

〈論 文〉

SiC 휘스커 보강 Al6061 복합재료의 통계학적 피로균열진전 수명예측

권재도* · 안정주** · 김상태*

(1994년 9월 1일 접수)

Statistical Life Prediction of Fatigue Crack Growth for SiC Whisker Reinforced Aluminium Composite

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

Key Words : SiC_w/Al Composite(SiC 휘스커 Al 복합재료), Al6061 Matrix(알루미늄 6061 기지재), Fatigue Crack Growth Test(피로균열진전실험), Statistical Analysis(통계적 해석), Cumulative Relative Frequency(누적분포도수), Kolmogonov-Smirnov Test(K-S 검정), Regression Analysis(회귀분석), Life Prediction(수명예측)

Abstract

In this study, statistical analysis of fatigue data which had obtained from respective 24 fatigue crack, was examined for SiC whisker reinforced aluminium 6061 composite alloy(SiC_w/Al6061) and aluminium 6061 alloy. SiC volume fraction in composite alloy is 25%. The analysis results indicate that statistical distribution pattern of fatigue crack growth rate(da/dN) in the constant stress intensity factor range and 0.1 mm fatigue crack initiation life for SiC_w/Al6061 composite & Al6061 matrix are the log-normal distribution. And regression analysis by linear model, exponential model and multiplicative model were performed to find out the relationship between fatigue crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK) in the SiC_w/Al6061 composite and examine the applicability of Paris' equation to SiC_w/Al6061 composite. Also computer simulation was performed for fatigue life prediction of SiC_w/Al6061 composite using the statistical results of this study.

1. 서 론

첨단 기술을 실현시키기 위해서는 기존의 구조용 재료로는 기능성의 한계 등 어려움이 대두되어, 선진 각국에서는 첨단 신소재 개발에 박차를 가하고 있다. 이런 관점에서 주목을 받고 있는 신소재가 바로 금속기지 복합재료(metal matrix composite

:MMC)라 할 수 있다. 이들 금속기지 복합재료는 높은 비강도, 비탄성을 지니고 있으며 또한 내열성, 내마모성, 내피로 특성^(1~3) 등 뛰어난 성질로 인해 첨단 기술개발을 위한 재료로 각광을 받고 있다. 특히 경량화를 목적으로 알루미늄 기지에 세라믹 휘스커가 보강된 금속기지 복합재료에 대한 연구가 활발히 진행중에 있다. 이들 휘스커 보강 복합재료에 대한 연구동향으로는 저자들의 피로균열진전 경로에 관한 연구,⁽⁴⁾ 휘스커 배향에 따른 기계적 특성의 평가,⁽⁵⁾ 피로균열의 진전거동과 복

*정회원, 영남대학교 기계공학과

**정회원, 영남대학교 대학원 기계설계공학과

합재료의 방향성에 관한 연구,⁽⁶⁾ 복합재료의 파괴 거동에 관한 연구⁽⁷⁻⁹⁾ 및 금속기지 복합재료의 통계적 강도평가에 관한 연구⁽¹⁰⁾ 등이 있다. 그러나 저자⁽⁴⁾들이 언급한 것 같이 금속기지 복합재료의 피로균열진전속도의 분산(scatter) 정도가 Al 모재보다 심하여, 피로균열진전 특성을 좀 더 명확히 파악하기 위해서는 통계학적 해석이 필요하나 이와 같은 연구결과는 현재로서는 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 통계학적 관점에서 피로균열진전 특성을 파악하기 위해서 SiC 휘스커가 체적비(volume fraction) 25%로 보강된 Al6061 복합재료 및 Al6061 모재에 대해 다수의 피로 균열진전 실험을 수행하여 피로균열진전 실험결과를 통계학적으로 해석해 보고자 하며, 피로균열진전 속도와 응력확대계수 범위사이의 관계인 Paris의 피로균열진전법칙이 구성 성분들간에 뚜렷한 계면을 형성하고 있으며 또한 완벽하게 결합(perfect bond)이 되어 있지 못한 금속기지 복합재료에 대해서도 적용이 가능한가를 통계적으로 검증해 보았다. 아울러 이들 통계적 해석결과들을 이용하여 SiCw/Al6061 복합재료의 피로수명을 예측해 보고자 한다.

2. 피로균열진전 실험

2.1 실험용 재료 및 피로 시험편

실험용 재료는 Mitsubishi 알루미늄에서 고압 용침법(high pressure infiltration method) 및 열간압출을 통해 제조한 SiCw/Al6061 복합재료와 Al6061 모재 등 두 종류 재료를 사용하였다. SiCw/Al6061 복합재료의 SiC 체적비(V_f)는 25%이며 직경 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$, 길이 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 인 휘스커를 사용하였다.

Table 1에는 SiCw/Al6061 복합재료 및 Al6061 모재의 압출방향에서의 기계적 특성을 나타낸 것으로 SiCw/Al6061 복합재료는 SiC 휘스커의 보강으로 인해 인장강도는 모재보다 월등히 향상되었으나

연신율의 감소가 심함을 알 수 있었다.

Fig. 1은 피로균열진전실험에 사용한 중앙노치 시험편(center cracked tension specimen : CCT)으로 시험편 중앙에 노치 곡률반경(ρ)이 0.25 mm, 길이 ($2a$)가 5 mm인 인공노치를 SiC 휘스커와 서로 직각이 되도록 가공하였다. 또한 피로균열길이 측정을 용이하게 하기 위하여 시험편 표면을 600번에서 1500번까지의 砂布를 사용하여 최종의 연마면을 얻었다. 이상과 같은 방법으로 SiCw/Al6061 복합재료 및 Al6061 모재의 피로시험편을 각각 6개씩 제작하여 피로균열진전실험에 임하였다.

2.2 피로균열진전실험 방법

피로균열진전실험은 Instron사의 최대 용량이 25 kN(5500 lb)인 유압서보 피로시험기(hydraulic servo fatigue test machine : model 1332)를 사용하였다.

