

# SiC입자강화 주조Al-Si복합재의 피로수명에 대한 인장평균변형률의 영향

고 승 기\*  
(1998년 12월 5일 접수)

## Tensile Mean Strain Effects on the Fatigue Life of SiC-Particulate-Reinforced Al-Si Cast Alloy Composites

Seung-Kee Koh

**Key Words:** Particulate-Reinforced Composite(입자강화 복합재), Low-Cycle Fatigue(저사이클 피로), Mean Strain(평균변형률), Mean Stress(평균응력), Cyclic Plasticity(반복 소성), Fatigue Damage Parameter(피로손상변수), Fatigue Life(피로수명).

### Abstract

The low-cycle fatigue behaviour of a SiC-particulate-reinforced Al-Si cast alloy with two different volume fractions has been investigated from a series of strain-controlled fatigue tests with zero and nonzero tensile mean strains. The composites including the unreinforced matrix alloy exhibited cyclic hardening behaviour, with more pronounced strain-hardening for the composites with a higher volume fraction of the SiC particles. For the tensile mean strain tests, the initial high tensile mean stress relaxed to zero for the ductile Al-Si alloy, resulting in no influence of the tensile mean strain on the fatigue life of the matrix alloy. However, tensile mean strain for the composite caused tensile mean stresses and reduced fatigue life. The pronounced effects of mean strain on the low-cycle fatigue life of the composite compared to the unreinforced matrix alloy were attributed to the initial large prestrain and non-relaxing high tensile mean stress in the composite with very limited ductility and cyclic plasticity. Fatigue damage parameter using strain energy density efficiently accounted for the mean stress effects. Predicted fatigue life using the damage parameter correlated fairly well with the experimental life within a factor of 3. Also, the fatigue damage parameter indicated the inferior life in the low-cycle regime and superior life in the high-cycle regime for the composite, compared to the unreinforced matrix alloy.

### 1. 서 론

매우 방향성이 강한 연속적인 장섬유강화 금속기지복합재에 비하여 단섬유 또는 입자의 불연속상으로 강화된 금속기지복합재(metal matrix composites: MMCs)는 기지금속에 비하여 향상된 강성 및 강도와 함께 근본적으로 등방성을 나타낸다.<sup>(1)</sup> 특히 탄화규소입자가 강화된 알루미늄기지 복합재(SiCp/Al-Si MMC)는 경량재로서 비강성, 비강도, 내열성, 내마모성이 우수하며, 주조, 압연, 단조, 그리고 압출 등과 같은 기존의 제조 및 가공이 가능한 많은 장점을 지니고 있다.<sup>(2,3)</sup>

그러나 SiCp/Al-Si 복합재는 Al-Si 기지금속에 비하여 강화입자의 체적비에 따라 연성, 파괴인성, 그리고 피로강도가 저하되는 문제점을 나타내고 있다.<sup>(4,6)</sup> 따라서 SiC입자강화 알루미늄복합재가 하중을 부담할 수 있는 기계 및 구조물의 부품으로 사용되어지기 위해서는 재료의 특성, 내구성 평가, 그리고 설계방법에 대한 보다 구체적인 연구가 요구되고 있다.

근래에 이르러 금속기지복합재의 기계적 성질, 파괴거동 및 피로수명에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다.<sup>(6-19)</sup> 분말야금법으로 제조된 체적비 15%의 SiC입자강화 알루미늄복합재가 하중제어 상태에서 반복하중을 받을 때 피로강도는 기지금속에 비하여 향상되는 결과를 보여주고 있으며,<sup>(10)</sup> 체적비 20%의 SiC휘스커로 강화된 2124 알

\* 회원, 군산대학교 기계공학부

루미늄복합재의 경우에서도 하중제어상태에서의 피로강도 향상이 얻어졌다.<sup>(11)</sup> 이처럼 하중제어를 받는 고사이클 피로수명영역에서 강화입자의 형상에 무관하게 복합재가 기지금속에 비하여 우수한 피로특성을 보이고 있으나, 변형률제어상태에서의 복합재의 저사이클 피로수명은 기지금속에 비하여 짧은 것으로 보고되고 있다.<sup>(6,12,13)</sup> 동일한 변형률진폭을 받는 변형률제어상태에서 기지금속이 입자강화 복합재보다 상대적으로 우수한 저사이클 피로수명을 갖는 이유는 상대적으로 큰 연성을 지닌 기지금속의 반복적인 소성변형에 대한 우수한 저항성으로 설명될 수 있다.

그러나 입자강화 복합재의 피로수명은 작용하중형태<sup>(14)</sup>를 비롯하여 기지금속의 미세조직,<sup>(15)</sup> 그리고 강화입자의 체적비,<sup>(6)</sup> 형상,<sup>(16)</sup> 크기,<sup>(17,18)</sup> 분산도<sup>(19)</sup> 등의 여러 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 특히 복합재의 제조방법에 따라 피로특성에 많은 영향을 받아서 일반적으로 분말야금법에 의하여 제조된 복합재가 주조방법에 의하여 제조된 복합재에 비하여 우수한 저사이클 피로특성을 나타내는 것으로 알려지고 있으며, 이는 주조복합재의 SiC입자와 기지금속과의 경계면에서의 분리, 그리고 강화입자의 불균일한 분포 등에 기인한다.<sup>(11)</sup>

기계 및 구조물의 피로수명은 평균변형률 또는 평균응력에 의하여 많은 영향을 받는다.<sup>(20)</sup> 일반적으로 평균응력을 동반하지 않는 경우의 평균변형률이 금속합금의 피로수명에 미치는 영향은 크지 않으며, 평균응력이 발생할 경우에 인장평균응력과 압축평균응력은 피로수명을 각각 단축시키거나 연장시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.<sup>(21)</sup> 그러나 이러한 평균변형률 및 평균응력에 의한 SiC입자강화복합재의 피로거동, 피로손상, 그리고 피로수명에 미치는 영향에 대한 연구는 많지 않다.<sup>(22)</sup>

본 연구에서는 SiC입자강화된 주조 알루미늄복합재가 반복적인 변형률을 받을 때 반복응력-반복변형률 응답특성과 저사이클 피로특성을 파악하고 피로수명을 평가하였으며, 기지금속의 피로거동 및 피로수명과 비교하였다. 특히 인장평균변형률을 지니는 피로하중상태에서 서로 다른 강화입자의 체적비가 복합재의 피로수명에 미치는 영향과 이러한 인장평균변형률에 의하여 발생하는 평균응력이 피로수명에 미치는 영향을 적절히 표현하는 피로손상변수를 도입하여 피로수명해석

을 실시하였다.

