

보강판의 균열거동해석과 Crack Arrest 설계(I) - Crack Arrest 설계기준의 수치해석

이의종*, 이환우#

Crack Growth Analysis and Crack Arrest Design of Stiffened Panels(I) - Numerical Approaches to Crack Arrest Design Chart

Eui-Jong Rhee*, Hwan-Woo Rhee#

ABSTRACT

The purpose of a fatigue crack arrest design is to prevent 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 flanges, crack arrest is possible; arrest occurring when the fatigue crack reaches the second element.

In the present work, a numerical analysis was carried out to estimate the effect of shape parameters on fatigue crack growth and arrest behavior of integrally stiffened panels. Based on these results, a set of fatigue crack arrest design chart is presented as 『non-dimensional arrest load - thickness ratio』 relationship.

Key Words : Stiffened Panel(보강판), Fatigue Crack Growth(피로균열성장), Crack Arrest Design(균열정지설계), Fatigue Threshold(피로균열성장 하한계 조건), Shape Parameter(형상변수)

1. 서 론

현재 구조물 자체에 Arrest Potential을 부여함으로써, 피로파괴를 방지하고 안전성과 신뢰성을 향상시키기 위한 손상-허용(Damage Tolerance) 개선책으로 개발된 균열정지설계(Crack Arrest Design : CAD) 개념에는 균열발생제어(Crack Initiation Control)와 균열성장제어(Crack Growth Control)의 측면이 있다^{1,2)}.

균열발생제어란, 균열저항력이 큰 재료를 모재로

사용하거나 또는 균열정지대(Crack Arrester)로 활용하여 애초부터 균열이 발생/성장할 수 있는 개연성에 근본적으로 대처한다는 발상으로서, 균열정지설계의 원리상으로 보면 균열 저항력(Crack Resistance Force) R의 증대이론을 배경으로 하고 있다. 반면에 균열성장제어 개념은 균열발생과 성장을 허용하되 그 거동을 지연 또는 정지시킬 수 있는 기하학적 경계조건을 도출하여 구조물 자체에 균열정지능력을 부여하는 일종의 구조해석적인 방법론이라고 할 수 있으며, 균열정지설계의 원리상으로 보면 균열 진전력(Crack Extension Force) G의 감소이론을 배경으로 하고 있다. 또한 CAD 개념을 해석대상균열의 성장속도에 따라 분류할 경우, 안정성장하는 피로균열(da/dN

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

$\langle 10^5 \text{m/cycle} \rangle$ 의 제어를 목적으로 하는 피로균열정지 설계(Fatigue Crack Arrest Design : FCAD)와 고속으로 성장하는 균열(Fast Running Crack : $da/dt \rangle 10^2 \text{m/sec}$)의 제어를 목적으로 하는 파괴정지설계(Fast Fracture Arrest Design : FFAD)로 대별할 수 있겠으나, 일련의 본 연구에서는, 위와 같은 균열정지설계의 다양한 측면을 단계적으로 검토하여 설계와 보수 단계에서 사용자가 선택적으로 활용할 수 있는 균열정지설계 기준이나 안전기준 등을 설정해보기 위하여 먼저, 균열 성장제어 측면에서 피로균열의 Arrest 가능성을 검토해보기로 하였다.

피로균열의 Arrest 설계에 관한 연구는, Kitagawa 등의^[3] 인공췌기(Artificial Wedge)를 이용한 균열단합(Crack Closure) 현상으로부터 응력확대계수(Stress Intensity Factor : SIF)의 감소와 더불어 균열정지거동을 유도한 선행적인 연구결과를 비롯하여 Sridhar 등의^[4] 균열 패칭법(Crack Patching Technique)을 응용한 피로실험결과가 있으며, 보강재의 결합방법과 재질에 따른 균열거동과 피로균열의 Arrest 가능성을 검토한 Schijve^[5]의 피로실험결과가 있다. 또한 미소균열의 정지거동에 관한 Pook와 Greenan^[6]의 피로실험결과와 본 연구자들에^[7,8] 의해 수행된 연구결과들이 간헐적으로 발표되고 있으나, 피로균열의 정지 퍼텐셜(Arrest Potential)을 정량적으로 해석하고, 설계기준을 논의한 연구결과는 그 사례가 극소하며, 이에 관한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

