

논문

용탕단조법으로 제조된 AC4C 합금기 세라믹강화 복합재료의 특성연구

김역수†

울산대학교 첨단소재공학부

Characterization of the Ceramic Reinforced AC4C Matrix Composites Processed by Squeeze Casting

Eok-Soo Kim†

The school of Materials Science and Engineering, University of Ulsan

Abstract

The microstructure and mechanical property of the ceramic reinforced AC4C matrix composites processed by squeeze casting were investigated. In this study Kaowool and Saffil fiber which are ceramic reinforcements are used as preform materials. As a matrix material, Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg(AC4C) has been used. In case of Kaowool and Saffil/AC4C composites, 7.5 MPa squeezing pressure and minimum 7.0% binder amount are needed to produce sound composite materials. The tensile strength of Kaowool/AC4C composite is lower than the matrix metal and this can be explained by the melt unfilling due to formed cluster of Kaowool reinforcements. But the mechanical properties of hardness, wear resistance and thermal expansion are better than the matrix materials due to the strengthening effect of ceramic reinforcements.

Key words : Squeeze casting, Al matrix Composite, thermal expansion.

(Received March 4, 2005; Accepted April 18, 2005)

1. 서론

최근 자동차 배기가스에 의한 환경오염 개선대책의 일환으로 차체의 경량화와 동시에 엔진의 성능을 향상시켜 차량의 연비를 개선하는 노력이 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 AI합금기 세라믹을 강화한 복합재료의 실용화가 적극적으로 연구되고 있다. AI합금기 복합재료는 고 비강도, 고 비탄성률, 고 내마모성 및 열팽창계수가 작아 고온에서 안정하여 고 성능의 경량 자동차의 엔진부품에의 적용이 크게 기대되고 있다.

그러나 AI합금기 복합재료가 이러한 우수한 특성을 지니고 있음에도 불구하고 실용화가 늦어지는 장애요인으로는 기존 재료에 비하여 고가이며, 각종 제조법에 따른 복합재료의 기계적 특성치에 대한 신뢰성이 낮다는 점을 들 수 있다. 이들 복합재료의 주요 제조방법으로는 크게 주조법, 분말 야금법, Spray 법, In-situ 반응법 등[1-3]이 개발되어 있으나 제조원가, 부분 복합화, 2차 가공성, 품질 및 생산성 등을 고려하면 주조법이 가장 유리하다고 볼 수 있다. 주조법에는 크게 용탕가압 침투법과 용탕교반법이 있으나 용탕가압 침투법의 하나로 액상의 기지금속 용탕을 세라믹 강화제로 만든 프리폼(preform)속으로 고압력을 이용하여 순간적으로 침투시켜 응고하는 용탕단조법이 품질과 경제적인 측면에서 가장 실용화에 가까운 공법으로 대

두되고 있다.

또한 AI합금기 세라믹강화 복합재의 복합화 설계방법으로는 부품의 전면 복합화설계와 실제 복합재의 기능을 요구하는 특정부위만 부분복합화 하는 부분 복합화설계의 부품으로 나눌 수 있다. 실제 자동차부품의 적용의 예를 보면 콘로드 등 고하중을 받는 부품은 전체 복합화가 필요하고 실린더라이너, 브레이크 디스크, 피스톤의 선단 링부 등 내마모성 및 내열성이 요구되는 부품은 표면부위 또는 특정부위만 복합화하는 것이 전체 복합화에 따른 재료의 인성저하를 막고, 기지금속에 비하여 고가인 강화재 사용을 절약할 수 있어서 제조원가 절감이 가능하며, 기계가공 문제를 해소할 수 있다. 국내에서는 그동안 피스톤의 복합화 개발에 이어 SiC 입자강화 알루미늄 복합재인 Dulcan ingot를 사용한 브레이크 디스크 개발이 완성차 업체를 중심으로 일부 진행 중에 있지만 너무 경한 SiC입자에 의한 패드재 손상과 SiC입자의 분리, 디스크 전체를 강화시키는데 따른 인성부족 등이 실용화를 어렵게 하고 있다[4-8].

따라서, 본 연구에서는 용탕단조법을 이용하여 SiC 입자강화 알루미늄 복합재 사용시 문제가 되고 있는 브레이크 디스크를 대상으로 Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg(AC4C) 합금기 혼합 단섬유 세라믹을 강화제로 마모부인 디스크 휠 부위만 세라믹 예비성형체로 복합화하는 연구로 기존의 입자강화 전체 부위의 복합화 소재 대비 인성저하, 가공성 문제 및 제조원가 절감 문제

†E-mail : esgim@mail.ulsan.ac.kr, osgim@korea.com

를 동시에 해결하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 기지금속은 주조용 합금으로 널리 이용되고 있는 Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg(AC4C) 알루미늄 합금이며 그 화학적 조성은 표 1과 같다. 강화소재는 SiO₂와 Al₂O₃를 주성분으로 하는 Kaowool 단섬유를 사용하였다. 표 2에는 Kaowool 단섬유 및 비교재료로 이용된 δ-Al₂O₃가 주성분인 Saffil R.F grade의 Al₂O₃ 단섬유의 화학적 조성 및 물리적 특성을 나타내었다.

