

폴리에틸렌 가스배관의 외부 하중에 대한 유한요소 해석

길성희[†] · 박교식 · 김지윤

한국가스안전공사 가스안전연구원 공정연구팀

(2008년 3월 13일 접수, 2009년 2월 18일 수정, 2009년 2월 18일 채택)

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

(Received 13 March 2008, Revised 18 February 2009, Accepted 24 February 2009)

요 약

폴리에틸렌(Polyethylene; PE) 배관은 시공이 편리하고 강관에 비해 가격이 저렴하기 때문에 저압 공급용으로 많이 사용하고 있다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 이용하여 매설한 PE배관이 다양한 외부하중을 받는 경우에 발생하는 응력 및 변형에 대하여 알아보았다. 배관 직경이 50~400mm인 PE배관에 대하여 매설 깊이를 0.6~1.2m로 달리하고 그리고 공급압력을 0.4~4bar로 변화시켰을 때 배관에 발생하는 응력을 유한요소를 이용하여 계산하였다. 결과적으로 매설 상태에서 각 하중 조건에 따른 응력 상태 그리고 복합적인 하중이 작용할 경우에 400호 배관에 발생하는 응력을 계산한 결과 매설 깊이가 1m일 때 최대 원주방향응력이 가장 작은 값을 나타내었다.

주요어 : 폴리에틸렌, 토하중, 차량하중, 내압, 유한요소해석

Abstract— Polyethylene (PE) pipes have been widely used as they are easy to construct and suitable for economical efficient when they are compared with metal pipelines. This paper studied the effect of various external loadings on stress and deflection of the buried PE pipes using Finite Element Method (FEM). For this purpose, stresses of buried PE pipes were calculated according to the loading condition such as pipe types (pipe diameter 50~400 mm), burial depths (0.6~1.2 m) and internal pressures (0.4~4 bar). As a result, it was founded the effect and relation with each of loading conditions under the buried condition.

Key words : Polyethylene (PE), Earth load, Live Load, Internal pressure, Finite Element Analysis

1. 서 론

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 차량 하중과 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.

[†]To whom correspondence should be addressed

332-1, Daeya-dong, Siheung-si, Gyeonggi-do, Korea,
429-712

E-mail : kiljudy@kgs.or.kr

2. 수식해

2.1 내압에 의한 영향

Fig. 1과 같이 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.

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

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

$(\sigma_{\theta})_p$: hoop stress

$(\sigma_x)_p$: axial stress

P : internal pressure

D : outside diameter of the pipe

t : thickness of the pipe

ν : poisson's ratio of the pipe

2.2 토양 하중에 의한 영향

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

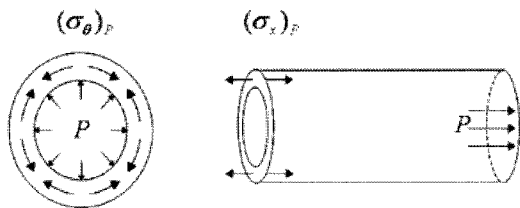


Fig. 1. Diagram of pipe by internal pressure.

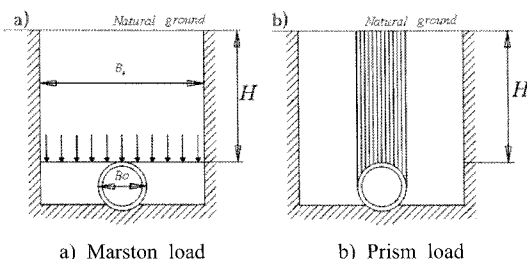


Fig. 2. Diagram of earth load of two type.

$$W_e = C_d \gamma B_c B_d \quad (3)$$

W_e : earth load per unit length

γ : weight of soil per unit volume(N/m^3)

B_c : outer diameter of pipe

B_d : width of trench

C_d : load coefficient

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

$$W_e = \gamma HD \quad (4)$$

W_e : earth load per unit length

γ : weight of soil per unit volume(N/m^3)

H : height of fill above top of pipe

D : outside diameter of the pipe

2.3 차량 하중에 의한 영향

차량바퀴에 의해 전달되는 하중²⁾은 깊이가 깊어질수록 압력이 분산되는 분포하중으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

