

論文

SiC 입자 강화 A356 A1기 복합재료의 미세조직과 인장특성

김남수* · 조경목* · 박익민*

Microstructure and Tensile Properties of SiC
Particulate Reinforced A356 A1 Matrix Composite

Nam-Su Kim, Kyung-Mox Cho and Ik-Min Park

ABSTRACT

In this study, an attempt has been made to modify the microstructure of a stir cast A356 A1/15 vol% SiCp composite. The solidification microstructure of the stir cast A1/SiCp composite revealed that reinforcing SiC particles are segregated to the interdendritic regions caused by particle pushing. The modified microstructure of the A356 A1/SiCp composite which was remelted and squeeze cast revealed a more homogeneous distribution of SiC particles. As a result, the yield and tensile strengths of the squeeze cast composite were improved. A356 A1/SiCp composite and A356 A1 alloy were aged to investigate the difference in aging behavior and its effects on tensile properties. Peak aging time was 12 and 24 hours for the composite and the unreinforced A356 A1 alloy respectively, and so accelerated aging was observed in the composite. The macrohardness (HRB) of the composite was measured higher than that of the A356 A1 alloy, while the microhardness(Hv) of the matrix region of the composite was lower than that of the A356 A1 alloy at peak aging. It results from the depletion of Mg in the matrix of the composite, and thus less amount of aging precipitations in the matrix. Therefore the aging effect on tensile strength was more pronounced in the unreinforced A356 A1 alloy than in the A356 A1/SiCp composite.

초 록

본 연구에서는 액상교반 주조법으로 제조된 A356 A1/15 vol% SiCp 복합재료를 재용해 한 후 squeeze casting 하여 강화제인 SiC 입자를 균일 분산시키므로써 미세조직의 개선을 시도하여 인장특성을 평가하였다. Squeeze casting으로 미세조직이 개선된 복합재료는 항복강도 및 인장강도가 향상되었다. Squeeze cast 한 A356 A1/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료 및 A356 A1 기지합금은 시효열처리를 행하면서 시효거동을 관찰하고 인장특성을 평가하였다. Squeeze cast 한 A356 A1/SiCp 복합재료와 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료의 시효거동은 유사하였다. 최고경도에 이르는 시효시간은 A356 A1 기지합금에서는 24시간이었으나 복합재료에서 12시간으로

* 부산대학교 공과대학 금속공학과

복합재료에서 가속시효가 일어났다. 최고 정도 시효열처리(T6) 후 거시경도(HRB)는 복합재료가 A356 A1 기지합금보다 높았으나, 미소경도(Hv) 측정결과 복합재료의 A1금속기지 만의 경도는 A356 A1 기지합금보다 낮게 나타났다. 이는 복합재료의 제조시 활성금속인 Mg이 강화재/기지 계면편석 및 화합물 생성 등으로 A1 금속기지에서 Mg이 고갈되어 시효석출물이 불충분하게 생성되었기 때문으로 판단되었다. 따라서 인장강도에 미치는 시효경화 효과는 복합재료 보다는 A356 A1 기지합금에서 더욱 뚜렷히 나타났다.

1. 서 론

금속기 복합재료는 가볍고 강도가 높은 세라믹 강화재를 금속기지에 보강하여 비강도 및 비강성이 향상될 뿐만 아니라 내마멸성, 내열성, 열전기특성, 감쇄특성 등이 우수하여 경량 신소재로서 각광을 받고 있다. 최근에는 다양한 기지금속 및 강화재의 개발과 제조기술의 발달에 힘입어 항공우주, 자동차, 전자기기 및 레저상품 관련 등 각종 산업분야에서 금속기 복합재료의 개발과 실용화가 이루어지고 있다. 금속기 복합재료는 종래에는 만족스런 물성을 얻기 위하여 값비싼 장섬유 및 단섬유를 보강한 형태를 생산단가가 높은 분말야금법을 이용하여 주로 생산하여 왔다. 그러나 최근에는 입자 강화재를 첨가한 금속기 복합재료를 주조법으로 값싸게 제조하는 기술이 확보되고 있다. 주조 입자강화 금속기 복합재료는 기존의 제조 및 가공공정을 이용함으로써 생산비 및 설비비를 동시에 절감시킬 수 있어 더욱 관심이 높아지고 있다[1-5]. 주조 금속기 복합재료 중 SiC 입자강화 알루미늄 합금기지 복합재료 (Al/SiCp)는 piston, brake rotors, Cylinder sleeves 및 drive shaft 등의 자동차 부품으로 실용화가 기대되고 있다[6-8].

