

응력비의 영향을 고려한 알루미늄합금 A5083-O의 피로균열전파 특성 예측모델

조상명*·김중호**·김영식***

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

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

Key words : LNG(액화천연가스), Fail safe design(파괴안전설계), A5083-O, Stress ratio(응력비), Mean stress(평균응력), Fatigue crack growth rate(피로균열전파속도), Through crack(관통균열), Threshold value of stress intensity factor range(하한계응력확대계수범위)

Abstract

In this paper the effect of stress ratio on the fatigue crack growth rate of aluminum alloy A5083-O was examined. The fatigue tests were carried out using CCT (center cracked tension) specimens and CT(compact tension) specimens which were subjected to 0.5 and -1.0 stress ratio respectively. The obtained results are as follows :

- 1) The ΔK_{th} as the function of stress ratio R was introduced in evaluating the fatigue crack growth rate of A5083-O.
- 2) A new model evaluating the effect of stress ratio on the fatigue crack growth rate was developed over the region of low and high propagation rate.

* 정회원, 부산공업대학교 생산가공학과

** 정회원, 한국선급

*** 정회원, 한국해양대학교 해양재료공학과

1. 서 론

파괴안전설계(Fail safe design) 또는 파단전 누설(Leak before break)의 관점에서 압력용기를 설계하거나 안전성을 평가하기 위해서는 사용재료와 그 용접부의 피로균열전파거동을 예측하는 것이 필요하다¹⁾. 피로균열의 전파거동은 주로 응력확대계수의 의해서 지배되지만, 응력비의 영향과 균열 전파하한계특성을 고려하지 않을 수 없다. 이에 대한 다수의 연구결과²⁻⁴⁾를 보면 균열전파하한계특성을 ΔK_{th} (응력확대계수하한계범위)로 표현하고 이를 응력비의 함수로 수식화하여 표현하고 있다.

이상의 관점에서 본 연구에서는 액화가스 산적 운반선의 탱크, 경구조선의 외판 등과 같이 경량화, 고강도 및 용접성이 요구되는 구조물에 주로 사용되는 알루미늄합금 A5083-O를 대상으로 하여 응력비의 변화와 이에 영향을 받는 ΔK_{th} 가 피로균열의

전파속도에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 제안하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에서는 Mg계열의 알루미늄합금인 A5083-O를 시험재로 사용하였다.

시험편은 Fig. 1 및 Fig.2와 같이 CT(compact tension) 시험편 및 CCT(centered cracked tension) 시험편의 2종류로 제작하였다. CCT 시험편은 두께 10 mm판의 중앙에 3.0 mm의 드릴구멍을 가공하고 길이 1 mm의 와이어컷 슬릿을 가공하였다.

시험은 실온의 대기중에서 CT 시험편은 응력비 0.5의 조건으로, CCT 시험편은 응력비 -1의 조건으로 각각 수행하였고, 하중의 파형은 정현파로 하였으며 하중속도는 5~40Hz로 조정하였다.

또 피로균열의 성장길이는 이동식현미경으로 0.01mm까지 정밀하게 측정하였다.

