

혼합모드하중을 받는 매설배관강의 피로균열전파 거동

이역섭(인하대 기계공학부), 최용길*(인하대 대학원 기계공학과)

Fatigue crack propagation of buried pipe steel under mixed mode loading

O S. Lee(School of Mech. Eng., Inha Univ.), Y. K. Choi*(Mech. Eng. Dept., Inha Univ.)

ABSTRACT

Recently, many studies focus on mixed-mode fatigue-fracture characteristics of materials. In order to reveal crack initiation and propagation mechanisms in combined-mode fatigue. This paper investigates the initiation and propagation behavior of the fatigue crack of the STS304 specimens under mixed mode loading conditions. Moreover crack arrest and branch phenomena were analyzed with respect to the change do the angle of inclined loading. The relationship between the angle of inclined loading and the angle of branched crack was studied. A greate number of cycles are necessary to initiate a new crack from the initial crack. The direction of the new crack propagation is determined by MTS theory.

Key Words : Fatigue life (피로수명), Maximum Tangential Stress (MTS) theory (최대 원주응력 이론), K_I (mode I 응력확대계수), K_{II} (mode II 응력확대계수), Inclined angle(경사각), branch crack (가지균열), Traveling microscope (이동 현미경)

1. 서론

최근 들어 파괴 역학적 연구의 초점은 재료의 혼합모드 피로-파괴 특성에 맞춰 이뤄지고 있으며 균열의 개시와 mode I 하중만이 아닌 mode II, mode III가 복합되어진 피로하중에서의 균열에 대한 역학적 거동이 이론적·실험적 방법에 의해 밝혀지고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 본 연구는 실제 지하 매설배관의 주재료로 사용중이며 액화 천연가스의 저장탱크, 각종 발전소 및 화학 플랜트와 같은 대형 구조물 내에서 약 70% 이상이 사용되고 있지만 상대적으로 파괴 역학적 기초자료가 부족한 STS304를 대상으로 하여 부식이나 환경적 영향 또는 화학적 작용에 의해 매설 배관 내부에 미소반지름을 가진 V형 노치가 발견되었다 라는 가정하에 작용하중에 수직인 방향으로 피로균열이 성장하는 순수한 열림 균열과는 달리 균열의 성장률과 성장방향이 변화하기 때문에 구조물에 위험한 상황을 초래할 수 있는 혼합모드의 피로 하중을 작용하여 균열의 개시, 피로균열

성장방향, 균열의 평균성장율, 나아가 피로수명 등을 하중경사각을 변화시키며 규명하였다. 본 연구의 주목적은 본 연구결과를 매설배관의 파괴역학적 설계와 균열 발생시 안전 잔여수명 산정에 기초 자료로 사용할 수 있도록 하는 것이다.

2. 이론

혼합모드 하중 하에서의 피로균열 진전방향은 MTS 이론을 사용하면 다음과 같이 예측할 수 있다.^(7,8)

$$\sigma_{ii}^{(total)} = \sigma_{ii}^{(I)} + \sigma_{ii}^{(II)} = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \tau_{r\theta} \end{bmatrix} \quad \text{식에서 } \sigma_{\theta\theta} \text{ 는}$$

다음과 같다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left\{ \frac{3}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right\} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left\{ -\frac{3}{4} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{3}{4} \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right\} \quad (1)$$

이때, 첫 번째 균열은 Fig.1 과 같이 $\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0$,

$\frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} \leq 0$ 을 만족하는 방향 즉, $\sigma_{\theta\theta}$ 가 최대인 θ_c 의 방향으로 진전한다.

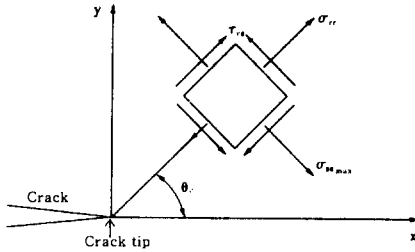


Fig. 1 Polar stress components near a crack tip.