W_L : live load per unit length acting on the pipe

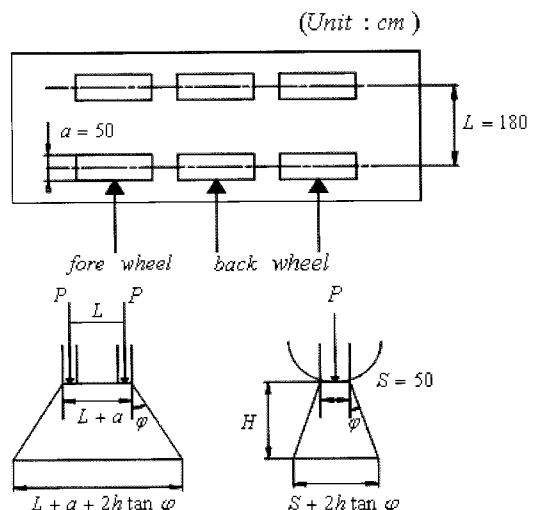


Fig. 3. Distribution load of vehicles.

- n : number of the vehicle wheel
 L : length between axle
 a : width of the vehicle wheel
 h : backfill height
 S : contact width of the vehicle wheel
 ϕ : distribution angle

토양하중과 차량하중에 의해 배관은 타원형으로 변형되며 수평방향 배관 지름의 증가는 Hoeg³⁾의 식에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta D = \frac{\frac{1-\nu_e}{3(3-4\nu_e)}(W_e + W_L)r^3}{\frac{E_p I_t}{1-\nu_p^2} + \frac{(3-2\nu_e)(1-2\nu_e)}{12(3-4\nu_e)(1-\nu_e)}r^3 E' s + \frac{1-\nu_e}{3(3-4\nu_e)} 2Pr^3} \quad (6)$$

- ΔD : horizontal deflection or change in diameter
 W_e : earth load per unit length acting on the pipe
 W_L : live load per unit length acting on the pipe
 ν_e : poisson's ratio of the sidefill soil
 ν_p : poisson's ratio of the pipe
 E_p : young's modulus of the pipe
 I_t : moment of inertia of the pipe wall per unit length ($t^3/12$)
 $E' s$: soil reaction modulus
 P : internal gas pressure
 r : average diameter of pipe

토양반응계수($E' s$)는 매설 배관이 외부 하중에 의해서 변형되는 것을 막아주는 토양의 영향을 계수로서 나타낸 것이며 흙을 조밀하게 다질수록 값은 커진다.

토양하중과 차량하중에 의해 매설 배관이 타원형으로 변형되므로 배관의 수평방향 변형량으로부터 다음과 같이 최대 원주방향 응력을 구할 수 있다.

$$(\sigma_\theta)_b = 0.75 E_p (1-\nu_p^2)^{-1} \left(\frac{t}{r}\right) \left(\frac{\Delta D}{r}\right) \quad (7)$$

- $(\sigma_\theta)_b$: maximum Hoop stress
 E_p : young's modulus of the pipe
 ν_p : poisson's ratio of the pipe
 t : thickness of the pipe
 r : average diameter of pipe
 ΔD : horizontal deflection or change in diameter

토양하중과 차량하중에 의해 발생하는 축방향응력은

다음과 같이 포아송 효과에 의한 응력과 길이방향 빔-굽힘효과에 의한 응력으로 나눌 수 있다.

$$(\sigma_x)_b = \nu(\sigma_\theta)_b + (\sigma_x)_{Lb} \quad (8)$$

- $(\sigma_x)_b$: axial stress
 ν : poisson's ratio of the pipe
 $(\sigma_\theta)_b$: maximum Hoop stress
 $(\sigma_x)_{Lb}$: stress for beam-bent effect

차량하중에 의해 발생하는 축방향응력 중 길이방향의 빔-굽힘 효과에 의해 작용하는 응력은 다음과 같다.

$$(\sigma_x)_{Lb} = \frac{0.322 W_L}{Z_p} \sqrt{\frac{E_p I_p}{kD}} \quad (9)$$

- $(\sigma_x)_{Lb}$: stress for beam-bent effect
 W_L : live load per unit length acting on the pipe
 Z_p : face factor
 E_p : young's modulus of the pipe
 I_p : 2nd moment of inertia of the pipe

$$I_p = \left(\frac{\pi}{64}\right)[D^4 - (D-2t)^4] \quad (10)$$

- D : outside diameter of the pipe
 t : thickness of the pipe

유한요소 해석시 차량의 동적인 특성을 나타내기 위하여 충격계수(I)를 고려하는데 일반적으로 충격계수는 1.5~2의 값을 사용하며 매설깊이 H에 따라 다음과 같이 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 I &= 1.75 & (H \leq 1.5\text{m}) \\
 I &= 1.75 - 0.1(H-1.5) & (1.5\text{m} \leq H \leq 9\text{m}) \\
 I &= 1.0 & (H \geq 9\text{m})
 \end{aligned} \quad (11)$$