상품화 되어있는 주조 금속기 복합재료에는 액상교반 주조방법(stir-casting)으로 제조된 DURALCAN사의 A356 Al/SiCp 복합재료가 있는데, 이 복합재료는 SiC 강화입자가 수직상정 간극으로 밀려나는 particle pushing 현상에 의해 분균일 분포되고 또한 비가압 제조방법이므로 SiC 입자와 기지금속 사이의 계면 void 등의 주조결함이 발생하여 기계적 특성의 저하가 문제시 되고 있다. 본 연구에서는 액상교반 주조법으로 제조된 A356 Al-SiCp 복합재료를

squeeze casting으로 재주조하여 미세조직의 개선을 시도하고 미세조직이 인장특성에 미치는 영향을 조사하였다. 금속기 복합재료의 기계적특성을 지배하는 인자로서 강화재의 크기, 형상, 분포 및 기지/강화재 계면 등이 주요한 관심사가 되어 왔으나, 불연속 강화재 보강 금속기 복합재료의 경우 금속기지의 특성도 기계특성에 상당한 영향을 미치는 중요한 인자이다[9,10]. 따라서 A356 Al/SiCp 복합재료를 시효열처리를 행하면서 금속기지의 시효거동을 분석 조사하여 복합화과정 및 시효 과정에서 금속기지의 특성변화가 복합재료의 인장특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 재료는 15vol% SiC 입자를 A1(A1-7.2 Si-0.35 Mg-0.2 Cu-0.1 Mn-0.2 Fe-0.2 Ti-0.1 Zn in wt%) 합금기지에 보강하여 액상교반 주조법으로 제조되어진 A356 Al/CiCp 금속기 복합재료로서 DURALCAN 사(San Diego, CA, USA)에서 구입하였다. 강화재인 SiC입자의 크기분포는 약 5-10 μ m이었다. A356 Al/SiCp 복합재료와의 비교를 위하여 비복합된 A356 A1 합금을 동시에 구입하여 실험에 사용하였다.

액상교반 주조한 A356 Al/SiCp 복합재료는 미세조직의 개선을 위하여 재용해하고 squeeze casting법으로 재주조하였다. Squeeze casting은 액상교반 주조 A356 Al/SiCp 복합재료를 Ar분위기의 전기로에서 용해하여 용탕온도 750 $^{\circ}$ C로 30분간 유지한 후 150 $^{\circ}$ C로 예열된 금형에 주입하여 가압 주조하였다. Squeeze casting의 적정조건은 가압력 75MPa, 가압지연시간 7초, 가압유지시간 60초였다. Squeeze cast 한 A356 Al/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한

A356 A1/SiCp 복합재료 및 A356 A1 기지합금은 시효열처리를 행하면서 시효거동을 조사하였다. 시효열처리는 550℃에서 12시간 균질화처리한 후 수냉하고, 155℃에서 1-72시간동안 유지하면서 행하였다. 시효시간에 따른 각 재료의 거시경도는 Rockwell B scale(HRB)를 이용하여 하중 100kgf로 10회 측정하여 평균치로 구하였다. HRB의 측정은 직경 3.175mm hard steel ball indentor사용하였고, 이는 불균일하게 분포된 SiC 입자를 포함한 복합재료의 거시경도를 측정하기에 충분하였다. 또한 시효에 따른 A1금속기지의 시효거동을 조사하기 위하여 복합재료의 기지(matrix)의 미소경도 및 A356 A1 합금의 미소경도를 Vickers 미소경도기를 이용하여 측정하였다. 미소경도는 하중 10g, 하중 유지시간 10초로서 20회 측정하여 평균치로 구하였다. Squeeze cast한 A356 A1/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp복합재료 및 A356 A1 기지합금의 미세조직은 광학현미경으로 조사하였다.

