論文

단섬유보강 금속복합재료의 피로수명예측

남현욱* · 정기홍* · 송정일** · 한경섭*

Fatigue Life Prediction of Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites

H.U. Nam*, J.K. Jung*, J.I. Song** and K.S. Han*

ABSTRACT

Metal matrix composites(MMCs) have emerged as a class of materials capable of advanced structural, aerospace, automotive applications. These alternatives of conventional materials provide the specific mechanical properties necessary for elevated and ambient temperature applications.

AC2B alloy reinforced with 15vol.% of Saffil-Al/Al_2O_3 fiber was fabricated by squeeze infiltration method. Mechanical properties of Al/Al_2O_3 composites and matrix alloy were investigated and also their fatigue life was predicted.

Tensile test was performed at room temperature. Tensile properties such as young's modulus and UTS were improved up to 16% and 4% respectively by the addition of reinforcements.

Load controlled fatigue tests were performed using a tension-tension loading, A sinusoidal waveform with frequencies of 2 to 10Hz was used. Fatigue life was predicted using modified fatigue life prediction equation(MFLPE) and S-N curve. Both predictions show good agreements with experimental data.

Fatigue strength of Al/Al_2O_3 composites and matrix alloy were about 194MPa and 176MPa, respectively. The deformation of a matrix alloy have occurred at the beginning of fatigue and at the end of fracture. But composites were deformed at the beginning of fatigue. The cyclic hardening phenomena of both matrix and composite showed at all stress levels.

초 록

금속복합재료는 고온에서 필요한 여러가지 기계적 물성을 제공하여 구조물이나 항공기, 자동차등의 분야에서 기존의 재료를 대체하면서 등장하였다.

AC2B 알루미늄과 알루미나(Saffil)을 사용하여 15vol.%의 복합재료를 가압침투법으로 제조하였다. 제조된 복합재료를 이용하여 기계적 물성을 평가하고, 피로시험을 통해 피로 수명을 예

* 포항공과대학교 기계공학과
** 포항산업과학연구원 기계설비연구팀

측하였다. 상온에서 인장시험을 수행하였으며, 보강재의 첨가로 인한 물성은 탄성계수의 경우 16%, 인장강도의 경우 4% 정도 향상되었다.

피로시험은 하중제어로 수행하였다. 피로시험중 하중은 2~10Hz의 싸인파를 사용하였다. 피로수명예측은 MFLPE(modified fatigue life prediction equation)과 S-N curve를 이용하였다. 두 예측식 모두 실험결과를 잘 만족하였으며, MFLPE는 S-N curve 보다 높은 응력수위에서 보다 낮은 응력수위에서 피로특성이 좋아지는 금속복합재료의 피로 특성을 잘 보여주었다. 피로강도는 Al/Al_2O_3 복합재료의 경우 194MPa이었고, 기지재의 경우는 176MPa였다.

기지재는 피로초기와 파단직전에 많은 변형이 일어났으며, 금속복합재료는 피로초기에 대부분의 변형이 일어났다. 금속복합재료와 기지재 모두 모든 응력수위에서 주기적 경화 현상을 보였다.

1. 서 론

과학과 기술의 발전에 따라 여러 분야에서 기존의 재료보다 우수한 특성을 발휘하는 첨단소재의 필요성이 대두되었으며, 이러한 요구에 의해 등장하게 된 것이 고기능성 금속복합재료이다. 금속복합재료는 기존의 구조용재료에 비강도, 비강성이 월등한 강화재를 보강시킴으로써 탄성계수, 인장강도 및 피로강도를 향상 시키고, 또 낮은 열팽창계수와 내마모성을 향상시키는 등 첨단소재로서의 고기능성을 가지는 동시에 재료가 가볍다는 장점을 지니고 있어 신소재로서 각광 받고 있다[1~2].

