

긴 표면균열재의 관통후 응력확대계수 평가

남 기 우 · 이 종 략*

부경대학교 재료공학부, *한국가스안전공사 가스안전기술연구원 연구개발실
(2000년 1월 8일 접수, 2000년 2월 18일 채택)

Evaluation of Stress Intensity Factor after Penetration of Plate with Long Surface Crack

Kiwoo Nam and Jongrark Lee*

Pukyong Nat. University, Dept. of Materials Science and Engineering

*Korea Gas Safety Corporation, R&D Division

(Received 9 January 2000 ; Accepted 18 February 2000)

요 약

긴 표면균열을 갖는 알루미늄합금(A5083)의 평판을 사용하여, 균열관통후의 응력확대계수를 검토하였다. 짧은 표면균열의 관통후에 제안된 식에 의하여 긴 표면균열 관통시의 평가는 균열중횡비가 적을수록 오차가 크게 되므로, 진전거동을 정확하게 평가하기 위해서는 수정이 필요하였다. 따라서 긴 표면균열 관통시의 중횡비를 고려하여, 응력확대계수의 평가식을 수정함으로써 관통후 고정도의 해석이 가능하였다.

Abstract - Stress intensity factor after penetration was discussed experimentally using long surface pre-cracked specimens of aluminum alloy 5083. The propagation behavior evaluation of long surface crack by equation proposed at penetration of short surface crack could be need modification to evaluate precisely because the error was high as aspect ratio is little. The modification of stress intensity factor with consideration of aspect ratio at penetration of long surface crack can be analyzed the behavior of crack penetration quantitatively.

Key Words : Fatigue, Leak Before Break, Behavior after Penetration, Long Surface Crack, Stress Intensity Factor

1. 서 론

구조물에 균열이 발생하여도 사용기간중에 중대한 손상이 일어나지 않으면 좋다는 생각을 손상허용설계라 부르며, 안전성을 필요로 하는 구조물의 설계에 사용하고 있다. 배관, 압력용기 및 탱크 등의 손상허용설계로서 LBB(Leak Before Break)가 있다[1,2]. LBB에서는 배관 또는 용기의 내벽에 존재하는 3차원표면균열이 성장하여 판두께를 관통하여 내용물이 누설할

때, 배관 또는 용기가 불안정 파괴하지 않을 것을 요구하고 있다 따라서, LBB성립을 판정하기 위해서는 3차원 표면균열의 관통전후 거동을 평가할 필요가 있다.

이와 같은 LBB거동에 관련하여, 표면균열이 판두께를 통하기까지의 수명과 관통시의 균열현상 등에 관하여는 많은 연구자들에 의하여 활발하게 연구되어져 왔다[4,5]. 한편 균열관통후의 거동은 LBB평가와 구조물의 건전성 평가상 대단히 중요하다고 생각되어, 저응력 및 고

† 주저자 : art2@mail.kgs.or.kr

응력하에서 일련의 연구가 수행되어 왔다. 즉, 저응력하에서는 인장하중을 받는 평활재[6,7], 응력집중을 받는 응력집중재[8,9], 인장과 굽힘을 받는 시험편[10,11], 치수효과를 고려한 대형시험편[12]을 실시하였고, 고응력하에서는 관통하중의 평가[13], 관통전후 뒷면에서의 변형량 계측[14]을 실시하였다. 그러나, 실제구조물에 존재하는 표면균열은 두께 방향의 길이보다 폭 방향의 균열이 길게 존재하는 경우가 많으리라고 생각한다. 이와 같은 긴 표면균열이 판두께를 관통하면, 관통한 뒷면의 균열길이 진전 속도가 매우 빨라져, 구조물에 치명적인 손상이 발생할 가능성이 매우 크다. 따라서, 판두께 관통후의 균열진전거동은 관통시 균열형상에 의존하므로 검토가 필요하리라고 생각한다. 본 연구에서는 알루미늄판재를 사용하여, 여러 가지 균열 형상을 갖는 표면균열재의 판두께 관통 전후의 거동을 검토하였다.