Squeeze cast한 A356 A1/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료 및 A356 A1 기지합금은 as cast 상태 및 최고경도 시효처리(T6) 후 인장시험을 행하여 항복강도, 인장강도 및 연신율을 측정하였다. 인장시험은 지름 6.25mm, 표점 거리 25mm의 시편으로 3.4×10^{-4} 의 변형율로서 행하였다. 인장시험 후 시편의 파단면은 주사전자 현미경(SEM)으로 관찰하여 인장특성과의 상관관계를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 미세조직

그림 1(a)는 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료의 미세조직으로 강화재로 첨가된 SiC 입자가 기지합금인 A356 A1의 공정 Si입자와 함께 망상조직을 형성하면서 매우 불균일하게 편재 분포해 있다. 이는 A356 A1/SiCp 복합재료 주조시 응고과정에 SiC 입자가 particle pushing 현상에 의해 초정 dendrite 전방으로 밀리면서 기지금속인 A356 A1 합금의 수지상 응고조직에서 가장 늦게 응고가 완료

되는 공정조직에 분포되기 때문이다.[11] 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료 망상조직의 cell 크기는 (그림 1(a)) 70~80 μm 로서 비복합화 A356 A1 기지합금의 cell 크기(그림 1(c)) 약 100 μm 보다는

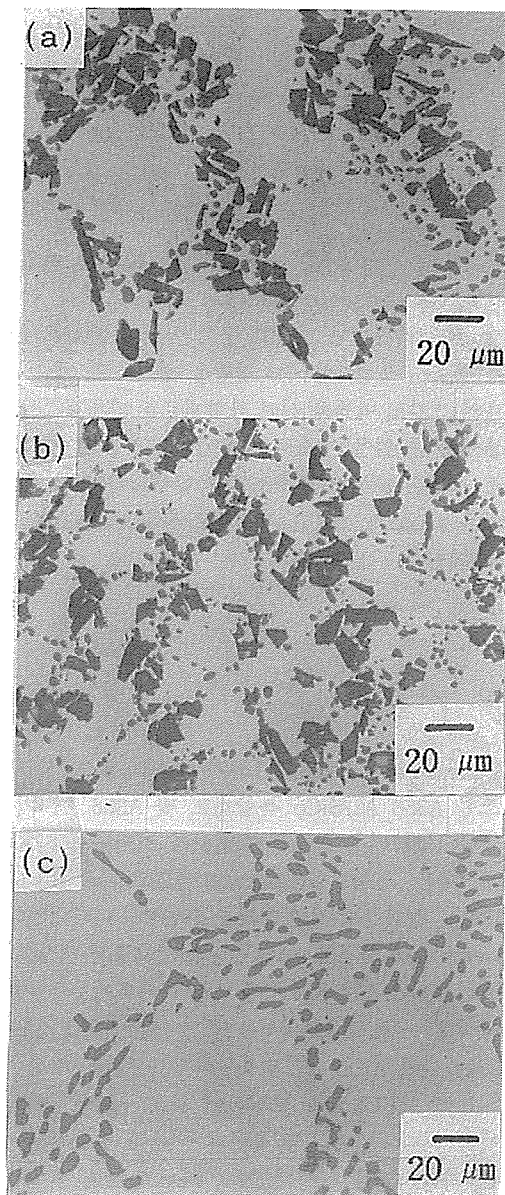


Fig. 1. Optical microstructure of (a) stir-cast A356 A1/SiCp, (b) squeeze cast A356 A1/SiCp, (c) A356 A1 alloy.

다소 작았다. 이는 복합화에 따른 불균일 핵생성 장소의 증가 등에 의한 결정립 미세화작용에 의한 것으로 사료된다[12].

