

용탕단조법에 의한 AC4A/SiCw 복합재료 제조에 관한 연구 (Ⅲ) - 기계적 특성 -

문경철* · 이준희* · 윤의박*

*대한알루미늄공업(주) · *동아대학교 · *한양대학교

Fabrication of AC4A/SiCw composite by squeeze casting (Ⅲ)
 - Mechanical characteristics -

*Moon Kyung-Cheol, *Lee Jun-Hee, *Yoon Eui-Pak

*Aluminium of Korea Ltd. Dong-A University

*Han-Yang University

ABSTRACT

This was studied about mechanical characteristic of AC4A/SiCw 10-30% reinforced composites.

Tensile strength of pressed base metal(base metal) with SiCw preform was higher than without pressed base metal(AC4A)

If SiCw whisker volume fraction was increased, tensile strength at room temperature was increased. And tensile strength of SiCw 30% was about 35kg/mm².

Tensile strength of SiCw 30% 400°C at same time aging was the most excellence, about 40kg/mm²

The fracture energy value of composite material at three point bending test was higher than AC4A.

Dislocation at matrix of composite material was evenly distributed. But dislocation around whisker of composite material was more existed than matrix. The reason was thought of pile-up around whisker.

1. 서 론

기지금속에 비하여 비강도 및 기계적 성질이 우수한 재료에 관한 연구가 알루미늄을 중심으로 활발히 진행되어 왔으며¹⁻⁷⁾ 현재까지 복합재료 기지금속으로 고강도와 고인성을 가지면서 7XXX계 합금과는 달리 전위가 석출물의 핵 생성 장소로 작용하기 때문에 제조과정중 SiC강화제와 기지금

속 사이의 열팽창 계수에 의해 필연적으로 많은 양의 전위가 도입되는 Al/SiCw 복합재료의 기지합금으로 2XXX계 알루미늄 합금이 주로 사용되어 왔다⁸⁾. 그러나 이들 재료는 해외에서 제조된 것이 거의 대부분이며 본고에서는 Al/SiCw 복합재료의 기지금속으로는 전 세계적으로 추진하고 있는 수송기기의 경량화에 발맞추어 현재 자동차용 뿐만 아니라 산업용으로도 사용되고 있는

AC4A 알루미늄 합금을 기지금속으로 하여 용탕 단조 방법으로 복합재료를 제조하였으며 제조 및 시효특성을 조사한 전보에^{9, 10)} 이어 기계적 특성 및 투과 전자현미경 조직에 관하여 고찰하였다.

2. 실험방법

시료는 전보^{9, 10)}에서와 같이 복합재료를 제조하였으며, 기지금속으로 AC4A 알루미늄 합금을 사용하였으며 강화재로는 동해 카-본제의 preform-med SiC 휘스커를 사용하였다.

Table 1은 사용한 AC4A 기지금속의 화학조성을 나타낸다.

Table. 1 Chemical composition of AC4A Al alloy
unit : wt. %

Cu	Si	Mg	Fe	Zn
0.01	10.0	0.30	0.19	0.003
Ti	V	기 타	Al	
0.03	0.01	0.01	Bal.	

휘스커는 직경 0.1 μ m-10 μ m인 분산 강화형으로서 길이 20-100 μ m인 β 형을 사용하였으며 preformed 휘스커의 체적분율은 10%, 20%, 30%였다. 또한 용탕 단조시 가압압력은 전보에서 제조한 결과를 바탕으로 기계적 성질이 가장 우수한 75MPa로 가압하였다. 이때 제조 조건으로는 기지금속의 용탕온도 800 $^{\circ}$ C, 급형에열온도 400 $^{\circ}$ C, preform 높이 30mm로 하였으며 아울러 squeezing시 용탕온도에 대한 영향을 파악하고자 SiCw 10% 강화한 재료에 대하여 용탕온도 850 $^{\circ}$ C에서도 복합재료를 제조하였다.

SiC 휘스커 강화한 복합재료를 제조한 후 전보^{9, 10)}에서와 같이 방사선 투과 시험을 행한 재료와 동시시효 처리한 시험편에 대해 인장시험을 행하였으며, 동시시효는 제조된 복합재료를 염욕로중 각 온도에서 1시간씩 처리하였다. 또한 등온시효는 525 $^{\circ}$ C, 1시간 용체화 처리후 170 $^{\circ}$ C에서 행하였다.

인장시험은 TINIUS OLSEN社의 Super L 60A를 사용하였으며 cross head speed 5mm/min으로 하였다.

Fig. 4는 인장시험편의 규격을 나타낸다.

