

축직각 표면타원균열이 존재하는 매설배관의 축방향응력에 대한 건전성 평가

이억섭*, 황인현**

Reliability Assessment of Buried Pipelines with a Circumferential Surface Elliptical Crack under Axial Stress

Ouk Sub Lee*, In Hyun Hwang**

ABSTRACT

The theoretical analyses for stresses induced in axial direction in the buried pipelines are reviewed. The influences of the axially directed stresses on the surface elliptical crack are studied in detail and thus some engineering technical informations are provided to use reliability assessment of buried pipelines. The change in temperature, the effect of inner pressure and soil friction in the buried pipeline constrained in axial direction are included to determine the axial stresses in the buried pipeline. Furthermore, the stress induced by the pipeline bending are also considered. The stress intensity factors calculated by two models such as a simple plane crack and an elliptical surface crack for a circumferential surface elliptical crack are compared.

Key Words : Buried pipeline (매설배관), Circumferential surface elliptical crack (원주방향 표면타원균열), Soil friction (토질마찰), Axial stress (축방향응력), Stress intensity factor (응력확대계수)

1. 서론

매설배관에 존재하는 표면타원균열에 대한 건전성 평가를 수행하기 위해서는 매설배관 주위의 경계조건이 매설배관에 미치는 영향을 우선적으로 정밀성있게 규명해야 한다.⁽¹⁻⁴⁾

대개 균일한 내압 혹은 외압을 받는 배관에서는 원환응력(hoop stress)이 축방향응력보다 크기 때문에 축방향응력의 영향에 대해서는 무시하는 경향이 있으나 매설배관에서는 경계조건에 영향을 예기치 않은 축방향응력이 발생하며, 이 응력에 수직으로 존재하는 표면타원균열은 매설배관의 건전성에 치명적일 수 있으므로 이에 대한 면밀한

해석이 필요한 실정이다.

매설배관의 축방향으로 응력을 발생시키는 원인에는 다음과 같은 것들이 있다. ① 온도와 압력의 변화 때문에 배관의 길이가 토질이나 구속경계보다도 짧아지는 경우 ② 내압이나 밸브, 엘보우 등에 의한 감압현상 때문에 발생하는 축방향 추력 ③ 배관의 베드가 균일하지 않기 때문에 발생하는 굽힘응력 ④ 토질의 크리프, 토질의 이동 때문에 발생하는 굽힘응력.

본 논문에서는 매설배관의 축방향으로 발생하는 응력에 대한 이론적인 해석을 수행하고, 이러한 응력들이 매설배관의 축직각 타원표면균열의 거동에 미치는 영향을 규명하여 매설배관의 건전성 평

* 인하대학교 기계공학부

** 인하대학교 대학원

가를 위한 공학적인 정보를 제공하였다.

2. 축방향으로 구속을 받는 배관⁽⁵⁾

2.1 온도변화

축방향으로 구속을 받는 배관의 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 응력은 열변형률이 $\epsilon_T = \alpha \Delta T$ 이며, Hooke 의 법칙을 적용하면

$$\sigma_T = E\alpha \Delta T \quad (1)$$

여기서

σ_T : 축방향 구속을 받는 매설배관에 온도가 변화할 때 발생하는 축방향 열응력

E : 배관재료의 탄성계수

α : 열팽창계수

ΔT : 온도변화

2.2 내압의 영향

내압 P가 작용하는 축방향 구속 배관에 유기되는 축방향응력, σ_p , 는 내압에 의한 축방향응력과 구속에 의한 팽창 때문에 발생하는 푸아송의 효과를 고려한 응력을 중첩하면

$$\sigma_p = (0.5 + \nu) \frac{Pr}{t} \quad (2)$$

여기서

σ_p : 축방향 구속을 받는 배관의 내압에 의한 축방향인장응력

ν : 푸아송의 비

P : 내압

r : 배관의 내경

t : 배관의 두께

용접이음된 매설배관의 길이가 매우 길면, 배관의 단부가 축방향 구속되지 않더라도 토질마찰 등에 의해서 구속되므로 온도감소나 내압에 의해서 인장응력이 발생하게 되므로 온도감소나 내압에 의해서 인장응력이 발생하게 된다.