2.1 예비성형체 제조 및 섬유분포 관찰

예비성형체는 규산소다 점결체를 각각 3, 5, 7, 9, 12, 15 및 20%로 변화시킨 수용액 용기에 Kaowool 단섬유를 넣고 stirrer로 90분간 고르게 분산시킨 후 성형금형에 강화섬유의 슬러리를 주입하고 일축 가압하여 제조하였다. 이 때 예비성형체의 체적율은 15 Vf가 되도록 성형압력을 조절하였으며, 예비성형체의 최종 치수는 직경 Ø86, 두께 20 mm로 하였다. 제조된 예비성형체는 48시간동안 자연상태에서 건조시킨 후, 200°C에서 24시간 이상 강제 건조시켰다. 비교재료로 사용된 Al₂O₃ 예비성형체 역시 동일한 조건으로 제조하였다. 또한, 예비성형체 내부의 섬유분포, 방향성 및 점결체의 상태 등을 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

2.2 주조시험

예비성형체 내로 용탕의 균일한 침투, 예비성형체의 변형 및 손상 등을 고려한 최적의 주조조건을 확립코자 하였으며, 주조시험은 전기로에서 예비성형체를 750°C로 예열한 후 350°C로 예열된 용탕단조 금형에 삽입하고 용탕을 주입한 즉시 편치로 용탕을 가압하여 예비성형체 내로 용탕을 충전시켜 복합재를 얻었다. 이 때 가압력은 7.5, 10, 15, 25 및 50 MPa로 변화시켰으며 가압유지 시간은 응고시간을 고려하여 90초로 하였다.

Table 2. Mechanical properties and characteristics of short fibers.

Reinforcement	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ fiber (Kaowool)	Al ₂ O ₃ milled fiber (Saffil R.F)
Composition	Al ₂ O ₃ : 47% SiO ₂ : 53%	Al ₂ O ₃ : 96% SiO ₂ : 4%
Density(g/cm ³)	2.6	3.3
Avg. diameter(μm)	2.8	3.0
Avg. length(μm)	200	100
Tensile strength(MPa)	1,400	2,000
Elastic modulus(GPa)	120	300
Max. use temp.	1,400	1,600

Table 1. Chemical composition of AC4C alloy

Material	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Ti	Al
AC4C	7.2	0.3	<0.001	0.016	0.32	<0.001	0.15	Bal.

2.3 복합재 시편의 미세조직 및 결합조사

각각의 주조조건으로 제조된 복합재 시편은 가압방향에 평행하게 절단하여 예비성형체의 변형상태, 용탕침투상태, 균열발생 및 결합의 유무 등을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 또한 가압방향의 수직 및 수평방향으로 섬유 배열상태, 분포 및 손상정도를 관찰하였다.

2.4 인장, 내마모 및 열팽창시험

인장시험은 그림 1(a,b)와 같이 ASTM B 557-84M 규격을 따라 가공하였으며 제조상태 및 열처리 상태에 따라서 Instron 8501을 이용해 cross head speed 1 mm/min의 속도로 인장시험을 행하였다. 시험편의 파단면은 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였으며, 균열생성원인을 조사하기 위해 파단면을 절단한 후 폴리싱하여 광학현미경으로 관찰하였다.

열팽창시험은 Shimadzu thermal analysis TA-501을 이용하여 행하였으며 시험치수는 그림 1(c)와 같이 직경 Ø5, 길이 20 mm로 가공하여 주조상태와 열처리한 시편에 대해 각각 측정 비교하였다.

그리고 내마모시험은 pin type의 내마모시험기를 이용하였으며 시험편은 그림 1(d)와 같이 Ø10×70 mm로 가공하였으며, 상대재료는 #600 mesh의 사포를 사용하였다. 내마모시험은 1.3 및 2.3 m/sec의 활주속도에서 행하였으며 시험편은 시험전에 알코올에 깨끗이 건조하여 0.0001 g까지 무게를 측정하고, 시험 후에도 세척한 후 건조하여 무게를 측정하여 시험편의 내마모량을 구하였다.