금속복합재료는 비강도가 큰 보강재의 하중전달이나, 기지재의 경화효과(matrix hardening effect)등의 강도 향상요인외에 보강재 주위의 기공, 기지재와 보강재의 계면에 응력집중, 분리(debonding) 현상등 강도 저하 요인들도 많이 있어 이들에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[3~5]. 이들 강도저하요인의 주 원인중의 하나가 잔류응력이며, 잔류응력은 금속복합재료의 인장강도나 피로특성 등에 많은 영향을 끼친다. 일반적으로 보강재에는 압축 잔류응력이 발생하며, 기지재에서는 인장-압축 두 방향의 잔류응력이 동시에 존재한다[6]. 또, 금속복합재료는 기지재로 사용되는 알루미늄의 영향으로 시효처리를 통한 석출강화를 통해 원하는 강도를 얻을 수 있는데, 이러한 시효처리도 금속복합재료의 전체적인 물성에 많은 영향을 끼침으로 이에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다[7].

한편, 금속복합재료는 주로 항공기나 자동차의 실린더 라이너, 크랭크축과 같은 반복하중을 받는 곳에 응용이 되는 재료로서, 금속복합재료의 피로특성과 수명예측은 필수적이라 할 수 있다. 금속복합재료의 피로에 관한 연구로는 주로 손상발생이나 손상과정에 대한 연구가 진행되었고[8~9], low cycle에서의 금속복합재료의 피로연구도 진행되고 있다[10]. 손상에 영향을 주는 요인들로서 잔류응력, 보강재의 크기나 모양등이 있으며, 또 표면의 조도 역시 영향을 미친다고 보고되고 있다[11].

금속복합재료의 피로 연구는 손상발생, 균열진전특성등 피로 특성에 관하여는 많은 연구가 진행되었으나 피로수명예측에 관한 연구는 미미한 실정이다. 복합재료의 피로수명예측을 위한 연구로 다양한 모델이 제시되었으며, 특히 Hwang과 Han은 피로계수와 합변형을 파단조건을 이용하여 제안한 피로 수명예측식을 새로이 참고 계수의 개념을 도입함으로서, FRP와 파괴양상이 다른 금속복합재료에도 피로수명예측이 가능하게 하였다[12~13].

본 연구에서는 자동차용 실린더에 사용되는 AC2B Al 합금을 이용하여 단섬유가 보강된 금속복합재료의 피로특성을 규명하고, Hwang과 Han이 제안한 피로계수를 이용하여 피로 수명을 예측하였다.

2. 피로수명 예측식(MFLPE)

2-1. 피로계수

재료가 반복하중을 받으면 가공 경화(Strain hardening)나 가공 연화(Strain softening)가 일어나게

되며, 이로 인하여 재료는 주기적으로 변하게 된다. 여기서 Hwang과 Han[12~13]이 제안한 피로계수는 특정한 하중주가 n에서 가한 응력과 그때의 변형율을 잇는 직선 0-n의 기울기로 정의된다.

$$F(n, q) = \frac{\sigma_a}{\varepsilon(n)} = \sigma_u \frac{q}{\varepsilon(n)} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, $F(n, q)$: 하중수위(q), 하중주기(n)에서의 피로계수

$\varepsilon(n)$: n번째 하중주기에서의 합변형률

q : 인장강도(σ_u)에 대한 가한 응력(σ_a)의 비

초기 및 경계조건은 다음과 같다.

$$F(0, q) = F_o = E_o$$
$$F(N, q) = F_f$$

2-2. 단일응력 수위의 피로수명 예측

피로계수 저하율 dF/dn은 피로주기 n의 지수함수로 나타낼 수 있다고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dF}{dn} = -A\frac{Cn^{C-1}}{BF^{B-1}} \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서, A, B 그리고 C는 재료상수이다.

식(2)를 n_2에서 n_1 주기까지 적분하면 다음과 같다.

$$F^B(n) - F^B(0) = -A(n_2^C - An_1^C) \quad \cdots\cdots (3)$$

$n_2 = n$, $n_1 = 0$을 대입하면,

$$F^B(n) - F^B(0) = -An^C \quad \cdots\cdots (4)$$

파괴시에는 n=N이므로 식(4)는 다음식과 같이 된다.

$$F_f^B - F_o^B = -AN^C \quad \cdots\cdots (5)$$

여기서, N은 파괴까지의 하중반복횟수, F_0는 초기 피로율 F_f는 파괴시의 피로율을 나타낸다.

기존피로율인 참고계수(reference modulus) F_R이 있다고 가정하고,

$$F_O/F_R = p \quad \cdots\cdots (6)$$

$$F_f/F_R = f(q) = q \quad \cdots\cdots (7)$$

라고 두면, p와 q는 각각 물질 상수가 된다.

