

SA-508 압력용기용강 변후재의 피로균열 Arrest 거동에 대한 변후 형상비의 영향

Effect of Width and Thickness Ratio on the Fatigue Crack Arrest Behavior of
SA-508 Pressure Vessel Steel Variable Thickness Plates.

이 환 우* 이 갑 래* 최 용 식**
H. W. Rhee K. R. Lee Y. S. Choy

ABSTRACT

The purpose of a fatigue crack arrest desing is to prvent a fatigue fracture of machine and structure resulted from unstable crack growth. In all cases of load transfer to second elements such as stringers, doublers or flangers, crack arrest is possible; arrest occuring when the fatigue crack reaches the second element.

In the present work, the possibility of crack arrest and the design criterion of fatigue crack arrest in the variable thickness plates are examined numericaiiy by using fatigue crack arrest thresthod ΔK_m of SA-508 reactor vessel steel and stress intensity factor which was obtained in the previous work as a result of 3-dimensional finite element analysis for CT type variable thickness plates having discontinuous interface.

1. 서 론

피로균열의 Arrest 설계(Fatigue Crack Arrest Fall Safe Design)는, 불안정 균열성장에 의한 파괴파괴를 사전에 예방하고, 기계·구조물의 안전성과 신뢰성 향상에 기여할 수 있는, 효과적인 손상-허용(Damage-Tolerance) 대책으로 인식되고 있으

나, 실험과 해석상의 어려움탓인지 정작피로균열의 Arrest에 관한 연구보고는, Choy^[1~3]를 비롯한 Kitagawa et al.^[4], Sridhar et al.^[5] 및 Schijve^[6]등의 문헌연구나 실험결과들이 단속적으로 발표되고 있을 뿐이며, 피로균열의 Arrest 거동을 정량적으로 평가한 연구결과나 피로균열의 Arrest 설계시 참고가 될만한 안전기준(Safety Guideline) 등에 관한 연구가 거의 없는 실정이다. 따라서 일련의 본 연구에서는 피로균열의 Arrest 가능성을 검토하고 그로부터 파생되는 문제점들을 고찰하여 피로균열의 Ar-

* 正會員 : 경남대학교 기계설계학과

** 正會員 : 성균관대학교 기계공학과

rest 조건을 설정해보기 위하여, CT형 변후 모델의 응력확대계수 (Stress Intensity Factor: SIF)의 해석^[7] 및 검증^[8], 균열성장거동의 수치적인 Simulation 가능성^[9] 등을 기 검토한 바있으며, 본 논문에서는 위에 나열된 저자들의 몇가지 연구결과를 토대로 하여 피로균열의 Arrest 거동에 대한 변후형상비의 영향을 수치해석하고, 제한된 범위내에서나마 변후형 구조물의 파괴방지 대책이나, 보수지침등을 수립할 때 적용 가능한 안전 기준을 설정해 보고자 한다.

2. 피로균열의 Arrest 조건

피로균열의 Arrest 현상은, 「잠재하던 균열이 피로하중이나 SCC (Stress Corrosion Cracking) 등에 의하여 성장을 하다가, 어떤 요인으로 말미암아 균열성장속도(da/dN)가 점차 둔화되어, 궁극적으로 $da/dN \rightarrow 0$ 가 되는 상태」를 지칭하는 균열성장거동의 최종적인 현상으로서, 피로균열의 성장거동이 균열선단 고유의 역학적 특성을 지배하는 SIF K의 변동거동에 전적으로 의존하고, 균열성장 하한계조건으로서 ΔK_{th} (Threshold SIF)가 재료상수임을 전제로 할 때 - 피로균열의 Arrest 조건은 다음과 같이 정의 할 수 있겠다.

