

〈論 文〉

단섬유보강 금속복합재료의 반복적 변형 및 피로특성

양유창** · 송정일* · 봉하동** · 한경섭*

(1994년 10월 8일 접수)

Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites

Y. C. Yang, J. I. Song, H. D. Bong and K. S. Han

Key Words : Squeeze Infiltration Method(가압주조법), Cyclic Deformation(반복적 변형), Metal Matrix Composites(금속복합재료), Fatigue Strength(피로강도), Resultant Displacement(합변위)

Abstract

Al6061 alloy reinforced with 15 volume % of Saffil fibers was fabricated by squeeze infiltration method. Uniform distribution of reinforcements and good bondings between reinforcements and matrix alloy were found in the microstructure of composites. Comparing with Al6061 matrix alloy, tensile strength and elastic modulus of Al₂O₃/Al composites were increased up to 26% and 31%, respectively. Cyclic deformation and fatigue behavior of Al₂O₃/Al metal matrix composites were studied. The specimens were cycled using tension-tension(R=0.1) loading and under load controlled fatigue test. Cyclic stress-displacement curve through fatigue test was obtained. Fatigue strength of Al₂O₃/Al composites was about 200 MPa, i. e. 0.55 of applied stress level(q). During fatigue test, Al₂O₃/Al composites displayed cyclic hardening at all applied stress levels. The most of resultant displacement due to permanent plastic deformation occurred in less than the first 5% of fatigue life. Displacement-to-failure of the fatigue test was smaller than that of the tensile test because of accumulative damage by cumulative plastic deformation.

기 호 설 명

- σ_u : 인장강도
- E : 탄성계수
- q : 응력수위 (인장강도에 대한 시편에 가해진 응력의 비(σ/σ_u))
- N : 반복회수
- N_f : 피로수명
- ϵ_N : N 번째 반복회수의 합변위 — $N-1$ 번째 반복회수의 합변위
- $\Delta\epsilon_N$: N 번째 반복회수의 반복변위량

ΔS_N : N 번째 반복회수의 응력범위

1. 서 론

금속복합재료(metal matrix composites: MMCs)는 기존의 구조용 재료에 경량이면서도 비강성, 비강도가 월등한 강화재를 보강시킨 것으로서, 구조재료의 경량화 및 고기능화의 요구에 부응할 수 있으며, 기계적 성질이 우수하고 기존의 금속재료 제조기술을 응용할 수 있다는 장점때문에 신소재로서 부각되고 있다. 특히, 알루미늄 단섬유보강 알루미늄

*정회원, 포항공과대학교 기계공학과

**포항공과대학교 기계공학과

높 기지복합재료는 그 기지재에 비하여 증가된 탄성계수, 인장강도 및 피로강도의 향상, 낮은 열팽창계수, 내마모성 등의 이점을 가지고 있는 것으로 밝혀졌다.^(1,2) 이 재료는 주로 자동차산업에서 경량, 저소음 및 고효율 엔진의 필요에 의해 개발되었으며 피스톤 헤드 부분에서의 적용에 성공, 최근에는 커넥팅로드(connecting rod), 피스톤 핀(piston pin), 실린더라이너(cylinder liner) 등으로 그 응용 범위가 확대되고 있다.^(3,4)

이와 같이 주로 반복하중하에서 사용되는 구조재에 금속복합재료의 성공적인 적용을 위해서는 금속복합재료의 피로파괴와 반복변형에 대한 이해가 필수적이며, 손상(damage)의 발생과 축적에 대한 정보는 금속복합재료의 응용부분에 대한 설계와 해석, 피로수명예측에 중요하다.

