

보강판의 균열거동해석과 Crack Arrest 설계(II) - Crack Arrest 거동의 시뮬레이션

이의종*, 이환우#

Crack Growth Analysis and Crack Arrest Design of Stiffened Panels(II) - Numerical Simulation of Crack Arrest Behavior

Eui-Jong Rhee*, Hwan-Woo Rhee#

ABSTRACT

To demonstrate the feasibility of utilizing FCAD chart proposed in our previous work, series of crack growth/arrest behavior in the integrally stiffened panels were simulated by numerical method using upper mentioned FCAD charts and a new crack growth rate equation. It is concluded that proposed family of FCAD curves, in the form of non-dimensional arrest load ranges, are reliable indicators of fatigue crack growth/arrest behavior of integrally stiffened panels considered here.

Key Words : Fatigue Threshold(피로균열성장 하한계 조건), Fatigue Crack Arrest Design(피로균열정지설계), Subcritical Crack Growth(안정균열성장), Static Fracture Model(정적 파괴모델), Stress Ratio(응력비)

1. 서 론

피로하중을 받고 있는 재료에 검출 가능한 거시적인 균열이 생성되었을 때, 이 초기균열길이(a_{in})에 상응하는 응력확대계수(Stress Intensity Factor : SIF) ΔK_{in} 이 피로균열성장 하한계조건으로 알려져 있는 ΔK_{th} 보다 작을 경우 균열은 하중반복수 N 에 무관하게 Arrest 상태를 지속하게 되며, $\Delta K_{in} \geq \Delta K_{th}$ 일 때 비로소 안정성장(Subcritical Crack Growth)을 개시하게 된다 (Fig. 1). 또한 $\Delta K_{in} > \Delta K_{th}$ 상태에서 N 이 증가함에 따라

균열이 성장하여 임계 균열길이(a_c)에 근접하게 되면 ΔK 의 증대와 더불어 피로균열성장속도(da/dN)의 가속을 초래하게 되며, ΔK 가 안정균열성장의 상한계 조건이 되는 ΔK_c (Critical SIF Range in Fatigue)에 이르게 되면 $da/dN \rightarrow \infty$ 즉, 불안정 균열성장에 의한 파괴(Fracture)를 초래하게 된다. 이와 같이 균열이 발생, 성장하여 불안정 파괴에 이르는 수명기간 동안에 적절한 대책을 강구하여 단계별로 대처할 수만 있다면 기계, 구조물의 유효사용수명을 향상시키고 피로파괴를 방지할 수가 있을 것이므로, 파손제어에 관한 문제는 오래 전부터 파괴역학적인 연구의 관심사가 되어 왔으며, 또한 효과적인 파손제어대책의 개발에 관한 문제는 모든 파괴역학적인 연구가 궁극적으로 지향하는 최종목표라고 할 수 있다¹⁾.

* 경남대학교 대학원 기계설계학과
교신저자 : 경남대학교 기계자동화공학부
E-mail : rhee@kyungnam.ac.kr

이와 같은 관점에서 볼 때, 균열발생제어(Crack Initiation Control)와 안정 및 불안정 균열성장을 포함한 균열성장제어(Crack Growth Control) 개념이 포괄되어 있는 Crack Arrest 설계개념이 정립될 경우 균열이 발생, 성장하여 파괴에 이르는 균열체의 수명이력(Life History) 전 과정에 단계별로 유연하게 대처할 수가 있을 것이므로 이에 관한 연구의 중요성이 강조되고 있다. 그러나 이에 관한 연구는 ASTM E-24.01.07(Dynamic Initiation-Crack Arrest Task Group)을 중심으로 급속 성장하는 균열의 정지대책에 관한 문제가 논의되고 있을 뿐^[2-4], 피로균열의 Arrest 설계(Fatigue Crack Arrest Design : FCAD)에 관한 연구는 아직까지 미진한 상태에 있으며, 피로균열 Arrest 설계개념이 정립되기 위해서는 균열성장과 더불어 SIF의 감소거동을 초래할 수 있는 피로균열의 Arrest Mechanism 개발과 Arrest Potential의 정량적인 평가방법 및 Arrest 설계기준 등에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다^[5-7]. 이와 관련하여, 일련의 본 연구에서는 피로균열의 Arrest 가능성을 상징한 다음, 일차적으로 보강판의 Crack Arrest 설계에 준용할 수 있는 디자인 차트를 설정하여 제안한 바 있으나^[8], 그 유용성 검증에 관한 필요성이 제기되었으므로, 본 연구의 제2보에서는 전보에서 설정된 FCAD 차트를 이용하여 일체형 보강판의 균열 성장/정지거동을 수치적으로 시뮬레이션하고 그 결과로부터 설정된 디자인 차트의 유용성 문제를 검토해보기로 하였다.