$$\Delta K \leq \Delta K_{th} \dots \dots \dots (1)$$

그러나, 균열·균후재내에 존재하는 피로균열의 SIF(Stress Intensity Factor)는 일반적으로 균열성장과 더불어 점차 증가하게 되며, 이에 따라 균열성장속도 da/dN 도 점차 가속되어 $\Delta K \rightarrow \Delta_c$ (ΔK_c : 균열성장 상한계 조건)일때 $da/dN \rightarrow \infty$ 즉, 불안정파괴에 이르게 될 것이므로, 이러한 경우에는 피로균열의 Arrest 가능성을 전혀 기대할 수가 없게 된다. 따라서 ΔK 감소거동에 의한 피로균열의 Arrest 가능성을 실현하기 위해서는, ΔK 의 감소를 유발시킬 수 있는 Arrest Mechanism의 도출과 변후부재의 SIF의 해석 및 설계대상재료의 균열성장 하한조건외의 평가등이 선행되어야 하겠다.

3. 수치해석

3.1 해석대상 모델

K 감소거동이 예상되는 균열거동으로는, 이재결합재^[10] 또는 변후재^[11]를 비롯한 각종 보강판재^[13] 등의 결합경계 및 변후경계 근방에서의 균열성장거동을 예거할 수 있겠으나, 본연구에서는 CT형 유한폭 변후재내에 존재 하는 Model 균열을 해석대상 모델로 선정하였다.

CT형 변후모델의 형상은 -Fig.1에 도시된 바와 같이, 두께가 t_1 이고 판폭이 W_1 인 박판에 두께 t_2 , 판폭 W_2 인 후판을 결합한 형태로서 -두께 t_1 인 박판부에 존재하는 균열이 변후경계를 향하여 성장해가는 Thin-to-Thick형이며, 변후 모델의 두께비 ($\beta = t_2/t_1$)와 판폭비 ($\omega = W_2/W_1$)는 해석목적에 따라 임의의 값으로 설정되었다.

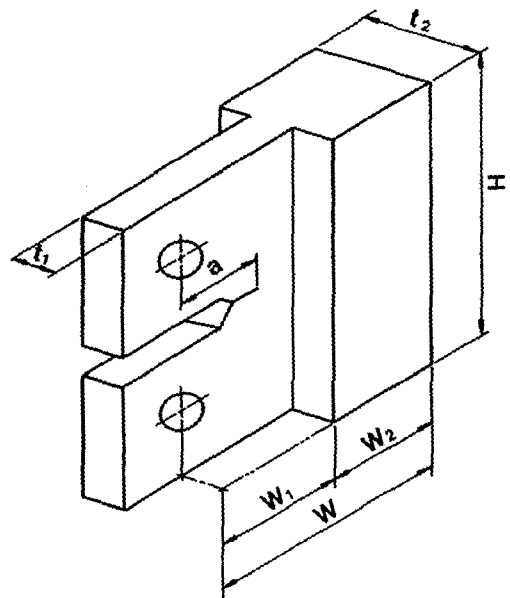


Fig.1 Geometry of CT Type Model having Discontinuous Thickness Interface

3.2 CT형 변후모델의 응력확대계수 해석

본 연구에서는 CT형 변후 Model의 SIF 해석에 관한 전보^{[7][8]}의 해석결과를 활용하였으며 전보에서 수행된 3차원 유한요소 수치해석과정을 개괄하면 다음과 같다.

CT형 변후재의 기본형은 두께가 균일한 CT 표준시험편(ASTM E-647)의 두께방향으로 보강재를 덧붙인 형상으로 생각할 수 있으므로, CT 표준시험편을 3차원 유한요소 수치해석의 Calibration Model로 선정한 다음, 적합한 Mesh Design과 균후 Model의 SIF를 수치해석하고, CT 표준시험편의 K_I 해와 비교하여 설정된 Mesh의 효용성을 검토하였다. 이와 같은 방법으로 효용성이 비교, 검증된 Mesh형을 판폭비와 두께비가 각각 $\omega(=W_2/W_1)$ 와 $\beta(=t_2/t_1)$ 인 CT형 변후 Model에 준용하여 (Fig.2 참조) 변후재의 응력확대계수 K_{IV} 를 CT 표준시험편의 K_I (같은 균열길이에서 두께가 균일한 경우)으로 무차원하여 CT형 변후 Model의 SIF Geometry Factor를 계산한 다음, 그 결과를 무차원 SIF F_{IV} 와 상대균열길이 $\lambda(=a/W_1)$ 의 관계로 정리하여 고찰하고, CT형 변후 Model의 SIF Geometry Factor F_{IV} 를 λ 와 β 의 함수로 정식화하여 다음과 같이 표시하였으며,

$$F_{IV}(\lambda, \beta) = 1 - 1.2065(1 - \frac{1}{\beta}) \cdot \lambda^3 \dots \dots \dots (2)$$

