

긴 균열을 갖는 알루미늄판재의 관통전후 피로거동

남 기 우 · 이 종 략* · 안 석 환

부경대학교 공과대학, *한국가스안전공사 가스안전기술연구센터
(1998년 11월 16일 접수, 1999년 3월 15일 채택)

Fatigue Behavior of Before-and-After Penetration of Aluminium Plate with Long Surface Crack

Ki-Woo Nam, Jong-Rark Lee* and Seok-Hwan Ahn

*Pukyong Nat. University, Dept. of Material Eng.,
Korea Gas Safety Corporation, R&D Center

(Received 16 February 1998 ; Accepted 15 March 1999)

요 약

알루미늄합금(5083-0)의 표면균열시험편의 관통전후의 피로거동을 조사하였다. 관통전의 피로균열형상은 거의 반타원형이며, 측정된 형상비는 Newman-Raju식의 K를 이용하여 계산한 값보다 더 크다. 관통후의 뒷면에서의 피로균열성장거동은 거의 유사하였으며 3영역으로 나누어졌다. 표면균열길이가 긴 경우, 피로균열전파법칙을 사용함으로써 표면균열재의 관통후의 피로균열 전파특성을 정량적으로 평가될 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract - Fatigue behavior of before-and-after penetration was examined experimentally using surface pre-cracked specimens of aluminium alloy 5083-0. The fatigue crack shape before penetration is almost semicircular, and the measured aspect ratio is larger than the value obtained by calculation using K values proposed by Newman-Raju. It is found that the crack growth behavior on the back side after penetration is unique and can be divided into three stages. By using a crack propagation rule in case of long surface crack, the change in crack shape after penetration can be evaluated quantitatively.

Key words : LBB(leak before break), Penetration behavior, Long surface crack, Stress intensity factor

1. 서 론

최근 구조물의 안정성 및 경제성 향상의 관점에서, 만일의 경우에도 내용물의 누설이 불안정 파괴에 앞서서 일어날 것을 보증하는 LBB설계(leak before break design) 개념이 주목받고 있다[1,2]. 이것은 일종의 Fail safe design 이라고 말할 수 있다.

이와 같은 LBB설계법에 관련해서, 표면균열이 판 두께를 관통하기까지의 수명과 관통시의

균열 현상 등에 관하여는 많은 연구자들에 의하여 활발하게 연구되어 왔다[3-5]. 한편 균열관통후의 거동을 평가하는 것은 LBB설계와 구조물의 건전성 평가상 대단히 중요하다고 생각되어 저자들에 의하여 저응력 및 고응력하에서 일련의 연구가 수행되어 왔다. 즉, 저응력하에서는 인장하중을 받는 평활재[6,7], 응력집중을 받는 응력집중재[8], 인장과 굽힘을 받는 시험편[9,10], 치수효과를 고려한 대형시험편[11]을 실시하였고, 고응력하에서는 관통하중의 평가[12], 관통전후 뒷면에서의 변형량 계측[13]을 실시하였다.

그러나 실제 구조물에 존재하는 표면균열은 두께 방향의 길이보다 폭 방향의 균열이 길게 존재하는 경우가 많으리라고 생각한다. 이와 같은 긴 표면균열이 판두께를 관통하면, 관통한 측(뒷면)의 균열길이는 진전속도가 매우 빨라져, 구조물에 치명적인 손상이 발생할 가능성이 매우 크다. 따라서 판두께 관통후의 균열진전거동은 표면균열에 의한 관통시 균열형상에 의존하므로 검토가 필요하다.

본 연구에서는 알루미늄판을 사용하여, 표면균열의 판두께 관통전후의 거동을 여러 가지 균열형상에 대하여 정량적으로 검토하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 시험편제작 및 실험방법

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

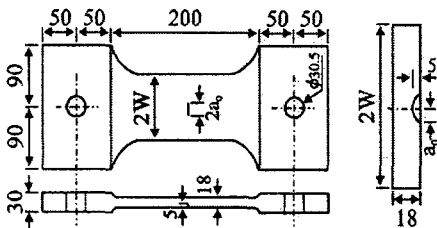


Fig. 1. Dimensions of specimens ; all dimensions in mm.

