

금속기 복합재료의 마찰·마모 특성에 관한 연구

A Study on the Frictional Abrasion Properties of MMC

이 광영*, 박 원조*, 허 선철*
Kwangyoung Lee, Wonjo Park, Sunchul Huh

ABSTRACT

Metal matrix composites had generated a lot of interest in recent times because of significant in specific properties, it was also highlighted as the material of frontier industry because strength, heat-resistant, corrosion-resistant and wear-resistant were superiored. In recent years, the study of metal matrix composite has increased by aluminum alloy. The study is based on the tribological properties of AC4CH that is a part of the mechanical property of metal matrix composites. Metal matrix composite that is produced from matrix material AC4CH and reinforcement SiO_2 , Al_2O_3 and TiO_2 are added to the metal matrix composite for strength so binding among the whisker can take place. Each metal matrix composite is produced using the squeeze casting method. To test for tribo a pin-on-disk machine and lubricant is used without paraffine 8.2CST at room temperature which is 40°C. As the results of this study, the tribological properties of each specimen are more improved than AC4CH. The variation of coefficient resistance is more stable at the AC4CH and TiO_2 , but the variation rates are higher at the inanimate binder.

주요기술용어 : Metal matrix composite (금속기 복합재료), Squeeze casting (가압단조), Frictional coefficient(마찰계수), Sintering(소결)

1. 서 론

복합재료는 높은 경도와 내마모성을 가지며 기계적 강도가 클 뿐만 아니라 열전도율, 전기절연성, 화학적 안정성 및 특히 고온강도가 우수하여 자동차 부품, 각종 화학 펌프부품 등의 재료로 많이 사용되고 있다.¹⁾

또한, 내마모성, 내식성이 우수하여 각종 기능의 조합이 가능하며 높은 치수 안정성 그리고 일체 성형에 의한 공작 과정이 단순하여 여러 부품

들의 소재로 복합재료를 사용하는 경우가 많다.^{2,3)}

이러한 복합재료 중에서도 알루미늄 보레이트 휘스커 강화 AC4CH 복합재료는 탁월한 비강도와 탄성도를 가지고 있으며 일반 whisker보다 단자가 저렴한 장점이 있다.⁴⁾

최근에는, 복합재료에 관한 많은 연구가 행해지고 있으나 AC4CH에 무기바인더의 종류를 달리하여 첨가한 복합재료에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기지재인 AC4CH와 강

* 회원, 경상대학교 수송기계공학부 해양산업 연구소

화재인 알루미늄 보레이트 휘스커에 무기바인더인 SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 를 첨가하여 가압단조법으로 복합재료를 제작하여 기지재와 복합재료의 기계적 특성들을 검토하고, 각 바인더 종류별로 미끄럼 속도 7.5rpm, 접촉하중 2kg을 가하여, 기지재인 AC4CH와 무기바인더 종류에 따른 내마모시험을 통하여 복합재의 마모 특성을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 시험재료

AC4CH는 순수한 Al-Si-Mg계 합금에서 Fe의 함량을 0.2% 이하로 인성을 높인 알루미늄 합금으로서 주물용 합금의 중간정도의 강도를 나타내지만 연신율이 커서 인성이 우수하고 주조성도 양호하며, 내식성이 우수한 합금으로서 복합재료의 기지재료로 널리 사용되고 있다. Table 1은 기지재인 AC4CH의 화학적 성분을, Table 2는 기계적 물성치를 나타내었다. 그리고 강화재로 사용된 알루미늄 보레이트 휘스커의 물성치를 Table 3에 나타내었다. Table 4는 프리폼 제작시 첨가한 휘스커의 체적율 및 유기바인더, 무기바인더의 종류와 중량을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical compositions of AC4CH alloy (wt.%)

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
0.20	7.5	0.45	0.10	0.20	0.10	0.05	0.20	0.05	0.05	0.05	Bal.