## 2. 실험 방법 및 절차

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 10%의 Si를 포함하는 알루미늄합금(Al-Si alloy)을 기지금속으로 하여 SiC입자를 첨가하여 주조(permanent mould cast)되어 Duralcan에서 제조된 복합재이다. 기계적 성질 및 피로특성의 비교하기 위하여 기지금속도 복합재와 동일한 방법으로 제조하였다. 상당량의 Si를 포함하는 것은 복합재의 제조시에 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>의 생성을 피하기 위한 목적이다. 주조된 복합재와 기지금속은 직경 14mm, 길이 200mm의 환봉형상이며, 열처리조건(T4)에 따라 530°C에서 5시간 열처리한 후 40°C의 물에 담금질하였다.

SiC강화입자의 체적비는 각각 10%, 20%이었으며, 입자의 평균크기는 약 15 $\mu$ m이다. 열처리 후 기지금속과 복합재에는 SiC강화입자와 함께 약 2 $\mu$ m 크기의 Si입자가 존재하고 있으며, 복합재의 조직에서는 강화입자의 덩어리(cluster)가 없이 Fig. 1과 같이 대체적으로 균일한 강화입자의 분포가 관찰된다.

열처리 후의 가공의 어려움을 피하기 위하여 시험편은 형상과 유사하도록 거친 가공을 하여 열처리를 한 후 마무리가공을 실시하였다. 시험편의 인장시험편 및 피로시험편 모두 같은 절차에 따라 제작되었다. 시험편은 ASTM 규격 E606에 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 50kN용량의 유압피로시험기를 이용하여 각각 ASTM 규격 E8, E606에 따라 수행되었다. 시험편의 굽힘에 의한 표점거리의 바깥부분에서의 파단과 좌굴을 방지하기 위하여 시험기와 시험편의 축정렬(alignment)에 주의를 기울였다. 일정진폭의 저사이클 피로시험과 단순인장시험은 변형률제어를 이용하여 각각 2.0x10<sup>-3</sup>/sec, 5.0x10<sup>-5</sup>/sec의 일정한 변형률속도에서 실험을 수행하였다.

Al-Si기지금속에 대한 SiC입자강화 주조Al-Si복

합재의 평균변형률을 지닌 피로하중에 대한 재질의 거동 및 피로수명을 파악하기 위하여 변형률비,  $R_\epsilon = \epsilon_{min}/\epsilon_{max}$ 가 각각 -1, 0.5가 되도록 하여 평균변형률이 없는 경우와 인장평균변형률을 지니는 경우에 대하여 각각 변형률제어상태에서 실험하였다. 변형률비가 0.5인 경우의 피로시험은 평균변형률에 이르기까지 단순인장한 후 일정진폭의 변형률로 반복하중을 가하였다. 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 단순인장거동

Fig. 2는 SiC입자강화된 주조Al-Si복합재 및 기지금속에 대한 단순인장응력-변형률곡선이다. 그림과 같이 복합재의 경우 체적비가 증가함에 따라 연성이 급격히 감소하며 항복강도는 증가하고 있으나 인장강도는 체적비에 따라 큰 변화를 나타내고 있지 않다.<sup>(10)</sup> Fig. 2의 실험결과를 이용하여 식 (1)의 Ramberg-Osgood식을 표현할 수 있다.

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



Fig. 1 Microstructure of Al-Si cast alloy reinforced with SiC particles of 20%vol.

즉, 선형회귀분석에서 얻어진 강도계수,  $K$ 와 변형률경화지수,  $n$ 을 비롯한 기지금속과 복합재의 기계적 성질은 Table 1과 같으며, 강화입자의 체적비가 클수록 높은 강도계수를 보이고 있다.

단순인장시험시 복합재 시험편이 조기 파단되어서 강화입자의 체적비가 20%인 경우의 완전한 단순인장곡선을 얻기가 매우 어려웠다. 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.

강화입자의 체적비가 증가함에 따라 탄성계수는 Table 1과 같이 선형적으로 증가하였다. 즉, 체적비가 각각 10%, 20%인 경우 탄성계수는 기지금속에 비하여 약 24%, 42%의 증가하였고, 파단변형률은 각각 51%, 94%로 현저한 연성의 저하를 보였다. 이때 SiCp 20%인 경우 파단변형률이 매우 적으므로 보통 사용되는 0.2%오프셋 항복강도를 대신하여 0.1%오프셋 항복강도를 취했다. 이러한 방법으로 구한 체적비에 따른 항복강도의 변화는 탄성계수와 유사하게 강화입자의 체적비가 증가할수록 증가하는 한 경향을 보였다. 강화입자의 체적비가 증가함에 따라 나타나는 연성 저하와 복합재의 주조기공(cast porosity)의 영향으로 인하여 강화입자의 첨가에 따른 복합재의 인장강도의 증가는 크지 않았으며, 이러한 경향은 다른 연구결과에서도 보고되고 있다.<sup>(10)</sup>

압입하중 500gr으로 10번의 측정결과로부터 얻어진 체적비 10%, 20%의 복합재의 미소비커스경도치는 기지금속에 비하여 각각 13%, 36% 증가하였다.

Table 1 Mechanical properties of Al-Si cast alloys SiCp/Al-Si composites.