그림 1(b)는 squeeze cast 한 A356 Al/SiCp 복합재료의 미세조직이며, 불균일 SiCp 분포를 갖는 액상교반 주조 복합재료를 채용해하고 squeeze casting하여 미세조직을 개선한 것이다. Squeeze casting시 용탕 가압효과에 따른 조성적 과냉의 증가, 수지상정의 분리, 냉각속도의 증가 등에 의해 조직이 미세화 되며[5], Al기지금속에서 SiCp 분포가 현저히 균일해졌다. Squeeze cast 한 A356 Al/SiCp 복합재료의 망상조직의 cell 크기는 10~20 μm 으로 줄어들었다. Squeeze casting은 SiCp를 더욱 균일하게 분포시키는 데 기여할 뿐만 아니라 가압효과에 의해 주조시 생성되는 주조결함을 제거하고, 공정 Si 입자의 크기도 미세화 시켜 복합재료의 기계적특성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 공정 Si 입자의 평균 크기는 액상교반 주조한 복합재료에서 약 7 μm 였으나 squeeze cast한 복합재료에서 약 5 μm 로 미세화 되었다.

3-2. 시효거동

Squeeze cast한 A356 Al/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한 A356 Al/SiCp 복합재료 및 A356 Al 기지합금을 155 $^{\circ}\text{C}$ 에서 등온 시효열처리 시키면서 시효시간에 따른 거시경도(Rockwell Hardness B-scale (HRB)) 변화를 측정한 결과를 그림 2에 나타내었다. Squeeze cast 한 A356 Al/SiCp 복합재료와 액상교반 주조한 A356 Al/SiCp 복합재료의 시효거동은 거의 유사하였다. 복합재료에서는 약 12시간에 최고경도에 이르는 한편 A356 Al 비복합화 기지합금에서는 약 24시간에 최고경도에 도달하여 peak aging 시간의 차이를 나타내었다. 즉 복합화에 따라 시효가 촉진되는 가속시효를 나타내었다. Peak aging 후 최고경도는 복합재료(HRB=78~80)가 비복합화 A356 Al 기지합금(HRB=70)보다 높았으나, 균질화처리 후 peak aging까지 정도증가는 A356 Al 합금의 경우

약 30로서 복합재료의 약 25보다 높게 측정되었다. 복합재료에서 시효경화는 주로 Al 금속기지내에 석출물이 생성되어 일어난다는 것을 고려하면 peak aging 시간과 정도증가의 차이는 복합재료의 Al 금속기지가 동일한 A356 Al 합금임에도 불구하고, 시효거동이 A356 Al 합금과 상이할 수 있음을 나타낸다. 이를 확인하기 위하여 시효시간에 따른 복합재료와 A356 Al 합금의 기지영역 만의 미소경도(Vicker microhardness(Hv))를 측정하였다(그림 3). 최고경도에 이르는 peak aging 시간은 복합재

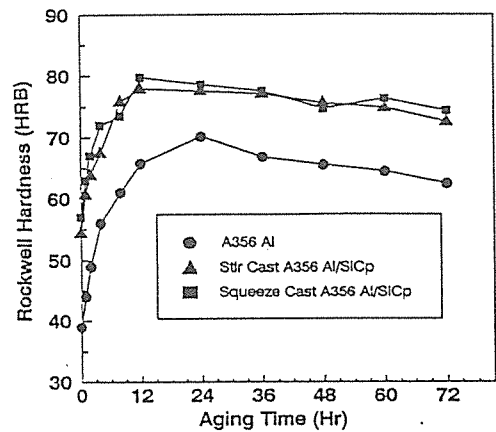


Fig. 2. Variation of hardness as a function of aging time for SiCp reinforced and unreinforced A356 Al alloy.

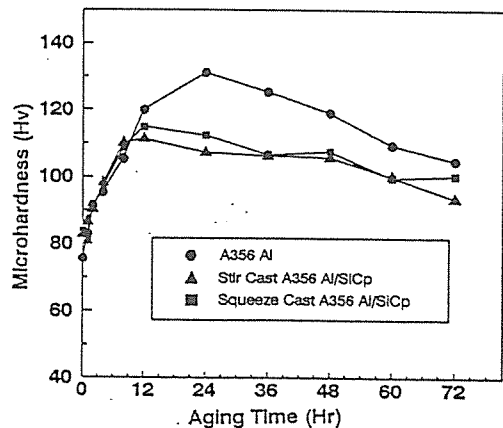


Fig. 3. Variation of A1 matrix microhardness as a function of aging time for SiCp reinforced and unreinforced A356 Al alloy.

