

# 보강판의 균열거동해석과 Crack Arrest 설계(III) — Crack Arrest Design 차트의 실험평가

이의종\*, 이환우#

## Crack Growth Analysis and Crack Arrest Design of Stiffened Panels(III) — Experimental Evaluation of Crack Arrest Design Chart

Eui-Jong Rhee\*, Hwan-Woo Rhee#

### ABSTRACT

In order to assess the validity of fatigue crack arrest design charts obtained from our previous numerical approach to fatigue crack arrest condition, an extensive fatigue crack growth/arrest test was performed using CT-type integrally stiffened panels. The results are presented as fatigue crack growth rate and non-dimensional crack length relationship, and these are compared with numerically simulated crack growth rates. The measured values of  $da/dN$  at the moment of fatigue crack arrest occurred in stiffened panels are good agreement with those numerically simulated crack growth rates.

**Key Words** : Stiffened Panel(보강판), Crack Arrester(균열정지대), Fatigue Threshold(피로균열성장 하한계조건), Load Shedding Technique(하중감소기법), Effective Stress Intensity Factor(유효 응력확대계수)

### 1. 서 론

균열이 발생, 성장하여 불안정 파괴에 이르는 균열체의 수명이력(Life History)이 응력확대계수(Stress Intensity Factor : SIF)  $K$ 의 변동거동에 의존하고, 또한 피로균열성장속도  $da/dN$ 의 SIF  $K$  의존성<sup>[1-3]</sup>이 알려진 이후, 피로균열 문제에 대한 파괴역학적인 연구는 주로 균열성장거동의 해석과 수명예측 등에 치중되어 왔다<sup>[4]</sup>. 그러나 이와 같은 연구가 지향하는 궁극적인 목적은 모두 피로수명을 향상시키고 파괴파

괴를 방지하는데 있을 것이므로, 최근, 균열발생 제어(Crack Initiation Control)와 균열성장제어(Crack Growth Control) 개념이 포괄된 손상-허용 개선대책으로서 Crack Arrest 설계에 관한 연구가 주목되고 있다<sup>[5]</sup>.

이와 관련하여 일련의 본 연구에서는, 균열성장제어대책의 일환으로 피로균열의 Arrest 가능성을 상정한 다음, 그 실현 가능성을 검토하기 위하여 일체형 보강판의 피로균열정지설계(Fatigue Crack Arrest Design : FCAD) 차트를 설정하고<sup>[6]</sup>, 균열거동을 시뮬레이션 하여 제안된 FCAD 차트의 유용성을 수치적으로 검토한 바 있으나<sup>[7]</sup>, 제시된 디자인 차트의 실용 가능성과 신뢰도를 뒷받침할 수 있는 검증실험이 병

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

행되지 않았기 때문에, 본 연구의 제3보에서는 주어진 Arrest 허용하중과 보강경계 근방에서 균열성장 및 정지거동을 실험·평가한 후, 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 본 연구의 제1보<sup>[6]</sup>에서 설정된 FCAD 차트의 유용성을 재확인해 보기로 하였다.

## 2. 디자인 차트의 검증실험

실험은 검증목적에 따라 단계별로 (1) Arrest 허용하중( $\Delta P_a$ )의 실험평가 (2) 균열성장 및 정지(Arrest) 거동의 검증실험 순서로 진행되었다. 먼저 실험(1)은 임의의 균열길이에서 Arrest를 유발할 수 있는 하중을 결정한 다음, 그 결과를 수치계산 결과와 비교하고 또한 비교, 평가된 결과를 후속 실험의 하중설정 에 참고하기 위한 1단계 실험과정이다. 실험(2)는 주어진 하중조건하에서 균열이 성장하다가 보강경계 근방에서 성장을 지속하거나 정지되는 거동을 관찰한 다음, 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교, 평가하기 위한 2단계 실험과정이다. 실험(1)과 (2)는 시험방법상의 차이는 있으나 실험에 사용된 소재는—시편의 두께비 조건에 따라 후판이 요구되는 특성을 고려하여—모두 SA-508 class 3 압력용기용 단조강을 사용하였으며, 인장실험결과에서 얻어진 동 재료의 주요 기계적인 성질을 요약하면 Table 1과 같다.