	SiCp (vol%)		
	0	10	20
Young's modulus, $E$ (MPa)	69.9	86.4	99.1
0.1%offset yield strength, $\sigma_y$ (MPa)	135.5	164.3	191.7
Ultimate tensile strength, $\sigma_u$ (MPa)	247.8	246.4	218
Reduction in area, RA(%)	4.9	4.5	-
Elongation, EL(%)	6.5	5.8	-
Fracture strain, $\epsilon_f$	0.063	0.031	0.004
Strain hardening exponent, $n$	0.182	0.155	0.186
Strength coefficient, $K$ (MPa)	435.5	479.9	705.8
Hardness, Hv	108	122	147

3.2 반복응력 및 반복변형거동

반복응력 및 변형률 거동은 반복적인 변형률이 작용할 때의 안정화된 히스테리시스 루프에서의 응력과 변형률응답으로부터 파악될 수 있다. 금속기지복합재의 이러한 반복응력-변형률거동은 재료의 미세조직, 작용하는 하중의 크기, 속도, 제어방법, 그리고 온도 등에 의존한다.<sup>(23)</sup>

본 연구에 사용된 SiCp/Al-Si 복합재는 일정 변형률속도의 변형률제어상태에서 일정 변형률진폭이 작용하였을 때 과도적인 피로경화거동(cyclic hardening behavior)을 보인 후 안정화되었다. 이러한 경화현상은 일정응력제어하에서의 단섬유보강 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15%Vf/Al 복합재의 피로시험에서도 관찰되고 있다.<sup>(24)</sup> 본 연구에 사용된 기지금속과 복합재는 초기에 매우 빠른 경화과정이 나타났으며, 이는 전위증가, 전위와 SiC 또는 Si입자, 그리고 전위간의 상호작용에 기인한다.<sup>(25)</sup> 또한 열처리 후에 발생하는 연성의 Al-Si합금과 경질의 SiC강화입자 사이의 큰 열팽창계수 차이로 인한 열간류응력이 상당히 높은 전위밀도를 유발하고, 이는 복합재가 초기에 두드러진 경화현상을 보이는 이유로 설명될 수 있다.<sup>(26)</sup>

반복응력-변형률곡선은 완전역전(fully reversed), 즉 변형률비 R<sub>ε</sub>= -1 피로시험으로부터 서로 다른 변형률진폭의 안정화된 히스테리시스 루프의 꼭지점을 연결하여 얻어진다. 주조 Al-Si합금과 SiCp 20%Vf/Al-Si복합재의 안정화된 히스테리시스 루프의 대표적인 형상은 각각 -1, 0.5의 변형률비에서 Fig. 3과 같이 얻어졌다. 단순인장곡선

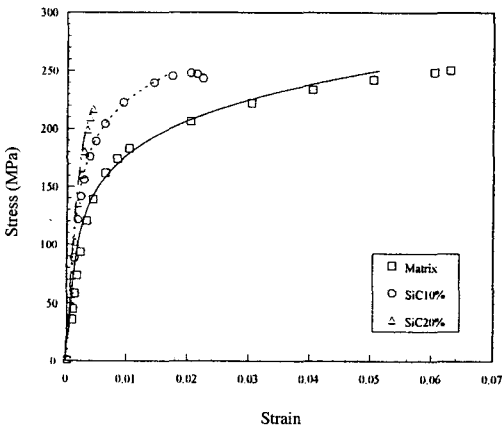


Fig. 2 Monotonic stress-strain curves of Al-Si cast alloy and SiCp/Al-Si cast composites.

과 비교하기 위하여 기지금속 및 복합재의 반복응력-변형률곡선을 Fig. 4에 나타내었으며, 이로부터 피로경화현상이 확인된다. 완전역전피로시험으로부터의 반복응력-변형률곡선은 식 (2)로 표현되며,

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

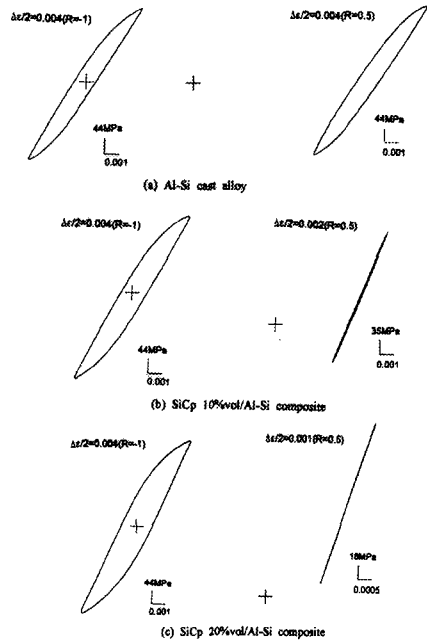


Fig. 3 Typical hysteresis loops at half-life.

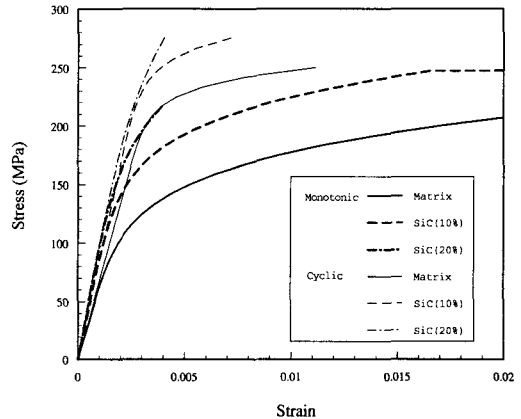


Fig. 4 Comparison of cyclic stress-strain curves from R<sub>ε</sub>=-1 with monotonic stress-strain curves of cast alloys and composites.

안정화된 히스테리시스 루프에 소성변형률진폭과 응력진폭을 이용하여 선형회귀해석으로부터 얻어진 각 재료의 피로강도계수  $K'$ , 피로변형률경화지수  $n'$ 은 Table 2와 같다. SiCp 20%Vf/Al-Si 복합재의 경우에는 단순인장특성과 비교하여 변형률경화지수가 상당히 증가함을 알 수 있다. 이처럼 강화입자의 체적비가 높은 복합재에서의 뚜렷한 변형률경화거동은 이미 존재하고 있는 높은 전위 밀도와 함께 피로하중 작용시 강화입자와 전위사이의 상대적으로 증가된 상호작용을 나타낸다.

하중의 반복수에 따른 복합재의 피로손상, 즉 보강재와 기지금속간의 분리(debonding)로 인한 탄성계수의 감소현상이 입자강화복합재<sup>(14)</sup>와 단섬유강화복합재<sup>(27)</sup>에서 각각 관찰되고 있다. 그러나 본 연구에서는 안정화된 히스테리시스루프의 인장제하(tensile unloading)과정에서 얻어진 복합재의 탄성계수,  $E'$ 를 단순인장시험에서의 탄성계수,  $E$ 와 비교하였을 때 Table 2와 같이 피로손상에 의한 탄성계수의 감소가 매우 작다. 따라서 SiCp/Al-Si 복합재 및 기지금속의 피로파단은 강화입자와 기지금속간의 분리보다는 반복변형률에 의한 피로경화 및 안정화과정을 거치면서 표면부근에서의 기공과 같은 구조결함으로부터 균열이 생성되고 빠른 속도로 전파하여 파단에 이르는 것으로 해석된다.