면의 균열길이(a_s) 및 균열이 관통한 뒷면의 균열길이(a_b)는 쌍안실체현미경을 사용하여 측정하였다. 그리고, 표면균열시험편의 균열길이 b 는 비치마크법에 의하여 파단후에 측정하였다. 모든 비치마크는 $R=0.5$, 주파수 12Hz에서 실시하였다.

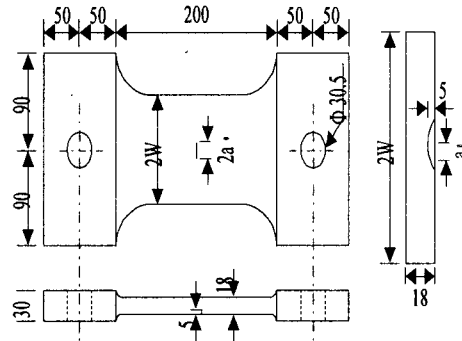


Fig. 1. Dimensions of specimen ; all dimensions in mm

Table 1. Specimen geometries and stress condition.

	Specimen geometry			Stress	Stress ratio
	t (mm)	w (mm)	a_0 (MPa)	$\Delta \sigma$ (MPa)	R
Al-1	18	50	5	49.0	0.1
Al-2	18	50	10	54.4	0.1
Al-3	18	60	15	49.0	0.1
Al-4	18	75	35	42.8	0.1
Al-5	18	75	45	36.3	0.1

2. 시험편 및 실험방법

사용한 재료는 강도, 인성 및 내식성이 뛰어난 A5083으로, Fig. 1과 같은 표면균열 시험편을 사용하였다. 표면균열시험편의 균열길이 $a_0=5, 10, 15\text{mm}$ 는 방전가공에 의하여 가공하였고, $a_0=35, 45\text{mm}$ 는 기계가공에 의하여 가공하였다. 표면균열시험편의 균열깊이는 모두 $b_0=5\text{mm}$ 로 하였다. 시험편 형상과 응력조건을 Table 1에 나타내었다.

피로실험은 전기유압식 피로시험기를 사용하여, 실온 대기중에서 실시하였다. 이때, 반복속도는 1~12 Hz, 응력비는 $R=0.1$ 의 응력제어로 하였다. 표면균열 시험편의 노치를 가공한 앞

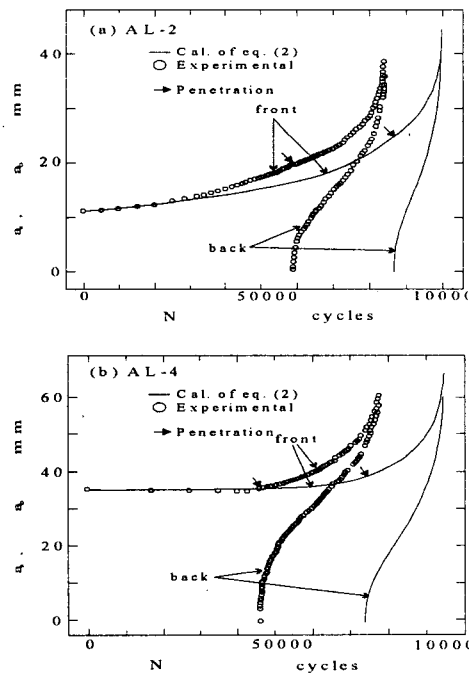


Fig. 2. Comparison of experimental with calculated value of crack growth
(a) Al-2 specimen, $a_0 = 10\text{mm}$
(b) Al-4 specimen, $a_0 = 35\text{mm}$

3. 피로균열 전파

실험에서 얻어진 피로균열 전파곡선의 일례를 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2(a)는 초기 표면 균열 길이 $a_0=10\text{mm}$ 의 결과이고, Fig. 2(b)는 초기 표면 균열길이 $a_0=35\text{mm}$ 의 결과이다.