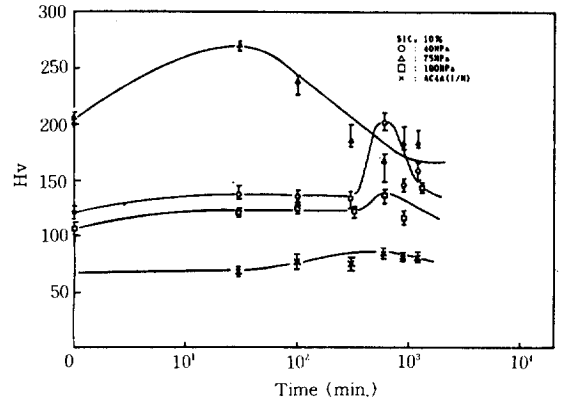


Fig. 1. The results of vickers hardness test according to aging time at 170 $^{\circ}$ C after solution treatment for at hour ar 525 $^{\circ}$ C

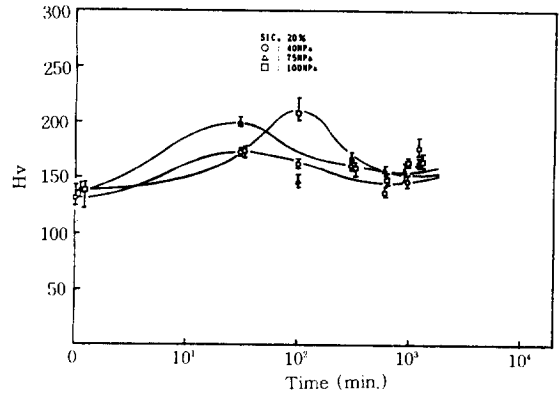


Fig. 2. The variation of vickers hardness value according to aging time at 170 $^{\circ}$ C after solution treatment for an hour at 525 $^{\circ}$ C

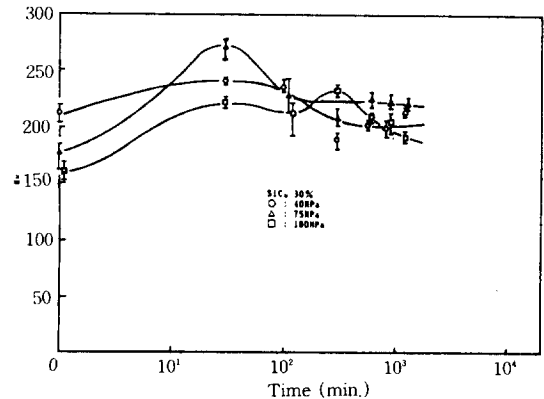


Fig. 3. The variation of vickers hardness value according to aging time at 170 $^{\circ}$ C after solution treatment for an hour at 525 $^{\circ}$ C

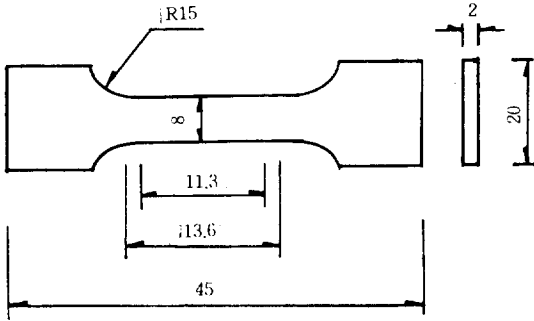


Fig. 4 Schematic of tensile test specimen. (unit : mm)

경도시험은 Matsuzawa seiki社의 DVK-1을 사용하여 하중 1kg, 유지시간 15초로 측정하였다.

3점굽힘 시험(three point bending)은 cross head speed 0.5mm/min, span 13mm, load 200kg으로 하였다.

전자현미경 조직은 복합재료 내부의 전위상태를 파악하기 위하여 투과전자현미경(TEM, 가속전압 200 kV)으로 관찰하였으며 아울러 diffraction pattern 분석도 병행하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 시효처리

Fig. 2-4는 기지금속인 AC4A I/M재와 복합재의 시효거동을 나타낸다. AC4A I/M재의 경도는 시효에 따라 약간 상승하지만 경화능은 크지 않은 반면 복합재는 AC4A I/M재에 비하여 경도가 훨씬 높을 뿐 아니라 초기 경화현상을 나타내고 있다.

SiCw 10%와 30%에서는 시효경화 현상이 현저하지만 20%에서는 그 상승폭이 작다. 이는 SiCw 체적분율 20%일 경우 강화재에 의한 강화효과가 그다지 크지 않지만 30%에서 다시 상승하는 것으로 보아 강화효과가 나타난다는 것을 의미한다.