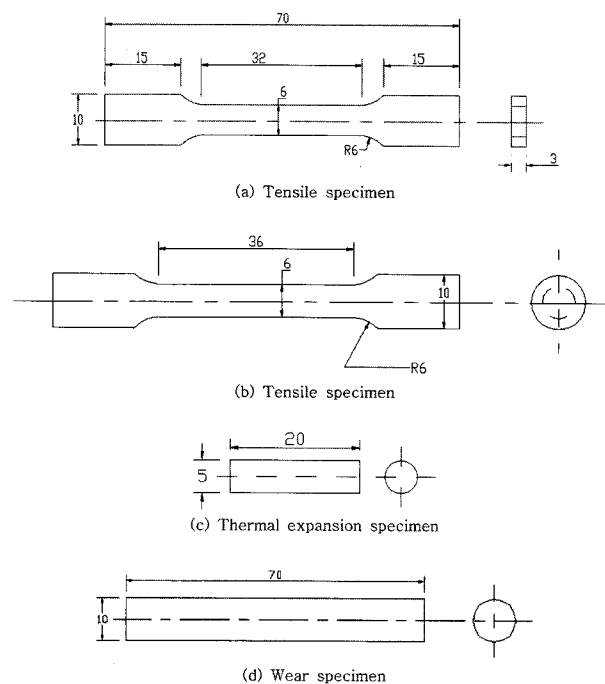


Fig. 1. Shape and dimension of various specimens.

3 실험결과 및 고찰

3.1 강화소재 예비성형체 제조 및 관찰

본 연구에 사용된 강화소재 Kaowool단섬유는 SiO₂가 주성분이고 섬유와 aspect ratio는 약 77이었다. 점결제로 사용된 규산소다는 무기계로 충분히 건조시키면 주조시 가스발생 등 문제를 유발하지 않으나 복합재의 기계적 성질을 떨어뜨리는 원인이 되기도 하므로 가능한 한 그 양을 적게 사용하면 좋다. 예비성형체의 제조는 점결제의 양을 3~20%까지 변화시킨 수용액에 강화재 섬유를 고르게 분산시킨 후 일축 가압하여 제조하였다. 그림 2(a), (b) 및 (c)는 각각 점결제의 양이 3, 7, 12% 첨가된 예비성형체의 내부를 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 그림 2(a)의 점결제가 3%첨가된 경우 점결제는 거의 보이지 않았으며 섬유가 교차하는 부분에도 점결제가 없는 부분들이 관찰되었다. 이 때문에 예비성형체의 강도가 저하되고 주조시 예비성형체의 변형이 발생된 것으로 생각된다. 그림 2(b)는 점결제량이 7%인 경우로 섬유들이 교체하는 부분에 점결제들이 모여있는 것을 관찰할 수 있었고 섬유의 선단부분에

도 점결제가 존재하고 있음을 알 수 있다. 점결제량이 12%로 증가하게 되면 그림 2(c)에서와 같이 섬유와 섬유사이의 공간이 점결제로 충전되어 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 과잉의 점결제가 존재하게 되면 용탕 침투공간을 막아 주조시 충분한 용탕침투가 어렵고 또한 잔류점결제의 일부는 기지금속 성분이나 강화섬유와 반응하여 유해한 반응 생성물을 형성시킬 수 있으며 기지금속과 강화섬유사이에 그대로 존재하여 복합재료의 기계적 성질을 저하시키는 원인이 되기도 한다. 예비성형체 내부의 강화섬유들의 분포와 방향성은 2차원의 성형체 축방향에 약간 수직한 배열을 가지고 있으며, 비교적 균일한 분포를 가지고 있었다. 또한 강화섬유의 직경이 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다.

3.2 Kaowool/AC4C 복합재의 주조성 및 조직특성

그림 3은 7.5 MPa의 가압력 하에서 점결제 양을 변화시켜 주조 시험한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 점결제가 5%인 경우로 가압주조에 의해 예비성형체의 중심부가 심하게 변형되었음을 알 수 있고, 점결제의 양이 7% 이상 증가하면 그