또한 피로균열진전실험은 상온에서 응력비(R) 0.05, 주파수(f) 10 Hz, 정현파의 인장-인장 하중 제어방식으로 수행하였으며, 하중범위는, Al6061 모재에서는 $\Delta\sigma = 52.47 \text{ MPa}$ 그리고 SiCw/Al6061 복합재료에서는 $\Delta\sigma = 66.49 \text{ MPa}$ 로 하였다.

피로균열진전 실험결과 SiCw/Al6061 복합재료의 피로균열진전형상이 인공노치 앞뒤 좌우에서 서로 상이하게 진전하는 것이 관찰되었다. 따라서 한개 시험편의 인공노치 앞뒤 좌우 4개소에서의 피로 균열을 각각 독립된 균열로 가정하였다. 즉 SiCw/Al6061 복합재료 및 Al6061 모재에 대해 각각 24개(6개 \times 4곳)의 균열로부터 피로균열길이를 측정하였다. 피로균열길이 측정방법은 표면 레프리카법

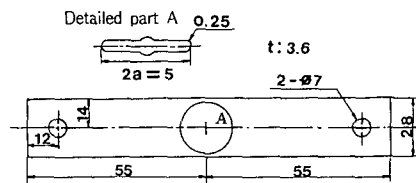


Fig. 1 Fatigue test specimen

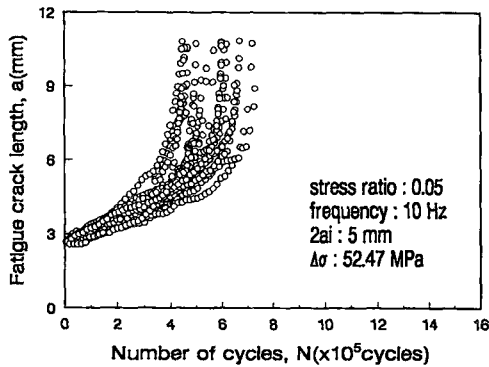
Table 1 Mechanical properties of extrusive direction of the SiCw/Al6061 composite & Al6061-T6 matrix

Material	Young's modulus (GPa)	Proof strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SiCw/Al6061	97.8	400	603	2.2
Al6061-T6	63.4	280	316	9.6

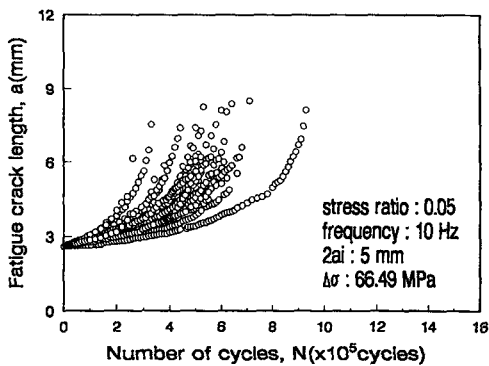
(surface replica method)을 이용하였으며, 피로균열길이, a 는 초기 인공노치의 길이에 OSM(optical scale meter)으로 측정된 피로균열 진전량(Δa)을 더한 값으로 정의하였으며, 피로균열이 인공노치 선단에서 0.1 mm 진전했을 때의 하중 반복회수를 0.1 mm 피로균열발생 수명으로 정의하였다.

3. 피로균열진전 실험결과

Fig. 2의 (a) 및 (b)는 Al6061 모재 및 SiC_w/Al6061 복합재료의 피로균열진전 실험결과 얻은 24개의 피로균열길이 a 와 하중 반복회수 N 사이의 관계를 나타낸 것으로 이 때 하중 반복회수 N 은 0.1 mm 피로균열발생 수명을 뺀 값을 나타낸다. 동 그림으로부터 SiC_w/Al6061 복합재료가 Al6061 모재보다 피로균열진전 특성의 불규칙 정도가 심함을 알 수 있었다.



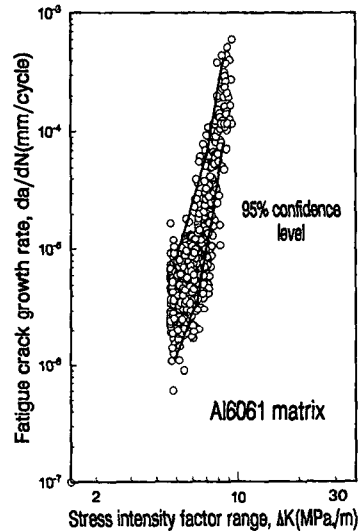
(a) Al6061 matrix



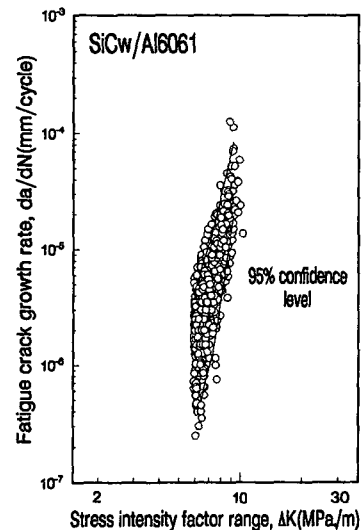
(b) SiC_w/Al6061 composite

Fig. 2 Fatigue crack length vs. growth life in the SiC_w/Al6061 composite & Al6061 matrix

또한 두 재료의 0.1 mm 피로균열발생 수명과 파단수명을 비교해 본 결과, Al6061 모재에서의 0.1 mm 피로균열발생 수명은 71000~332500 사이클 범위이고, 파단수명은 592100~911900 사이클 범위이었으며, SiC_w/Al6061 복합재료의 0.1 mm 피로균열발생 수명은 211250~1020000 사이클 범위이며, 파단수명은 793900~1352800 사이클 범위이었다. 위 결과로부터 SiC_w/Al6061 복합재료의 0.1



(a) Al6061-matrix



(b) SiC_w/Al6061 composite

Fig. 3 Stress intensity factor range vs. fatigue crack growth rate in the SiC_w/Al6061 composite & Al6061 matrix

mm 피로균열발생 수명의 분산이 모재보다 심하며, SiC_w/Al6061 복합재료 간에도 큰 차이가 나타남을 알 수 있었다. 즉 SiC 휘스커가 피로 균열발생 및 진전에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3의 (a) 및 (b)는 Al6061모재 및 SiC_w/Al6061 복합 재료에 대해 각각 피로균열진전실험을 통해서 얻은 24개의 $\Delta K \cdot da/dN$ 관계를 모두 출력한 것으로, 동 선도에는 응력확대계수 범위에 대한 피로균열진전속도의 95% 신뢰 구간을 함께 나타내었다.

