

주조 및 압출가공된 SiC입자강화 알루미늄복합재의 피로거동 및 피로수명에 대한 비교 연구

고 승 기* · 이 경 업**
(1999년 6월 23일 접수)

A Comparative Study on the Cyclic Behavior and Fatigue Life of Cast and Extruded SiC-Particulate-Reinforced Al-Si Composites

Seung-Kee Koh and Kyung-Yop Rhee

Key Words: Particulate-Reinforced Composite(입자강화 복합재), Cyclic Plasticity(반복 소성), Cast Porosity(주조 기공), Low-Cycle Fatigue Damage(저사이클 피로손상)

Abstract

The low-cycle fatigue behaviors of cast Al-Si alloy and composite with reinforcement of SiC particles were compared with those of extruded unreinforced matrix alloy and composite in order to investigate the influence of cast and extrusion processes on the cyclic deformation and fatigue life. Generally, both cast and extruded composites including the unreinforced alloy exhibited cyclic hardening behaviour, with more pronounced strain-hardening for the composites with a higher volume fraction of the SiC particles. However, cast composite under a low applied cyclic strain showing no observable plastic strain exhibited cyclic softening behavior due to the cast porosities. The elastic modulus and yield strength of the cast composite were found to be quite comparable to those of the extruded composite, however, the extrusion process considerably improved the ductility and fracture strength of the composite by effectively eliminating the cast porosities. Low-cycle fatigue lives of the cast alloy and composite were shorter than those of the extruded counterparts. Large difference in life between cast and extruded composites was attributed to the higher influence of the cast porosities on the fatigue life of the composite than that of the unreinforced alloy material. A fatigue damage parameter using strain energy density effectively represented the inferior life in the low-cycle regime and superior life in the high-cycle regime for the composite, compared to the unreinforced alloy.

1. 서 론

탄화규소입자가 강화된 알루미늄기지 복합재(SiC-particulate-reinforced aluminum composite)는 기지금속에 비하여 비강성, 비강도가 높으며 주조, 압연, 단조, 그리고 압출 등과 같은 기존의 방법으로 제조 및 가공이 가능한 많은 장점을 지닌 새로운 재료이다.⁽¹⁾ 특히 실리콘함량을 증가시킨 Al-10%Si기지금속에 탄화규소입자(SiCp)를 강

화시킨 SiCp/Al-10%Si 복합재는 최근에 새로이 개발된 신소재이다. 기지금속에서의 실리콘함량 증가는 기지금속과 강화입자간의 상호작용을 차단하여 계면강도(interface strength)를 향상시킨다.

매우 방향성이 강한 연속적인 장섬유강화 금속기지복합재에 비하여 단섬유 또는 입자의 불연속 상으로 강화된 금속기지복합재는 근본적으로 등방성을 나타내며, 특히 주조에 의한 입자강화 알루미늄복합재의 제조는 저렴한 비용으로 비강성, 비강도 및 내마모성을 지닌 복합재를 얻을 수 있어서 차량 등과 같은 운송기기의 고강도 경량부품에 널리 사용되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 주조된 SiCp/Al-Si 복합재는 Al-Si기지금속에 비하여 강화

* 회원, 군산대학교 기계공학부

E-mail : skkoh@ks.kunsan.ac.kr

TEL : (0654)469-4717 FAX : (0654)466-2086

** 경희대학교 기계공학부

입자의 체적비에 따라 연성, 파괴인성, 그리고 피로강도가 현저히 저하되는 단점을 보인다.⁽²⁾

하중제어를 받는 고사이클 피로수명영역에서는 강화입자의 형상에 무관하게 복합재가 기지금속에 비하여 우수한 피로특성을 보이지만, 변형률 제어상태에서 복합재의 저사이클 피로수명은 기지금속에 비하여 짧은 것으로 보고되고 있다.⁽³⁾ 동일한 변형률진폭을 받는 변형률제어상태에서 기지금속이 입자강화복합재보다 상대적으로 우수한 저사이클 피로수명을 갖는 이유는 상대적으로 큰 연성을 지닌 기지금속의 반복적인 소성변형에 대한 우수한 저항성으로 설명될 수 있다. 그러나 입자강화복합재의 피로수명은 작용하중형태를 비롯하여 기지금속의 미세조직, 그리고 강화입자의 체적비, 형상, 크기, 분산도 등의 여러 영향을 받는다.^(4~12) 특히 복합재의 제조방법에 따라 기계적 특성 및 피로특성에 많은 영향을 받아서 용탕 제조 후 압출된 복합재의 향상된 기계적 성질이 보고되고 있으며,⁽¹³⁾ 분말야금법에 의하여 제조된 복합재가 주조방법에 의하여 제조된 복합재에 비하여 우수한 저사이클 피로특성을 나타내는 것으로 알려지고 있다.⁽¹⁴⁾