2.3 토질 마찰의 영향

가스켓 조인트 매설배관에서는 배관 길이가 매우 길지 않으면 온도와 푸아송 효과는 무시된다. 그러나 배관 길이가 매우 길면 온도와 푸아송 효과는 상당한 축방향응력을 야기시킨다. 매설배관

과 토양의 마찰이 매설배관에 발생시키는 구속 때문에 야기되는 축방향응력, σ_μ , 는 배관의 중간 지점에서 가장 크며 다음과 같다.

$$\sigma_\mu = \frac{LH\gamma\mu}{2t} \quad (3)$$

여기서

σ_μ : 토질 마찰 때문에 매설배관에 발생하는 축방향응력

L : 배관길이

H : 배관위의 토질 커버 높이

γ : 토질 커버의 단위무게

μ : 배관과 토질사이의 마찰계수

t : 배관의 두께

3. 배관의 굽힘에 의한 응력

원래 직선인 매설배관에 경계조건의 영향(토질의 이동이나 불균일한 배관설치) 등으로 인한 굽힘이 발생할 때 축방향으로 발생하는 최대 응력, σ_B , 는

$$\sigma_B = \frac{Er}{R} \quad (4)$$

여기서

σ_B : 최대 축방향응력

E : 탄성계수

R : 매설배관의 굽힘 곡률반경

r : 매설배관 단면의 외부반경

매설배관이 원래 곡률반경 R' 을 갖는 곡선배관일 경우에는 축방향으로 발생하는 최대응력, σ_B , 을 다음식으로 구한다.

$$\sigma_B = Er \left(\frac{R' - R}{RR'} \right) \quad (4')$$

여기서

R : 배관의 곡률반경

경계조건의 영향에 의한 굽힘은 축방향 최대 응력, σ_B , 를 매설배관에 발생시키는데 이 굽힘은 모멘트를 유발시키게 됨으로 이 모멘트에 의한 축방향응력, σ_M , 을 다음과 같이 산정한다.

$$\sigma_M = \frac{Mr}{I} \quad (5)$$

여기서

- σ_M : 유기된 모멘트에 의한 축방향응력
- M : 배관에 유기되는 모멘트
- r : 배관단면의 외부반경
- I : 배관단면의 도심에대한 2차 모멘트

4. 축직각 표면타원균열에 대한 응력확대 계수 산정

축방향 인장응력의 합, σ_{TT} , 는

$$\sigma_{TT} = \sigma_T + \sigma_P + \sigma_\mu + \sigma_B + \sigma_M \quad (6)$$

내압(P_i)과 외압(P_o)이 작용하는 배관의 원환 응력, σ_H , 는

$$\sigma_H = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_o)r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)r^2} \quad (7)$$

여기서

- r_i : 내부반경
- r_o : 외부반경
- r : 변형된 링 반경
- 매설배관의 경우에는

$\sigma_{TT} > \sigma_H$ 이므로 축직각 표면타원균열이 매설배관의 건전성을 위협하는 가장 위험한 형태의 균열이라 생각할 수 있으며 σ_{TT} 에 대한 응력확대계수와 σ_{TT} 에 영향을 주는 각 응력성분중 가장 크게 영향을 미치는 것을 찾아내어, 그 성분에 대한 감시를 철저히 하여야 한다.

매설배관에 존재하는 축직각 표면타원균열의 외양은 Fig. 1 과 같다.

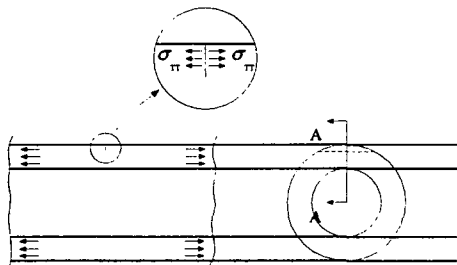


Fig. 1 Surface crack vertical to axis in a buried pipeline

4.1 단순 평판균열 가정

Fig. 1 에서 단면 A-A 에 균열이 표면으로 부터 가장 깊게 나타남으로 이 경우의 응력확대계수는 Fig. 2 와 같이 결정할 수 있다.