일반적으로 금속 합금(alloy)의 피로손상은 정적하중을 받는 경우에 비해 현저히 증가된 dislocation과 point defects 그리고 균열(crack)이 발생되기 쉽게 표면이 거칠어지는 현상에 기인하며 피로 균열은 그러한 피로손상에 의한 결함과 inclusions 및 grain 경계를 따라 전파됨이 밝혀졌다. 또한, 피로하중을 받을 때 생기는 영구변형은 반복경화(cyclic hardening) 또는 반복연화(cyclic softening) 현상에 의한 것으로 합금의 조성, 미세조직, 시험 온도 그리고 하중의 형태에 주된 영향을 받는다.⁽⁵⁾ 현재까지 섬유보강 플라스틱(fiber reinforced plastic, FRP) 및 장섬유보강 금속복합재료(continuous fiber reinforced MMCs)의 피로거동 및 손상에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔다.⁽⁶⁻¹⁴⁾ 섬유보강 복합재료의 피로거동 및 피로수명예측을 위하여 다양한 모형이 제시되었으며, 특히 Hwang과 Han^(6,7)은 피로계수(fatigue modulus)와 합변형률(resultant strain) 파단조건을 이용하여 제안한 수명예측식을 새로이 참고계수(reference modulus)의 개념을 도입하여 보다 정확한 피로수명예측식을 제안하였다. 장섬유보강 금속복합재료에 대한 연구로서는 Johnson,^(8,14) Dvorak,^(9,10) Majumdar⁽¹¹⁾ 등이 주로 B/Al, SiC/Al, B/Ti, SiC/Ti 금속복합재료의 피로거동에 관한 연구에서, 장섬유보강 금속복

합재료의 피로손상은 수많은 균열이 누적된 결과로서 기지균열(matrix cracking), 섬유와 기지재료의 분리(debonding), 층간분리(delamination), 기공의 성장(void growth), 보강재 파단(fiber breakage)의 섬유보강 플라스틱의 피로기구와 유사한 형태로 나타나며, 이들의 조합된 기구에 의해 피로파괴가 발생함을 밝혔다.

단섬유보강 금속복합재료 및 세라믹입자보강 금속복합재료(ceramic particulate-reinforced MMCs)는 최근에 구조재로서의 응용이 활발해짐에 따라 최적 제조조건, 기계적물성 및 미세조직에 관한 많은 연구가 수행되고 있으나, 피로거동에 관한 연구는 아직 국내외적으로 미미한 실정이다.^(5,15-21) Llorca 등⁽²⁰⁾은 단섬유보강 금속복합재료의 반복변형에 관한 연구에서 피로거동중의 미세조직 변화는 보강재와 기지재 사이의 열팽창률의 불일치로 생기는 dislocation의 증가, 기공의 형성, 경계면에서의 화학적 반응물 석출, 보강재와 기지재의 경계분리 등에 기인하며, 순수한 금속의 피로거동과 주된 다른 점은 취성의 보강재와 일반적으로 연성인 기지재간의 강제적 소성유동(plastic flow)에 기인한 기지재에서의 강한 응력의 발생이라고 밝혔다.

본 연구에서는 가압용침법을 이용하여 부피분율 15%의 단섬유보강 Al₂O₃/Al 복합재료를 제조한 후 반복적 응력-변위의 관계변화를 중심으로 피로 거동(fatigue behavior)과 피로하중하에서의 반복변형(cyclic deformation)에 대해서 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 기지재료는 Al-Mg-Si계열의 6061 알루미늄합금이며 그 화학적 조성은 Table 1⁽²³⁾에 나타내었다. 보강재는 RF-grade Saffil 알루미늄 단섬유로서 δ-결정상이며 약 5% 정도의 실리카(silica)를 포함하고 있다. 그에 대한 제원은 Table 2⁽²⁴⁾에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of 6061 Al alloy(wt. %)

Material	Si	Cu	Mg	Cr	Al
6061 Al alloy	0.40~0.8	0.15~0.40	0.8~1.2	0.04~0.35	Balance

2.2 금속복합재료의 제조

가압용침법에 의한 금속복합재료의 제조에 필요한 예비성형체는 보강재의 균일한 분포를 위해 진공압추출법을 사용하여 제조한 후 발전주파수가 2.45 GHz인 초음파오븐(microwave oven)을 사용하여 건조하였다. 성형체는 무기성형제로서 silica colloid를 사용하였다.

예비성형체의 제조방법은 다음과 같다. 증류수와 무기성형제를 95 : 5의 질량비율로 혼합하여 성형제 수용액을 만든 다음, 예비성형체 부피의 15%에 해당하는 보강재와 성형제 수용액을 서로 혼합하고 몰드에 넣은 뒤, 진공펌프를 작동시켜 예비성형체 내의 수분을 충분히 제거한 후 유압프레스로 가압하여 직경 110 mm, 높이 20 mm, 보강재의 부피분이 15%인 예비성형체를 완성하며, 초음파를 이용하여 30분간 건조한 후 1000°C의 전기로에서 2시간 소결시킨다.