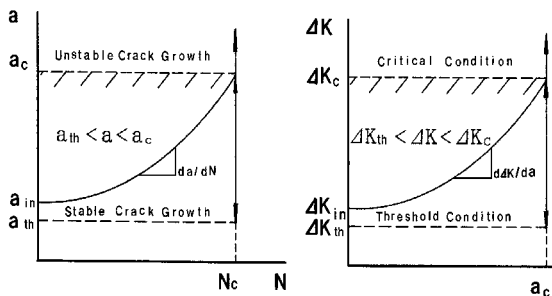


Fig. 1 Schematic representation of subcritical crack growth

2. 균열성장모델

Fig. 2와 같이 제2영역(B)상의 균열성장거동에 대한 해석적인 모델링에는 Paris Power Law를 비롯한 그 유형이 일반적으로 적용되고 있으나, 본 연구에서와 같이 ΔK 의 감소거동이 지속되어 $\Delta K \rightarrow \Delta K_{th}$ 가 되는 저 ΔK 영역의 균열거동에 까지 Paris Law를 준용할 수는 없을 것이므로, 본 연구에서는 먼저 Lal과 Weiss의 정적파괴모델(Static Fracture Model)에 기반을 둔 새로운 균열성장모델의^[9-10] 적용 가능성을 검토하였다.

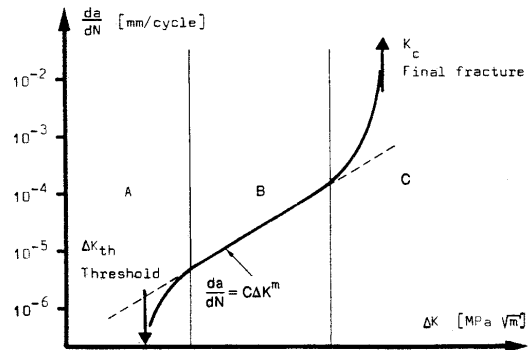


Fig. 2 Schematic representation of da/dN vs. ΔK

Fig. 3과 같이 피로균열의 성장기구(Crack Growth Mechanism)를 균열선단 피로요소(Fatigue Elements)의 정적파괴과정으로 가정한 다음, “균열이 Fig. 4와 같이 단위 사이클 동안에 균열선단 최대수직응력(Maximum Normal Stress at Crack-tip) σ 와 임계파괴응력(Critical Fracture Stress) σ_{ff} 가 $\sigma \geq \sigma_{ff}$ 의 조건을 만족하는 거리 $x=x_f$ 만큼 성장한다.”는 Lal과 Weiss의 정적파괴모델에 Fig. 5와 같이 응력비가 $R=0$ 인 반복하중하에서의 균열선단 둔화효과를 고려하여 정적파괴 모델을 수정하면 다음과 같다. 즉, 단위 사이클 당의 균열성장 da/dN 은, Lal과 Weiss의 가정에 따라 $\sigma \geq \sigma_{ff}$ 가 되는 거리 $x=x_f$ 만큼 성장할 것이므로, 식(1)과 같이 표시할 수 있겠다.

$$\frac{da}{dN} = x_f = x (\sigma = \sigma_{ff}) \quad (1)$$

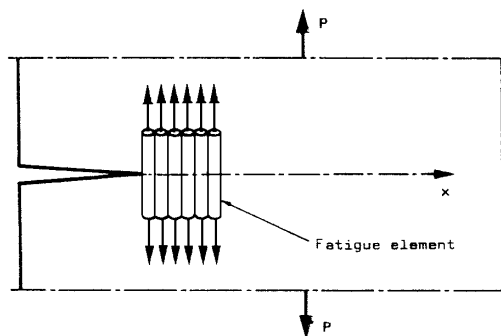


Fig. 3 Schematic illustration of the fatigue element along the potential crack path

