

혼합강화 복합재료의 인장 및 내마모특성

김 용 현 · 이 광 학*

영동전문대학 금속과

*울산대학교 재료공학·금속공학부

The Tensile Properties and Wear Behaviour of Mixing-reinforced Composites by Squeeze Casting Process

Yong-Hyun Kim and Kwang-Hak Lee*

Dept. of Metallurgical Eng., Yeong Dong college, KongNung, 210-840, Korea

*Dept. of Materials and Metallurgical Eng., Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

(1998년 10월 30일 받음, 1999년 2월 8일 최종수정본 받음)

초 록 상용 ADC12 (Al-Si계) 합금을 기지금속으로 하여 saffil/cerakwool, saffil/Si입자를 각각 5:5로 혼합하여 강화한 복합재료를 제조하여 상온과 250°C에서 인장 및 내마모특성을 알아보았다. 인장강도는 saffil/cerakwool로 강화한 복합재료가 320MPa로 가장 우수하였다. 인장파단면은 대부분 덩플형태의 연성파괴가 일어났으나 saffil/Si입자로 강화한 복합재료는 공정Si에 의한 일부 벽개파괴가 관찰되었다. 또한 상온에서는 강화재/기지재간의 debonding이나 섬유유 pull-out 현상이 나타나지 않았으나 고온에서는 saffil/Si 입자로 강화한 복합재료는 일부 pull-out이 관찰되었다. 내마모시험은 접촉하중을 10N~40N으로 변화시켜 전식마찰시켰는데 스카핑(scuffing) 현상은 상온 40N, 고온인 경우는 30N에서 일어났으며 saffil/cerakwool로 강화한 복합재료의 내마모성이 더 우수하였다.

Abstract The tensile strength and wear resistance of ADC12 alloy matrix composites reinforced with saffil/cerakwool and saffil/Si particle prepared by squeeze casting have been investigated in room temperature and 250°C. Adhesive and scuffing wear phenomena was studied when load was changed to 10 ~ 40N and wear velocity was 2.0m/s at room temperature and 250°C. Generally, the morphology of tensile fractured surface revealed dimple pattern which implies ductile fracture of the composites. However, cleavage fracture was also observed in case of ADC12 alloy based saffil/Si particle composite. The maximum tensile strength of 320MPa was obtained in ADC12 alloy based composites reinforced by saffil/cerakwool(5:5) preformed fibers. In the results of dry wear test, it was observed that scuffing was occurred at 40N in room temperature and 30N for 250°C.

1. 서 론

금속기 복합재료는 기존의 금속재료에 비해 우수한 성질을 가진 재료¹⁾로서 여러 산업분야에서 그 사용이 확대되어 가고 있다.²⁾ 금속기 복합재료의 강화재로는 분말, 휘스커(whisker), 단섬유 등이 주로 사용되어 왔으며, 복합재료의 제조방법은 액상법중 스퀴즈 캐스팅법이 실용적인 측면에서 경제성과 생산성이 비교적 우수하여 많이 활용³⁾되어 왔다.

Al합금기 복합재료는 경량화에 의한 연비향상, 내열성, 낮은 열팽창성 및 우수한 내마모성 등의 이점⁴⁾ 때문에 엔진블록등 자동차 부품으로 적용하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이들 고강도 경량 복합재료 개발은 주로 강화재를 단독으로 사용하였으며, 여러 가지 강화재를 혼합하여 강화한 복합재료에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 강화재와 기지금속의 계면은 복합재료의 물성을 결정하는 중요한 인자로서 기지금속이 받는 하중을 섬유로 전달하기 위해서는 계면결합력이 우수하여야 한다. 그러나 섬유와 용