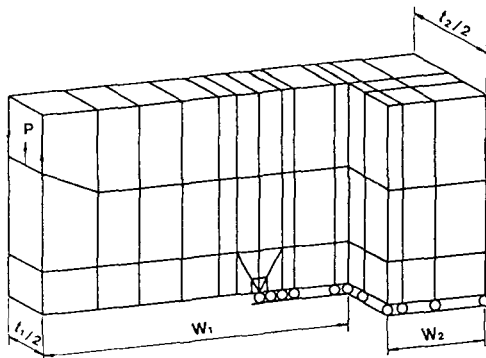


Fig.2 Mesh Design for 3D-FEM Analysis

CT형 변후모델의 응력확대계수 K_{IV} 를 다음과 같이 정의하였다.

$$K_{IV} = \frac{P}{t_1 \sqrt{W}} F_I(\alpha) \cdot F_{IV}(\lambda, \beta) \dots \dots \dots (3)$$

$$F_I(\alpha) = (2 + \alpha)(0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) / (1 - \alpha)^{3/2}$$

식 (3)에서 α 무차원 균열길이 a/W 이고, W 는 CT형 변후 Model의 전폭 『 $W_1 + W_2$ 』이며, $F_I(\alpha)$ 는 CT 표준시험편의 SIF Correction Factor에 판폭비 ω 를 고려한 CT형 변후 Model의 유한폭 수정계수 (Finite Width Correction Factor)이다.

3.3 변후재의 Crack Arrest조건

변후재의 피로균열성장거동은 Fig.3에 도시된 바와 같이 균후재와는 달리 단순 증가형이 아니고, 변후경계에 도달하기 전에 변곡점 (Inflation Point)을 갖으며, 이 변곡점을 지난 다음에는 균열성장속도 (da/dN)의 급 감하는 것으로 알려져 있다.^[13] 또한 이와같은 균열성장속도의 천이거동은 변후형상비에 의존하고, da/dN 의 증·감 천이점은 두께비가 클수록 변후경계의 원방에 위치한다^[7,9]. 따라서 변후재의 두께비와 판폭비 조건을 적절하게 설정할 경우, $da/dN \rightarrow 0$ 즉 식(1)과 같은 피로균열의 Arrest 조건을 만족하는 변후형상을 설계할 수도 있을 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 식(1)에 변후 Model의 SIF K_{IV} 를 고려하여 변후재의 피로균열 Arrest 조건을 식(4)와 같이 표시한 다음,

$$\Delta K_{IV} \leq \Delta K_{th} \dots \dots \dots (4)$$

변후부재내에 존재하는 피로균열이 주어진 하중 조건 (ΔP)하에서 안정성장을 하다가, 변후경계근방 ($\lambda=0.95$)에서 식(4)를 만족할 수 있는 두께비와 판폭비의 임계치를 설정해보기 위하여 식(4)의 ΔK_{IV} 에 식(3)을 도입하여 변후재의 피로균열 Arrest 조건을 식(5)와 같이 재정리 하면 다음과 같다.