Table 2 Properties of AC4CH alloy

Materials	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)
AC4CH	278	186	68	4.07

Table 3 Properties of aluminum borate whisker

Materials	Diameter (μm)	Length (μm)	Tensile strength (GPa)	Young's modulus (GPa)	Crystal structure
$\text{Al}_1\text{B}_4\text{O}_3$	0.5~1.0	10~30	8	400	Orthorhombic

Table 4 Specifications of preform

Type	Raw material	Blended quantity
Aluminum borate whisker	$9\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$	120g
Ion water		1000ml
Organic bind	polym vinyl alcohol 10%	5ml
Coagulation	polyma 2%	5ml
$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2$	46%	13g

2.2 금속기 복합재료 제조

금속기 복합재료의 제조를 위해 예비성형체를 제조해야 하는데 예비 성형체는 알루미늄 보레이트 휘스커에 이온수 1000ml를 교반하면서, 폴리비닐알콜 및 응집제를 첨가하고, 충분히 교반된 slurry 상태에서, 진공탈포함으로써 기포를 제거한 후, 금형에서 흡입펌프로 이온수를 여과시키면서 압축하여 소정의 프리폼 형상을 완성하였다. 그 후, 3일 정도 자연 건조하고 소결로에서 1100°C 조건으로 2시간 소결(sintering)한 후, 노냉하여 제작하였고, 제작된 프리폼의 크기는 100×110×25(mm)이다. 제작한 프리폼을 약 700°C로 가열하여, 압착단조장치의 금형 내에 고정하여, 이 때의 금형 온도는 200°C이며, 760°C의 용탕을 금형에 주입하여 프레스 장치에서 가압력을 83.4MPa, 가압속도를 50mm/sec, 가압시간은 40초의 조건으로 가압하여 프리폼의 공극에 용탕을 주입시킨 후, 응고시켜 금속기복합재료를 제작하였다.

2.3 실험방법

Fig. 1은 인장시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 실험은 ASTM D3039규정에 의거 10tonf MTS으로 실시하였으며, 변위제어모드에서 크로스헤드 스피드는 0.1mm/min으로 실험하였으며, 대기중의 실온에서 실시하였다.

마찰·마모 실험은 pin-on-disk형 마찰시험기를 사용하여 윤활마찰 실험을 하였으며 Fig. 2는 시험편과 마찰되는 강구의 개략도를 나타내고 있다.



Fig. 1 Configuration of test specimen

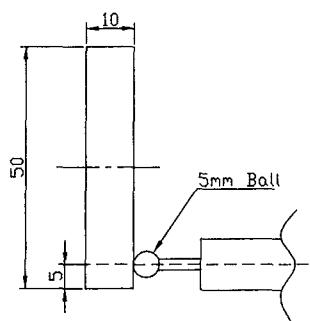


Fig. 2 Schematic diagram of pin on disk wear test

윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 윤활유가 담긴 비이커를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로서 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 적하시켰다. 미끄럼속도 7.5rpm, 접촉하중은 2kg, 미끄럼 거리는 235m로 속도와 하중을 일정하게 하였다. 미끄럼 거리는 초기(0~78m), 중기(78~156m), 말기(156~235m)로 나누어서 윤활유 100ml씩 사용하고 각각 2시간 간격으로 윤활유 속에 채취된 마멸분을 헥산과 1:1 비율로 섞어 20 ml의 샘플을 추출하여 공경 0.45의 membrane filter가 부착된 마멸입자 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다.

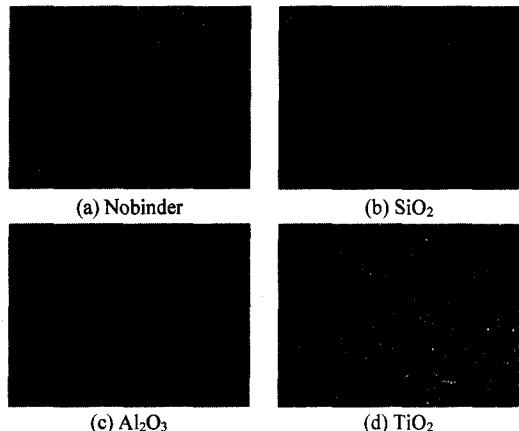
강구는 직경 5.0mm의 베어링 강구 STB2를 사용하였다. 시험편의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm의 disk형 시험편으로 표면을 샌드페이퍼 #1500으로 정밀 연마하여 그 표면조도를 $0.2\mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다.