금속복합재료는 가압용침법을 사용하여 다음과 같은 방법으로 제조하였다. 알루미늄합금을 질소(N₂) 분위기의 전기로에서 830°C로 용융시키고 금형과 예비성형체를 각각 500°C로 예열한 후 금형과 예비성형체를 가압주조장치에 위치시키고 용탕주입과 동시에 가압속도 2.0 cm/sec로 펀치를 가압한 후 60초 동안 25 MPa의 압력을 유지하여 원형의 잉곳(지름 : 11 cm, 높이 : 3 cm)을 제작한다. 제조된 금속복합재료는 T6 열처리되었다. (용체화처리 : 540°C에서 4시간 → 수냉 → 시효처리 : 180°C에서 4시간 → 공냉)

주사전자현미경(SEM) 및 광학현미경을 이용하여 예비성형체 및 금속복합재료의 제조상태를 확인하고 그 미세조직을 관찰하였다.

2.3 인장 및 피로실험

인장시험 및 피로시험을 위한 시편은 제조된 잉곳(ingot)에서 가압방향에 수직인 면에서 채취하였으며, T6 열처리 후 CNC선반으로 정밀하게 가공되고 사포로 연마되어 시편의 평균 조도는 1.5 μm를 유지하게 하였다. 시편의 형태는 ASTM D3552

를 기초로 물림부만 수정하여 제작하였으며 그 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

인장시험은 상온에서 피로시험기(Shimadzu, 5 ton, Japan)를 이용하여 0.5 mm/min의 변위제어로 수행하였으며, 게이지길이(gage length) 12.5 mm의 신장계(extensometer)를 부착하여 응력-변형률 선도와 응력-변위의 선도를 PC 및 X-Y 기록제로부터 얻었다.

피로시험은 하중제어(load control)로 인장-인장의 사인파(sinusoidal wave) 형태의 하중을 가하여 실시했다. 주파수는 응력수위(파괴응력에 대한 가한 최대응력의 비(σ/σ_u), q)를 고려하여 2~8 Hz로 하였다. 응력수위는 1에서 0.55까지 0.05 간격으로 하였으며 각 수위마다 1~3개의 시편을 시험하였다. 실험 중 최소하중에 대한 최대하중의 비(R)는 0.1로 일정하게 유지하였다. 피로한도는 2×10^6 cycles로 가정하였다.

파단된 시험편은 주사전자현미경을 이용하여 파단면을 미시적으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 금속복합재료의 제조

진공압추출 및 초음파건조 등의 방법을 사용함으로써 균일한 보강재의 분포를 갖는 예비성형체의 제조가 가능하였다. 예비성형체내의 보강재는 거의 2차원으로 무질서하게 분포하고 있으며 이러한 분포양상은 가압용침이 이루어진 후에도 거의 변하지 않았다.

이전의 연구결과⁽²²⁾와 6061 알루미늄합금의 용융

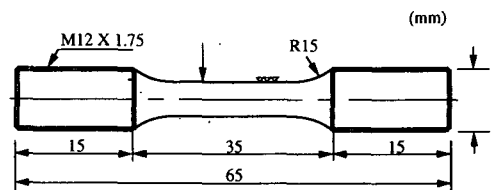


Fig. 1 Configuration of test specimen

Table 2 Specification of alumina short fiber

Material	Density (g/cm ³)	Diameter (μm)	Length (μm)	Aspect ratio (l/d)	σ _u (GPa)	E (GPa)
Al ₂ O ₃ (Saffil)	3.3	3	150	50	2.0	310

점을 고려한 가압용침 공정조건으로 양호한 금속복합재료의 제조가 가능하였다. 용침과정중 예비성형체의 함몰현상은 나타나지 않았고 완전용침이 이루어졌다. Fig. 2는 광학현미경으로 관찰한 제조된 금속복합재료의 미세조직 사진이다. 보강재는 뭉침

없이 비교적 고르게 분포하고 있으며 가압방향에 수직한 평면에서는 보강재가 주로 2차원으로 분포하고 있음이 관찰된다.

금속복합재료의 T6 열처리시 시효처리시간은 경도를 측정하여 최고경도가 나타나는 시간으로 정하였다. 일반적으로 단섬유보강 금속복합재료는 보강재와 기지금속간의 열팽창계수의 차이로 보강섬유 주위의 전위밀도 증가에 따라 기지금속의 석출경화의 속도가 빨라진다. 인공시효처리결과, 알루미늄 기지재와 Al₂O₃(15%)/Al 복합재료의 최적 시효처리시간은 각각 10시간과 4시간으로서, Al₂O₃(15%)/Al 복합재료가 기지재에 비하여 6시간이 빨랐다.