Table 1. Specimen geometries and test results

Specimen no.	Specimen geometry			Stress condition	Stress ratio
	t (mm)	W (mm)	a _o (mm)	$\Delta\sigma$ (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

피로실험은 전기유압식 피로시험기를 사용하여, 실온 대기중에서 실시하였다. 이때, 반복속도는 1~12Hz, 응력비는 R=0.1의 응력제어로 하였다. 표면균열 시험편의 노치를 가공한 측(앞면) 및 균열이 관통한 측(뒷면)의 균열길이는 쌍안실체현미경을 사용하여 측정하였다. 그리고, 표면균열 시험편의 균열깊이 b는 beach mark법에 의하여 파단후에 측정하였다. 모든 beach mark는 R=0.5, 주파수 12Hz에서 실시하였다.

2.2. 응력확대계수의 평가방법

표면균열 시험편의 응력확대계수 평가는 피로균열이 관통하기 전에는 Newman-Raju식[14]로 평가하였다. 한편 표면균열이 판두께를 관통한 후의 앞면과 뒷면의 응력확대계수 K_A^e, K_D^e 는 저자들이 제안한 모델인 Fig. 2에서 유도한 다음 식으로 평가하였다[6].

$$K_A^e = \delta(a_e) / \delta(a_s) \sigma \sqrt{\pi a_s} F(\eta_s) \quad (1)$$

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

여기서, a_s 및 a_b 는 각각 앞면 및 뒷면에서의 균열길이, a_e 는 판두께 중앙부에서의 균열길이이며, $a_e = 0.5(3a_s^2 + a_b^2)^{1/2}$, $\eta_s = a_s/W, \eta_b = a_b/W$, $F(\eta) = (1 - 0.5\eta + 0.370\eta^2 - 0.044\eta^3) / (1 - \eta)^{0.5}$ 를 이용하였다.

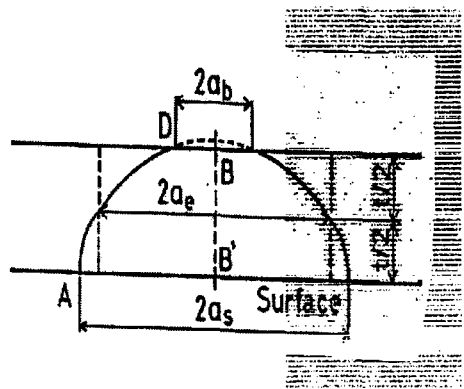


Fig. 2. Crack model to evaluate the stress intensity factor after penetration.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 피로균열 전파

실험에서 얻어진 피로균열 전파곡선의 한 예

를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 초기 표면균열 길이 $a_0=10\text{mm}$ 에서 얻어진 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 반복하중에 따라서 초기표면 균열길이 성장하는 Fig. 3에서는 균열 발생수명 등의 영향을 고려하여 앞면에서의 균열길이가 1.3mm 진전한 때의 반복수를 0으로 하였다.

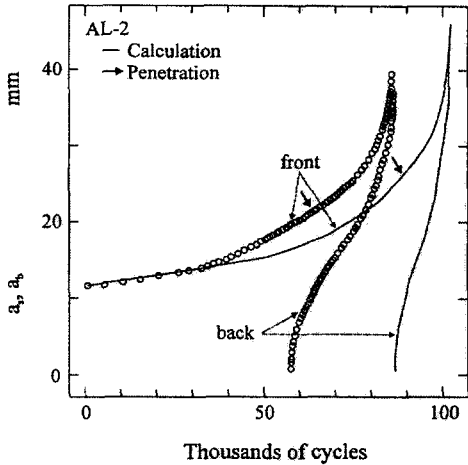


Fig. 3. Comparison of experimental with calculated values of crack growth. (AL-2 specimen, $a_0=5\text{mm}$)

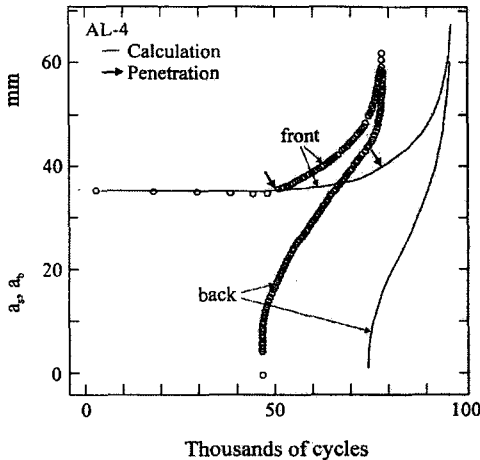


Fig. 4. Comparison of experimental with calculated values of crack growth. (AL-4 specimen, $a_0=35\text{mm}$)