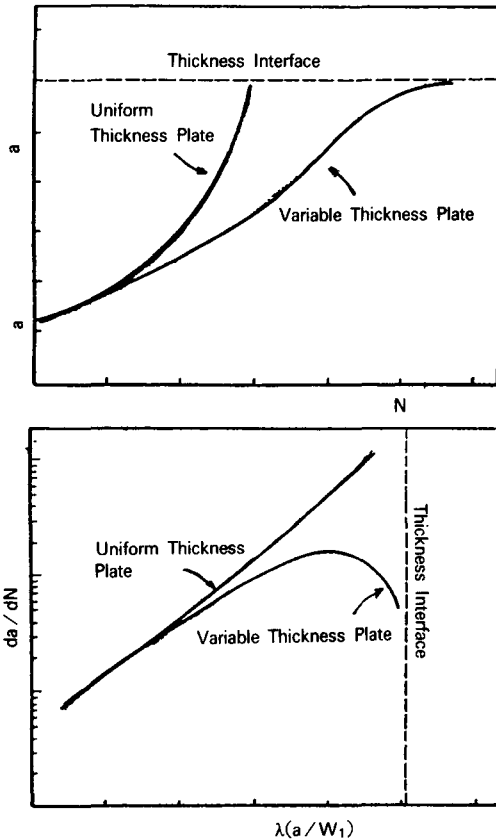


Fig.3 Schematic Representation of Fatigue Crack Growth Behavior for Homogeneous and Variable Thickness Plates

$$\frac{\Delta P}{t_1 W} F_I(\alpha) \cdot F_{IV}(\lambda, \beta) - \Delta K_{th} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

따라서, 식(5)를 만족하는 변후부재의 기하학적 조건 및 Δp 를 구하여 피로균열 Arrest를 실현할 수 있을 것이다.

Table 1. Mechanical Properties of SA-508 Class 3

Temp. (°C)	Yield Strength (Kgf / mm ²)	Tensile Strength (Kgf / mm ²)	Elongation (%)	Young's Modulus (×10 ⁴ Kgf / mm ²)
20	46.8	60.9	27.5	2.10

4. 수치해석결과 및 고찰

SA-508 압력용기용강(Table 1)을 변후재의 피로 균열 Arrest 설계·대상재료로 설정하고, 동재료에 대한 Fatigue Crack Arrest Threshold ΔK_{th} 를 ASTM E-647A에 제안되어 있는 Constant R Method에 준하여 실험 평가한 다음 (Table 2 참조), 그 결과를 이용하여, CT형 변후 Model의 피로균열 Arrest 거동을 수치해석 하였다.

Table 2. Fatigue Threshold of SA-508 C3

Initial P_{max} (kg)	Load Ratio	ΔK_{th} (kg / mm ^{3/2})
900	0.1	21
900	0.3	19
900	0.5	15
1000	0.7	12

4.1 변후재의 피로균열 Arrest Design Curves

식(5)를 이용하여 변후경계근방($\lambda=0.95$)에서 Crack Arrest가 예상되는 변후형상비(두께비와 판폭비) 조건을 구한 다음, 식(5)의 Δp 를 $\sigma_{vt} W_1$ (σ_v : 항복강도)으로 무차원화 하여 변후재의 피로 균열 Arrest조건을 「 $\Delta P / \sigma_{vt} W_1 - \beta$ 」의 관계로 정리하였으며, 이 관계선도를 Fatigue Crack Arrest Design Curve (FCAD Curve)로 정의하였다.

Fig.4-Fig.7은 R=0.1, 0.3, 0.5 및 0.7에서 SA508 압력용기의 FCAD선도를 예시한 것이므로, 개괄적인 경향은 응력비(R)가 커짐에 따라 Arrest 가능한 임계하중(무차원하중 「 $\Delta P / \sigma_{vt} W_1$ 」)이 점차 하향하는 경향을 가지며, 두께비가 커질수록 무차원 하중치는 일양 증가하는 양상을 보이고 있다.

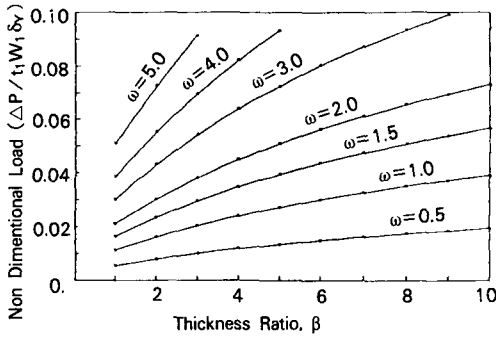


Fig.4 Fatigue Crack Arrest Design Curves of SA-508 CT Type Variable Thickness Plates(R=0.1)