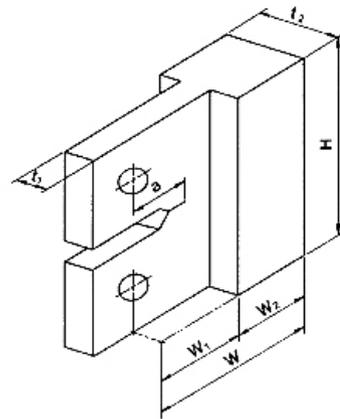
**Table 1 Mechanical properties of SA-508 class 3**

Temp. (°C)	Yield Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Young's Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )
20	46.8	60.9	27.5	$2.1 \times 10^4$

시편의 형상은 Fig. 1에 도시되어 있는 바와 같이 두께가  $t_1$ 인 박판의 양면에 판 폭이  $W_2$ 인 동질의 보강재가 두께방향으로 덧붙여진 형상으로서, 박판부에 존재하는 균열이 보강경계를 향하여 성장해가는 박·후판 결합형(Thin-to-Thick Type)이다.

한편, 균열성장거동에 관여하는 형상 파라미터로서 보강판의 판폭비  $\omega(=W_2/W_1)$ 와 두께비  $\beta(=t_2/t_1)$ 는 실험목적에 따라 각기 달리 설정하였다. 즉, 실험(1)의 경우, 시편의 형상비 조건은 모두  $\omega=1.0$ 과  $\beta=3.0$ 으로

일정한 반면에 균열길이를 각각  $\lambda(=a/W_1)=0.6\sim 1.0$  범위에서 7단계로 변화시켰으며, 실험(2)의 경우에는  $\omega=1.0$ 인 Arrest 곡선을 검증대상으로 선정하였기 때문에 판폭비는 모두  $\omega=1.0$ 으로 고정하고 두께비만 각각  $\beta=3.0, 4.0, 5.0$  및  $6.0$ 과 같이 변화시켰다. 참고로, 기계가공 된 노치선단의 형상은 모두 세브론(Chevron)형으로 가공하였으며, 예비균열(Pre-crack)의 길이는 노치 선단으로부터 약 3mm 정도가 되도록 하였다.



**Fig. 1 Geometry of CT-type stiffened panel**

또한 실험(1)은 전술된 바와 같이 주어진 균열길이에서 보강판의 SIF  $\Delta K_{IV}$ 가 피로균열의 Arrest 조건을 만족할 수 있는 Arrest 하중을 검증하는 과정이므로, 실험방법은 피로균열성장 하한계 조건(Fatigue Threshold)  $\Delta K_{th}$ 의 실험평가에 보편적으로 활용되고 있는 하중제어방식 K-감소(Load-controlled K Reduction) 피로시험법을<sup>[8]</sup> 이용하였다. 이 실험에서  $\Delta K$ -감소는 균열이 약 0.5mm 성장할 때마다 직전 하중의 10% 범위 내에서  $\Delta P$ 를 단계적으로 감소시키는 하중감소 기법(Load Shedding Technique)을 이용하였으며, 초기 하중은 주어진 균열길이에서  $\Delta K_{IV}=\Delta K_{th}$ 가 될 수 있는 Arrest 하중을 예측한 다음, 예측된 Arrest 하중의 1.5배를 기준으로 하여 모델에 따라 다소 가감 조정 하였다.

실험(2)는, 균열이 성장하여  $\lambda=1$  근방에서 Arrest되는 거동을 관찰하는 실험이므로, 통상적인  $\Delta P$ -일정

하중제어방식의 피로시험법을<sup>[9]</sup> 준용하였으며, 하중 설정은 실험(1)의 결과와 Arrest 하중의 예측결과를 참고하여  $\Delta P = 1.2\Delta P_a$ 가 되도록 하였다.