식(4), (5), (6), (7)들을 정리하면, 파괴까지의 반복횟수는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$N = [M(p^B - q^B)]^{1/C} \quad \cdots\cdots (8)$$

여기서, $M = F_R^B/A$이다. 따라서, 가한 응력수위 q와 재료상수인 M, p, B, C를 구하면, 위식을 이용하여 단일응력하중하의 피로수명식을 예측할 수 있다.

3. 제조 및 실험 방법

3-1. 금속복합재료의 제조

본 연구에서는 기지재로 AC2B와 보강재로서 알루미나를 각각 사용하였다. 주조용 알루미늄합금인 AC2B는 주조성이 좋고 불순물의 허용 범위가 넓은 것이 특징이다. 보강재로 사용되는 알루미나는 ICI사의 Saffil 알루미나 RF grade의 단섬유로서 δ-결정상이다. AC2B의 화학적성분과 기본적 물성, 열처리 조건은 Table 1, Table 2에 나타내었으며, 보강재의 제원은 Table 3과 같다.

금속복합재료의 제조에 필요한 예비성형체는 보강재의 균일한 분포를 위해 진공압추출법을 사용

Table 1. Chemical compositions of AC2B Al alloy

Material	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Al
AC2B	3.0	6.0	0.5	1.0	1.0	0.5	0.35	0.2	0.2	0.1	Rem

Table 2. Mechanical property and heat treatment condition of AC2B Al alloy

Material	Mechanical Properties			Heat Treatment Condition(T6)	
AC2B	T.S.(MPa)	Elong.(%)	Hardness(HB)	Solution H.T.(℃)	Aging H.T.(℃)
	245 min	1 min	90	500℃ for 10hr	160℃ for 6-12hr

Table 3. Specification of alumina short fiber

Material	Density(g/cm^3)	Diameter(mm)	Length(mm)	Tensile Strength(GPa)	Modulus(GPa)
Al_2O_3(Saffil)	3.3	3.0	100	2.01	310

하여 제조한 후 발진주파수가 2.45GHz인 초음파 오븐을 사용하여 건조하였다. 예비성형체 내에 잔존하는 불순물의 제거를 위해 1000℃의 전기로에 2시간 노출시켰다. 금속복합재료는 가압침투법을 사용하여 제조하였다. 제조된 금속복합재료는 Table 2의 열처리 조건에 따라 T6 열처리 하였다. AC2B의 경우 열처리 과정중 시효처리시간은 8시간으로 하였으며, 금속복합재료의 경우에는 6시간으로 하였다.

3-2. 인장 및 피로 시험

정하중시험 및 피로시험을 위한 시편은 기지재와 금속복합재료 모두 위와 같은 제조방법으로 제조된 잉곳(ingot)에서 가압방향에 수직인 면에서 채취하였으며, T6열처리 후 CNC 선반으로 정밀하게 가공하고 사포로 연마하여 시편의 평균 조도(roughness)는 1.5μm를 유지하게 하였다. 시편의 형태는 ASTM D3552를 기초로 물림부만 수정하여 제작하였다.

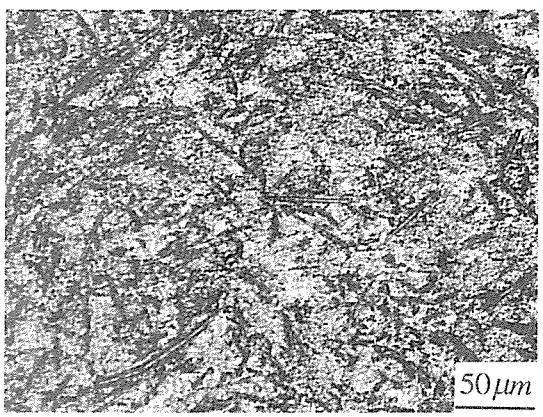
인장시험은 상온에서 MTS(100KN)를 이용하였다. 금속복합재료와 기지재 모두 0.01mm/sec의 변위 제어로 수행하였다. 인장시험의 경우 시편에 gage length 20mm의 신장계(extensometer)를 부착하여 응력-변형률 선도를 PC로부터 얻었다.