반복하중에 따라서 초기 표면 균열길이가 성장하는 (a)에서는 균열발생수명 등의 영향을 고려하여 앞면에서의 균열길이가 1.3mm 진전한 때의 반복수를 0으로 하였다. 그러나, 초기균열 길이가 깊이에 비교하여 큰 형상인 (b)에서는 피로균열은 깊이방향으로 우선 진전이 일어난다. 이와 같은 이유에 의하여 최초의 비치마크 까지 반복수를 0으로 하였다. 앞면에서의 균열 전파거동($N-a_s$)은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 특별히 큰 변화는 없고, 거의 연속적인 거동을 나타내고 있다. 이것에 대하여, 뒷면에서는 극히 빠른 균열성장거동($N-a_b$)을 나타내고 있다. 또 그림중의 실선은 Newman-Raju[15]에 의한 응력확대계수 평가식(1)과 식(2) 및 피로균열전파법칙(7)식으로 얻어진 N-a곡선이다. 계산결과는 실험결과에 비교하여 약간 장수명이 되어 있지만, 전체적인 경향은 좋은 일치를 보이고 있다.

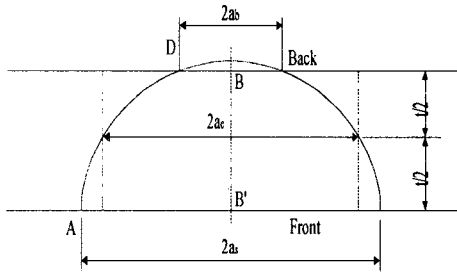


Fig. 3. Crack model to evaluate the stress intensity factor after penetration

4. 응력확대계수의 평가

표면균열시험편의 응력확대계수 평가에는 피로균열이 관통하기 전에는 식(1)에 나타내는 Newman-Raju식[15]으로 평가하였다.

$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b)\sqrt{\pi b}/Q \cdot F \quad (1)$$

여기서, $Q=1+1.464(b/a_s)^{1.65}$, ($b/a_s \leq 1$)

σ_m 은 인장응력, σ_b 는 굽힘응력, H와 F는 보정계수, a_s 는 표면균열길이, b는 균열깊이이다.

한편 표면균열이 판두께 관통한 후의 앞면과 뒷면의 응력확대계수 K_A^e , K_D^e 는 Fig. 3과 같은 모델을 제안하여 다음 식으로 평가하였다 [6].

$$K_A^e = \delta(a_e)/\delta(a_s) \sigma \sqrt{\pi a_s} F(\eta_s)$$

$$K_D^e = \delta(a_e)/\delta(a_b) \sigma \sqrt{\pi a_b} F(\eta_b) \quad (2)$$

여기서, a_s 는 앞면의 균열길이, a_b 는 뒷면의 균열 길이, a_e 는 판두께 중앙부의 균열길이로서, $a_e = 0.5(3a_s^2 + a_b^2)^{1/2}$ 이다. $F(\eta) = (1-0.5\eta + 0.370\eta^2 - 0.044\eta^3)/(1-\eta)^{1/2}$ 이며, $\eta = a/W$ 이다. 그리고, $\delta(a) = 4\sigma \cdot a(1-\nu^2)/E \cdot V(\eta)$ 로서, ν 는 포아손비, E는 종탄성계수, $V(\eta) = -0.071 - 0.535\eta + 0.169\eta^2 + 0.029\eta^3 - 1.071(1/\eta)\log(1-\eta)$ 이다.

그러나 식(2)는 균열관통시 균열의 종횡비가 비교적 큰 경우에 사용하면, 판두께를 관통한 후의 표면균열 진전거동을 평가할 수 있다는 것을 알았다. 그러나 관통시의 균열의 종횡비가 비교적 적게되면, 앞면과 뒷면의 균열 진전에 차이가 생겨서 수정이 필요하리라고 생각된다. 즉, 관통시 균열의 종횡비가 비교적 적은 경우, 균열진전에 미치는 식(2)의 영향과 특징은 다음과 같다.

(a) 뒷면에서의 응력확대계수는 과소평가의 경향을 나타내고, 그 결과 뒷면의 균열성장거동($N-a_b$)에서, 관통직후의 균열 성장영역인 'a' 영역의 균열길이에 오차가 발생한다고 생각된다.

(b) 앞면에서의 응력확대계수는 반대로 과대평가를 하는 경향이 있다.

