

응력집중의 영향을 고려한 알루미늄합금 A5083-O의 피로균열전파 특성 예측모델

조상명* · 김종호** · 김영식***

A Model Estimating the Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloy A5083-O Considering the Effect of Stress Concentration

Sang-Myung, Cho*, Jong-Ho, Kim** and Young-Sik, Kim***

Key Words : Fail safe design(파괴안전설계), Leak before break(과단 전 누설), A5083-O, Eccentric plate(편심판), Aspect ratio(형상비), Fatigue crack(피로균열), Stress concentration(응력집중), Surface crack(표면균열), Weld toe(용접토우부)

Abstract

In this study the fatigue crack growth behavior was investigated for the surface cracks in aluminum alloy A5083-O plate and its weldment. Several kinds of specimens were tested at room temperature. The Eccentric specimens(E1.0, E2.5) subjected to combined stresses(tension+bending) were tested and the welded specimens with weld toes(TOE1, TOE2) were tested in order to verify the method to consider the stress concentration such as weld toe. It was ascertained that the surface crack growth property in the weld toe could be predicted by the corrected Pang's equation proposed in this study.

1. 서 론

파괴안전설계(Fail safe design)와 과단전 누설(Leak before break)의 관점에서 압력용기를 설계하거나 안전성을 평가하고자 할 경우 사용 재료와 그 용접부의 피로균열전파거동을 예측하는 것이 필요하다^{1,2)}. 즉 압력용기의 제작 당시 검사를 통하여

발견되지 못한 결함 또는 정기적인 검사를 통하여 발견된 결함이 예상 수명동안 용기의 벽을 관통하는 지에 대한 해석과 관통 시의 균열형상변화 등을 설계단계에서 미리 평가할 필요가 있다. 이 경우 Fig.1(a)와 같이 평판에 존재하는 표면균열의 전파거동은 많은 연구³⁻⁵⁾에 의해 밝혀져 있으며 또 Newman-Raju⁶⁻⁸⁾가 제안한 응력확대계수를 적용하면 일반적인 해를 얻을 수 있다. 그러나 Fig.1(b)와 같이 응력집중이 존재하는 용접토우부에 존재하는 표면균열의

* 정희원, 부산공업대학 생산가공학과

** 정희원, 한국선급

*** 정희원, 한국해양대학교 해양재료공학과

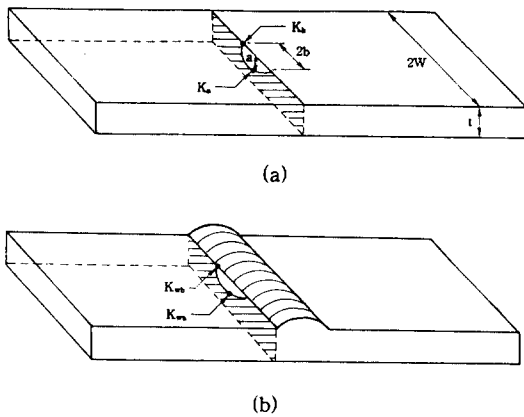


Fig. 1 Configuration of surface crack

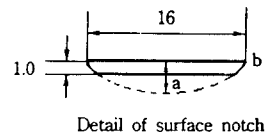
전과거동을 합리적으로 평가하는 것은 쉽지 않다. H. L.J.Pang⁹⁾은 필릿용접부 토우에 존재하는 표면균열에 대한 응력확대계수식을 상기 Newman-Raju의 수치해석을 기초로 하여 유도한 수치해석해를 발표했으나, 직접적인 실험을 통하여 그 유효성을 입증한 실적도 없고 또 Fig.1(b)와 같은 맞대기 용접이음부에는 직접 적용하는 것은 어렵다.

이상의 관점에서 본 연구에서는 압력용기의 제작 당시 비파괴검사를 통하여 발견되지 못한 초기 표면결함이 용기벽을 관통할 때의 형상변화와 표면결함의 전파특성을 유한요소해석과 표면균열의 전파시험을 통하여 검토하였다. 특히 용접토우부와 같은 응력집중부에서 성장하는 표면균열에 대한 응력확대계수식을 산정하고, 표면균열전파시험을 통하여 이 산식에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에서는 Mg계열의 알루미늄합금인 A5083-0를 시험재로 사용하였다. 시험편의 기본형상은 Fig. 2 (a)~(f)와 같이 평판(FP), 편심판(E1.0, E2.5) 및 용접토우를 가진 판(TOE1, TOE2)으로 구분하고, 표면균열전파시험은 Table 1과 같이 7종류의 시험편에 대해서 응력비 $R=0.5$ 인 조건으로 실온의 대기 중에서 수행하였다.

시험편 TOE 1 및 TOE 2는 용접비이드를 갖는 시험편으로서 백킹바를 사용하여 편면MIG용접을 수직상진자세로 실시하여 시험편을 제작한 후 백킹바가 붙은 뒷면만을 절삭해낸 후 두께를 10mm로



Detail of surface notch

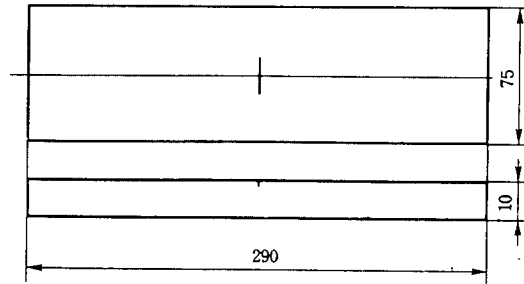


Fig. 2(a) Surface crack specimen(Base Metal)