3. 실험방법

3.1 시험편 재료 및 setting 형상

본 연구의 사용재료인 STS304의 기계적 성질과 화학적 성질을 Table1과 Table2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of STS304

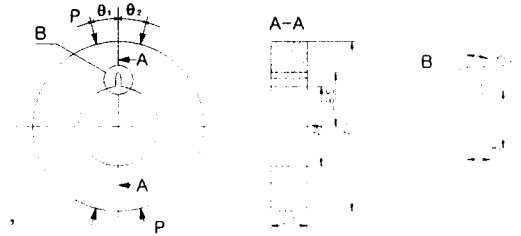
Materials	SUS304
Material Properties	SUS304
Yield Strength [MPa] (0.2% offset)	391.02
Tensile Strength [MPa]	649.74
Elongation [%]	63.29
Density [kg/m ³]	7920

Table 2 Chemical Composition of STS304

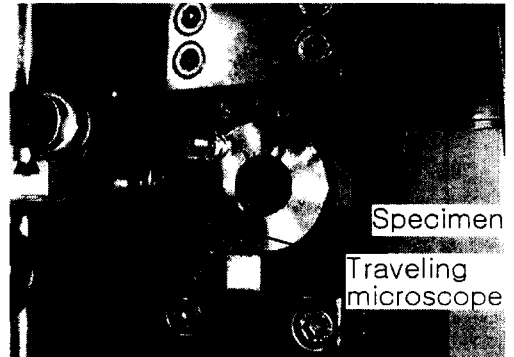
Materials	Chemical Comp. (wt.%)
C	0.08
Cr	18~20
Ni	8~12
Mn	2.00
Mo	-
Si	1.00
P	0.045
S	0.030

Fig. 2(a)는 혼합모드 하중에서의 피로 균열 성장 거동을 실험적으로 규명하기 위한 시험편의 형상이

다. Fig. 2(b)는 혼합모드 즉, 인장하중(mode I)과 전단하중(mode II)을 가하기 위해 일축하중에서도 실험할 수 있도록 시험편을 설치한 사진(inclined angle 15°, 30°)이다.



(a) Geometry of circular ring shaped specimen



(b) Testing under mixed mode loading

Fig. 2 Geometry of internal notched ring and inclined loading and a general view of the test under the mixed mode loading condition

3.2 하중조건

본 실험에서의 하중은 실험의 전과정동안 P_{max} 를 1350kg, P_{min} 은 150kg사이에서 제어하였으며 Sine파형의 반복압축하중을 가하였다. 주파수는 5Hz로 하였으며 V형노치의 중심면에서 15°, 30°의 하중경사각을 줌으로써 노치의 선단에서는 혼합모드 I-II의 응력장(인장열림-면내전단)이 작용하도록 하였다.

3.3 실험과정

(1) 노치는 일반적으로 가공 과정에서 잔류응력을 포함한다. 따라서 노치 선단에 예비균열을 만들어야 하며 각각의 시험편은 항복하중의 약40%인 300kg의 피로 하중 하에서 예비균열을 포함 시

켰다. ($\pm 15^\circ : 0.5\text{mm}$, $30^\circ : 0.4\text{mm}$)

- (2) 시편은 예비균열의 선단에서부터 균열의 시작 후 노치면의 중심축에 대한 $+15^\circ$ 의 하중경사각에 대해서는 2.2mm 까지, 30° 의 하중경사각에 대해서는 1.0mm 까지 주기적 압축하중을 가한다. 균열의 시작은 예비균열의 선단이다.
- (3) 그런 다음 시편을 반대방향으로 회전시켜 노치면의 중심축에서 -15° 경사진 하중을 가한다. 이 과정에서 시편은 branch 균열이 시작되고 약 1.2 mm 성장할 때까지 같은 범위의 반복하중을 받는다.
- (4) 각 시편의 균열길이의 측정은 이동 현미경 (traveling microscope)를 사용하였다. 수직, 수평 거리를 측정하는 이동 현미경으로 균열 양쪽 선단의 x축 거리, y축 거리를 측정하여 $a = \sqrt{x^2 + y^2}$ 로 산정하였다.