여기서, 피로균열진전속도, da/dN 는 secant법⁽¹¹⁾을 사용하여 계산하였으며 응력 확대 계수는 다음과 같은 CCT 시험편에 대한 Tada의 식을 사용하여 계산하였다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F(a)^*, \quad a = \frac{2a}{W}$$

$$F(a)^* = (1 - 0.025a^2 + 0.06a^4) \sqrt{\sec(\frac{a\pi}{2})}$$

Fig. 3의 (a) 및 (b)에서 알 수 있듯이 SiC_w/Al6061 복합재료의 피로균열진전속도가 Al6061보다 통계학적으로 매우 느림을 알 수 있었다. 또한 Al6061 모재의 경우 피로균열진전속도의 분산은 피로균열발생 초기에 다소 심한 반면 SiC_w/Al6061 복합재료에서는 피로균열 발생초기의 분산정도가 진전해 가면서도 뚜렷한 감소를 보이지 않았다. 따라서 휘스커가 보강됨으로 인해 피로균열진전속도의 분산정도가 모재보다 큼을 알 수 있었다.

4. 피로균열진전 특성의 통계적 해석

4.1 피로균열의 발생 및 진전속도의 통계적 분포 특성

SiC_w/Al6061 복합재료 및 Al6061 모재로 피로균열진전실험을 수행해서 얻은 결과로부터 0.1 mm 피로균열발생 수명 및 일정 응력확대계수 범위 ΔK 에 대한 피로균열진전속도 da/dN 의 통계적 분포 특성을 검토해 보았다.

Fig. 4에는 SiC_w/Al6061 복합재료, Al6061 모재의 0.1 mm 피로균열발생 수명을 대수-정규 확률지에 나타내었으며, 일반 구조용강과의 비교를 위해 SS41강^(14,15)의 0.1 mm 피로균열발생 수명 및 Cr-Mo강⁽¹⁸⁾의 0.3 mm 피로균열발생 수명을 실선 및 점선으로 함께 나타내었다. 또한 위의 확률 분포가 적합한지를 규명하기 위하여 KS

(Kolmogonov-Smirnov test) 적합도 검정⁽¹⁹⁾을 실시해 보았다. 적합도 검정에서 사용되어지는 값인 D_m 는 표본(sample)의 누적확률분포와 가설로 설정된 누적확률분포의 최대차이(maximum deviation)로 임계치 D 값보다 적다면 가정된 확률분포는 적합함을 의미한다. Al6061 모재의 추정 D_m 는 0.1184이며 SiC 휘스커 Al6061 복합재료의 추정 D_m 값은 0.2016으로 유의 수준(α) 0.1일 때의 임계 D 값인 0.21204보다 적어 SiC_w/Al6061 복합재료도 Al6061 모재 및 SS41강, Cr-Mo강 등의 일반구조용 재료와 마찬가지로 대수-정규 확률분포를 따른다는 것을 알 수 있었다.

또한 Al6061 모재의 경우 0.1 mm 피로균열발생 수명은 71000~332500 사이클 범위로 0.1 mm 피로균열발생 수명의 평균(μ)은 161063 사이클이며 표준편차(σ)는 60594 사이클로 변동계수(coefficient of variance, σ/μ)는 0.38이었다. 한편 SiC_w/Al6061 복합 재료인 경우, 0.1 mm 피로균열발생 수명은 211250~1020000 사이클 범위로 0.1 mm 피로균열발생 수명의 평균(μ)은 424507 사이클이며 표준편차(σ)는 204756 사이클로 변동계수는 0.48이었다. 이들 결과로부터 SiC_w/Al6061 복합재료의 0.1 mm 피로균열발생 수명의 분산정도가 Al6061 모재보다 심함을 알 수 있었다.

아울러 피로균열진전실험을 수행한 SiC_w/Al6061

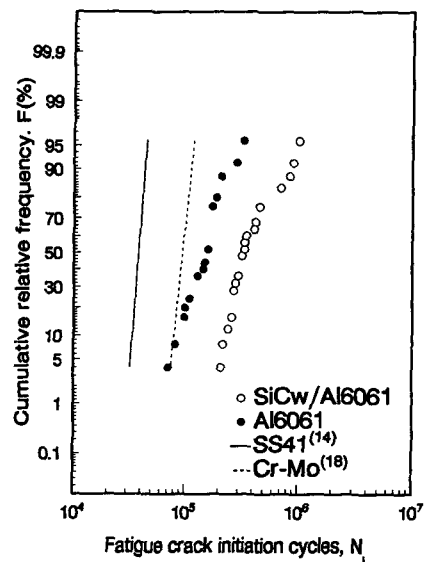


Fig. 4 Log-normal distribution plots of the 0.1 mm crack initiation lives in the Al6061 matrix & SiC_w/Al6061 composite

복합재료 및 Al6061 모재에서 동일 응력확대계수 범위(ΔK)에서 피로균열진전속도(da/dN)의 확률분포 특성을 검토해 보았다.