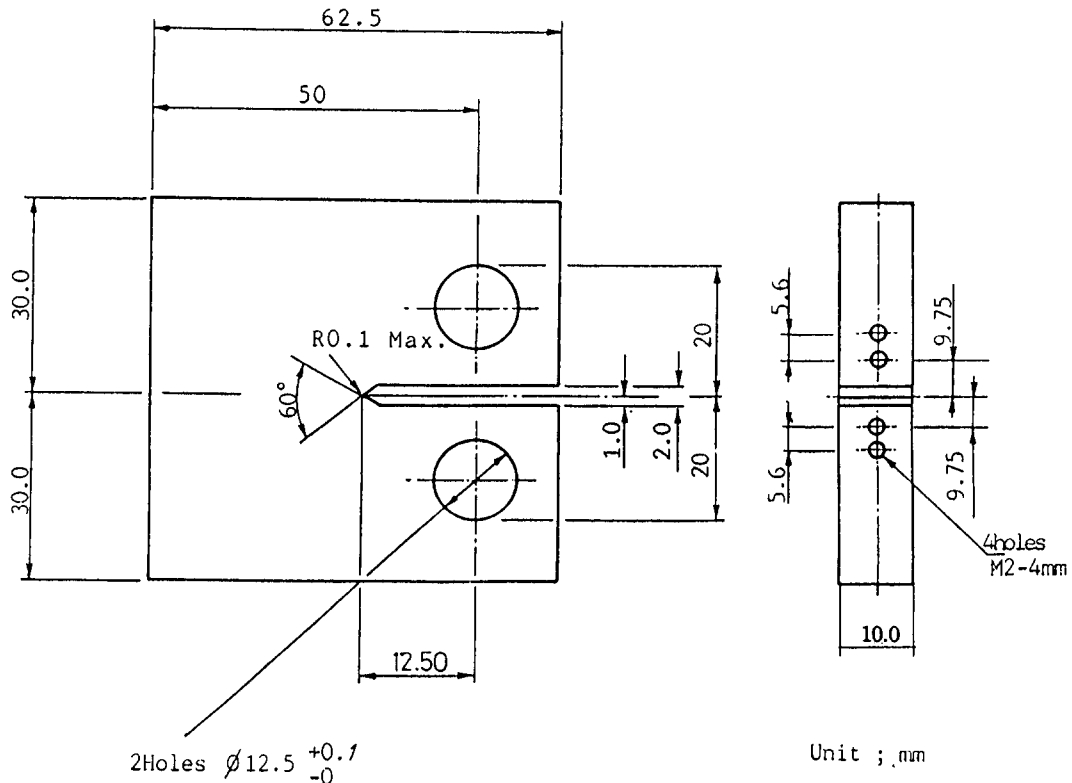


Fig. 1 CT specimen for fatigue crack propagation test

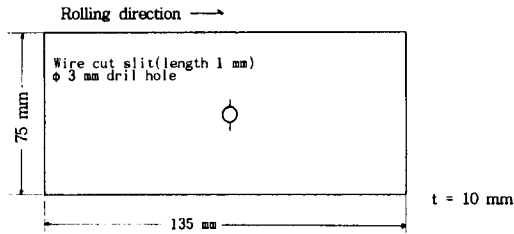


Fig. 2 CCT specimen

3. 평균응력의 영향에 대한 검토와 모델화

3.1 평균응력의 영향에 대한 기존모델의 검토

Elber³⁾는 피로균열전파 특성에 미치는 평균응력의 영향을 검토하기 위하여 응력비 R을 도입하였다. 이 논문에서 Elber는 피로균열이 응력비 R에 의하여 받는 영향을 구체적으로 설명하기 위하여 고강도 알루미늄을 사용하여 피로균열전파시험을 행하였다. 여기서 잘 알려진 피로균열 개폐현상(fatigue crack closure phenomenon)이 밝혀졌고 모델화가 최초로 시도되었다. 이 실험에서 같은 ΔK 일지라도 응력비가 높아지면 피로균열이 빨리 전파하는 이유를 다음의 균열개구비에 의하여 매우 합리적으로 설명하여 식(1)과 같이 지금은 정착된 이론으로 인정되고 있다.

$$\text{균열개구비 } U = (K_{\max} - K_{\text{open}}) / (K_{\max} - K_{\min}) \quad (1)$$

그러나, 이러한 균열개폐현상 자체에 대해서는 널리 인정받고 있지만, 균열개구비 U가 응력비 R에 지배되는 정도에 대해서는 아직도 통일된 방법이 제시되지 못하고 있다. Elber가 제안한 R과 U의 관계는 식(2)와 같다.

$$U = 0.5 + 0.4R \quad (2)$$

이 U는 다시 식(3)과 같은 Paris식에 도입되므로, 결국 응력비 R이 높아지면 균열개구비 U가 커지게 되고 이로 인하여 균열전파속도 da/dN 에 구체적으로 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

$$da/dN = C(U\Delta K)^m \quad (3)$$

Elber의 U산정식은 항공기용 고강도 알루미늄에 있어서 R이 0~0.5의 범위에서는 비교적 좋은 결과를 얻게 되지만, 그 이외의 조건에 대해서는 그다지 타당한 결과를 얻기가 곤란하다.