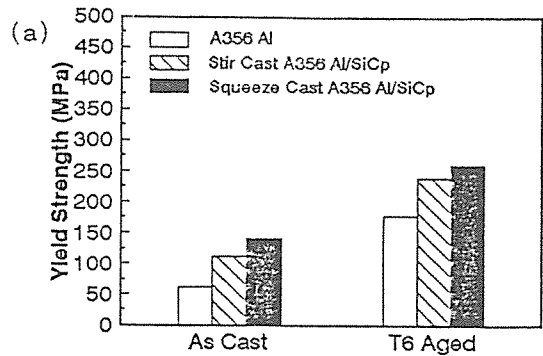
료의 A1 금속기지의 경우 12시간, 비복합화 A356 A1 기지합금의 경우 24시간으로 그림 2의 경우와 일치하였다. Peak aging 후 최고경도는 A356 A1 합금의 기지영역(Hv=135)이 복합재료의 A1 금속기지(Hv=125)보다 높았고, 균질화처리 후 peak aging 까지의 경도증가치도 A356 A1 합금의 기지영역이 약 55로서 복합재료의 A1 기지금속의 약 35보다 높아서 비복합화 A356 A1 기지합금의 시효경화 효과가 더욱 크게 일어났음을 알 수 있다.

복합재료가 비복합화 A356 A1 합금에 비해 최고 시효경도에 이르는 시간이 짧아지는 가속 시효효과와는 SiCp 입자와 A1 기지금속과의 열팽창계수 차이(약 10 : 1)로 인하여 A1 기지금속에 전위밀도가 증가하고 탄성 잔류응력이 유발되어 시효석출물의 생성이 용이하게 되었기 때문이며, 이는 가속 시효효과를 나타내는 대부분의 A1 합금 금속기 복합재료의 시효거동 결과와 일치한다[13, 15]. 일반적으로 A1-Si-Mg²⁰ 합금에서는 시효에 따른 Mg₂Si 등의 석출물이 시효경화를 일으키는 것으로 알려져 있다[16]. 그러나 A356 A1 합금기지에 SiC 입자 강화재의 복합화는 활성원소인 Mg이 금속기지/강화재 계면에 편석될 뿐만 아니라, Mg 함유화합물을 생성시켜 금속기지에서 Mg을 고갈시키는 것으로 보고되고 있다[13, 16, 17]. 따라서 복합재료가 비복합화 A356 A1 합금에 비하여 시효경화 효과가 적어서 경도의 최고 증가치가 낮게 나타나는 것은 복합재료의 A1 금속기지 내에 석출물을 생성시켜 시효경화를 유발시킬 수 있는 원소 중 Mg이 고갈되기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

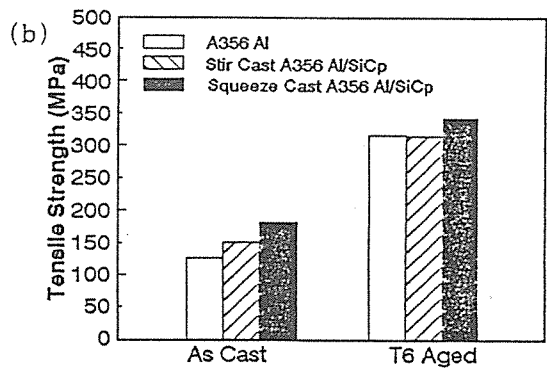
3-3. 인장특성

인장특성 중에서 탄성계수는 A356 A1 합금, 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료 및 squeeze cast 한 A356 A1/SiCp 복합재료에서 각각 78, 94 및 101 GPa로서 SiCp 복합화 및 squeeze casting으로 SiCp의 분포를 균일하게 미세조직을 개선함으로써 탄성계수가 상당히 증가하였다. 그림 4는 squeeze cast 한 A356 A1/SiCp 복합재료, 액상 교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료, A356 A1 기지합금의 as

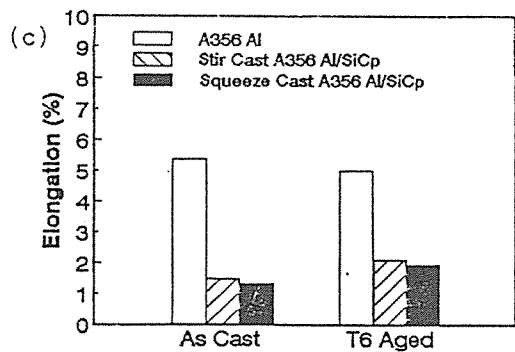
cast 상태 및 시효열처리 후의 인장특성을 측정된 결과이다. As cast 상태에서는 A356 A1 기지합금에 SiCp 강화재를 액상교반 주조법으로 복합화하고



(a) yield_strength.