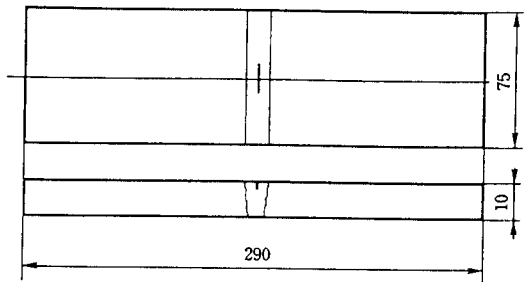
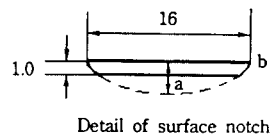


Fig. 2(b) Surface crack specimen(Weld Metal)



Detail of surface notch

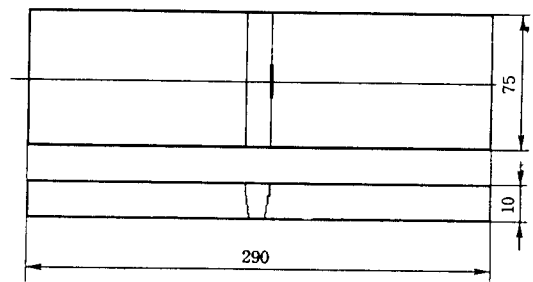


Fig. 2(c) Surface crack specimen(HAZ)

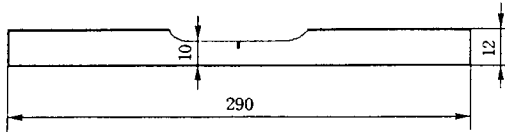
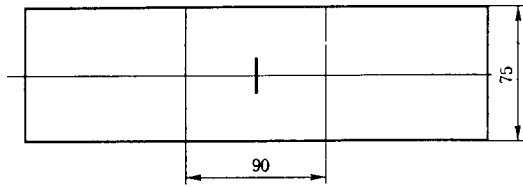


Fig. 2(d) Surface crack specimen(E1.0)

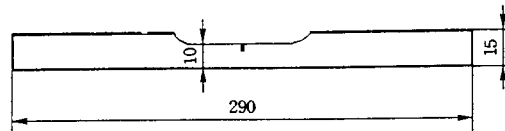
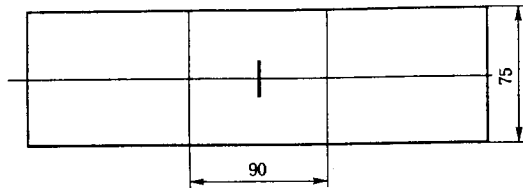
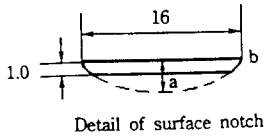


Fig. 2(e) Surface crack specimen(E2.5)

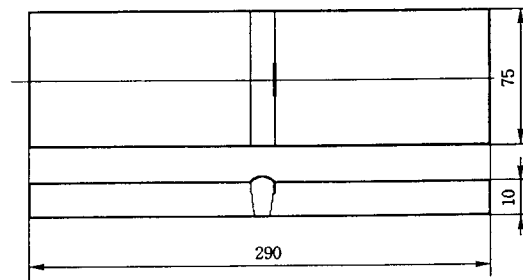


Fig. 2(f) Surface crack specimen(TOE1, TOE2)

가공하였다. 따라서 TOE 1의 경우에는 용접한 그대로의 상태에서 표면균열이 국부적 응력집중부인

용접토우부를 따라서 성장하게 된다. 또 TOE 2는 용접토우부를 드레싱(dressing)하여 토우부의 플랭크 각(flank angle)을 크게 하고 국부적 곡률반경을 크게 하여 응력집중계수를 감소시킨 시험편이다.

모든 시험편에는 깊이 1mm, 표면길이 16mm인 표면결함을 방전가공하여 넣었다. 또한 균열의 길이 측정을 쉽게 하기 위하여 시험편의 앞면과 뒷면은 사포로 가공한 후 연마가공하였다. 또한 시험편의

Table 1. SPECIMENS & REMARKS

STRESS STATE	SPECIMEN		REMARKS
	FLAT PLATE	FP(BM) FP(HAZ) FP(WM)	
TENSION STRESS ONLY	FLAT PLATE	FP(BM)	CRACK IN BM
		FP(HAZ)	CRACK IN HAZ
		FP(WM)	CRACK IN WM
TENSION+ BENDING	ECCENTRIC PLATE	E1.0	LOW BENDING STRESS
		E2.5	HIGH BENDING STRESS
LOCAL STRESS CONCENTRATION	WELD TOE	TOE1	Kt=1.7
		TOE2	Kt=1.2

표면에서의 균열길이 b(crack length on surface)는 이동식 현미경을 활용하여 측정하였고 깊이방향의 균열깊이 a (crack depth)는 비이치마크 기법(beach mark method)를 이용하여 파면상에서 버어니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면균열의 형상변화 관찰

Photo 1은 각종 시험편에 있어서 반복응력에 의하여 반타원형의 피로균열이 전파한 후 파단된 파면을 나타내고 있다.

Photo 1(a)~(d)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 평판인 FP시험편에서는 재질이 모재, 용접금속, 및 열영향부등으로 바뀌어도 표면균열의 형상변화는 거의 차이가 없이 성장하였다. 그러나 Photo 1(e)~(f)와 같이 편심으로 인하여 굽힘응력이 함께 작용하는 경우는 앞면의 인장의 굽힘응력으로 인하여 앞면쪽 표면길이 b가 균열깊이 a에 비하여 많이 성장함을 알 수 있다.