24ton 차량이 다음 Fig. 4와 같이 매설 배관 위를 직각 방향으로 지나가는 경우에 도로교 표준시방서를 참고하면 차량 후륜하중은 9.6ton이다. 따라서 이 값을 압력으로 나타내기 위하여 바퀴가 도로와 접촉하는 면적 0.5m × 0.2m으로 나눈다. 또한 차량의 동적인 특성을 나타내기 위하여 충격계수를 고려하는데 충격계수는 1.5~2의 값을 상용하며 매설깊이 H에 따라 다음과 같은 값을 사용한다.

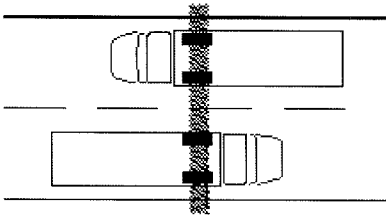


Fig. 4. Crossing of vehicle through pipes.

Table 1. Outer diameter and thickness of PE pipe.

호칭	D (mm)	t (mm)
50	60	5.5
75	89	8.1
100	114	10.4
150	165	15.0
200	216	19.7
250	267	24.3
300	318	28.9
350	370	33.6
400	420	38.2

$$P = \frac{9600Kg \times 9.81m/s^2}{0.5m \times 0.2m} \times I \quad (12)$$

I : impact factor

2.4 허용응력

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

(1) 원주축방향 응력 $\leq 2/5\sigma_f$

σ_f : 인장강도

(2) 유효응력 $\leq 0.9\sigma_y$

σ_y : 항복강도

여기서 유효응력은 복합적인 응력상태에서 재료의 항복유무를 판단할 수 있는 응력 기준으로서 유효응력이 인장시의 항복응력을 초과하면 재료에 항복이 일어나게 된다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (13)$$

$\bar{\sigma}$: 유효응력

σ_1 : 원주방향응력

σ_2 : 축방향응력

σ_3 : 반지름방향응력

Table 2. Material property of PE pipe.

재질	E (MPa)	ν
PE	600	0.46

Table 3. Material property of variable soil.

	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν	C (MPa)	ϕ
sand	2,000	25	0.25	0	33
backfill	2,000	15	0.3	1.72E-02	33
in situ soil	2,000	20	0.3		
base course	2,240	140	0.25		
ascon	2,400	3000	0.2		

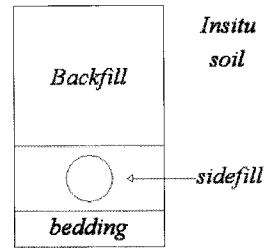


Fig. 5. Diagram of buried pipe.

(3) 유효응력 $\leq \sigma_y/SF$ (안전계수)

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

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

F : 지역보정계수

E : 길이방향 조인트계수

T : 온도보정 계수

F는 지역보정계수로서 지역에 따라 0.4에서 0.72의 값을 가진다.

ρ : unit mass

E : elastic modulus

ν : poisson's ratio

C : cohesion

ϕ : internal friction angle

3. 유한요소 해석 방법

3.1 내압에 의한 영향

초기 유한요소 모델은 Fig. 6과 같으며 배관 및 주위 지반의 물성치는 Table 2와 3에 제시한 값들을 사용하였

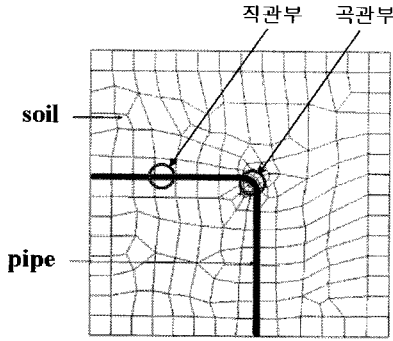


Fig. 6. Finite element method (FEM) model for inner pressure.