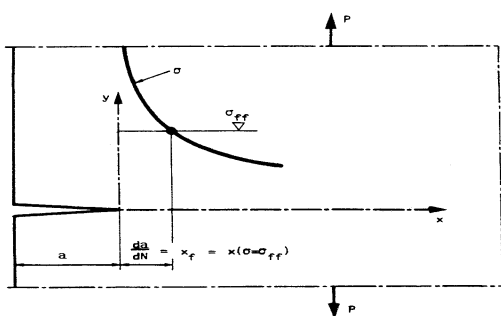


Fig. 4 Schematic illustration of the assumption of the incremental fatigue crack growth

한편, Mode I 하중을 받고 있는 균열체의 탄성해석에서 균열선단 수직응력분포는 식(2)와 같으며,

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi x}} : \text{where } \theta = 0 \quad (2)$$

또한, “피로균열성장 하한계 조건과 마찬가지로 단순하중(Monotonic Loading)하에서도 균열 개시조건(Crack Threshold)으로서 K_{th} 가 존재할 뿐만 아니라, $\sigma \leq \sigma_{ff}$ 상태에서 균열성장은 $K_{eff} = K_{max} - K_{th}$ 에 의존한다”는 Schwalbe의 이론에 따라 균열이 $x = x_f (= da/dN)$ 만큼 성장했을 때, $K_I = K_{eff}$ 를 식(2)에 대입하면 식(1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= \frac{1}{2\pi \sigma_{ff}^2} \cdot K_{eff}^2 \\ &= \frac{1}{2\pi \sigma_{ff}^2} (K_{max} - K_{th})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$K_{eff} = K_{max} - K_{th}$: Effective SIF

da/dN : Fatigue crack growth rate

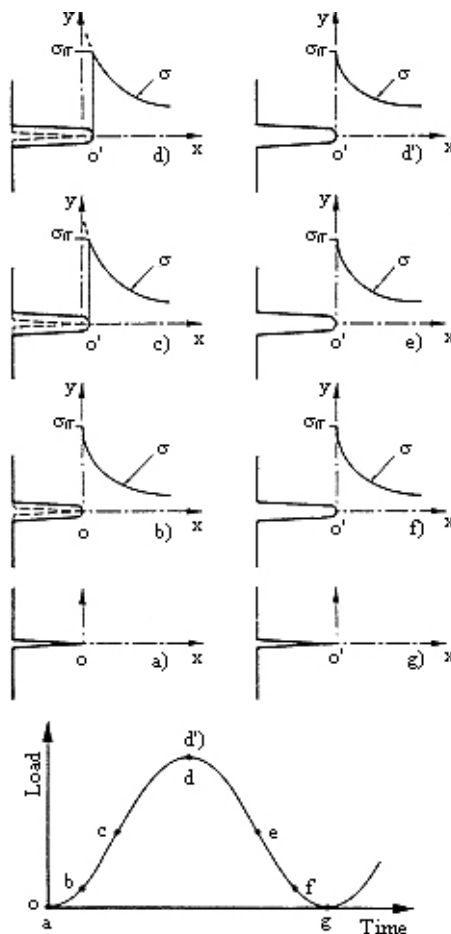


Fig. 5 Schematic illustration of the static fracture model for fatigue crack growth

또한 둔화된 균열을 예리한 노치(Notch)로 간주할 경우, 균열선단 최대수직응력 σ 는 노치기저(Notch Root)에서의 탄성응력 $\kappa_t S$ (여기서 κ_t : Theoretical stress concentration factor, S : Nominal Stress)와 등가로 취급할 수 있으며, $\sigma (= \kappa_t S)$ 가 금속재료의 이론파괴강도에 도달하게 되면 노치기저에 새로운 균열선단이 형성될 것이므로, Lal과 Weiss의 정적 파괴모델에서 물리

적인 의미가 결여된 임계 파괴응력 σ_{ff} 는 식(4)와 같이 금속재료의 이론파괴강도로 대체할 수 있겠다.