KOHARA 등이¹¹⁾ SiCw/A1 복합재료 제조시 분말 야금법을 응용한 분체 소결법과 액상압출법, 액상 hot 프레스법에 의해서는 SiCw 체적을 상승이 15%에서 한계에 이르렀으나 용탕 단조법에 의하여 SiCw 휘스커 체적분율이 30%까지 증대시킬 수 있었을 뿐 아니

라 이때의 인장강도 값도 상승하였다고 보고하고 있다. 이는 용탕 단조법에 의하여 복합재료 제조시 휘스커의 체적분율이 30%에서도 강화효과가 나타난다는 것을 의미하며 이 결과는 본 실험과도 잘 일치하고 있다.

액상 hot 프레스법이나 액상 압출법에서는 복합재료 제조시 휘스커와 용융 A1이 모두 함께 유동하며 전자는 휘스커의 편재가 나타나고 후자는 가압시 용융 A1과 휘스커가 함께 유출한다. 반면 용탕 단조법에서는 가압하여도 휘스커는 어느 정도의 길이를 가진 상태에서 어떤 특정한 방향으로 배향되지 않고 무질서한 방향으로 preform을 형성하고 있으며 휘스커 사이사이에 공간을 형성하고 있어서 휘스커의 유동이 없어 용융 A1이 유동하여 preform 내부로 침투하기 때문에 체적분율이 높은 SiCw 30%에서도 강화효과가 나타나는 것으로 사료된다.

가압력 75MPa일 때의 경도값이 최대값을 나타내고 있어 전보와 같이 가압력 75MPa이 최적조건이라는 사실을 입증시켜 주고 있다.

SiCw 체적분율로 볼 때 경화능의 크기는 SiCw 30% > 10% > 20%의 순이며 체적분율이 증가할수록 시효초기에 경화되는 초기 경화현상을 나타내고 있다.

3. 2. 인장시험

인장시험은 JIS 7호 규격에 준해서 시험편을 제작하여 상온에서 복합재의 휘스커 체적분율에 따른 변화를 고찰하였다.

과단은 재료가 거의 연신이 없는 취성파괴를 나타내었는데 이는 강화재인 SiC 휘스커에 의해 인장시 재료 내부에서 발생한 공공이나 전위에 의한 슬립이 계속 진행되지 못하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 5는 복합재료의 인장시험 결과를 나타낸다.

인장강도는 강화재인 SiC 휘스커 체적분율이 증가함에 따라 상승한다는 것을 알 수 있다. 한편, SiCw 10% 강화시킨 복합재의 경우 용탕 단조시 용탕 온도의 영향을 파악하고자 행한 용탕온도 850℃는 800℃에서 용탕 단조했을 때와 큰 차이는 없으나 조금 낮은 것을 알 수 있다. 또한 복합재료 제조시 SiC 휘스커 체적분율별의 preform과 함께 가압된 AC4A 모재(base metal)를 보면 커다란 차이가 없다는 것을 알

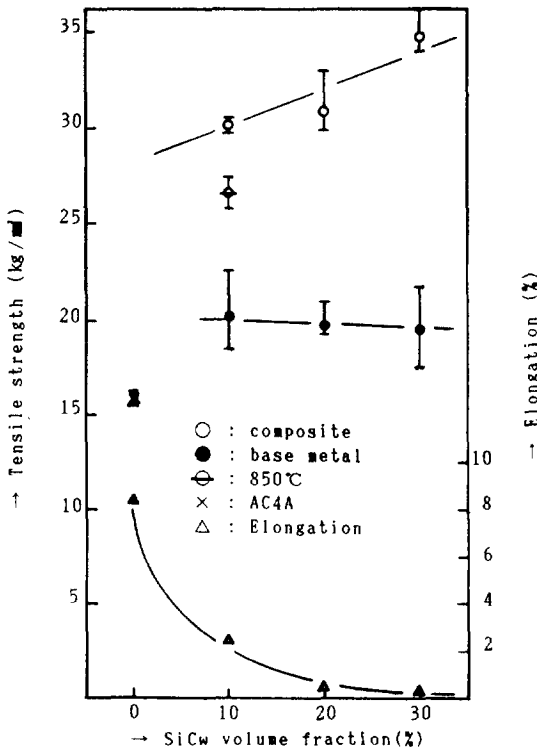


Fig. 5 Tensile test result composite material at room temperature on 75MPa

수 있다. 이는 75MPa의 압력이 강화재의 체적분율에 관계없이 등압으로 작용하였음을 의미한다. 아울러 휘스커 preform과 함께 가압된 base metal은 휘스커의 체적분율에 관계없이 가압되지 않은 AC4A 모재보다도 약 1.2배 높다는 것을 알 수 있다. 이는 용탕을 가압하게 되면 용고 조직이 주조 조직과는 달리 용고되면서 impurity나 공정물들이 grain boundary에 모이기도 전에 용고하게 됨으로써 grain 내부에 고루 분포하게 될 뿐 아니라 조직이 보다 치밀하게 되어 기계적인 성질이 향상되기 때문이며 이러한 성질을 이용하여 고압주조로 제품을 생산한다는 것은 널리 잘 알려진 사실이다.