Fig. 2 Microstructure of Al₂O₃/Al composites made by squeeze casting

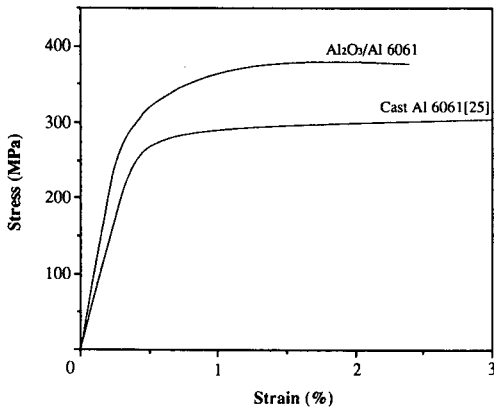


Fig. 3 Stress-strain curves for Al6061 and Al₂O₃/Al composites

3.2 피로거동

Fig. 3은 본 연구에서 제조한 부피분율 15%의 알루미늄 단섬유보강 Al6061 금속복합재료의 인장시험 결과를 응력과 변형률의 선도로 나타낸 것이다. Table 3은 금속복합재료와 기지재(matrix)의 인장시험결과를 나타낸 것이다. 금속복합재료는 기지재에 비하여 탄성계수 및 인장강도가 각각 31%, 26% 향상되었다. 한편, 취성재료인 알루미늄 보강재의 영향으로 금속복합재료의 연신율(elongation)은 기지재의 9~12%에 비하여 현저하게 감소한 2~3%의 값을 나타내었다.

Fig. 4는 응력수위(q)의 변화에 따른 피로수명을 나타낸 그래프이다. 응력수위 0.90 이상의 고하중이 가해진 경우, 복합재료는 Fig. 3의 인장그래프에서와 같이 소성변형 영역에 놓이게 되어 응력수위의 변화에 따른 시험초기에 발생된 소성변형의 큰 차이로 인해서 피로수명의 변화가 심한 것을 알 수 있다. 그에 비하여 응력수위 0.70~0.90의 부분은 상대적으로 응력수위에 따른 피로수명의 변화가 크지 않았으며, 0.70 이하의 낮은 응력수위에서는 금속복합재료의 탄성영역내에 들어가게 되어 다시 피로수명의 급격한 증가를 보이게 된다. 피로한도를 2×10⁶ 주기로 정의한 본 연구에서의 피로강도

Table 3 Tensile properties of materials studied (T6 test treated)

Material	Elastic modulus (GPa)	0.2% yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Cast Al6061 ⁽²⁵⁾	70	251	301	9~12
Al ₂ O ₃ /Al	92	310	378	2~3

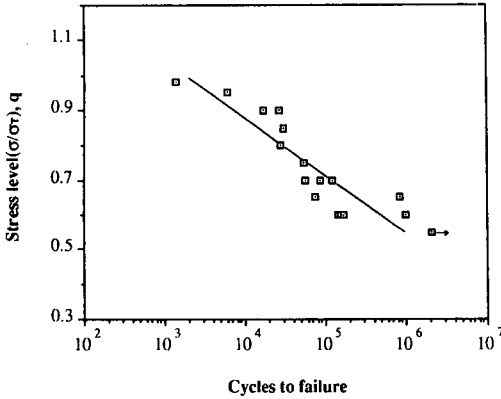


Fig. 4 q-N curve for Al₂O₃/Al composites

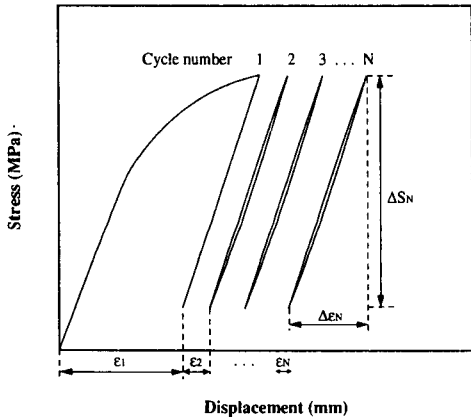


Fig. 5 Example of stress-displacement recording of Al₂O₃/Al composite specimen

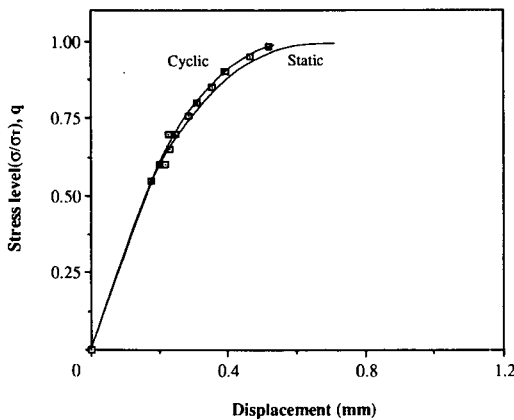


Fig. 6 Static and cyclic stress level(q)-displacement curves for Al₂O₃/Al composites

는 0.55의 응력수위, 약 200 MPa으로 나타났다.

