

입자강화 금속기 복합재료의 고온 피로강도 향상에 관한 연구

신형섭*
(1999년 4월 28일 접수)

A Study on the Improvement of Fatigue Strength in Particulate Reinforced Metal Matrix Composites at Elevated Temperatures

Hyung-Seop Shin

Key Words: Particulate Reinforced Composite(입자강화복합재), Fatigue Strength(피로강도), Intermetallic Compound(금속간화합물입자), Diecasting(다이캐스팅), Interface Property(계면특성), Elevated Temperature(고온)

Abstract

Fatigue strength of NiAl and Ni₃Al particulate reinforced aluminum alloy composites fabricated by the diecasting method was examined at room and elevated temperatures. The results were compared with that of SiC particulate reinforced one. The particulate reinforced composites showed some improvement in the static and fatigue strength at elevated temperatures when compared with that of Al alloy. The composites reinforced by intermetallic compound particles showed good fatigue strengths at elevated temperatures; especially Ni₃Al_p/Al alloy composite showed good fatigue limit up to high temperature of 300°C. Adopting intermetallic compound particle as a reinforcement phase, it will be possible to develop MMC representing better fatigue property at elevated temperature.

1. 서론

알루미늄합금을 모상으로 하는 입자 분산 강화 금속기 복합재료 (Metal Matrix Composites, MMCs)는 단상의 석출경화형 알루미늄합금보다 강도, 강성, 내마모성, 내열성 등 기계적 성질이 뛰어나, 항공우주분야와 자동차용 고온 구조용 재료로 사용되어 오고 있다.^(1~5) 금속기 복합재료의 연구는 주로 SiC, Al₂O₃ 등 세라믹 단섬유 (whisker) 또는 입자를 알루미늄합금에 강화시킨 알루미늄기 복합재료를 중심으로 진행되고 있다. 그러나, 세라믹입자 강화 복합재료의 경우, 절삭성, 제작비용 문제 외에도 강화입자와 모재합금

과의 친화성, 계면에서 부착성이 불충분하기 때문에 연성 및 파괴인성 등의 특성이 떨어지는 문제점이 있어 강화입자의 성질 개선을 필요로 한다.^(2~4) 또한 고온에서 기지금속에 비하여 우수한 강도 특성을 나타내지만, 강화입자의 종류, 체적비에 따라서 피로강도가 저하를 가져오는 경우도 있다.

따라서 강화입자와 모재 합금의 친화성, 계면에서 부착성 향상을 위하여 세라믹 이외에 고온에서 높은 경도, 강성, 용점을 갖는 금속간화합물 입자가 분산 강화재로 생각되고 있다. 그 중 모재인 알루미늄합금과 좋은 결합을 나타내리라 생각되는 Ni-Al계 금속간화합물에 기대가 모아지고 있다.^(6~8) 그러나, 금속간화합물은 용융재 내에서 비교적 빠른 확산을 나타내기 때문에 분산강화법으로, 종래의 분말야금이나 주조과정 뒤 압출, 압연과 같은 2차 가공에 의한 방법과는 달리 짧은 시간내 강화처리가 필요하다.⁽⁶⁾ 이러한 측면에서

* 회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail:hsshin@andong.ac.kr
TEL : (0571)850-5675 FAX : (0571)850-5675

금속간화합물입자의 강화법으로는 복합화 처리시간이 비교적 짧고 금속용도가 가능한 다이캐스팅(diecasting)법이 검토되고 있다.^(7,8) 다이캐스팅은 또한 복잡한 형상의 부품을 최소한의 가공으로 제조 가능케하여 경제적 측면에서 MMC의 적용분야 확대에 기여할 것으로 생각된다. 새로운 방식으로 제조한 MMC를 구조용 재료로 실용화하기 위해서는 강도, 파괴인성, 피로, 환경 및 열사이클 특성 등 재료의 신뢰성 확보를 위한 연구가 필요하다.^(9~14)

본 연구에서는, 다이캐스팅에 의하여 고온특성이 우수한 금속간화합물인 NiAl 입자와 Ni₃Al 입자를 Al-Ni-Mg-Mn계 알루미늄합금에 분산 강화시킨 입자강화 금속기복합재를 사용하여 일정응력하 고사이클 피로시험을 실시하였다. 그리고, 피로강도의 온도의존성과 피로균열의 발생 및 진전과정을 조사하여 입자강화복합재의 고온 피로특성에 미치는 강화입자의 영향을 규명하였다. 또한 SiC 입자강화재와 비교하여 금속간화합물입자강화 복합재의 고온구조 재료로서의 가능성을 모색하는 것을 그 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 복합재의 모재로는 Al-Ni-Mg-Mn계 알루미늄합금을 사용하였고, 그 화학적조성을 Table 1에 나타내었다. 강화재에는 입경이 20~45 μm인 금속간화합물 NiAl 입자와 Ni₃Al 입자, 그리고 비교를 위해 SiC 입자를 채용하였다. 강화입자의 분율은 다이캐스팅시 입자의 분산상태를 고려하여 5wt%로 하였다. 시험편으로 3종류의 입자강화 복합재(이하 입자강화재라고 부른다)와 모재합금을 사용하였다.