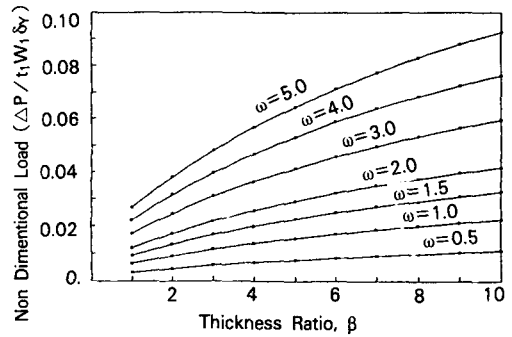


Fig.7 Fatigue Crack Arrest Design Curves of SA-508 CT Type Variable Thickness Plates(R=0.7)

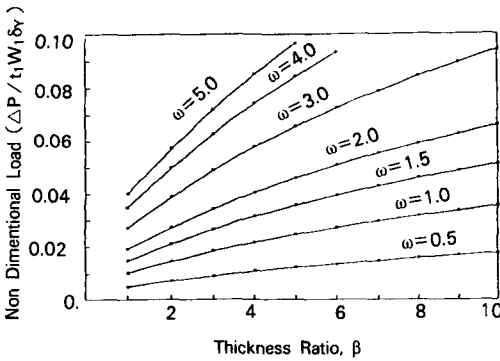


Fig.5 Fatigue Crack Arrest Design Curves of SA-508 CT Type Variable Thickness Plates(R=0.3)

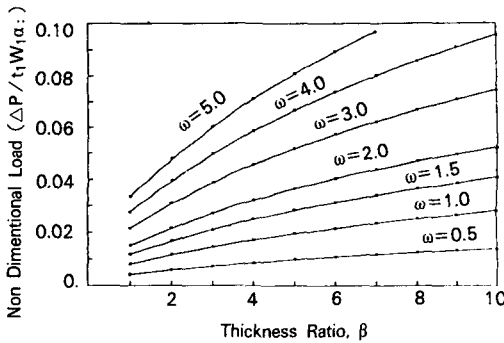


Fig.6 Fatigue Crack Arrest Design Curves of SA-508 CT Type Variable Thickness Plates(R=0.5)

4.2 Fatigue Crack Arrest Design Curves의 검증

SA508 압력용기강의 FCAD 선도를 수치적으로 검증하기 위하여, Fig.8과 같이 R=0.3이고 판폭비가 1인 FCAD 선도상의 B점을 중심으로 하여 그 상하 및 좌우에 위치한 A,C 및 D,E 점에 상당하는 변후 모델의 『a-N』 관계를 예측한 다음 그 결과를 상호 비교한 것이다. 균열 성장거동 예측에는 Modified

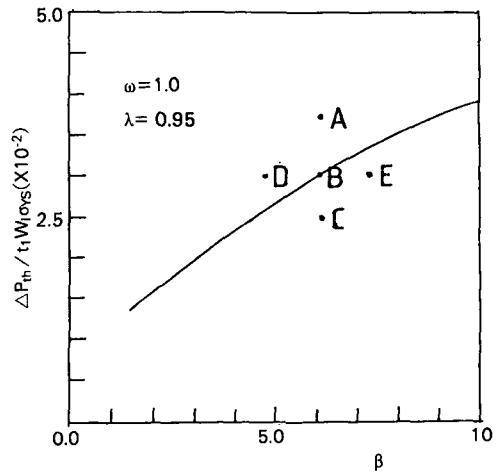


Fig.8 Fatigue Crack Arrest Design Curves of SA-508 CT Type Variable Thickness Plates(R=0.1, ω=1)

