

<논 문>

몬테카르로 시뮬레이션에 의한 SiC_w/Al 복합재료의 피로수명예측

안정주* · 권재도** · 김상태**

(1995년 10월 25일 접수)

Fatigue Life Prediction of SiC_w/Al Composites by Using the Monte-Carlo Simulation

Jeong-Ju Ahn, Jae-Do Kwon and Sang-Tae Kim

Key Words: Metal Matrix Composites(금속기지 복합재료), Monte-Carlo Simulation(몬테카르로 시뮬레이션), Fatigue Crack Growth Life Prediction(피로균열진전수명예측), Probability Distribution(확률분포), Random Number(난수)

Abstract

It requires much time and cost to obtain the fatigue crack growth life and fatigue crack growth path morphology from the fatigue crack growth tests. In this study, the Monte-Carlo simulation program was developed to predict the fatigue crack growth life and fatigue crack growth path morphology of metal matrix composites. Fatigue crack growth lives of 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% SiC_w/Al composites were predicted by using the Monte-Carlo Simulation. And the fatigue crack growth lives of 25% SiC_w/Al and Al matrix from Monte-carlo simulation were compared with fatigue life from experiments in order to verify the accuracy of Monte-Carlo simulation program.

1. 서 론

금속기지 복합재료(metal matrix composites; MMC)는 뛰어난 재료특성으로 인해 스포츠 용품에서 우주·항공 및 군수품에 이르기까지 그 사용 범위를 넓혀가고 있다. 따라서 MMC의 제조기술뿐 아니라 기계적 특성을 파악하기 위해서 많은 노력을 기울이고 있으며 특히 기계 구조물의 수명에 큰 영향을 미치는 피로특성의 파악을 위해 활발히 연구^(1~11)가 진행되고 있다.

그러나 MMC의 피로특성을 파악하기 위한 대부분

의 연구 결과들은 피로균열진전시험을 통해서 얻어진 것들이다. 또한 피로균열진전시험을 통해, 체적비, 보강재의 배향 방향, 온도 및 주위 환경 등 다양한 조건하에서 MMC의 피로균열진전수명을 예측하기 위해서는 많은 경비와 노력이 필요하게 된다.

따라서 피로균열진전수명을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 예측하기 위한 연구^(12~14)들이 활발히 진행되고 있으며, 이와 같은 연구들은 주로 강재들에 대해 이루어져 왔으며, 신뢰성 있는 강재의 피로수명예측을 위해 몬테카르로 시뮬레이션이 이용되고 있다. 그러나 MMC에 대한 피로수명예측을 위한 연구의 예는 찾아보기 어렵다. 또한 등방성 재료보다 제조과정부터 많은 확률변수들을 갖고 있는

*영남대학교 대학원 기계공학과

**회원, 영남대학교 기계공학과

MMC의 보다 정도 높은 피로수명예측을 위해서는, Monte-Carlo 시뮬레이션이 매우 유용할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 SiC_w/Al 복합재료 및 Al 모재의 피로균열진전시험을 통해서 얻은 통계적 결과⁽²⁾들을 기초로 하여, SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명 및 피로균열진전경로형상을 예측할 수 있는 Monte-Carlo 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 그 후, 피로균열진전시험을 통해서 얻은 25% SiC_w/Al 복합재료 및 Al 모재의 피로균열진전수명들과 Monte-Carlo 시뮬레이션에서 예측된 피로균열 진전수명을 비교해 시뮬레이션의 신뢰성을 검증하였다. 또한 5%에서 30%까지 체적비를 변화시켜 가며, SiC_w/Al 복합재료의 체적비에 따른 피로균열진전수명을 예측해 보았다.

2. 피로균열진전시험

2.1 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전 양상

피로균열진전시험 결과는 저자들이 기 발표한^(1,2) 바와 같이 6개의 시험편으로부터 얻은 총 24개의 피로균열진전 데이터가 있다. Fig. 1에는 SiC_w/Al 복합재료 및 Al 모재에 대해 피로균열진전시험을 수행하고 난 후, 얻어진 대표적인 피로 파단면 형상의 예를 나타내었는데, 여기서, (a)는 Al 모재이고 (b), (c) 및 (d)에는 SiC_w/Al 복합재료의 피로 파단면 형상이다. 동 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Al 모재의 피로균열진전경로형상은 하중 방향

과 수직인 한가지 형상으로 나타났으나, 25% SiC_w/Al 복합재료의 피로균열 진전 경로 형상은 세 타입으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1의 (b)와 같이 인공노치 양쪽의 균열이 모두 하중 방향과 수직인 경우를 A 타입(type)으로, (c)와 같이 한쪽 균열은 하중방향과 임의의 각도를 가지며 반대편 균열은 하중방향과 수직인 경우를 B타입으로 그리고 (d)처럼 양쪽 균열이 모두 하중방향과 임의의 각도일 때를 C 타입으로 정의하였다. 이와 같이 SiC_w/Al 복합재료가 다양한 피로균열진전경로형상을 나타내는 원인에 대해서는 전보⁽¹⁾에서 언급한 바 있다.

또한 저자들의 연구 결과⁽²⁾에 나타난 바와 같이 Al 모재 및 SiC_w/Al 복합 재료의 피로균열진전법칙에서의 지수 m 은 정규분포를, C 는 대수정규분포를 따른다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 m 과 C 사이의 관계는 $C=A \times B^m$ 로 나타낼 수 있음도 확인하였다.