시험편은 고압 다이캐스팅으로 제작하였다. 다이캐스팅조건은 용탕온도 770℃, 금형온도 180℃, 주조압력 70MPa, 사출속도 50m/s이다. 주조기는 급형체결력이 90톤인 콜드 챔버형(cold-chamber

type) 다이캐스팅 성형기를 사용하였고, Fig. 1 (a)에 보인 형상의 소재를 제작하였다. 이를 선반가공으로 (b)에 보인 바와 같이 중앙 평행부 길이 30mm인 평활시험편을 제작하였다. 평활부를 샌드페이퍼 #1,000까지 연마한 뒤 인장 및 피로시험에 사용하였다.

Fig. 2는 모재 및 입자강화재에서 시험편의 길이방향(사출방향)에 수직면상 조직을 보여주고 있다. (a)의 모재는 결정입경이 5~10μm의 조직을 하고 있다. (b)~(d)의 입자강화재에서는 강화입자가 비교적 균일하게 분포되어 있다. 특히 NiAl

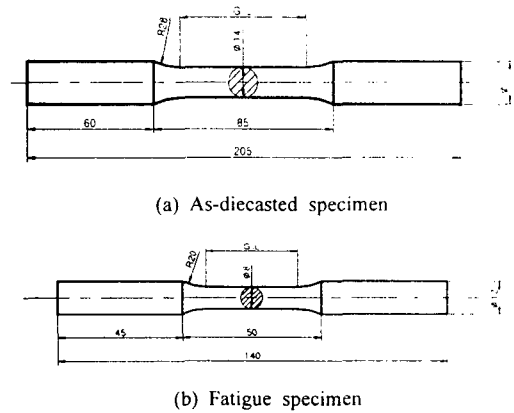


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

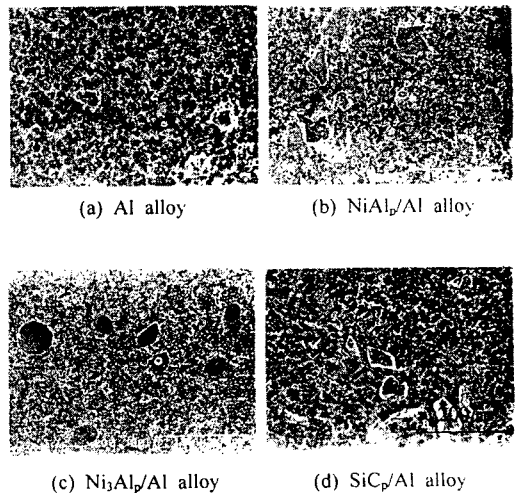


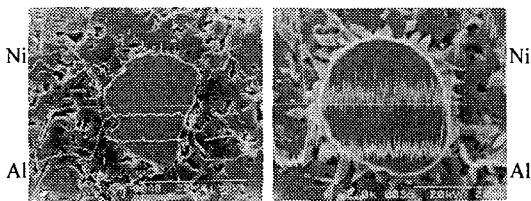
Fig. 2 Microstructure of each specimen

Table 1 Chemical composition of Al alloy matrix material (wt.%)

Materials	Al	Ni	Mg	Mn
Al alloy	91.4	3.0	4.8	0.8

입자 및 Ni₃Al 입자는 모재와 양호한 부착을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 한편, 모든 시험편에는 다이캐스팅시 생긴 기공(pore)이 다수 내재하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 Omura 등⁽⁸⁾이 내마모성 향상을 위해 다이캐스팅법으로 제조한 입자강화복합재의 경우와도 같았다. 특히, 표면 부근에 존재하는 기공은 피로시험시 피로균열의 기점으로서 역할을 하게 된다.

한편, 입자강화재에서 강화입자와 모재의 결합 상태를 알아보기 위해 강화입자 주변의 미세조직, EDX에 의한 계면 및 입자원소에 대한 선분석 상을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 (a)의 NiAl 입자 강화재에서는 강화입자와 모재사이 계면에는 간극없이 양호한 결합을 보여준다. 또한 계면에서 약간의 석출물 성장을 볼 수 있다. (b)의 Ni₃Al 입자 강화재에서는 강화입자-모재 계면에 바늘상 석출물이 심하게 발달해 있고 이것은 Omura 등의 분석결과에 따르면⁽⁸⁾ Al₃Ni와 Al₃Ni₂임을 알 수 있었다. 이들 입자강화재에 대한 선분석결과를 보면, 원소를 나타내는 라인이 강화입자와 모재 계면에서 완만한 천이를 나타내고 있다. 이것은 금속간화합물입자 강화재에서는 강화입자와 모재와의 집합성이 좋다는 것을 나타낸다. 한편 (c) SiC 입자강화재에서는 선분석 결과,



(a) NiAl/Al alloy

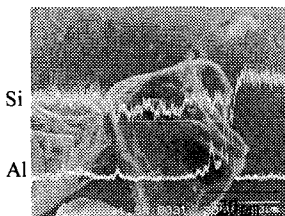
(b) Ni₃Al/Al alloy(c) SiC_p/Al alloy

Fig. 3 Microstructure and EDX line analysis around a particle in each particulate reinforced composites

모재에는 강화입자의 원소인 Si 성분이 포함되어 있지 않고, 또한 강화입자부분에도 모재의 원소인 Al 성분이 전혀 포함되어 있지 않는 극단적인 변화를 볼 수 있다. 이것은 다이캐스팅시 SiC 입자 원소의 확산이 전혀 생기지 않아서 강화입자-모재 계면에 중간 생성물이 만들어지지 않았다는 것을 나타낸다.