본 논문에서는 주조에 의한 미세조직 및 기공이 SiC 입자강화된 Al-Si 복합재의 피로거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 주조 알루미늄복합재의 피로거동특성 및 피로수명을 압출된 복합재 및 기지금속의 결과와 비교 평가하였다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 10%의 실리콘을 포함하는 알루미늄합금(Al-10%Si alloy)에 SiC입자를 첨가하여 각각 주조 및 압출되어 Duralcan에서 제조된 복합재이다. 비교를 위하여 기지금속도 복합재와 같은 방법으로 각각 주조 및 압출 제조되었다. 상당량의 규소를 포함하는 것은 복합재의 제조시에 Al_4C_3 의 생성을 피하여 강화입자와 기지금속에서의 계면강도를 증가시키기 위한 목적이다. 주조된 복합재와 기지금속은 직경 14mm, 길이 200mm의 환봉형상이며, T4열처리조건에 따라 530°C에서 5시간 열처리한 후 40°C의 물에 담금질하였다.

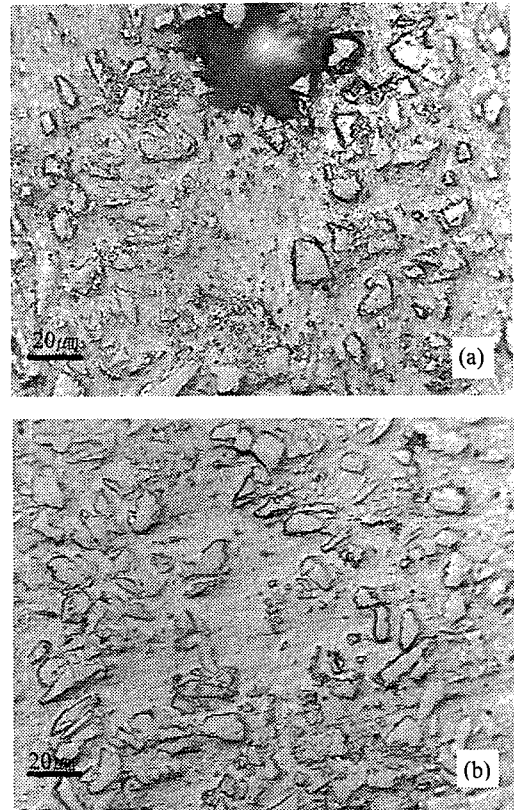


Fig. 1 Microstructures of cast(a) and extruded(b) composite reinforced with SiCp 20% volume fraction

SiC 강화입자의 체적비는 각각 10%, 20%이며, 입자의 평균크기는 약 15 μ m이다. 열처리 후 기지금속과 복합재에는 SiC 강화입자와 함께 약 2 μ m크기의 Si입자가 존재하고 있으며, SiCp 10%vf/Al-Si 복합재의 조직에서는 강화입자의 불균일한 분포, 즉 입자덩어리(cluster)가 존재하였으나 SiCp 20%vf/Al-Si 복합재의 조직에서는 두드러지게 나타나는 강화입자의 덩어리가 없이 대체적으로 균일한 강화입자의 분포가 관찰되었다. Fig. 1과 같이 압출된 복합재는 주조복합재와 유사한 입자분포를 보이고 있었으나 주조복합재에서 광범위하게 보이는 기공이 효과적으로 제거된 조직을 나타내었다.

시험편은 형상과 유사하도록 거친 가공을 하여 열처리를 한 후 마무리가공을 실시하였다. 시험편의 인장시험편 및 피로시험편 모두 같은 절차에 따라 제작되었다. 시험편은 ASTM 규격 E606

에 따라 표점거리에서의 직경 8mm, 길이 20mm의 일축봉상으로 제작되었으며 가공에 의한 원주방향 흠집을 제거하기 위하여 에머리페이퍼(#1000)를 이용하여 길이방향으로 연마하였다.

2.2 실험절차

인장 및 피로시험은 50kN 용량의 유압피로시험기를 이용하여 각각 ASTM standard E8, E606의 절차에 따라 수행되었다. 시험편의 굽힘에 의한 표점거리 바깥부분에서의 파단과 좌굴을 방지하기 위하여 시험기와 시험편의 축정렬에 주의를 기울였다. 일정진폭의 저사이클 피로시험과 단순인장시험은 변형률제어를 이용하여 각각 $2.0 \times 10^{-3}/\text{sec}$, $5.0 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 의 일정한 변형률속도가 되도록 하여 실험을 수행하였다.