Foreman은 $da/dN = 1 \times 10^{-3} \text{mm/cycle}$ 전후의 높은 속도영역에서 나타나는 응력비 R의 영향을 고려하기 위하여 식(4)를 제안하였다⁶⁾.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R) K_c - \Delta K} \quad (4)$$

이 식은 피로균열의 전파속도가 비교적 빠른 영역에 한하여 적용성이 좋고 낮은 전파속도 영역, 특히 $1 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ 전후의 전파속도영역으로서 속도가 급격하게 감소하는 근방에 대해서는 적용이 곤란하다.

일본조선연구협회의 第 8 基準研究部會⁷⁾ (이하 SR위원회)와 IIW (International Institute of Welding)의 XIII위원회⁸⁾에서는 평균응력의 영향을 정량적으로 고려하기 위하여 응력비 R을 도입한 식(5)와 같은 식을 적용하였다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \frac{1+R}{1-R} (\Delta K)^m \quad (5)$$

다만, C, m은 R=0일 때의 재료상수이다.

식(5)와 관련된 SR위원회의 피로균열전파시험 결과를 보면 균열전파시험은 피로균열의 전파속도가 $1 \times 10^{-5} \text{mm/cycle}$ 이상인 비교적 높은 전파속도 영역에서만 시험을 하였으므로 실험시 소요시간은 상당히 짧았을 것이지만 낮은 전파속도 영역에서의 피로균열전파거동 및 피로균열의 정류현상등을 고려할 수 없었던 것이다. 따라서 당시에 실험한 범위에서는 식(5)에 의하여 실험결과를 비교적 양호하게 표현할 수 있었던 것으로 판단된다.

飯野등은 평균응력을 고려하기 위하여 R을 도입하여 다음과 같은 Tall의 모델을 이용하여 알루미늄합금 A5083-0에 대한 피로균열전파해석을 시도하였다⁹⁾.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \frac{C}{1-R} (\Delta K)^m \quad (6)$$

Fig.3은 飯野등이 실험하여 상기의 식(6)에 의한

여 정리한 피로균열전파 특성이다. 이 자료는 전체적으로 상당히 빠른 속도로 피로균열이 전파하는 영역에서만 실험을 행하여 도시하고 있다. 그림에서 실험점들 사이의 일점쇄선(R=0.38)과 이점쇄선(R=-1)은 실선(R=0)의 C, m을 이용하여 상기의 식(6)에 의하여 해석하여 나타낸 것이다.

이상과 같이 응력비의 영향을 고려하여 균열전

파속도를 표시한 기존의 연구에서는 피로균열전파 하한계 ΔK_{th} 를 고려하지 않은 식으로 표현하여 사실상 이값을 0으로 간주하고 있다.

3.2 응력비가 ΔK_{th} 에 미치는 영향에 대한 검토

ΔK_{th} 에 대한 기존의 연구에서는 이를 응력비의 함수로 표현하고 있다. 즉 M. Kanao 등은 ΔK_{th} 자체에 미치는 응력비 R의 영향을 검토하여 식(7)과 같은 실험식을 제안하였다²⁾.

$$\Delta K_{th} = (\Delta K_{th})_0 \cdot (1-R)^g \quad (7)$$

단, $(\Delta K_{th})_0$: R=0일 때의 ΔK_{th}
g: 0.6~0.8

Lukas와 Klesnil도 위와 유사한 식(8)을 제안하였다³⁾.