2.2 피로시험

피로시험은 로타리식 회전 굽힘 피로시험기를 사용하여 응력비 R=-1에서 실시하였다. 시험기에 부착한 개폐식 전기저항식 가열로를 사용하여 설정온도에 도달하여 30분간 유지 후 피로시험을 개시하였다. 이때 시험온도는 참고문헌^(15,16)과 알루미늄합금기 복합재료의 적용을 고려하여, 실온, 200℃ 및 300℃로 하였다. 고온 피로시험시 온도는 설정치의±3℃ 범위 내에 있도록 하였다.

피로균열의 발생 및 전과 거동의 관찰을 위해 임의의 반복수에서 시험기를 멈추고 시험편표면의 래프리카(replica)를 채취하였다. 이때 피로균열의 진전에 따른 강화입자와의 상관관계 관찰을 용이하게 하기 위하여 시험편 표면을 20~30μm 정도 전해연마하였다. 전해연마액은 과염소산을 에탄올로 희석한 용액을 사용하였고, DC 10V의 전압을 가하여 실온에서 실시하였다. 래프리카는 시험편 표면에 초산메틸을 용제로 하여 아세틸세룰로스 필름을 부착하여 제작하였다. 고온시험시 는 시험편을 실온으로 냉각하여 실시하였다.

래프리카 관찰에는 광학현미경과 Au 스퍼터링(sputtering)후 SEM을 이용하였다. 피로 파단 후 SEM을 사용하여 파면관찰을 실시하여 균열의 발생 및 파괴형태를 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 입자강화재의 인장특성

피로시험의 경우와 동일한 형상의 시험편을 사용하여, 각 시험온도에서 인장시험(액추에이터의 속도 0.5mm/s) 결과 얻어진 기계적 특성치를 Table 2에 나타내었다. NiAl 입자강화재는 모재, SiC 입자강화재보다 항복 및 인장강도에 있어서 다소 높은 값을 보여주고 있다. 또한 입자강화에 따른 재료의 연신을 저하는 SiC 입자강화재보다

Table 2 Mechanical properties of specimens at various temperatures

Materials	Test temperature (°C)	UTS (MPa)	0.2%Y.S. (MPa)	Elongation (%)
Al alloy	R.T.	214	143	4.5
	200	144	90	3.2
	300	104	91	7.2
NiAl _p /Al alloy	R.T.	221	160	3.1
	200	192	149	3.2
	300	111	103	5.7
Ni ₃ Al _p /Al alloy	R.T.	259	181	0.5
	200	245	180	0.5
	300	236	196	0.6
SiC _p /Al alloy	R.T.	210	164	2.9
	200	196	163	3.6
	300	121	113	3.9

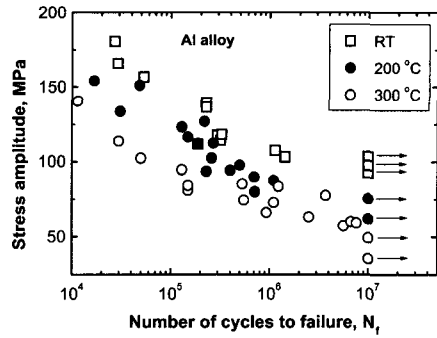
적었다.

한편, Ni₃Al 입자강화재는 실온에서부터 300°C의 온도범위에서 모재 및 NiAl 입자와 SiC 입자강화재보다 우수한 항복강도 및 인장강도를 나타내었다. 그러나, 연신율은 모재는 물론 다른 입자강화재보다도 현저히 낮은 값을 나타내었다. 이것은 Ni₃Al 입자강화재의 경우, 강화입자의 형상이 구형인 것으로 인해 항복응력을 넘는 높은 응력하에서는 강화입자-모재 계면에서 일어나는 분리가 곧장 시험편 파단으로 연결되므로 연성재료 특유의 가공경화에 따른 인장강도의 증가나 연화거동이 단순인장시험에서는 나타나지 않았기 때문으로 사료된다.

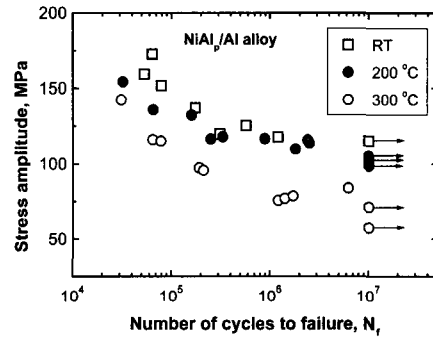
3.2 S-N 선도

Fig. 4 (a)~(d)는 각 시험재에 대하여 각각의 시험온도에서 얻어진 S-N선도를 나타낸 것이다. 피로강도는 다소의 분산을 나타내지만, 전체적으로 고사이클 피로의 특성을 보여주고 있다. 데이터 분산의 원인으로는 Fig. 2에 보인 바와 같이 다이캐스팅시 재료에 내재하는 기공의 크기 및 분포상태를 들 수 있다.⁽¹⁷⁾ 시험온도가 증가함에 따라 전체적으로 피로강도의 저하를 나타내고 있으나, 강화입자의 종류에 따라서 피로강도의 저하 정도는 차를 나타내었다.