탕간의 화학적 반응으로 인한 과도한 반응층의 형성은 오히려 복합재료의 물성을 저하시키기 때문에 계면은 양면성⁵⁾을 지니고 있다. 따라서 기계적 성질이 우수한 단섬유 saffil과 Al합금과의 젖음성을 향상시키는 SiO₂가 함유되어 있는 cerakwool을 혼합하여 제조한 복합재료를 연구하고자 하였다. 또한 과공정 Al-Si합금은 열팽창계수가 적고 내마모성이 우수한 재료이나 조대한 초정Si와 미개량화된 공정Si로 인해 재료의 인성과 절삭성이 좋지 않으며, 이들을 개량처리 하여도 내마모성에 미치는 영향이 크지 않기 때문에⁶⁾ 휘스커와 Si입자를 혼합첨가한 재료의 특성을 알아보고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 saffil (Al₂O₃), cerakwool (Al₂O₃ · SiO₂) 및 saffil, Si입자를 혼합한 예비성형체를 제조한 후 스퀴즈 캐스팅에 의해 ADC12합금을 기지재로 한 복합재료를 제조하여 인장특성과 내마모성을 연구하였다. 특히 마모는 표면 미세돌기(asperity)의 응착에 기인한 파단으로 표면입자가 상대체에 응착되거나 또는 표면입자의 이탈로 발생하는 응착마모(adhesive wear)⁷⁾와 마찰면에서의

Table 1. Chemical composition of ADC12 Al alloy (wt.%)

Si	Cu	Mn	Zn	Mg	Ni	Fe	P	Al
9.6~12	1.5~3.5	0.3↓	0.8↓	0.3↓	0.3↓	0.8↓	미량	bal.

Table 2. Specification of reinforcements.

Parameter	Saffil(Al ₂ O ₃)	Cerakwool(Al ₂ O ₃ · SiO ₂)	Si particle
Density (g/cm ³)	3.40	2.65	2.33
Diameter (μm)	3	3	20~30
Length (μm)	50~60	10~20	-

마찰이 갑자기 증가하여 두 표면 사이에 거시적인 응착이 발생하여 재료의 내구성에 상당한 영향을 미치는 스카핑(scuffing)⁸⁾ 현상에 대하여 상온과 고온에서 그 마모현상을 연구하고자 하였다.

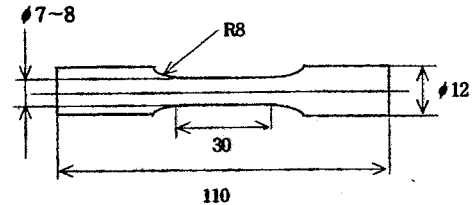
2. 실험방법

예비성형체는 saffil과 cerakwool, saffil과 Si입자를 각각 5:5로 혼합하여 이온교환수와 함께 1700~2000rpm으로 교반한 후 접결제를 첨가하여 진공가압법으로 부피분율 20%로 제조하였다. 제조된 예비성형체는 ADC12합금을 기지금속으로 하여 스퀴즈 캐스팅으로 복합재료를 제조하였다(이하 각각을 SC복합재료, SS복합재료라 함). 기지금속인 ADC12 합금의 성분과 강화재의 제특성은 Table 1 및 2에 각각 나타내었다.

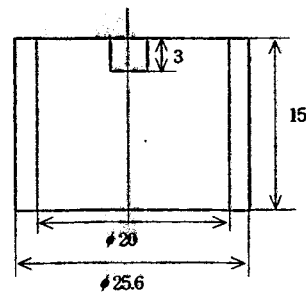
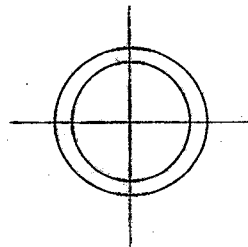
복합재료 제조시 용탕이 예비성형체로의 침투를 용이하게 하기 위하여 예비성형체를 가열한 후 350℃로 예열된 금형내에 장착하였으며, 용탕온도는 880℃, 플란자(plunger)가압속도는 2mm/sec로 그리고 가압력은 50MPa로 하였다.

인장시편은 Fig. 1(a)의 규격으로 제조된 두가지 복합재료를 각각 가공하였으며, MTS(Materials Testing system, MTS819, USA)를 사용하여 상온과 고온(250℃)에서 cross head speed 1mm/min로 인장시험을 행하였다. 고온인장은 인장시편의 열적안정을 위하여 시험온도인 250℃에서 20분간 유지 후 시험하였다.