피로시험은 인장시험의 경우와 동일한 시험기와 시편을 이용하여 하중제어(load control)로 인장-인장의 사인파(isnusoidal wave) 형태의 하중을 가하여 실시했다. 주파수는 응력수위[파괴응력에 대한 가한 최대응력의 비(σ/σ_u, q)]를 고려, 2-10 Hz의 범위를 사용하여 재료가 파단될 때까지의 응력-변위 곡선을 PC에 저장하였다. 응력수위의 범위는 0.9에서 약 0.50까지 다양하게 변화시켰으며 각 수위마다 1~3개의 시편을 시험하였다. 실험 중 최소하중에 대한 최대하중의 비(R)는 0.1로 일정하게 유지하였으며, 피로한도는 2×10^6 cycles로 정의하였다.

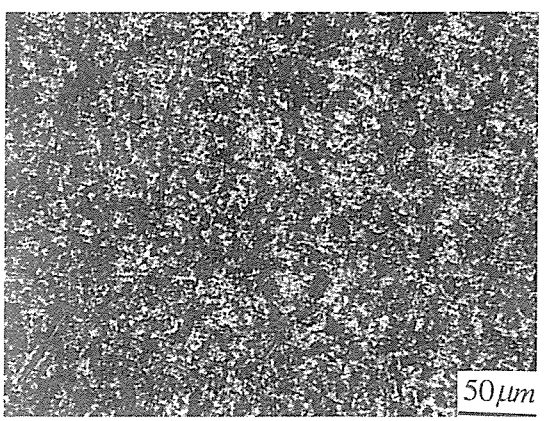
4. 결과 및 고찰

4-1. 미세구조 및 인장

Fig. 1은 금속복합재료를 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 보강재는 뭉침없이 비교적 고르게 분포



(a)



(b)

Fig. 1. Microstructure of Al/Al_2O_3 composites fabricated by squeeze casting method showing perpendicular (a) and parallel (b) to pressure direction.

하고 있으며 가압방향에 수직한 평면에서는 보강재가 주로 2차원으로 분포하고 있음이 관찰된다. 금속복합재료의 T6열처리를 위하여 경도시험을 통해 인공시효처리 시간을 결정하였다. 금속복합재료의 경우 6시간, 기지재의 경우 8시간으로 나타났다. 이것은 금속복합재료의 경우 보강재와 기지금속간의 열팽창계수차이로 보강섬유 주위의 전위밀도 증가에 따라 기지금속의 석출경화의 속도가 빨라지기 때문이다.

Fig.2에 금속복합재료 및 기지재의 인장시험결과를 나타내었다. 탄성계수는 16% 정도 향상되었으나 인장강도의 향상은 4% 정도이었다. 이것은 기지재로 사용된 AC2B가 마그네슘의 함량이 0.4%로 연신율이 2~3%인 취성재료이기 때문인 것으로 보인다. 이전의 연구결과에서도 취성재료의 인장강도 향상은 두드러지지 않는 것으로 보고 되고 있으며[14], 이것은 기지재의 성분이 금속복합재료의 인장강도에 영향을 미친다고 볼 수 있는데, 마그네슘의 함량이 1% 정도이고, 연신율이 10%인 6061알루미늄을 기지재로한 금속복합재료의 인장강도는 모재에 비해 15%이상 향상을 보이는 것은 이러한 사실을 뒷받침 해준다[15].