3.3 변형률제어 피로수명

변형률진폭 0.0005~0.008사이의 변형률제어 피로시험이 수행되었으며 모든 자료는 안정화된 반수명(half-life)에서의 히스테리시스 루프로부터 얻어졌다. 인장평균변형률이 Al-Si합금과 SiCp/Al-Si 복합재의 피로수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여  $R_\epsilon = -1, 0.5$ 에서 피로시험이 이루어졌다. 안정된 히스테리시스 루프가 선형탄성을 보이는 낮은 변형률진폭의 변형률제어시험은 하중제어로 전환하여 실험이 수행되었다.

평균변형률이 존재하지 않는  $R_\epsilon = -1$ 에서의 반복적인 변형률에 의한 피로손상에 의한 피로수명 공식(3)과 같은 변형률-수명식으로 표시된다.

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

위에서  $a'$ 와  $b$ 는 각각 피로강도계수(fatigue strength

coefficient), 피로강도지수(fatigue strength exponent)이며,  $\epsilon_f'$ 와  $c$ 는 각각 피로연성계수(fatigue ductility coefficient), 피로연성지수(fatigue ductility exponent)이다. 따라서 피로손상은 짧은 수명과 긴 수명구간에서 각각 소성변형률과 탄성변형률성분에 의하여 지배적으로 영향을 받게 된다. 완전역전시험에서 얻어진 기지금속과 입자강화된 복합재의 저사이클 피로수명은 Fig. 5와 같으며, SiCp 10%Vf/Al-Si 복합재는 수명이 길어질수록 기지금속과의 수명차이가 작아지고 있으나 SiCp 20%Vf/Al-Si 복합재는 다른 재료에 비하여 매우 짧은 피로수명을 보이고 있다.

특히  $2N_f < 10^3$ 의 짧은 수명영역에서의 SiCp 20%Vf/Al-Si 복합재피로수명은 기지금속에 비하여 매우 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 항상된

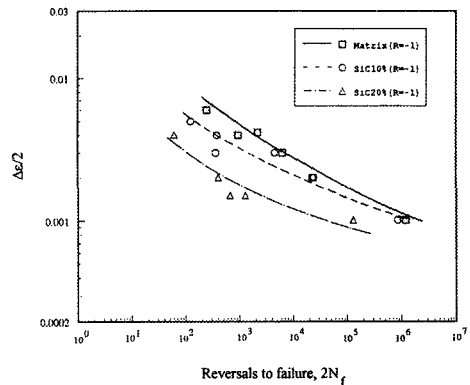


Fig. 5 Comparison of strain-life curves of SiCp/Al-Si cast composites for  $R_\epsilon = -1$ .

Table 2 Cyclic properties of Al-Si cast alloys SiCp/Al-Si composites.

	SiCp (vol%)		
	0	10	20
Young's modulus, $E'$ (MPa)	67.0	82.7	96.9
0.1%offset yield strength, $\sigma_{y0.1}'$ (MPa)	220	250	267
Cyclic strain hardening exponent, $n'$	0.060	0.065	0.211
Cyclic strength coefficient, $K'$ (MPa)	335.7	395.6	1130.1

피로수명을 나타낼 수 있음을 예상할 수 있다. 식 (3)에서의 피로특성치는 실험으로부터 얻어지는 피로수명과 각각 반수명에서의 탄성변형률성분 또는 소성변형률성분을 선형회귀분석하여 계산되어지며, 그 결과는 Table 3과 같이 얻어졌다.

복합재와 기지금속의 피로수명의 대부분은 안정된 응력-변형률상태에서 소비되었으므로 반수명에서의 응력진폭은 하중제어피로시험으로부터 얻어지는 응력-수명선도의 응력에 등가하는 값으로 고려될 수 있다. 응력진폭으로 표현된  $R_e=-1$ 에서의 각 재료에 대한 피로수명선도는 Fig. 6와 같다. Fig. 6으로부터 SiCp 10%Vf/Al-Si복합재는  $2N_f \geq 2 \times 10^3$  이후의 영역에서 기지금속보다 향상된 수명을 나타내고 있으며, SiCp 20%Vf/Al-Si복합재의 경우에도 조심스럽게 외삽을 하였을 때  $2N_f \geq 2 \times 10^7$ 의 영역에서 기지금속보다 긴 수명을 보인다. 이처럼 응력진폭을 이용하여 피로수명을 표시하였을 때 복합재가 기지금속에 비하여 향상된 피로수명을 나타내는 것은 경질 취성인 SiC입자의 보강으로 인한 복합재의 증가된 강성에 기

인한다.

3.4 인장평균변형률의 피로수명에 대한 영향

일반적으로 평균변형률은 그 값이 상당히 크지 않다면 평균응력이 동반될 경우에만 피로거동 및 수명에 영향을 미치어, 인장평균응력은 피로수명을 단축시키고 압축평균응력은 피로수명을 연장시키는 것으로 알려져있다.<sup>(21)</sup> 그러나 평균응력의 크기는 작용하중의 제어상태와 진폭에 따른 재료의 피로거동에 의하여 영향을 받는다. 본 실험에서는 평균변형률이 존재하지 않는  $R_e=-1$ 과 인장평균변형률을 지니는  $R_e=0.5$ 상태에서 일정진폭으로 변형률제어하였을 때 SiC강화입자의 체적비에 따른 복합재의 피로수명을 기지금속과 비교하였다.

반복적인 변형률을 가하였을 때 대체적으로 상당히 큰 반복적인 소성변형이 발생하였으나, 반복수가 증가함에 따라 평균응력의 크기는 점차 작아지는 응력이완현상이 모든 재료에서 관찰되었다. 응력이완의 정도는 작용된 변형률진폭의 크기, 즉 소성변형률진폭에 지배를 받아서 큰 변형률진폭의 경우에는 큰 속도의 응력이완이 발생하였으나, 소성변형이 나타나지 않는 작은 변형률진폭의 반복하중에서는 응력이완이 없이 상당히 큰 인장평균응력이 존재하여 피로수명의 감소를 초래하였다.

강화입자가 첨가되지 않은 기지금속인 주조 Al-Si합금은 실험수명 전 영역에 걸쳐 인장평균변형률에 의한 인장평균응력이 대부분 이완됨이 관

Table 3 Low-cycle fatigue properties of Al-Si cast alloys and SiCp/Al-Si composites.

