

## 폴리에틸렌 가스배관의 외부 하중에 대한 유한요소 해석

길성희, 박교식\*, 김지윤  
한국가스안전공사 가스안전연구원 공정연구팀  
([kspark@kgs.or.kr](mailto:kspark@kgs.or.kr))

### Finite Element Analysis on Polyethylene Gas Pipes under External Loadings

Seong Hee Kil, Kyo Shik Park\*, Ji Yoon Kim  
\*Dept. of Gas Safety R&D Center, Korea Gas Safety Corporation  
([kspark@kgs.or.kr](mailto:kspark@kgs.or.kr))

#### I. 서론

도시가스용 배관으로 사용하고 있는 폴리에틸렌 배관은 유연하여 시공이 용이할 뿐만 아니라 부식 및 전식이 일어나지 않아 유지관리가 편리하고 교체 없이 50년 이상 사용이 가능하여 금속 소재에 비하여 경제적이기 때문에 그 사용량이 증가하고 있다. 그러나 차량의 증가로 인하여 매설된 배관에 작용하는 차량하중이 증가되어 배관에 많은 응력이 집중되고 있다. 따라서 증가한 차량하중과 토하중이 복합적으로 작용할 경우에 매설된 배관에 어느 정도의 영향을 주는지를 검토하고자 한다. 매설된 폴리에틸렌 배관에 작용하는 응력은 유한요소를 이용하여 계산하고 그 결과를 검토하였다. 즉 직경이 50~400mm인 배관을 대상으로 매설 깊이(0.6~1.2m)와 사용압력(0.4~4bar)을 변화시켜 배관 응력을 계산한 결과와 수식해와 비교하여 그 결과를 검증하였다.

#### II. 수식해

##### 2.1 내압에 의한 영향

내압이 작용하는 배관에서 원주방향응력(hoop stress)은 다음 식 1과 같이 나타낼 수 있으며, 축방향이 구속되는 배관의 경우 내압에 의한 원주방향응력에 대한 포아송 효과(poisson's effect)에 의하여 다음 식 2와 같은 축방향응력(axial stress)이 작용한다.

$$(\sigma_{\theta})_p = \frac{P(D-t)}{2t} \quad \text{식 1}$$

$$(\sigma_x)_p = \nu \frac{P(D-t)}{2t} \quad \text{식 2}$$

##### 2.2 토양 하중에 의한 영향

배관의 토양 하중을 계산하기 위하여 마스톤하중(Marston load)과 프리즘하중(Prism load)의 2가지 방법을 고려하였다.<sup>1)</sup> 마스톤하중은 흙막이벽(trench) 벽면의 마찰력을 제외한 토양하중은 배관 상부에 균일하게 분포한다는 이론으로서 다음과 같이 표현한다.

$$W_e = C_d \gamma B_c B_d \quad \text{식 3}$$

프리즘하중은 배관에 작용하는 토양하중이 배관 상부의 토양의 무게와 같다는 가정에 기반을 두며 다음과 같이 표현한다.

$$W_e = \gamma H D \quad \text{식 4}$$

##### 2.3 차량 하중에 의한 영향

차량바퀴에 의해 전달되는 하중<sup>2)</sup>은 깊이가 깊어질수록 압력이 분산되는 분포하중으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_L = D \frac{nPI}{(L+a+2h \tan \phi)(S+2h \tan \phi)} \quad \text{식 5}$$

토양하중과 차량하중에 의해 배관은 타원형으로 변형되며 수평방향 배관 지름의 증가는 Hoeg의 식에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta D = \frac{\frac{1-\nu_c}{3(3-4\nu_c)}(W_c + W_L)r^3}{\frac{E_p I_p}{1-\nu_p^2} + \frac{(3-2\nu_c)(1-2\nu_c)}{12(3-4\nu_c)(1-\nu_c)}r^3 E' s + \frac{1-\nu_c}{3(3-4\nu_c)}2Pr^3} - \text{식 6}$$

**2.4 허용응력**

일반적으로 가스배관 설계에 사용하는 허용응력 기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- (1) 원주축방향 응력  $\leq 2/5\sigma_f$

$\sigma_f$  : 인장강도

- (2) 유효응력  $\leq 0.9\sigma_y$

$\sigma_y$  : 항복강도

- (3) 유효응력  $\leq \sigma_y/SF$ (안전계수)

GRI(Gas Research Institute) 기준의 경우 안전계수(Safeth Factor) 개념을 도입하여 1.4 ~ 2.0까지의 값을 사용하고 있다.