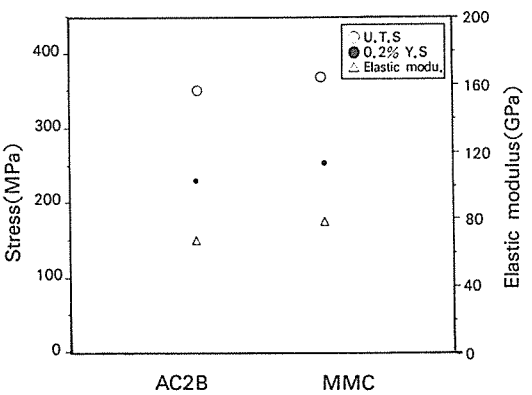


Fig. 2. Comparison of mechanical properties of each material

4-2. 피로특성과 피로수명예측

Fig.3은 금속복합재료와 기지재의 피로시험 결과를 나타낸 그래프이다. 실험 전반에 걸쳐 금속복합재료의 피로특성이 향상된 것으로 볼 수 있다. 피로수명예측을 위해 S-N 곡선과 Hwang과 Han이 제안한 MFLPE(Modified Fatigue Life Prediction Equation)을 이용하였다. Fig.3에 예측한 결과를 응력-주기 선도로 나타내었으며, Table 4.에는 S-N 곡선과 MFLPE로 구한 계수와 식을 나타내었다. MFLPE는 첫번째 모델만 계산하였다. 실험구간내에서는 MFLPE는 실험결과를 양호하게 추적하여, 금속복합재료의 피로수명식으로 사용될 수 있음을 보였다. 전반적으로 S-N 곡선과 거의 유사하며, 높은 응력수위(0.9이상)에서 S-N 곡선과

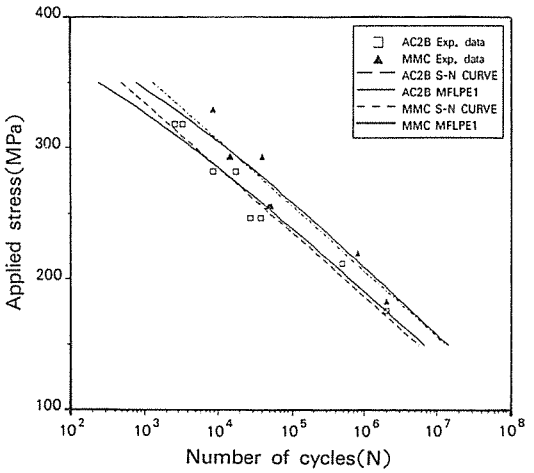


Fig. 3. Applied stress vs number of cycles for AC2B composite

Table 4. Estimation of constant and fatigue life prediction equation

Material	MFLPE1				S-N Curve	
	M	P	B	C	k	d
AC2B	148.27	1.475	0.0301	0.109	1.365	0.140
	$N=\{148.27[1.0122-(q)^{0.0301}]\}^{9.17}$				$q=1.365\log N+0.14$	
Al/Al_2O_3	173.26	1.425	0.0318	0.116	1.382	0.136
	$N=\{173.26[1.011-(q)^{0.0318}]\}^{8.62}$				$q=1.382\log N+0.136$	

차이를 보인다. 일반적으로 단섬유보강 금속복합재료는 높은 응력수위의 피로하중하에 놓일 경우, 보강재의 피로손상(fatigue damage)이 발생한다. 또한 상대적으로 취약한 부분인 보강재와 기지재의 접합부분에서 응력집중이 일어난다. 따라서 금속복합재료의 경우 높은 응력수위에서의 피로향상보다 낮은 응력수위에서의 피로향상이 두드러지는데, MFLPE는 이러한 특성을 S-N curve 보다 잘 나타내고 있다. 피로한도를 2×10^6으로 정의한 금속복합재료의 피로강도를 MFLPE에서 찾아보면 기지재의 경우는 176MPa이며 금속복합재료의 경우는 194MPa로서 피로강도가 10% 정도 향상됨을 보였다. 이것은 비강도가 높은 보강재가 하중을 나누어 받았으며, 보강재들이 피로과정중에 기지재에서 발생한 전위의 증가 및 피로균열 전파를 방해하는 역할을 함으로서 재료의 피로강도가 향상되었다. 그리고 열팽창계수차에 의해 기지재에 발생한 압축잔류응력도 피로강도를 향상시켰다고 사료된다.

금속복합재료와 기지재의 피로시험결과를 살펴보면, 피로시험시 가한 응력에서의 파단연신율이 인장시험의 연신율 보다 작은 것이 관찰되는데, 이는 두재료 모두 주기적 경화가 일어났다는 것을 나타낸다. 장섬유보강 금속복합재료에서 나타나는 탄성계수의 감소는 보이지 않았다. Fig.4, Fig.5는