Fig. 5 및 6에는 응력확대계수 범위 $\Delta K=6, 6.5, 6.9, 7.5$ 및 $8.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 일정한 경우,

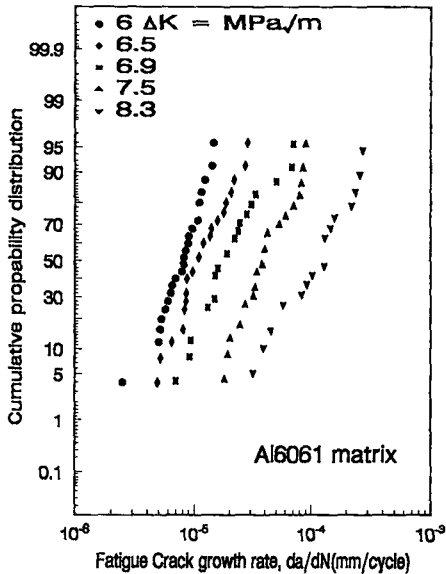


Fig. 5 Log-normal distribution plots of fatigue crack growth rate, da/dN in the Al6061 matrix

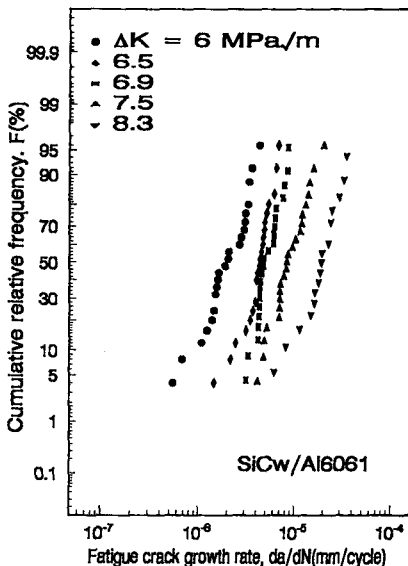


Fig. 6 Log-normal distribution plots of fatigue crack growth rates, da/dN in the SiC_w/Al6061 composite

Al6061 모재 및 SiC_w/Al6061 복합재료의 피로균열진전속도의 확률분포상태를 대수-정규 확률지에 출력(plot)한 결과를 나타낸 것이다.

여기서, ΔK 가 6, 6.5, 6.9, 7.5 및 $8.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일 때 Al6061 모재의 추정 D_m 값은 0.1084, 0.1261, 0.0893, 0.1177 및 0.1243이었으며 SiC_w/Al6061 복합 재료의 추정 D_m 값은 0.1379, 0.2122, 0.1589, 0.1111 및 0.1513으로 유의 수준 α 가 0.1일 때 임계 D 인 0.22115보다 적었다. 따라서 SiC_w/Al6061 복합재료 및 Al6061 모재의 피로균열진전속도 역시 대수-정규 확률분포에 따른다는 것을 K-S 검정 결과로부터 확인할 수 있었다.

이상에서 언급한 바와 같이 SiC_w/Al6061 복합재료도 Al6061 모재와 같이 0.1 mm 피로균열발생수명의 확률분포 특성 및 일정 응력확대계수 범위에서의 피로균열진전속도의 확률분포 특성이 모두 대수-정규 분포에 따른다는 것이 확인 되었으며, 이는 기존의 연구결과인 일반 구조용 SS41강 및 압력용기용 Cr-Mo강의 확률분포 특성^(14,15,18)과 유사하였다.

4.2 SiC_w/Al6061의 ΔK - da/dN 관계의 회귀분석

본 연구에서 사용한 SiC_w/Al6061 복합재료와 같이 구성성분들이 완전히 섞여져 있지 않고 양립성(compatibility)을 지니고 있으며 또한 보강재와 기지가 완전히 결합(perfect bond)되어 있지 않은 금속기지 복합재료에서 Paris의 피로균열진전범칙의 상수(C) 및 지수(m)의 값을 구할 경우, 이들 값을 수명 예측에 사용할 수 있는지에 관해서는 아직까지 검증이 되어있지 않은 상황이다. 따라서 본 절에서는 SiC_w/Al 복합재료의 피로균열진전속도와 응력확대계수 범위와의 관계를 회귀분석을 통해 통계적 관점에서 검토해 보고자 한다.

통계학에서 많이 사용되어지고 있는 회귀분석 모델인 선형모델($da/dN = A(\Delta K) + B + \epsilon$), 지수 모델($da/dN = \exp(A + B(\Delta K) + \epsilon)$), 그리고 다항 모델($da/dN = A(\Delta K)^{(B+C)}$)에 대해서 회귀분석을 실시하였다.

여기에, 사용된 피로균열진전속도(da/dN)는 4-2 절에서 사용한 응력확대계수 범위(ΔK)일 때의 값이며 응력확대계수 범위만을 피로균열진전속도에 영향을 주는 독립변수(independent variable)로, 피로균열진전속도를 종속 변수(dependent variable)로 하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석에 사용된

통계 소프트웨어 (software) 는 STATGRAPHICS(statistical graphics system)이다. SiC_w/Al6061 복합재료의 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대계수 범위(ΔK)와의 관계에 대해 선형모델, 지수모델 그리고 다항모델로 회귀분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 표에서도 알 수 있듯이 다항모델의 결정계수(R^2)가 0.76으로 선형모델의 결정계수 0.65 및 지수모델의 결정계수 0.75보다 큼을 확인할 수 있었다. 이는 휘스커 보강 복합재료인 경우 본 연구에서 수행한 세 개의 회귀분석 모델 중 다항모델이 가장 적합함을 의미한다. 이는 Paris의 피로균열진전법칙이 구성성분들간에 양립성이 존재하며 완전한 결합(perfect bond)이 되어 있지 않은 금속기지 복합재료에 있어서도 피로균열진전법칙으로 적용될 수 있음을 의미한다. Fig. 7은 SiC_w/Al6061 복합 재료에 있어서 응력확대계수 범위에 대해 피로균열진전속도를 다항모델로 회귀분석하였을 때 각 K 구간에서의 잔차(residual)의 분산(variance)을 나타낸 것으로 구간에 대해 잔차의 분산이 비교적 균일함을 알 수 있다.