(c) 이러한 경향은 앞면과 뒷면의 균열길이가 큰 차이를 나타낼 때 성립하고, 뒷면의 균열길이가 어느 정도 성장하면 식(2)으로 잘 설명된다.

또한 균열관통시의 균열 종횡비가 비교적 적게되면, 균열진전거동에 있어서 앞뒷면에 차이가 생기는 이유는 다음과 같다

첫째, 표면균열이 판두께와 판폭방향으로 충분히 성장하는 것이 가능하면, 어떤 일정한

형상으로 되는 것이 예측된다. 그러나, 초기균열이 극단적으로 긴 경우, 균열은 판폭방향으로 충분히 성장하지 않고 관통한다. 이 경우 균열이 관통하여도 일정기간 동안은 종횡비를 높게 하려는 경향이 있다고 생각된다.

둘째, 표면균열이 판두께를 관통한 후에도 아직 2차원균열이 아니기 때문에, 뒷면의 균열 선단부근에서는 균열이 판폭방향과 깊이방향으로 진전하고자 하는 역할의 K값도 존재한다고 생각된다. 또한 판두께가 얇을수록 이러한 경향이 강하다고 생각된다. 따라서 긴 균열형상의 경우, 뒷면에서는 판두께가 대단히 얇은 상황으로 이러한 경향을 강하게 받아서, 깊이방향의 K값 존재를 무시할 수 없게 되고 거동에 다소의 변화를 준다고 생각된다.

상기와 같은 이유에 의하여 표면균열길이가 비교적 긴 경우, 응력확대계수를 보다 정도 높게 해석하기 위하여 검토하였다. 피로균열진전 거동의 차이는 관통시의 종횡비에 크게 의존한다. 따라서, 균열선단의 형상을 어떠한 파라미터로 수정을 할 필요가 있다고 생각된다. 더구나 상기의 ㉔에서 알 수 있듯이 뒷면의 균열이 성장하여, 앞뒷면의 균열길이 차가 어느 정도 이하로 되면, 수정할 필요가 없이 식(2)로 균열 진전을 설명할 수 있다.

이상의 관점에서 검토할 수정 모델의 모식도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 균열이 뒷면에 관통하여 성장하는 모습을 단계적으로 나타낸 것이다. (a)는 관통시 종횡비 t/a_p 가 0.5인 경우를 나타내며, 표면균열이 판두께를 관통한 직후의 모습을 나타내고 있다. 여기서 a_p 는 관통시의 앞면균열길이를 나타낸다. 이와 같은 상태에서 관통후 뒷면의 균열은 식(2)로 나타내는 K_D 를 사용한 해석보다도 상당히 빨리 진전하며, 앞면의 균열은 약간 늦게 진전한다. 또한 이러한 균열의 진전에 의하여 뒷면의 균열은 거의 앞면균열에 가까워지고, (b)와 같은 상태가 된다 이 때의 균열형상을 나타내는 파라미터로서 다음 식과 같이 정의한다.

$$S = t / (a_s - a_b) \quad (3)$$

Fig. 4의 (b)에서 S는 0.67이다. 이 값은 본 실험에서 사용한 긴 표면균열재에서, 관통후 뒷면 균열길이가 성장하여 앞면 균열길이에 접근하는 관통직후 균열길이인 'a'영역의 균열 성장길이를 제외한 종횡비이다. 더욱 균열이 진

전하면 $a_s - a_b = t$ 인 (c)의 상태가 되고 식(2)의 수정은 필요없게 된다. 이 때의 S값을 S_c 로 한다. S_c 는 식(2)가 적용되는 범위내에서 관통시의 균열형상이 가장 편평화한 때의 종횡비와 같다고 가정하고, 다음 식으로 주어진다.

$$S_c = (t / a_p)_c \quad (4)$$

식(4)는 관통시 종횡비의 적용한계값이다. 이 값은 시험편의 체결조건 등에 의해서 변하는 정수라고 생각된다. 즉, 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 시험편의 실험결과[10]는 균열이 충분히 성장하여 관통하여도 관통시의 종횡비는 약 0.65로 적다. 그러나 이 경우에 식(2)의 수정이 필요 없었던 점으로부터, S_c 값이 실험조건 등에 따라서 변화함을 알 수 있다. 본 실험에서는 0.9 - 1.0 정도의 값이다. 균열이 더욱 진전하여 (d)의 상태인 $S > S_c$ 로 되면, 식(2)를 그대로 적용한다.