	SiCp (vol%)		
	0	10	20
Fatigue strength coefficient, $a_f$ (MPa)	714.8	599.2	428.4
Fatigue strength exponent, $b$ (MPa)	-0.168	-0.143	-0.144
Fatigue ductility coefficient, $\epsilon_f'$	0.048	0.026	0.078
Fatigue ductility exponent, $c$	-0.555	-0.606	-1.028

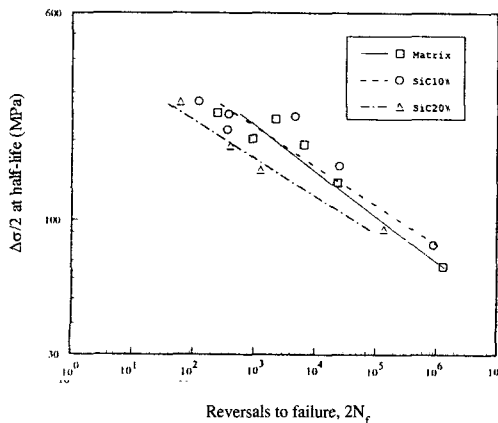


Fig. 6 Stress amplitude at half-life versus reversals to failure for  $R_e=-1$ .

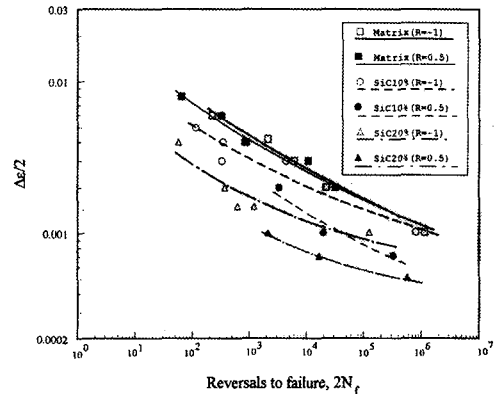


Fig. 7 Strain-life curves of SiCp/Al-Si cast alloy and composites.

찰되었으며, Fig. 7에 나타난 것과 같이 변형률비에 따른 피로수명의 차이를 찾을 수 없다. 그러나 SiC 강화입자가 첨가된 복합재에서의 인장평균변형률을 지나는 피로시험에서는 히스테리시스 루프에서 주목할 만한 반복소성변형이 관찰되지 않았다. 따라서 복합재에서는 인장평균변형률에 의하여 유발된 인장평균응력이 이완되지 않고 존재하여 평균변형률이 없는 경우에 비하여 상당히 감소된 수명을 보이고 있으며 이러한 경향은 작은 변형률진폭의 실험, 즉 긴 수명의 고사이클영역에서 뚜렷하게 나타났다. 인장 평균변형률/평균응력에 의하여 복합재의 짧아진 피로수명은 평균변형률/평균응력이 없는 경우에 비하여 상대적으로 큰 최대응력에 의한 증가된 피로손상, 그리고 큰 변형률비로 인한 균열열림으로부터의 빠른 균열진전에 기인한다. 즉, 연성이 극히 제한된 복합재의 경우 큰 인장 평균변형률이 작용함에 따른 연성소모(ductility exhaustion)에 의한 균열발생과 큰 인장변형과 높은 인장응력으로부터의 빠른 균열진전으로 인하여 기지금속에 비하여 매우 짧아진 피로수명을 나타낸 것으로 설명되어진다.

Fig. 6에서 나타난  $R_e=1$ 조건외의 고사이클영역에서 복합재 피로수명의 향상은  $R_e=0.5$ 조건외의 인장평균변형률을 지날 경우에는 나타나지 않음을 Fig. 8에서 알 수 있다. 이는 인장평균변형률은 기지금속의 피로수명에는 영향을 거의 미치지 않지만 기지금속에 비하여 연성이 매우 적은 복합재의 경우에는 평균응력을 동반하여 큰 피로손상을 유발함으로써 피로수명에 매우 큰 영향을 미

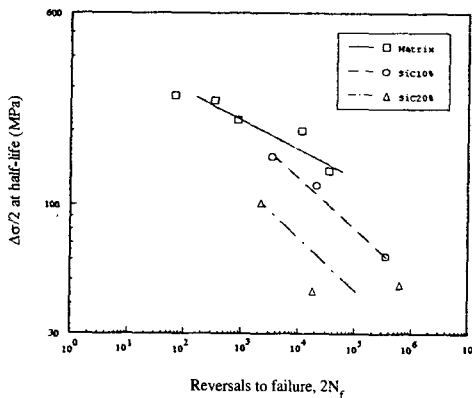


Fig. 8 Stress amplitude at half-life versus reversals to failure at  $R_e=0.5$ .

친다는 것을 의미한다.

### 3.5 평균변형률/평균응력을 고려한 에너지 피로손상변수

피로손상은 일반적으로 응력, 변형률, 그리고 에너지를 기본으로 하여 표현된다. 응력에 의거한 손상변수는 피로수명에 영향을 미치는 정수압 응력을 고려하지 못하는 결점을 지니고 있으나 Tresca 또는 von Mises 등의 항복기준을 수정하여 표현되며 주로 긴 수명의 고사이클 피로파괴기준으로 사용되고 있다. 저사이클영역에서는 응력집중부위에서의 비선형 변형이 둘러싸인 탄성재료에 의하여 구속되고 제어되기 때문에 변형률에 의거한 손상변수가 사용된다. 그러나 변형과정에서의 응력과 변형률과의 상호작용이 고려되는 변형에너지에 의거한 손상변수는 응력과 변형률을 모두 포함하며, 저사이클 및 고사이클의 전 피로수명영역에 걸쳐 다축하중상태까지 확장이 가능한 많은 장점을 지닌 피로손상변수로 제안되어 사용되고 있다.<sup>(28)</sup>

변형률제어피로시험에서의 평균변형률/평균응력이 복합재의 피로손상에 미치는 영향을 효과적으로 평가하기 위하여 Morrow, Smith-Watson-Topper, 그리고 총변형률에너지밀도(total strain energy density) 변수가 각각 고려되었다. 평균응력의 영향이 고사이클 피로수명영역에서 지배적으로 나타남을 고려하여 기존의 변형률-수명식 (3)을 수정하여 제안된 Morrow손상변수는 식 (4)와 같이 표현된다.<sup>(29)</sup>