2.2 경사방향의 피로균열진전속도

SiC_w/Al 복합재료의 경우, Fig. 1에서 나타난 바와 같이 균열이 경사지게 진전할 때도 있으므로 이를 컴퓨터를 이용해 재현하기 위해서는 피로균열진전속도를 수직 및 수평방향 성분으로 분리하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 즉, Fig. 2과 같이 피로 균열의 진전량을 거시적으로 보면, 경사균열의 진전량 Δa 처럼 보이지만 이를 미시적으로 관찰한다면 수직 및 수평방향성분들의 합인 Δa_v 및 Δa_H

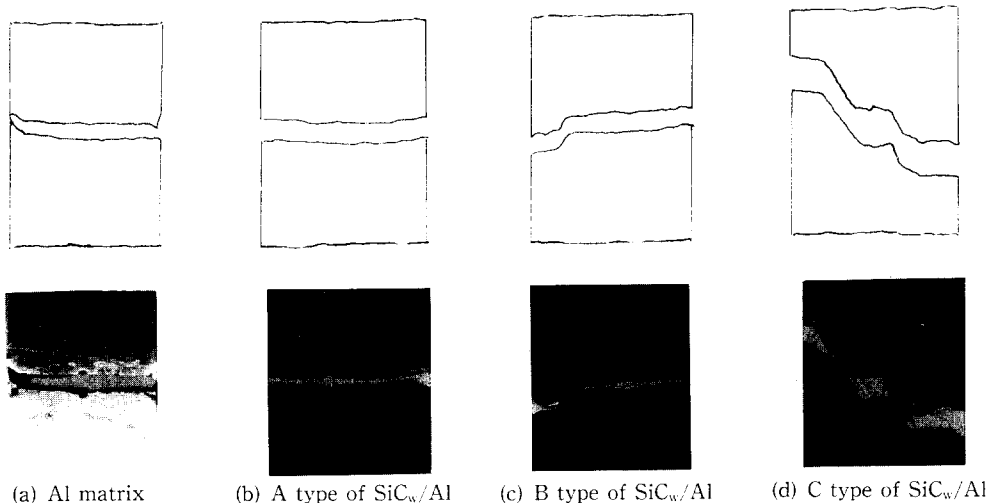


Fig. 1 Fatigue specimen photograph & scheme after fatigue crack growth test

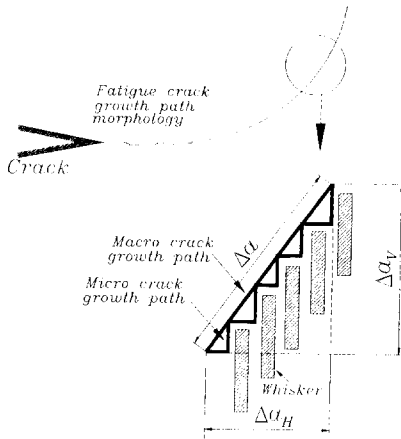


Fig. 2 Fatigue crack growth length component that used in the Monte-Carlo simulation

로 나눌 수 있다. 따라서 본 연구에서는 경사균열의 진전량을 수직 및 수평방향성분으로 나누었으며 각 성분들에 대해 다음과 같은 가정을 설정하였다.

Fig. 2에서와 같이 피로균열이 수평방향으로 진전할 경우, 피로균열진전속도는 Al 보재의 경우와 같다고 가정하였다. 한편 수직방향 피로균열진전속도 성분은 수평방향의 피로균열길이 증가할수록 증가할 것이며, 또한 수평방향으로 동일한 피로균열길이인 경우, 수평방향으로부터의 각도가 커질수록 수직방향의 피로균열진전속도 성분은 증가할 것이다.

이와 같은 관점에서 Fig. 3에 나타난 바와 같이 경사균열을 모드 I 균열로 등가화시키는 식 (1)을 이용하여 경사균열을 모드 I 균열⁽³⁾로 등가화시킨 후, Tada⁽¹²⁾의 식을 이용하여 등가경사균열의 응력확대계수를 추정하는 방법을 사용하였다.

$$a_{eq} = a \times [\cos^2 \beta^* C_{11}(a^*) + \sin^2 \beta^* \cos^2 \beta^* C_{12}(a^*)]^2 \quad (1)$$

여기서,

$$C_{11} = \frac{3}{4} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\alpha}{2}\right)$$

$$C_{12} = -\frac{3}{4} \left[\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \sin\left(\frac{3\alpha}{2}\right) \right]$$

β^* = 주균열과 X축이 이루는 각도

α^* = 주균열 선단과 경사균열이 이루는 각도

a_{eq} = 모드 I 등가 균열의 길이

a = 주균열의 길이

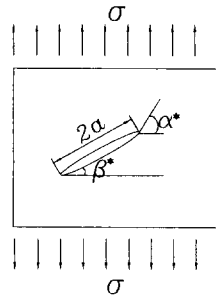


Fig. 3 Scheme of Mode I equivalence crack

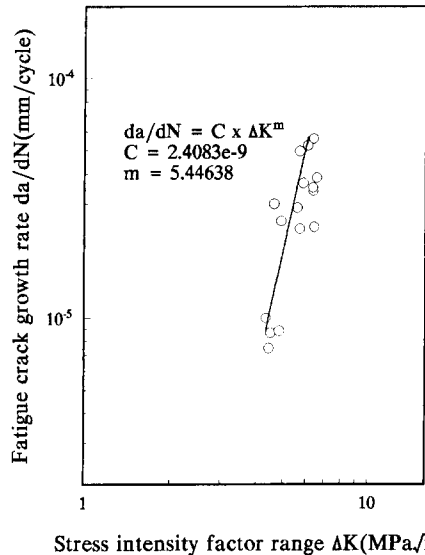


Fig. 4 Stress intensity factor range vs. fatigue crack growth rate of vertical direction in the B and C type SiC_w/Al composites