SiC 입자강화 주조Al-Si 복합체와 압출 Al-Si 복합체의 미세조직의 영향을 고려한 재질의 피로거동 및 피로수명을 비교평가하기 위한 피로실험은 변형률비, $R_\epsilon = \epsilon_{\min}/\epsilon_{\max} = -1$ 이 되도록 하여 변형률제어상태에서 실험을 수행하였다. 피로수명은 최대하중이 25% 저하될 때의 반복수로 정의되었으나, 그 이전에 시편이 파단되는 경우에는 시편의 파단시까지의 반복수로 정의되었다. 강화입자의 체적비 및 하중조건에 따른 각 인장 및 피로시험편의 파단면은 피로하중에 의한 균열의 생성 및 전파양상을 파악하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단순인장 거동

SiC 입자강화된 주조 및 압출된 Al-Si 복합체 및 기지금속의 단순인장응력-변형률곡선은 Fig. 2와 같다. Fig. 2로부터 복합체의 체적비가 증가함에 따라 탄성계수 및 항복응력은 증가하고 있으나 연성이 급격히 감소하고 있다. 기지금속의 경우 주조재질의 인장곡선은 압출재질의 것과 유사하여 Table 1에서와 같이 비슷한 항복응력치를 보였으나 연성의 감소로 인하여 상대적으로 작은 파단변형률과 인장강도를 나타냈다. 특히 주조된 복합체(SiCp 20%vf)의 연성은 압출된 복합체에 비하여 현저히 작았으며 강화입자의 체적비가 증가함에 따라 오히려 인장강도가 감소하는 경우도

발생하였다. 이러한 현상은 주조재에 존재하는 기공으로부터의 조기파손에 기인하였으며, 기지금속에서 보다 상대적으로 연성이 낮은 복합체에서 두드러지게 나타났다.

강화입자의 첨가가 주조복합체에서의 인장강도 향상에 많은 영향을 미치지 못하는 이러한 결과는 다른 연구에서도 보고되고 있다.⁽²⁾ 그러나 본 연구에서는 압출가공에 의하여 효과적으로 기공이 제거된 SiCp 20%vf/Al-Si 복합체가 주조복합체에 비하여 항복응력과 인장강도가 각각 20%, 60% 증가하였으며, 파단변형률은 약 7배로 증가하여 매우 향상된 연성을 나타냈다. Table 1의 비교로부터 압출제조된 기지금속 및 복합체의 탄성계수가 주조제조된 기지금속 및 복합체에 비하여 각각 11%, 14% 증가함을 알 수 있다. 주조재가 압출재에 비하여 상대적으로 낮은 강성을 나타내는 것은 주조재에 존재하는 기공에 의한 하중부담면적의 감소 및 응력집중에 의한 기공주위의 국부적인 소성변형에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 2의 응력-변형률곡선은 다음의 Ramberg-Osgood 식으로 나타내어진다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \tag{1}$$

선형회귀분석으로부터 얻어진 강도계수, K와 변형률경화지수, n을 비롯한 기지금속과 복합체의 기계적 성질은 Table 1과 같으며, 강화입자의 체적비가 클수록 높은 탄성계수를 보이고 있다.

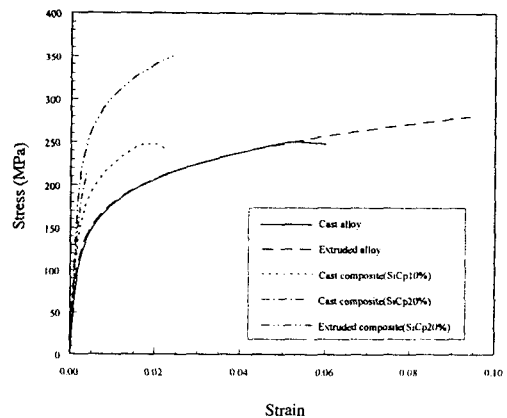


Fig. 2 Tensile stress-strain curves of Al-Si alloy and SiCp/Al-Si composites

Table 1 Mechanical properties of cast or extruded alloys and composites

	Cast alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)			Extruded alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)	
	0	10	20	0	20
Young's modulus, E (GPa)	69.9	86.4	99.1	76.4	113.0
0.1% offset yield strength, $\sigma_{0.01}$ (MPa)	124.5	164.3	191.7	126.2	230.0
Ultimate tensile strength, σ_u (MPa)	247.8	246.4	218.0	340.7	350.5
Reduction in area, RA (%)	4.9	4.5	-	35.2	6.2
Fracture strain, ϵ_f	0.063	0.031	0.004	0.591	0.028
Strain hardening exponent, n	0.182	0.155	0.186	0.181	0.137
Strength coefficient, K (MPa)	435.5	479.9	705.8	432.6	594.4
Hardness, H_v	108	122	147	76	112