한편, 연신율은 인장강도 값이 높을수록, 즉 SiC 휘스커 체적분율이 증가할수록 감소한다는 것을 알 수 있다. 특히 SiCw 20%에서는 상온 인장강도 값이 SiCw 10%와 비슷하거나 조금 높은 반면 연신율은 SiCw 10%보다 훨씬 적다는 것을 알 수 있다. 이러한

결과와 앞의 시효처리한 결과를 나타내는 Fig. 2와 Fig. 3에서 Fig. 5의 가압력 75MPa 결과를 비교해 보면 SiCw 20%는 상온 인장강도는 다소 강화효과가 나타나지만 시효에 따른 효과는 SiCw 10%의 최고강도치가 약 1.3배 높다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실들로 보아 SiCw 20%는 SiCw 10%보다 강화효과가 못하다는 것을 알 수 있으며 SiCw 30%에서는 거의 연신이 일어나지 않음을 알 수 있다.

이상으로 보아 SiC 휘스커 강화한 복합재료에 있어서는 강도의 향상효과를 기대할 수는 있으나 연신효과는 기대할 수 없음을 알 수 있으며 특히 SiCw 20% 이상에서는 연신율이 극히 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 6061 알루미늄 합금에 SiC powder 강화한 복합재료의¹²⁾ 경우 인장값은 높은 반면 연신율이 매우 낮다는 결과와도 잘 일치하고 있으며 이러한 성질과 전보에서⁹⁾ 나타난 강화재인 SiC 휘스커에 의한 양호한 내마모성을 이용한다면 피스톤 링 등 내마모용 부품에 적합하다고 판단되며 향후 제3 첨가원소에 의한 인성향상에 대한 연구가 이루어진다면 부품으로의 응용범위는 더욱 확대될 것으로 기대된다.

3. 3. 등시시효

Fig. 6은 각 온도에서 1시간씩 등시시효 처리한 복합재의 경도시험 결과를 나타낸다. 경도값은 모재인 AC4A보다 복합재의 경우가 2배 이상 크며 Fig.5의 인장시험 결과와 마찬가지로 강화재인 SiC 휘스커 체적분율이 증가함에 따라 상승한다는 것을 알 수 있다. 즉, SiCw 체적분율이 높을수록 상온에서의 인장강도 값이 높을 뿐 아니라 경도값도 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 이로써 강화재인 SiCw에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

아울러 AC4A에서는 온도 증가와 함께 경도값은 감소하는 반면 복합재의 경우 SiCw 10% 및 30%에서 300°C까지 상승한 후 온도가 더 이상 올라가면 감소한다는 것을 알 수 있다. 반면 SiCw 20%에 있어서 경도값은 SiCw 10%보다 다소 높지만 온도 증가와 더불어 감소하는 것으로 보아 강화효과는 전보¹⁰⁾에서와 같이 SiCw 10%보다 못하다는 것을 알 수 있다.

한편 SiCw 10% 강화시킨 복합재의 경우 용탕 단조시 용탕온도의 영향을 파악하고자 행한 용탕온도

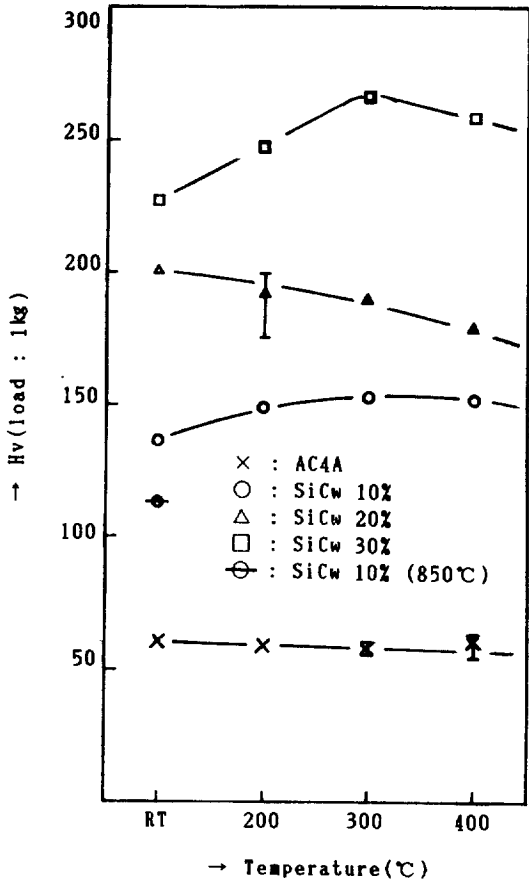


Fig. 6 Vickers hardness test results of an hour aged materials at various temperatures.