$$\Delta K_{th} = (\Delta K_{th})_0 \cdot (1-R)^r \quad (8)$$

단, $(\Delta K_{th})_0$: R=0일 때의 ΔK_{th}
r: 0.7

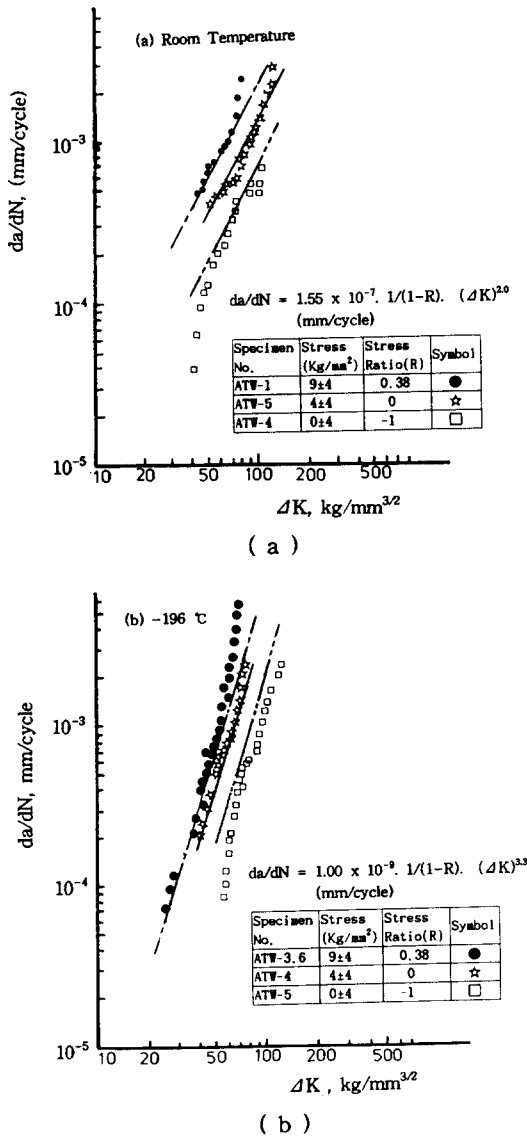


Fig. 3 Evaluation of crack propagation property by using Tall's model(A5083-O)

Fig. 4와 5는 A5083-O에 대한 본 연구의 실험결

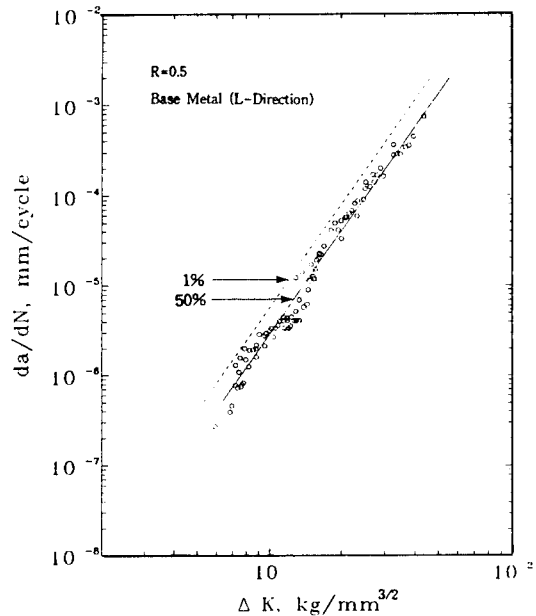


Fig. 4 Relation of ΔK -da/dN for base metal (L-direction)