끝으로, 실험(1)과 (2)에서 피로하중은 모두 MTS 810 시스템을 이용하여 응력비가  $R=0.3$ 인 30Hz 정현 파형으로 부하되었으며, 균열성장거동의 관찰은 이동식 디지털 현미경을 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

먼저, 본 연구의 제1보<sup>[6]</sup>에서 얻어진 일체형 보강판의 피로균열 Arrest 조건에 대한 수치해석결과 중에서 검증실험결과와 직접 비교하게 될 주요 해석결과를 예시하면 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 이 중 Fig. 2는  $R=0.3$ 인 경우의 피로균열정지설계(FCAD) 차트이며, 또한 Fig. 3은 Fig. 2에서 판폭비가  $\omega=1$ 이고 두께비가 각각  $\beta=2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$  및  $8.0$ 인 일체형 보강판이 주어진 균열길이에서  $\Delta K_{IV} = \Delta K_{th}$ 를 만족시킬 수 있는 하중조건을 수치계산한 다음, 그 결과를 “무차원 Arrest 하중  $\Delta P_a$ 와 무차원 균열길이  $\lambda$ ” 사이의 관계로 도시한 것이다.

실험(1)의 경우, Fig. 3의 『 $\Delta P_a - \lambda$ 』 선도에서 판폭비와 두께비가 각각  $\omega=1.0$ 이고  $\beta=3.0$ 인 일체형 보강판의 Arrest 하중선도를 검증실험 대상으로 선정한다. 임의의 균열길이에서 균열정지거동을 초래할 수 있는 Arrest 하중  $\Delta P_a$ 를 실험, 평가하고,  $\Delta P_a$ 의 실험치와 계산치를 비교하였으며, 그 결과를 도시하면 Fig. 4와 같다.

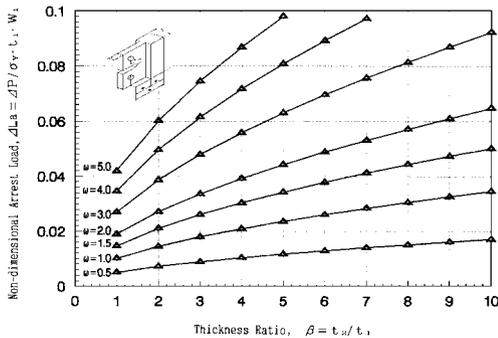


Fig. 2 FCAD chart for SA-508 integrally stiffened panels at  $R=0.3$

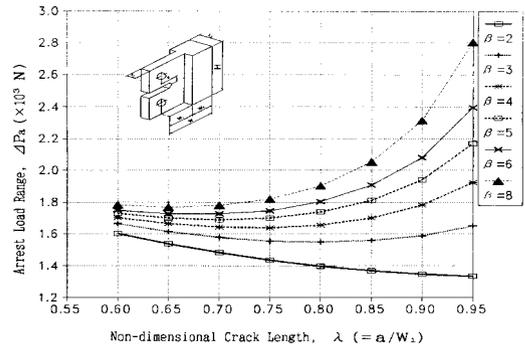


Fig. 3 Effects of crack length and thickness ratio on the permissible arrest load