피로시험중 반복하중에 따른 신장계의 미끄러짐 등에 의한 연속적인 변형률측정의 어려움으로 본 실험에서는 시편전체의 변위를 측정하였다. Fig. 5는 반복적 응력-변위 그래프의 한 예이다. 여기에서 ϵ_N , $\Delta\epsilon_N$, ΔS_N 는 각각 다음과 같이 정의되었다.

ϵ_N = N번째 반복회수의 합변위 — N-1번째 반복회수의 합변위

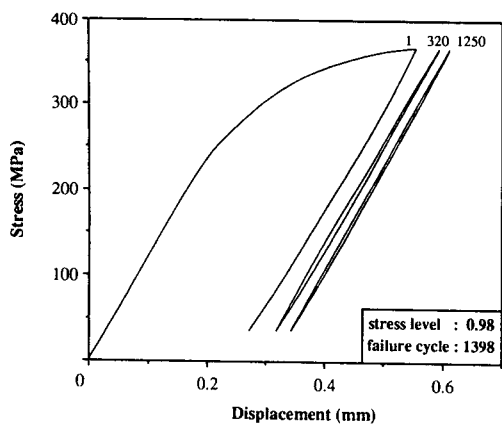
$\Delta\epsilon_N$ = N번째 반복회수의 반복변위량

ΔS_N = N번째 반복회수의 응력범위

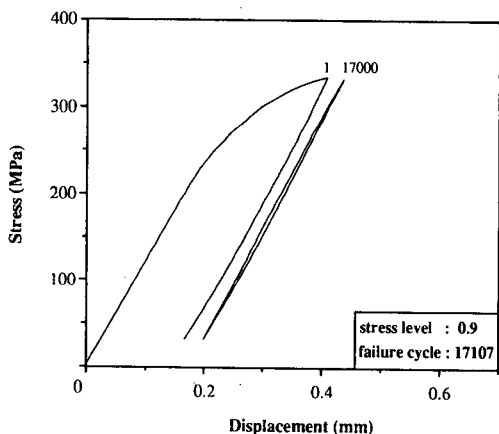
Fig. 6은 정적(static)하중과 반복적(cyclic)하중에서의 응력-변위의 선도를 비교한 것이다. 반복적 응력-변위선도는 각 응력수위에 대한 $\epsilon_1 + \Delta\epsilon_1$ 의 값들을 도시험으로써 얻어졌다. 반복적 응력-변위선도에서 탄성계수의 변화는 없으며 주로 기지재의 영향에 의한 소성영역에서의 반복경화현상(cyclic hardening)이 관찰된다.

Fig. 7은 응력수위에 따른 반복적 응력-변위의 관계를 나타낸 그래프이다. 하중제어모드에 의한 시험방법으로 시험도중 ΔS_N 는 각 응력수위에서 일정하게 유지되었다. 대부분의 장섬유보강 금속복합재료의 피로거동과 Liu⁽²¹⁾의 단섬유 금속복합재료에 대한 연구결과에서 나타나는 반복수에 따른 탄성계수의 감소현상은 나타나지 않았으며, 오히려 Fig. 8과 같이 $\Delta\epsilon$ 은 반복수에 따라 연속적으로 감소하는 현상을 보였다. 이 사실로부터 Al₂O₃/Al 복합재료에서는 피로에 의한 기지재 내부의 dislocation 증가에 따른 경화(hardening)현상이 전체 피로수명의 대부분에서 나타나며, 그 영향은 피로에 의한 결과로 발생하는 보강재의 debonding 및 손상이 강도저하에 미치는 영향에 비하여 상대적으로 크을 알 수 있다. 이러한 경화현상은 SiC_p/Al 복합재료에 대한 Srivatsan⁽⁵⁾의 연구결과에서도 관찰된 바 있다. 최종적으로 Al₂O₃/Al 복합재료의 파단은 피로수명의 마지막 순간에서 복합적인 미세균열(microcrack)의 생성 및 합체에 의한 거시적균열(macrocrack)의 발생 그리고 급속한 균열의 전파로 이어져 강도저하로 인해 일어난다.