단순인장시험시 주조복합재 시험편의 조기파손으로 강화입자의 체적비가 20%인 경우의 완전한 단순인장곡선을 얻기가 매우 어려웠으며, 이러한 현상은 매우 취성이 강한 SiC입자의 첨가로 인한 연성의 저하와 함께 주조에 의한 기공 및 강화입자덩어리 등과 같은 재질의 결함으로 인한 파괴에 대한 민감도의 증가에 기인한다. 특히 주조된 SiCp 20%vf/Al-Si 복합재의 매우 제한된 과단변형률로 인하여 0.2% 오프셋 항복강도를 대신하여 0.1%오프셋 항복강도가 얻어졌다.

3.2 반복변형률에 의한 피로거동

반복응력 및 변형률 거동은 반복적인 변형률이 작용할 때의 안정화된 응력응답을 나타내는 반복응력-변형률곡선으로 표현된다. 금속기지복합재의 이러한 반복응력-변형률거동은 재료의 미세조직, 작용하는 하중의 크기, 속도, 제어방법, 그리고 온도 등에 의존한다. 본 연구에 사용된 SiCp/Al-Si 복합재는 일정 변형률속도의 변형률제어상태에서 일정 변형률진폭을 작용하였을 때 과도적인 경화거동을 보인 후 안정화되었다. 금속기지 및 복합재의 피로경화현상은 전위밀도의 증가, 전위와 SiC 또는 Si공석, 그리고 전위간의 상호작용에 기인하는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁵⁾ 그러나 본 연구에서는 Figs. 3 ~ 4에서 각각 관찰되듯이 금속기지 및 복합재의 대부분 경우에서 변형률진폭이 클수록 경화구배(속도)가 증가하며, 주조재와 압출재 사이의

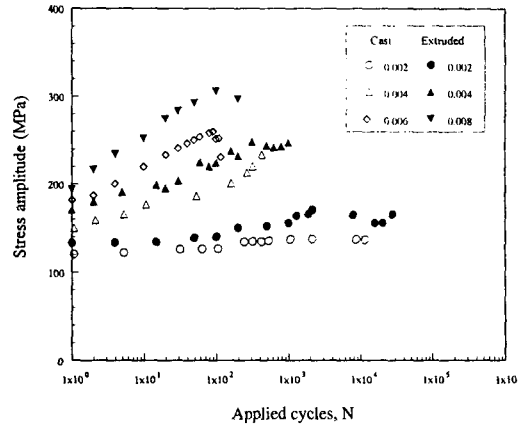


Fig. 3 Stress variations of Al-Si alloys

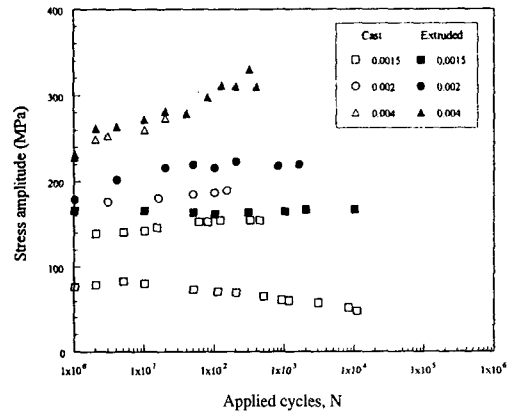


Fig. 4 Stress variations of SiCp/Al-Si composites

경화구배 및 금속기지와 복합재사이의 경화구배도 유사하다. 이는 복합재의 피로경화현상이 금속기지에 지배적으로 의존함을 의미한다.

Fig. 4에서 낮은 변형률진폭($\Delta\epsilon/2=0.0015$, symbol \square)의 주조복합재는 피로경화와 함께 피로연화의 큰 차이를 보이고 있다. 이처럼 상대적으로 낮은 응력진폭은 실험 후 과단면으로부터 확인된 시편내부에 존재하는 큰 주조기공으로 인한 강성감소에 기인하며, 이 결함으로부터의 계속적인 균열진전에 의한 강성저하는 피로연화를 나타냈다.