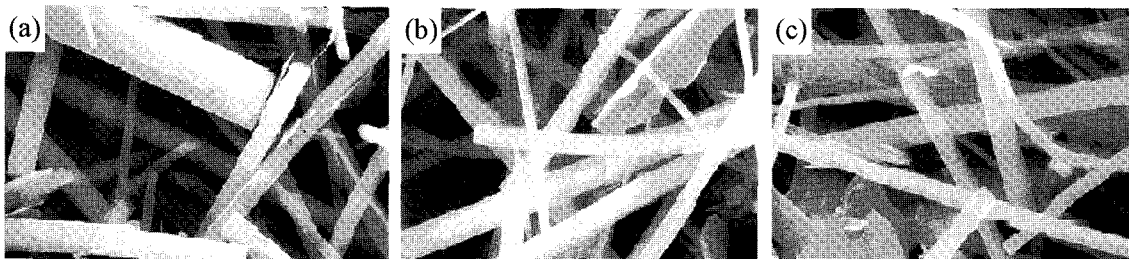


Fig. 2. SEM view of ceramic preform by amount of binder. (a) 3% (b) 7% (c) 12%

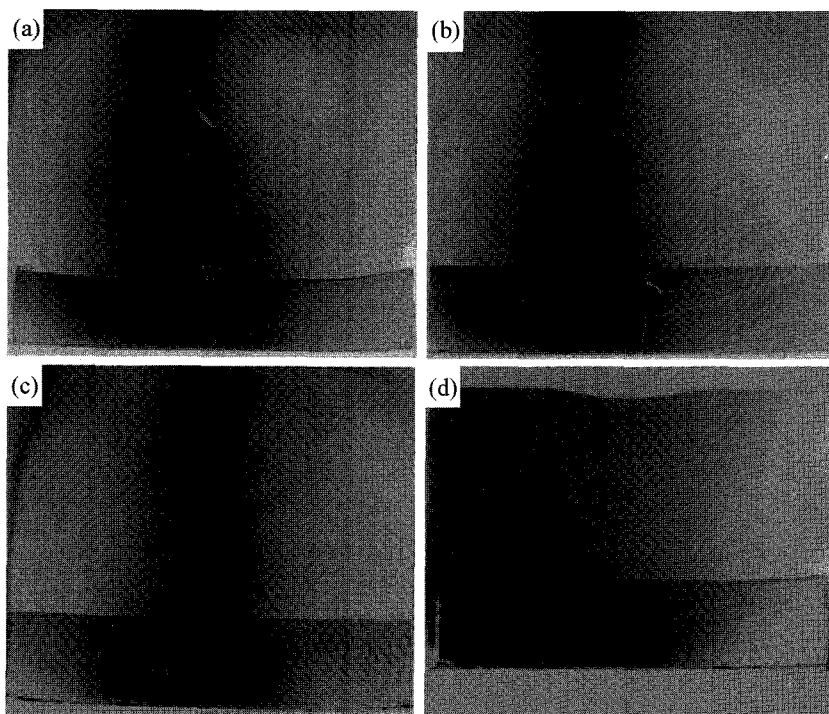


Fig. 3. Cross sectional view of Kaowool/AC4C composites by amount of binder. (a) 5% (b) 7% (c) 9% (d) 12%

림 3(b),(c),(d)에서와 같이 모든 조건에서 예비성형체의 변형이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었으나 점결제량이 9%인 경우에는 예비성형체의 변형은 없었지만 그림 3(c)의 좌측 및 우측면에 검게 나타난 기지금속과 예비성형체의 경계면에 용탕침투가 완전하게 이루어지지 않아 박리된 층이 생겨났으며 그림 3(d)의 12% 조건에서는 그 현상이 더욱 심해져 측면에 용탕이 침투하지 못하고 예비성형체가 그대로 남아 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 예비성형체 제조시 일축가압공정에서 유동성이 조은 대부분의 점결체가 예비성형체의 표면으로 밀려 나오게 되고 일부의 점결체는 예비성형체 내부에 잔류하게 됨으로써 표면으로 밀려나온 점결체는 자연 건조 후 200°C에서 강제 건조하는 과정에서 수분이 증발하고 점결체만 그대로 표면에서 경화되어 용탕침투를 방해하기 때문에 점결체의 양이 증가하게 되면 예비성형체 내부로의 완전한 용탕침투를 시키는 데는 더 큰 가압력이 필요하게 될 것으로 생각된다.

한편, 그림 4는 7%의 점결체가 첨가된 Kaowool 단섬유 예비성형체를 사용해 가압력을 변화시켜 주조시험 한 결과를 나타낸 것이다. 주조 가압력은 각각 7.5, 10, 15, 25 MPa로 변화시켰으며 그림 4(a)의 7.5 MPa의 가압력에서는 예비성형체의 변형이 없고 용탕이 완전히 침투되어 있음을 볼 수 있지만, 가압력이 10 MPa로 증가하면서 예비성형체 중심부가 아래쪽으로 조금 변형되었고 그 이상의 가압력에서는 그림 4(c),(d)와 같이 중심부의 변형이 매우 심해졌으며 예비성형체의 측면이 심하게 파손된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 앞의 표 2에서 알 수 있듯이 섬유의 탄성율, 강도 등의 물리적 특성이 Al₂O₃ 섬유보다 떨어지고, 섬유의 aspect ratio가

77로 크고, 직경이 작아서 예비성형체 내부에서 섬유들이 더욱 조밀하게 배열되어 있기 때문에 주조시 용탕침투 저항이 증가되어 예비성형체의 변형이 주조압력에 민감하게 의존한 것으로 생각된다. 또한 가압주조시 섬유의 파손이 많아지고 파손된 섬유들은 가압 방향으로 방향성을 갖기 쉬울 것으로 생각된다.