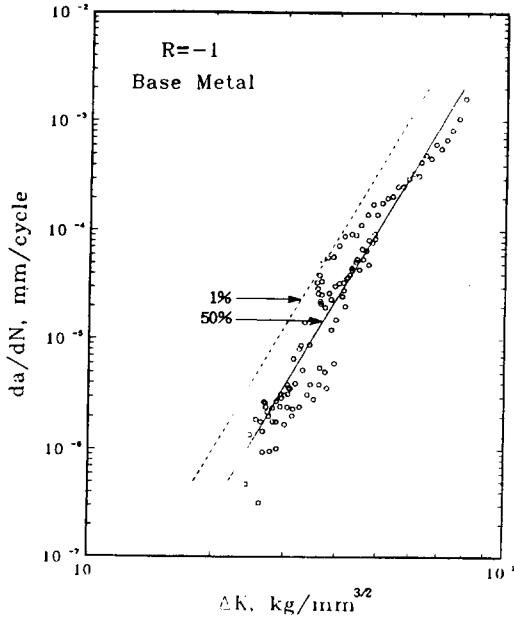


Fig. 5 Relation of ΔK - da/dN for base metal ($R=-1$)

과를 da/dN - Δk 의 관계로 나타낸 것이다. 각 그림에서 실선의 직선은 실험점을 최소자승법으로 통계처리하여 나타낸 50%파괴확률선이며 점선은 표준편차를 고려한 1%파괴확률선이다. 또 Fig.5는 시험재의 압연방향과 압연직각방향에 대한 실험점의 결과를 함께 표시한 것이다. 본 연구의 실험을 통하여 확인한 ΔK_{th} 값을 상기 식(7) 및 식(8)에 대입하여 보면 비교적 양호하게 일치하는 것을 알 수 있다. 한편 宇佐美는 상기 식의 지수에 대한 상세한 검토를 통하여 이 값은 비교적 폭넓은 값을 갖고 하나의 값을 갖지 않는 경향이 있지만 적어도 재료의 종류에 따라서는 그다지 크게 변하지 않음을 확인하였다. 또한 하나의 값 예를들어 $g=0.7$ 을 가지고 다양한 R 에 대하여 적용하면 통상은 안전한 측의 예측이 됨을 밝힌 바 있다⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 상기 식(7)을 사용하여 ΔK_{th} 에 미치는 응력비의 영향을 평가하고 지수 g 는 0.7을 사용하기로 하였다.

3.3 응력비의 영향에 대한 본 연구의 모델화

응력비가 피로균열전파속도에 미치는 영향을 모

델화하기 위하여 먼저 ΔK_{th} 를 고려하지 않고 전과 거동을 표현한 기존의 모델식에 ΔK_{th} 를 고려하여 본 연구의 실험결과를 정리하여 비교하였다.

前述한 SR위원회가 제안한 식(5)에 ΔK_{th} 를 고려해서 피로균열전파속도를 표현하면 식(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \frac{1+R}{1-R} (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (9)$$

Fig.6은 본 연구의 실험결과를 상기 식(9)와 비교한 것으로서 그림 중의 실험점은 본 연구의 실험결과이다. 응력비 $R=0$ 와 $R=0.5$ 에서 상기 식(9)는 본 연구의 실험결과를 비교적 양호하게 표현하고 있다. 그러나 $R=-1$ 의 경우는 식(9)의 분자가 0으로 되어 적용이 불가능하다. 즉 SR위원회가 채용한 평균응력의 고려방법은 근본적으로 $R=-1$ 에 대한 조건 즉 평균응력이 존재하지 않고 응력진폭만이 작용하는 경우에는 적용할 수 없다.

또한 前述한 飯野 등이 A5083-O에 대하여 실험한 결과를 정리하기 위하여 사용한 Tall의 모델에 ΔK_{th} 를 고려하면 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