단순인장곡선과 비교하여 금속기지 및 복합재의 반복응력-변형률곡선은 Fig. 5와 같다. 반복응력-변형률곡선은 완전역전피로시험에서 서로 다른 변형률진폭의 안정화된 히스테리시스루프의 꼭지점을 연결하여 얻어졌다. Fig. 5와 Fig. 2의 비교로부터 금속기지 및 복합재의 피로경화현상

이 확인될 수 있으며, 단순인장과 반복하중 사이의 탄성계수의 차이는 매우 적음을 알 수 있다. 완전역전피로시험, 즉 $R_\epsilon = -1$ 로부터의 반복응력-변형률곡선은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K}\right)^{1/n'} \quad (2)$$

안정화된 히스테리시스 루프에서의 소성변형률진폭과 응력진폭을 이용한 선형회귀해석으로부터 얻어진 각 재료의 피로강도계수 K' , 피로변형경화지수 n' 은 Table 2와 같다.

3.3 피로수명

변형률진폭 0.0005 ~ 0.008 구간에서 일정진폭의 변형률제어 저사이클피로시험이 수행되었으며 모든 자료는 안정화된 반수명(half-life)에서의 히스테리시스 루프로부터 얻어졌다. 안정된 히스테리시스

Table 2 Cyclic properties of cast or extruded alloys and composites

	Cast alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)			Extruded alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)	
	0	10	20	0	20
0.1% offset cyclic yield strength, $\sigma_{0.2}$ (MPa)	220	250	267	262	298
Strain hardening exponent, n'	0.060	0.0654	0.210	0.102	0.110
Strength coefficient, K' (MPa)	335.7	395.6	1130.1	526.9	637.0

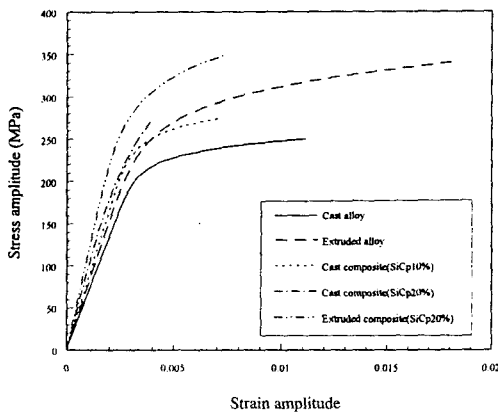


Fig. 5 Cyclic stress-strain curves of Al-Si alloys and SiCp/Al-Si composites

루프가 선형탄성을 보이는 낮은 변형률진폭의 변형률제어시험은 하중제어로 전환하여 실험이 수행되었다.

반복적인 변형에 의한 피로손상은 다음과 같은 변형률-수명식으로 표시된다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

따라서 피로손상은 짧은 수명과 긴 수명구간에서 각각 소성변형률과 탄성변형률성분에 의하여 지배적으로 영향을 받게 된다. 식 (3)에서의 피로특성치는 실험으로부터 얻어지는 탄성, 소성변형률진폭과 피로수명과 로그-로그 선형회귀해석을 이용하여 Table 3과 같이 얻어졌다. 완전역전시험 ($R_\epsilon = -1$)에서 얻어진 구조와 압출제조된 기지금속 및 복합재의 저사이클 피로수명은 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 상대적으로 작은 연성을 지닌 구조된 재질이 압출가공된 재질에 비하여 짧은 피로수명을 보이고 있으며 이러한 경향은 기지금속에서 보다 복합재에서 현저하게 나타나고 있다. 이처럼 구조복합재의 매우 짧은 피로수명은 기공이 기지금속에 비하여 복합재에 더 큰 손상을 초래함에 기인한다. 동일한 변형률진폭에서의 SiCp/Al-Si 복합재 피로수명은 Fig. 8과 같이 대응되는 기지금속에 비하여 짧았으며, 이는 SiC 강화입자의 첨가로 인한 연성의 현저한 저하, 그리고 탄성계수의 증가로 인한 같은 변형률진폭에서의 상대적으로 큰 응력진폭의 부담에 기인하였다. 따라서 응력진폭으로 피로수명을 표시하는 응력-수명식의 경우에는 입자강화 복합재가 기지금속에 비하여 우수할 가능성이 있음을 예상할 수 있다.

Table 3 Low-cycle fatigue properties of cast or extruded alloys and composites from $R = -1$ tests

	Cast alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)			Extruded alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)	
	0	10	20	0	20
σ_f' (MPa)	714.8	599.2	428.4	600.1	571.3
b	-0.168	-0.143	-0.144	-0.117	-0.107
ϵ_f'	0.0477	0.0260	0.0776	0.5254	0.0382
c	-0.555	-0.606	-1.028	-0.813	-0.640

복합재와 기지금속의 피로수명은 대부분 안정된 응력-변형률상태에서 소비되었으므로 반수명에서의 응력진폭은 하중제어 피로시험으로부터 얻어지는 응력-수명선도의 응력에 등가하는 값으로 고려될 수 있다.

