. 곡관부에서 내압에 의한 원주방향응력은 그래프에서 (elbow) 항목으로 나타내었다. 그래프 상에 허용응력을 수평 점선으로 표시하여 배관에 발생하는 응력이 허용 응력을 초과하는지를 그래프에서 손쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 텍스트에서는 그래프에 나타낸 응력 값들을 숫자로 표시하여 허용 응력과 크기를 비교하였으며, 발생하는 응력과 변형이 허용 기준을 초과하면 **"failed"** , 초과하지 않으면 **"safe"** 문자가 출력되도록 하였다. 4가지 허용 기준을 검토하여 전체적인 안전 판단을 하게 되는데, 4가지 허용 기준이 모두 만족되어야만 **"∴ safe"** 가 표시된다.

첫 번째인 내압에 의한 원주방향응력에 관한 기준은 ANSI B31.8의 배관설계 기준으로 내압에 의한 원주방향응력이 $F \cdot E \cdot T \cdot \sigma_y$ 이하여야 하는 요건이다.

두 번째 허용응력기준은 한국가스공사에서 발행한 가스배관설계 개론에서 인용한 것으로 전체 기준은 아래의 두 요건으로 구성된다.

- 원주방향응력, 축방향응력 $\leq 2/5\ \sigma_f$ (σ_f : 인장강도)
- 유효응력 $\leq 0.9 \sigma_y$ (σy: 항복응력)

위의 두 요건은 기본적으로 탄소강 강관에 적용되던 기준이다. 그러나 원주방향응력, 축방향응력 허용 기준의 경우에는 30″ D 11.9t, 26″ D 10.3t 배관의 경우 내압만에 의한 원주방향응력만으로 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이와 같은 문제점은 탄소강 강관과 현재 한국가스공사의 배관재료인 고장력강의 API 강관의 항복응력/인장강도의 비가 크게 다른 점에 기인한다. 탄소강 강관의 경우 API 강관에 비하여 항복응력/인장강도의 비가 작기 때문에 허용 응력의 기준으로 인장강도를 사용하여도 문제가 없지만, API 강관의 경우 항복응력/인장강도의 비가 크기

때문에 인장강도의 2/5 값이 너무 작게 된다. 따라서, API 강관에 적합한 원주방향응력, 축방향 응력에 대한 허용 응력도가 새롭게 규정될 필요가 있는 것으로 판단되어 후자의 유효응력 기준만을 본 프로그램의 기준으로 사용하였다.

유효응력은 복합적인 응력상태에서 재료의 항복 유무를 판단할 수 있는 응력 기준으로서, 유효응력이 인장시의 항복응력을 초과하면 재료에 항복이 일어나게 된다. 유효응력의 정의는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2]^{1/2}$$

여기서, σ_1, σ_2, σ_3는 주응력을 의미하며, 각각 원주방향응력, 축방향응력, 반지름방향응력에 해당한다.

세 번째 기준은 유효응력이 σ_y / SF (SF:안전계수) 이하이어야 한다는 것으로 GRI(Gas Research Institute)의 기준이다. 이는 안전계수가 고려되어 매설배관이 설계된 경우에 적용이 가능하다.

네 번째는 배관의 찌그러짐에 의한 외경의 변화량이 3%이하여야 한다는 규정으로 일반적으로 연성관에 많이 적용되는 규정이다.

4. 결론

원형 단면의 갖는 긴 직선배관의 매설 배관에서의 내압, 토하중, 차량하중, 열하중, 지반침하에 의해 발생하는 최대응력을 계산하고, 규격의 허용응력 초과여부를 판단하여 주는 응력계산프로그램을 개발하였다. 이는 윈도우타입의 프로그램으로 단순히 배관과 토양에 대한 물성을 입력하면 특정 매설환경에 의해 발생하는 최고 응력을 계산하여 준다.

그러므로 배관유지시 발생할 수 있는 매설깊이, 차량하중, 열하중, 지반침하 등의 다양한 매설조건 변화에 의해 발생하는 응력을 기존의 수식 및 유한요소해석의 복잡성을 피하여 현장에서 간단히 계산할 수 있게 도와줌으로서 비전문가인 실무자들의 배관의 유지 및 관리에 매우 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