- (4) 내압에 의한 원주방향응력  $\leq F \cdot E \cdot T \cdot \sigma_y$

**III. 유한요소 해석 방법**

**3.1 내압에 의한 영향**

내압에 의한 응력 차이를 알아보기 위하여 아바쿠스에서 제공하는 ELBOW 요소를 직관부, 곡관부 배관에 사용하였고 토양은 2차원 쉘(shell) 요소를 사용하였다. 직관부의 경우 양 끝단이 막힌 경우로 모델링을 하였으며 곡관부는 곡률반경이 직경의 1.5배인 90° elbow요소로 모델링하였다.

**3.2 토양 하중에 의한 영향**

Fig. 1에 토양하중 해석을 위한 유한요소 모델을 나타내었다.

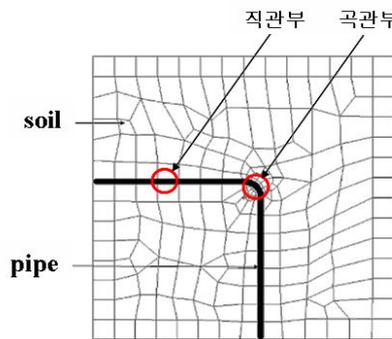


Fig 1. Finite element method(FEM) model for inner pressure

**3.3 차량하중에 의한 영향**

Fig. 2에 차량하중 해석을 위한 초기 유한요소 모델을 나타내었다. 지반 및 배관의 유한요소 모델 크기는 차량하중의 영향을 충분히 고려하기 위하여 가로방향(x 방향) 10m, 매설깊이 방향(y 방향) 10m(backfill height와 sidefill height 값을 뺀 값), 배관 축방향(z 방향) 8.3m으로 하였으며 아스팔트와 기층 두께는 4cm로 하였다.

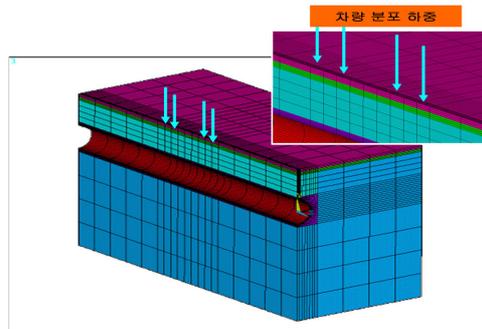


Fig. 2 FEM model for live load

IV. 유한요소 해석 결과

4.1 내압에 의한 영향

Fig. 3은 배관 호칭 400호에 대해 내압을 증가시켜 이에 따른 원주방향 응력의 변화량을 수식 1, 2와 유한요소해(FEM)를 비교한 것이다. 그 결과 두께가 동일한 배관의 경우 직관부에 비해 곡관부의 원주방향응력이 좀 더 크게 나타났으며 배관의 직경이 증가하고 내압이 증가할수록 직관부와 곡관부의 원주방향 응력 차이는 커졌다. 그 이유는 곡관의 휨 부분에 응력집중이 더 크기 때문이라고 판단된다.

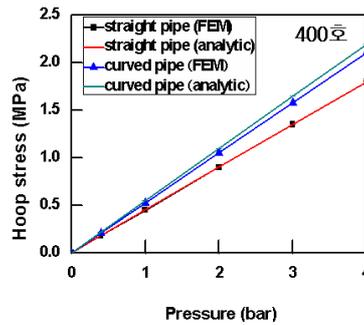


Fig. 3 Comparison between analytic and FEM solution of type 400 by inner pressure

4.2 토양하중에 의한 영향

Fig. 4는 400호 배관에 4bar의 내압이 가해졌을 경우에 매설된 배관에 작용하는 원주방향응력을 수식을 이용해서 계산한 결과와 유한요소를 이용하여 해석한 결과를 비교한 것이다. 이 결과를 살펴보면 프리즘하중이 가장 높은 응력값을 나타냈으며 토양의 비선형성을 고려한 유한요소해석 결과가 가장 낮은 응력을 나타내었다.