따라서 일련의 본 연구에서는, 항공기 동체와 주익 구조물 중에 일반적으로 활용되고 있는 일체형 보강판을 해석대상모델로 선정한 다음, 동 모델의 응력확대계수와 피로균열성장거동^[9-11] 등에 관한 자료들을 입력 데이터로 하여 일체형 보강판의 피로균열 Arrest 조건을 수치해석하고, 그 결과를 설계도표(Design Chart)형으로 제시하였다.

2. 피로균열 Arrest 기준의 설정

2.1 해석모델

피로균열 정지조건을 수치해석에는, 항공기 주익 구조상의 일체형 보강판(Fig. 1a)을 두께가 불연속적

으로 변화하는 CT형 보강판 모델(Fig. 1b)로 이상화하였다.

CT형 보강판은—Fig. 1(b)에 도시된 바와 같이 두께가 t_1 이고 판 폭이 W_1 인 박판에 두께가 t_2 이고 판 폭이 W_2 인 동질의 보강재를 두께방향으로 덧붙인 형태로서—박판부에 존재하는 균열이 후판과의 결합경계를 향하여 성장해가는 박·후판 결합형이며, 균열 성장에 관여하는 형상 파라미터로서 보강판의 판폭비(Width Ratio) $\omega(=W_2/W_1)$ 와 두께비(Thickness Ratio) $\beta(=t_2/t_1)$ 는, 본 연구자들의 선행 연구결과들을^[9-11] 참고하여, 각각 $0.5 \leq \omega \leq 5.0$ 및 $1 < \beta < 10$ 범위에서 몇 단계로 변화시켰다.

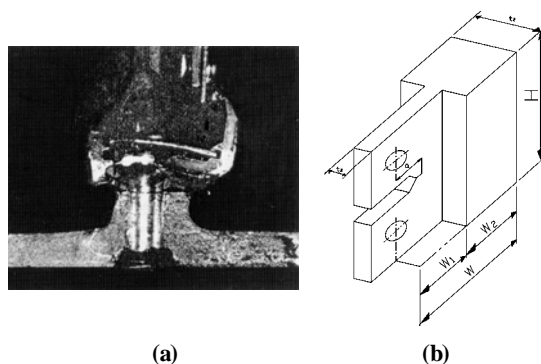


Fig. 1 Geometry of integrally stiffened panel
(a) Lower skin wing outer panel of the F-100
(b) CT-type integrally stiffened panel

한편, 해석대상 소재는 실제 구조물에 사용된 재료를 고려할 경우 Al-합금계열이 적합할 것으로 생각되나, 본 연구에서 재료의 성질은 입력 데이터 요건이기 때문에 사용자의 필요에 따라 선택 가능함으로, 후속될 검증실험 단계에서 두께비 조건에 따라 요구될 수 있는 후판의 필요성을 감안하여, 편의상 SA-508 Class 3 압력용기용 단조강으로 선정하였으며, 이 소재의 기계적인 성질은 Table 1과 같다. 또한 Table 2는 선정된 소재의 Arrest 설계기준이 되는 피로균열성장 하한계조건(Fatigue Threshold ΔK_{th})의 평가결과를 정리한 것으로서, ΔK_{th} 의 실험 평가에는 ASTM E-24에 제안되어 있는 ΔK -감소제어 피로시험법^[12]에 준하여, 균열이 약 0.5mm 성장할 때 마다 직전 ΔK 의 10% 범위 내에서 ΔP 를 단계별로 감소시키

는 하중감소기법을 이용하였으며, 결과의 정리는 ASTM 관련 규정에 따라 『da/dN—ΔK』 관계 선도에서 10⁻⁷~10⁻⁶mm/cycle의 균열성장속도 영역에 분포하는 최소 5개의 유효 데이터에 대한 선형회귀선을 구한 다음, 10⁻⁷mm/cycle의 da/dN에 해당하는 ΔK를 ΔK_{th}로 정의하였다.