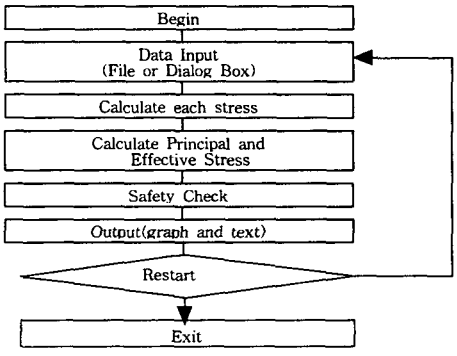

Figure 1. Flow chart of the program

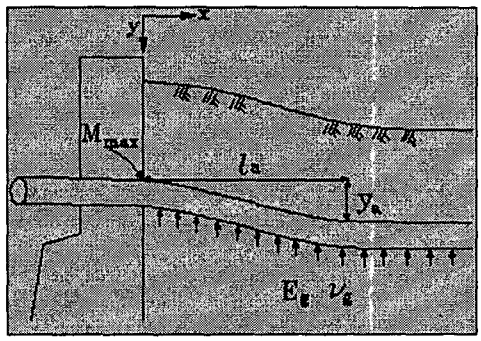

Figure 2. The schematic diagram of case 1 subsidence

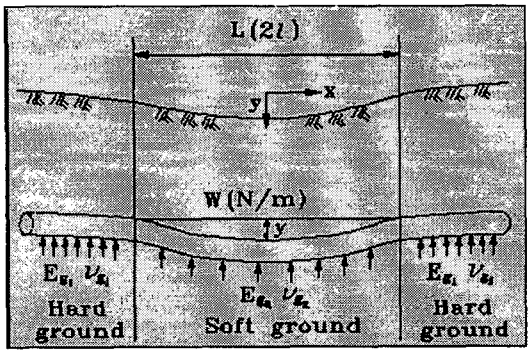

Figure 3. The schematic diagram of case 2 subsidence

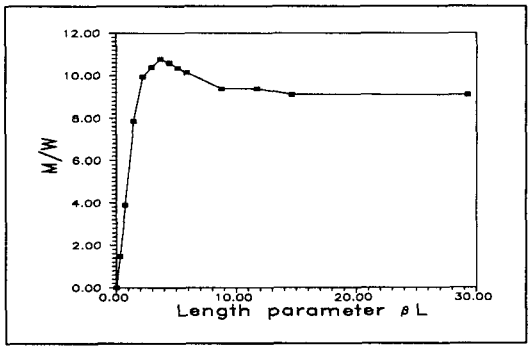

Figure 4. Maximum M/W parameter A plotted against βL

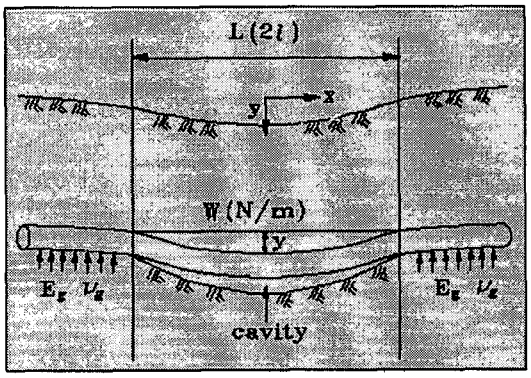

Figure 5. The schematic diagram of case 3 subsidence

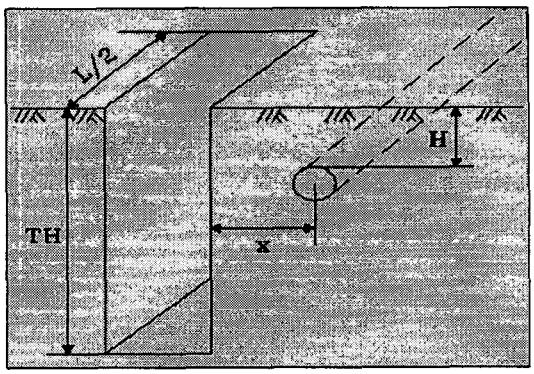

Figure 6. The schematic diagram of case 4 subsidence

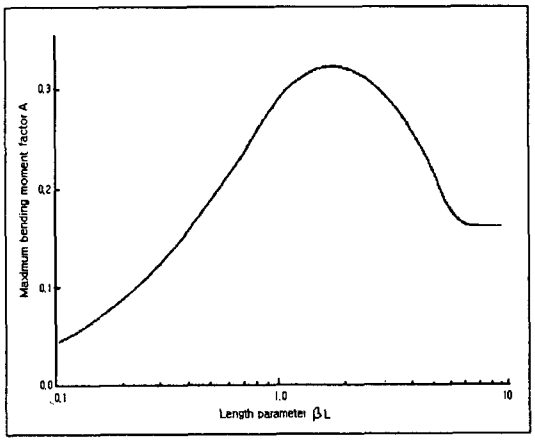

Figure 7. Maximum bending moment parameter A plotted against length of trench parameter βL

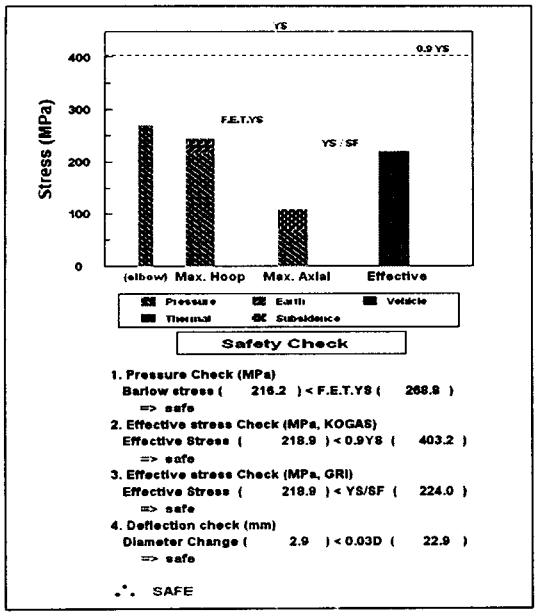

Figure 8. Results of calculation.