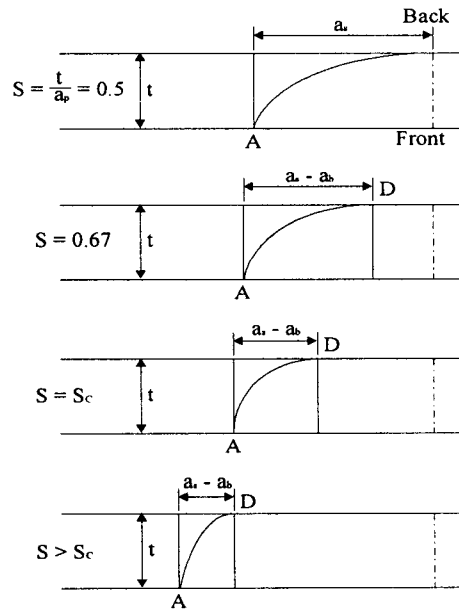


Fig. 4. Modified crack model to evaluate the stress intensity factor after penetration.

따라서 관통시 종횡비가 비교적 적은 경우에는 식(2)의 응력확대계수는 적용한계값까지의 S와 적용한계값인 S_c 의 비인 (S/S_c)를 승계함

으로써, 다음 식과 같이 주어진다.

$$S \leq S_c \text{ 일 때}$$

$$K_{AS} = K_A^e \times (S/S_c) \quad (5)$$

$$K_{DS} = K_D^e / (S/S_c) \quad S \geq S_c \text{ 일 때}$$

$$K_{AS} = K_A^e$$

$$K_{DS} = K_D^e \quad (6)$$

여기서 K_{AS} , K_{DS} 는 수정후의 앞면과 뒷면의 응력확대계수이고, 식(5)와 식(6)의 K_A^e 및 K_D^e 는 식(2)에서와 같다.

Fig. 2와 같은 N-a곡선으로부터 얻어진 파괴균열전파속도 da/dN 와 식(2), 식(5) 및 Newman-Raju에 의한 응력확대계수의 평가식(1)을 사용하여 얻어진 ΔK 와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

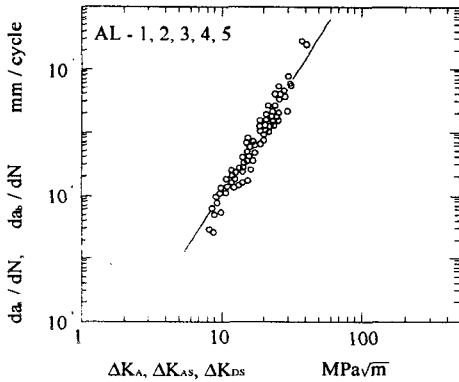


Fig. 5. Crack growth versus stress intensity factor range at the front and back sides of a plate.

이 그림에서 AL-1,2,3 시험편은 관통전후의 결과이고, AL-4,5 시험편은 관통후의 결과만을 나타내고 있다. 이 그림에 의하면, da/dN 와 ΔK 사이의 관계는 초기 표면 균열길이에 관계없이 관통전후는 다음 식과 같이 정리될 수 있는 것을 알았다.

$$da/dN = 1.99 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.65} \quad (7)$$

여기서

$$da/dN \text{는 mm/cycle, } \Delta K \text{는 MPa}\sqrt{m} \text{이다.}$$

5. 관통후의 균열전파

뒷면에서의 균열전파거동을 검토하기 위하여 Fig. 2의 N-a곡선에서 균열 관통 후 부분만 확대하여 Fig. 6의 (a), (b)에 나타내었다. 이 그림들은 저자들이 보고한 결과[6-13]들과 유사하게 3영역으로 나누어지는 경향을 나타내고 있다. 첫째 'a'영역은 균열관통직후의 부분으로서 균열이 매우 빠르게 성장하고 있다. 이 영역에서의 균열성장 길이를 a_{ba} 로 나타낸다. 둘째 'b'영역은 어느 구간에 걸쳐서 거의 일정한 성장속도를 나타내고 있다. 셋째 'c'영역은 뒷면에서의 균열성장속도가 가속화해서 앞면에서의 균열길이에 접근해 가는 영역이다.