한편, 마모시험은 suzuki type 마모시험기(EFM-III-E model, Japan)를 사용하였다. 마모시편은 Fig. 1(b)의 규격으로 가공하였으며, 마모부위는 표면거칠기의 영향을 최소화하기 위하여 연마지로 #1200까지 연마하고 diamond paste로 polishing한 후 아세톤 용액내에서 초음파 세척하였다. 상대재는 SCM4로서 마모재와 동일한 방법으로 가공하였다. 마모시험은 마모속도 2.0m/sec, 마모거리 900m로 하였으며, 접촉하중은 10~40N까지 변화하여 상온과 고온(250℃)에서 시험하여 응착마모와 스카핑 마모현상을 관찰하였다. 스카핑현상은 주어진 마모속도에서 거시적 응착현상을 일으켜 마모량이 급격히 증가하는 하중과 마모면의 응착현상을 기준으로 측정하였다.



(a) Tensile specimen



(b) Wear specimen

Fig. 1. Shape and dimension of specimen(mm).

3. 실험결과 및 고찰

인장특성

Saffil(Al₂O₃)과 cerakwool(Al₂O₃ · SiO₂), saffil(Al₂O₃)과 Si입자를 혼합하여 강화상부피분율 20%로 제조한 기지금속 ADC12(Al-Si계)의 복합재료인 SC 및 SS복합재료를 상온과 고온(250℃)에서 각각 인장시험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 상온에서 SC복합재료의 인장강도는 320MPa, SS복합재료의 인장강도는 280MPa로 나타나 ADC12합금의 230MPa에 비하여 각각 39%, 22%의 증가현상이 나타났으며, 파단신율도 SS복합재료는 4%, SC복합재료는 3.5%로 나타나 ADC12합금의 2%에 비하여 우수하였다. 이와 같이 상온인장강도가 증가하는 것은 두

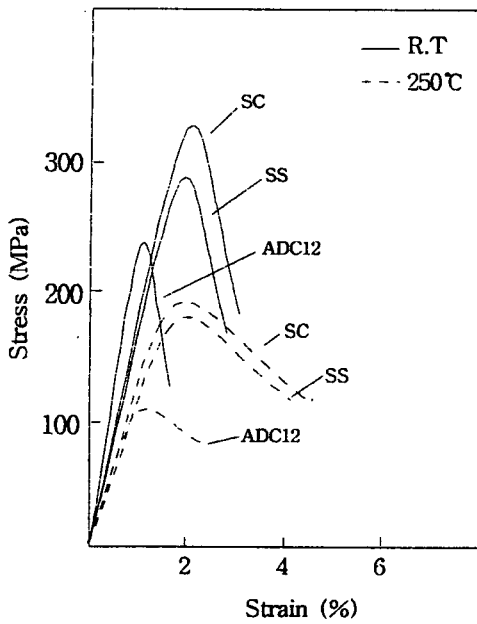


Fig. 2. Stress vs. strain curves for SC and SS composite.

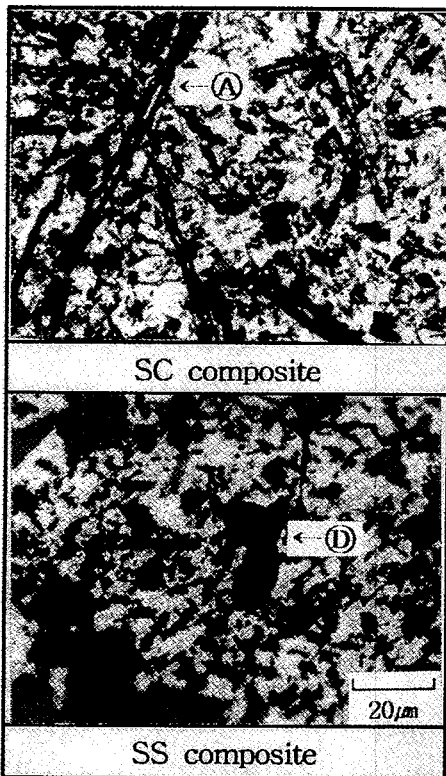


Fig. 3. Microstructure of as-cast SC and SS composite.