850°C는 800°C에서 용탕 단조했을 때에 비하여 경도값이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 전보⁹⁾에서 밝힌 바와 같이 용탕 단조시 용탕온도 800°C가 최적조건이라는 것을 잘 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 7은 여러가지 재료들의 200, 300, 400°C에서 1시간씩 동시시효 처리후 인장시험한 결과를 나타낸다. a)는 인장강도를 나타낸 것으로서 모재인 AC4A와 SiC 휘스커 강화재와 함께 가압된 모재(base metal)인 경우 온도증가에 따라 인장강도는 감소하고 있으나 가압된 base metal의 경우 Fig. 5에 나타낸 상온에서 가압되지 않은 모재(AC4A)보다는 휘스커의 체적분율에 관계없이 높다는 것을 알 수 있다. 이는 같은 재료일지라도 주조된 상태보다는 squeezing 함으로써 기계적 성질을 향상시킬 수 있다는 것을 나타

낸다.

한편 SiC 휘스커 강화한 복합재에 있어서는 SiCw 10% 및 30%인 경우 온도상승과 함께 인장강도값도 상승하고 있으며, 특히 SiCw 30%에서는 온도에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 강화재인 SiC 휘스커가 고온에서도 안정하기 때문인 것으로 판단되며 SiCw 20%에서는 전보⁹⁾에서 나타난 바와 같이 가압력에 의해 영향을 크게 받지 않을 뿐만 아니라 온도에도 그다지 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 小原 등과¹¹⁾ 같이 SiCw 20%에서는 강화재에 의한 효과가 별로 없다는 결과와 일치한다.

한편, 연신율을 나타내는 b)에서 보면 주조상태로 가압되지 않은 모재인 AC4A는 온도 증가와 함께 연신율이 증가하는 반면 복합재에 있어서는 다소 감소하고 있으나 온도에 의하여 크게는 영향받지 않음을 알 수 있다.

즉, 강화재인 SiC 휘스커의 체적분율이 증가할수록 연신율은 감소함과 더불어 온도에 의한 영향도 적으며 SiCw 30%에서는 거의 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는 모재의 경우 온도가 증가할수록 재료 내부에서 슬립이 잘 일어나게 되어 더욱 연성으로 되는 반면 복합재에서는 강화재인 SiC 휘스커 체적분율이 증가할수록 강화재로 인하여 재료 내부의 슬립이 일어나기 어렵게 되기 때문으로 사료된다.

3. 4. 3점굽힘 시험

Fig. 8은 복합재료의 여러 온도에서 1시간 동시시효 처리를 한 다음 3점굽힘 시험한 결과를 나타낸다.

a)는 온도변화에 따른 σ (kg/mm²)값을 나타낸 것으로서 그 값은 모재인 AC4A보다 복합화하였을 경우가 높다는 것을 알 수 있으며 이러한 현상은 강화재인 SiC 휘스커 preform과 함께 squeeze한 base metal에서도 마찬가지로 현상을 나타낼 것이라는 것은 Fig. 5의 인장시험 결과로 미루어 보아 추측할 수 있다. 한편 상온에서 보면 SiC 휘스커의 체적분율이 증가할수록 σ 값은 인장시의 같이 높게 나타나며 체적분율 10%에서 squeezing시 용탕온도의 영향을 알아보기 위해서 행한 squeezing시 용탕온도 800°C와 850°C를 비교해 보면 별로 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 또한 200°C에서 동시시효했을 경우 인장시험시 인장값은 상온