4.3 m과 C의 통계적 분포 특성

본 절에서는 Paris 피로균열진전 법칙의 지수 m 과 상수 C 의 분포특성 파악을 위해 SiC_w/Al6061 복합재료 및 Al6061 모재에 대해 각각 피로균열진전실험을 통해 얻은 24개의 m 및 C 의 분포상태를 통계적으로 해석해 보았다. 여기서, Paris 피로균열진전법칙의 지수 m 과 상수 C 는 Fig. 3의 (a) 및 (b)의 $\Delta K \cdot da/dN$ 관계에서 선형적인 구간에 대

Table 2 Result of regression analysis between stress intensity factor range(ΔK) & fatigue crack growth rate(da/dN) in the SiC_w/Al6061 composite

Model	SST	SSE	SSR	R ²
Linear model	76.22	26.62	49.60	0.65
Exponential model	76.22	18.86	57.37	0.75
Multiplicative model	76.22	18.64	57.58	0.762

SST : Sum of squares total
 SSE : Sum of squares error
 SSR : Sum of squares regression
 R² : Coefficient of determination

해 최소자승법을 이용해 구하였다.

이와 같이 구해진 Al6061 모재와 SiC_w/Al6061 복합재료에서 Paris 피로균열진전법칙에서의 지수 m 값의 분포 특성을 정규확률지에서 출력한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 아울러 정규 확률분포의 결과가 타당한지를 확인하기 위해 K-S 적합도 검정을 수행해 본 결과 Al6061 모재 및 SiC_w/Al6061 복합재료의 균열진전법칙에서의 지수 m 의 추정 D_m 는 각각 0.115 및 0.106으로 유의 수준 α 가 0.1 이고 표본수가 24개 일 때의 임계 D 값인 0.21204

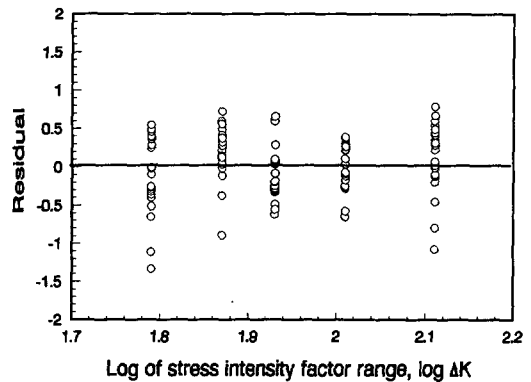


Fig. 7 Residual distribution in the SiC_w/Al6061 composite

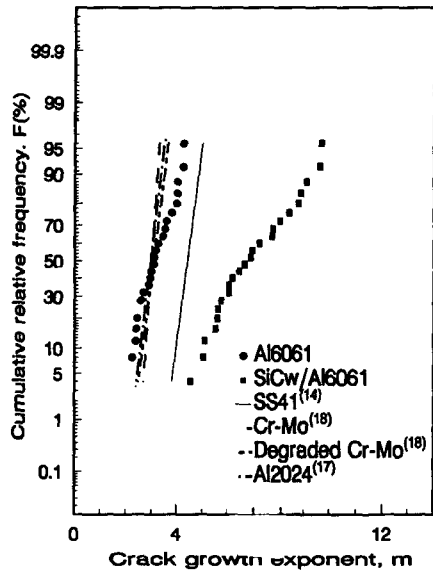


Fig. 8 Normal distribution plots of the crack growth exponent m in the SiC_w/Al6061 composite Al6061 matrix

보다 적어 m 값은 정규분포에 따른다는 것을 알 수 있었다. 또한 동 그림에는 일반 구조용 SS41강,^(14,15) 압력용기용 Cr-Mo강⁽¹⁸⁾ 및 Al2024-T3⁽¹⁷⁾에 대한 m 의 분포 특성을 각각 실선, 점선 및 일점 쇄선으로 함께 나타냈다. 또한 Al6061 모재 및 SiC_w/Al6061 복합재료의 Paris 피로균열진전법칙의 상수 C 값의 분포상태를 대수-정규 확률지에 출력한 것이 Fig. 9이며, 일반구조용 SS41강^(14,15) 및 압력용기용 Cr-Mo강⁽¹⁸⁾ 및 Al2024-T3⁽¹⁷⁾에 대한 C 의 분포특성을 각각 실선, 점선 및 일점 쇄선으로 같이 나타내 보았다. Paris식에서 균열 진전 상수 C 값에 대한 K-S 적합도 검정에서 Al6061 모재 및 SiC_w/Al6061 복합재료의 추정 D_m 가 0.160과 0.148로 유의 수준 α 가 0.1일 때의 임계 D 값인 0.21204보다 적어 두 재료 모두 대수-정규 확률분포가 적합함을 확인할 수 있었다.

Paris 피로균열진전법칙에서의 지수 m 및 상수 C 사이의 관계를 알아보기 위해서 반대수(semilog) 선도(線圖)상에 출력한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 동 그림에서 일반 구조용강과의 비교를 위해 SS41강,^(14,15) Al2024⁽¹⁷⁾ 및 압력용기용 Cr-Mo강⁽¹⁸⁾의 m 과 C 와의 관계를 각각 실선, 점선 및 일점 쇄선으로 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 m 과 C 값은 서로 독립적인 관계가 아니

라 반대수 선도상에서 직선적인 관계가 성립함을 알 수 있었으며, 또한 이 직선은 $C=A*B^m$ 으로 나타낼 수 있으며 특히하게도 Al6061 모재 및 SiC_w/Al6061 복합재료의 경우 두 재료를 m 과 C 의 반대수 선도상에 출력해 본 결과 직선이 서로 겹쳐져 하나의 직선을 이룬다는 것도 알 수 있었다. 이 직선을 $C=A*B^m$ 으로 나타낼 경우 상수 A 는 $1.652E-5$ 이며 B 는 0.1243이었다.