그러나 초기균열길이가 깊이에 비교하여 큰

형상인 Fig. 4에서는 피로균열은 깊이 방향으로 우선 진전이 일어난다. 이와 같은 이유에 의하여 최초의 beach mark까지의 반복수를 0으로 하였다. 앞면에서의 균열전파거동($N-a_f$)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-Raju에 의한 응력확대계수 평가식과 식(1), (2) 및 피로균열전파법칙 (3)식으로 얻어진 $N-a$ 곡선이다. 계산결과는 실험결과에 비교하여 약간 장수명이 되어 있지만, 전체적인 경향은 좋은 일치를 보이고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4와 같은 $N-a$ 곡선으로부터 얻어진 피로균열전파속도 da/dN 와 식 (1), (2) 및 Newman-Raju에 의한 응력확대계수의 평가식을 사용하여 얻어진 ΔK 와의 관계를 Fig.5에 나타내었다. 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 표면균열 길이에 관계없이 관통전후는 다음 식과 같이 정리될 수 있는 것을 알았다.

$$da/dN = 1.99 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.65} \quad (3)$$

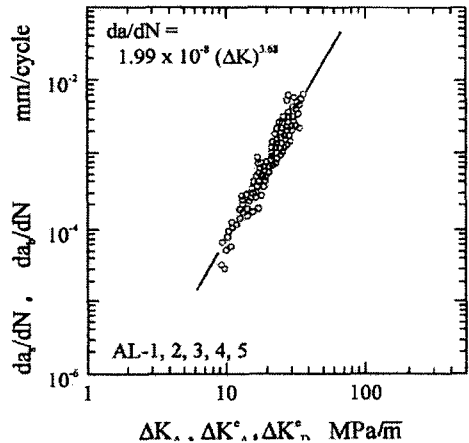


Fig. 5. Crack growth rate versus stress intensity factor range at the front and back sides of a plate.

3.2. 관통 후의 균열전파

균열관통 후 뒷면에서의 전파거동을 검토하기 위하여 $N-a$ 곡선을 확대하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림들은 저자들이 보고한 결과 [6,8,9]들과 유사하게 3영역으로 나누어지는 경향

을 나타내고 있다. 첫째영역은 균열관통직후의 부분으로서 균열이 매우 빠르게 성장하고 있다. 이 영역에서의 균열성장량을 Δa_{ba} 로 나타내기로 한다. 둘째 영역은 어느 구간에 걸쳐서 거의 일정한 성장속도를 나타내고 있다. 이 영역에서의 균열성장량을 Δa_{bb} 로 나타내기로 한다. 셋째 영역은 뒷면에서의 균열성장속도가 가속화해서 앞면에서의 균열길이에 접근해 가는 영역이다.

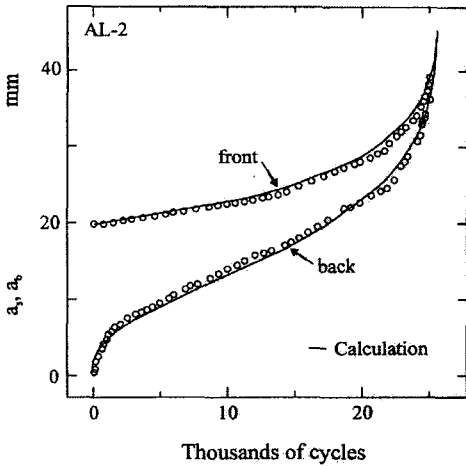


Fig. 6. Comparison of experimental with calculated values of crack growth after penetration. (AL-2 specimen, $a_0=5\text{mm}$)

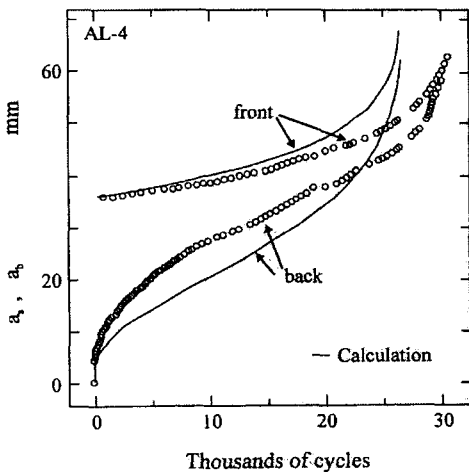


Fig. 7. Comparison of experimental with calculated values of crack growth after penetration. (AL-4 specimen, $a_0=35\text{mm}$)