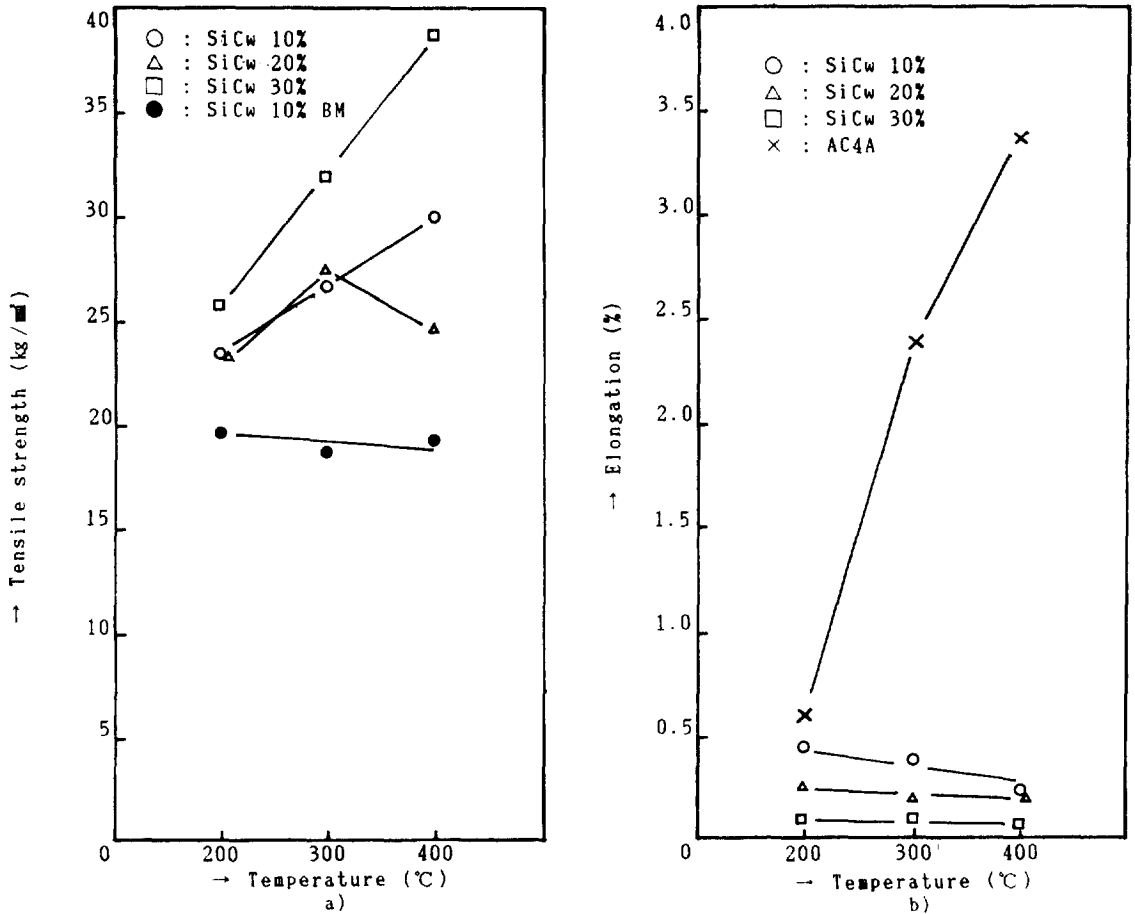


Fig. 7. The tensile test results of an hour aged materials at various temperatures
 a) Tensile strength
 b) Elongation

에서보다 낮았던 반면 3점굽힘 시험값은 더 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 400°C까지의 시효에 있어서도 그 값은 상온에서보다 높거나 비슷하게 유지됨을 알 수 있으며 이는 전보¹⁰⁾에서의 결과와도 잘 일치하고 있다. 아울러 3점굽힘 시험에 있어서는 SiC 휘스커의 체적분율이 30%일 때 동시시효 효과가 가장 크다는 것을 알 수 있다. b)는 시효온도에 따른 deflection값을 나타낸 것으로서 복합재는 SiC 휘스커 체적분율에 크게 영향받지 않으며 모재인 AC4A보다 훨씬 작게 나타날 뿐 아니라 시효온도가 200°C 이상이 되면 AC4A와는 달리 온도에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 고온이 되

어도 복합재는 파단시 높은 에너지를 필요로 함과 더불어 거의 연신됨이 없이 파단될 것임을 추측할 수 있다. 반면 모재인 AC4A를 200°C에서 시효한 경우에는 복합재가 파단시 높은 에너지와 함께 deflection도 감소하는 것과 달리 a)에서의 σ 값 증가와 함께 deflection도 증가하고 있다. 이는 200°C에서는 시효에 의해 a)에서의 같이 3점굽힘 시험값이 증가함과 더불어 200°C로 온도가 상승함에 따라 재료는 연성을 띠는 일반적인 현상을 나타내고 있다. 반면 그 이상의 온도로 더욱 상승하게 되면 3점굽힘 시험시 낮은 에너지로 파단됨과 동시에 deflection이 감소하고 있음을 알 수 있다.