5. SiC_w/Al6061 복합재료의 수명예측

피로에 대한 구조물의 신뢰성 해석을 하기 위해서는 피로균열의 진전속도의 확률 특성을 명확히 하여야 한다. 파괴역학적 견지에서 이 문제는 Paris 피로균열진전법칙의 지수 m 과 상수 C 의 확률 특성을 명확히 하는 것으로 귀착된다. 이론적으로 m 과 C 를 취급하는 방법으로 다음과 같이 5가지 방법⁽¹⁷⁾을 대표적으로 들 수 있다.

- (1) m 과 C 를 확정된 값으로 취급
- (2) m 은 확정된 값으로, C 는 확률변수로 취급
- (3) m 을 확률변수로, C 는 확정된 값으로 취급
- (4) m 과 C 는 확률변수이나 서로 독립적(independent)으로 취급
- (5) m 과 C 는 확률변수이며 서로 종속적(dependent)으로 취급

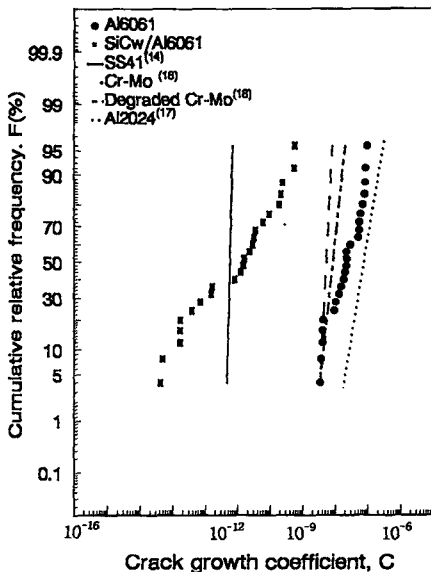


Fig. 9 Log-normal distribution plots of the crack growth coefficient C in the SiC_w/Al6061 composite and Al6061 matrix

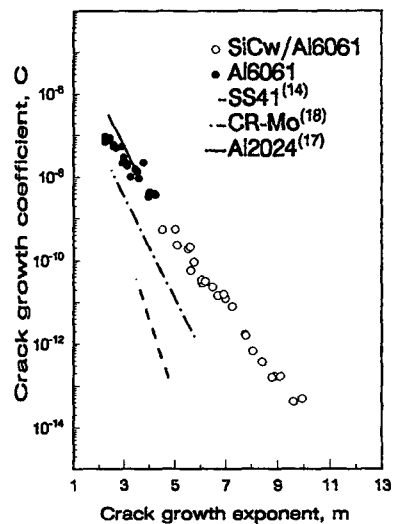


Fig. 10 Log-normal distribution plots between crack growth exponent, m and coefficient, C in the SiC_w/Al6061 composite and Al6061 matrix

이들 중 어느 방법이 보다 타당한지는 적합한 다수의 실험결과와 축적이 필요하다. 그러나 현재로서는 본 문제에 대한 실험결과는 대단히 부족한 실정이다. 그래서 Al과 같은 기존의 구조용 재료에 대한 m 과 C 의 연구 결과⁽¹⁷⁾들은 m 과 C 는 확률변수이며 서로 종속적(dependent)이라 가정하고 통계적으로 평가하고 있는 실정이다.

그러나 본 연구에서 사용된 SiC_w/Al6061 복합재료와 같은 금속기지 복합재료인 경우에 있어서는 m 과 C 가 위의 5가지 가정들 중 어느 경우가 수명 예측에 보다 타당한지에 대해 현재까지 검증된 바가 없다.

따라서 본 절에서는 SiC_w/Al6061 복합재료인 경우 앞에서 가정한 5가지 가정들 중 m 과 C 가 모두 하나의 확정된 값으로 가정한 경우를 제외한 4가지 가정들에 대해서 컴퓨터로 가상실험을 해 보았다. 컴퓨터 가상실험은 m 과 C 를 먼저 가정에 맞게 난수 발생시킨 후 피로균열길이를 Paris식에 의해서 진전시켰으며 이렇게 해서 증가된 피로 균열길이가 실험을 통해서 얻은 파단길이보다 클 경우나 또는 피로균열이 진전한 후의 응력확대계수 범위(ΔK)가

피로 파단시에 계산된 파단 응력확대계수 범위(ΔK)보다 클 경우 종료되도록 프로그램하여 수행하였다.

위에서 언급한 각 조건들에 대해 시험편과 동일한 모델에 대해 동일한 실험조건을 적용하여 컴퓨터 가상실험을 수행해서 얻은 24개의 $a-N$ 관계는 Fig. 11의 (a), (b), (c) 및 (d)에 그리고 $K-da/dN$ 의 관계는 Fig. 12의 (a), (b), (c) 및 (d)에 나타내었다.

그림에서도 알 수 있는 바와 같이 Fig. 11 및 12의 (a)는 m 은 상수이고 C 는 확률변수인 경우이며, Fig. 11 및 12의 (b)는 m 은 확률변수이고 C 는 상수인 경우로, 두 경우 모두 피로균열진전속도가 전반적으로 실험치보다 상당히 빠르게 계산되었다. 또한 Fig. 11 및 12의 (c)는 m 과 C 모두 확률변수이나 서로 독립적으로 가정한 경우로 실측한 피로균열진전속도보다 전반적으로 피로균열진전속도가 굉장히 느리게 계산되어 실험치와 상당한 차이를 보였다. 따라서 이들 3가지의 가정들은 SiC_w/Al6061 복합재료에서의 m 과 C 의 관계를 예측하는데 적합하지 못함을 알 수 있었다.