그림 5는 Kaowool 단섬유 및 비교재료로 이용된 Al₂O₃ 강화 AC4C 복합재료의 주조 후 미세조직을 보여주고 있다. Kaowool 및 Al₂O₃ 단섬유의 aspect ratio는 각각 77과 33이 었지만 그림과 같이 주조 후에는 Kaowool 단섬유의 경우가 더 짧아졌음을 알 수 있다. 이것은 예비성형체 성형시는 주조시 Kaowool 섬유가 손상되었기 때문에 것으로 생각된다. 또한 두 복합재료 모두 전반적으로 가압방향에 수직인 2차원적인 섬유배열을 보여주고 있다 이는 예비성형체 제조시 일축가압할 때 섬유가 가압 방향으로 회전하게 되고 인접한 섬유와 3차원적으로 엉켜있기 때문에 서로 방해를 받아 가압방향으로 완전히 회전하지 못한 결과라고 생각된다.

3.3 세라믹 강화한 복합재료의 기계적 특성

3.3.1 인장시험 및 파단면 관찰

그림 6은 기지금속 및 세라믹강화 복합재료의 인장강도를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 복합재료의 인장강도는 Al₂O₃ 단섬유 강화 복합재료의 경우 기지금속보다 증가 하였으나 Kaowool 단섬유를 강화한 복합재료의 경우 기지금속 보다 낮은 인장강도 값을 나타내었다. T6열처리에 의해서는 기지금속의 인장강도 값은 약 45% 정도 증가하였으며 복합재료의 경우는 그 증가폭이 감소하였다. 또한, 그림 7은 기지금속 및 각각의

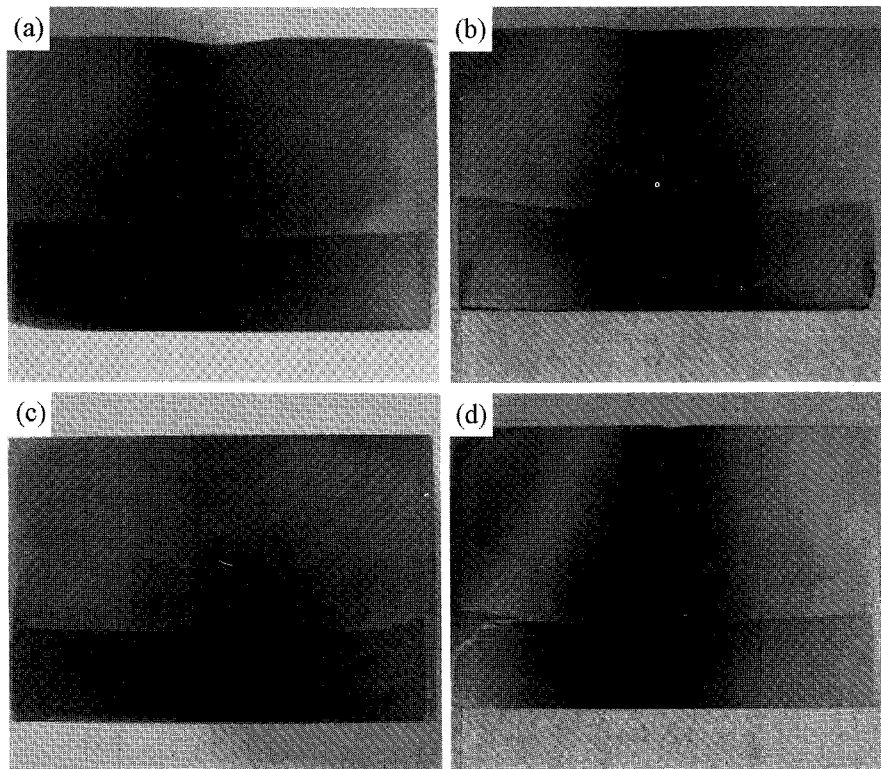


Fig. 4. Cross sectional view of Kaowool/AC4C composites by changing pressure. (a) 7.5 MPa (b) 10 MPa (c) 15 MPa (d) 25 MPa