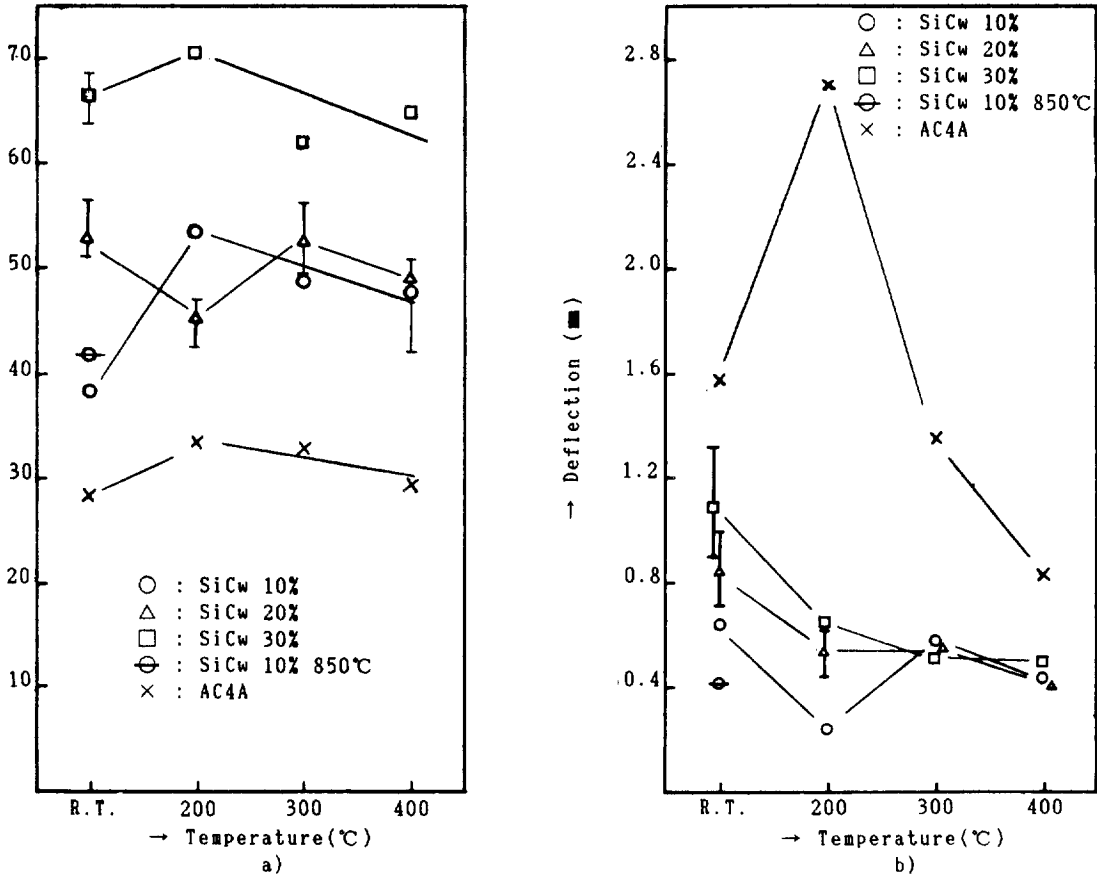


Fig. 8 Three point bending test results of an hour aged materials at various temperatures.
 a) σ -temperature curve b) Deflection-temperature curve

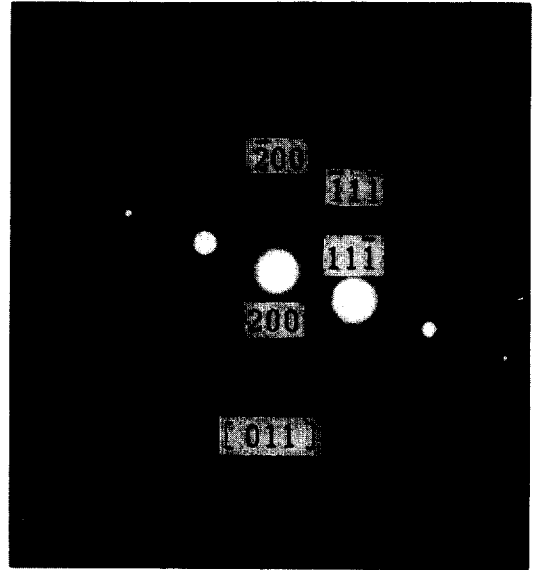
3. 5. 전자현미경 조직

Fig. 9는 SiCw 30% 강화한 복합재료의 투과전자현미경(TEM) 사진을 나타낸다. a)는 bright film image로서 matrix의 전위조직을 나타내며 전위는 matrix에 고르게 분포되어 존재함을 알 수 있다. b)는 a)에 대한 diffraction pattern으로서 [011] 방향이다. c)는 휘스커 주변의 전위조직을 나타낸 것으로서 전위는 matrix에서보다 휘스커 주변에 많이 존재함을 알 수 있다. 이것으로 보아 휘스커 강화한 복합재료 제조시 전위는 입자분산 강화시 전위가 입자 주변을 통과해 갈 때 내부응력이 높은 강화입자를 피해서 그 주변에 전위 loop를 남기고 통과해 나가는 것과는