4. 실험결과

예비균열의 끝단이 혼합모드(전단-인장)의 하중을 받을 때 균열의 시작과 성장은 한방향으로 일어나며 노치면의 중심축에 대해서 θ 의 각을 가진다. $+15^\circ$ 의 하중 경사각을 받는 시편의 균열은 균열선단의 중심축에 대해 25° 의 방향으로 성장하였고 균열이 시작됐을 때와 2.2mm 성장할 때의 cycle은 각각 $1.5 \times 10^5 \text{ cycle}$ 과 $6.2 \times 10^5 \text{ cycle}$ 이었다. 이 시편의 평균피로균열성장율은 약 $3.4 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 이었다.

Fig.3은 광학현미경을 사용해 $\pm 15^\circ$ 의 경사하중을 받는 시편의 균열방향 및 길이를 나타낸 사진이다. $+30^\circ$ 의 하중경사각을 갖는 시편의 균열의 성장방향은 35° 방향이었으며 균열이 시작은 $4.1 \times 10^5 \text{ cycle}$, 1mm 성장했을 때는 $9.2 \times 10^5 \text{ cycle}$ 이었으며 이때의 평균피로균열성장율은 $1.06 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 였다. 이것은 $+15^\circ$ 하중경사각을 받는 시편의 경우보다 균열의 시작은 2.7배, 1mm에 이른 cycle은 2.3배 지연된 결과이다. 따라서 하중경사각이 균열의 시작을 제어하는 함수임을 알 수 있다. 예비균열을 가진 시편이 압축반복하중을 받을 때의 균열은 닫힘 상태가 되며 균열성장은 정지(arrest)되어 초기($1.2 \times 10^5 \text{ cycle}$)의 균열성장이 0에 가까웠으며 이는 하중방향을 바꿀 때에도 나타나는 현상이었다. 특히 예비균열과 $+15^\circ$ 방향의 반복압축하중의 작용후 방향을 바꿨던 시편의 경우는 -15° 방향에서 하중을 받을 때 $+15^\circ$ 의 하중을 받으면서 성장했던 균열이 또다시 느리게 성장(2.9mm, $5.6 \times 10^5 \text{ cycle}$)하였고 -15° 하중 방향의 균열은 정지(arrest)되어 $2.7 \times 10^5 \text{ cycle}$ 까지는 균열 성장율이 0이었다. 예비균열의 선단에서 가지(branch)균열이 시작되는 점은 $2.80 \times 10^5 \text{ cycle}$ 에

서 나타났으며 균열이 시작되어 성장하는 평균 균열 성장율이 $1.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 로써 $+15^\circ$ 방향의 시편에 비해 매우 느리게 진행됨을 알 수 있었다. Fig.4는 시편의 하중경사각에 따른 균열의 성장방향 및 길이를 도식화 하였다. 또한 MTS를 사용한 (1)식에 의해 계산된 첫 번째 균열의 방향은 23.6° 였으나 실제 균열의 방향은 25° 로 이들 사이에는 5.6%의 오차가 생김을 알 수 있다. Fig.5는 cycle수와 균열의 성장과의 관계를 규명하기 위한 그림이며 하중경사각에 따른 피로수명은 최초 균열의 열림에서 평균균열성장율에 따라 예측할 수 있다.

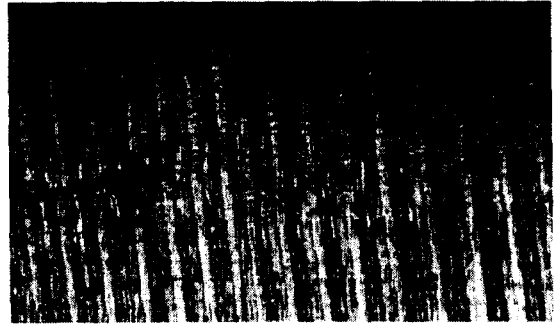


Fig. 3 Magnification of a branched crack in a specimen ($\pm 15^\circ$) ($\times 40$)