한편, Photo 1(g), (h)와 같이 용접토우부에서 균열이 성장하는 경우는 토우부의 국부적 응력집중으로 인하여 표면쪽의 길이 b가 상당히 커져서 표면균열의

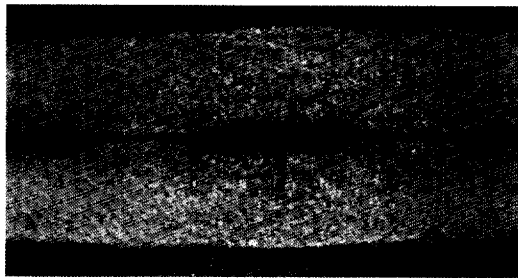


Photo. 1(a) FP(WM)



Photo. 1(b) FP(BM)



Photo. 1(c) HAZ

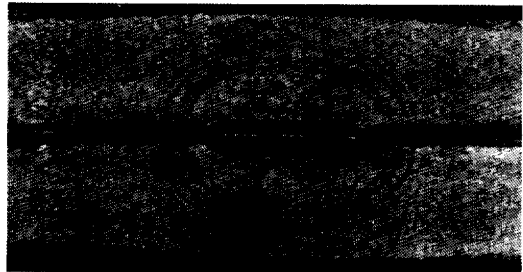


Photo. 1(d) HAZ



Photo. 1(e) E1.0

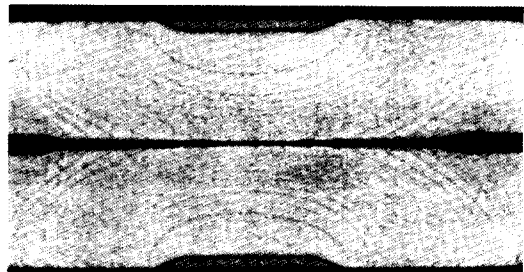


Photo. 1(f) E2.5

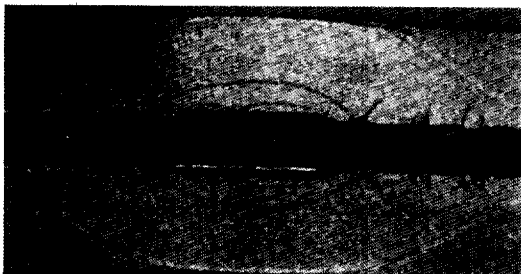


Photo. 1(g) TOE1-a

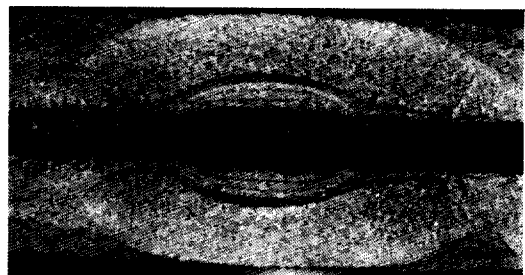


Photo. 1(h) TOE1-b

Photo 1 Beach marks on various specimens

전파에 대한 표면방향의 구동력인 응력확대계수범위 (ΔK_s)에 미치는 용접토우부 응력집중의 영향을 엿볼 수 있다.

이와 같은 표면균열의 형상변화는 근본적으로 반복하중에 의한 표면방향의 구동력인 응력확대계수

범위 ΔK_s 와 깊이방향의 구동력인 응력확대계수범위 ΔK_d 가 어떤 비율로 작용하며, 이 값들이 어떻게 작용하는가에 따라 좌우되는 것이다. 따라서 표면균열의 형상변화는 결국 다음절에서 다루는 응력확대계수문제로 귀착된다고 할 수 있다.

3.2 평판 및 편심판의 표면균열에 대한 응력확대계수와 형상변화

평판인 FP 시험편과 편심판인 E1.0, E2.5 시험편에 대한 응력확대계수는 Newman-Raju의 해를 활용하면 비교적 간단하게 계산된다. 즉 평판은 굽힘응력이 0인 상태로 해석하면 표면방향의 ΔK_b 와 깊이방향의 ΔK_a 가 계산된다.

Fig.3은 평판인 FP 시험편에 있어서 표면균열의 형상변화를 a/t 에 대한 a/b 의 관계를 이용하여 표시한 것이다. 실험점들은 모재와 용접부의 실험 결과도 함께 나타낸 것으로서 모재와 용접부의 표면 균열 성장에 따른 균열의 형상은 모재와 용접부가 모두 같은 것을 확인할 수 있었다.

Fig.3 중에서 점선은 실험결과를 2차 회귀분석한 결과를 나타낸다. 또한 실선은 Newman-Raju가 제안한 식(1)같은 방식에 의하여 표면길이의 증분 Δa 에 대한 깊이의 증분 Δ_b 를 추정하여 더하여 감으로서 표면균열의 형상변화를 추정한 것이다.

$$\Delta a = \left(\frac{\Delta K_A}{0.9 \Delta K_B} \right)^m \Delta b \quad (1)$$

여기서 형상변화를 추정하기 위하여 필요한 초기 자료는 초기균열과 응력조건 및 재료상수인 m (직선부 기울기)등이다. 이와 같이 추정된 실선을 보면 거의 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서

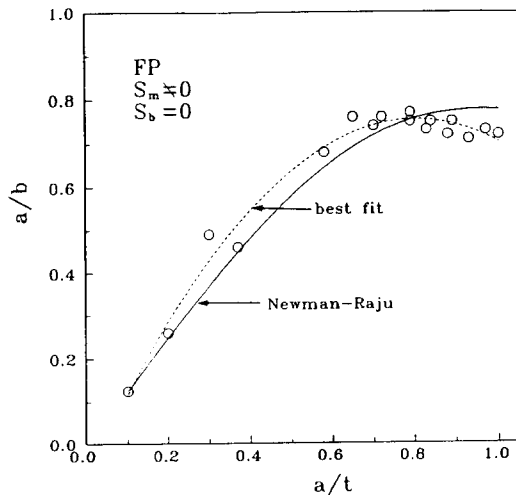


Fig. 3 Variation of aspect ratio in FP

이러한 해석기술 즉 평판에 대한 Newman-Raju의 해와 식(1)의 기법을 적용하면 응력집중부가 없는 평판에 존재하는 초기결합의 전파에 따른 형상변화를 미리 파악할 수 있다. 동시에 균열의 구동력인 ΔK_b 및 ΔK_a 를 설계단계에서 해석할 수 있기 때문에 균열전파속도와 관통수명을 해석할 수 있다.