(b) tensile strength



(d) T6 aged conditions.

Fig. 4. Tensile properties of squeeze cast A356 A1/SiCp, Stir-cast A356 A1/SiCp and A356 A1 alloy in as cast and T6 aged conditions.

squeeze casting으로 미세조직을 개선하여 항복강도와 인장강도가 모두 증가하였다. 일반적으로 입자강화형 복합재료는 하중전달(load transfer)을 받는 입자에 의하여 기지금속이 소성유동을 구속받아 강화가 일어난다. 이때 복합재료의 강도는 기지금속의 소성유동 유효거리(mean free path)에 역비례 한다[18]. A356 A1/SiCp 복합재료에서는 소성유동 유효거리는 cell 크기가 됨으로, squeeze cast한 A356 A1/SiCp 복합재료에서는 SiC 입자가 훨씬 균일하게 분포되어 망상구조의 cell 크기가 미세화되어(그림 1) 강도가 증가한 것으로 사료된다.

한편 그림 4(a)의 peak aging 한 상태에서 항복강도는 squeeze cast 한 A356 A1/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료 및 비복합화 A356 A1 합금에서 공히 증가하여 SiC 입자강화,

미세조직의 개선 및 시효경화에 의한 효과로 인하여 항복강도가 증가하고 있음을 나타내고 있다. 그런데 복합재료에 비하여 비복합화 A356 A1 합금에서 시효경화가 크게 나타났음에도 여전히 항복강도가 가장 낮은 것은 SiC입자강화가 항복강도의 증가에 크게 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 그러나 그림 4(b)의 peak aging시킨 후 인장강도 측정결과에서는 시효경화의 차이에 따른 효과가 관찰되었다. 인장강도는 squeeze casting 한 A1/SiCp 복합재료가 가장 높았으나, 비복합화 A356 A1합금과 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료가 거의 동등하였다. 이는 액상교반 주조한 A356 A1/SiCp 복합재료가 SiC 입자로 강화되었음에도 불구하고 A1 금속기지에 석출물 생성원소인 Mg의 고갈로 인하여 시효열처리 과정에서 시효석출물이 불충분하게 생성되어 인장강도의 증가