한편 피로균열진전시험에서 얻은 B 및 C 타입의 경사균열들을 식 (1)로부터 구한 모드 I 등가균열을 사용하여 응력확대계수범위 ΔK 를 구하였으며, 피로균열진전시험 도중에 채취한 '표면 레프리카를 현미경에서 측정하여 수직방향에 대한 $a-N$ 관계를 구하고 이 결과로부터 secant 방법을 이용해 수직방향의 피로균열진전속도 da/dN 을 계산하였다. Fig. 4에는 이와 같이 구한 수직방향의 $\Delta K \cdot da/dN$ 의 관계를 나타내었으며, 최소 자승법에 따라 구한 수직방향의 피로균열진전지수 m 및 상수 C 를 구해 동 그림의 내부에 나타내었다.

3. Monte-Carlo 시뮬레이션 프로그램

3.1 시뮬레이션에 사용된 가정

SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명을 예측하기 위해서는 보강재의 개수, 위치(x, y), 길이, 직경, 보강재의 배열방향, 균열이 휘스커를 만난 경우 진전방향, 모재 및 보강재의 피로균열진전지수 m 및 상수 C , 파단시 균열길이(a_f) 등이 통계량이 되어 난수로 취급되어야 할 것으로 생각된다. 그러나 SiC_w/Al 복합재료인 경우, 피로파단될 때까지 균열이 휘스커를 우회하는 것으로 알려져 있으므로^(4~11) 즉, 균열이 보강재를 관통하지 못하므로 보강재의 m 및 C 값은 본 프로그램에서는 사용하지 않았다. 또한 보강재의 배열방향도 피로균열진전수명에 영향을 미치지 않음은 입증할 경우, 휘스커는 가압방향에 대해 수직하게 배향하려는 성질이 있으며, 압출과정을 거치고 난 후 SiC_w/Al 복합재료의 미세조직 사진에서 보강재의 배열방향이 압출방향이라는 것이 확인되었으므로 난수로 취급하지 않았다. 그러나 파단시 피로균열길이는 확률변수로 취급되어지는 것이 바람직하지만, 이에 대한 실험결과가 충분하지 못하여 확률변수로는 취급하지 못하였다.

아울러 본 Monte-Carlo 시뮬레이션에서는 다음과 같은 가정들을 토대로 하여 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명을 예측하는 프로그램을 작성하였다.

(1) 휘스커가 없는 영역을 진전할 때의 피로균열진전속도는 Al 모재만이 저항이 되므로 Al 모재의 피로균열진전속도와 동일하다 가정하고(Fig. 5의 case 1 참조) Al 모재의 m 및 C 의 값을 사용하였다.

(2) 피로균열이 휘스커를 만날 경우, 균열은 휘스커를 우회해서 진전한다는 기존 및 저자들의 연구 결과^(4~11)로부터 우회하는 것으로 가정하였으며 우회 조건은 균열이 휘스커를 만나는 위치에서 휘스커의 끝까지의 거리가 가까운 쪽으로 우회하는 것으로 하였으며, 휘스커 길이의 중앙에서 만날 경우는 난수로서 피로균열진전방향을 결정하였다.(Fig. 5의 case 2 참조)

(3) 휘스커가 두 개 이상 서로 겹쳐져 있는 경우, 겹쳐져 있는 부분이 휘스커 길이의 5% 이내이면 피로균열은 휘스커의 겹친 부분 사이로 관통하

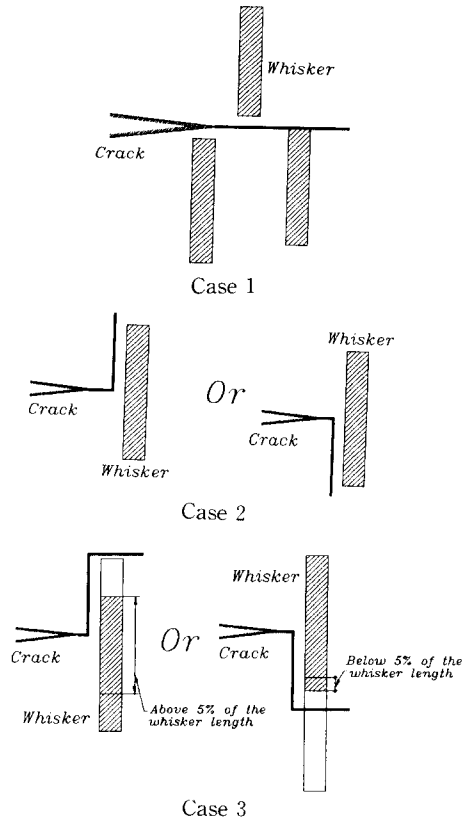


Fig. 5 Fatigue crack growth model

고 5% 이상이면 피로균열은 휘스커를 우회하는 것으로 가정하였다. (Fig. 5의 case 3 참조)

(4) 수평방향 피로균열의 응력확대계수는 Tada의 식을, 경사피로균열의 응력확대계수의 계산은 경사균열의 길이곱 모드 I 등가균열길이⁽³⁾로 환산한 후 Tada의 식으로 계산하였다. 또한 피로균열진전속도의 계산은 Paris의 식을 이용하였다.