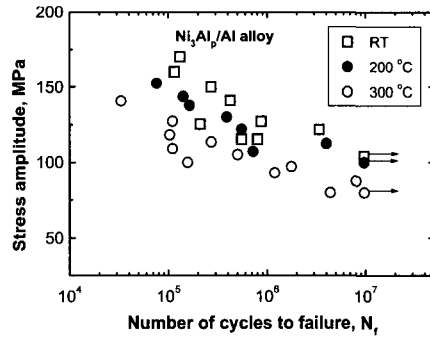
먼저, (a) 모재의 경우, 온도가 증가함에 따라 전 파단반복수역에서 피로 강도의 전반적인 저하



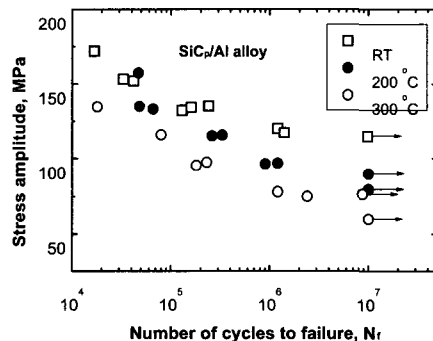
(a) Al alloy



(b) NiAl_p/Al alloy



(c) Ni₃Al_p/Al alloy



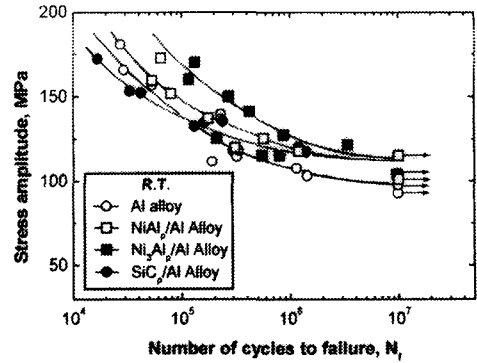
(d) SiC_p/Al alloy

Fig. 4 S-N curves for each specimen

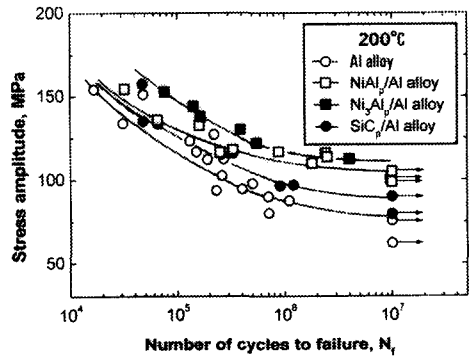
를 나타내었다. (b) NiAl 입자강화재의 경우, 200°C까지는 고과단반복수역에서 거의 실온의 피로강도를 나타내나 300°C로 온도가 증가하면 피로강도의 저하정도가 특별히 증대되었다. (c) Ni₃Al 입자강화재의 경우, 전체적으로 다른 시험재보다 높은 피로강도를 나타내고 있다. 또한 200°C까지는 거의 실온의 강도를 나타낼 뿐만 아니라 온도가 300°C로 증가하여도 고과단반복수역에서 피로강도의 저하정도가 다른 입자강화재에 비하여 적음을 볼 수 있다. 한편, (d) SiC 입자강화재의 경우는 금속간화합물입자강화재와는 달리 고과단반복수역으로 갈수록 온도에 따른 영향이 다소 현저하게 나타났으나 모재의 경우보다는 그 정도가 낮았다.

Fig. 5는 각 온도에서 전 시험편의 피로시험결과를 나타낸 S-N 선도이다. 먼저 (a) 실온의 경우, 저과단반복수역에서는 입자강화재의 피로강도가 모재의 경우에 비하여 거의 차가 없거나 오히려 낮은 값(SiC 입자강화재의 경우)을 나타내는데 비하여, 고과단반복수역에서는 입자에 의한 강화효과가 나타나 입자강화재가 모재보다 높은 피로강도를 나타내고 있다. 이것은 저과단반복수역에서는 피로수명이 주로 균열의 발생보다는 균열의 진전거동에 지배를 받아서, 입자강화의 효과가 파단수명의 개선에는 크게 영향을 미치지 못하였기 때문으로 생각된다. 특히 SiC 입자강화재가 석출경화형인 모재보다 낮은 피로수명을 나타내는 것은 특히 낮은 연성 및 입자파괴에 기인하였다.⁽⁹⁾ 한편 고과단반복수역에서는 강화입자 부근에 형성된 장범위 응력장이 전위의 이동을 방해하여 입자강화재에서 국부적 슬립 또는 변형의 억제효과가 나타나 균열발생과 초기진전을 억제하였기 때문에 입자강화재가 모재보다 높은 피로강도를 나타내었다고 생각된다.