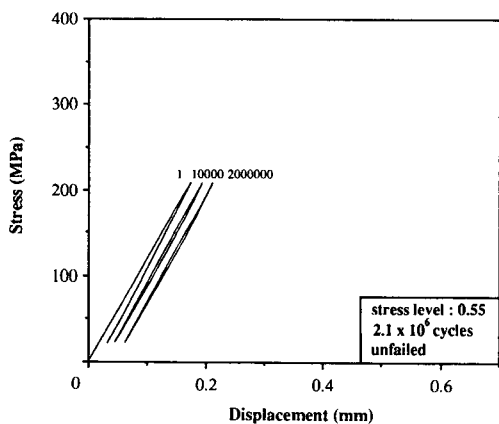
Fig. 9는 반복회수에 따른 합변위의 변화를 각 응력수위별로 나타낸 그래프이다. 세로축위에 표시된 값들은 각 응력수위에서의 ϵ_1 값이 된다. ϵ_1 의 크기는 초기 소성변형, 기존하는 결합의 성장과 보강재끝과 같은 내부의 응력집중 부위에서의 많은



(a) $q=0.98$



(b) $q=0.9$



(c) $q=0.55$

Fig. 7 Cyclic stress-displacement behavior of Al_2O_3/Al composites

미세균열의 생성으로 인하여 후속하는 어떠한 주기보다도 크며, 응력수위가 높아짐에 따라 전체 합변위에서의 ϵ_1 이 차지하는 비율도 커짐을 알 수 있다. 소성영역에서 하중을 받는 고응력 수위의 경우, 초기에 합변위의 급격한 증가양상을 보인다. 또한, 모든 응력수위에서 파단시의 최종 합변위에 반복적 변위량을 더한 값은 인장시험의 0.7~0.8 mm의 결과와 비교해서 비교적 작은 경향을 보였다. 이것은 피로하중 하에서의 축적된 소성변형 때문이다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 반복회수(N)를 각 응력수위에서의 피로수명(N_f)으로 나누어 무차원화한 그래프이다. 파괴까지의 변위증가는 응력수위 0.98일

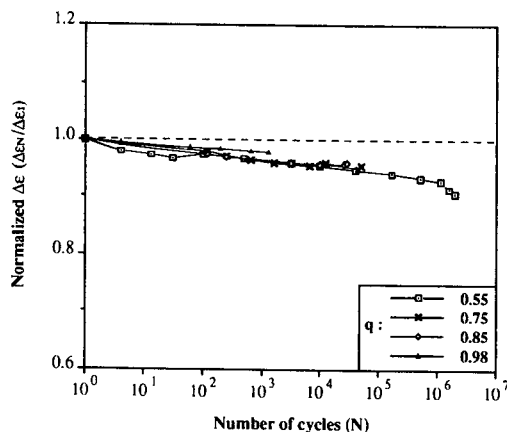


Fig. 8 Changes of cyclic displacement($\Delta\epsilon$) during fatigue test

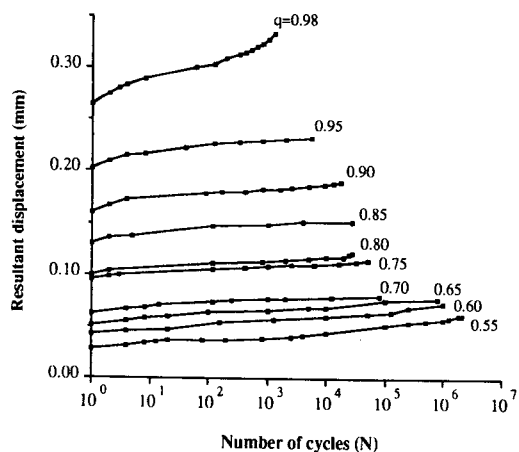


Fig. 9 Resultant displacement versus number of cycles

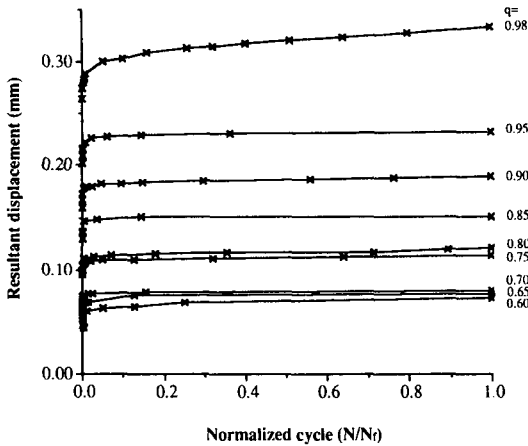


Fig. 10 Resultant displacement versus normalized cycle(N/N_f)