(5) 복합재료의 체적비는 면적비와 동일한 것으로 하였다.

(6) 피로균열진전시험에 사용한 시험편의 치수에 비해 휘스커 길이(10~20 μm) 및 직경(0.5~1 μm)이 너무 작기 때문에, 휘스커의 아스펙비(aspect ratio)를 사용하여 화면상에 휘스커를 나타내었으며, 화면상에 나타난 하나의 휘스커는 실제 다수의 휘스커가 동일 위치에 모여 있는 것으로 가정하였다.

3.2 피로균열진전수명예측 프로그램의 흐름도

SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명을 예측하

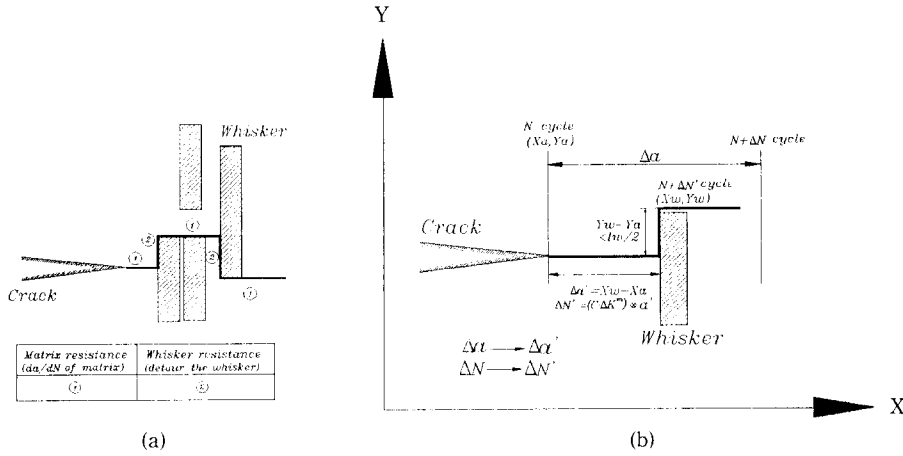


Fig. 6 Fatigue crack growth path in the Monte-Carlo simulation

기 위한 Monte-Carlo 시뮬레이션에는 기본적인 입력변수로는 반복하중($\Delta\sigma$), 시험편 폭(W), 두께(t), 초기 균열의 길이(a_i), 파단시 균열길이(a_f), 파단시 응력확대계수범위(ΔK_f), Al 소재의 피로균열진전지수 m 의 평균 및 표준편차(μ_m, σ_m) 및 상수, $C, C=A \times B^m$ 에서 상수 A 및 B 그리고 하중 반복횟수 증가분(ΔN) 등이 있다. Fig. 6의 (a) 및 (b)는 본 Monte-Carlo 시뮬레이션에 의해 피로균열이 진전해 가는 과정을 도식적으로 나타낸 것이며, Fig. 7에는 Monte-Carlo 시뮬레이션의 흐름도(flow chart)를 나타내었다.

피로균열진전시험에 사용한 시험편의 치수와 휘스커의 평균 직경 및 길이는 큰 차이를 가지고 있기 때문에, 실제 치수대로 화면상에 나타낸다면 휘스커는 점으로 밖에 나타나지 않는다. 따라서 가정 6에 따라 휘스커의 아스펙트(실제 10~40)를 기준으로 하여 화면상에 나타내었다. 따라서 체적비에 따른 휘스커 개수의 계산은 화면상에 나타나는 휘스커 평균길이 및 직경을 사용하여 구하였다. 그 후 휘스커 개수만큼 휘스커의 발생 위치(x, y)를 난수로 발생시켜 결정하였다. SiC_w/Al 복합재료 제조시 사용된 휘스커 직경의 평균은 0.75 μm , 표준편차는 0.083이며, 길이의 평균은 15 μm , 표준편차는 1.667이다. 이들값을 이용하여 먼저 휘스커의 길이(l_w) 및 직경(d_w)을 난수로 발생시켰다. 또한 소재의 피로균열진전지수 m 이 정규분포⁽²⁾를 따르므로 피로균열진전지수의 평균과 표준편차를 이용해 m 을 난수로 결정하였으며, 피로균열진전상수

C 는 $C=A \times B^m$ 의 관계식에서 구하였다.

이와 같은 방법으로 휘스커 위치, 길이, 직경 및 피로균열진전지수 m , 상수 C 가 정해지면 식 (2)와 같이 Paris의 피로균열진전법칙을 적분하여 피로균열진전량(Δa)을 계산하였다.