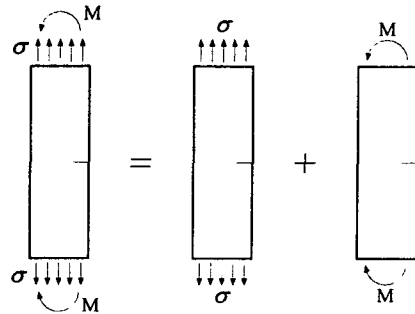


Fig. 2 Determination of stress intensity factor by superposition

$$K^{TT} = K_\sigma + K_M \quad (8)$$

4.2 타원균열 가정

축직각 타원균열에 대한 응력확대계수는 Newman-Raju 의 해석을 사용하여 결정할 수 있다.⁽⁶⁾

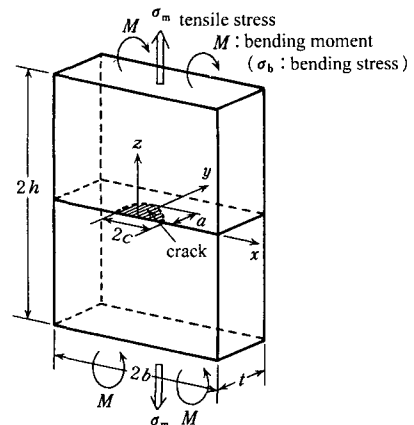
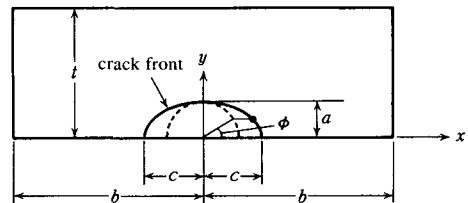


Fig. 3 Semi elliptical surface crack in a middle plate

$$K_I = [(\sigma_{TT} - \sigma_M) + H\sigma_M] F \sqrt{\pi a / Q} \quad (9)$$

여기서

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$$

$$F = [M_1 + M_2(a/t)^2 + M_3(a/t)^4] \cdot f_\phi \cdot g \cdot f_w$$

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(a/c)$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89/(0.2 + a/c)$$

$$M_3 = 0.5 - 1.0/(0.65 + a/c) + 14(1.0 - a/c)^{24}$$

$$f_\phi = [(a/c)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi]^{1/4}$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35(a/t)^2](1 - \sin \phi)^2$$

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi c}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2}$$

$$R_0 = b/\pi$$

$$p = 0.2 + a/c + 0.6(a/t)$$

$$H_1 = 1 - 0.34(a/t) - 0.11(a/c)(a/t)$$

$$H_2 = 1 + G_1(a/t) + G_2(a/t)^2$$

$$G_1 = -1.22 - 0.12(a/c)$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5}$$

5. 결과 및 고찰

매설배관에 존재하는 축직각 표면타원균열에 대한 응력확대계수를 산정하기 위하여 매설배관에 작용하는 축방향응력을 해석하고 이 응력을 이용하여 앞에서 제시한 2 가지 모델을 사용하여 각 경우에 대한 응력확대계수를 산정하였다. 사용된 매설배관의 재료는 API 5L X65 이고 재료 물성치는 Table 1 과 같고, 치수와 토질과 관련된 계산자료는 Table 2 와 Fig. 4 에 나타내었다.

Table 1 Pipeline material property

API X65	σ_y (MPa)	σ_U (MPa)	E (GPa)	ν	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
	448	540	207	0.3	109.5

σ_y : 항복응력, σ_U : 극한강도, E: 탄성계수, ν : 푸아송의 비, K_{IC} : 파괴인성치

Table 2 pipe geometry and reference conditions

r (mm)	t (mm)	H (mm)	μ	α ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)	γ (N/m^3)	ω (N/m)
203.2	10	927	0.2	11.7	19622.5	18190.1

r: 배관 안쪽 반지름, t: 배관의 벽두께, H: 매설깊이, μ : 토질과 배관사이의 마찰계수, α : 열팽창계수, γ : 토질의 단위무게, ω : 파이프의 단위길이당 가해지는 하중

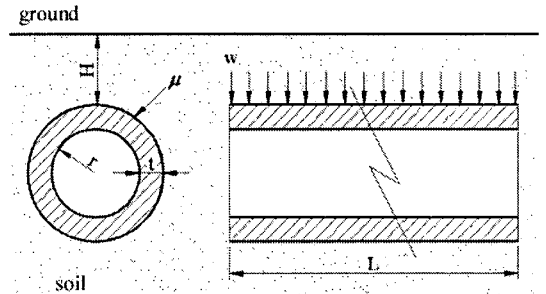


Fig. 4 Pipe geometry and boundary condition

5.1 단순 평판균열 가정

Fig.1 에서 나타낸 바와 같이 균열이 존재하는 매설배관에서 타원균열의 최대 균열깊이가 위치한 종단면을 Fig.2 에서 보인 바와 같은 평판으로 가정하고 균열의 폭과 평판의 두께를 무시하고 식 (8)을 이용하여 균열길이 a 인 경우의 응력확대계수를 계산한다.⁽⁷⁾