강화상의 복합강화 효과와 함께 스퀴즈 가압으로 인해 응고 시 Al_2O_3 휘스커 주위의 전위밀도 증가에 따른 기지금속의 강도 증가⁹⁾ 때문이라고 생각된다. SS복합재료의 상온 인장강도는 첨가된 Si입자로 인해 가장 높은 인장강도를 예상하였으나 ADC12합금에 비해 크게 높지 않게 나타났으며, 상대적으로 SC복합재료보다 인장강도가 낮은 것은 Si 첨가로 인해 기지금속내에 정출한 조대한 Si입자가 경하고 취약할 뿐만 아니라 SC복합재료의 강화상보다 젖음성이 좋

지 못하여 계면결합력이 우수하지 못하였기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 3에 SC 및 SS복합재료의 미세조직을 나타내었다. 이 조직사진을 보면 SC복합재료의 Al_2O_3 휘스커 배열상태는 방향성없이 무질서하게 분포되어 있으며, 국부적인 편석현상도 나타났다. SS복합재료는 첨가된 Si의 형태가 ①와 같이 전형적인 과공정 Al-Si합금의 초정Si처럼 나타나 있고 일부의 공정Si는 Al_2O_3 휘스커 주위에 부착되어 있으며 공정Si의 양이 SC복합재료보다는 비교적 많이 기지금속에 분포되어 있었다. 이렇게 공정Si가 SC복합재료보다 많이 관찰되므로서 이들 공정Si의 벽개파괴 현상 때문에 상온인장강도가 낮게 나타난 것으로 생각되어진다.

온도변화에 따른 인장강도변화는 ADC12합금이 200°C까지는 인장강도가 서서히 감소하나 200°C 이상에서는 인장강도 감소가 커지는 경향¹⁰⁾이 있으므로 시험온도를 250°C로 하였다. 복합재료의 고온인장강도는 상온에서 보다는 감소하였으나 ADC12합금의 상온인장강도와 거의 유사한 값을 보여 250°C의 고온에서도 인장특성이 양호하게 나타났다. 고온에서는 기지재료의 연화로 인하여 상온인장강도 보다는 낮은 값을 보이는 것이 당연하지만, ADC12합금의 상온인장강도와 복합재료의 고온인장강도 값이 유사하게 나타난 것은 Al_2O_3 휘스커에 의한 강화현상 때문이며, 특히 SC복합재료는 고온에서도 물성을 잃지 않는 안정한 화합물¹¹⁾인 Al_2O_3 휘스커가 SS복합재료보다 더 많이 함유되어 있으므로 고온강도가 가장 높게 나타났으며, SS복합재료는 분산되지 못하고 뭉쳐진 Si입자 영역에서 계면접착력이 약화되어 계면이 균열전파를 촉진하므로 고온인장강도가 낮게 나타난 것으로 생각된다.

상온 및 고온인장시험 후의 인장과단면 조직을 SEM으로 관찰하여 Fig. 4에 나타내었다. 상온에서 SC복합재료는 딴플(dimple)의 깊이는 얇으나 대체로 연성파면을 보이고 있으며 강화재와 기지간의 debonding이나 pull-out 현상은 관찰되지 않았다. 그러나 SS 복합재료의 경우는 입자강화 복합재료의 문제점인 Si입자 강화상의 뭉침현상이 일부 관찰되었으며, 정출된 공정 Si상에 의한 일부 벽개파괴 현상도 나타났다. 이로써 상온 인장값은 Fig. 2에 보인 바와 같이 SC 복합재료가 SS복합재료보다 우수하다는 것을 알 수 있었다. 고온인장 과단면에서도 SC복합재료는 전체적으로 딴플과단의 양상을 나타내고 있으나, 강화재/기지재의 계면분리가 진행되고 있음을 알 수 있었으며, 휘스커들이 떨어져 나간 영역에서 평평한 파면형태를 가짐으로써 기계적 성질이 감소하였음을 알 수 있었다. SS 복합재료는 분산되지 못하고 뭉쳐진 입자영역에서 섬유 pull-out 현상을 일부 보였으며, 또한 기지재의 매끈함이 관찰되어 계면접착력이 약화됨으로써 계면분리가 더욱 뚜렷이 진행되고 있음을 알 수 있었다. 즉 상온에서는 SC복합재료는 휘스커의 취성파괴와 ADC12합금의 기지금속 연성파괴에 기인하며, SS복합재료는 공정Si의 벽개파괴도 관찰되었으며, 고온에서는 이외에 기지금속의 연화에 따른 강화상의 pull-out 현상이 일부 관찰되었다.