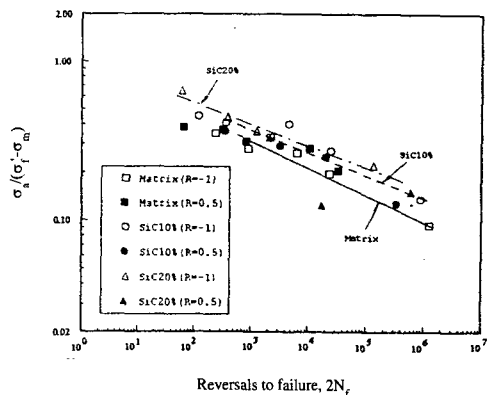


Fig. 9 Morrow's parameter versus cycles to failure of SiCp/Al-Si cast alloy and composites.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

윗식에서 평균변형률에 의하여 발생하는 평균응력,  $\sigma_m$ 은 탄성변형률 피로수명에 대하여만 영향을 미치므로 탄성변형률 피로수명항만을 고려하면 응력진폭,  $\sigma_a$ 와 피로수명은 식 (5)와 같은 관계를 지닌다.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f' - \sigma_m} = (2N_f)^b \quad (5)$$

윗식에서 피로강도계수  $\sigma_f'$ 는 평균변형률과 평균응력이 존재하지 않는  $R_e=-1$ 경우의 저사이클 피로수명식에서 Table 3과 같이 계산되어지며 평균응력, 응력진폭은 반수명에서의 히스테리시스 루프에서 얻어진다.

인장평균변형률을 지니는  $R_e = 0.5$ 의 경우에 대한 기지금속 및 복합체의 피로수명과 Morrow손상변수와의 상관관계는 Fig. 9와 같다. Fig. 9로부터 Morrow손상변수는 각각의 재료에 대하여 피로수명을 평균변형률 및 평균응력에 무관하게 한 개의 함수로 표현하고 있다. 특히 모든 피로수명 영역에서 복합체는 기지금속에 비하여 긴 피로수명을 보이고 있으며 이러한 경향은 응력제어 피로시험에서의 연구결과와 일치한다.<sup>(10,11)</sup> 따라서 Morrow손상변수는 평균변형률/평균응력을 받는 복합체 및 기지금속의 탄성피로수명을 효과적으로

로 표현함을 알 수 있다. Fig. 9에서 SiCp 20%Vf/Al-Si복합체의 피로수명경향과 큰 오차를 보이는 한 개의 데이터는 시편에 존재하는 내부 결함으로 인하여 반복하중 초기부터 강성의 큰 저하를 보였으며 선형회귀해석을 통한 커브피팅 (curve fitting)에서 제외되었다.

재료의 피로손상이 발생하는 최대응력과 변형률진폭의 곱의 함수로 표현될 수 있다고 가정하여 Smith, Watson 그리고 Topper는 피로수명을 식 (6)과 같이 제안하였다.<sup>(30)</sup>

$$\sigma_{\max} \epsilon_a = f(2N_f) \quad (6)$$

완전역전피로하중( $R_e=-1$ )의 경우 변형률진폭은 식 (3)으로 나타내어지며, 응력진폭은  $\sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b$ 이므로 이를 식 (6)에 대입하여 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\sigma_{\max} \epsilon_a E} = \left[ (\sigma_f')^2 (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' E (2N_f)^{b+c} \right]^{1/2} \quad (7)$$

또는 선형로그-로그 함수로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$\sqrt{\sigma_{\max} \epsilon_a E} = C(2N_f)^y \quad (8)$$

피로수명과 SWT손상변수와의 상관관계는 식 (7)과 식 (8) 사이에 큰 차이가 없었으며, 식 (8)의 선형 SWT피로손상변수로 표현된 각 재료의 피로수명은 변형률비에 무관하게 Fig. 10와 같이

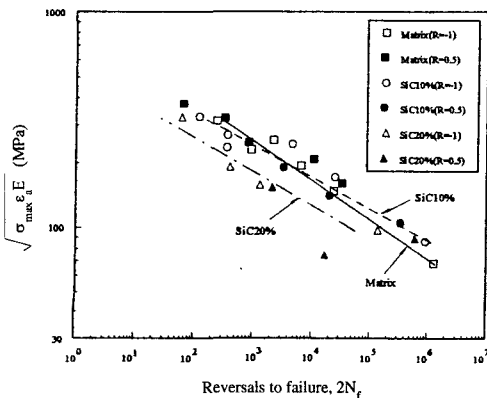


Fig. 10 Morrow's parameter versus cycles to failure of SiCp/Al-Si cast alloy and composites.

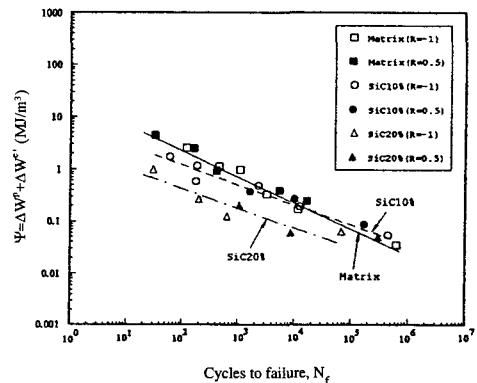


Fig. 11 Total strain energy density versus cycles to failure of SiCp/Al-Si cast alloy and composite.



한 개의 함수에 잘 일치함을 보여주고 있다. 특히 저사이클영역에서는 복합재가 기지금속에 비하여 열등한 피로특성을 지니지만 고사이클영역으로 갈수록 오히려 복합재의 피로수명이 향상될 수 있음을 보여주고 있어서, SWT손상변수가 전 영역에서의 피로수명을 잘 표현하는 손상변수로서 사용될 수 있음을 알 수 있다.