3. 실험결과

3.1 복합재료의 미세조직

Fig. 3은 복합재료의 미세조작사진을 나타내고 있다. 스퀴즈캐스팅의 경우 복합재 메트릭스에 휘스커의 분포가 비교적 고르게 분포되어 강

도를 향상시키기 때문에 우수한 복합재료 제조 방법으로 알려져 있다. 본 연구에서도 그림에서 보는 것처럼 휘스커의 분포가 matrix에 비교적 고르게 분포되어 있으며 nobinder 및 무기바인더 종류에 따른 조직적 차이점은 발견할 수 없었다.

Fig. 3 Optical microstructure of composite material ($\times 50$)

3.2 경도시험 결과

Fig. 4는 모재와 바인더 종류에 따른 경도시험 결과를 나타내고 있다. 그림에서 AC4CH인 경우 Hv65이고 nobinder는 Hv 115로 복합화에 따른 경도가 약 2배 정도 증가하였으므로 연성적인 AC4CH에 휘스커를 강화한 복합화의 효과를 충분히 확인할 수 있다. 그리고 무기바인더의 종류인 SiO₂는 Hv 99, Al₂O₃의 경우 Hv 110, TiO₂의 경

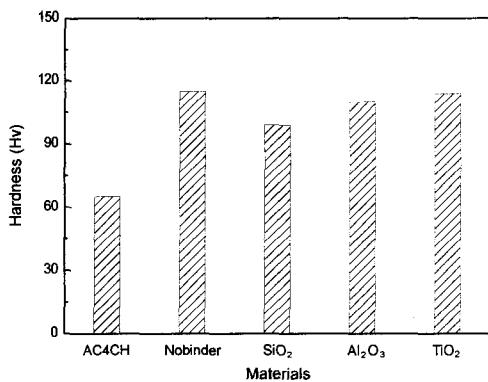


Fig. 4 Results of micro vickers hardness

우 Hv 114로서 각각 AC4CH에 비해 52%, 69%, 75%로 각각 경도값이 증가하였으므로 복합재료의 경우 경도 특성이 대단히 우수하다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 SiO_2 , Al_2O_3 의 경우는 nobinder보다 경도가 낮고, TiO_2 가 경도 특성이 가장 우수하였으므로 무기바인더의 경우는 TiO_2 의 사용이 요망된다.

3.3 인장시험 결과

Fig. 5는 인장시험의 결과를 나타내었다. AC4CH의 인장강도가 약 278MPa인데 비해, nobinder의 인장강도는 373MPa, SiO_2 는 307MPa, Al_2O_3 는 345MPa, TiO_2 는 375MPa로서 복합재료의 인장강도가 각각 기지재보다 34%, 10.4%, 24%, 34.8%씩 향상된 것을 알 수 있다. 특히 TiO_2 를 첨가한 복합재료의 최대인장강도가 가장 우수하다는 것을 알 수 있었다. 이것은 인성이 강한 기지재에 강화재를 첨가시킴으로서 기지재의 조직이 조밀화되어 강도의 향상으로 나타난 것으로 생각한다. 또한 유기바인더 및 무기바인더는 강화재의 균일한 분산을 위해 첨가되고, 용탕 단조시 예비성형체의 변형을 억제하여 예비성형체의 강도향상을 위해 첨가되므로 바인더의 종류에 따라 인장강도가 증가한 것으로 생각한다. 그러나, SiO_2 , Al_2O_3 의 경우는 무기바인더를 첨가하지 않은 nobinder보다 강도가 저하하므로 무기바인더의 효과를 확인할 수 없었다.

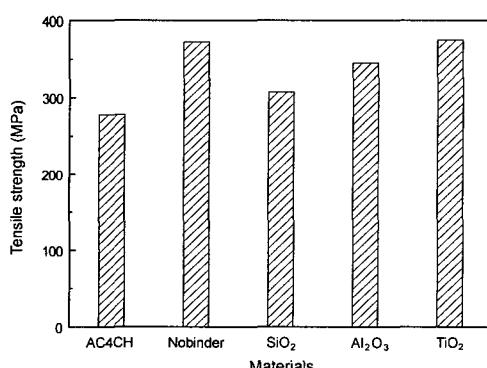


Fig. 5 Tensile strength of AC4CH and metal matrix composite

3.4 마찰계수변화

Fig. 6, Fig. 7, 8과 Fig. 9 및 Fig. 10은 matrix와 바인더 종류에 따른 각각의 시간별 마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 6은 AC4CH인 경우 전체적으로 비교적 안정적인 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 이는 초기에 생성된 마모분이 2시간이 경과하면서 편과 같이 모재에 마찰을 일으켜 마찰계수가 높아지나 4시간이 경과하면서