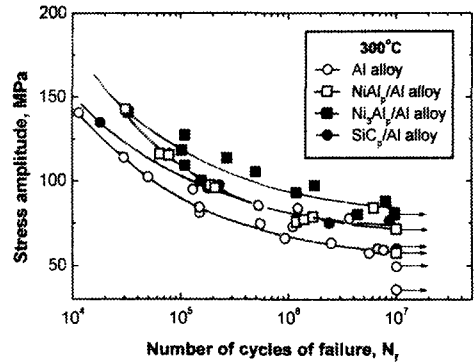
그러나, 고온으로 갈수록 전반적으로 피로강도는 저하하지만 모재에 비교하여 입자강화에 의한 효과가 증가하여, 입자강화재가 모재보다 전체적으로 높은 피로강도를 나타내고 있다. (b)의 200°C에서는 Ni₃Al 입자 및 NiAl 입자강화재가 SiC 입자강화재보다 큰 피로수명 및 강도를 나타내었다. 특히 Ni₃Al 입자강화재는 NiAl 입자강화재보다 높은 피로강도를 나타내었다. 이것은 Ni₃Al 입자의 우수한 고온특성 및 Fig. 3(b)에 볼 수 있었던



(a) Room temperature



(b) 200°C



(c) 300°C

Fig. 5 S-N curves at each tested temperature

강화입자에 함유된 Ni이 모재와 확산반응을 일으켜 계면에서 양호한 결합을 형성하였기 때문으로 생각되어진다. (c)의 300°C에서는, 입자강화재의 피로강도가 모재에 비교하여 상승해 있지만, NiAl 입자강화재와 SiC 입자강화재 간에는 강화입자의 차는 볼 수가 없고 거의 동일한 S-N 곡선

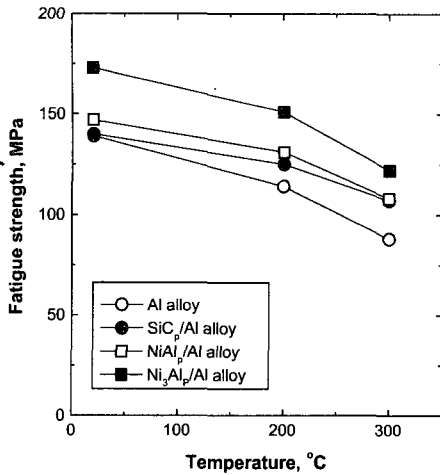


Fig. 6 Change of fatigue strength at 10⁵cycles with increase of temperature

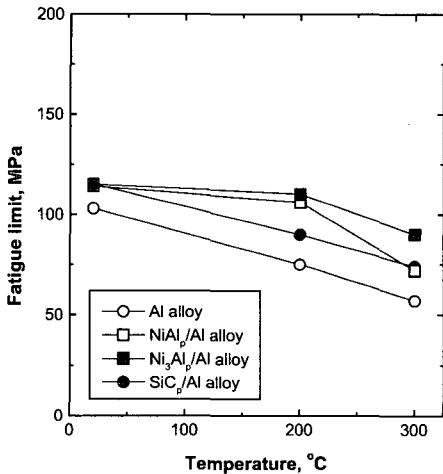


Fig. 7 Change of fatigue limit at 10⁷cycles with increase of temperature

을 나타내고 있다. 그러나 Ni₃Al 입자강화재는 여전히 다른 입자강화재보다 우수한 피로특성을 나타내었다.

3.3 피로강도의 온도의존성

피로강도의 온도의존성을 알아보기 위하여 Fig. 5에 내삽한 파괴확률곡선으로부터 반복회수 10⁵ 사이클에서 피로강도와 10⁷사이클에서의 피로강도인 피로한도(fatigue limit)를 각각 구하여 온도에 따른 거동을 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었

다. 입자강화재는 시험온도 범위에서 모재보다 높은 피로강도 및 피로한도를 나타내고 있지만, 강화입자에 따라 차를 나타내었다.

먼저 10⁵사이클에서 피로강도의 온도의존성을 살펴보면, 전체적으로 200°C에서는 비교적 완만한 저하를 나타내고 온도가 300°C로 증가하면 저하 정도가 다소 크게 되었다. 300°C에서 피로강도는 Ni₃Al 입자강화재, NiAl 입자강화재와 SiC 입자강화재, 모재의 순으로 나타났다. Ni₃Al 입자강화재의 경우 300°C에서도 125MPa으로 모재의 87MPa보다 높은 피로강도를 나타내었다.

Fig. 7에서 피로한도의 온도의존성을 보면, 모재의 경우는 온도증가와 더불어 피로한도는 거의 직선적으로 저하하였다. SiC 입자강화재의 경우는 직선적으로 저하하였지만, 모재보다는 높은 값을 나타내었다. 즉 SiC 입자강화재의 경우는 모재상의 강도특성이 강화재인 SiC 입자보다 온도에 의한 영향을 크게 받고 있어서, 이것이 입자강화재의 피로강도에도 크게 영향을 미쳤다.