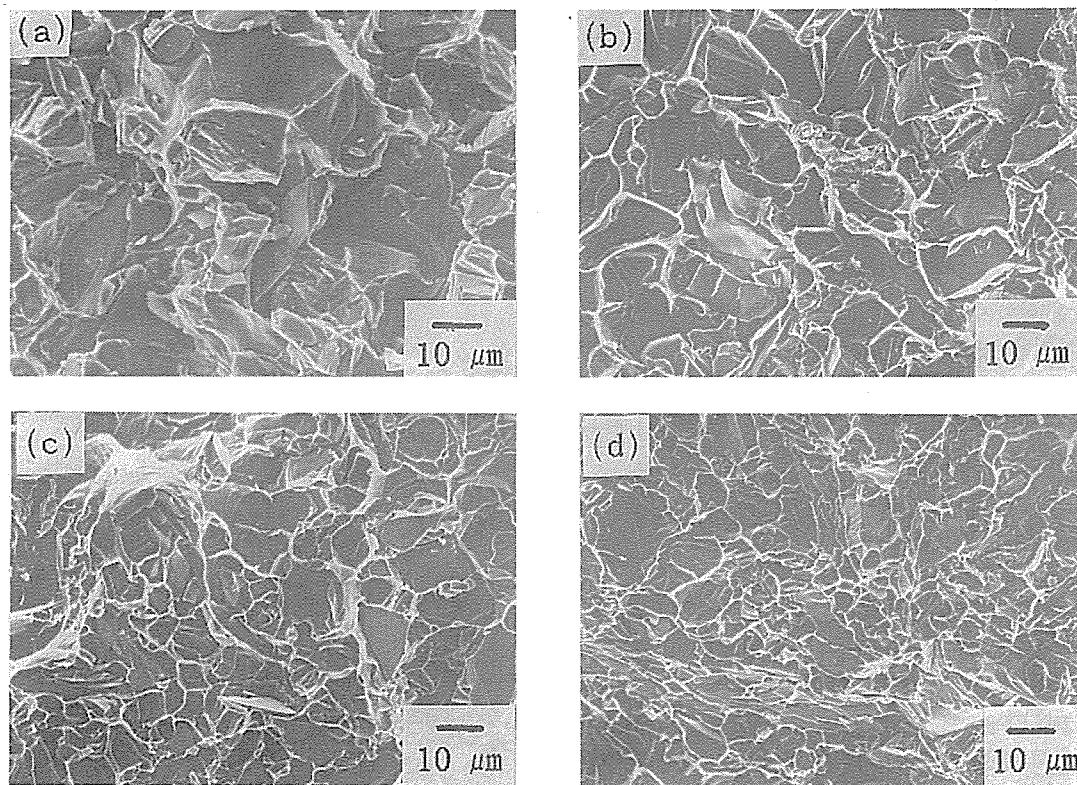


Fig. 5. SEM fractographs of squeeze cast A356 A1/SiCp in (a) as cast (b) as cast (c) T6 aged ; stir-cast A356 A1/SiCp in (d) T6 aged conditions.

가 작은 반면, 비복합화 A356 Al 합금에서는 시효 석출물이 충분히 석출되어 시효경화 효과가 더욱 높아서 인장강도의 증가가 크게 나타났기 때문에 판단된다. 즉 시효열처리 후에는 액상교반 주조한 A356 Al /SiCp 복합재료가 비복합화 A356 Al 합금에 비하여 인장강도가 높지 못하여 SiC 입자 복합화로 인장강도의 증가 효과가 유효하지 못하게 되었다. 그러나 squeeze cast한 A356 Al/SiCp 복합재료의 인장강도는 시효열처리 후에도 비복합화 A356 Al 합금보다도 높아서 시효경화 효과가 불충분함에도 불구하고 미세조직 개선에 의한 SiC 입자 복합화 효과로 인하여 높은 인장강도를 나타내었다.

그림 4(c)의 연신을 측정결과에서는 금속기지 복합재료의 가장 큰 취약점인 낮은 연신율의 전형적인 결과를 보여주고 있다. 복합재료의 연신율은 매우 낮으며, as cast 상태에서 약 1.5% 최고 정도 시효열처리 후에는 약 2.0%로 다소 증가하였다. 비복합화 A356 Al 합금의 연신율은 약 5%로 as cast 및 시효후에 거의 변화가 없었다. 그림 5는 squeeze cast한 A356 Al/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한 A356 Al/SiCp 복합재료 및 A356 Al 기지합금의 as cast 상태 및 시효열처리 후의 인장시편의 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. As cast 상태에서 복합재료의 파단면(그림 5(a), (b))은 공정 Si 및 SiCp로 이루어진 망상조직의 경계를 따라 파괴가 일어나 파단면에는 주로 입자들의 취성파괴 양상을 관찰할 수 있다. 이와 같은 망상조직 경계에서의 입자의 취성파괴는 in-situ 파괴에서도 관찰되고 있다[19]. 한편 최고 정도까지 시효한(T6) 복합재료의 파단면(그림 5(c), (d))은 공정 Si 입자의 형상이 as cast 상태에서는 불규칙하였으나 균질화 처리중 구상화되어 취성파괴된 입자의 양상은 다소 변화하였으나 as cast 상태에 비하여 Al 금속기지의 소성변형량이 뚜렷이 증가한 경향은 보이지 않아 연신율 증가에 크게 기여하지 못한 것으로 판단된다.