피로하중을 받는 재료의 누적피로손상은 탄성변형률에너지와 소성변형률에너지의 합으로 표시되는 총변형률에너지에 의하여 표현되어질 수 있으며, 완전역전피로시험에서의 재료의 피로수명은 식 (9)와 같은 변형률에너지손상변수로 나타내어 진다.<sup>(28)</sup>

$$\Psi = \frac{\Delta W^p}{\rho} + \Delta W^{e+} = \kappa_u N_f^\alpha + C_u \quad (9)$$

위에서  $\Delta W^p$ 는 각 사이클에서의 소성변형률에너지이며,  $\rho$ 는 다축구속계수(multiaxial constraint factor), 그리고  $\Delta W^{e+}$ 는 인장 탄성변형률에너지이다. 본 연구에서와 같은 일축하중상태에서는  $\rho = 1$ 이며  $\sigma_{min} < 0$  이라면  $\Delta W^{e+} = \sigma_{max}^2 / 2E$  이 된다. 재료상수,  $\kappa_u$ 와  $C_u$ 는 완전역전피로시험으로부터 얻어지며,  $C_u$ 는 피로한도에서의 재료가 지니는 임계변형률에너지로 정의된다. 위의 에너지 피로손상변수에서 평균변형률/평균응력의 영향은  $\Delta W^{e+}$ 의

항에서 고려된다.

평균응력을 고려한 SiCp/Al-Si복합재의 피로손상을 평가하기 위하여 유한수명구간에서 식 (4)의 임계변형률에너지,  $C_u$ 를 무시하면 에너지-수명식은 식 (10)과 같다.

$$\Psi = \Delta W^p + \Delta W^{e+} = \kappa_u N_f^\alpha \quad (10)$$

소성변형률에너지는 반수명에서의 히스테리시스 루프의 면적을 계산하여 얻어졌으며, 탄성변형률에너지는 최대응력과 탄성계수로부터 계산되었다. 변형률에너지에 근거한 피로손상변수를 이용한 피로수명선도는 Fig. 11과 같으며, 선형회귀 해석을 이용한 각 재료의 재료상수는 Table 4와 같다. Fig. 11으로부터  $R_e=0.5$ 의 실험결과가  $R_e=-1$ 의 실험결과로부터 얻어진 피로수명선도와 잘 일치하고 있어 식 (10)의 변형률에너지 손상변수는 평균변형률/평균응력을 적절히 고려하는 피로손상변수로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에서  $N_f < 2 \times 10^4$  cycle 범위에서의 복합재의 피로수명은 기지금속에 비하여 열등하지만,  $N_f \geq 2 \times 10^4$  cycle 범위에서 SiCp 10%Vf/Al-Si복합재의 피로수명은 기지금속보다 우수함이 관찰된다. 주의를 요구하기는 하지만 Fig. 11의 피로수명선도를 외삽하였을 때  $N_f \geq 10^8$  cycle 범위, 즉 고사이클 피로영역에서는 SiCp 10%Vf/Al-Si복합재의 피로수명이 기지금속의 피로수명보다 우수함이 예

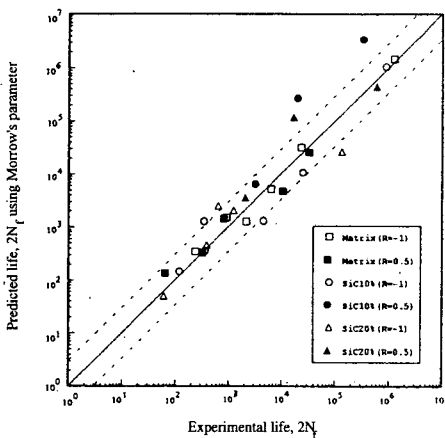


Fig. 12 Correlation of predicted fatigue life with experimental fatigue life using Morrow's parameter.

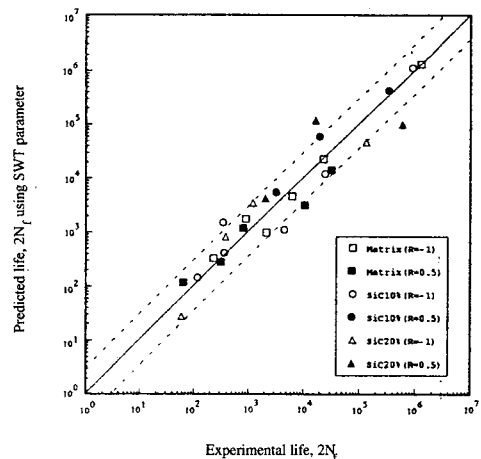


Fig. 13 Correlation of predicted fatigue life with experimental fatigue life using SWT parameter.

측된다. 이는 고사이클 영역에서의 하중제어 피로실험으로부터 입자강화 금속기지복합재가 기지금속에 비하여 향상된 피로특성 및 긴 피로수명이 얻어지는 결과와 일치함을 나타낸다. 따라서 에너지 피로손상변수는 짧은 수명의 저사이클피로영역에서의 연성을 지닌 기지금속의 우수한 피로특성과 긴 수명의 고사이클 피로영역에서의 SiC입자강화로 강성이 증가된 복합재의 우수한 피로특성을 잘 표현하고 있다.

본 연구에서 평균변형률을 달리하여 변형률 제어상태에서 얻어진 복합재의 실험피로수명과 평균변형률/평균응력을 고려한 식 (4), (8), (10)의 각 피로손상변수를 사용하여 예측된 피로수명과 상관관계는 Fig. 12 ~ 14과 같다. 각 피로손상변수에 의하여 얻어진 예측피로수명은 실험수명과 모두 약 3배 이내의 오차범위에서 적절한 상관관계를 나타내고 있다. 변형률에너지손상변수에 의한 예측수명이 다른 손상변수에 의한 예측수명에 비하여 대체적으로 실험수명에 더 접근

하는 결과가 얻어졌다.

#### 4. 결론

(1) 기지금속을 포함한 모든 재료에서 피로균열은 시편의 표면 및 표면근처의 주조기공에서 생성되었으며, 피로경화현상이 관찰되었다. 반복하중에 의한 피로경화현상은 SiC입자의 체적비가 높을수록 심하게 나타났다.

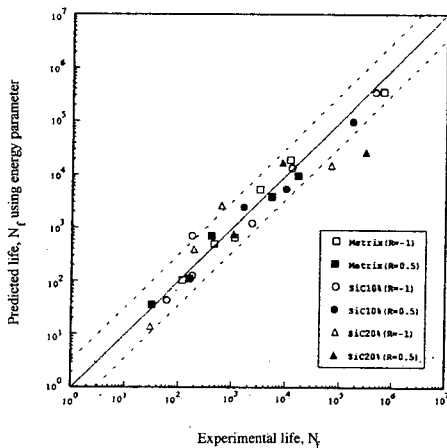
(2) 강화입자의 체적비가 증가할수록 같은 변형률진폭에서 짧은 수명이 얻어졌다. 이처럼 복합재의 짧은 변형률피로수명은 취성 경질의 강화입자의 첨가로 인한 저하된 연성과 이에 의한 소성변형에 대한 낮은 저항성에 기인한다. 그러나 안정된 히스테리시스 루프로부터 얻어진 응력피로수명은 체적비에 따라 복합재가 기지금속에 비하여 고사이클영역에서 우수한 피로특성을 나타냈다.