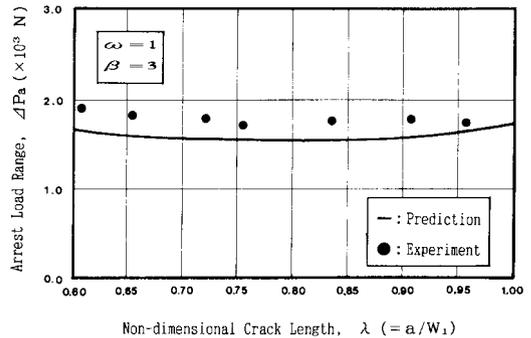


Fig. 4 Comparison of analytical and experimental arrest loads at  $R=0.3$

이 결과에 의하면, 검증실험 결과에서 얻어진 Arrest 허용하중은 대체로 본 연구의 제1보에서 수치계산된  $\Delta P_a$ 에 비해 평균 10% 정도 큰 것으로 평가되었다. 이와 같은 두 결과 사이의 차이는 Crack Arrest의 정의에서 1차적인 요인을 찾을 수 있겠다. 즉, 피로균열성장속도를 기준으로 한 ASTM의 Crack Arrest에 대한 정의에 의하면, 피로균열성장속도가  $da/dN = 10^{-7} \text{mm/cycle}$  이하로 둔화될 경우 Crack Arrest 상태로 규정하고 있으며<sup>[8]</sup>, 본 연구에서는 이와 같은 ASTM의 정의에 따라 피로균열성장속도가  $da/dN = 10^{-7} \text{mm/cycle}$ 에 이르면 일단 Crack Arrest 상태로 간주하고 실험을 중단하였다. 그러나 실제의 경우 균열은  $10^{-8} \text{mm/cycle}$  이하로 성장할 수 있으며, BS(British Standard)에서는 피로균열정지개시조건(Fatigue Crack Arrest Threshold)을  $da/dN \leq 10^{-8} \text{mm/cycle}$ 으로 규정하

고 있다<sup>9)</sup>. 따라서 실험시간에 여유를 두고 균열거동을 충분히 관찰할 경우 두 결과를 훨씬 근사시킬 수도 있을 것으로 생각되지만, 실용설계를 목적으로 한 공학적 해석에서 10% 정도의 오차는 크게 문제시 될 만한 정도는 아니므로, 본 연구에서 제안된 FCAD 차트는 검증실험결과에서 보인 오차범위 내에서 일체형 보강판의 Arrest 허용하중의 설정과 예측 등에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

한편, FCAD 차트를 이용한 시뮬레이션 결과를 뒷받침하기 위하여 수행된 실험(2)에서는, Fig.2의 FCAD 차트에서  $\omega=1.0$ 이고 두께비가 각각  $\beta=3.0, 4.0, 5.0$  및  $6.0$ 인 모델을 선정하여,  $\lambda=1$  근방에서의 균열성장/정지거동을 실험, 평가하고—본 연구의 제2보<sup>7)</sup>에서와 같이—식(1)을 수치적분하여 일체형 보강판의 균열성장거동을 시뮬레이션한 다음, 그 결과를 실험(2)의 결과와 비교하였다.

$$\frac{da}{dN} = B\Delta K_{eff}^2 \quad (1)$$

위 식에서 B는 재료상수이고  $\Delta K_{eff}$ 는, 식(2)에 표시된 CT형 보강판의 응력확대계수  $\Delta K_{IV}$ 와 피로균열성장 하한계 조건  $\Delta K_{th}$ 의 차로 정의되는, 유효 응력확대계수 폭(Effective Stress Intensity Factor Range)이다.

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

여기서

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

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

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

Fig. 5 ~ Fig. 8은 검증실험과 시뮬레이션 결과에서 얻어진 피로균열성장거동을 『a - N』 관계로 도시하여 비교한 것이다. 이 결과에 의하면, 균열성장 초기 단계에서는 두 결과가 대체로 일치하는 양상을 보이고 있으나, 균열이 성장하여 보강경계(a=40mm)에 근

접하는 과정에서 양자 간의 차이가 점차 커지는 양상을 보이고 있다. 또한 두 결과의 균열성장거동을 『a - N』 곡선의 형상으로 비교해보면, 실험결과에서는 균열이 보강경계에 근접함에 따라 『a - N』 곡선의 기울기가 현저하게 둔화되는 양상을 보이고 있으나, 시뮬레이션 결과에서는 대체로 균열성장둔화거동이 매우 완만하게 진행되어 균열이 보강경계를 상회하여 어느 정도 성장한 연후에 정지되는 양상을 보이고 있다. 이와 같은 시뮬레이션 결과상의 완만한 균열성장 둔화거동은 실험자의 경험으로 볼 때 균열선단이 보강경계에 도달하게 되면 원호형 내부균열(Internal Crack)로 성장하는 과정에서 상당 기간동안 균열성장 정체현상이 유발되기 때문에 전혀 물리적인 의미가 없는 것은 아니나, 직접적인 원인은 균열성장을 실험 목적에 따라 의도적으로 보강경계 근방까지 유도하기