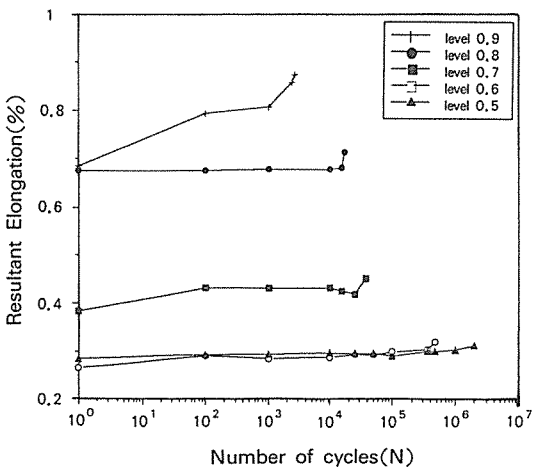


Fig. 4. Resultant elongation vs. number of cycles for AC2B

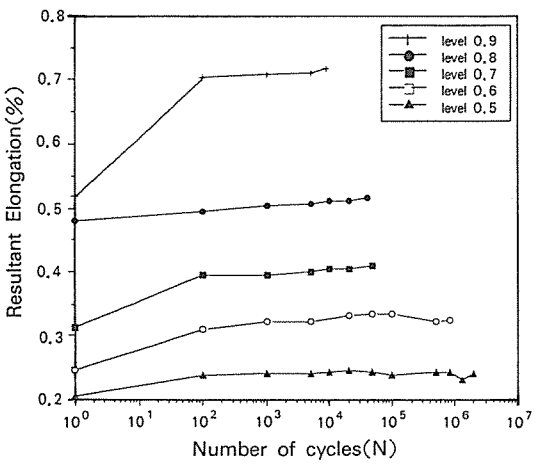


Fig. 5. Resultant elongation vs. number of cycles for composites

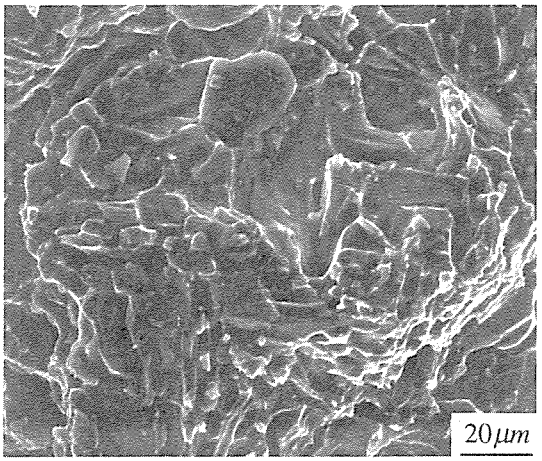
각각 기지재와 금속복합재료의 Cycle과 변위를 나타내었다. 기지재가 피로초기와 파단시에 급격히 변위가 증가되는데 비하여 금속복합재료는 초기에 일어난 변형이 파단될 때까지 유지되는 것을 볼 수 있다. 인장시험시 연신율 보다 피로시험시 파단연신율이 급격히 줄어드는 것은 기지재나 복합재료 모두 경화 현상이 일어나는 것을 뒷받침해 준다.

4-3. 파면해석

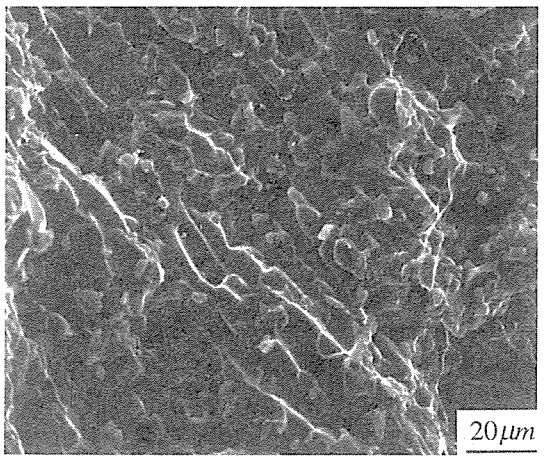
Fig.6은 기지재인 AC2B와 Al/Al_2O_3의 인장파면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 기지재의 경우 복합재료 보다 큰 딤플을 가짐을 볼 수 있다. 이것은 복합재료의 경우 보강재의 첨가로 기지금속을 미세화시킨다는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 금속복합재료의 피로 파면을 나타내고 있다. Fig.7(a)는 피로를 받지 않은 면으로서 취성파괴에서 관찰되는 예리하게 보이는 벽개파면(cleavage facet)의 형태가 지배적이며, 같은 응력수위에서 피로하중을 받은 Fig.7(b)는 파단면이 무뎌지게 나타나는 연성피로면을 볼 수 있다. 이것은 본 연구에서 사용된 AC2B 알루미늄합금이 3% 미만의 낮은 연신율을 나타낸 결과와 잘 일치하는 것으로 생각된다.