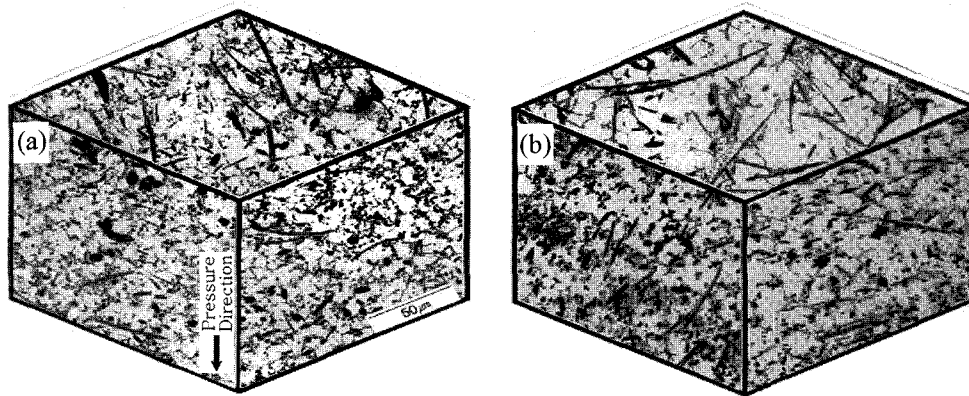


Fig. 5. Microstructure of Al₂O₃ Kaowool-short fiber reinforced AC4C composite. (a) Kaowool/AC4C (b) Al₂O₃/AC4C

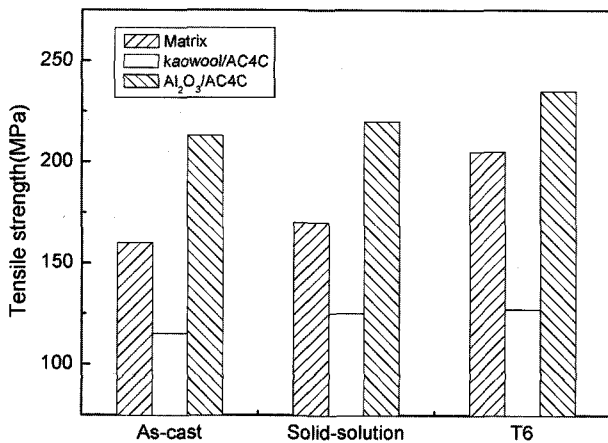


Fig. 6. Tensile strength of matrix(AC4C alloy) and composite.



Fig. 8. SEM fractography of Kaowool reinforced composite.

복합재료의 파단면을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 기지금속에 비하여 세라믹 강화 복합재료의 경우 모두 취성적 파괴가 이루어 졌음을 볼 수 있다.

특히, Kaowool 단섬유 강화 복합재료의 경우 인장강도가 기지금속보다도 작은 값을 나타내었는데 그 원인으로는 Kaowool 단섬유가 Al₂O₃에 비해 미세하기 때문에 강화 섬유의 완전한 분산이 이루어지지 않아 복합재료 내부에 강화 섬유의 응집부가 형성되어 균열 생성원으로 작용하여 조기파단을 야기시키며, 또한 주조시 섬유의 손상이 심하여 강화에 기여할 수 있는 섬유분율이 작아졌기 때문인 것으로 생각된다. 한편,

그림 8은 Kaowool 섬유 강화 복합재료의 인장 파단면을 확대한 것으로 섬유들의 cluster를 확인할 수 있었으며, 이 부위에는 용탕침투 흔적이 없었으므로 복합재료의 균열 생성원으로 작용하여 복합재료의 조기파단을 야기시키고 이로 인하여 인장강도가 저하한 것으로 생각된다.

3.3.2 경도 및 내마모시험

그림 9는 브리넬 경도기로 측정한 기지금속 및 세라믹강화 복합재료의 경도 값을 나타낸 것이다. 경도 측정은 각 시험편에 대하여 5회씩 측정하여 평균값을 취하였다. 그림에서 보듯이 세라믹강화 복합재의 경우가 기지금속에 비해 월등히 높은