달리 matrix 내부에서 이동을 진행하다가 비교적 큰 휘스커의 장벽에 부딪혀 전위 loop를 형성하지 못한 채 더 이상 앞으로 나아가지 못하고 휘스커 주변에서 pile-up되기 때문으로 사료되며, 이로 인하여 인장시 재료는 네킹현상을 거의 일으키지 않고 파단되었음을 잘 입증해 주고 있다. 뿐만 아니라 Fig. 5의 인장시험과 Fig. 8의 3점굽힘 시험에서와 같이 SiC 휘스커 강화한 복합재는 파단에 요하는 에너지 값이 큰 반면 파단시의 연신율과 deflection이 작다는 것을 명확히 해 주고 있음을 알 수 있다. d)는 diffraction pattern을 나타내며 전위의 방향은 matrix와 같이 [011] 방향이다.



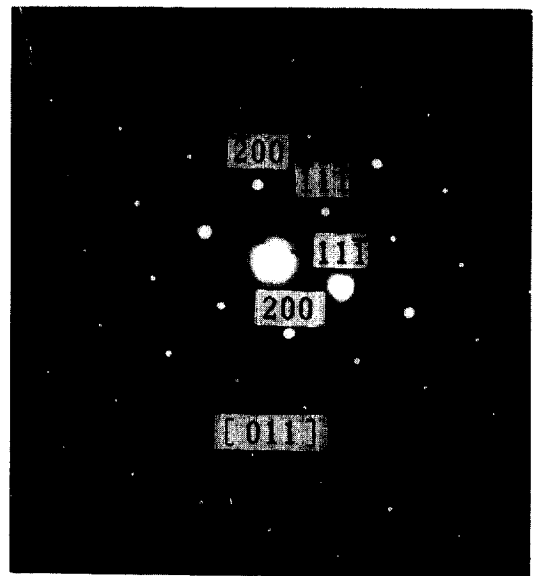
a)



b)



c)



d)

Fig. 9. TEM images of AC4A/SiCw 30%, 100MPa composite and selected area diffraction pattern

- a) Matrix
- b) Diffraction pattern of matrix
- c) Whisker
- d) Diffraction pattern of around whisker

4. 결 론

참 고 문 헌

SiC 휘스커 강화한 AC4A 알루미늄 합금기 복합재를 제조한 후 동시시효, 인장시험, 경도시험, 3점굽힘 시험 및 전자현미경 조직관찰 등을 통하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SiCw preform과 함께 가압된 모재의 인장강도가 가압되지 않은 모재보다 약 1.2배 높았다.

2) SiC 휘스커 체적분율이 높을수록 상온에서의 인장강도는 증가하였으며, 30%인 경우 약 35kg/mm^2 를 나타내었다. 동시시효에서는 체적분율 30%의 400°C 동시시효일 때 인장강도가 가장 우수하였으며 약 40kg/mm^2 였다.

3) 3점굽힘 시험시 복합재가 모재보다 파단에 요하는 에너지 값이 더 높았으며 동시시효 효과는 SiCw 30%일 때가 가장 우수하였다.

4) 3점굽힘 시험시 파괴양상은 AC4A 경우 소성변형을 수반하였던 반면 복합재의 경우 거의 탄성적 파괴양상을 나타내었다.

5) 복합재에 있어서 전위가 matrix에서는 골고루 분포하였으나 휘스커 주변에서 더 많이 존재하였다.

1. 日野 光雄:アルトピア, 12(1989) 9
2. 坂本 昭:アルトピア, 8(1989) 21
3. 近田 敏弘: A1-ある, 5.6(1991) 17
4. 崔龍圭, 金英煥, 權東 -, 李聖鶴: 대한금속학회지, Vol. 31, No. 3(1993) 373
5. 崔龍圭, 金英煥, 權東 -, 李聖鶴: 대한금속학회지, Vol. 31, No. 3(1993) 381
6. 金英煥, 李聖鶴, 權東 -, 崔原鳳: 대한금속학회지, Vol. 30, No. 5(1992) 516
7. 李聖鶴 외 4: 대한금속학회지. Vol. 30, No. 5 (1992) 524
8. 李聖鶴 외 4: 대한금속학회지. Vol. 30, No. 11 (1992) 1375
9. 文慶鐵, 李俊熹: 한국재료학회지. Vol. 2, No. 6 (1992) 461
10. 文慶鐵, 李俊熹: 한국재료학회지. Vol. 3, No. 6 (1993) 606
11. KOHARA · ASADA: 輕金屬. Vol. 37, No. 7 (1987) 483
12. 金憲珠, 尹義博: 대한금속학회지. Vol. 29, No. 10(1991) 1055