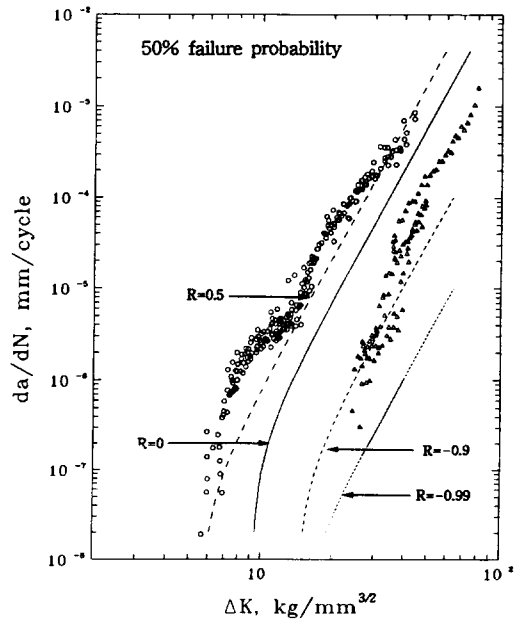


Fig. 6 Estimation of crack propagation property by model of SR committee

$$\frac{da}{dN} = \frac{C}{1-R} (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (10)$$

Fig.7은 Tall의 모델에 ΔK_{th} 를 고려하여 피로균열전파속도를 응력비 $R=0.5, 0, -1$ 으로 표현한 것으로서 그림 중의 실험점은 본 연구의 실험결과이다. 균열의 전파속도가 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{mm/cycle}$ 정도로 상당히 빠를 때, 상기 식(10)은 본 연구의 실험결과를 양호하게 표현할 수 있다. 이것은 飯野등이 식(6)을 이용하여 피로균열전파 해석한 경우와 유사한 특징을 보인다. 그러나 낮은 ΔK 영역으로 내려가면 실험점과 해석에 의해 추정된 곡선들은 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 일반적으로 높은 균열전파속도 영역에서는 응력비의 영향이 작게 나타나지만, 낮은 균열전파속도 영역에서는 응력비의 영향이 두드러지는 것과 동일한 현상이 여기서도 알 수 있다.

한편 지금까지 검토한 피로균열전파속도에 미치는 응력비의 영향을 보면 $R=-1$ 일 때는 $R=0.5$ 일 때보다는 기울기 m 이 커지는 반면에 계수 C 는 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 R 의 변화에 따라서 연속적으로 변하게 되므로 직선부의 기울기 m 과 R 은 다음의 관계가 있는 것으로 가정하

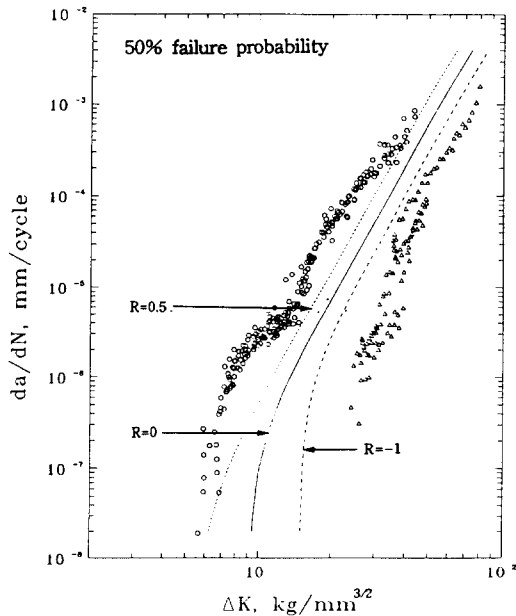


Fig. 7 Estimation of crack propagation property by the revised Tall's model

였다.

$$m = A \cdot R + B \quad (11)$$

단, A, B : 재료상수(실험에 의하여 결정)

또 직선부의 기울기 m 과 계수 C 의 관계는 SR위원회가 제안한 식(12)를 사용하였다.

$$\log(C) = \eta \cdot m + \xi \quad (12)$$

단, η, ξ : 재료상수(실험에 의하여 결정)

Fig.8은 상기 식(12)의 타당성을 검토하기 위하여 SR위원회가 스테인리스강과 36%Ni강에 대하여 m 과 C 를 피로균열전파시험으로 부터 구하여 편대수좌표에 도시한 것이다.