$$\frac{K_I^{TT}}{1.1} = (\sigma_T + \sigma_p + \sigma_\mu + \sigma_B + \sigma_M) \sqrt{\pi a}$$

$$= \left[E\alpha \Delta T + (0.5 + \nu) \frac{Pr}{t} + \frac{LH\gamma\mu}{2t} + \frac{Er}{R} + \frac{Mr}{l} \right] \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

여기서

1.1 은 편축균열의 경계조건을 고려한 계수이며, 균열길이 a 는 타원균열의 단축길이의 1/2 인 2.5mm 로 계산하였다.

Fig. 5 에 온도변화, 내압의 영향, 토질마찰의 영향, 배관굽힘의 영향에 대한 응력확대계수의 변화양상을 식(1)-식(5)을 사용하여 나타내었다.

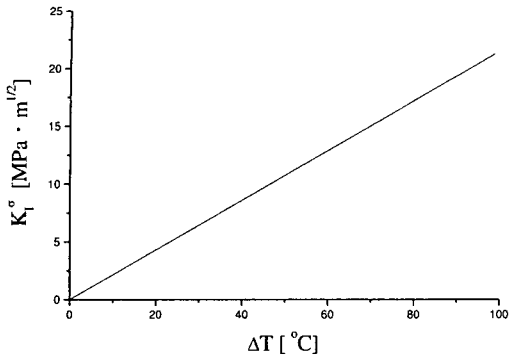


Fig. 5-1 Stress intensity factor(SIF) vs. changes in temperature

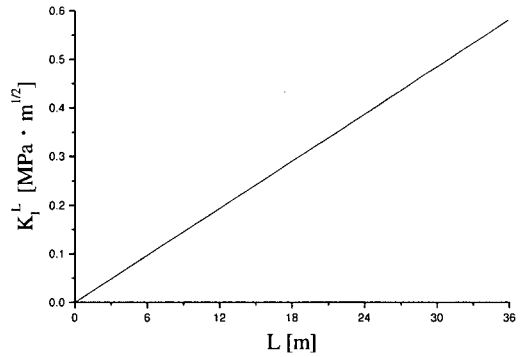


Fig. 5-4 Stress intensity factor vs. length of pipeline

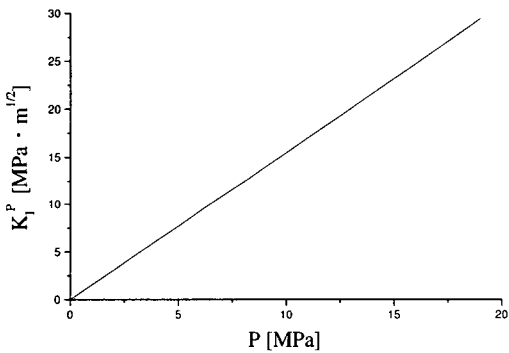


Fig. 5-2 Stress intensity factor vs. internal pressure

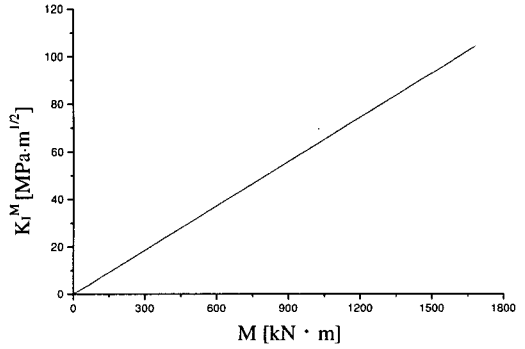


Fig. 5-5 Stress intensity factor vs. bending moment

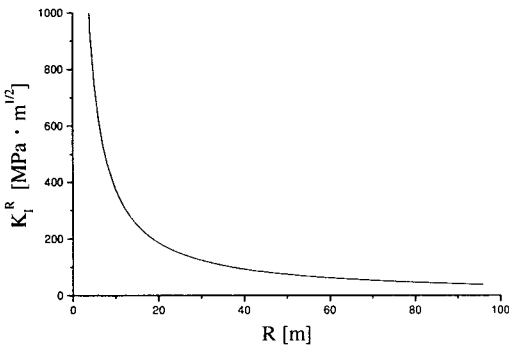


Fig. 5-3 Stress intensity factor vs. radius of curvature

Fig. 6 에는 각각의 조건에 대해서 임의의 데이터를 취하여 각 조건이 SIF 에 미치는 영향을 비교한 것이다.