Fig. 6, 7에 나타난 실선은 피로균열전파법칙 (3)식과 식(1), (2)에서 얻어진 관통후의 $N-a$ 곡선이다. 이것은 실험에서 얻어진 관통시의 앞면 균열길이를 대입하고, 반복수를 0으로 하였다. 이 결과 표면균열이 비교적 짧은 AL-2와 같은 형상뿐만 아니라, 표면균열이 비교적 긴 AL-4와 같은 형상의 시험편에 대하여서도 저자 등이 제안한 식(1), (2)에 의하여 관통후의 균열전파 거동을 평가할 수 있는 것이라고 생각되어 진다.

3.3. 피로균열형상

실험에서 얻어진 피로파면의 거시적 양상을 Photo. 1에 나타내었다. Photo. 1은 초기균열길이 a_0 가 각각 10mm(AL-2), 35mm(AL-4), 45mm(AL-5)일 때의 결과이다. 이 그림에서 초기표면균열길이가 길어짐에 따라서 피로균열이 편평화하는 경향을 알 수 있다.

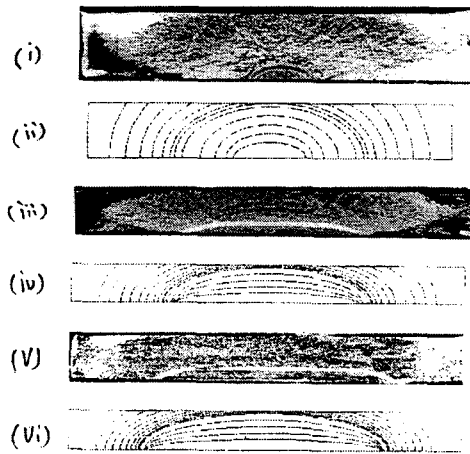


Photo. 1. Fatigue fracture surfaces.

- i) Specimen AL-2 (experiment)
- ii) Specimen AL-2 (calculation)
- iii) Specimen AL-4 (experiment)
- iv) Specimen AL-4 (calculation)
- v) Specimen AL-5 (experiment)
- vi) Specimen AL-5 (calculation)

그리고 관통후의 균열진전형상은 초기균열길이에 관계없이 거의 타원의 일부로 되어 있는 것을 알 수 있다. 이것에 의하여, 저자들[6]이 관통후의 응력확대계수 평가식을 유도할 때 가정한 "균열은 관두개를 관통한 후에도 반타원형 형상을 유지하고, a_s 는 언제나 타원의 장경으로

한다. 이것에 의하여 판두께 중앙부의 균열길이는 $a_c=0.5(3a_s^2+a_b^2)^{0.5}$ 로 주어진다.”는 초기표면균열길이가 긴 경우에도 타당하다고 말할 수 있다. 그림에서 계산된 균열진전형상은 피로균열전파법칙 (3)식, Newman-Raju에 의한 응력확대계수의 평가식과 식(1), (2)에서 얻어진 결과이다.

Photo. 1과 같은 피로파면에서 얻어진 종횡비 (b/a_s)와 계산에서 얻어진 종횡비와의 비교를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 실선은 피로균열전파법칙 (3)식과 Newman-Raju에 의한 응력확대계수의 평가식을 사용하여 얻어진 종횡비이다. 이 그림에서 실측된 종횡비는 해석에서 얻어진 종횡비보다 큰 값을 나타내며, 관통시에는 거의 반원에 가까워지는 경향을 보이고 있다 [6]. 이와 같은 실험값과 계산값의 차이는 실험에 사용한 치구에 의하여 표면 균열 시험편의 면외변형이 구속되었기 때문이라고 생각한다. 그러나 시험편의 면외변형을 구속하지 않은 인장과 굽힘을 받는 시험편의 경우는 좋은 일치를 나타내었다[9]. 따라서 본 연구에서와 같은 시험편의 경우, 면외변형을 구속하지 않는 치구를 사용하여 균열진전거동을 검토하는 것은 금후의 과제이다. 한편, 초기표면 균열길이가 긴 경우는 실험과 계산결과가 좋은 일치를 보이고 있다.