(3) 변형률제어하에서 인장평균변형률은 연성이 제한된 복합재의 경우에는 인장평균응력을 동반하여 피로수명의 현저한 저하를 초래하였으나, 기지금속의 경우에는 인장평균응력의 완전이완으로 인장평균변형률에 무관하게 유사한 피로수명을 보였다.

(4) 변형률에너지에 기초한 피로손상변수는 평균변형률 또는 평균응력에 무관하게 피로수명을 한 개의 함수로써 적절히 표현하였으며 이를 이용한 예측수명은 실험수명과 약 3배 이내의 오차범위에서 잘 일치하였다. 특히, 에너지 피로손상변수는 저사이클 및 고사이클 피로수명영역에서 복합재의 피로수명이 각각 기지금속보다 열등하거나 우수한 피로특성을 잘 표현하였다. 이는 각각 SiC강화입자의 첨가로 인한 복합재의 연성저하와 강성증가에 기인한다.

**Table 4** Material constants in total strain energy density damage model from  $R_e=-1$  tests.

Material	$K_M$	$a$
Matrix	26.0	-0.5185
SiCp 10%vol	6.9	-0.3856
SiCp 20%vol	2.6	-0.3964



**Fig. 14** Correlation of predicted fatigue life with experimental fatigue life using energy parameter.

#### 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," *Journal of Minerals*, Vol. 43, No. 4, pp. 10~15.
- (3) 권재도, 안경주, 1995, "SiC 보강 Al6061 복합

- 재료의 마멸 및 마찰특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제9호, pp. 2122~2132.
- (4) McDanel, D., 1985, "Analysis of Stress-Strain, Fracture, and Ductility Behavior of Aluminum Matrix Composites Containing Discontinuous Silicon Carbide Reinforcement," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 16A, pp. 1105~1115.
- (5) Lloyd, D. J., 1991, "Aspects of Fracture in Particulate Reinforced Metal Matrix Composites," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 39, No. 1, pp. 59~71.
- (6) Srivatsan, T. S., 1992, "The Low-Cycle Fatigue Behavior of an Aluminum-Alloy-Ceramic-Particle Composite," *International Journal of Fatigue*, Vol. 14, pp. 173~182.
- (7) 서영호, 강충길, 1996, "용탕제조법에 의하여 제조된 SiCp/Al 복합재료의 2차성형가공이 기계적 성질에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제11호, pp. 3474~3490.
- (8) 권재도, 문윤배, 김상태, 1995, "SiC 입자보강 Al 복합재료의 피로균열 진전거동," 대한기계학회논문집, 제19권, 제1호, pp. 121~131.
- (9) 최영근, 이택순, 이문환, 1995, "SiC 입자강화 알루미늄기 복합재료의 표면미소 피로균열의 발생 및 진전거동," 대한기계학회논문집, 제19권, 제11호, pp. 2787~2796.
- (10) Bonnen, J. J., Allison, J. E. and Jones, J. W., 1991, "Fatigue Behavior of a 2xxx Series Aluminum Alloy Reinforced with 15 Vol Pct SiCp," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22A, pp. 1007~1019.
- (11) Sasaki, M., Lawson, L. and Meshii, M., 1994, "Low-Cycle Fatigue Properties of a SiC Whisker-Reinforced 2124 Aluminum Alloy," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 25A, pp. 2265~2274.
- (12) Hurd, N.J., 1988, "Fatigue Performance of Alumina Reinforced Metal Matrix Composites," *Materials Science and Technology*, Vol. 4, pp. 513~517.
- (13) 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.
- (14) Xia, Z., Ellyin, F. and Meijer, G., 1997, "Mechanical Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Particle- Reinforced 6061 Aluminum Alloy under Uniaxial and Multi-axial Cyclic Loading," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, pp. 237~248.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) 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.
- (20) Sandor, B. I., 1972, *Fundamentals of Cyclic Stress and Strain*, The University of Wisconsin Press, Madison.
- (21) Koh, S. K. and Stephens, R. I., 1991, "Mean Stress Effects on the Low Cycle Fatigue Life of High Strength Steel," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 14, No. 4, pp. 413~428.
- (22) Biermann, H., Beyer, G. and Mughrabi, H., 1997, "Low-cycle Fatigue of Metal-Matrix Composite: Influence of Pre-straining on the Fatigue Life," *Materials Science and Engineering*, Vol. A234, pp. 198~201.
- (23) Nieh, T. G. and Karlak, R. F., 1984, "Aging

- Characteristics of B<sub>4</sub>C-Reinforced 6061- Aluminum," *Scripta Metallurgica*, Vol. 18, pp. 25~28.
- (24) 양유창, 송정일, 봉하동, 한경섭, 1995, "단섬유강화 금속복합재료의 반복적 변형 및 피로특성," 대한기계학회논문집, 제19권, 6호, pp. 1422~1430.
- (25) Christman, T. and Suresh, S., 1988, "Microstructural Development in an Aluminum Alloy-SiC Whisker Composite," *Acta Metall.*, Vol. 36, No. 7, pp. 1691~1704.
- (26) Taya, M. and Lulay, K. E., 1991, "Strengthening of a Particulate Metal Matrix Composite by Quenching," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 39, No. 1, pp. 73~87.
- (27) Liu, X. C. and Bathias, C., 1993, "Fatigue Damage Development in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al Composite," *Composites*, Vol. 24, pp. 282~287.
- (28) Golos, K. and Ellyin, F., 1988, "A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage," *ASME J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 110, pp. 36~41.
- (29) Graham, J. A., Ed., 1968, *Fatigue Design Handbook*, Chapter 3, Vol. 4, Society of Automotive Engineers.
- (30) Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. M., 1970, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Materials," *J. Materials*, Vol. 5, No. 4, pp. 767~778.