Table 1 Mechanical properties of SA-508 forged steel

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

Table 2 Fatigue threshold for SA-508 forged steel

Specimen Type	Control Mode	Cyclic Waveform	Freq. (Hz)	P _{maxi} * (Kg)	Load Ratio	ΔK _{th} (Kg/mm ^{3/2})
CT	Load	Sine	30	900	0.1	21
CT	Load	Sine	30	900	0.3	19
CT	Load	Sine	30	900	0.5	15
CT	Load	Sine	30	1000	0.7	12

* P_{maxi} : Initial P_{max}

2.2 피로균열 Arrest 조건의 해석

보강판의 균열성장거동은, Fig.2에 도시된 바와 같이, 비보강판의 경우와는 달리 일반적으로 보강경계 근방에서 균열성장속도의 천이점(Transition Point)을 가지며, 균열이 성장하여 이 점을 지나게 되면 피로 균열성장속도 da/dN이 급감하는 현상을 초래하게 된다. 또한 이와 같은 균열성장속도의 천이거동은 보강판의 형상비에 의존하고 균열성장속도의 감소거동이 시작되는 천이점은 보강판의 판폭비 ω와 두께비 β가 클수록 보강경계의 원방에 위치하는 것으로 알려져 있다^[11]. 따라서 일체형 보강판의 균열성장거동을 지배하는 형상비(두께비와 판폭비) 조건을 적절하게 설정할 경우, Fig. 2와 같은 피로균열성장속도의 감소거동을 지속시켜 궁극적으로 da/dN→0이 되는 즉, 식(1)과 같은 피로균열의 Arrest 조건을 만족하는 보강판을 설계할 수도 있을 것이다.

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

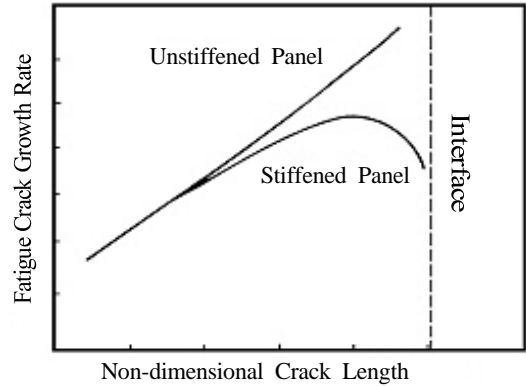


Fig. 2 Schematic representation of crack growth in stiffened panel

이와 같은 관점에서, 본 연구에서는 일체형 보강판의 피로균열 Arrest 조건을 동 모델의 응력확대계수 해석결과^[9]를 이용하여 식(2)와 같이 표시한 다음,

$$\frac{\Delta P}{t_1 \sqrt{W}} \cdot F_I(\alpha) \cdot F_{IV}(\lambda, \beta) \leq \Delta K_{th} \quad (2)$$

여기서,

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

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

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

박판부에 존재하는 균열이 성장하다가 보강경계 근방(λ=0.95)에서 da/dN≤10⁻⁷mm/cycle이 될 수 있는 임계 형상비 조건을 식(2)를 이용하여 수치 계산하였으며, 식(2)의 수치계산에는 Newton-Raphson법을 이용하였다.