$$\Delta a = \int (C \cdot \Delta K^m) \times \Delta N \tag{2}$$

Fig. 6의 (a)는 피로균열이 진전할 때 휘스커를 만나기 전에는 소재의 저항으로 진전하나 휘스커를 만나면 휘스커 저항에 의해 수직방향으로 진전해 가는 것을 도식화한 것이며, Fig. 6의 (b)는 균열길이 a 인 경우 N 사이클에서 $N + \Delta N$ 사이클 동안에 진전할 피로균열길이 증가분 Δa 가 계산되어 지면, 다음으로 Δa 구간 안에 휘스커가 있는지를 확인하게 된다. 만약 휘스커가 없다면 균열은 Δa 만큼 진전하게 된다. 그러나 휘스커가 존재한다면 휘스커까지만 균열이 진전하게 되고 하중반복횟수 증가분 ΔN 은 $\Delta N'$ 로 또한 피로균열길이 증가분 Δa 는 $\Delta a'$ 로 바뀌게 되는 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 그 후, 피로균열은 가정 2 및 3의 조건에 의해, 피로균열은 휘스커와 평행하게 위쪽 또는 아래쪽으로 진전하게 된다. 특히 수직방향의 피로균열 진전량의 계산은 2.1절에서 언급한 바와 같이 먼저 식 (1)을 이용하여 현재의 피로균열을 모드 I 균열로 등가화하였다. 그 후 수직방향의 m, C 그리고 모드 I 등가균열길이를 사용해서 구한 응력확대계수 범위를 식 (2)에 대입하여 수직방향의 피로균열진전량을 구하였다. 몬테카르로 시뮬레이션 프

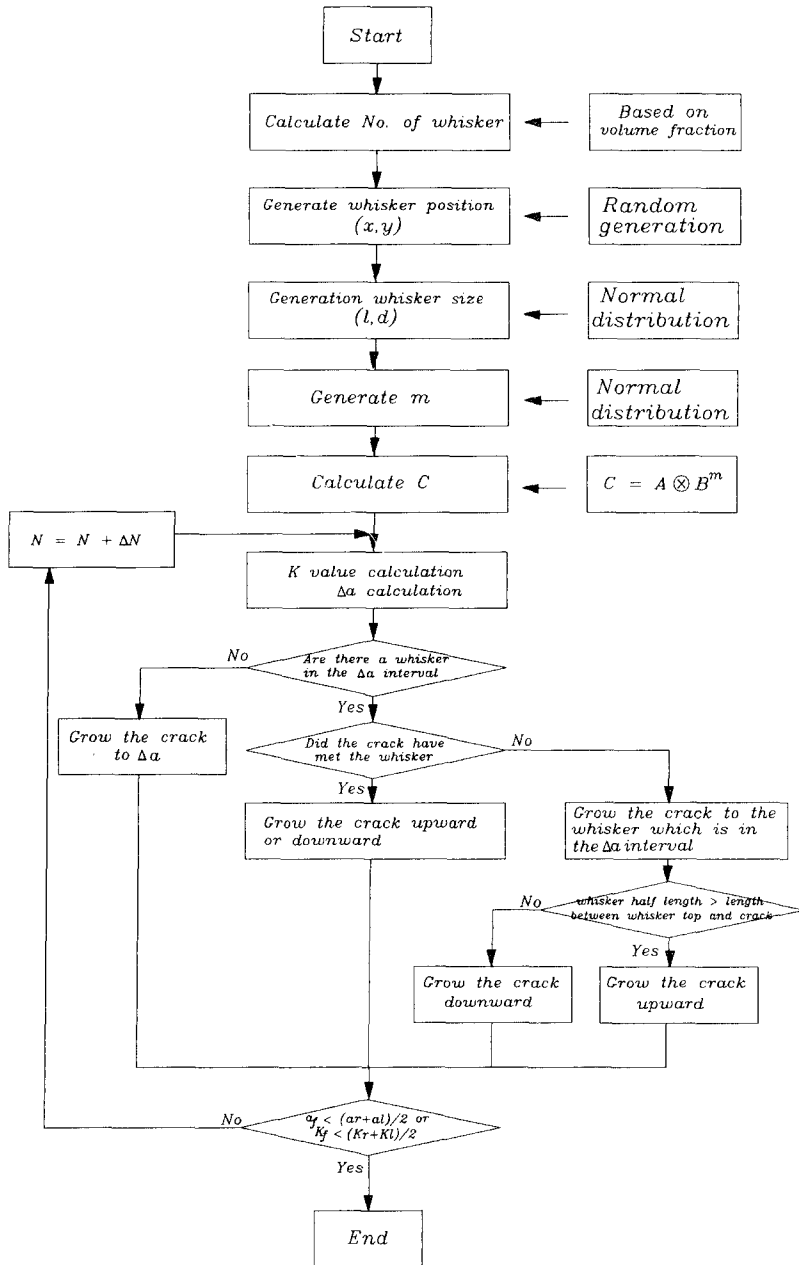


Fig. 7 Monte-Carlo simulation program flow chart

로그래에서 수직방향의 피로균열진전량을 계산하는 부분을 부프로그램(sub-program)화하여 사용하였다.

이상과 같은 방법으로 좌·우측으로 피로균열을 진전시킨 후, 좌·우측 피로균열의 평균길이(($a_r + a_l$)/2)와 피로균열진전시험에서 얻은 파단시 피

로균열길이(a_f)를 비교하였다. 만약 평균피로균열 길이가 파단시 길이보다 짧다면, 하중반복횟수(N)에 하중반복횟수 증가분(ΔN)을 더한 후의 피로균열진전량을 계산해 위의 방법을 되풀이한다. 그러나 파단시 피로균열길이보다 길다면, 시뮬레이션을 종료하도록 하였다.

본 시뮬레이션 프로그램에서는 휘스커 위치 좌표 (x, y) 및 길이(l), 피로균열진전지수 및 상수(m, C) 그리고 하중반복횟수와 그때의 좌·우측의 균열길이를 데이터 파일로 만들어서 PC에 저장하도록 하였다.