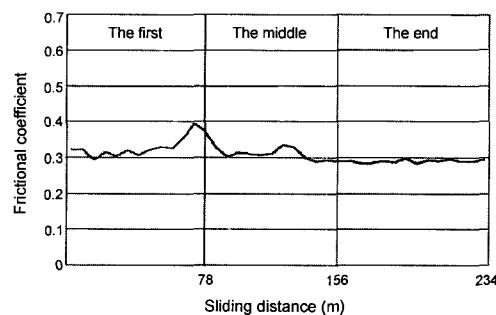


Fig. 6 The variation of frictional coefficient with test time (AC4CH)

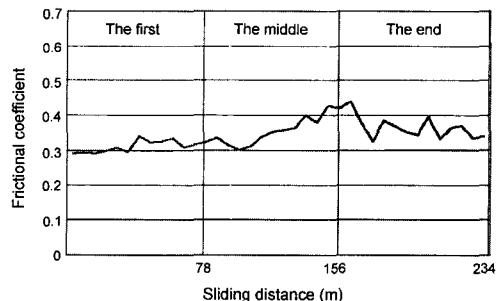


Fig. 7 The variation of frictional coefficient with test time (nobinder)

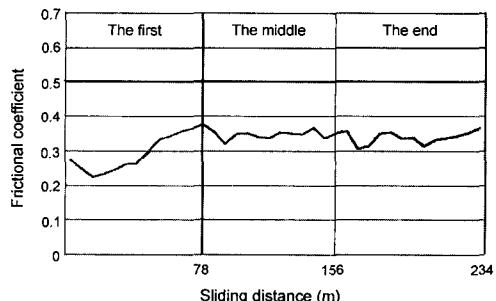


Fig. 8 The variation of frictional coefficient with test time (SiO_2)

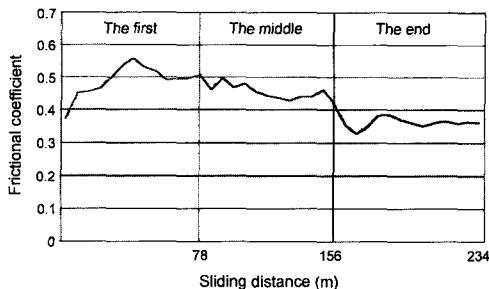


Fig. 9 The variation of frictional coefficient with test time (Al_2O_3)

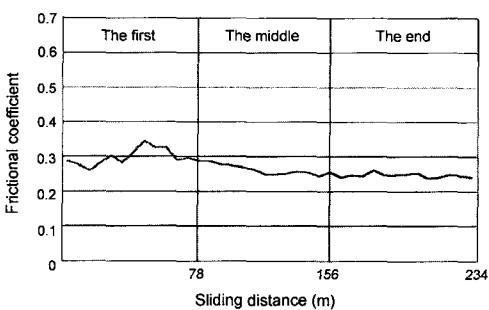


Fig. 10 The variation of frictional coefficient with test time (TiO_2)

생성된 마모분이 탈락하고 순수 편과 모재의 마찰로 인하여 안정화되어 간다고 생각한다.

Fig. 7은 nobinder로서 초기부터 중기까지 마찰계수가 지속적으로 높아지며 말기에는 마찰계수가 일시적으로 조금 낮아지나 일정하지 않다.

nobinder는 내마모성이 우수하므로 초기에 마찰계수가 안정화되어 있으나 중기 이후 3~4시간 이상 지나면서 생성된 sludge 등이 adhesive wear 형태로 편과 시험편 표면을 거칠게 마모시킴으로서 마찰계수가 불안정 해지는 것으로 생각한다.

Fig. 8은 SiO_2 로서 초기에서 중기에 이르기 까지 마찰계수가 조금 상승하고 말기에 이르기 까지 약간의 진폭이 있으나 비교적 일정한 마찰계수를 보인다.