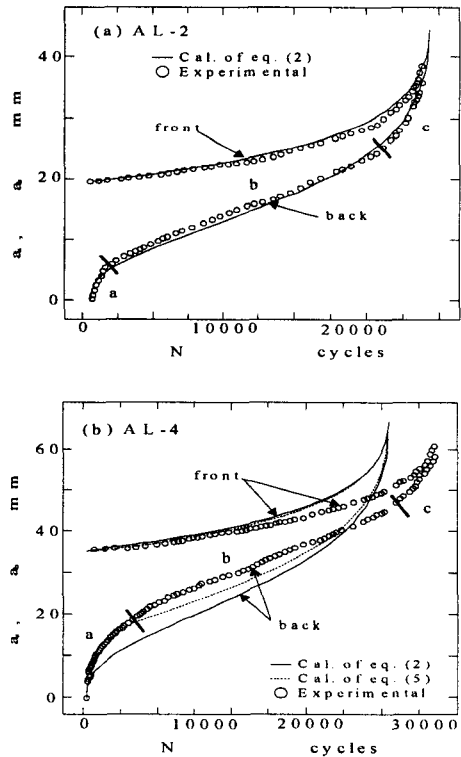


Fig. 6. Comparison of experimental with calculated values of crack growth after penetration.

- (a) AL-2 specimen, $a_0 = 10\text{mm}$
- (b) AL-4 specimen, $a_0 = 35\text{mm}$

Fig. 6에서 나타낸 실선은 피로균열전파법칙(7)식과 식(2)에서 얻어진 관통후의 N-a곡선이다. 이것은 실험에서 얻어진 관통시의 앞면균열길이를 대입하고, 반복수를 0으로 하였다. 이 결과, 표면균열이 비교적 짧은 AL-2와 같은 형상은 잘 일치하고 있고, 표면균열이 비교적 긴 AL-4와 같은 형상의 시험편에 대하여도 식(2)에 의하여 관통후의 균열전파거동을 평가할 수 있는 것이라고 생각되어 진다. 그러나 표면균열이 비교적 긴 경우인 AL-4를 자세히 보면, 관통 후 첫째영역에서 실험과 계산의 결과가 약간 상이함을 알 수 있다. 따라서 표면균열이 비교적 긴 경우에는 관통직후 앞면과 뒷면의 응력확대계수 평가식(5)와 피로균열전파법칙 식(7)을 사용하여 N-a곡선을 구하였다. 이 결과를 Fig. 6(b)의 점선으로 나타내었다. 이 그림에서 양자는 파단까지의 수명은 그렇게 차이를 보이지 않지만, 뒷면의 균열이 급속하게 성장하는 a영역에 관해서는 식(5)에 의한 해석이 실험결과와 좋은 일치를 보이고 있다.

이것을 보다 상세하게 검토하기 위하여 식(2) 및 식(5)에 의한 관통시의 종횡비 t/a_0 와 뒷면균열의 a영역길이 a_{ba} 와의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 직선은 식(2)에 의한 결과이고, 곡선은 식(5)에 의한 결과를 나타낸 것이다. 실험값은 식(5)에 의해서 얻어진 해석결과와 좋은 일치를 나타내고 있는 것으로부터, 이 식을 사용하면 뒷면의 급속균열진전영역의 균열진전을 좋게 평가할 수 있다고 생각된다.

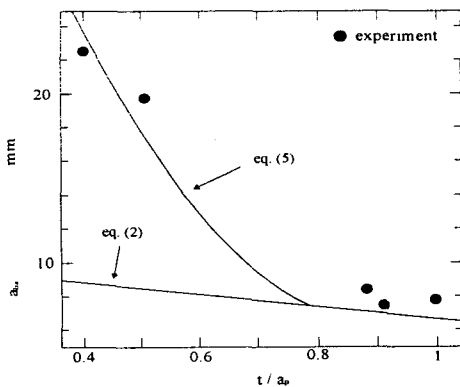


Fig. 7. Comparison of aspect ratio at penetration with first stage crack length of back side.