다. 내압에 의한 응력 차이를 알아보기 위하여 아바쿠스에서 제공하는 엘보우(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° 엘보우 요소로 모델링하였다. 곡관의 힘에 의해 단면 형상이 타원으로 변형되는 현상이 발생하며 이러한 현상을 묘사하기 위하여 해석 옵션 중 타원 모드를 사용하였다. 유한요소 해석 후 배관의 단면 위치에 따른 결과값을 읽기 위해 원주방향 포인트 20개, 두께방향 포인트 5개로 설정하였다. 경계 조건은 배관 끝단과 토양 외곽에 구속조건을 주었고 직관과 곡관의 이음부분은 x, y, z 방향을 구속시켰다.

3.2 토양 하중에 의한 영향

Fig. 7에 토양하중 해석을 위한 유한요소 모델을 나타내었다. 배관 및 주위 지반의 물성값은 Table 2와 3에 제시한 값들을 사용하였다. 특히 주위 지반의 경우 장소와 배관의 길이 방향과 시추 깊이에 따라 토양 성분의 변화가 심하여 제시된 물성치의 성분으로만 이루어졌다고 보기는 어렵다. 따라서 주어진 물성값을 그대로 사용하기 보다는 측면채움재(sidefill), backfil(되매움재), 모래 모두 모래의 물성값으로 통일하였고 점착력(cohesion) C 와 내부마찰각(internal friction angle) ϕ 의 값으로 각각 1.724E-2와 33을 사용하였다.

토양하중과 내압을 받는 직선 배관의 경우 축방향 변위가 주위 지반에 의해 구속되므로 평면 변형 조건(plane strain condition)을 사용하였고, 배관의 중심을 지나는 수직 단면에 대하여 하중과 기하학적 형상이 대칭을 이루므로 대칭조건을 이용하여 전체 계의 반쪽만을 모델링하였다.

경계조건으로 토양의 양쪽 경계선은 x 방향만을 아래쪽 경계선은 y 방향만을 구속시켰으며 토양하중을 먼저

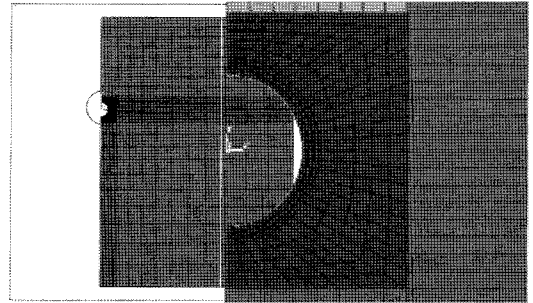


Fig. 7. A cross section of FEM model for earth load.

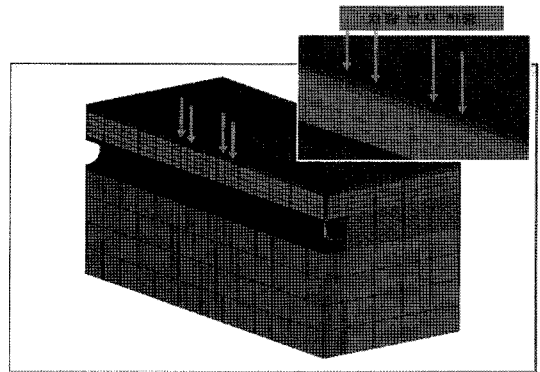


Fig. 8. FEM model for live load.

가한 후 배관의 내경에 내압을 가하였으며 토양은 비선형 해석을 하였다.^{4,5)}

3.3 차량하중에 의한 영향

해석에 사용한 차량하중은 도로교 표준시방서에 제시되어 있는 1등급에 대한 설계 활하중인 DB-24 하중으로 후륜하중이 9.6ton이다. 다음 Fig. 8에 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. 모델의 형상이 배관의 길이방향과 배관의 중심을 지나는 수직단면에 대해서 대칭성을 가지므로 대칭경계조건을 이용하여 전체 계의 반쪽만을 모델링 하였다. 총 12,340개의 절점과 10,488개의 요소를 사용하였으며, 특히 배관과 배관 주위를 미세하게 요소화하였다. 특히 토양의 물성값은 토양하중 해석 방법과 동일하게 적용하였다. 경계조건으로 토양의 양쪽 면은 x 방향만을, 아랫쪽 면은 y 방향만을, 앞쪽 면과 뒤쪽 면은 z 방향만을 구속시켰으며, 차량 하중은 상

부에 만든 $(0.5 \times 0.2)/2$ 크기를 가진 두 개의 면에 압력으로 가하였다.