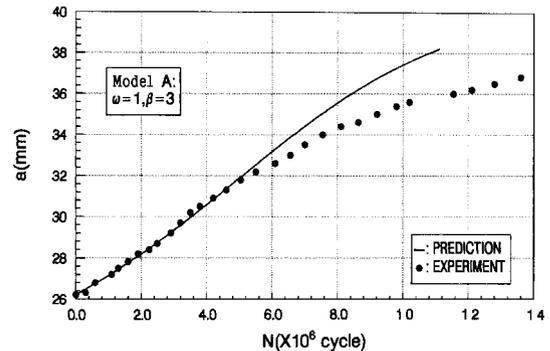


Fig. 5 Comparison of analytical and experimental crack growth behavior ( $\omega=1.0, \beta=3.0$ )

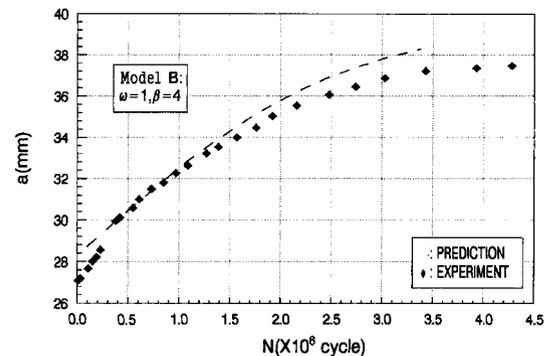


Fig. 6 Comparison of analytical and experimental crack growth behavior ( $\omega=1.0, \beta=4.0$ )

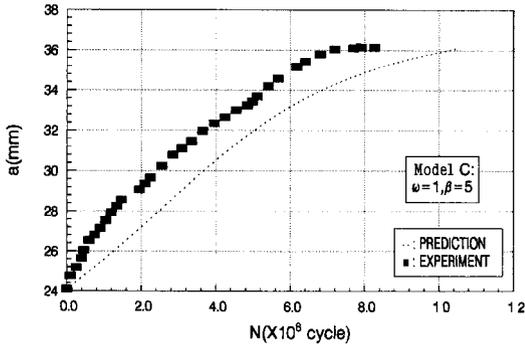


Fig. 7 Comparison of analytical and experimental crack growth behavior ( $\omega=1.0$ ,  $\beta=5.0$ )

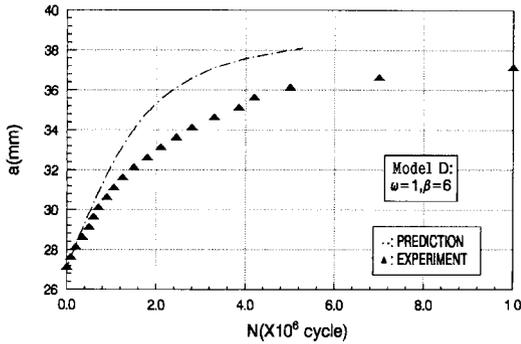


Fig. 8 Comparison of analytical and experimental crack growth behavior ( $\omega=1.0$ ,  $\beta=6.0$ )

위하여 피로하중조건을 Arrest 허용하중의 1.2배로 설정했기 때문인 것으로 생각할 수 있겠다. 다시 말해서, 본 연구의 제1보<sup>[6]</sup>에서 설정된 FCAD 차트는  $\lambda=0.95$ 에서  $\Delta K_{IV}=\Delta K_{th}$  조건을 만족하는 하중과 형상비 사이의 관계 선도로서, 식(2)에서 알 수 있듯이,  $\beta$ 를 일정하게 하고  $\Delta P$ 를 상향 조정할 경우  $\Delta K_{IV}=\Delta K_{th}$  조건을 만족시킬 수 있는 무차원 균열길이  $\lambda$ 의 기대치는  $\lambda=0.95$  보다 큰 값으로 예측될 수밖에 없기 때문이다. 또한 실험과 시뮬레이션 결과에서 보이고 있는 양자 간의 차이는 SIF의 수치해석과  $da/dN$ 의 수치적분 과정에서 누적된 오차를 비롯한 균열성장 하한계 조건의 실험평가와 본 실험과정에서 개재될 수 있는 균열길이 측정상의 오차 등을 감안할 때 충분히 예상할 수 있는 범위의 오차라고 할 수 있다.