Fig.4 (a), (b)는 편심판 E1.0와 E2.5의 표면균열전파에 따른 형상변화를 나타낸 것이다. 여기서도 점선은 2차 회귀분석에 의하여 나타낸 것이며, 실선은 Newman-Raju의 해와 식(1)에 따라 표시한 것이다. 시험편에 편심이 주어졌기 때문에 상당한 면외굽힘

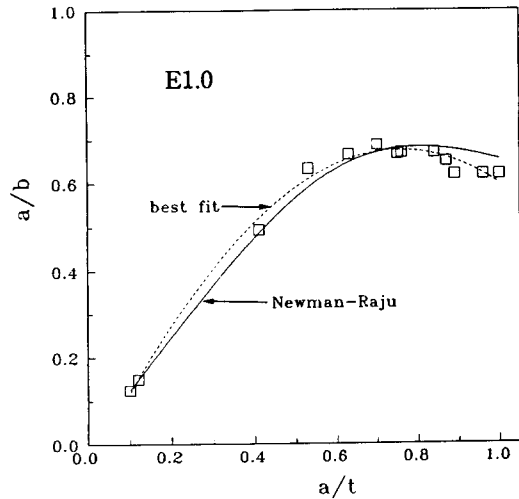


Fig. 4(a) Variation of aspect ratio in E1.0

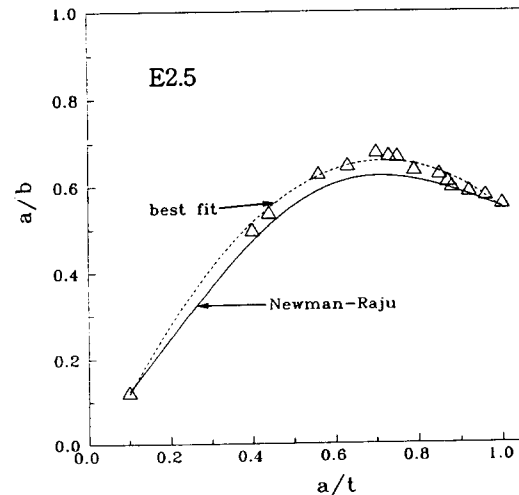


Fig. 4(b) Variation of aspect ratio in E2.5

응력이 발생하게 되고 이로 인하여 전체적으로 평판인 FP시험편보다 아랫쪽으로 곡선이 휘어져 있다. 즉 a/b의 값이 작아져서 깊이 a에 비하여 표면길이 b가 크게 됨을 알 수 있고, 또 이것은 Photo 1과 Fig.5를 통하여서도 알 수 있다.

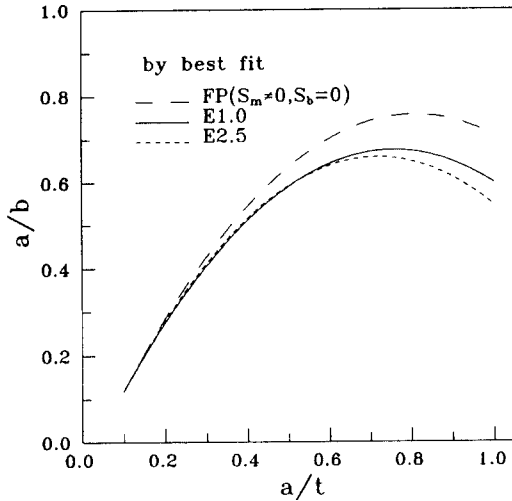


Fig. 5 Variation of aspect ratio in FP, E1.0 & E2.5

3.3. 용접비이드가 존재하는 판에 대한 응력확대계수와 표면균열의 형상변화

응력집중부가 아닌 곳에 표면균열이 존재하고 여기에 인장응력과 굽힘응력이 함께 작용하는 경우라고 하더라도 응력확대계수는 앞절에서 설명한 바와 같이 비교적 용이하게 구할 수가 있다.

그러나 Fig.1(b)와 같이 맞대기 용접비이드의 토우부에 표면균열이 있는 경우 이 균열이 부재의 피로수명과 피로강도에 미치는 영향을 합리적으로 구하기는 쉽지 않다. 이와같이 용접토우부에 표면결함이 있을 때 간단한 평가를 하면서도 안전한 평가를 하기 위한 하나의 방법은 3차원의 표면결함을 전체폭에 걸쳐서 존재하는 것으로 가정하여 2차원 균열로 해석하는 것이다. 따라서 이 경우는 균열의 두께방향 성장속도만을 평가하게 되고 응력확대계수의 해석도 두께방향의 균열에 대해서만 하면 좋다. 실제 3차원의 반타원 표면균열에 대하여 이런 방식으로 2차원 해석을 하면 응력확대계수는 3차원 균열의 깊이방향의 그것보다 큰 값이 얻어진다.