Fig. 11 SEM photographs of fractured surface for Al₂O₃/Al composites

때를 제외하고 모든 경우에 있어 피로수명 초기 5% 이내에서의 합변위증가가 전체 피로수명에서의 합변위의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 영구소성변형(permanent plastic deformation)이 피로초기에 대부분 발생한다는 것과 그에 따르는 반복적 경화현상 또한 피로초기에 빠르게 발생함을 의미한다. 또한 피로수명의 약 5%이후의 반복회수에서는 합변위가 매우 완만하게 증가하고 있다.

Fig. 11은 인장과 피로시험 후 파단면을 SEM으로 관찰한 것으로, Fig. 11(a)의 인장파면에서 보강재의 뽑힘(pull out)현상은 거의 발견되지 않으며 주로 보강재의 파단이 두드러졌다. 위의 사실로부터 기지재인 알루미늄합금과 보강재인 세라믹섬유간의 결합이 양호하게 이루어졌음을 알 수 있다. 한편, Fig. 11(b)의 피로파면에서는 연속적인 피로하중에 의한 기지재와 보강재간의 분리(debonding) 등의 결과로 화살표로 표시한 부분과 같이 보강재가 뽑혀나간 흔적이 관찰되며 연속피로파면에서 관찰되는 striation이나 beach mark같은 피로흔적은 발견되지 않았고, 시험편의 전체 단면에서 피로균열 발생영역(initiation site)은 매우 좁게 나타나 취성파괴의 경향을 나타내었다.

4. 결 론

가압용침법을 사용하여 제조된 15% 부피분율의 알루미늄나 단섬유보강 금속복합재료에 대한 반복적 변형 및 피로거동에 관한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제조시 용침과정중 예비성형체의 함몰현상은 발견되지 않았으며 완전한 용침이 이루어졌다. Al₂O₃/Al 복합재료내의 보강재들은 주로 가압방향에 수직한 평면에 2차원으로 균일한 분포를 갖는다.

(2) Al₂O₃/Al 복합재료는 기지재인 Al6061에 비하여 탄성계수 및 인장강도가 각각 31%와 26% 향상되었으며 보강재의 영향으로 연신율은 약 75% 감소하였다. Al₂O₃/Al 복합재료의 피로강도는 약 0.55의 응력수위, 약 200 MPa로 나타났다.

(3) 영구소성변형에 의한 합변위는 고응력 수위 일 때를 제외하고 피로수명 초기 5% 이내에서 대부분 발생하며 파단시의 최종 합변위는 축적된 소성변형으로 인하여 인장시험에서의 연신율에 비해 비교적 작은 값을 가진다.

(4) 모든 응력수위에서 Al₂O₃/Al 복합재료는 피로수명의 대부분에서 경화현상이 나타났으며, 그 결과, 반복적 변위(cyclic displacement)는 피로하

중을 받음에 따라 지속적으로 감소하였다. 피로파면은 보강재의 영향으로 취성파단의 경향을 나타내었다.