Fig. 9~Fig. 12는 상술된 『a - N』 관계를 피로균열

성장속도 기준으로 고찰하기 위하여 『 $da/dN - \lambda$ 』 관계로 재정리한 것이다. 이 결과에 의하면  $\lambda < 0.90$  영역에서는 실험결과와 시뮬레이션 결과가 대체로 잘 일치하고 있으나,  $\lambda > 0.90$  영역에서는 『a - N』 관계에서 시사된 바와 같이 두 결과 사이의 차이가 다소 커지는 양상을 보이고 있다. 이와 같은 현상의 원인에 대해서는 이미 『a - N』 관계를 고찰하는 과정에서 충분히 언급되었기 때문에 차치하기로 하고, 이 결과에서 주목해야 할 관찰사항을 소개하면 다음과 같다. 즉, 실험결과의 경우 대체로  $\lambda=0.95$  근방에서 피로균열성장속도가 ASTM에 규정된 Crack Arrest 속도  $da/dN=10^{-7}$ mm/cycle에 근사하고 있으며, 또한 시뮬레이션 결과에서도  $\lambda$ 의 기대치에 차이는 있으나—균열이  $\lambda=1.0$ 에 근접하게 되면 균열성장속도가 급격하게 감소되어 Crack Arrest 속도에 근접할 수 있는 가능성을 보이고 있다.

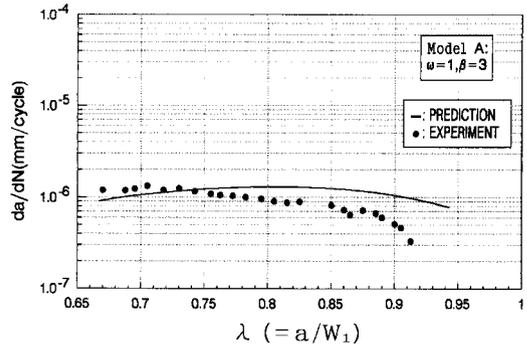


Fig. 9 Comparison of analytical and experimental crack growth rates( $\omega=1.0$ ,  $\beta=3.0$ )

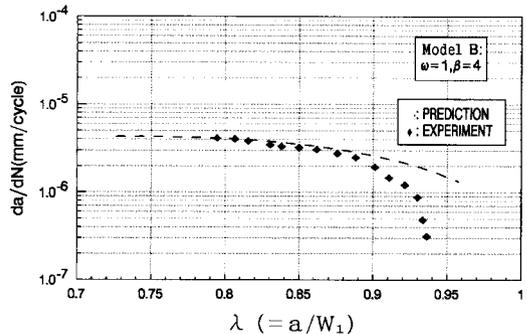


Fig. 10 Comparison of analytical and experimental crack growth rates( $\omega=1.0$ ,  $\beta=4.0$ )

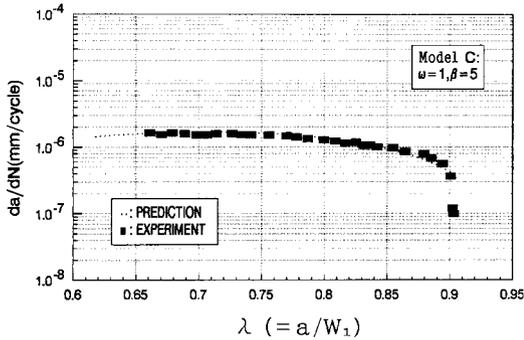


Fig. 11 Comparison of analytical and experimental crack growth rates( $\omega=1.0$ ,  $\beta=5.0$ )

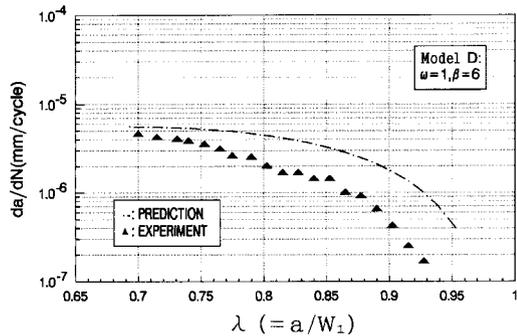


Fig. 12 Comparison of analytical and experimental crack growth rates( $\omega=1.0$ ,  $\beta=6.0$ )