Fig.8은 기지재의 피로면을 나타낸 것으로 Fig.

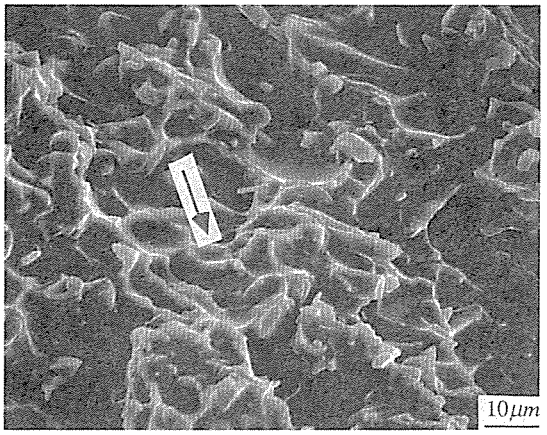


(a)

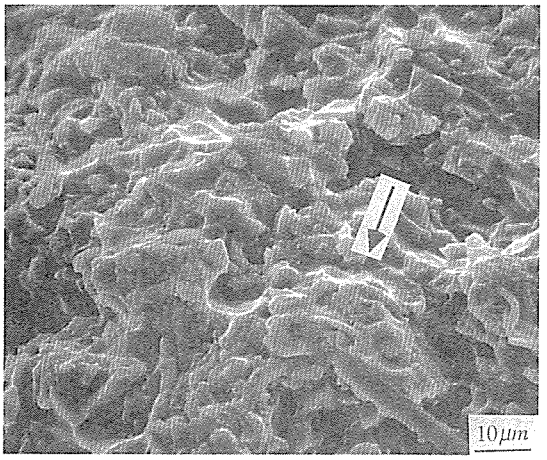


(b)

Fig. 6. Tensile fractured surfaces of (a) AC2B alloy and (b) Al/Al_2O_3 composites



(a) unfatigued surface(stress level : 0.8)



(b) fatigued surface(stress level : 0.8)

Fig. 7. Fracture surface of Al/Al_2O_3 composite after fatigue test

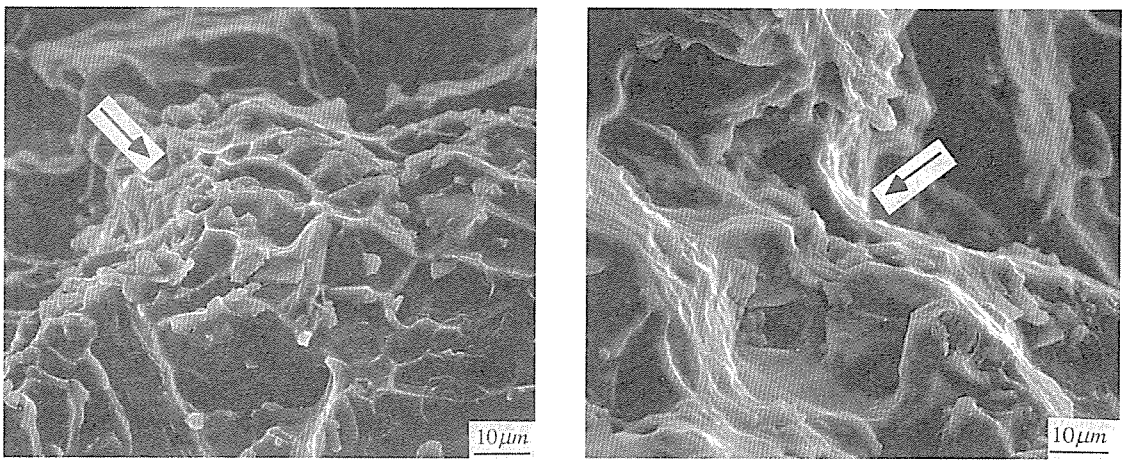
8(a)는 피로 받지 않은면을 Fig.8(b)는 피로 받은 면을 나타내는 것이다. 복합재료와 달리 딤플의 크기가 큰것을 볼 수 있으며, 복합재료에서와 마찬가지로 피로 받지 않은 면에서는 벽계파괴가 관찰되며 피로받은 면에서는 연화 현상으로 파단면이 무디어진 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 단섬유 보강금속복합재료의 피로수명 예측에 관한 연구로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Al/Al_2O_3 금속복합재료의 피로수명을 MFLPE로 예측한 결과 실험치와 잘 일치하였으며, MFLPE는 높은 응력수위에서의 피로강도 향상보다 낮은 응력수위에서 피로강도향상이 두드러지는 금속복합재료의 특성을 S-N curve 보다 잘 보여주었다.