H.L.J.Pang은 필릿용접부 토우부에 있는 표면균열에 대한 응력확대계수의 해석을 행하기 위하여 식(2)와 (3)과 같이 계수를 정의하였다.

$$K_{wa} = M_{ka} K_a \quad (2)$$

$$K_{wb} = M_{kb} K_b \quad (3)$$

단, K_a, K_b : 같은 균열이 평판($K_t=1$)에 존재할 때의 응력확대계수

M_{ka}, M_{kb} : 용접부의 응력집중으로 인해 생기는 응력집중계수와 같은 것으로서 응력집중확대계수(stress concentration magnification factor)

따라서 응력집중이 되는 용접부의 토우부에 존재하는 표면균열에 대해서는 이 M_{ka}, M_{kb} 만 파악하면 응력확대계수 K_{wa}, K_{wb} 가 계산된다.

Pang의 해에 의하면 M_{ka}, M_{kb} 는 각각 식(4)(5)와 같다.

$$M_{ka} = M_k(2D) \quad (4)$$

$$M_{kb} = M_{ka} + M_{k(b-a)} \quad (5)$$

단, $M_{k(b-a)} = 1.15 \exp(-9.74a/t)$, for $a/t \leq 0.15$

$M_{k(b-a)} = 0.267$, for $a/t > 0.15$

Fig.6은 상기 식(4)의 M_{ka} 를 본 연구에서의 시험편에 대하여 구하기 위하여 2차원 유한요소해석한 모델의 일례를 보인다. Fig.6(a)는 토우부에 균열을 가진 모델의 요소분할 예이며 균열은 $a/t=0.05$ 에서 일정 간격으로 성장시키면서 응력확대계수를 해석하여 M_{ka} 를 산출하였다. Fig.6(b)는 실제 구조물에 가까운 경계조건으로 해석한 예이고, Fig.6(c)는 피로시험 상태에 대한 경계조건으로 해석한 예로서 변형량을 확대하여 도시한 것이다. 이와 같은 해석을 통하여 경계조건이 서로 다른 (b)와 (c)에 대한 M_{ka} 의 차이는 그다지 현저하지 않음을 확인하였다.

Fig.7은 상기 유한요소해석결과를 도시하고 이 결과를 근거로 유도한 다음식(6),(7)에 의한 선도와 로이드선급이 채용하고 있는 M_{ka} 에 관한 경향⁽¹⁰⁾을 함께 나타내었다. 유한요소해석결과를 보면 로이드선급의 방법은 상당히 안전한 쪽으로 해석하게 됨을 알 수 있다.

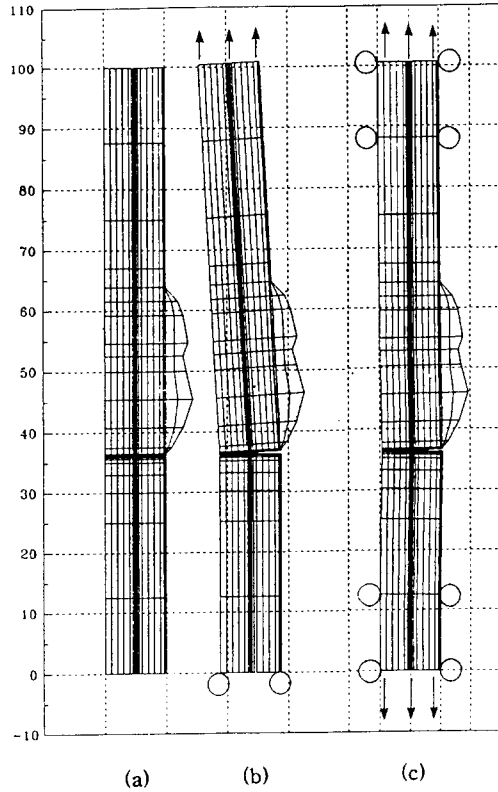


Fig. 6 FEM model(2D) for the calculation of M_{ka} in weld toe

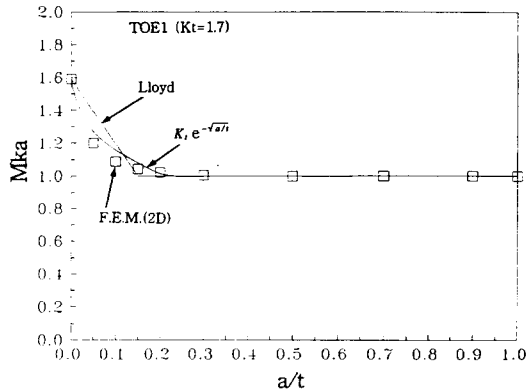


Fig. 7 Variation of M_{ka} according to a/t in weld toe

$$M_{ka} = K_t \exp\left(-\sqrt{\frac{a}{t}}\right) \quad a/t < (\ln K_t)^2 \quad (6)$$

$$M_{ka} = 1.0 \quad a/t \geq (\ln K_t)^2 \quad (7)$$

한편, 위의 식(5)에서 M_{kb} 는 $M_{k(b-a)}$ 만 알면 바로 계산할 수가 있으나, K_t 가 약 1.267이하인 경우가 문제이다. 즉 $M_{k(b-a)}$ 는 a/t 가 0.15이상이면 항상 0.267이 되어 $a/t=0.15$ 에서의 M_{ka} 에 더하게 된다. 따라서 M_{ka} 가 1에 가깝더라도 M_{kb} 는 1.267이상 되어 모순이 생기게 된다.