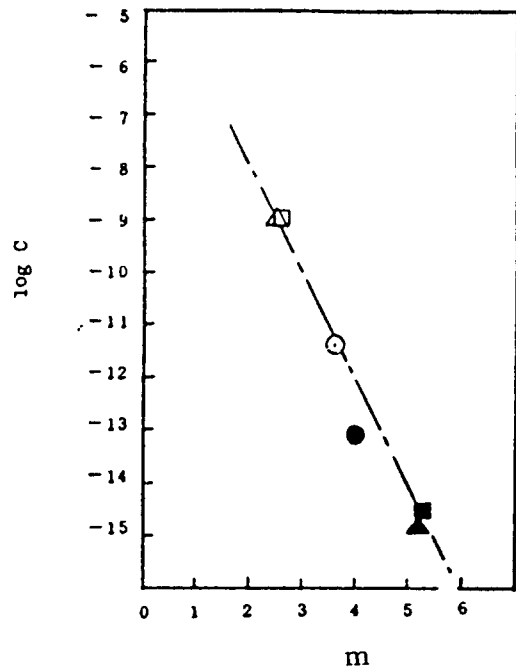


Fig. 8 Relation of m - C by SR Committee

- SUS304L, $t=1.2$, R.T.
- SUS304L, $t=1.2$, -196°C
- △ 36% Ni steel, $t=1.5$, R.T.
- ▲ 36% Ni steel, $t=1.5$, R.T.
- 36% Ni steel, $t=1.5$, R.T.
- 36% Ni steel, $t=0.5$, -196°C

Fig.9는 T.Okumura등이 용접구조용 강에 대하여 광범위하게 조사한 m과 C의 관계를 나타낸 것이다.⁹⁾

Fig.8과 9의 실험점들을 보면 m과 C의 관계는 역사 위의 식(12)과 같이 직선으로 주어질 수 있음을 알 수 있다.

이상의 검토를 통하여 본 연구에서는 식(13)을 사용하여 피로균열전파속도에 미치는 응력비 R의 영향을 보다 합리적으로 평가하는 식(13)과 같은 모델을 개발하였다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (13)$$

우선 동일한 재료에 대하여 두 조건이상의 응력비 R에 대한 피로균열전파 시험 결과를 이용하여 식(11) 및 식(12)의 계수 즉 A, B, η, ξ 그리고 식(7)에서 ΔK_{th} 를 구한다. 다음으로 식(11)로 부터 평가하고자 하는 응력비(R)의 값을 대입하여 직선부의 기울기 m을 구한다. 이어서 식(12)를 써서 계수 C를 계산한다. 이렇게 하여 구해진 C와 m을 식(13)에 대입하면 균열전파속도를 계산할 수 있게 된다. 이때 사용하는 ΔK_{th} 는 응력비 R의 영향을

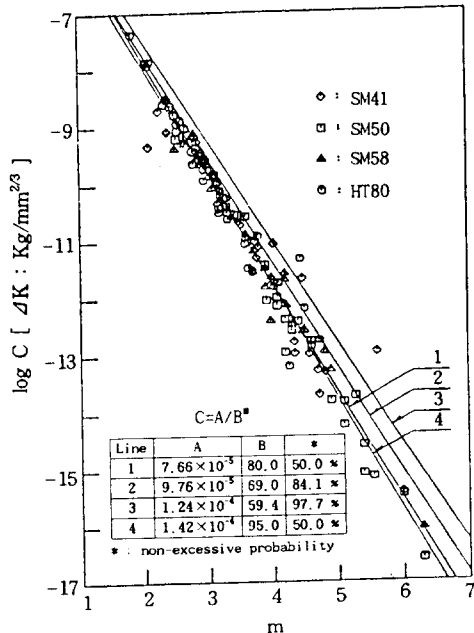


Fig. 9 Relation of m-C by T. Okumura

고려한 식(7)을 통하여 계산된 값을 사용한다.