4. Monte-Carlo 시뮬레이션 결과의 고찰

SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명예측을 위해 개발한 Monte-Carlo 시뮬레이션의 정도를 알아보기 위해, 25% SiC_w/Al 복합재료 및 Al 모재의 피로 시험에서 얻은 피로균열진전수명과 본 시뮬레이션에서 얻은 피로균열진전수명을 비교해 보았다.

SiC_w/Al 복합재료 및 Al 모재의 피로균열진전수명예측 프로그램에 사용되어진 입력변수의 값은 Table 1과 같다.

프로그램에 입력된 파단시의 피로균열길이는 피로시험결과로부터 얻은 값으로, SiC_w/Al의 A 타입은 6.48 mm, B 타입은 7.62 mm 및 C 타입은 5.91 mm로 하였으며 Al 모재는 9.77 mm를 사용하였다. 프로그램에서는 세 타입의 파단길이를 시뮬레이션 경로에 따라 자동적으로 판단하도록 하였다. 즉 피로시험결과 B 및 C 타입인 경우, 피로균열과 X축이 이루는 각도가 약 35°부터는 계속해서 상승 또는 하강을 하였다. 따라서 프로그램에서는 피로균열의 각도가 35° 이상인 경우이면 b 및 c 타

입으로 간주하고 각 타입의 파단시 피로균열길이까지 피로균열을 진전도록 하였다. Figs. 8, 9 및 10은 각각 피로균열진전수명 예측 프로그램을 통해서 얻은 A, B 및 C 세 타입의 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전경로형상의 예를 나타내었다.

Table 2에는 Table 1과 같은 조건으로 25회 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하여 얻은 Al 모재 및 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명의 예측 결과와 피로시험에서 얻은 수명을 비교하여 나타내었다.

Table 2에서도 알 수 있듯이, 체적비가 0%일 때, 즉 Al 모재에 있어서 25회 시뮬레이션 결과의 평균값을 비교할 경우, 예측값과 실험값과는 2.18%의 오차를 보였다.

한편 SiC_w/Al 복합재료인 경우 25회 시뮬레이션을 수행한 결과, A 타입은 10회, B 타입은 7회, C 타입은 4회 나타났으나 또한 C 타입의 파단시 피로균열길이를 지난 후 C 타입과 같이 좌우측이 경사지게 진전하는 경우도 4회 나타났으나, 이는 시험 결과와 비교할 수가 없으므로 사용하지 않았다. 따라서 피로균열진전시험에서 얻어진 A, B 및 C 타입과 동일하게 시뮬레이션이 되는 경우의 피로균열진전 수명만을 시험 결과와 비교하였다. Table 2와 같이 세 타입의 시험 및 시뮬레이션에서 얻어진 피로균열진전수명의 평균값을 비교한 결과 A 타입은 15.3%, B 타입은 9.9%, C 타입은 14.5%

Table 1 Input data of the Monte-Carlo simulation program

Stress amplitude($\Delta\sigma$)		S. I. F. at fracture(ΔK_I)	10 MPa \sqrt{m}
Al matrix	52.47 MPa		
SiC _w /Al	66.49 MPa		
Width of specimen(W)	30 mm	Average of $m(\mu_m)$	2.936
Thickness of specimen(t)	3 mm	Standard deviation of $m(\sigma_m)$	0.547
Initial crack length(a)	2.6 mm	m of vertical crack	5.446
Crack length at fracture(a _f)		C of vertical crack	2.408E-9
Al matrix	9.77 mm		
A type of SiC _w /Al	6.48 mm	A of $C=A \times B^m$	1.431E-9
B type of SiC _w /Al	7.62 mm		
C type of SiC _w /Al	5.91 mm	B of $C=A \times B^m$	0.307
Average of SiC _w /Al	7 mm		

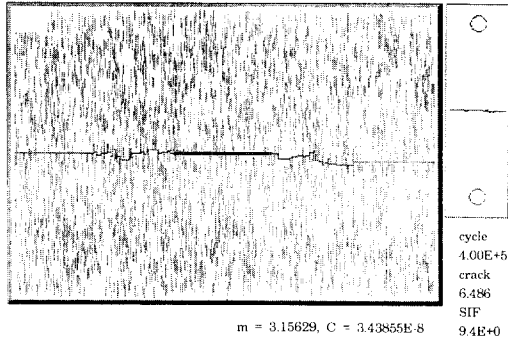


Fig. 8 Result of A type obtained from the Monte-Carlo simulation

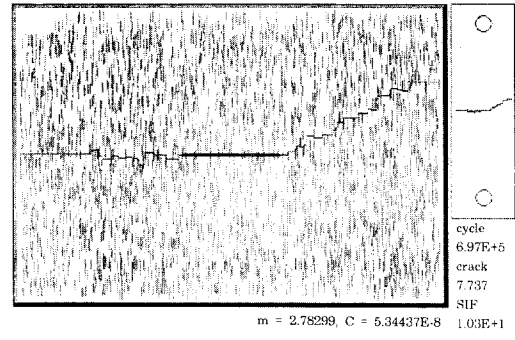


Fig. 9 Result of B type obtained from the Monte-Carlo simulation

의 오차를 보였다.