그래서 본 연구에서는 식(8)과 같은 보정계수 M_{sc} 를 도입하여 이러한 모순을 없애도록 시도하였다.

$$M_{k(b-a)} = 1.15 \exp(-9.74a/t) \cdot M_{sc} \quad (8)$$

단, $M_{sc} = 1.0, \quad K_t > 1.5$

$M_{sc} = 2(K_t - 1) \quad K_t \leq 1.5$

본 연구에서의 TOE2는 $K_t=1.2$ 로서 낮았으며, 실제 압력용기를 용접한 후에 드레싱을 하는 경우가 많으므로 이 경우는 대부분 응력집중계수가 상당히 낮아서 식(8)의 효용성이 높아지리라고 사료된다.

Fig.8 (a), (b)는 응력집중을 받는 TOE1과 TOE2 시험편에 대한 표면균열의 형상변화를 도시한 것이다. 그림에서 파선은 $M_{kb} = K_t$ 로 일정하게 두고 K_{wb} 를 구하고 이에 의하여 응력확대계수범위를 구해서 균열

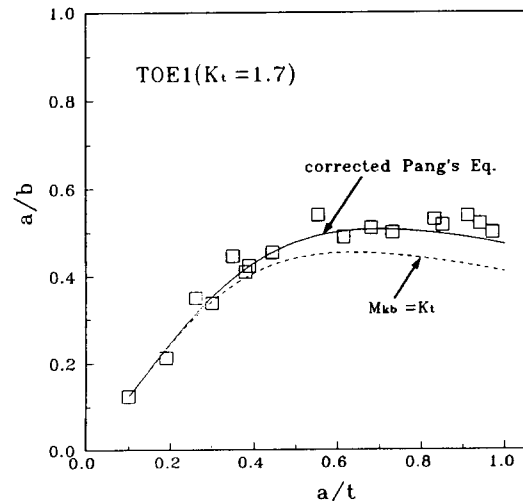


Fig. 8(a) Variation of crack aspect ratio in TOE1($K_t=1.7$)

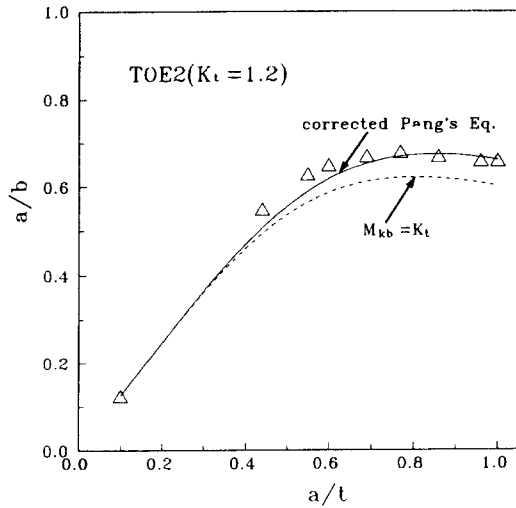


Fig. 8(b) Variation of crack aspect ratio in TOE2($K_t=1.2$)

전파속도를 평가하여 표면균열의 형상변화를 해석하여 도기한 것이다. 또한 실선은 본 연구에서 제안한 식(8)을 식(5)에 대입하여 용접토우부의 표면균열에 대한 응력확대계수를 구하고 이에 의하여 균열의 형상변화를 해석하여 도기한 것이다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 TOE1의 a/b 는 상당히 낮은 상태에서 계속 성장하다가 관통하게 되나 TOE2는 비교적 응력집중계수가 낮으므로 토우부를 따라서 전파하는 표면균열이 그다지 크게 성장하지 않음을 알 수 있다.

Fig.9는 TOE1과 TOE2시험편에 대한 표면균열의

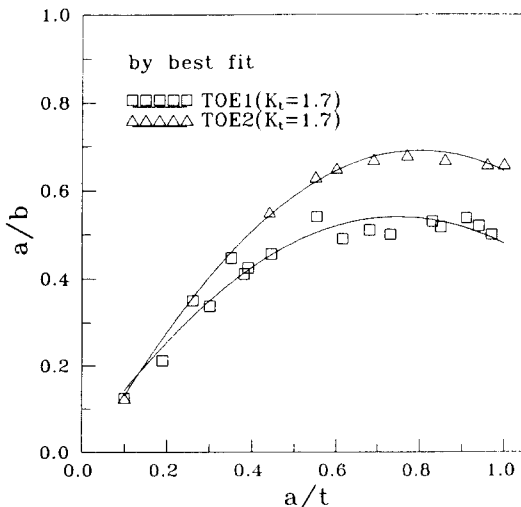


Fig. 9 Variation of crack aspect ratio in TOE1 & TOE2

형상변화를 함께 도기한 것으로서 실험에서 나타난 현상을 상당히 양호하게 재현할 수 있었다.

3.4 표면균열의 전파속도 해석

본 절에서는 본 연구의 피로시험결과를 앞절에서 해석한 각종 표면균열에 대한 응력확대계수범위를 이용하여 $da/dN \sim \Delta K$ 로 정리하고 또 본 연구의 전보¹¹⁾에서 실험을 통하여 확인한 관통균열의 그것과 비교하고자 한다.

Fig.10, Fig.11, Fig.12, Fig.13, Fig.14, 및 Fig.15는 각각 평판인 FT(BM-T)와 FP(HAZ), 편심판인 E1.0, E2.5 그리고 용접토우부가 존재하는 시험편의 토우부를 따라서 균열이 전파하는 경우 즉 TOE1, TOE2에 대한 표면피로균열 전파특성을 도기한 것이다.

각 그림에서 공통적으로 나타낸 작은 기호의 실험점은 3차원 표면균열과의 전파특성비교를 위하여 같은 응력비 $R=0.5$ 에서 CT시험편에 의하여 행한 피로시험 결과로서 2차원 관통균열의 전파특성이라고 할 수 있다. 또한 직선은 2차원 관통균열의 실험점에 대한 대수선형회귀분석한 결과이다.