끝으로 이상과 같은 고찰사항을 종합해보면, 비록 가속시험의 형태로 진행된 검증실험이지만, Arrest 허용하중의 평가결과는 평균 10% 정도의 오차 범위 내에서 FCAD 차트를 이용한 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였으며, Growth/Arrest 시험결과 또한  $0.95 \leq \lambda \leq 1.0$  영역에서 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 FCAD 차트는 일체형 보강판의 균열정지설계와 보수계획 수립에 참고할 수 있는 피로설계기준으로 활용 가능할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

FCAD 차트의 실용 가능성을 뒷받침하기 위하여

검증실험을 수행하고 그 결과를 균열성장/정지거동의 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, 주요 고찰 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Arrest 허용하중의 실험평가결과는 FCAD 차트를 이용한 시뮬레이션 결과와 평균 10%의 오차 범위 내에서 서로 잘 일치하였다.
2. FCAD 차트에서 임의로 선정된 일체형 보강판에 대한 Growth/Arrest 시험결과의 경우, 보강경계 근방에서 관찰된  $da/dN$ 의 둔화거동은 시뮬레이션 결과와 다소 차이가 있었으나,  $0.95 \leq \lambda \leq 1.0$  영역에서의 피로균열성장속도가 모두 Crack Arrest 상태에 상응하는  $da/dN=10^{-7}$  mm/cycle에 근접함을 알 수 있었다.
3. 위와 같은 결론(1)과 (2)를 종합해보면, 본 연구에서 제안된 FCAD 차트는 보강경계 근방에서 균열정지거동을 유발시킬 수 있는 일체형 보강판이나 이에 준하는 경계조건을 갖는 구조물의 Arrest 허용하중의 예측과 구조형상 설계에 실용할 수 있을 것으로 생각된다.

다만 검증실험이 제한된 범위에서 수행된 것을 감안할 경우, 보다 정교하게 FCAD 차트를 개선하기 위해서는 광범위한 형상비와 하중조건하에서 조직적인 검증실험이 후속되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 경남대학교 학술 장려금의 일부로 수행되었으며, 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Paris, P. C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Trans ASME, J. Basic Engng, Vol. 85, No. 4, pp. 528-534, 1963.
2. Forman, R. G., Kearney, V. E. and Engle, R. M. "Numerical Analysis of Crack Propagation in a Cyclic-loaded Structure," Trans. ASME, J. Basic Engng, Vol. 89, No. 3, pp. 459-464, 1967.
3. Walker, K., "The Effect of Stress Ratio During

- Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum,” ASTM STP 462, pp. 1-14, 1970.
4. Miller, M. S. and Gallagher, J. P., “An Analysis of Several Fatigue Crack Growth Rate Descriptions,” ASTM STP 738, pp. 205-251, 1981.
  5. Schijve, J., “Crack Stoppers and ARALL Laminates,” Engng. F.M., Vol. 37, No. 2, pp. 405-421, 1990.
  6. 이의중, 이환우, “보강판의 균열거동해석과 Crack Arrest설계(Ⅰ)－Crack Arrest 설계기준의 수치해석,” 한국기계가공학회지, 제4권, 제2호, pp. 43-49, 2005.
  7. 이의중, 이환우, “보강판의 균열거동해석과 Crack Arrest 설계(Ⅱ)－Crack Arrest 거동의 시뮬레이션,” 한국기계가공학회지, 제4권, 제2호, pp. 50-56, 2005.
  8. Bucci, R. J., “Development of a Proposed ASTM Standard Test Method for Near Threshold Fatigue Crack Growth Rate Measurement,” ASTM STP 738, pp. 5-28, 1981.
  9. ASTM Designation: E647-83, “Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10<sup>8</sup>m/Cycle,” 1985.
  10. David Taylor, Fatigue Threshold, Butterworth Publishers, London, UK, pp. 10-181, 1989.