$$\sigma_{ff} = \sqrt{E \sigma_f \varepsilon_f} \quad (4)$$

여기서

- E : Young' modulus
- σ_f : Fracture strength
- ε_f : Fracture ductility

뿐만 아니라, 반복하중하에서 응력비가 R=0일 때, 식(3)에 포함된 응력확대계수는 각각 다음과 같이 ΔK 형태로 표시할 수 있을 것이므로

$$K_{max}=\Delta K, K_{th}=\Delta K_{th}, K_{eff}=\Delta K_{eff} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)를 식(3)에 대입하면 식(6)과 같은 R=0에서의 피로균열성장속도 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= B \Delta K_{eff}^2 \\ &= \frac{1}{2\pi \sigma_{ff}^2} (\Delta K - \Delta K_{th})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$B=1/2 \pi E \sigma_f \varepsilon_f : \text{Material constant}$$

참고로, 식(6)을 R=0 이외의 응력비 조건에 활용할 경우 da/dN이 ΔK_{eff} 에 의존하는 한 식(7)과 같은 “ ΔK_{th} 의 R 의존성”^[11]을 식(6)에 고려함으로써 피로균열성장거동에 대한 응력비 R의 영향을 검토할 수도 있을 것이다. 즉,

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} (1 - R)^\gamma \quad (7)$$

여기서

- ΔK_{th0} : Fatigue threshold at R=0
- γ : Constant($0 \leq \gamma \leq 1$)

이상과 같이 정적파괴모델(Static Fracture Model)에 기반을 둔 식(6)은—da/dN ≤ 10⁻³mm/cycle이 되는 제 I, II 영역상의 균열성장거동 해석에 공히 적용 가능할

뿐만 아니라, 식 중의 재료상수 B를 인장특성으로부터 용이하게 결정할 수 있으며, 또한 II 영역상의 피로 데이터가 주어질 경우 피로균열성장 하한계 조건으로서 ΔK_{th} 을 예측할 수도 있으므로— 피로균열의 Arrest 거동 해석에 매우 적합한 균열성장모델이라고 할 수 있겠다.

3. Crack Arrest 거동의 시뮬레이션

본 연구의 제1보^[8]에서 설정된 FCAD 선도의 유용성을 검토하기 위하여 응력비가 R=0.1인 FCAD 차트(Fig. 6 참조)에서 $\omega=1.0$ 인 Arrest 곡선을 선별한 다음(Fig. 7 참조), 이 곡선상의 B점을 중심으로 하여 그 상/하 및 전/후에 위치한 A, C 및 D, E점의 종/횡좌표에 대응하는 하중과 형상비 조건을 갖는 CT형 보강판 모델의 균열성장/정지거동을 수치적으로 시뮬레이션 하였다.

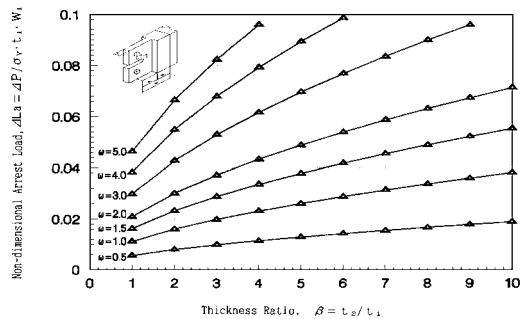


Fig. 6 FCAD chart for CT-type stiffened panel (R=1.0)^[8]

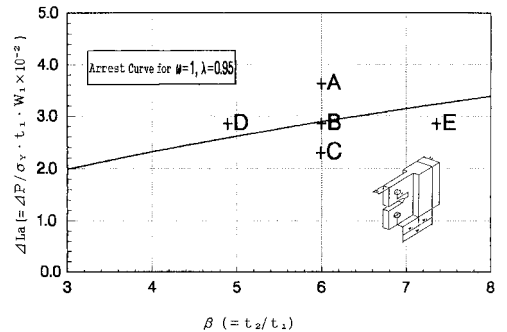


Fig. 7 FCAD curve for CT-type stiffened panel having width ratio $\omega=1.0$ (R=0.1)