Fig.10은 이상과 같이 본 연구에서 응력비 R의 영향을 고려하기 위하여 개발한 모델을 사용하여 본 연구의 실험결과를 표현한 것으로서 실험결과에서 얻어진 C, m값은 응력비 R=0.5인 경우 C=2.92E-10, m=3.95, R=-1인 경우 C=4.88E-15, m=6이다. 이 그림에서 보면 높은 전파속도영역이나 낮은 전파속도영역 모두에서 폭넓게 좋은 해석결과를 보이고 있으므로, 응력비 R의 영향을 비교적 합리적으로 고려하여 균열전파수명을 예측할 수 있는 모델이 될 것으로 사료된다.

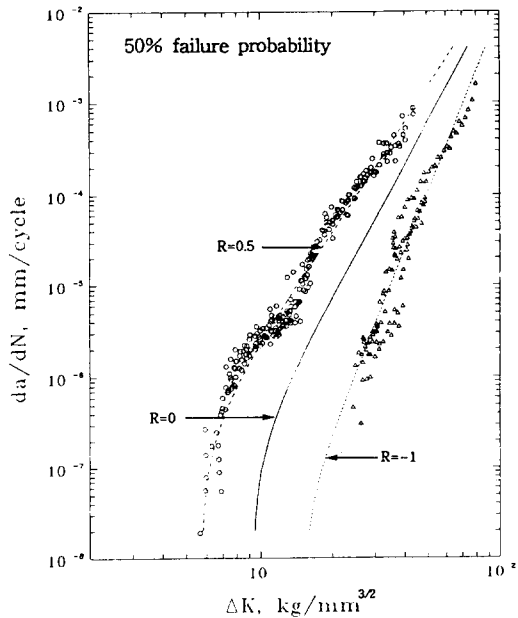


Fig. 10 Estimation of crack propagation property by the present model

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 낮은 전파속도영역에서 알루미늄합금 A5083-O의 피로균열 전파특성에 미치는 응력비의 영향을 평가하기 위하여 ΔK_{th} 를 도입함으로써 낮은 전파속도 영역에서의 특성을 양호하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

2) 피로균열전파속도에 미치는 응력비 R의 영향을 평가하기 위하여 재료상수 C, m 및 ΔK_{th} 를

도입하여 식(13)과 같은 형태의 모델을 개발하였다.

참 고 문 헌

- 1) (사) 한국선급 : 선급 및 강선규칙 제 7편 5장 액화가스산적운반선, (사)한국선급(1993), pp. 41~42
- 2) M. Kanao 外 3名 : Fatigue Crack Propagation Properties and ΔK_{th} for Several Structural Steel Plates, Trans. of NRIM, Japan, Vol. 27, No.2(1985), pp.17~24
- 3) P. Lukas and M. Klesnil : Effect of Stress Cycle Asymmetry of Fatigue Crack Growth, Material, Sci. Eng. Vol.9(1972), pp.231~240
- 4) 宇佐美 : 機械構造物における各種疲労問題の破壊力學による解析手法の開発に関する研究, 博士論文 東京大學(1984), pp.11~12
- 5) W. Elber : The Significance of Fatigue Crack Closure, Annual Meeting of ASTM, Toronto(1970), pp.21~23
- 6) R.G. Foreman 外 2名 : Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structure, J.Basic Eng. Trans. ASME Series D,89(1967), p.459
- 7) 社団法人 日本造船研究協會 : LNG運搬船の安全基準に関する調査研究報告書, L-3 疲労強度, 社団法人 日本造船研究協會(1976), pp.181~195
- 8) R. Nagamoto, M. Matoba, D. Sakai, K. Hashimoto : A Review of Japanese Research into the Fatigue of A5083 Alloy Construction for LNG Spherical Tanks, IIW-XIII-1235-87(1987), pp.1-38
- 9) 飯野 外 3名 : 疲労き裂の進展を考慮した構造物の安全性評価に関する考察, IHI技報, 第15巻4號(1970), pp.459~462
- 10) T. Okumura 外 3名 : Fatigue Crack Growth Rate in Structural Steels, Proc. of JSCE, No.332(1982), pp.175~178