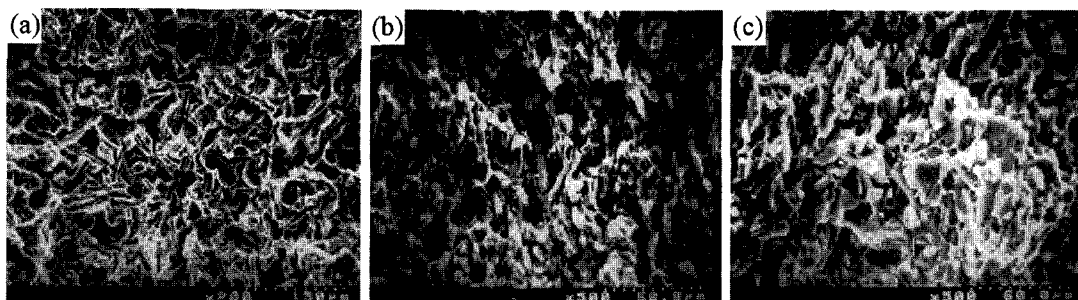


Fig. 7. SEM fractographies of matrix and composite. (a) Matrix (b) Kaowool/AC4C (c) Al₂O₃/AC4C

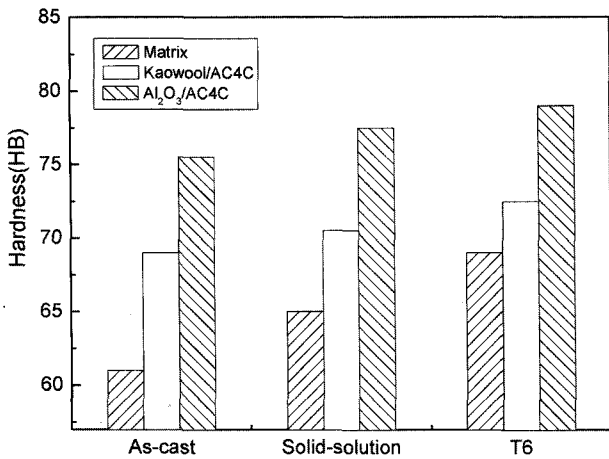


Fig. 9. Hardness of matrix(AC4C alloy) and composites by condition of heat treatment.

경도 값을 얻을 수 있었으며 특히 Al₂O₃ 강화 복합재료의 경우가 가장 높은 경도 값을 나타냈었다. 이는 강화상 고유의 경도특성 때문이라 생각된다. 또한 열처리의 영향으로도 경도 값이 다소 증가하였다.

그림 10은 1.3 m/sec의 활주 구간에서 마모시험을 행한 결과를 나타낸 것이다. 기지금속의 경우 시효처리에 의해 마모 특성이 향상되었으며, 복합재료의 마모특성은 기지금속에 첨가된 강화재 때문에 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한 Al₂O₃ 강화 복합재료의 경우가 가장 우수한 특성을 나타내었는데 이것은 강화상 자체의 특성 때문으로 생각된다. 이는 경도시험의 결과와도 일치 하였다. 또한 그림 11은 2.3 m/sec의 활주구간에서 마모시험을 행한 결과이다. 전반적인 경향은 앞의 실험에서와 유사 하였다.

3.3.3 열팽창시험

열팽창시험은 Shimadzu thermal analysis(TA-501)을 이용하여 상온에서 400°C에서 50°C까지 동일 냉각속도로 냉각하며 실험을 행하였다. 그림 12는 기지금속 및 각 복합재료에 대한 열팽창량을 나타낸 것이다. 그래프에서 보듯이 기지금속에 비하여 복합재료가 열팽창량이 적었으며 이는 강화재로 들어간 재

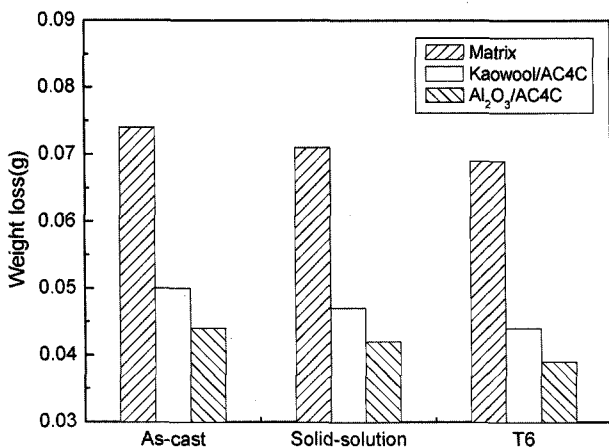


Fig. 10. The characteristics of wear of matrix(AC4C alloy) and composites at 1.3 m/sec sliding velocity.