후 기

본 논문은 1993년도 G7-Project(경량 금속복합재료 개발(Ⅱ))의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Maier, R. D., Smalc, M. D., Krucek, T. W. and Budinger, B. O., 1992, "Fatigue Behaviour of Squeeze Cast Metal Matrix Composites for Diesel Pistons," *SAE Technical Paper*, Series, No. 920456.
- (2) Fukunaga, H., 1988, "Squeeze Casting Processes for Fibre Reinforced Metals and Their Mechanical Properties," *Cast Reinforced Metal Composites*, ASM, pp. 133~138.
- (3) Verma, S. K. and Dorcic, J. L., 1988, "Performance Characteristics of Metal-Ceramic Composites Made by the Squeeze Casting Process," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 9[7~8], pp. 579~596.
- (4) Forgar, F., "Fiber FP/Metal Matrix Composite Connecting Rods: Design, Fabrication and Performance," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 9[7~8], pp. 561~578.
- (5) Srivatsan, T. S., 1992, "The Low-Cycle Fatigue Behaviour of an Aluminium-Alloy-Ceramic-Particle Composites," *Int. J. Fatigue*, Vol. 14, No. 3, pp. 173~182.
- (6) Hwang, W. and Han, K. S., 1986, "Fatigue of Composites-Fatigue Modulus Concept and Life Prediction," *J. of Composite Materials*, Vol. 20, pp. 125~153.
- (7) Hwang, W. and Han, K. S., 1989, "Fatigue of Composite Materials-Damage Model and Life Prediction," *Composite Materials: Fatigue and Fracture(2nd Volume)*, ASTM STP 1012, Paul A. Lagace, Ed., pp. 87~102.
- (8) Johnson, W. S., 1989, "Fatigue Testing and Damage Development in Continuous Fiber Reinforced Metal Matrix Composites," *ASTM STP 1032*, pp. 194~221.
- (9) Dvorak, G. J. and Johnson, W. S., 1980, "Fatigue of Metal Matrix Composites," *Int. J. Fracture*, Vol. 16, No. 6, pp. 585~607.
- (10) Dvorak, G. J. and Johnson, W. S., 1981, "Fatigue Mechanisms in Metal Matrix Composite Laminates," *Advances in Aerospace Structures and Materials*, ASME AD-01, pp. 21~34.
- (11) Majumdar, B. S. and Newaz, G. M., 1992, "Inelastic Deformation of Metal Matrix Composites: Plasticity and Damage Mechanisms," *Phil. Magazine A*, Vol. 66, No. 2, pp. 187~212.
- (12) Gabb, T. P., Gayda, J., Bartolotta, P. A. and Castelli, M. G., 1993, "A Review of Thermomechanical Fatigue Damage Mechanisms in Two Titanium and Titanium Aluminide Matrix Composites," *Int. J. Fatigue*, Vol. 15, No. 5, pp. 413~422.
- (13) Schulte, K. and Minoshima, K., 1993, "Damage Mechanisms Under Tensile and Fatigue Loading of Continuous Fibre-Reinforced Metal-Matrix Composites," *Composites*, Vol. 24, No. 3, pp. 197~208.
- (14) Johnson, W. S., 1993, "Damage Development in Titanium Metal-Matrix Composites Subjected to Cyclic Loading," *Composites*, Vol. 24, No. 3, pp. 187~196.
- (15) Masuda, C. and Tanaka, Y., 1992, "Fatigue Properties and Fatigue Fracture Mechanisms of SiC Whiskers or SiC Particulate-Reinforced Aluminium Composites," *J. Mat. Sci.*, Vol. 27, 413~422.
- (16) Bonnen, J. J., Allison, J. E. and Jones, J. W., 1991, "Fatigue Behavior of 2XXX Series Aluminium Alloy Reinforced with 15 Vol. Pct. SiC_p," *Metall. Trans. A*, Vol. 22A, pp. 1007~1019.
- (17) Hurd, N. J., 1988, "Fatigue Performance of Alumina Reinforced Metal Matrix Composites," *Mat. Sci. Tech.*, Vol. 4, pp. 513~517.
- (18) Hochreiter, E., Panzenbock, M. and Jeglitsh, F., 1993, "Fatigue Properties of Particle-reinforced Metal-Matrix Composites," *Int. J. Fatigue*, Vol. 15, No. 6, pp. 493~499.

- (19) Levin, M. and Karlson, B., 1993, "Fatigue Behaviour of a Saffil-Reinforced Aluminium Alloy(AA6061)," *Composites*, Vol. 24, No. 3, pp. 288~295.
- (20) Llorca, J., Suresh, S. and Needleman, A., 1992, "Experimental and Numerical Study of Cyclic Deformation in Metal Matrix Composites," *Metall. Trans. A*, Vol. 23A, pp. 919~934.
- (21) Liu, X. C. and Bathias, C., 1993, "Fatigue Damage Development in Al_2O_3/Al Composite," *Composites*, Vol. 24, pp. 282~287.
- (22) 임홍준, 1994, "엔진경량화용 알루미늄 복합재료의 제조조건과 피로거동에 관한 연구," 포항공과대학교 석사학위논문, pp. 21~26.
- (23) King, F. 1987, *Aluminium and Its Alloys*, John Wiley & Sons, pp. 84~87.
- (24) Data Sheet from ICI Co.
- (25) Unpublished Results.