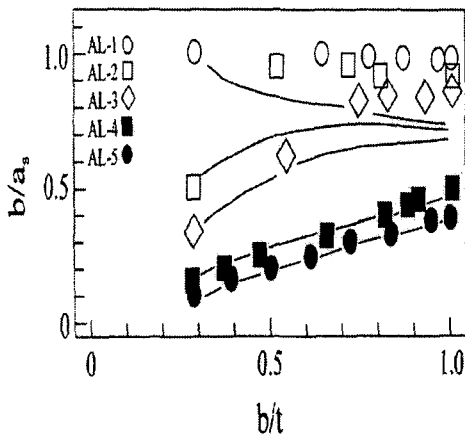


Fig. 8. Aspect ratio.

Photo. 1과 같은 파면의 Beach mark에서 판두께 중앙부의 균열길이 a_c 를 실측하였다. 저자들이 관통후의 응력확대계수의 평가식을 유도할 때 가정한 판두께 중앙부의 균열길이 $a_c=0.5(3a_s^2+a_b^2)^{0.5}$ 에 실측한 앞면 및 뒷면의 균열길이 a_s , a_b 를 대입하여 얻어진 a_c 와 실측한 a_c 를

비교하여 Fig.9에 나타내었다. 이 그림에서 실측된 a_c 와 계산된 a_c 는 여러 가지 초기표면균열길이에 대하여 좋은 일치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 저자들이 관통후의 응력확대계수 평가식을 유도할 때 가정한 판두께 중앙부의 균열길이 $a_c=0.5(3a_s^2+a_b^2)^{0.5}$ 는 타당한 것이라 생각한다.

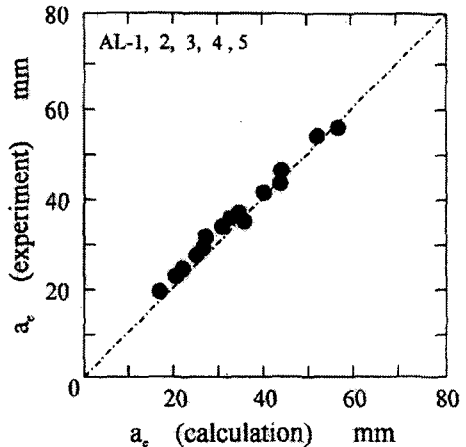


Fig. 9. Comparison of experimental with calculated crack length at the centre of the plate thickness.

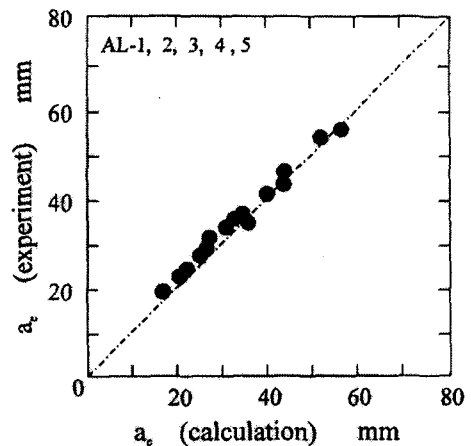


Fig. 10. Comparison of experimental with calculated values of Δa_{ba} and Δa_{bb}

3.4. 실험결과와 계산결과와의 비교

초기 표면 균열길이가 비교적 긴 경우에 있어서 저자들이 제안한 식 (1), (2)의 타당성을 검

토하였다. 균열관통후 첫째영역에서의 균열성장량 Δa_{ba} 과 둘째 영역에서의 균열성장량 Δa_{bb} 의 실험치와 계산치를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서 첫째영역에서의 균열성장량 Δa_{ba} 는 초기 표면 균열길이(0.47 $\langle a/W \rangle$)가 길어짐에 따라서 실험치가 약간 길어지는 경향을 나타내고 있다. 그러나, 둘째 영역에서의 균열성장량 Δa_{bb} 는 실험치와 계산치 어느 쪽도 좋은 일치를 나타내고 있다. 이것에 의하여 저자들이 제안한 식(1), (2)은 초기 표면 균열길이 긴 경우에도 관통후의 균열전파량을 정량적으로 평가할 수 있으리라 생각되어 진다.