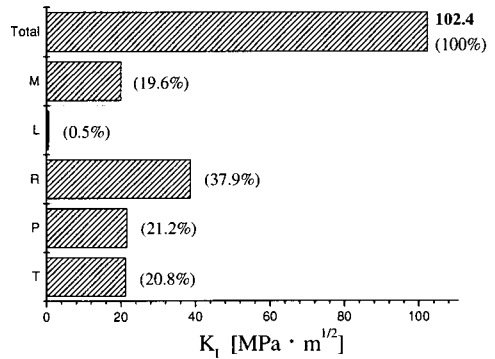


Fig. 6-1 Contribution of varying reference conditions to stress intensity factor in a simple plane crack model. T(99°C), P(14Mpa), R(96m), L(36m), M(323kN · m)

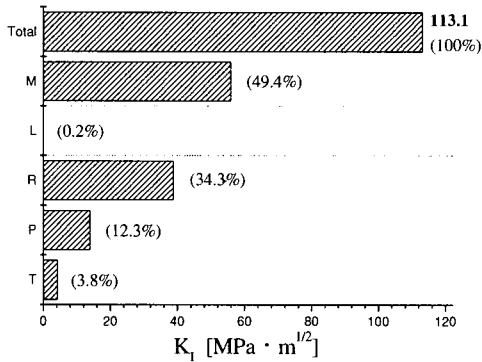


Fig. 6-2 Contribution of varying reference conditions to stress intensity factor in a simple plane crack model. T(20°C), P(9Mpa), R(96m), L(10m), M(901kN·m)

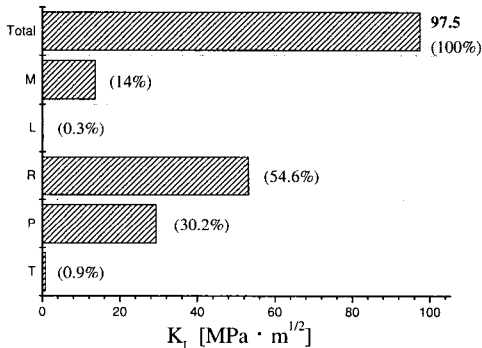


Fig. 6-3 Contribution of varying reference conditions to stress intensity factor in a simple plane crack model. T(4°C), P(19Mpa), R(70m), L(20m), M(221kN·m)

5.2 타원균열 가정 계산

5.1의 단순 평판균열 모델의 균열길이는 a 이었다. 타원의 기하학적 형상 결정은 $a/c = 1, 0.75, 0.5, 0.25$ 로 가정하여 여러가지 σ_{TT} 와 σ_M 에 대응하는 K_I 을 계산하였다.

Fig. 7에는 Fig. 6의 각각의 경우에 해당하는 데이터를 취하여 타원균열 전면(front)에 대한 K_I 의 변화양상을 나타내었다.

Fig. 8은 극저온의 영향을 조사하기 위하여 온도를 -99°C으로 가정하고 Fig. 6-3과 같은 데이터를 사용하여 결정한 K_I 의 변화양상을 나타낸 것이다.

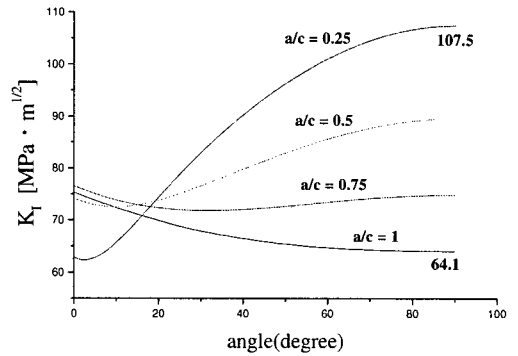


Fig. 7-1 Variation of stress intensity factors in elliptical crack model according to varying a/c and reference conditions of Fig. 6-1