그러나 Fig. 11 및 12의 (d)는 m 과 C 는 모두 확

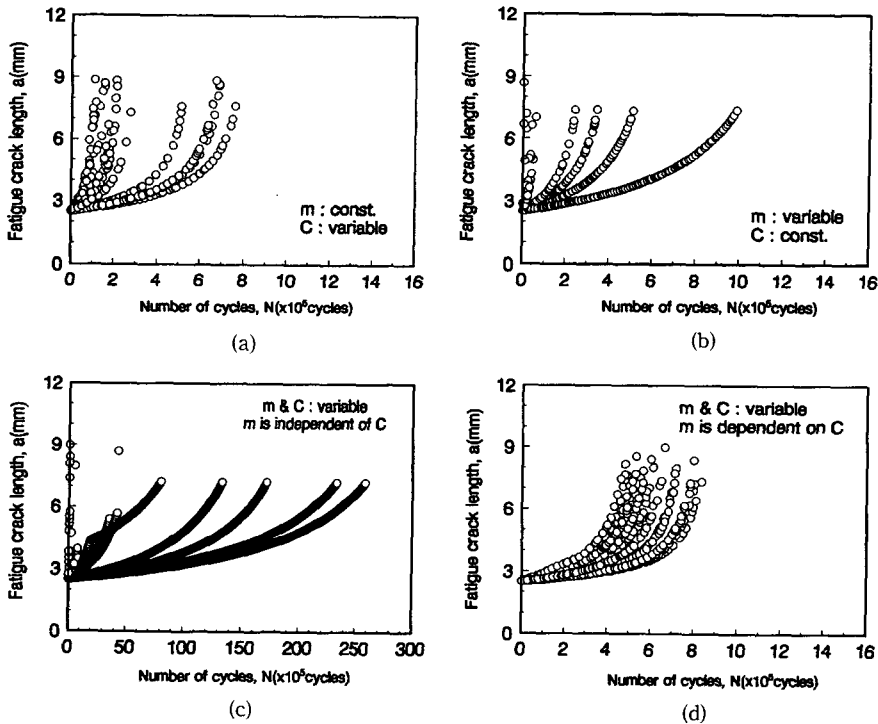
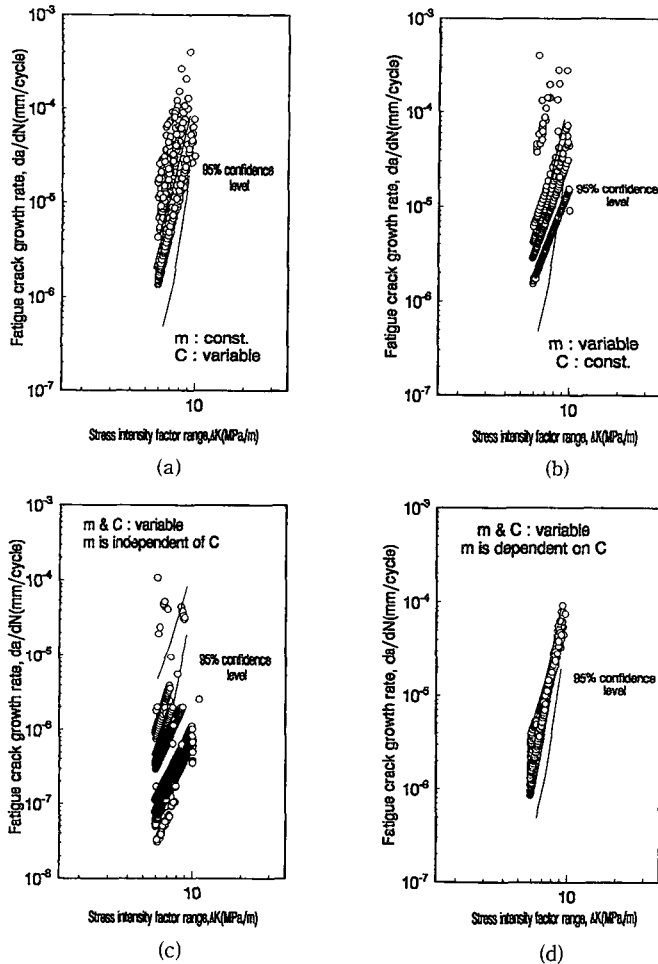


Fig. 11 Life prediction of $a-N$ in the SiC_w/Al6061 composite

Fig. 12 Life prediction of ΔK - da/dN in the $SiC_w/Al/6061$ composite

불변수이며 서로 종속적으로 가정해 컴퓨터 가상실험한 경우로 피로균열의 진전 경향도 실험치와 매우 유사하게 예측되었으며 피로균열진전속도 또한 예측된 값이 모두 실험치의 95% 신뢰구간 범위에 포함됨을 알 수 있었다. 따라서 4가지의 가정들에 대해 컴퓨터를 이용한 가상실험에서 m 과 C 는 모두 확률변수이며 서로 종속적으로 가정한 경우가 실험치와 매우 유사하게 예측됨을 알 수 있었다.

일반 구조용 재료에서 뿐 아니라 $SiC_w/Al6061$ 복합재료와 같은 금속기지 복합재료의 경우에 있어서 Paris 균열진전법칙의 지수 m 과 상수 C 의 분포 특성은 앞에서 언급한 5가지의 가정들 중 다섯 번째 가정인 m 과 C 는 모두 확률변수이며 상호 종속적인 관계로 예측되어지는 것이 타당할 것으로 사료되어진다.

6. 결 론

이상과 같이 $Al6061$ 모재와 $SiC_w/Al6061$ 복합재료의 피로균열진전실험을 수행한 후 이들 결과들을 통계적으로 해석하여 수명예측을 수행한 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

(1) $SiC_w/Al6061$ 복합재료 및 $Al6061$ 모재의 응력확대계수 범위 ΔK 와 피로균열진전속도 da/dN 관계의 95% 신뢰구간을 비교해 본 결과 $SiC_w/Al6061$ 복합재료가 $Al6061$ 모재의 피로균열진전속도보다 느리게 진전함을 통계적으로 알 수 있었다.