한편 NiAl 입자강화재의 피로한도는 200°C에서 실온의 강도에 비하여 8% 저하한 값을 나타내어 우수한 고온피로특성을 나타내었지만, 온도가 300°C로 높아지면 37%까지 저하하여 SiC 입자강화재와 거의 같은 강도 값을 보여주고 있다. 이것은 고온에서 NiAl 입자-모재간 계면강도가 뛰어나 특히 200°C에서 SiC 입자강화재보다 높은 피로강도를 가져왔으나, 300°C에서는 피로균열의 발생 및 진전이 모재의 강도특성에 크게 의존하였기 때문이다. Ni₃Al 입자강화재의 피로한도는, 200°C까지는 거의 실온의 강도치를 유지하여 우수한 고온피로특성을 나타내지만, 온도가 300°C로 높아지면 90MPa까지 저하하였지만 그 값은 다른 입자강화재보다는 15MPa이상 높은 값이다. 이것은 고온에서 Ni₃Al 입자와 모재간 계면 강도가 뛰어나, 특히 200°C에서 다른 입자강화재보다 높은 피로강도를 가져왔다고 생각된다.

이상으로부터 강화재에 금속간화합물입자 도입은 SiC 입자강화재에 비하여 정적강도 뿐만 아니라, 고온역에서 피로강도를 개선시킴을 알 수 있다. 이것은 또한 NiAl 입자 또는 Ni₃Al 입자보다 내열성 및 연성이 뛰어난 금속간화합물입자를 개발·적용함으로써 다른 기계적 성질의 저하없이 고온피로 특성이 우수한 입자강화 MMC의 개발 가능성을 시사해 준다.

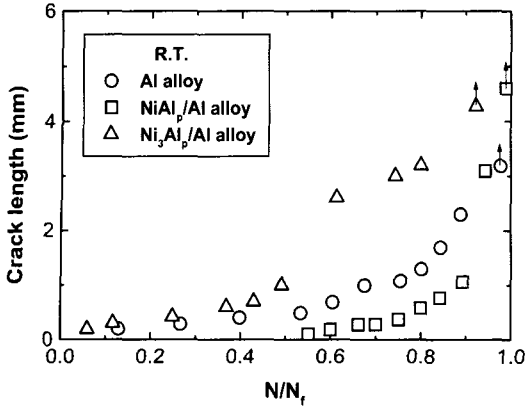


Fig. 8 Fatigue crack propagation behavior at room temperature

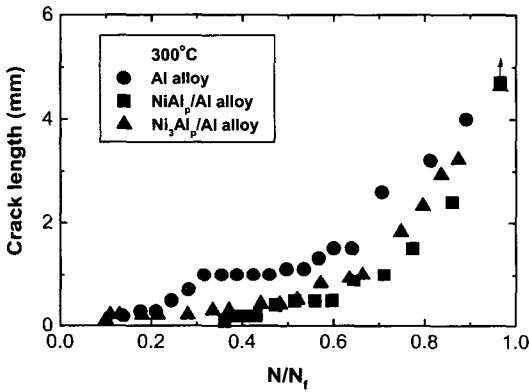
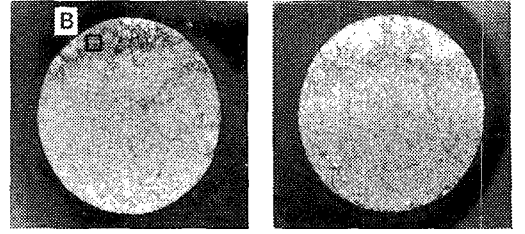
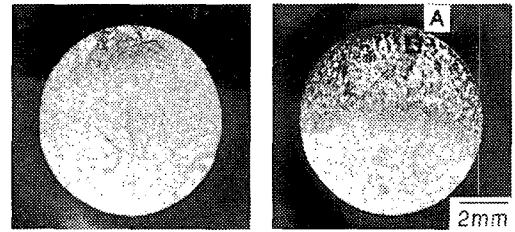


Fig. 9 Fatigue crack propagation behavior at 300°C

3.4 입자강화재에서 피로균열 발생 및 진전거동
 입자강화재의 피로균열의 진전과정에서 강화입자가 어떠한 역할을 하는지 알아보기 위하여 모재, NiAl 입자강화재, Ni₃Al 입자강화재의 실온 및 300°C에서의 균열진전곡선을 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. 이때 균열개시부를 한정하기 위하여 시험편의 평활부 중앙에 길이 15mm, 폭 2mm의 평탄부를 도입하였다. 먼저 실온에서는 각 재료 모두 응력진폭을 150MPa로, 300°C에서는 응력진폭을 110MPa으로 하여 실험을 실시하였다. 실온과 300°C에서 모재와 Ni₃Al 입자강화재에 대해서는 균열발생이 파단 수명의 10%정도에 상당하는 반복수에서 확인되었고, 그 후 완만한 균열 진전을 나타내고 있다. 한편 NiAl 입자강화재의 경우, 균열발생이 실온에서는 파단수명의 약55%에 상당하는 반복수에서, 300°C에서는 35%정도의