6. 결 론

알루미늄합금(A5083)을 사용하여, 표면균열 시험편의 피로수명과 균열관통후의 거동을 검토한 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

표면균열의 균열관통후 진전거동은 균열형상에 관계없이 식(2)를 사용하여 해석할 수 있었다. 뒷면에서의 피로균열 성장거동은 초기 표면균열 길이에 관계없이 반원형 노치를 갖는 모든 시험편과 유사한 경향을 보이며, 3영역으로 나뉘어 졌다. 식(2)에 의한 평가는 관통시의 균열종횡비가 적을수록 오차가 크게 되므로, 진전거동을 정확하게 평가하기 위해서는 수정이 필요하다.

따라서 균열관통시의 종횡비를 고려하여, 응력확대계수의 평가식을 수정함으로써 고정도의 해석이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. IMCO resolution A 328(IX), "Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk" (1975)
2. ASME, "Boiler and Pressure Vessel Code. Sec.XI" (1987)
3. Hodulak, L., Kordisch, H., Kunzelmann, S. and Sommer, E., "Growth of Part-Through Cracks," *ASTM STP*, 677, 399~410 (1979).
4. Ruttenauer, B., Setz, W. and Grueler, L., "Further Considerations on the Development of Surface Cracks under Stable Crack Extension," *Z. Werkstofftech*, Vol.14, 41~44 (1993).
5. Gilchrist, M. D., Chipalo, M. I. and Smith, R. A., "Shape Development of Surface Defects in Tension Fatigued Finite Thickness Plates," *Int. J. Press. Piping*, Vol.49, 121~137 (1992).
6. Ando, K., Fujibayashi, S., Nam, K. W., Takahashi, M. and Ogura, N., "The Fatigue Life and Crack Through-Thickness Behaviour of a Surface-Cracked Plate (for the Case of Tensile Load)," *JSME Int. J.*, Vol.30, 1898~1905 (1987).
7. 남기우, "고장력강의 피로수명과 균열관통거

- 동에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제5권, 제6호, 1990~2001 (1991).
8. Nam, K. W., Fujibayashi, S., Ando, K. and Ogura, N., "The Fatigue Life and Crack Through-Thickness Behaviour of a Surface-Cracked Plate (Effect of Stress Concentration)," *JSME Int. J.*, Vol.31, 272~279 (1988).
 9. Nam, K. W., Ando, K. and Ogura, N., "Surface Fatigue Crack Life and Penetration Behaviour of Stress Concentration Specimen," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol .51, No.1, 161~166 (1995).
 10. Nam, K. W., Ando, K., Ogura, N. and Matui, K., "Fatigue Life and Penetration Behaviour of Surface-Cracked Plate under Combined Tension and Bending," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.17, No.8, 873~882 (1994).
 11. 남기우, "인장 굽힘피로를 받는 부재의 피로수명과 균열관통," 한국해양공학회지, 제8권, 제1호, 41~49 (1994).
 12. Nam, K. W., Ando, K. and Ogura, N., "The Effect of Specimen Size on the Behaviour of Penetrating Fatigue Cracks," *Fatigue Fract, Engng. Mater. Struct.*, Vol.16, 767~779 (1993).
 13. Nam, K. W., Ando, K., Sakai, Y. and Ogura, N., "Leak-Before-Break Conditions of Plates and Pipes under High Fatigue Stresses," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.15, 809~824 (1992).
 14. 南起祐, 酒井護, 安藤柱, 小倉信和, "繰り返し荷重を受ける平板及び配管のLBB條件に關する研究(第3報 貫通前後の龜裂周邊の變形狀態)," *日本高壓力技術*, 第27券, 第1號, 41~48 (1998).
 15. Newman, J. C. Jr. and Raju. I. S., "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack," *Engng. Fract, Mech.*, Vol.15, 185~192 (1981).