4.3 차량하중에 의한 영향

400호 배관에 4bar의 압력이 가해진 경우 매설 깊이에 따라 매설된 배관에 미치는 차량하중의 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 결과는 매설 깊이가 증가할수록 배관에 발생하는 응력은 감소하였으며 약 2m 이상 매설할 경우에는 차량하중에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

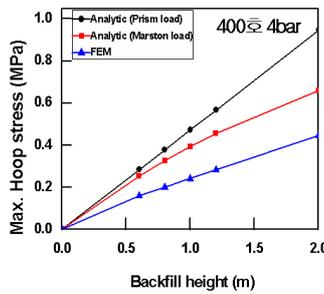


Fig. 4 Comparison between analytic of two type and FEM solution by earth load

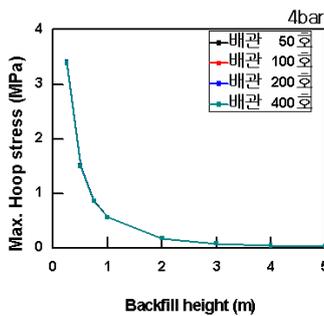


Fig. 5 Analytic result of 400 type pipe by live load

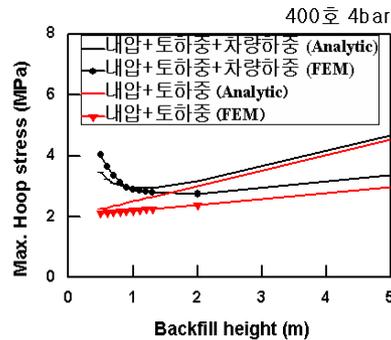


Fig. 6 Comparison between analytic and FEM solution by primary load

Fig. 7은 차량하중에 의한 매설 깊이에 따른 최대 원주방향응력, 축방향응력 그리고 유효응력을 나타낸 것이다.

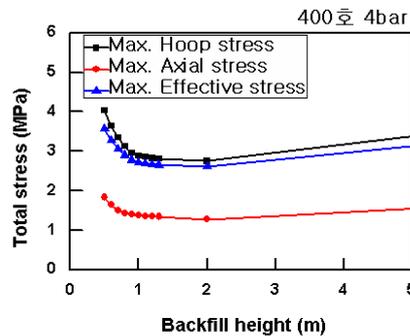


Fig. 7 Total stress according to backfill height

## VII. 결론

지하에 매설한 PE배관에 다양한 하중 조건을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수식해와 유한요소 결과를 비교하여 각각의 결과를 검증한 결과 수식해가 유한요소 결과보다 약간 높은 응력값을 나타내었다.
2. 다양한 외부 하중에 대하여 PE배관에 발생하는 응력을 해석하는 방법을 제시하였다.
3. 매설된 PE배관의 경우 내압, 토하중, 차량하중 등이 복합적으로 작용할 경우 매설 깊이 1m일 때 가장 낮은 원주방향응력이 발생하였다.

## 참고 문헌

1. A. P. Moser, "Buried Pipe Design", Vol.2, McGraw-Hill, New York, pp. 9~29, 2001
2. Reynold King Watkins and Loren Runar Anderson, "Structural Mechanics of Buried Pipes", Vol.1, CRC, pp 129~138, 1999
3. K. Hoeg, "Stress against Underground Structural cylinders", Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE NO SM1, pp. 833~858, 1968
4. Winkler, "Die Lehre von der Elastizität und Frstighkeit(on Elasticity and Flexibility)", Prague, 1867
5. M. Hetenyi, "Beams on Elastic Houndation", University of Michigan Press, 1946