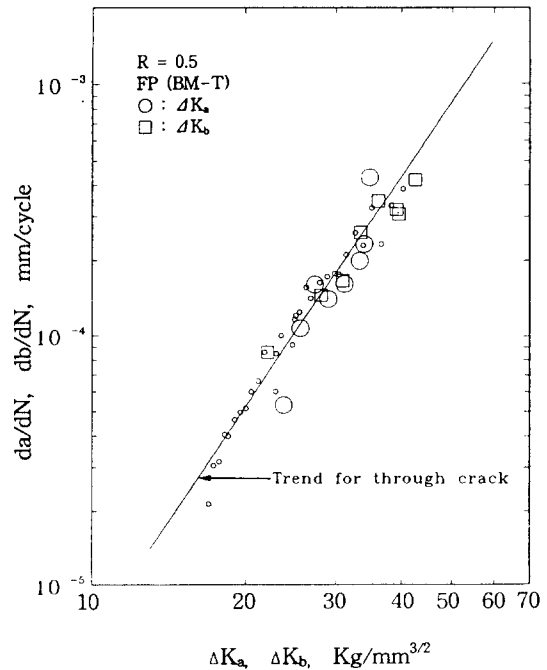


Fig. 10 Surface crack propagation property in flat plate(BM-T)

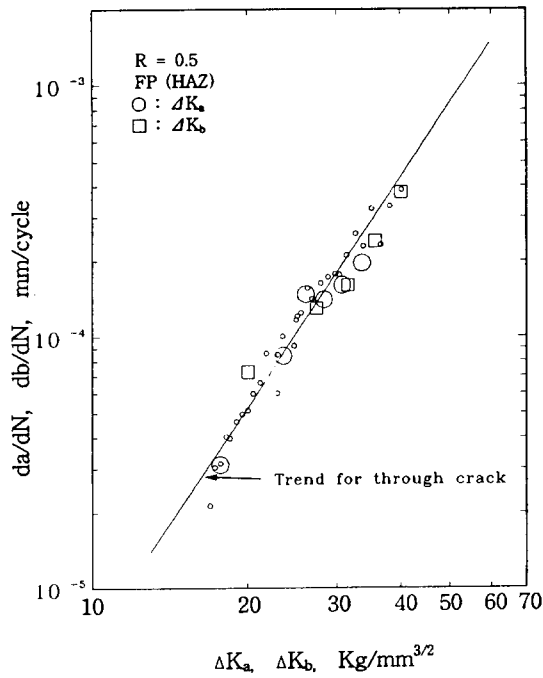


Fig. 11 Surface crack propagation property in flat plate (HAZ)

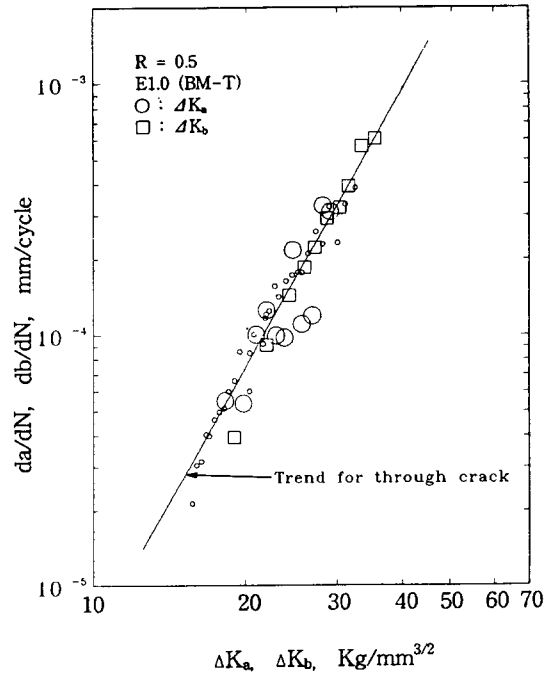


Fig. 12 Surface crack propagation property in E1.0(BM-T)

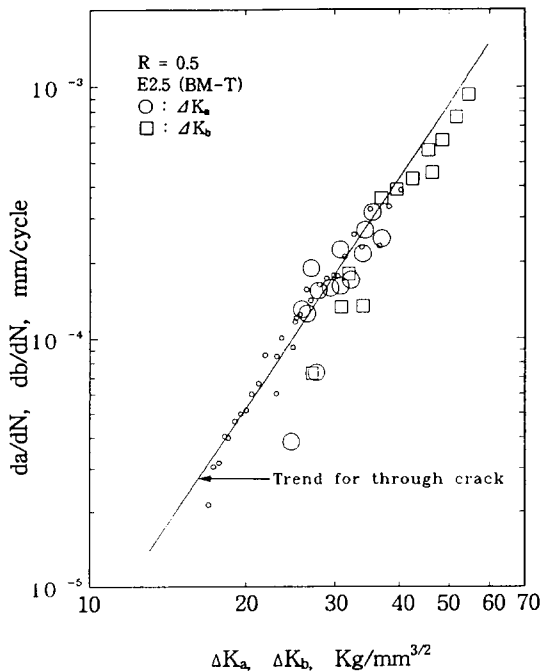


Fig. 13 Surface crack propagation property in E2.5(BM-T)