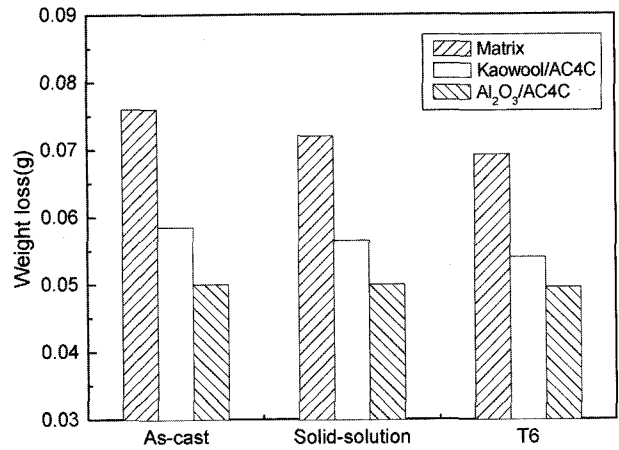


Fig. 11. The characteristics of wear of matrix(AC4C alloy) and composites at 2.3 m/sec sliding velocity.

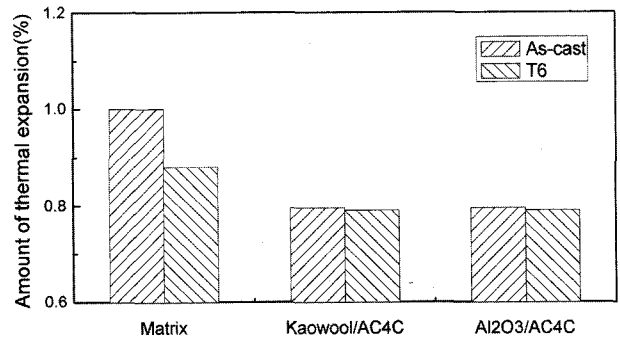


Fig. 12. Amount of thermal expansion of matrix(AC4C alloy) and composites.

료가 상대적으로 기지금속에 비해 고온에서 열적으로 안정하기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

용탕단조법에 의한 Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg 합금기지에 세라믹을 강화한 복합재료의 시험편을 제조 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Kaowool/AC4C 복합재료의 주조시험 결과 예비성형체의 점결제 양은 7% 이상의 조건에서 변형의 발생이 없었으며, 가압력은 7.5 MPa에서 예비성형체의 변형이 없이 용탕이 완전히 침투가 일어남을 볼 수 있었다.

2) Kaowool을 강화한 복합재료의 기계적 특성을 고찰한 결과 인장강도는 Kaowool 단섬유가 Al₂O₃에 비해 미세하기 때문에 강화섬유의 완전한 분산이 이루어지지 않아 복합재료 내부에 강화 섬유용 응집부가 형성, 균열의 생성원으로 작용하여 조기파단을 야기시켜 기지금속보다 낮은 인장강도 값을 얻었지만 경도, 내마모, 열팽창 시험결과에서는 고가의 Al₂O₃를 강화한 복합재에 필적하는 기지금속보다는 매우 우수한 Kaowool/AC4C 복합재의 특성을 얻을 수 있었다.

이상의 연구 결과로 볼 때, Kaowool 복합 세라믹 섬유는

예비성형체의 성형성이 Al₂O₃ 섬유에 비하여 떨어지고 주조조건이 까다로우나 경제적 측면에서는 유리한 강화재료로 판단되었다.

참 고 문 헌

[1] I. M. Park, K. S. Shin and E. P. Yoon : J. of KFS, "Casting Technology in Metal-base Composite", 8 (1988) 412-417.

[2] H. J. Lee and C. P. Hong : J. of KFS, "Microstructure and Characteristics of SiCp/Al-4.5wt%Cu-1wt%Mg Composites by Pressurized Continuous Compo-Casting", 11 (1991) 71-78.

[3] H. J. Lee, H. M. Kwak and C. P. Hong : J. of KFS, "Fabrication and Wear Characteristics of SiCp / Al Alloy Matrix Composite Materials by Rheo-compocasting Process", 11 (1991) 126-134.

[4] S. W. Kim, J. S. Park and K. Ogi : J. of KFS, "Wear Characteristics of Al / SiCp Composites", 22 (2002) 176-184.

[5] S. W. Kim, W. K. Kim, K. D. Woo and H. K. Ahn : J.of KFS, "Heat and Wear Resistance Characterization of SiCp Reinforced Al Matrix Composites", 20 (2000) 377-385.

[6] H. K. Kang, J. H. Lee and S. K. Kim : J. of KFS, "Wear Characteristics of AC4C/Kaowool Composites Fabricated by Squeeze Casting", 18 (1998) 69-76.

[7] I. M. Park, K. S. Shin and M. H. Rhee : J. of KFS, "Development of Metal Matrix Composites by Squeeze Casting Technique", 17 (1997) 426-437.

[8] I. D. Yeo and C. H. Lee : J. of KFS, "Influence of Binder and Applied Pressure on Tensile Strength of AC4C / Al₂O₃ Composites Made by Squeeze Casting Process", 15 (1995) 138-145.