이상의 결과들로부터 25% SiC_w/Al 복합재료의 피로시험에서 얻어진 피로 균열진전수명과 Monte-Carlo 시뮬레이션에서 얻어진 수명과는 평균 13% 정도의 오차 범위에서 예측됨을 알 수 있었다. 그러나 이와 같은 오차는 휘스키 주위의 응력분포상태 및 균열의 위치에 따라 어떻게 휘스커를 우회해서 가는지에 관한 불충분한 정보, 휘스커를 따라 수직으로 피로균열이 진전할 때의 정확한 응력확대계수 값과 본 프로그램에서 사용한 모드 I 균열로 등가화시켜서 구한 응력확대계수 값과의 오차 등이 원인인 것으로 생각된다. 따라서 이에 대한 실험적 데이터들이 축적되어진다면 실제 피로균열진전수명에 근접한 예측결과를 보일 것으로 사료되어지며, 앞으로 해결해야 될 문제점이기도 하다.

Fig. 11에는 Monte-Carlo 시뮬레이션에 의해 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전 수명예측결과

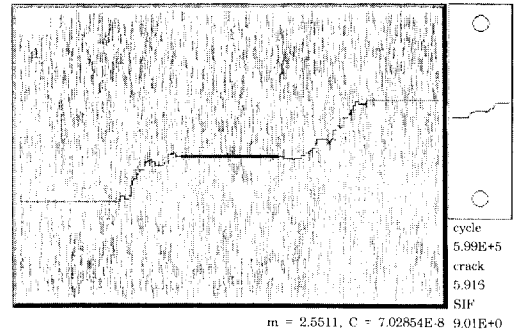


Fig. 10 Result of C type obtained from the Monte-Carlo simulation

데이터 파일로 얻어진 세 타입 피로균열진전경로형상의 하중반복회수와 균열과의 관계를 피로균열진전시험의 경우와 동일하게 처리하여 구한 $\Delta K \cdot da/dN$ 선도를 나타내었으며, 아울러 피로균열진전시험에서 얻은 피로균열진전속도의 95% 신뢰구간을

Table 2 Comparison the fatigue test results with the Monte-Carlo simulation results in the Al matrix and SiC_w/Al composite

Material \ Item	Fatigue test result (average)	Simulation result (average)	Difference
Al6061 matrix	468,000 ~ 667,000 (571,500)	450,000 ~ 805,000 (584,000)	+ 12,500
A type of SiC _w /Al	425,500 ~ 640,000 (528,000)	379,000 ~ 600,000 (458,000)	- 70,000
B type of SiC _w /Al	554,000 ~ 582,600 (568,400)	523,000 ~ 714,000 (630,500)	+ 62,100
C type of SiC _w /Al	453,300	347,000 ~ 599,000 (396,000)	- 57,300

실선으로 함께 나타내었다. 동 그림으로부터 예측되어진 세 타입의 피로균열진전속도의 대부분이 95% 신뢰구간에 포함되므로 Monte-Carlo 시뮬레이션이 비교적 잘 예측됨을 알 수 있었다.

따라서 본 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 5%에서 30%까지 체적비를 변화시켜가며 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명을 예측해 보았다. 체적비에 따른 피로균열진전수명을 비교하

기 위해서 피로파단균열길이(a_f)를 7 mm, 즉 25% SiC_w/Al 복합재료의 평균 피로파단균열길이를 사용하였으며 피로하중 Δσ는 66.49 MPa로 동일하게 하였다. 그 밖의 나머지 조건은 Table 1과 같도록 하여 각각 25회 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 12에는 체적비의 변화에 따라 Monte-Carlo 시뮬레이션으로 예측한 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명을 반대수 선도상에 나타내었다. 동 그림에서 ○표는 평균수명을 나타내며 수명의 분산 범위도 함께 표시하였다. 아울러 그림에서 체적비가 증가함에 따라 피로균열진전수명이 급격히 증가함을 알 수 있었다. 또한 A 타입 피로균열진전형상은 전 체적비에서 모두 나타났으나, 체적비가 증가할수록 나타나는 횟수는 급격히 감소하였다. 반면 B 타입은 체적비 15%부터 나타나기 시작해 체적비 30%까지 계속해서 나타났으며, C 타입은 체적비 20%에서부터 나타나기 시작하였으며 체적비 30%인 경우에는 대부분이 C 타입이었다. 한편 Al 모재에서부터 체적비가 30%일 때까지의 예측된 피로균열진전수명의 평균값에 대해 2차식으로 회귀 분석을 한 결과 식 (3)과 같은 피로균열진전수명 예측식을 얻을 수 있었다.

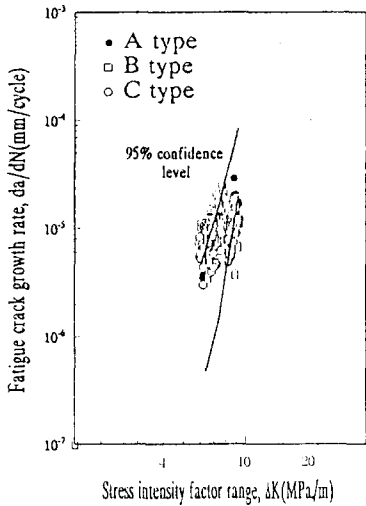


Fig. 11 Stress intensity factor range vs. fatigue crack growth rate in the SiC_w/Al composites and Al matrix that were obtained from the Monte-Carlo simulation

$$N_{growth}(cycles) = a \times V_f^2 + \beta \times V_f + \gamma \quad (3)$$

여기서, N_{growth} 는 피로균열진전수명, V_f 는 체적비를 나타내며 상수 α , β 및 γ 는 각각 388.952, 2405.71 및 249219을 갖는다.