설정된 디자인 차트의 유용성을 검증하기 위한 시뮬레이션에서 피로균열성장거동의 모델링에는 Lal과 Weiss의 정적과피모델을 수정한 식(6)에 CT형 보강판의 SIF 해석결과를^[12] 고려하여 다음과 같은 속도방정식(Rate Equation)을 이용하였으며,

$$\frac{da}{dN} = B \cdot \Delta K_{eff}^2 \quad (8)$$

여기서

$$\Delta K_{eff} = \Delta K_{IV} - \Delta K_{th}$$

$$\Delta K_{IV} = \frac{\Delta P}{t_1 \sqrt{W}} \cdot F_I(a) \cdot F_{IV}(\lambda, \beta) \quad (9)$$

$$F_I(a) = \frac{2+a}{(1-a)^{3/2}} \cdot (0.886 + 4.64a - 13.32 a^2 + 14.72 a^3 - 5.64 a^4)$$

$$a = \frac{\lambda}{1 + \omega} \quad \text{and} \quad \lambda = \frac{a}{W_1}$$

$$F_{IV}(\lambda, \beta) = 1 - 1.2065 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\beta}} \right) \cdot \lambda^3$$

식(8)을 수치적분한 다음, 그 결과를 『a - N』 및 『da/dN - λ』관계로 정리하여 균열이 주어진 하중조건하에서 성장하다가 보강경계(λ=1) 근방에 이르렀을 때 성장을 지속하거나 Arrest되는 거동을 균열성장속도와 SIF를 기준으로 비교·평가하였다. 즉, ΔK_{th}의 결정시험법에 관한 ASTM E-24^[13]의 관련 규정에 준하여 균열성장속도가 da/dN < 10⁻⁷mm/cycle이 되거나 또는 ΔK_{IV} ≤ ΔK_{th} 조건이 만족되면 Crack Arrest 상태로 판정하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 9는, Fig. 7의 B점과 그 주변에 위치한 A, C 및 D, E점의 종/횡좌표에 대응하는 하중과 형상비 조건을 갖는 CT형 보강판의 균열성장/정지거동을 시뮬레이션 해석하고 그 결과를 『a - N』 관계로 정리하여

도시한 것이다.

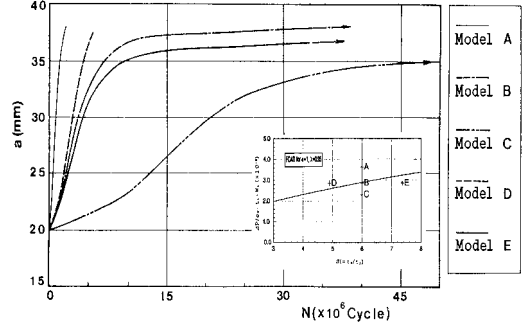


Fig. 9 Predicted crack growth curves for SA-508 CT-type stiffened panels

이 결과에서 『a - N』 선도로 본 보강판의 균열성장거동은 작용하중과 두께비 조건에 따라 다소 차이가 있으나, 대체로 전형적인 보강판의 균열성장특성이 함축되어 있는 형상을 보이고 있으며, 또한 보강경계(λ=1) 근방에서 Crack Arrest 현상을 유발시킬 수 있는 형상비 조건이나 허용하중의 평가지표로서 FCAD 차트의 유용성을 확인할 수 있는 특성이 잘 나타나 있다. 즉, ω=1.0인 Arrest 곡선의 상부에 위치한 A 및 D점의 종/횡좌표에 대응하는 하중조건과 형상비를 갖는 모델 A와 D의 경우, 『a - N』 곡선으로 본 균열성장거동은 균열이 보강경계(λ=1)를 상회하여 성장을 지속할 수 있는 경향을 보이고 있다. 그러나 Arrest 곡선상에 있는 B점을 비롯하여 그 하부에 위치한 C점과 E점에 대응하는 모델의 『a - N』 선도에서는 균열이 성장하여 λ=0.75 근방에 이르게 되면 『a - N』곡선의 기울기(da/dN)가 점차 둔화되기 시작하며, λ=0.8~0.9 이상이 되면 그 기울기가 거의 0에 근접함으로써, 현저한 피로수명 증대와 더불어 Crack Arrest를 예상할 수 있게 한다. 따라서 Fig. 7에 도시된 ω=1인 Arrest 곡선의 상부영역은 균열이 보강경계를 관통하여 성장을 지속할 수 있는 『균열성장영역』이라고 할 수 있으며, Arrest 곡선의 하부영역은 균열이 성장하다가 보강경계 근방에서 Arrest 현상을 유발시킬 수 있는 『Crack Arrest 영역』이라고 할 수 있겠다. 또한 균열성장/정지 영역의 경계가 되는 Arrest 곡선 자체는 λ=1 근방에서 Arrest를 유발할 수 있는 하중과 형상비 조건의 임계치를 표시하는 것으로 생각되나 이 문제에 대한 고찰은 FCAD 선도의