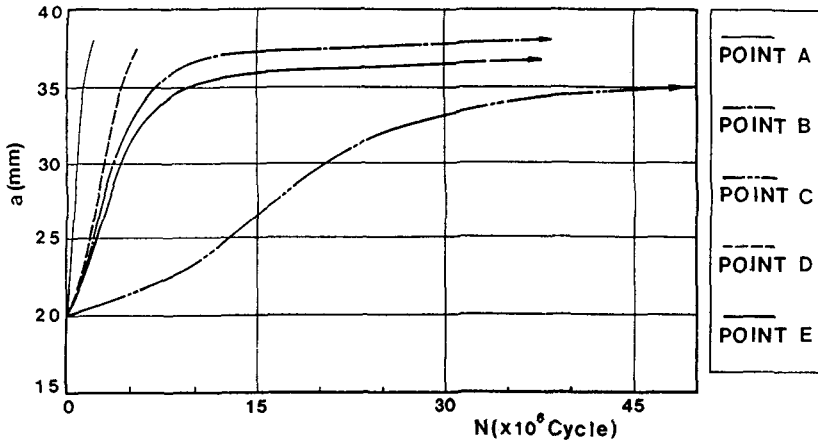


Fig.9 Predicted Crack Growth Curves for CT Type Variable Thickness Plates

Static Fracture Model을 근거로 하여 Zheng¹⁴ 등에 의해 제시된 식(6)을 이용하였다.

$$da/dN = B(K_{IV} - K_{th})^2 \dots \dots \dots (6)$$

$$B = 15.9/E^2 (E : \text{Young's Modulus})$$

Fig.9에 도시된 바와 같이, 예측된 「a-N」 관계는 전형적인 변후재의 균열 성장 거동을 잘 예시해주고

있으나, FCAD 선동상의 Arrest 영역내에 위치한 B,C<E 점에 대한 a-N 관계에서는 현저한 피로수명 증대와 함께 변후경계 근방에서 a-N 곡선의 기울기가 거의 0에 수렴하는 경향을 갖는 반면에, Crack Growth 영역에 위치한 A, D점의 경우에는 이와 같은 거동이 예측되지 않았다.

한편, Fig.9의 균열성장 거동을 「da/dN-λ」 관계로 정리한 결과 Fig.10과 같이 A,D 점을 제외한 B,C

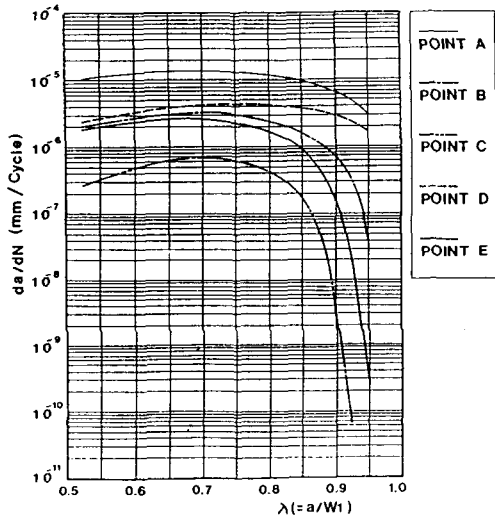


Fig.10 Predicted Variation Fatigue Crack Growth Rates with Nondimensional Crack Length (R=0.1, w=1)

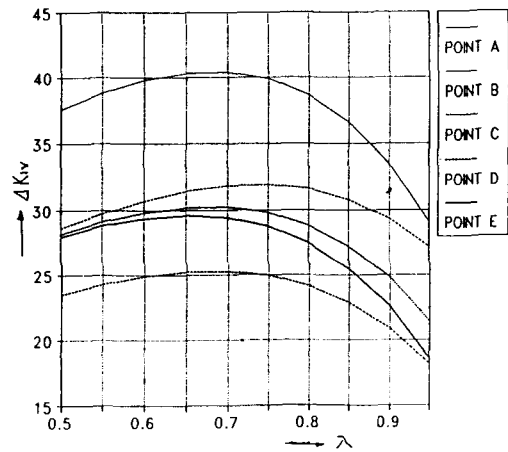


Fig.11 Predicted Variation of Stress Intensity Factors with Nondimensional Crack Length (R=0.1, w=1)

및 E 점에 상당하는 변후 Model의 경우 =0.95 또는 그 이전에 이미 균열성장속도가 10^7 mm/sec 이하로 감소되어 $\Delta K_{IV} \leq \Delta K_m$ 조건을 만족하는 것을 알 수 있으며, 이와같은 거동은 상기 변후 Model에 대한 「 $\Delta K_{IV} - \lambda$ 」 관계(Fig.11)에서 직접 확인할 수 있었다.