한편, Crack Arrest가 가능한 임계 형상비 조건에 대응하는 ΔP_a를 식(3)과 같이 해석대상재료의 항복강도와 박판부의 단면적으로 무차원화 한 다음, 그 결과를 무차원 Arrest 하중 ΔL_a와 보강판의 두께비 β 사이의 관계로 도시하였으며, 이 『ΔL_a—β』 선도를 피로균열정지설계선도(Fatigue Crack Arrest Design Chart : FCAD Chart)로 정의하였다.

$$\Delta L_a = \frac{\Delta P_a}{\sigma_Y \cdot t_1 \cdot W_1} \quad (3)$$

여기서

- ΔL_a : Non-dimensional arrest load range
- ΔP_a : Maximum permissible arrest load range
- σ_Y : Yield strength

3. 해석결과 및 고찰

균열을 포함하는 박판에 동질의 보강재가 두께방향으로 덧붙여진 일체형 보강판의 균열정지 퍼텐셜을—피로균열 Arrest 조건을 비롯한 해석모델의 응력 확대계수, 피로균열성장 하한계조건, 응력비, 초기 하중조건 등을 입력 데이터로 하여—형상비(관폭비와 두께비)의 함수로 해석하였으며, 그 결과를 피로균열 Arrest 설계 차트로 정리하여 고찰하였다.

Fig. 3~Fig. 6은 응력비가 R=0.1, 0.3, 0.5 및 0.7일 때 SA-508 압력용기용 단조강의 ΔK_{th} 를 기준으로 설정된 일체형 보강판의 FCAD 차트로서, 보강경계 근방($\lambda=0.95$)에서 균열정지 현상을 유발할 수 있는 무차원 Arrest 하중 ΔL_a 의 형상비 의존성을 검토해보면 다음과 같다.

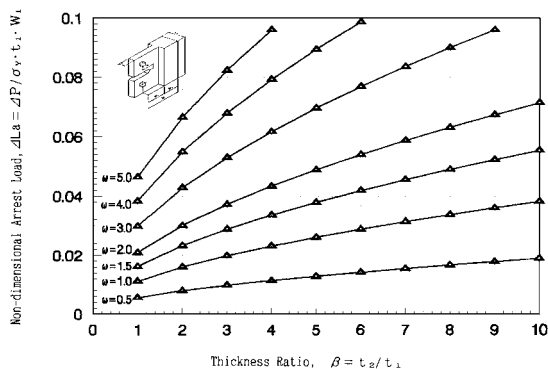


Fig. 3 FCAD chart for SA-508 Class 3 integrally stiffened panels(R=0.1)

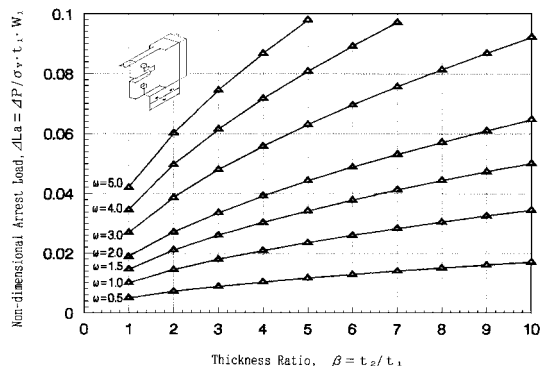


Fig. 4 FCAD chart for SA-508 class 3 integrally stiffened panels(R=0.3)

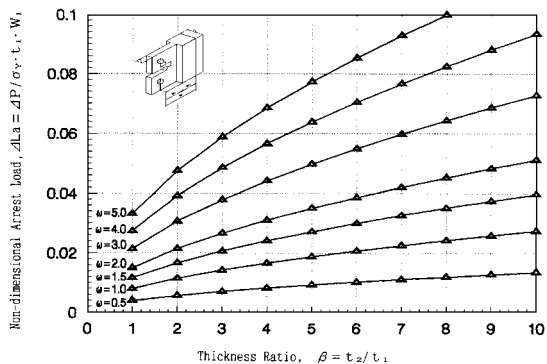


Fig. 5 FCAD chart for SA-508 class 3 integrally stiffened plate(R=0.5)