응력진폭으로 표현된 $R_e=-1$ 에서의 각 재료에 대한 피로수명선도는 Fig. 9와 같다. SiCp/Al-Si 주조복합재의 경우, 조심스럽게 외삽을 하였을 때 $2N_f > 2 \times 10^7$ 의 영역에서 주조기지금속보다 긴 수명을 보인다. 이처럼 응력진폭을 이용하여 피로수명을 표시하였을 때 복합재가 기지금속에

비하여 향상된 피로수명을 나타내는 것은 경질의 취성인 SiC입자의 보강으로 인하여 복합재의 증가한 강성에 기인한다.

3.4 변형률에너지를 이용한 피로손상

변형과정에서의 응력과 변형률과의 상호작용이 고려되는 변형에너지에 의거한 손상변수는 응력과 변형률을 모두 포함하며, 저사이클 및 저사이클의 진 피로수명영역에 걸쳐 다축하중상태까지 확장이 가능한 많은 장점을 지닌 피로손상변수로 제안되어 사용되고 있다.⁽¹⁶⁾

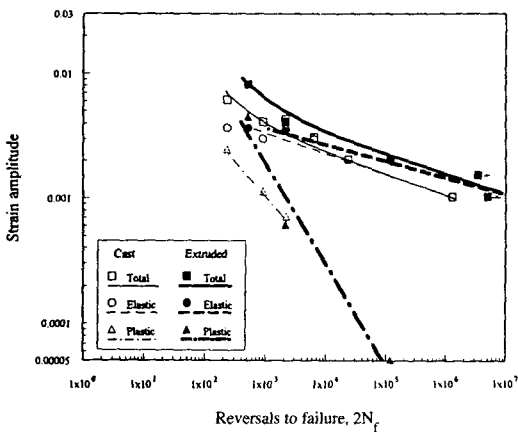


Fig. 6 Strain-life curves of cast and extruded alloys

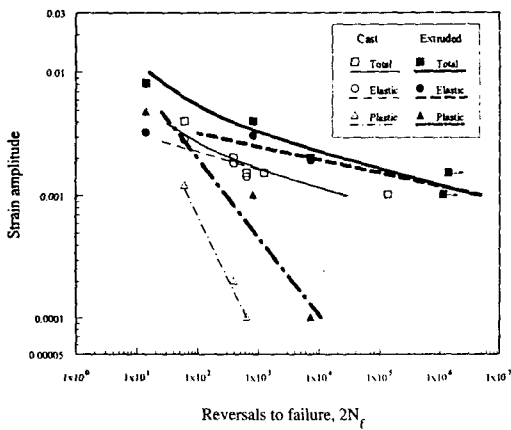


Fig. 7 Strain-life curves of cast and extruded composites

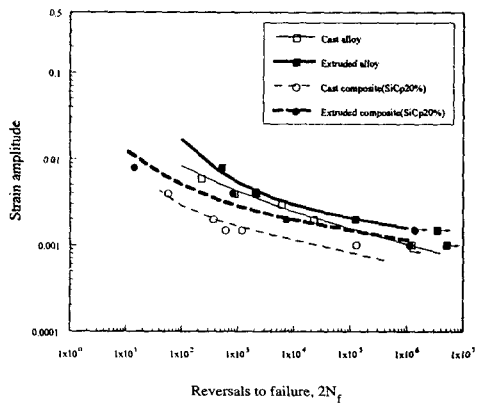


Fig. 8 Fatigue lives of Al-Si alloy and SiCp/Al-Si composite

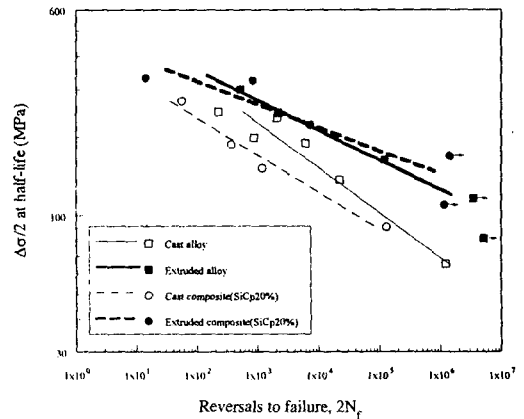


Fig. 9 Stress amplitude at half-life versus reversals to failure

완전역전피로시험에서의 변형률에너지 피로손상 변수는 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁶⁾

$$\psi = \frac{\Delta W^p}{\rho} + \Delta W^{e+} = x_u N_f^\alpha + C_u \quad (4)$$

위에서 ΔW^p 는 각 사이클에서의 소성변형률에너지이며, ρ 는 다축구속계수, 그리고 ΔW^{e+} 는 인장탄성 변형률에너지이다. 본 연구에서와 같은 일축하중상태에서는 $\rho=1$ 이며 $\sigma_{min} \leq 0$ 이라면 $\Delta W^{e+} = \sigma_{max}^2 / 2E$ 이 된다. 재료상수, x_u 와 C_u 는 완전역전피로시험으로부터 얻어지며, C_u 는 피로한도에서의 재료가 지니는 임계변형률에너지로 정의된다.