4. 결 론

액상교반 주조법으로 제조된 A356 Al/SiCp 복합

재료를 재용해한 후 squeeze casting하여 강화제인 SiCp의 분포를 균일하게 함으로서 복합재료의 미세조직을 개선할 수 있었다. Squeeze cast A356 Al/SiCp 복합재료는 미세조직의 개선을 통하여 항복강도 및 인장강도가 전반적으로 증가하였으나 연성의 변화는 거의 없었다. Squeeze cast 한 A356 Al/SiCp 복합재료, 액상교반 주조한 A356 Al/SiCp 복합재료 및 A356 Al 합금을 시효처리하면서 시효거동을 관찰하고 미세조직과 인장특성의 상관관계를 분석하였다. Squeeze cast 한 A356 Al/SiCp 복합재료와 액상교반 주조한 A356 Al/SiCp 복합재료의 시효거동은 매우 유사하였다. 시효에 의한 최고 정도에 도달하는 시간은 A356 Al 합금이 24시간 인데 비하여 복합재료가 12시간으로 가속 시효효과가 나타났다. 그러나 시효에 의한 정도의 최고 증가치는 복합재료에 비하여 비복합화 A356 Al 합금이 크게 나타났다. 이는 복합재료의 Al 금속기지에서 시효 석출물을 생성시키는 Mg이 고갈되어 석출물이 불충분하게 생성되었기 때문으로 판단되었다. 시효거동의 차이는 복합재료의 인장특성에도 영향을 미쳤다. 즉 시효경화가 큰 비복합화 A356 Al 합금의 인장강도는 액상교반 주조한 A356 Al/SiCp 복합재료와 유사하여 SiC 입자강화의 효과가 유효하지 못하였다. 그러나 squeeze casting 한 A356 Al/SiCp 복합재료에서는 강화제인 SiCp를 균일하게 분산시킴으로서 SiCp 강화에 의한 인장강도의 증가효과를 나타내었다.

후 기

본 연구는 1992년도 교육부 신소재분야 연구지원에 의하여 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. Rohatgi : JOM, 43, 1991, p.10.
2. S.G. Fishman : JOM, 40, 1988, p.8.
3. A. Mortensen, V.J. Michaud and M.C. Flemings : JOM, 45, 1993, p.36.
4. D.O. Kennedy : Advanced Materials &

- Processes, 6, 1991, p.42.
5. D.E. Hammond and R. Hoover : in Science and Engineering of Light Materials, K. Hirano and H.Oikawa eds., 1991, p. 447.
 6. 조경목, 박익민 : 제1회 자동차 경량화 심포지움, Pohang, p.239.
 7. J.E. Allison and G.S. Cole : JOM, 45, 1993, p.19.
 8. H. Fugunaga : Proc. of Inter. Symp. on Advanced MMC's, Chicago, 1988, p.101.
 9. J.J. Lewandowski, C. Liu and W.H. Hunt Jr. : Proc.of Symp. on Interfacial Phenomena in Composites, S. Suresh and A. Needleman ed., Newport, RI, 1989, p.241.
 10. R.J. Arsenault, L. Wang and C.R. Feng : Acta Metall., 39, 1991, p.47.
 11. K.C. Russell, J.A. Cornie, and S.Y. Oh : in "Interfaces in Metal Matrix Composites", A. K. Dhingra and S.G. Fishman ed., TMS-AIME, 1986, p.61.
 12. D.U. Kim, I.M. Park and J. Kim : Proc. of ICCM/8, S.W. Tsai and G.S. Springer eds., SAMPE, 1991, p. 17M.
 13. N. Wang, J. Wang and G.C. Weatherly : Proc. of Inter. Symp. on Advanced MMC's, Chicago, 1988, p.145.
 14. T. Christman and S. Suresh : Acta Metall. 36, 1988, p.1691.
 15. R.J. Arsenault and N. Shi : Mat. Sci. Eng., 81, 1986, p.175.
 16. D.L. Lloyd, H. Legacy and P.L. Morris : Mat. Sci. Eng., A107, 1989, p.73.
 17. S.Y. Hong and T. Gray III : Acta Metall., 40, 1992, p.3299.
 18. K. Cho and J. Gurland : Metall. Trans. A, 19A, 1988, p. 2027.
 19. 김영환, 이성학, 김낙준, 이두영 : 대한금속학회지, 29, 1991, p.112.