Fig. 9는 Al_2O_3 로서 초기에 마찰계수가 급상승하다가 중기부터 감소하기 시작하여, 말기에 가서는 안정적인 마찰계수의 변화를 보인다. 이는 초기에 탈락한 휘스커로 인해 초기 중기까지는

마찰계수가 크게 증가하고 말기부터는 안정화되어 간다고 생각한다.

Fig. 10인 TiO_2 는 전체 재료중에서 제일 안정적인 마찰계수를 보여주며 초기에 마찰계수가 소폭 상승하나 중기부터 조금씩 마찰계수가 떨어지기 시작하여 말기에는 아주 안정적인 모습을 보인다. 이는 앞의 경도 결과에서도 알 수 있듯이 TiO_2 가 가장 높은 경도값을 나타내었으므로 무기바인더인 TiO_2 의 첨가로 제조 및 강도, 경도등의 증가로 표면의 내마모성이 가장 우수하여 마찰계수가 비교적 일정한 것으로 생각하며, 강도 및 마찰계수등을 종합하면 무기바인더로서 TiO_2 의 첨가는 가장 우수한 특성을 나타내고 있다.

3.5 마모트랙 및 마모량

Fig. 11은 실험종료 후 마모된 시편의 마모 트랙을 화상 분석기를 이용해서 배율 100배로 확대하여 나타낸 사진이고, Table 1은 마모트랙의 폭을 3 point에 대해 화상분석기로 측정하여 평균

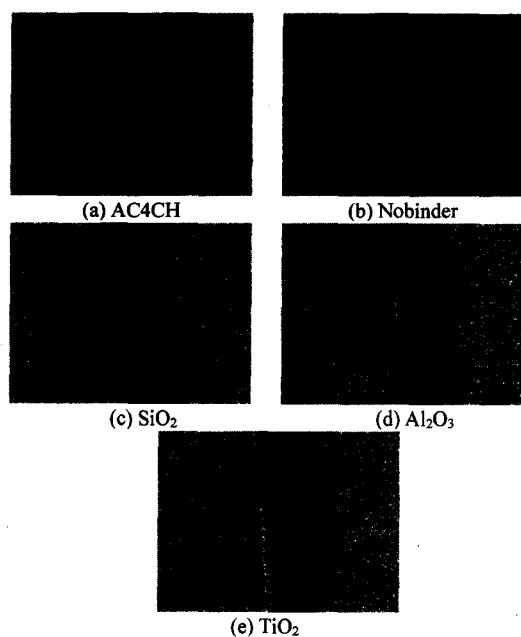


Fig. 11 Macroscopic picture of wear surface metal matrix composite ($\times 100$)

Table 1 The results of wear test of metal matrix composite

종류	Track width (μm)	Wear volume (cm^3)
AC4CH	828.22	0.08
nobinder	545.63	0.056
SiO_2	501.21	0.043
Al_2O_3	471.19	0.039
TiO_2	450.05	0.021

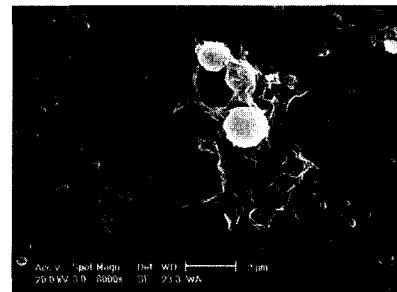
값을 내고 이를 이용하여 마모된 마모량의 체적을 계산하여 나타내었다.

AC4CH는 마모량이 가장 많다는 것을 알 수 있으며, 이는 표면 경도값이 가장 낮다는 결과와 잘 일치한다. 또한 마모트랙 사진에서 부분적으로 마모된 입자들이 탈락된 흔적을 확인할 수 있다. nobinder의 경우 경도 값이 가장 높게 나왔음에도 불구하고 다른 무기바인더에 비해 마모량이 많다는 것을 알 수 있다. 이는 마찰계수값이 약 3시간 이후부터 상승하여 말기에는 일정하지 못하므로 후반기에 흡착, 탈락이 집중적으로 이루어졌기 때문으로 생각하며 이는 Fig.11의 (b)에서도 잘 확인할 수 있다.