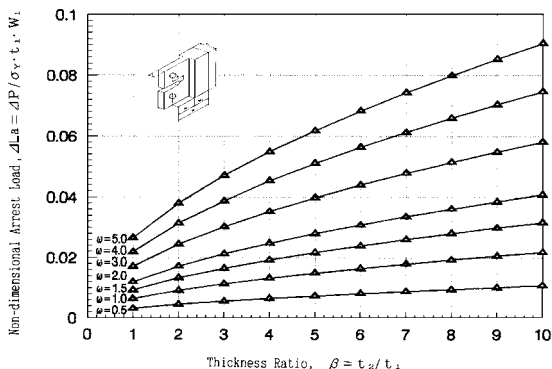


Fig. 6 FCAD chart for SA-508 Class 3 integrally stiffened plate(R=0.7)

판폭비가 일정한 보강판의 경우, ΔL_a 는 대체로 두께비의 증가와 더불어 일양 증가하는 양상을 보이고 있으며, 또한 두께비가 일정한 반면에 판폭비가 변화하는 경우에서도 ΔL_a 는 판폭비가 클수록 증대되는 양상을 나타내었다. 이와 같이 무차원 Arrest 하중 ΔL_a 가 보강판의 판폭비와 두께비에 의존하는 까닭은, 보강판의 강성비(Stiffness Ratio)를 식(4)와 같이 정의할 경우^[5], 보강판의 판폭비와 두께비가 증가하게 되면 박판부의 강성은 일정할지라도 보강재(Stiffener)의 강성이 증대되어 보강판 전체의 강성비를 증가시키게 되며, 또한 강성비의 증가는 상대적으로 보강판의 보강효과를 증대시키기 때문이라고 할 수 있다. 다시 말해서, 보강효과가 보강판의 형상비에 의존하기 때문이다.

$$\mu = \frac{\sum (E \cdot A)_{st}}{(E \cdot A)_{thin} + \sum (E \cdot A)_{st}} \quad (4)$$

여기서

E : Young's modulus

A : Cross section

and subscript "st" means stiffener

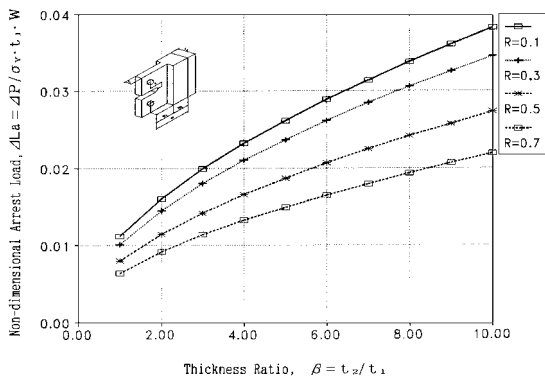


Fig. 7 Effect of stress ratio on FCAD chart

Fig. 7은, FCAD 차트의 응력비 의존성을 검토하기 위하여, Fig. 3~Fig. 6의 FCAD 차트에서 판폭비 조건이 $\omega=1$ 인 경우만을 선별하여 일괄 도시한 것으로서, 최상부에 R=0.1일 때의 Arrest 선도가 위치하고 그 하부에 R=0.3, 0.5, 및 0.7일 때의 Arrest 선도가 응력비

의 크기 순으로 배열되는 양상을 보이고 있다. 따라서 응력비가 큰 하중조건하에서는 Arrest 하중 ΔL_a 의 크기가 상대적으로 저하됨을 알 수 있으며, 이러한 ΔL_a 의 저하현상은 Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 FCAD 차트의 설정기준이 되는 ΔK_{th} 의 응력비 의존성에서 기인한 것으로 생각된다.

또한 Fig. 8은 R=0.3인 경우의 FCAD 차트에서(Fig. 4 참조) 판폭비와 두께비 조건이 각각 $\omega=1$ 이고, $\beta=2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$ 및 8.0인 일체형 보강판이 주어진 균열길이에서 Crack Arrest를 유발할 수 있는 하중조건을 식(2)로부터 계산하고, 그 결과를 『 $\Delta P_a - \lambda$ 』 관계로 도시한 것이다.