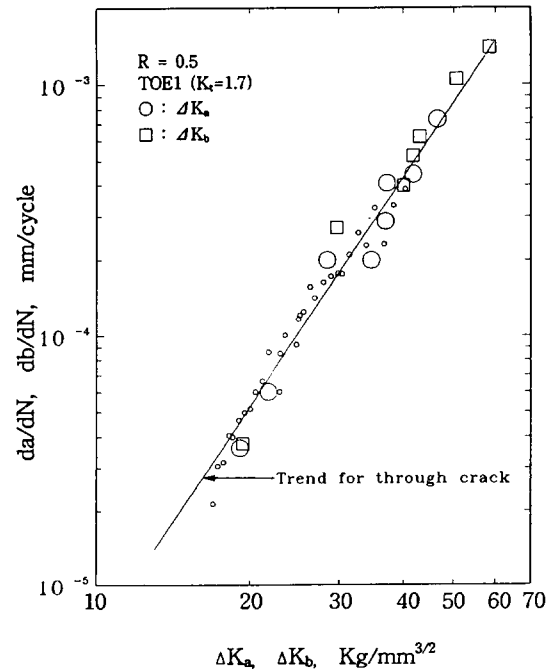


Fig. 14 Surface crack propagation property in TOE(K_t=1.7)

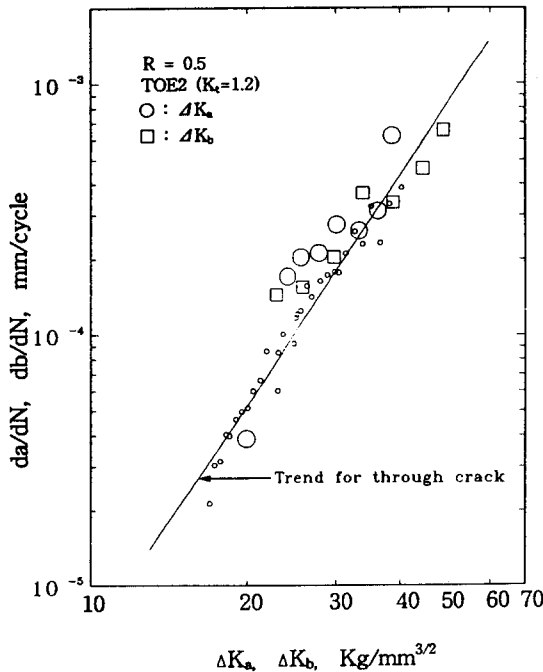


Fig. 15 Surface crack propagation property in TOE2($K_t=1.2$)

여기서 표면균열전파속도는 비이치마크에 의해 나타난 실험결과로서 실제적인 현상을 의미하며, 이에 대한 응력확대계수범위는 그 때의 균열길이와 형상 및 응력범위를 이용하여 앞절에서 기술한 방법으로 해석한 것이다.

전체적으로 실험점이 그다지 많지 않고 비교적 빠른 속도영역에서만 실험점이 있는 것은 깊이방향의 균열길이를 검출하는데는 역시 비이치마크법이 가장 확실하기 때문에 이 방법으로 실험하였기 때문이다. 이와 같이 비이치마크법에 의하여 실험을 할 때는 전파속도를 정상속도의 10~20% 정도로 낮추어서 비이치마크를 새겨넣어야 하므로 전체적으로 정상속도 영역이 위쪽에 치우쳐 있는 것이다.

이상의 그림은 관통균열의 전파특성과 표면균열의 전파특성은 같은 재료이면 모두 동일하여야 한다는 현상을 잘 나타내고 있으므로 본 연구에서 적용하고 또 제안한 응력확대계수범위의 해석방법은 공학적 입장에서 충분한 정도를 가지고 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

- 1) 용접토우부에서 성장하는 표면균열의 형상변화는 응력집중을 고려한 본 연구의 수정 Pang식을 이용하여 양호하게 예측할 수 있었다.
- 2) 본 연구에서 제안한 수정 Pang식과 관통균열의 전파특성을 이용하면 용접토우부와 같은 응력집중부의 표면균열전파속도를 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) (사)한국선급: 선급 및 강선규칙 제7편 5장 액화가스산적운반선, (사)한국선급(1993), pp. 41~42
- 2) H.O.Fuchs, R.I.Stephens: Metal Fatigue in Engineering, John & Sons. Inc.(1980), pp.9~12
- 3) 金澤 武外 1人: 溶接継手の強度, 産報出版(1979), pp.171~172
- 4) 社団法人 日本造船研究協會: LNG運搬船の安全基準に關する調査研究報告書, L-3 疲勞強度, 社団法人 日本造船研究協會(1976), pp.179~180
- 5) Y.S.Lee, M.Raymund: Stress Intensity Factor Solutions for internal Longitudinal Semi-circular Surface Flaws in a Cylinder under arbitrary Loading, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.105 (1983), pp.309~315
- 6) J.C.Newman, L.S. Raju: Analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads, NASA Technical Paper 1578(1979), pp.10~13
- 7) J.C.Newman, L.S.Raju: An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engineering Fracture Mechanics(1981), Vol. 15, No.1-2, pp.185~192
- 8) J.C.Newman, L.S.Raju: Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies, American Society for Testing and Materials(1983), pp.249~250
- 9) H.L.J.Pang: A Review of Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Surface Crack in Plate and Fillet Welded Joint, The Welding Institute, (1990), pp.

- 5~13
- 10) Lloyd Register of Shipping : Moss Rosenberg LNG containment system, An Introduction to the Design Appraisal Procedure, Lloyd's Register of Shipping(1980), pp.9~12
- 11) 김영식, 조상명, 김종호 : 응력비의 영향을 고려한 알루미늄합금 A5083-O의 피로균열전파 특성 예측모델, 대한용접학회(1994), 제12권, 제3호, pp. 82~89