SiCp/Al-Si 복합재의 피로손상은 유한수명구간에서 식 (4)의 임계변형률에너지, C_u 를 고려하지 않았을 때 에너지-수명식으로 표현될 수 있다.

$$\psi = \Delta W^p + \Delta W^{e+} = x_u N_f^\alpha \quad (5)$$

소성변형률에너지는 반수명에서의 히스테리시스 루프의 면적을 측정하여 얻어졌으며, 탄성변형률 에너지는 최대응력과 탄성계수로부터 계산되었다. 변형률에너지에 근거한 피로손상변수를 이용한 피로수명선도는 Fig. 10과 같으며 에너지-수명식의 재료상수는 Table 4와 같다.

Fig. 10은 주조복합재가 압출된 복합재에 비하여 열등한 피로수명특성을 잘 보여주고 있는데, 이는 Fig. 11과 같이 주조복합재의 기공으로부터의 피로손상에 기인한다. 또한 응력 또는 변형률 등의 하중수준, 즉 변형률에너지수준이 낮아질수록 기공으로부터의 균열발생가능성이 낮아져 주조재와 압출재의 피로수명 차이가 작아지고 있다.

긴 수명영역으로 갈수록 기지금속과 복합재와 피로수명차이가 작아지고 있음이 Fig. 10에서 관찰되고 있다. 이는 일반적으로 고사이클 영역에서 입자강화 금속기지복합재가 기지금속에 비하여 향상된 피로특성이 얻어지는 경향에 접근하고 있다. 따라서 변형률에너지 피로손상변수는 짧은 수명의 저사이클 피로영역에서의 연성을 지닌 기지금속의 우수한 피로특성과 긴 수명의 고사이클 피로영역에서 SiC 입자강화로 강성이 증가된 복합재의 개선된 피로특성을 잘 표현하였다.

Table 4 Material constants in total strain energy density damage model of cast or extruded alloys and composites

	Cast alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)			Extruded alloy and composite (SiCp vol. fraction, %)	
	0	10	20	0	20
x_u	26.0	6.9	2.6	114.2	21.6
α	-0.519	-0.386	-0.396	-0.612	-0.515

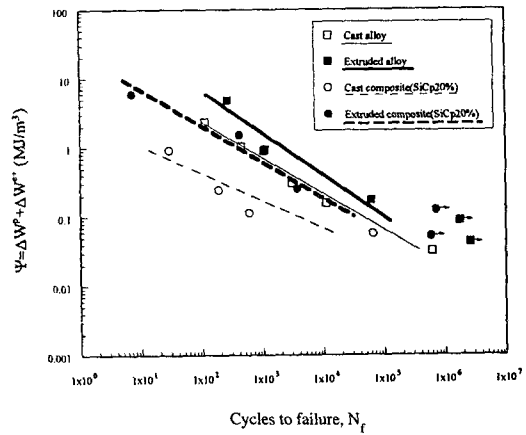


Fig. 10 Total strain energy density versus cycles to failure of cast or extruded alloys and composites

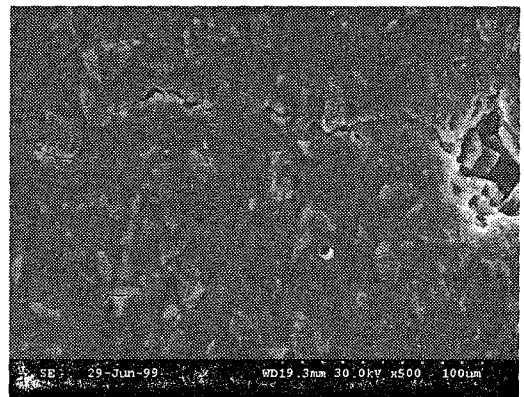


Fig. 11 Photomicrography of fatigue crack initiation and growth from a pore in cast composite

4. 결 론

(1) 압출가공된 SiCp/Al-10%Si 복합재는 주조복합재에 비하여 항복응력, 인장강도 및 연성이 매우 향상되었다. 이는 압출가공에 의한 주조결함의 효과적인 제거에 기인한다.

(2) 모든 재료는 연속적인 피로경화현상을 나타냈으며, 기지금속과 복합재 사이의 피로경화구배가 유사하였다. 이는 복합재의 피로경화현상이 기지금속의 전위기구에 지배적으로 의존함을 의미한다.