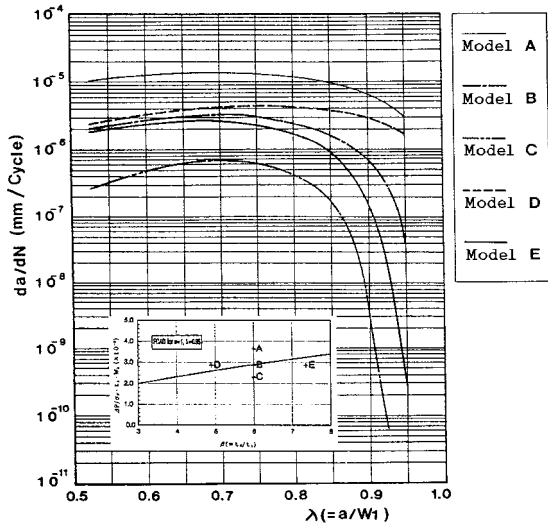


Fig. 10 Predicted crack growth rate in SA-508 CT-type stiffened panels(R=0.1, ω=1.0)

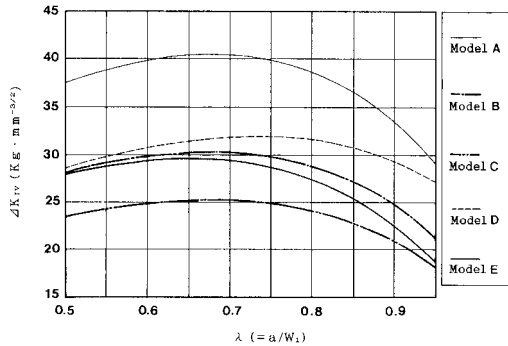


Fig. 11 Predicted SIF variation behaviors with non-dimensional crack length(R=0.1, ω=1.0)

실험검증에 관한 후속연구에서 재론하기로 한다.

Fig. 10은 균열성장속도를 기준으로 FCAD 선도의 유용성을 검토하기 위하여 Fig. 9의 『a - N』 데이터를 『da/dN - λ』관계로 재정리한 것이다. 이 결과에 의하면, Arrest 곡선의 “균열성장영역”에서 선택된 모델 A와 B의 경우, λ=0.95에서도 균열성장속도가 da/dN>10⁻⁷mm/cycle이 되어 균열이 성장을 지속할 수 있다는 것을 바로 확인할 수 있으며, 한편, “균열정지

영역”과 그 경계상에서 선택된 모델 C, E 및 B의 경우에는 균열성장속도가 λ=0.95(모델 B) 또는 그 이전에 da/dN=10⁻⁷~10⁻¹⁰mm/cycle 이하로 감소하여 균열이 정지상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은, 응력확대계수 기준의 Crack Arrest 조건 (ΔK_{IV} ≤ ΔK_{th})의 만족 여부를 재확인하기 위하여 선정된 각 모델의 ΔK_{IV}를 응력비 R=0.1에서 ΔP로 환산된 Arrest 하중과 무차원 균열길이 λ의 함수로 계산한 다음, 그 결과를 『ΔK_{IV} - λ』관계로 도시한 것이다. 이 결과에 의하면, 각 모델의 ΔK_{IV}는 균열성장과 더불어 점차 증가하다가, λ=0.7을 전후하여 감소거동을 시작하게 되나 “균열성장영역”에서 선정된 모델 A와 D의 경우, λ=0.95에서 계산된 ΔK_{IV}를 ΔK_{th}(=21 Kg/mm^{3/2} at R=0.1)와 비교해 보면 ΔK_{IV} ≥ ΔK_{th} 상태가 지속되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 “균열정지영역”에서 선정된 모델의 경우에는 λ=0.95 근방에서 모두 ΔK_{IV} ≤ ΔK_{th} 상태가 만족되어 Crack Arrest 상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 보강판의 균열성장과 Arrest 거동의 시뮬레이션 결과들은 본 연구의 제1보에서 제안된 FCAD 차트의 유용성을 입증할 수 있는 근거가 될 수 있겠으나, 그 실용 가능성은 실험적인 사실로 재확인되어야 할 것이므로 FCAD 차트의 실험검증에 관한 문제는 후속 연구에서 다루기로 한다.