$\sigma=173\text{MPa}, N_f=6.4 \times 10^4$ $\sigma=120\text{MPa}, N_f=3.1 \times 10^5$
 (a) Room temperature



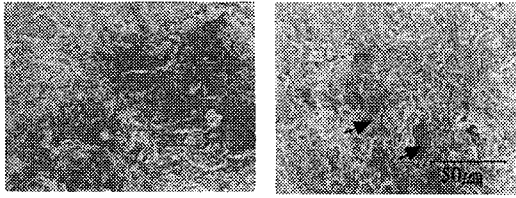
$\sigma=143\text{MPa}, N_f=3.1 \times 10^4$ $\sigma=84\text{MPa}, N_f=6.2 \times 10^6$
 (b) 300°C

Fig. 10 Macroscopic views of fracture surface in NiAl_p/Al alloy composite

반복수에서 각각 확인되었고, 그 후 비교적 급속히 진전하여 파단에 달하였다. 즉 Ni₃Al 입자강화재에서는, 입자첨가에 의해 긴 균열의 성장이 억제되어 있고, 더욱이 NiAl 입자강화재에 대하여는 특히 짧은 균열의 성장이 억제된다는 것을 알 수 있다.

3.5 파면관찰

피로균열의 발생 및 진전거동에 미치는 강화입자의 영향을 조사하기 위하여, 피로한도 이전의 유한수명에서 파단한 시험편의 파면관찰을 하였다. 피로파면의 거시적 형태는 강화입자의 유무, 실험온도의 차에 따른 특징적인 변화 없이 유사한 양상을 보이지만, 응력진폭에 따라서는 차이를 가져왔다. Fig. 10은 NiAl 입자강화재의 파면양상을 보여주고 있다. 여기서 파면의 위쪽 검게 변한 부분이 피로파면을 나타내고 있다. 사진 좌측의 파단수명이 짧은 경우, 즉 높은 응력진폭에서는 복수의 균열이 발생·진전함으로써 파단면의 단차가 심하다. 이에 비하여, 우측의 파단수명이 긴 경우, 즉 낮은 응력진폭에서는 피로파면이 차지하는 분율이 클 뿐만 아니라 하나의



(a) Spot A (at 300°C) (b) Spot B (at R.T.)

Fig. 11 Magnified microstructure of spots shown in Fig. 10

균열이 발생·진전하여 평탄한 파면을 나타내고 있다.

Fig. 11은 피로균열의 진전과정에서 강화입자의 역할을 알아보기 위하여 Fig. 10에 보인 피로파면의 특징적인 부분의 상세를 나타낸다. (a)는 300°C의 고온, 저응력진폭에서의 피로균열 진전부로서, 파면상에는 강화입자는 볼 수 없고, 알루미늄합금에서의 파면파⁽¹⁸⁾ 같이 스트라이에이션(striation)을 관찰할 수 있었다. 이것은 고파단반복수역의 즉 낮은 응력진폭에서는, 균열기점으로부터 거리가 짧으면 상대적으로 균열선단에서 소성역 사이즈가 작아 피로균열은 전위루프가 밀집된 강화입자의 주위를 피해 주로 모재부(matrix)를 진전하여 스트라이에이션을 형성하였기 때문이다. 이것으로부터 고온에서의 피로균열은 주로 모재중을 진전하였고, 이로 인해 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 고파단수명역에서 입자강화재의 피로강도가 모재의 강도특성에 크게 의존하였다는 것을 알 수 있다.

또한 (b)는 실온, 고응력진폭하 피로균열 진전부를 나타내는데, 파면상에는 많지는 않지만 강화입자가 존재하는 것을 볼 수 있고(화살표 표시부), 또 덤플(dimple)도 일부 관찰되고 있다. 이와 같이 파면에 강화입자가 관찰된 것은, 고응력진폭역에서는 균열선단에서의 소성역 사이즈가 커서 그 가운데에 포함된 강화입자로부터도 균열이 발생하여 결함으로부터 발생한 주균열과 합체하였기 때문으로 생각된다. 또한 SiC 입자강화재 및 Ni₃Al 입자강화재에서도 시험온도, 부하응력진폭에 따라서 NiAl 입자강화재의 경우와 비슷한 형태를 나타내었다.

4. 결 론

알루미늄합금을 모재로 NiAl, Ni₃Al의 금속간화합물입자를 다이캐스팅법으로 강화한 MMC에 대하여 실온 및 고온에서 고사이클 피로시험을 실시하여, 고온피로특성 및 피로파괴기구에 미치는 강화입자의 영향에 대하여 조사하였다. 또한, SiC 입자강화재와 비교하였다.

(1) 실온에서부터 300°C까지의 온도범위에서, 입자강화재는 모두 모재보다 우수한 정적강도와 피로강도를 나타내었다. 시험온도의 증가에 따른 피로강도의 저하는 강화입자에 따라서 차를 나타내었다. 특히 금속간화합물인 NiAl 입자와 Ni₃Al 입자 강화재는 시험한 모든 응력진폭역과 온도역에서 모재와 SiC 입자강화재보다 우수한 피로강도를 나타내었다.