Fig. 4. SEM fractographs of SC and SS composites. : (a) R. T (b) 250°C

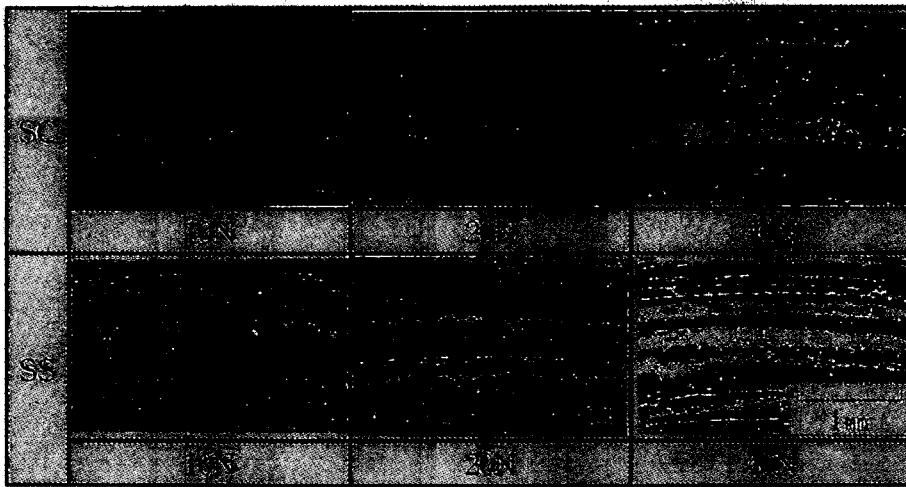


Fig. 5. SEM photographs for wear surface : velocity 2.0m/s, wear distance 900m, R.T. and dry friction.

마모특성

마모는 마모면상태, 접촉형태, 재료, 사용환경등 여러 가지 요인에 의해 발생하는 복합적인 현상이나 본 연구에서는 마모현상을 단순화하여 표면 미세돌기의 응력에 기인한 응착마모와 금속접촉에 의한 마찰열의 발생으로 마모면이 용융될 때 일어나서 재료의 내구성에 악영향을 미치는 스카핑 현상을 알아보려고 하였다. 마모시험은마모속도 2.0m/sec, 마모거리 900m로 하여 접촉하중을 10, 20 및 40N으로 각각 변화시키면서 건식마찰시켰으며, Fig. 5에 상온에서 시험한 마모면의 조직을 나타내었다. 이 조직사진에서 알 수

있듯이 마모재의 표면에서 마찰방향으로 소성유동이 발생하여 재료일부가 마모분이 되어 있음을 관찰할 수 있었다. 또한 마모면은 마찰하중이 10N에서 40N으로 증가함에 따라 마모흔의 폭이 넓어지고 있으며, 마모면의 깊이도 깊어져서 마모의 진행이 표면에서 내부로 이동하고 있음을 알 수 있었다.