5. 결 론

본 연구의 제1보에서 제안된 Arrest 설계기준의 유용성을 검토하기 위하여 R=0.1에서 얻어진 FCAD 선도 중에서 ω=1.0인 Arrest 곡선을 이용하여 Crack Arrest 거동을 시뮬레이션 하였으며 주요 고찰사항을 요약하면 다음과 같다.

1. Arrest 곡선을 경계로 하여 그 상부영역에서 선정된 해석모델의 경우, 보강경계(λ=1) 근방에서도 da/dN>10⁻⁷mm/cycle의 성장속도를 유지함으로써 피로균열의 Arrest 조건(ΔK_{IV} ≤ ΔK_{th})을 만족하지 않음을 확인할 수 있었다.
2. Arrest 곡선의 하부영역과 그 경계상에서 선정된 해석모델의 경우, λ=0.95와 그 이전에 균열성장속

도가 $da/dN=10^{-7}\sim 10^{-10}$ mm/cycle 이하로 감소되어 $\Delta K_{IV} \leq \Delta K_{th}$ 의 조건을 용이하게 만족하였다.

- 결론 1,2에 의하면, Arrest 곡선의 상부영역은 균열이 보강경계를 관통하여 성장을 지속할 수 있는 균열성장영역"이라고 할 수 있으며, Arrest 곡선의 하부영역은 보강경계 근방에서 균열정지 현상을 유발시킬 수 있는 "Crack Arrest 영역"이라고 할 수 있다. 또한 영역간의 경계가 되는 Arrest 곡선 자체는 균열성장과 정지거동의 분기점이 되는 하중과 형상비 조건을 표시하는 것으로 생각된다.

이상과 같은 결론을 종합해 보면, 본 연구의 제1보에서 제안된 일체형 보강판의 FCAD 선도는 보강경계 근방에서 Crack Arrest를 유발할 수 있는 하중조건과 Arrest Potential을 갖는 보강판의 형상비 조건을 선별할 수 있는 지표로 평가되었으나, 그 실용 가능성에 대해서는 실험적인 검증이 뒤따라야 할 것이므로 이 문제는 후속 연구에서 다루기로 한다.

참 고 문 헌

- Rolf S. T. and Barsom J. M., "Fracture and Fatigue Control in Structure - Applications of F.M.," Prentice-Hall, New Jersey, pp. 345-515, 1981.
- Hahn G. T., Hoagland R. G., Kanninen M. F. and Rosenfield A. R., "Crack Arrest in Steels," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 583-591, 1975.
- Dally J. W., Fourny W. L. and Irwin G. R., "On the Uniqueness of the Stress Intensity Factor-Crack Velocity Relationship," Int. J. Fracture, Vol. 27, pp. 159-168, 1985.
- Kobayashi A. S., Ramulu M., Dadkhan M. S., Yang K. H. and Kang B. S. J., "Dynamic Fracture Toughness," Int. J. Fracture, Vol. 30, pp. 275-285, 1986.
- Vlieger H., "The Residual Strength Characteristics of Stiffened Panels Containing Fatigue Cracks," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 5, pp. 447-477, 1973.
- Kitagawa H., Toyohira S. and Ikeda K., "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, 1979.
- Schijve J., "Crack Stoppers and ARALL Laminates," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 37, No. 2, pp. 405-421, 1990.
- 이의중, 이환우, "보강판의 균열거동해석과 Crack Arrest 설계(I) - Crack Arrest 설계기준의 수치해석," 한국기계공학회지 게재 예정.
- Zheng X. and Hirt M. A., "Fatigue Crack Propagation in Steels," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, No. 5, pp. 965-973, 1983.
- Zheng X., "A Simple Formula for Fatigue Crack Propagation and a New Method for the Determination of ΔK_{th} ," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 27, No. 4, pp. 465-475, 1987.
- Vosikovskiy O., "The Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rates in Steels," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 340-356, 1981.
- Rhee H. W., Choy Y. S., Yang W. H., Chang S. I., "Stress Intensity Factor for Crack in a Variable Thickness Plate," Proceedings of Asian-Pacific Con. on Strength Evaluation, pp. 1258-1263, 1991.
- ASTM Designation : E-24, "Proposed ASTM Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM STP 738 Appendix II, pp. 340-356, 1981.