(2) 온도 증가에 따른 피로한도의 저하는 모재와 SiC 입자강화재에서는 거의 직선적이었는데 비하여, 금속간화합물입자 강화재는 200°C까지 뛰어난 피로특성을 나타내었고, 특히 Ni₃Al 입자 강화재는 300°C에서 우수한 피로한도를 나타내어 고온 구조용재료로서 가능성을 보여주었다.

(3) 다이캐스팅한 알루미늄합금기 입자강화재의 경우, 피로균열은 다이캐스팅시 도입된 보이드에서 주로 발생하였다. 발생한 피로균열은 실온에서는 모재부와 강화입자-모재계면을 따라서 주로 진전하였다. 고온에서는 강화입자-모재계면을 따라서 진전하는 빈도는 감소하여 주로 모재부를 진전하여, 피로강도가 모재부의 강도 특성에 크게 의존함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME-97-C-20)의 지원에 의하여 연구되었습니다. 지원에 감사드립니다. 또한 시험편 제공과 조언을 주신 Iwate Univ.의 K. Katagiri교수와 Ryobi Co. Ltd.에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Clyne, T. W. and Withers, P. J., 1993, An

- Introduction to Metal Matrix Composites, Cambridge University Press.
- (2) Harrigan, Jr. W. C., 1991, "Metal Matrix Composites," Everett, R. K. and Arenault, R. J. Ed., Metal Matrix Composites; Processing and Interfaces, *Treatise Mater. Sci. Tech.*, Vol. 32, pp. 1~16.
- (3) 권재도, 문윤배, 김상태, 1995, "SiC입자보강 Al복합재료의 피로균열진전거동," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제1호, pp. 121~131.
- (4) Nair, S. V., Tien J. K. and Bates R. C., 1985, "SiC-Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites," *Int. Metall. Rev.*, Vol. 30, pp. 275~290.
- (5) Rohatgi, P., 1991, "Cast Aluminum-Matrix Composites for Automotive Applications", *J. Minerals*, Vol. 43, No. 4, pp. 10~15.
- (6) 서영호, 강충길, 1996, "용탕제조법에 의하여 제조된 SiC_p/Al 복합재료의 2차성형가공이 기계적성질에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제11호, pp. 3474~3490.
- (7) Omura, H., Miyoshi, T., Takahashi, Y., Conley, J. and Yodogawa, M., 1989, "The Development of Die Cast Metal Matrix Composites for Tribological Applications," *MRS Int'l Mtg. on Adv. Mats.* Vol. 4, pp. 41~46.
- (8) Omura, H., Miyoshi, T., Takahashi, Y., Conley, J. G. and Yodogawa, M., 1988, "Dispersion of NiAl Intermetallic Compound and Si₃N₄ in Die Castings for Increased Wear Resistance," Kim, Y. W. and Griffith, W. M. Ed., in *Dispersion Strengthened Aluminum Alloys, MMCS*, pp. 421~435.
- (9) Bonnen, J. J., Allison, J. E. and Jones, J. W., 1991, "Fatigue Behavior of a 2xxx Series Aluminum Alloy Reinforced with 15 vol Pct SiC_p," *Met. Trans.* Vol. 22A, pp. 1007~1019.
- (10) 서동우, 권동일, 이성학, 1996, "주조 A356 Al-SiC_p 복합재료의 파괴인성 해석연구," 대한금속학회지, 제35권, pp. 7~13.
- (11) 양유창, 송정일, 봉하동, 한경섭, 1995, "단섬유강화 금속복합재료의 반복적 변형 및 피로특성," 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1422~1430.
- (12) Hadianfard, M. J., Healy, J. and Mai, Y. W., 1994, "The Influence of Temperature on the Mechanical and Fracture Properties of a 20 vol% Ceramic Particulate-Reinforced Aluminium Matrix Composite," *J. Mater. Sci.*, Vol. 29, pp. 3906~3912.
- (13) Karayaku, M. and Sehitoglu, H., 1991, "Thermomechanical Fatigue of Particulate-Reinforced Aluminum 2xxx-T4," *Metall. Trans.*, Vol. 22A, pp. 697~707.
- (14) Zhao, D., Tuler, F. R. and Lloyd, D. J., 1994, "Fracture at Elevated Temperatures in a Particle Reinforced Composite," *Acta, Metall. Mater.*, Vol. 42, pp. 2525~2533.
- (15) Smith, H. H., Michel, D. J. and Reed, J. R., 1989, "Fatigue Crack Propagation in Rapidly Solidified Aluminum Alloys at 25°C and 300°C," *Metal. Trans.*, Vol. 20A, pp. 2425~2430.
- (16) Healy, J. C. and Beevers, C. J., 1984, "A Study of Fatigue Crack Growth in a Particulate-Reinforced Al-Si Alloy at 23°C and 220 °C," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A142, pp. 183~192.
- (17) Chen, R. and Zhang, G., 1993, "Casting Defects and Properties of Cast A356 Aluminum Alloy Reinforced with SiC Particles," *Composite Sci. Tech.*, Vol. 47, pp. 51~56.
- (18) Broek, D., 1986, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 4th ed., Martinus Nijhoff Publishers, p.509.