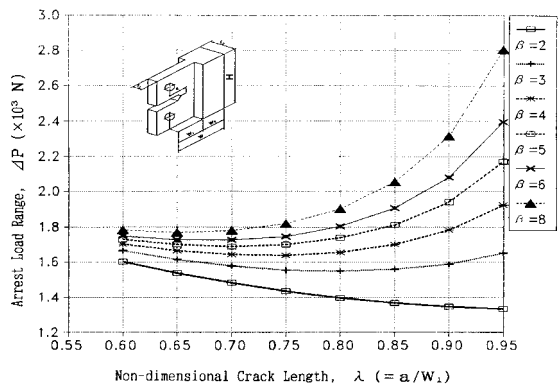


Fig. 8 Effects of crack length and thickness ratio on permissible arrest load

이 결과에서 “Arrest 허용하중에 대한 균열길이와 두께비의 영향”을 검토해보면, $\beta=2.0$ 인 보강판의 경우 주어진 균열길이가 클수록 Arrest 하중은 상대적으로 감소하는 양상을 보이고 있으나, 그 경향으로 보아 균열길이가 $\lambda=1$ 이상이 되면 점차 증가하는 양상을 보일 것으로 추정되며, $\beta \geq 3.0$ 인 보강판의 경우에는 주어진 균열길이가 크면 Arrest 하중도 점차 커지며, 그 증가율은 β 가 클수록 커지는 양상을 보이고 있다. 이와 같이 ΔP_a 가 상향되는 거동은 SIF의 변동거동을 지배하는 형상계수 $F_{IV}(\lambda, \beta)$ 의 감소거동으로 설명할 수 있다. 즉, Fig. 9에 예시된 보강판의 SIF 해석결과^[9]에 의하면, $F_{IV}(\lambda, \beta)$ 는 균열성장과 더불어 점차 감소하다가 보강경계 근방에서 급감하며, $F_{IV}(\lambda, \beta)$

의 감소율은 두께비가 클수록 증대된다. 따라서 주어진 균열길이가 크다는 것은 곧 그 균열선단이 보강경계에 근접되어 있음을 뜻하는 만큼, 그와 같은 영역에서는 $F_{IV}(\lambda, \beta)$ 의 감소율이 클 뿐만 아니라 ΔK_{IV} 의 감소율도 클 것 이므로, 상향된 ΔP_a 상태에서도 $\Delta K_{IV} \leq \Delta K_{th}$ 조건을 쉽게 만족시킬 수 있을 것이며, 또한 β 가 클수록 보강효과도 상대적으로 클 것이므로 Arrest를 유발시킬 수 있는 하중이 상향되는 거동은 당연한 결과라고 할 수 있겠다.

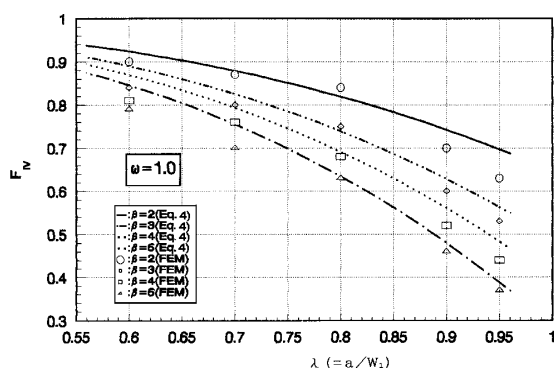


Fig. 9 Geometry factor F_{IV} of CT type integrally stiffened plates($\omega=1.0$)

이상과 같은 고찰결과를 종합해보면, 본 연구에서 얻어진 FCAD 차트는 보강판의 SIF 변동거동과 균열 성장특성이 함축된 설계 곡선군이라는 것을 알 수 있으며, 또한 용도상으로 보면, 특정 하중조건하에서 발생된 피로균열이 성장을 지속하다가 보강경계 근방에서 Arrest될 수 있는 보강 구조형상의 설계와 임의의 형상비를 갖는 일체형 보강판의 Arrest 설계시 허용하중의 설정에 활용할 수 있을 것으로 생각되나, 이 문제는 후속연구에서 검토하기로 한다.