따라서, Fig.4-Fig.7에 제시된 FCAD는 1) 두께비와 판폭비가 각각 및 인 SA508 압력용기용강 변후재의 변후경계서 피로균열 성장을 정지시킬 수 있는 임계하중치를 예측하거나, 2) 변후재내에 존재하는 피로균열이 주어진 하중조건 하에서 안정성장을 하다가, 변후경계 근방에서 피로균열의 Arrest 될 수 있는 변후형상비의 설정시 안전기준을 활용할 수 있겠다.

5. 결 론

1) 변후재내에 존재하는 피로균열에 대한 Arrest 기준을 K_m 를 이용하여 설정할 수 있으며, 제한된 범위에서나마 수치적으로 Simulation 가능함을 볼 수 있었다.

2) 본 연구에서 제안된 FCAD곡선의 타당성은 $K_{IV} - \lambda$ 관계 또는 a-N관계로써 검증할 수 있었다.

3) 그러나, FCAD곡선의 실구조물에서의 사용가능성에 대해서는 실험적인 결과 비교·평가가 필요할 것으로 생각되나, 이 문제는 후속연구에서 거론하기로 한다.

후 기

본 연구는 경남대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 관계제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) 최용식, "Crack Arrest에 관한 기초적 연구 (1)", 성대 과학기술연구, Vol.10, pp.63-71, 1982
 2) 최용식, "Crack Arrest에 관한 기초적 연구

(2)", 성대 과학기술연구, Vol.11, pp.45-52, 1983
 3) 최용식, "Crack Arrest에 관한 기초적 연구 (3)", 성대 논문집(자연계), Vol.34, No.2, pp. 265-273, 1983
 4) H.Kitagawa, S.Toyohira, and K.Ikeda, "A New Method of Arresting Fatigue Crack Growth by Artificial Wedge", Proceedings of an Int. Con. on F.M. in Engineering Application pp. 281-293, India, Mar., 1979
 5) M.K.Sridhar, G. Basavarajappa and N. Balasubramanian, "Control of Crack Propagation in Metals by the use of Composites", Proceedings of an Int. Con. on F.M. in Engineering Application, pp.331-339, India, Mar., 1979
 6) J.Schijve, "Crack Stoppers and ARALL Laminates", Engng F.M., Vol.37 No.2, pp.405-421, 1990
 7) 장세인, 이환우, 양원호, 최용식, "CT형 유한폭 변후부재에서의 피로균열 성장거동(I)", 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술강연회 초록집, pp.52-56, 1991
 8) 이환우, 이갑래, 최용식, "CT형 변후재의 광탄성 응력확대계수 해석", 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집(I), pp.55-58, 1991
 9) 이환우, 장세인, 최용식, "CT형 변후재의 피로 균열성장거동(II)", 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집(I), pp.47-50, 1991
 10) F.Erdogan and V. Biricikoglu, "Two bonded Half Planes with a Crack Going Through the Interface", Int. J. Sci., Vol. 11, pp. 745-766, 1973
 11) M.M.Ratwani and H.P.Kan, "Analysis and Growth of Cracks in Skins with Variable Thickness", ASTM STP 833, pp. 44-56, 1984
 12) R.C.Shah and F.T.Lin, "Stress Intensity Factors of Stiffened Panels with Partially Cracked Stiffeners", ASTM STP 791, pp. 157-171, 1983
 13) Yang, W.H., Houssny-Emam, H. and Bassim,

이환우, 이갑래, 최용식

M.N., "An Experimental K-Analysis on the Fatigue Crack Near the Interface where Plate Thickness Varies Discontinuously", Engng F. M., Vol. 19, No. 2, pp. 295-303, 1987

14) Xiulin Zheng, "Fatigue Crack Propagation in Steels", Engng F.M., Vol. 18, No.5, pp. 965-973, 1983