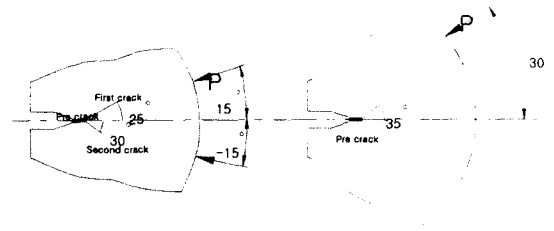
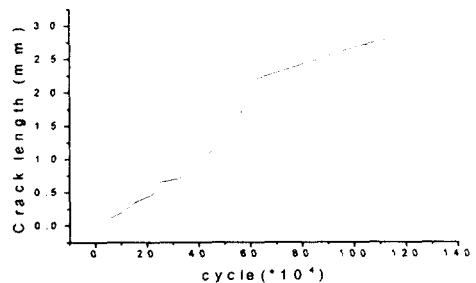
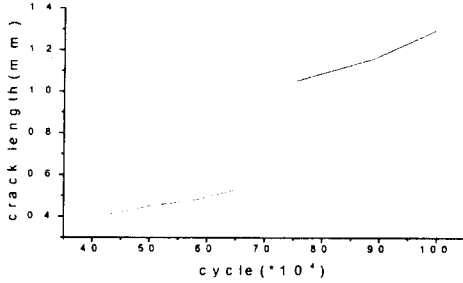


Fig. 4 Branched crack positions of inclined angle of $\pm 15^\circ$ and 30° specimens



(a) inclined angle of $+15^\circ$

참고문헌



(b) inclined angle of +15°

Fig.5 Crack growth and cycle for inclined angle of (a) +15° and (b) -15° specimens

5. 결론

지하매설배관 및 저장탱크의 주재료로 많이 사용되는 STS304의 내부에 존재하는 균열이 혼합모드 피로하중을 받을 때의 피로균열 전파양상과 피로수명을 결정하는 실험적인 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) mode I 이 지배적인 조건일수록(θ 의 크기가 작아질수록)균열이 시작되는 시점이 빨라지며 이는 순수한 열림 하중의 상태에 가까워진다.
- (2) 각각의 조건에서 균열이 성장해 감에 따라 mode I 이 지배적인 경향으로 피로균열이 전파한다.
- (3) far-field의 반복하중시험동안 경사각의 변화는 피로균열의 성장을 정지(arrest)할 수 있으며 발생된 균열로부터 새로운 균열의 개시까지의 많은 시간이 소요된다.
- (4) 새로운 균열의 진전방향 및 평균균열 성장률은 혼합모드의 조건에 의해 결정된다.
- (5) 피로균열전파수명은 하중경사각의 함수로 나타낼수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가연구 센터(SAFE)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

1. Qian, J. and Fatemi, A., Mixed mode fatigue crack growth : A literature survey, Engng Fracture Mech., 1996, 55, 969-990.
2. Ramulu, M. and Kobayashi, A. S., Numerical and of experimental study of mixed mode fatigue crack propagation, Hand book of Fatigue crack propagation in metallic structures, 1994, 1073-1123.
3. Tanaka, K., Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis, Engng Fracture Mech., 1974, 6, 493-507.
4. Gao, H., Brown, M. and Miller, K., Mixed mode fatigue threshold, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1982, 5, 1-17.
5. Liu, A. F., Allison, J. E., Dittmer, D. F. and Yamane, J. R., Effect of biaxial stresses on crack growth, the 11th National Sym. on Fracture Mech., 5-22.
6. Mahajan, R. V. and Ravi-Chander, K., An experimental investigation of mixed mode fracture, Engng Fracture Mech., 1988, 235-252.
7. Paris, P. C. and Erdogan, F., A critical analysis of crack propagation laws, Basic Engng., ASME Trans., 1963., 88, 528-535.
8. Erdogan, F. and Sih, G. C., On the crack extension n plates under plane loading and transverse shear, Basic Engng., ASME Trans., 1963, 85, 519-525.