앞면에서의 피로균열이 성장하여 뒷면에 관통하기까지의 반복수(N_L)와 균열이 관통하고 나서 뒷면의 균열길이가 15mm(AL-1, 2, 3) 및 30mm(AL-4, 5)에 달하기까지의 하중반복수(N_{ab})의 실험치와 계산치를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 피로균열 관통수명(N_L)은 실험치와 계산치가 좋은 일치를 보이고 있다. 한편 N_{ab} 에 대하여도 전체적으로 양자가 좋은 일치를 보이고 있다고 말할 수 있다. 이것으로부터 저자들이 제안한 균열관통후의 응력확대계수평가식 (1), (2)와 피로균열전파법칙 식(3)을 사용하여 비교적 초기 표면균열이 긴 표면균열재의 피로수명과 균열관통 거동을 정량적으로 평가할 수 있다고 생각되어 진다.

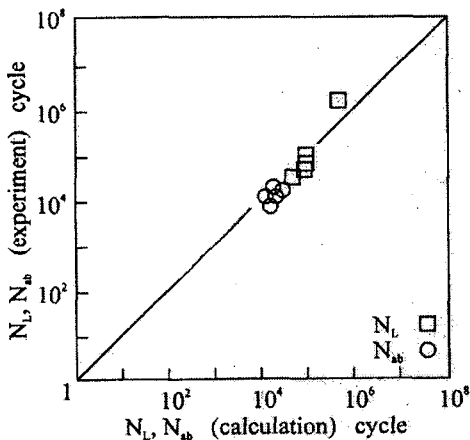


Fig. 11. Comparison of experimental with calculated values of N_L and N_{ab} .

4. 결 론

알루미늄합금(A5083)을 사용하여, 표면균열시

험편의 피로수명과 균열관통후의 거동을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 피로균열진전 형상은 초기 표면균열 길이가 길어짐에 따라서 편평화하고, 거의 타원의 일부를 이루었다. 그리고, 초기 표면균열 길이가 짧은 경우는 계산의 결과와 차이를 보였으나, 긴 경우는 좋은 일치를 보여 주었다.
- 2) 균열관통후 뒷면에서의 피로균열 성장거동은 초기 표면균열길이에 관계없이 반원형노치를 갖는 모든 시험편과 유사한 경향을 보이고, 3영역으로 나누어졌다.
- 3) 표면균열길이에 관계없이 균열관통 후의 응력확대계수 평가식과 피로균열전파법칙을 사용함으로써 표면균열재의 판두께 관통후의 특이한 피로 균열 전파특성을 정량적으로 평가될 수 있음을 알았다.

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. L.Hodulak, H.Kordisch, S.Kunzelmann and E.Sommer, "Growth of Part-through Cracks," *ASTM STP 677*, 399-410(1979).
4. B.Ruttenauer, W.Setz and L.Grueter, "Further Considerations on the Development of Surface Cracks under Stable Crack Extension," *Z.Werkstofftech*, Vol.14, 41-44(1983).
5. M.D.Gilchrist, M.I.Chipalo and R.A.Smith, "Shape Development of Surface Defects in Tension Fatigued Finite Thickness Plates." *Int.J.Press.Piping*, Vol.49, 121-137(1992).
6. K.Ando, S.Fujibayashi, K.W.Nam, M.Takahashi and N.Ogura, "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. 남 기우, "고장력강의 피로수명과 균열관통 거동에 관한 연구." *대한기계학회논문집*, 제 5권 제6호, 1990-2001(1991).
8. K.W.Nam, S.Fujibayashi, K.Ando and N.Ogura, "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. K.W.Nam, K.Ando, N.Ogura and K.Matui, "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).
10. 남기우, "인장 굽힘피로를 받는 부재의 피로 수명과 균열관통." *한국해양공학회지*, 제8권 제1호, 41-49(1994).
11. K.W.Nam, K.Ando and N.Ogura, "The Effect of Specimen Size on the Behaviour of Penetration Fatigue Cracks." *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.16, 767-779(1993).
12. K.W.Nam, K.Ando, Y.Sakai and N.Ogura, "Leak-Before-Break Conditions of Plates and Pipes under High Fatigue Stresses." *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 15, 809-824(1992).
13. 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條件に関する研究(第3報貫通前後の亀裂周邊の變形狀態)," *日本高壓力技術*, 第27巻 第1號, 41-48(1989).
14. J.C.Newman, Jr and I.S.Raju, An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack. *Engng. Fract. Mech.* Vol. 15, 185-192(1981).