따라서 식 (3)을 이용하게 되면 Table 1과 같은 조건하에서 다양한 체적비를 지닌 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전수명예측이 가능할 것으로 사료된다.

5. 결론

휘스커 보강 복합재료의 피로균열진전수명 및 피로균열진전경로형상을 예측하기 위한 Monte-Carlo 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 25% SiC_w/Al 복합재료 및 Al 모재의 피로시험에서 얻어진 피로균열진전수명과 예측된 피로균열진전수명을 비교해 보았다. 그 결과, Al 모재에서는 2% 정도의, SiC_w/Al 복합재료에서 세 타입별로 다소 차이는 있었으나 피로시험에서 얻어진 피로균열진전수명과 평균 13% 정도의 오차를 나타내었다.

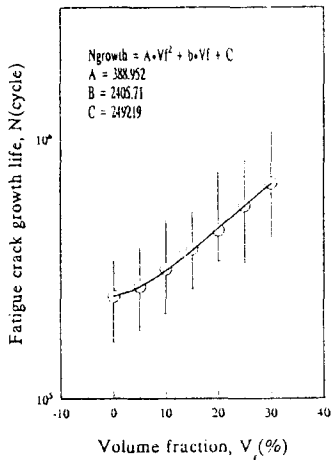


Fig. 12 Relationship between fatigue crack growth life and volume fraction obtained from the Monte-Carlo simulation

따라서 본 프로그램의 오차를 모재 수준으로 줄이기 위해서는 휘스커 주위의 응력분포상태 및 균열의 위치에 따라 어떻게 휘스커를 우회해서 진전하는지에 관한 구체적 정보의 부재, 경사균열의 정확한 응력확대계수와 모드 I 균열로 등가화시켜서 얻은 응력확대계수와 차이 등에 관한 많은 연구들이 진행되어져야 할 것으로 사료되어진다.

또한 복합재료의 피로균열진전특성들을 본 Monte-Carlo 시뮬레이션을 사용한다면 많은 경비와 시간을 투자해서 직접 시험을 수행하지 않고도 짧은 시간내에 피로균열진전수명예측 및 진전경로형상을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 산업현장과 같이 단시간에 피로균열진전특성을 필요로 하는 곳에서는 구조물의 파괴방지라는 관점에서 본 프로그램이 상당히 유용하게 사용되리라고 사료되어진다.

참고문헌

- (1) 권재도, 안정주, 김상태, 1994, "SiC 휘스커 보강 Al 복합재료의 피로균열진전특성에 관한 기초 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp. 2374~2385.
- (2) 권재도, 안정주, 김상태, 1995, "SiC 휘스커 보강 Al 복합재료의 통계학적 피로균열진전수명예측," 대한기계학회논문집, 제19권, 제2호, pp. 475~485.
- (3) Anderson, T. L., 1995, "Fracture Mechanics-2nd Version," CRC Press, pp. 93~95.
- (4) Ishii, H., Targo, K. Araki, H. and Aguspuji, P., 1993, "Fatigue of SiC Reinforced 6061 Aluminum Alloy at Elevated Temperature," APCFS'93, pp. 47~52.
- (5) Lee, Eun. U., 1990, "Crack Path Morphology in Silicon Carbide Whisker-Reinforced Aluminum Composite," *Met. Trans. A*, 21A, pp. 1783~1785.
- (6) Ma, Z. Y., Liu, J. and Yao, C. K., 1991, "Fracture Mechanism in SiC_w-6061Al Composite," *Jour. of Mat. Sic.* 26, pp. 1971~1976.
- (7) Tanaka, Y., Masuda, C. Yamamoto, M. and Fukazawa, M., 1990, "Fatigue Fracture Surface at High Temperature for SiC Whisker Reinforced Al2024 Matrix Composite," *Jour. of Society of Mats. Sci.*, Japan, Vol. 40, No. 453, pp. 94~100.
- (8) Hirano, K. and Takizawa, H., 1991, "Evaluation of Fatigue Crack Growth Characteristics of Whisker Reinforced Aluminum Alloy Matrix Composite," *JSME Inter. Jour.*, Vol. 34, No. 2, pp. 221~227.
- (9) 野口博司, 西谷弘信, 金允海, 西澤彰夫, 1992, "SiC whisker 強化アルミニウム 合金の平滑材および切欠材の疲労特性について," *日本機械學會論文集*, 58卷, 554號, pp. 1765~1771.
- (10) Lim, T., Lee, C. S., Kim, Y. H., Lee, K. C. and Han, K. S., 1990, "Fracture Behaviors and Material Properties of Metal Matrix Composites," '90 KSME-JSME Conference, pp. 624~629.
- (11) Dai-Heng Chen and Haruyama, S., 1993, "Interference Between Crack and Fiber," *JAME*, Vol. 59, No. 560, pp. 903~909.
- (12) 北川英夫, 1977, "疲労き裂進展の破壊力學的解析(II)," *재료* 26권, 285호, pp. 590~604.
- (13) Kitagawa, H., Fujita, T. and Miyazawa, K., 1978, "Small Randomly Distributed Cracks in Corrosion Fatigue," *ASTM STP 642*, pp. 98~114.
- (14) Kitakawa, H., Nakasone, Y. and Miyashita, S., 1983, "Measurement of Fatigue Damage by Randomly Distributed Small Crack Data," *ASTM STP 811*, pp. 233~263.