(3) 상대적으로 높은 연성을 지닌 압출가공된 재질이 주조된 재질에 비하여 긴 피로수명을 보이고 있으며 이러한 경향은 기지금속에서 보다 복합재에서 현저하게 나타나고 있다. 이처럼 압출가공된 복합재의 현저하게 향상된 피로수명은 기지금속에 비하여 복합재에 더 큰 손상을 초래하는 주조 가공의 압출가공을 통한 효과적 제거에 기인한다.

(4) 변형률에너지 피로손상변수는 저사이클 피로영역에서의 큰 연성을 지닌 기지금속의 우수한 피로특성과 SiC 입자강화로 강성이 증가된 복합재의 개선된 고사이클 피로특성을 적절히 표현하였다.

참고문헌

- (1) Clyne, T.W. and Withers, P.J., 1993, *An Introduction to Metal Matrix Composites*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (2) Rohatgi, P., 1991, "Cast Aluminum-Matrix Composites for Automotive Applications," *J. Minerals*, Vol.43, No.4, pp. 10~15.
- (3) Srivatsan, T.S., 1992, "The Low-Cycle Fatigue Behavior of an Aluminum-Alloy-Ceramic- Particle Composite," *Int. J. Fatigue*, Vol.14, pp. 173~182.
- (4) Wang, L., Sun, Z.M., Kobayashi, T., Toda, H. and Wang, Z.G., 1996, "Cyclic Deformation and Low Cycle Fatigue Behavior in a 6061 Al/22% Vol. SiC Whisker Composite," *Materials Transactions, JIM*, Vol. 37, pp. 763~768.
- (5) Xia, Z., Ellyin, F. and Meijer, G., 1997, "Mechanical Behavior of Al₂O₃-Particle-Reinforced 6061 Aluminum Alloy under Uniaxial and Multiaxial Cyclic Loading," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, pp. 237~248.
- (6) Srivatsan, T.S. and Lavernia, E.J., 1993, "Effects of Microstructure on the Strain-controlled Fatigue Failure Behavior of an Aluminum-alloy/Ceramic-particle Composite," *Composites Science Technology*, Vol. 49, pp. 303~313.
- (7) Vyletel, G.M., Allison, J.E. and Sachdev, A.K., 1993, "The Influence of Matrix Microstructure and TiC Reinforcement on the Cyclic Response and Fatigue Behavior of 2219 Al," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 24A, pp. 2545~2557.
- (8) Shang, J.K. and Ritchie, R.O., 1989, "On the Particle-Size Dependence of Fatigue-Crack Propagation Thresholds in SiC-Particulate-Reinforced Aluminum-Alloy Composites: Role of Crack Closure and Crack Trapping," *Acta Metall.*, Vol. 37, No. 8, pp. 2267~2278.
- (9) Han, N.L., Wang, Z.G. and Sun, L., 1995, "Effect of Reinforcement Size on Low Cycle Fatigue Behavior of SiC Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 33, No. 5, pp. 781~787.
- (10) Hu, J., Kumai, S., Higo, Y. and Nunomura, S., 1993, "The Effect of Microstructural Characteristics on Fatigue Crack Growth in SiC Particulate-Reinforced Cast Aluminum Alloy Composites," *Fatigue '93*, pp. 1123~1128.
- (11) 양유창, 송정일, 봉하동, 한경섭, 1995, "단섬유강화 금속복합재료의 반복적 변형 및 피로특성," *대한기계학회논문집*, 제19권, 6호, pp. 1422~1430.
- (12) 최영근, 이택순, 이문환, 1995, "SiC 입자강화 알루미늄기 복합재료의 표면미소 피로균열의 발생 및 진전거동," *대한기계학회논문집*, 제19권, 제11호, pp. 2787~2796.
- (13) 서영호, 강종길, 1996, "용탕제조법에 의하여 제조된 SiCp/Al 복합재료의 2차성형가공이 기계적 성질에 미치는 영향," *대한기계학회논문집 (A)*, 제20권, 제11호, pp. 3474~3490.

- (14) Sasaki, M., Lawson, L. and Meshii, M., 1994, "Low-Cycle Fatigue Properties of a SiC Whisker-Reinforced 2124 Aluminum Alloy," *Metallurgical Transactions*, Vol. 25A, pp. 2265 ~ 2274.
- (15) Christman, T. and Suresh, S., 1988, "Microstructural Development in an Aluminum Alloy-SiC Whisker Composite," *Acta Metall.*, Vol. 36, No. 7, pp. 1691 ~ 1704.
- (16) Golos, K. and Ellyin, F., 1988, "A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage," *J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 110, pp. 36 ~ 41.