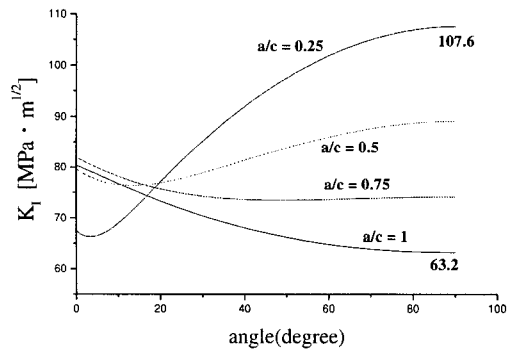


Fig. 7-2 Variation of stress intensity factors in elliptical crack model according to varying a/c and reference conditions of Fig. 6-2

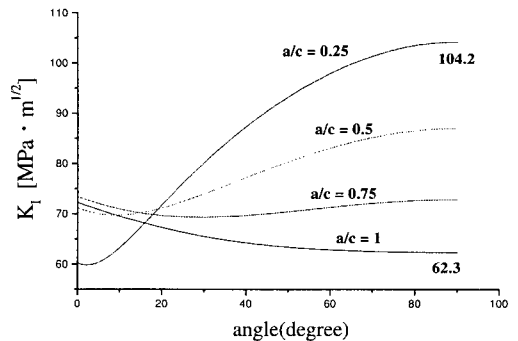
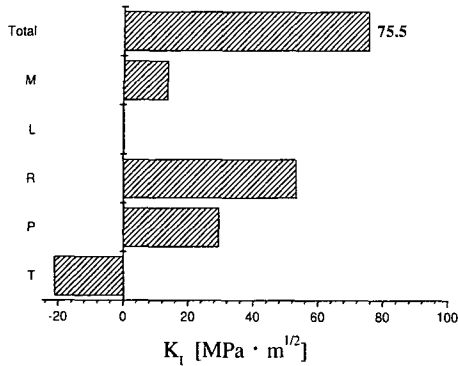
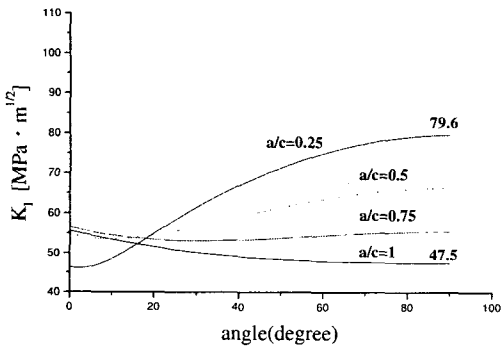


Fig. 7-3 Variation of stress intensity factors in elliptical crack model according to varying a/c and reference conditions of Fig. 6-3



(1) Simple plane crack model. T(-99°C), P(19Mpa), R(70m), L(20m),M(221 kN·m)



(2) Elliptical crack model

Fig. 8 Very low temperature effect on stress intensity factor under reference condition of Fig. 6-3

6. 결론

매설배관의 축방향응력이 축직각 표면타원균열에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 기술적인 방법론을 제시하고 여러가지 매설배관의 경계조건들의 영향이 응력확대계수(SIF)에 미치는 영향들을 결정하였다. 본 연구에서 얻어진 중요한 결론은 다음과 같다.

1) 매설 배관의 여러가지 경계조건들이 축직각 표면타원 균열에 미치는 영향을 정량하는 방법론이 제시되어 여러 상황에 응용이 가능하도록 하였다.

2) 타원균열로 가정하여 결정한 SIF의 최대치와 단순 평면 균열로 모델하여 결정한 SIF의 크기는 대동소이 하다.

후 기

본 논문은 한국과학재단산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터(SAFE)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 이역섭, 최선순, 류황희, “사각캐비티가 매설배관에 미치는 영향,” 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 113-119, 1998.
- 이역섭, 류황희, “3 차원 사각캐비티가 매설배관의 응력에 미치는 영향,” 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 647-650, 1999.
- 이역섭, 김호중, “파이프라인의 외부표면균열에 대한 파손 안전평가,” 한국정밀공학회지 submitted for publication, pp. 48-54, 2000.
- 이역섭, 황인현, “(매설)가스 배관의 건전성 평가 시스템 개발,” 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 176-180, 2000.
- Moser, A. P., Buried Pipe Design, McGraw-Hill, 1990.
- Raju, I., and Newman, J., “Stress-Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite-Thickness Plates,” Engineering Fracture Mechanics 11, pp. 817, 1979.
- Anderson, T. L., Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications, CRC Press, 1995.