4. 유한요소 해석 결과

4.1 내압에 의한 영향

Fig. 9~10은 배관 호칭 50호와 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 원주방향 응력이 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. 11은 배관의 호칭에 따라 내압을 변화시켜 직관부의 원주방향응력을 해석한 결과로서 배관의 직경에 관

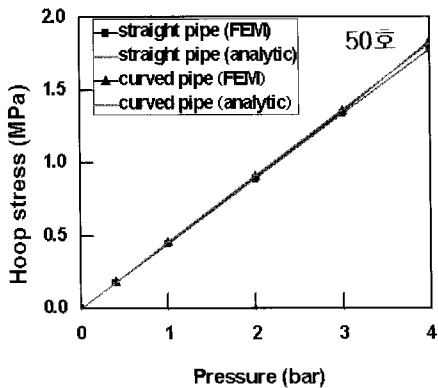


Fig. 9. Comparison between analytic and FEM solution of type 50 by inner pressure.

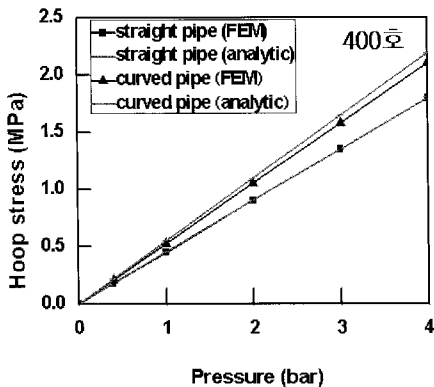


Fig. 10. Comparison between analytic and FEM solution of type 400 by inner pressure.

계없이 내압에 따른 원주방향 응력 값이 일정하게 나온다. 이는 배관 설계시 배관의 직경 대 두께의 비가 일정하게 설계하기 때문이다.

4.2 토양하중에 의한 영향

Fig. 12는 400호 배관에 4bar의 내압이 가해졌을 경우에 매설된 배관에 작용하는 원주방향응력을 수식을 이용하여 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. 따라서 설계 기준으로 프리즘하중을 선택하는 것이 보수적인 기준이라고 사료된다.

4.3 차랑하중에 의한 영향

400호 배관에 4bar의 압력이 가해진 경우 매설 깊이에

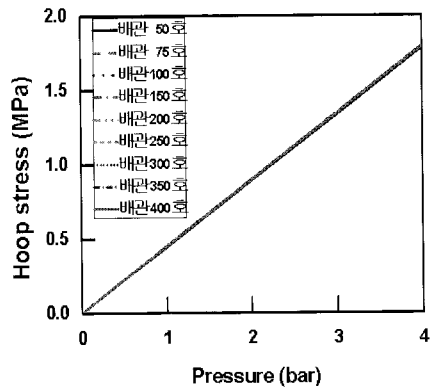


Fig. 11. Comparison of hoop stress according to pipe type for straight pipe.

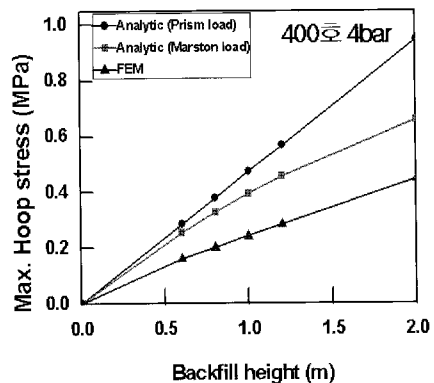


Fig. 12. Comparison between analytic of two type and FEM solution by earth load.

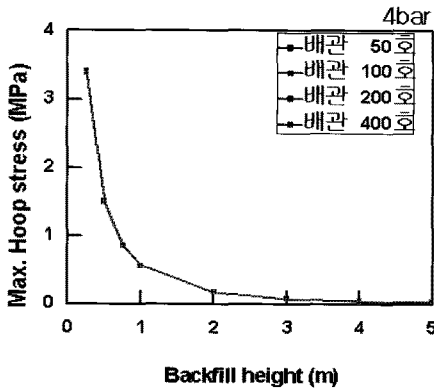


Fig. 13. Analytic result of 400 type pipe by live load.