(2) $SiC_w/Al6061$ 복합재료 및 $Al6061$ 모재에 대해 실시한 피로균열진전실험의 결과를 통계적으로 처리한 결과 0.1 mm 피로균열발생 수명 및 일정

응력확대계수 범위 ΔK 에 대한 피로균열진전속도 da/dN 의 분포상태는 $\text{SiC}_w/\text{Al6061}$ 복합재료도 Al6061 모재와 같이 대수-정규 확률 분포를 따른다는 것을 알 수 있었다.

(3) $\text{SiC}_w/\text{Al6061}$ 복합재료와 같은 금속기지 복합재료에 Paris식의 적용가능성을 알아보기 위해 선형, 지수 및 다항모델로 응력확대계수 범위와 피로균열진전속도와의 관계에 대해 회귀분석한 결과 다항모델($da/dN = A(\Delta K)^{B+C}$)이 적합하여 Paris의 피로균열진전법칙이 적용 가능함을 확인하였다.

(4) $\text{SiC}_w/\text{Al6061}$ 복합재료 및 Al6061 모재에 있어서, 균열진전법칙에서의 지수 m 은 정규 확률 분포를, 상수 C 는 대수-정규 확률분포상태를 나타낼 수 확인할 수 있었다. 따라서 m 과 C 의 관계는 $C = A * B^m$ 인 식으로 나타낼 수 있으며 이 때 상수인 A 와 B 의 값은 $A = 1.652E-5$, $B = 0.1243$ 이었다.

(5) $\text{SiC}_w/\text{Al6061}$ 복합재료의 피로균열진전 수명 예측을 행하기 위하여 Paris 균열진전법칙에서의 지수 m 과 상수 C 를 5절의 5가지 가정을 토대로 컴퓨터 가상실험을 수행한 결과 m 과 C 는 확률변수이며 상호종속적이라는 가정으로 수명예측한 결과와 실험결과가 가장 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 日本機械學會 編, 1985, “新しい構造材料—基礎と應用—,” コロナ社, pp. 79~96.
- (2) 日本機械學會 編, 1990, “先端複合材料,” 技報堂, pp. 97~115.
- (3) 이창수, 김영한, 임태원, 한경섭, 1990, “Al/SiC 금속복합재료의 마모특성,” 한국복합재료학회 춘계논문초록집, pp. 3~8.
- (4) 권재도, 안정주, 김상태, 1994, “SiC 휘스커 보강 Al6061 복합재료의 피로균열의 진전 특성에 관한 기초 연구,” 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp. 2374~2385.
- (5) Ma, Z. Y., and Liu, J., Yao, C. K., 1991, “Fracture Mechanism in SiC_w -6061 Al Composite,” *J. of Mat. Sci.* 26, pp. 1971~1976.
- (6) Voituriez, C., and Hall, I. W., 1991, “Strengthening Mechanism in Whisker-Reinforced Aluminium Composite,” *J. of Mat. Sci.* 26, pp. 4241~4249.
- (7) Hirano, K., and Takizawa, H., 1991, “Evaluation of Fatigue Crack Growth Characteristics of Whisker-Reinforced Aluminium Alloy Matrix Composite,” *JSME Inter. J.*, Vol. 34, No. 2, pp. 221~227.
- (8) Ishii, H., Targo, K., Araki, H., and Aguspuji, P., 1993, “Fatigue of SiC Reinforced 6061 Aluminium Alloy at Elevated Temperature,” *APCFs'93*, pp. 47~52.
- (9) Lee, E. U., 1990, “Crack Path Morphology in Silicon Carbide Whisker Reinforced Aluminium Composite,” *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21 A-June, pp. 1783~1785.
- (10) 최재호, 김경택, 고명완, 이지환, 1994, “SiC 입자강화 Al 합금기 복합재료에 대한 강도의 통계적 평가에 관한 연구,” 대한금속학회지, 제32권, 제1호, pp. 56~63.
- (11) ASTM, 1990, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, Vol. 3, E647~88a, pp. 646~666.
- (12) 한영창 역, 1989, “신소재 핸드북,” pp. 88~97.
- (13) 백경호, 이규창, 한경섭, 1990, “ Al_2O_3 -AC8A 복합재료의 가압력에 따른 미세조직과 인장강도,” 한국복합재료학회지, 제3권, 제2호, pp. 49~56.
- (14) 권재도, 최선호, 황재석, 광상국, 전경욱, 장재영, 1990, “신뢰성 공학적 피로균열의 발생, 진전수명평가 및 예측에 관한 연구(I)” 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1538~1591.
- (15) 권재도, 광상국, 최선호, 황재석, 진영준, 1991, “신뢰성 공학적 피로균열의 발생, 진전수명평가 및 예측에 관한 연구(II),” 대한기계학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 907~915.
- (16) Hoppner, D. W., and Krupp, W. E., 1974, “Prediction of Component Life by Application of Fatigue Crack Growth Knowledge,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 6, pp. 47~70.
- (17) Ichikawa, M., Hamaguchi, M. and Nakamura, T., 1983, “Statistical Characteristics of m and C in Fatigue Crack Propagation Law $da/dN = C(\Delta K)^m$ (2024-T3 Al alloy),” *J. of the Society of Mat. Sci.*, Japan, VOL. 33, No. 364, pp. 8~13.

- (18) 北川英夫, 權在度, 中僧根祐司, 島崎剛, 15卷, 480號, pp. 1749~1756.
1986, “長期使用 クロムモリブデン鋼劣化材の疲
勞き裂進展壽命豫測,” 日本機械學會論文集(A),
- (19) 박연식, 윤영선, 1994, “現代統計學,” 茶山出
版社, pp. 427~430.