(2) Al/Al_2O_3 금속복합재료의 피로강도는 응력수위 약 0.53인 193.5MPa로 기지재에 비하여 10 % 정도 향상되었다.



(a) unfatigued surface(stress level : 0.8) (b) fatigued surface(stress level : 0.8)

Fig. 8. Fracture surface of AC2B alloy after fatigue test

(3) 기지재는 피로초기와 파단직전에 많은 변형이 일어났으며, 금속복합재료는 피로초기에 대부분이 변형이 일어났다. 기지재와 금속복합재료 모두 모든 응력 수위에서 주기적 경화현상을 보였다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 ME 95-(-20)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R.D. Maier and M.D. Smalc, T.W. Krucek and B.O. Budinger, "Fatigue behaviour of squeeze cast metal matrix composites for deisel pistons," SAE Technical paper series, No. 920456, 1992.

2. H. Fukunaga, "Squeeze casting processes for fibre reinforced metals and their mechanical properties," Cast reinforced metal composites, ASM, 1988, pp. 133-138.

3. R.B. Bhagat, "Squeeze cast metal matrix composites : evaluation of their strength, damping capacity and corrosion resistance," J. of Com. Mat., Vol. 23, 1989, pp. 961-975.

4. G.R. Cappleman, J.F. Watts and T.W. Clyne, "The interface region in squeeze-infiltrated composites containing δ-alumina fiber in aluminum matrix," J. of Mat. Sci., Vol. 20, 1985, pp. 2159-2168.

5. U. Madelend, H. Liu, T. Shinoda, Y. Mishima and T. Suzuki, "Compatibility between alumina fibres and aluminum," J. of Mat. Sci., Vol. 25, 1990, pp. 3273-3280.

6. L.C. Davis and J.E. Allison, "Residual stresses and their effect on deformation in particle-reinforced metal matrix composites," Metall. trans. A, Vol. 24A, 1993, pp. 2487-2496.

7. A.J. Shakesheff, "Aging behavior and toughness of silicon-carbide particulate-reinforced Al-Li-Ci- Mg-Zr metal matrix composite," J. of Mat Sci., Vol. 30, 1995, pp. 2263-2268.

8. K. Schulte, et al., "Damage mechanisms under tensile and fatigue loading of continuous fiber-reinforced metal matrix composites," Composites, Vol. 24, 1993, pp. 197-208.

9. T.S. Srivatsan, "The low-cycle fatigue be-

haviour of an aluminium-alloy-ceramic-particle composites," Int. J. Fatigue, Vol.14, No.3, 1992, pp.173-182.

10. Y. Brechet, "Damage Initiation in metal matrix composites," Acta metall. Mater, Vol.39, 1991, pp.1781-1786.

11. E. Hochreiter. "Fatigue properties of particle-reinforced metal matrix compostes," Int. J. fatigue, Vol.15, 1993, pp.493-499.

12. W. Hwang and K.S. Han, "Fatigue of composites-fatigue modulus concept and life prediction," J. of Composite Materials, Vol.20, 1986, pp.125-153.

13. W. Hwang and K.S. Han, "Fatigue of composite materials-damage model and life prediction," Composite Materials : Fatigue and Fracture(2nd volume), ASTM STP 1012, Paul A. Lagace, Ed, 1989, pp.87-102.

14. 송정일, 봉하동, 양유창, 한경섭, "가압용침법에 의한 Al/Al_2O_3 금속복합재료의 기계적물성과 마모거동," 한국복합재료학회지, 제7권, 제3호, 1994, pp.20-32.

15. 양유창, 송정일, 봉하동, 한경섭, "단섬유보강 금속복합재료의 주기적 변형 및 피로거동," 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, 1995, pp.1422-1430.