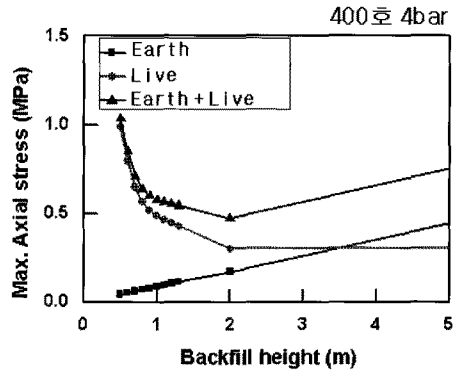


Fig. 15. Axial stress according to backfill height.

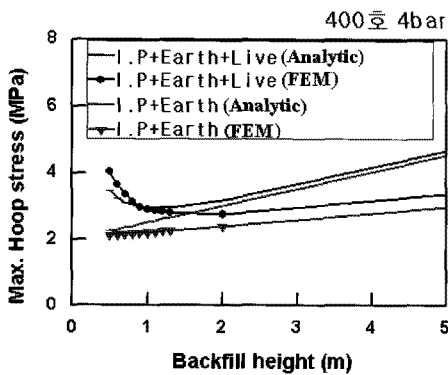


Fig. 14. Comparison between analytic and FEM solution by primary load.

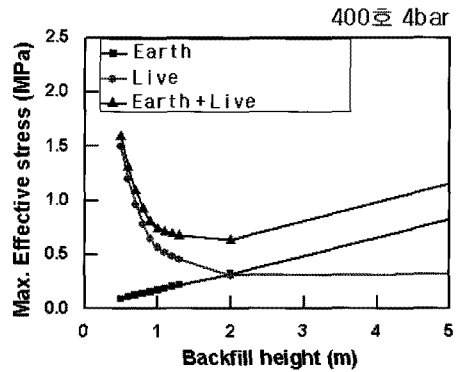


Fig. 16. Max effective stress according to backfill height.

따라 매설된 배관에 미치는 차량하중의 영향을 Fig. 13에 나타내었다. 결과는 매설 깊이가 증가할수록 배관에 발생하는 응력은 감소하였으며 약 2m 이상 매설할 경우에는 차량하중에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 내압, 토양하중, 차량하중을 중첩하여 매설 깊이를 변화시켜 최대 원주방향응력을 수식7과 유한요소해로 비교한 것이다. 호칭 400호, 내압 4bar에서 원주방향응력은 2MPa이며 매설깊이 약 1m 까지는 차량하중에 의한 영향이 큰 반면 매설깊이 약 1m 이후에는 토양하중의 영향이 크게 나타났다. 매설깊이가 약 1m일 때 최대 원주방향응력이 가장 작은 값을 나타내었다.

Fig. 15, 16은 토양하중과 차량하중의 중첩에 따라 매설 깊이를 변화시켜가며 최대 축방향응력, 최대 유효응력을 나타낸 것이다.

Fig. 17은 차량하중에 의한 매설 깊이에 따른 최대 원주방향응력, 축방향응력 그리고 유효응력을 나타낸 것이다. 최대 원주방향응력이 가장 높은 값을 나타내므로 배관 설계시 최대 원주방향 응력을 우선적으로 고려하는 것

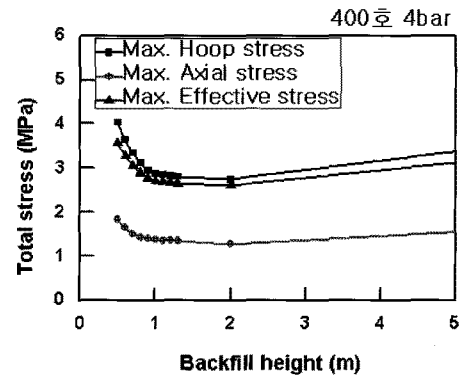


Fig. 17. Total stress according to backfill height.

이 유효응력을 고려하는 것보다 보수적임을 알 수 있다.

5. 결 론

지하에 매설한 PE배관에 다양한 하중 조건을 적용하

여 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.

참고문헌

- 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 and Frstigkeit (on Elasticity and Flexibility)", Prague, 1867.
- 5) M. Hetenyi, "Beams on Elastic Foundation", University of Michigan Press, 1946.