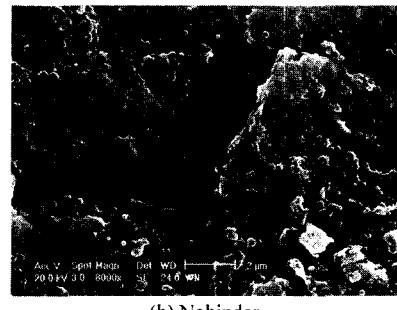
TiO_2 는 마모량이 가장 작게 나타났으며 경도값 또한 가장 크고 마찰계수의 변화도 중기와 말기에서 낮게 나타났으며 가장 안정적인 마찰계수변화를 보이고 있다. 또한 마찰 트랙의 사진에서 살펴보면 본 복합재료 소재중 가장 깨끗한 마모트랙 형상을 보임으로서 구조재료 사용하기 위해서는 무기바인더 종류 중 TiO_2 가 가장 우수하다고 할 수 있다.

Fig. 12는 마모 시험 후 마모면을 8000배 확대하여 SEM사진으로 나타낸 것이다.

(a)는 AC4CH의 경우로서 복합재에 비해 연성이므로 마찰 표면은 비교적 깨끗한 표면을 나타내고 있다. (b)는 nobinder의 경우로서 마찰 표면이 비교적 거칠고 표면에 생성된 휘스커를 관찰할 수 있다. (c)는 TiO_2 의 표면을 나타내는 것으로서 마모시 발생하는 열로 인하여 팽창 수축을 함으로서 표면에 균열이 발생하는 것을 알 수 있으



(a) AC4CH



(b) Nobinder

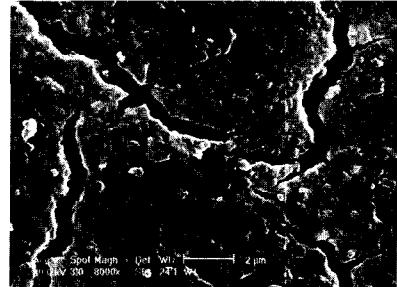
(c) TiO_2

Fig.12 Microscopic picture of wear surface

며, 이러한 부분이 마찰 특성을 변화시키는 것으로 생각된다. 그리고, 무기바인더로서 SiO_2 , Al_2O_3 를 첨가한 경우도 TiO_2 의 경우와 같은 파면양상을 보이는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

기지재 AC4CH에 알루미늄 보레이트 휘스커를 첨가하고, 무기바인더 종류를 달리한 복합재를 제작하여 기계적 특성 및 마모 시험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 스퀴즈 캐스팅법에 의한 복합재료를 제작한 결과 휘스커가 비교적 고른 분포를 한 양호한 조직을 얻을 수 있었고, 바인더 종류에 따른 조직적 특성은 거의 유사함을 알 수 있었다.
- 2) 경도 시험결과 기지재 AC4CH보다는 복합재의 경도가 평균 70%의 경도 향상을 보였으며, 특히 nobinder와 TiO₂의 경우가 가장 우수한 경도 값을 나타내었다.
- 3) 마찰계수의 변화는 연질인 AC4CH와 표면 경도가 가장 높은 TiO₂가 마찰계수의 변화가 안정적이며 그 외 무기바인더의 경우는 마찰계수의 변화가 크다.
- 4) 복합재의 경우 마모트랙에 형성된 debris와 adhesive wear 현상으로 인해 마모트랙이 불규칙하고 거친 형상을 나타낸다.

후기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 홍창선, “복합재료 응용기술 및 연구,” 대한 기계학회지, 제34권 제5호, pp.334-341, 1994.
- 2) N. E. Frost, L. P. Pook, K. Denton, “A Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth Data for Various Materials,” Engineering Fracture Mechanics, Vol.3, pp.109-126, 1971.
- 3) L. P. Pook, “Fatigue Crack Growth Data of Various Materials Deduced from the Fatigue Lives of Precracked Plates,” ASTM STP 513, pp.106-124, 1972.
- 4) N. Saito, M. Nakanishim, Y. Nishida, “Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Aluminum Borate Whisker Reinforced 6061 Aluminum Alloy,” Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.44, No.2, pp.86-90, 1994.
- 5) J. K. Shang, et al., “Role of Silicon Carbide Particles in Fatigue Crack Growth in SiC Particulate Reinforced Aluminum Alloy Composites,” Material Science and Engineering A, 102, pp.181-192, 1988.