4. 결 론

일체형 보강판의 피로균열 Arrest 가능성을 상정하고, 피로균열의 Arrest 설계시 지침이 될 수 있는 설계차트를 설정하여 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일체형 보강판의 균열정지능력(Crack Arrest Potential)은 보강판의 형상비에 의존하고, 보강경계 근방에서 Arrest를 유발시킬 수 있는 무차원 Arrest 하중 ΔL_a 는 판폭비와 두께비가 클수록 증대되는 경향을 나타내었으며, 이와 같은 ΔL_a 의 상향 거동은 보강판의 강성비에 의존하는 보강효과에서 기인한 것으로 생각된다.
2. FCAD 차트는 응력비에 의존하는 특성을 갖으며, 응력비가 클수록 하향 이동하는 경향을 갖는다. 따라서 동일한 형상비 조건일지라도 무차원 Arrest 하중은 응력비가 클수록 저하된다.
3. FCAD 차트를 이용하여 임의의 균열길이에서 Arrest를 유발시킬 수 있는 최대하중을 예측해 본 결과, 균열길이가 클수록 Arrest 허용하중도 커지며, 이와 같은 Arrest 허용하중의 증대거동은 두께비가 클수록 현저하였다.

또한, 본 연구에서 제안된 FCAD 선도는 일체형 보강판의 보강경계 근방에서 Arrest를 유발시킬 수 있는 보강 구조형상의 설계와 Arrest 허용하중의 예측 등에 활용할 수 있을 것으로 생각되나, 이에 관한 검증 문제는 후속 연구에서 논의하기로 한다.

참고문헌

1. Broek, D., "The Practical Use of Fracture Mechanics," Noordhoff, Netherland, pp. 115-392, 1986.
2. Rolfe, S. T. and Barsom, J. M., "Fracture and Fatigue Control in Structure - Applications of F.M.," Prentice-Hall, New Jersey, pp. 345-515, 1981.
3. H. Kitagawa, S. Toyohira and K. Ikeda, "A New Method of Arresting Fatigue Crack Growth by Artificial Wedge," Proc. of an Int. Con. on F.M. in Engineering Application, pp. 281-293, 1979.
4. Sridar, M. K., Basavarajappa, G. and Balasubramanian, N., "Control of Crack Propagation in Metals by the Use of Composites," Proc. of an Int. Con. on F.M. in Engineering Application, pp. 331-339, 1979.

5. Schijve, J., "Crack Stoppers and ARALL Laminates," Engineering F. M., Vol. 37, No. 2, pp. 405-421, 1990.
6. Pook L. P. and Greenan, A. F., "Fatigue Crack Arrest in Mild Steel Specimens under Constant Amplitude Loading," Fatigue Engineering Mater. & Struct., Vol. 7, No. 1, pp. 65-73, 1984.
7. 이환우, 이갑래, 석창성, 최용식, "변후재의 피로 균열 Arrest 거동(I)," 대한기계학회 '91년도 추계 학술대회 논문집, pp. 92-95, 1991
8. 이환우, 이갑래, 석창성, 최용식, "변후재의 피로 균열 Arrest 거동(II)," 대한기계학회 '92년도 춘계 학술대회 논문집(I), pp. 5-8, 1992
9. Rhee, H. W., Choy, Y. S., Yang, W. H. and 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.
10. 이환우, 이갑래, 최용식, "CT형 변후재의 광탄성 응력확대계수해석," 대한기계학회 '91년도 춘계 학술대회 논문집, Vol. I, pp. 55-58, 1991.
11. Rhee, H. W. and Choy, Y. S., "Prediction of Constant Amplitude Fatigue Crack Growth in the Variable Thickness Plates Having Discontinuous Thickness Interface," Proceedings of Asian-Pacific Con. on Fracture & Strength '93, p. 87, 1993.
12. ASTM STP 738 Appendix II, "Proposed ASTM Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," pp. 340-356, 1979.