한편 스카핑(scuffing) 마모는 금속접촉에 의한 마찰열의 발생으로 마모면이 용융될 때 일어나는 현상으로서 SS 복합재료의 경우는 40N의 접촉하중에서 거시적인 응착현상이 관찰되었으며, SC복합재료는 동일하중에서 부분적인

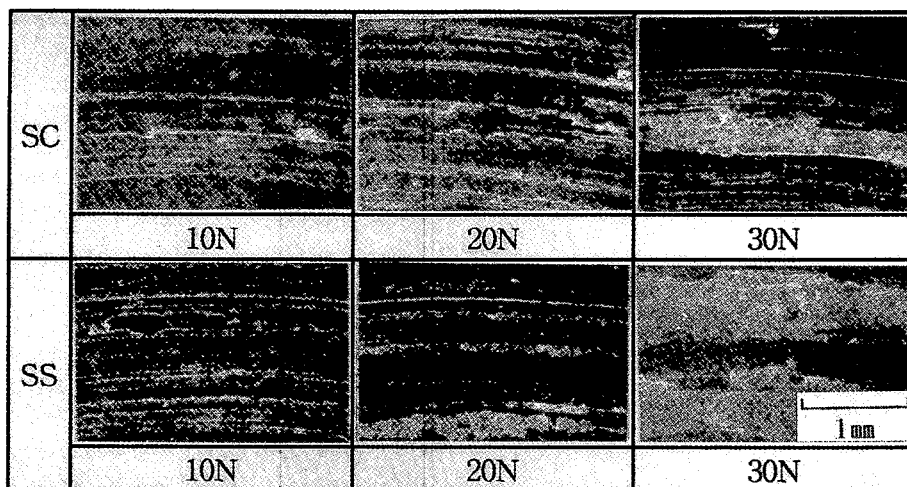


Fig. 6. SEM photographs showing wear surface : velocity 2.0m/s, wear distance 900m, 250°C and dry friction.

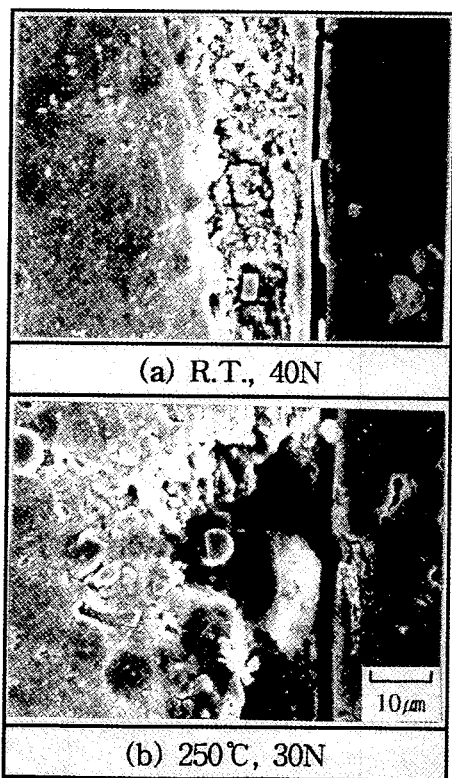


Fig. 7. Cross-sectional view of wear surface in SS composite.

윤착현상이 나타났다. Al-Si합금은 기지내에 분포한 경한 Si상 때문에 내마모성이 우수한 재료¹²⁾로 알려져 있으나 복합재료는 강화재와 기지재의 결합력에 의하여 마모특성이 결정¹³⁾되기 때문에 전술한 바와 같이 인장강도가 높게 나타난 SC 복합재료가 내마모성이 더 우수하였던 것으로 판단된다. 또한 SS 복합재료는 초기접촉하중인 10N에서도 마모면의 흔적이 깊고 넓게 분포하고 있음을 관찰할 수 있었는데 이는 강화상으로 첨가된 Si가 공정조성의 기지금속으로 고용되지 못하여 파괴된 Si정출상이 파단면에 존재하여 연삭마모가 마모초기부터 일어났기 때문으로 생각된다. 또

한 마모량도 SC복합재료는 12×10^{-4} g이며, SS복합재료는 20×10^{-4} g로 나타나서 SC복합재료의 마모량이 적었음을 볼 때 SC복합재료가 내마모성이 더 우수하였다.

Fig. 6에는 마모속도와 마모거리의 상온에서의 마모시험과 동일하게 하고 접촉하중을 10, 20 및 30N으로 변화시키면서 250°C의 고온에서 건식마찰시킨 마모면의 조직을 나타내었다. 고온에서는 상온마모와는 달리 30N의 접촉하중에서도 윤착마모 현상이 뚜렷이 관찰되었다. 따라서 고온에서는 상온에서와는 달리 더 낮은 하중에서 스카핑이 존재하였으며, 이는 고온이 되면 기지조직 및 강화재의 소성유동이 증가하기 때문에 내마모성이 감소하는 것으로 생각된다.

이것을 확인하기 위하여 SS복합재료의 마모시편을 마찰 방향에 평행하게 마찰면을 수직으로 절단하여 그 단면의 조직을 Fig. 7에 나타내었다. 이 조직사진을 보면 상온에서는 마찰면의 표면에서 소성유동이 발생하여 재료일부가 마모분이 되어있음을 볼 수 있으며 마모의 진행에 따라 재료의 표면에서 내부로 마모가 진행되고 있음을 관찰할 수 있었다. 그러나 고온에서는 마모면의 마모입자가 조대하며, 또한 마모입자의 이탈현상이 뚜렷하게 관찰되어 고온인 경우가 상온보다 내마모성이 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기지재의 연화로 인한 강화재의 이탈현상 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

Saffil과 cerakwool, saffil과 Si particle을 혼합하여 강화한 ADC12 합금기지 복합재료인 SC 및 SS복합재료의 인장 및 마모시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SC복합재료는 인장강도가 320MPa, SS복합재료는 280MPa로서 ADC12합금보다 인장강도가 각각 39%, 22% 증가하였으며, 파단신율도 SC복합재료는 4%, SS복합재료는 3.5%로 ADC12합금의 2%에 비하여 우수하였다.

2) 인장파단면은 대부분 덩플형태의 연성파괴가 일어났

으나, SS복합재료는 공정Si의 정출로 인해 일부 백개화과가 관찰되었다.

3) 상온에서는 강화재/기지간의 debonding이나 섬유의 pull-out 현상이 관찰되지 않았으나 고온에서는 SS 복합재료에서 일부 pull-out 현상이 보였다.

4) 마모량은 SC복합재료는 12×10^{-4} g이며, SS복합재료는 20×10^{-4} g으로 나타나 SC복합재료의 내마모성이 더 우수하였다.

5) 상온에서 전식마찰시킨 경우 SS복합재료는 40N의 접촉하중에서 거시적인 용착 현상이 관찰되었으나, SS복합재료는 부분적인 용착현상만 나타났다. 고온에서는 30N에서 스카핑현상이 일어났다.

참 고 문 헌

1. D. L. Davidson, Met. Trans., **22A**, 97 (1991).
2. D. J. Lloyd, Compos. Sci. Tech., **35**, 159 (1989).
3. A. Mortensen, J. F. Mason, Met. Trans., **18A**, 1519

- (1987).
4. N. Yamamoto, M. Itamura and T. Ueno, AFS Trans. **87**, 539 (1992).
5. D. J. Lloyd, I. Jin, Met. Trans., **19A**, 3107 (1988).
6. A. J. Clegg, A. A. Das, Br. Foundryman, **70**, 339 (1977).
7. I. V. Kraghelsky, Trans. ASME. D87, (3), 785 (1965).
8. 曹田範宗 : 潤滑, **5**, (3), 109 (1960).
9. R. J. Aresenault, Met. Sci. Eng., **64**, 171 (1984).
10. 輕金屬學會, “アルミニウムの組織と性質,” 524 (1991).
11. G. R. Cappleman, J. F. Watts T. W. Clyne, J. Mater. Sci., **20**, 2159 (1985).
12. A. D. Sarker, Wear, **31**, 331 (1975).
13. A. Wang, H. J. Rack, Mat. Sci. Eng., **147A**, 211 (1991).