

무가압침침법으로 제조된 입자강화 금속복합재료의 마모특성

김재동* · 정순익** · 김형진**

*경상대학교 해양산업연구소

**경상대학교 수송기계공학부

Wear Characteristics of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites Fabricated by Pressureless Metal Infiltration Process

JAE-DONG KIM*, SUN-UK JUNG** and HYUNG-JIN KIM**

*Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**School of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

KEY WORDS: Metal Matrix Composites 금속복합재료, Wear Characteristics 마모특성, Volume Fraction 부피분율, Particle Size 입자크기, Worn Surface 마모면

ABSTRACT: The effect of size and volume fraction of ceramic particles with sliding velocity on the wear properties were investigated for the metal matrix composites fabricated by pressureless infiltration process. The particulate metal matrix composites exhibited about 5.5 - 6 times of excellent wear resistance compared with AC8A alloy at high sliding velocity, and as increasing the particle size and decreasing the volume fraction the wear resistance was improved. The wear resistance of metal matrix composites and AC8A alloy exhibited different aspects. Wear loss of AC8A alloy increased with sliding velocity linearly, whereas metal matrix composites indicated more wear loss than AC8A alloy at slow velocity region, however a transition point of wear loss was found at middle velocity region which show the minimum wear loss, and wear loss at high velocity region exhibited nearly same value with slow velocity region. In terms of wear mechanism, the metal matrix composites exhibited the abrasive wear at slow to high sliding velocity generally, however AC8A alloy showed abrasive wear at low sliding velocity and adhesive and melt wear at high sliding velocity.

1. 서 론

일반적으로 금속재료는 접촉하중과 마찰속도가 증가함에 따라 마찰면에서 온도가 상승하고, 이에 따라 급격한 연화현상이 발생하여 마모량이 증가한다. 그러나 입자강화 금속복합재료의 경우는 강화입자의 형태와 크기 및 부피분율, 경도, 계면강도와 같은 많은 인자에 의해 마모저항이 영향을 받으며, 또한 상대마모재(counterpart material)에 의해 상이한 마모양상을 나타내고 있다 (Zhang 등, 1995).

입자강화 금속복합재료의 마모에 관한 이전의 연구에서, Ma 및 Cordovilla 등 (Ma 등, 1996, Cordovilla 등, 1996)은 세라믹 강화상의 부피분율과 크기를 증가시키에 따라 금속복합재료의 마모저항이 증가함을 관찰했다. Ma는 강화입자의 부피분율보다는 입자의 크기가 마모저항에 더 많은 영향을 미친다고 보고하고 있으며, 강화입자가 소직경인 경우는 강화입자에 의한 기지의 강화가 마모저항 증가의 주 요인인데 비해, 대직경의 경우는 입자 자체의 우수한 마모저항에 의해 복합재료의 마모저항이 증가한다고 발표하고 있다. 이에 반해 Sannino 등 (San-

nino 등, 1996)은 강화상의 입자 크기와 기지금속의 경도가 증가함에 따라 마모율이 증가한다는 결과를 발표하고, 강화상이 소직경 입자인 경우는 응착과 미소절단(micro-cutting)이 주된 마모기구인데 비해, 대직경 입자의 경우는 부표면의 박리(delamination)가 주된 마모기구라고 해석하고 있다. 이와 같은 상반된 결과는 금속복합재료에 있어서 마찰 중에 발생하는 생성물간의 상호작용이 불확실하고, 또한 복합재료의 제조법에 따른 결합강도의 차이와 상대마모재 선택의 상이함에 그 원인이 있지 않나 생각된다

그동안 여러 입자강화 금속복합재료의 마모 특성에 관한 연구는 많이 보고되고 있으나, 무가압침침법(pressureless metal infiltration process)으로 제조된 입자강화 금속복합재료의 마모 특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 그러므로 본 연구에서는 무가압침침법으로 제조된 입자강화 금속재료에 있어서 마찰속도의 변화에 따른 강화상 크기 및 부피분율의 마모저항에 미치는 영향에 대하여 마모량과 마모면의 해석을 통해 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 복합재료의 제조

제1저자 김재동 연락처: 경남 통영시 인평동 445

0555-640-3168 jdkim@gaechuk.gsnu.ac.kr

본 실험에 사용된 금속복합재료(metal matrix composites : MMCs)는 무가압침범으로 제조하였다. 강화상 크기의 영향을 고찰하기 위해 평균입경이 각각 $26\mu\text{m}$, $38\mu\text{m}$ 및 $100\mu\text{m}$ 인 SiC입자를 주조용 AC8A합금과 조합하여, 부피분율은 20%로 동일하나 강화상의 입경이 서로 다른 3종류의 SiCp/AC8A 복합재료를 제조하였으며, 또한 부피분율의 영향을 고찰하기 위해 강화상은 평균입경이 $38\mu\text{m}$ Al_2O_3 입자로 동일하나 부피분율이 각각 20%, 30% 및 40%로 다른 3종류의 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{p}$ /AC8A 복합재료를 제조하였다.

복합재료의 제조는 다음과 같이 하였다. 우선 부피분율에 맞게 조성된 강화 입자와, 기지재료의 강화상 입자 속으로의 침투를 돕는 반응원료로 전체 기지 조성에 대하여 3wt%의 Mg을 혼합한 혼합분말을 원통형 알루미늄 도가니에 넣고, 이 혼합분말 위에 기지재인 AC8A합금 잉곳을 놓은 다음 분위기로에 넣었다. 분위기로는 진공펌프로 1×10^{-2} torr까지 진공시킨 후, 질소가스를 연속 주입하면서 출구에서 미량의 질소가스를 배출시켜 항상 질소 분위기 환경을 유지하도록 하였다. 분위기로의 승온은 약 $300^\circ\text{C}/\text{h}$ 의 속도로 하였으며, 700°C 에 도달한 후에는 3시간 유지시켜 기지금속을 강화상 입자 속으로 자발적으로 침투시켰다. 이후 산화방지를 위하여 500°C 까지 노냉 시킨 다음, 노에서 꺼내 대기 중에서 실온까지 냉각시켰다. 제조된 복합재는 다이아몬드 정밀절단기로 중앙을 잘라 시험편으로 제작하였다. 또한 열처리(T6)에 의한 기계적 성질의 변화를 조사하기 위하여 기지재료 및 복합재료를 520°C 에서 3시간 용체화처리한 후 소입시키고, 170°C 에서 8시간 시효 처리 하였다.

2.2 마모특성

마모시험은 블록 모양의 시편위에 디스크 모양의 상대마모재를 회전시키는 마모시험기(Rinken Ogoshi type)를 사용하여, #1000 사포로 최종 연마된 $30 \times 50 \times 5\text{mm}^3$ 크기의 시험편을 표면경화하여 경도가 HRC 50인 상대마모재(S45C)에 건식 미끄럼마찰시켰다. 시험조건은 최종하중과 마찰거리를 각각 12.6kg, 100m로 일정하게 유지하고, 마찰속도를 0.62, 1.14, 2.38 및 3.53m/s의 속도로 변화시켜 각각의 마모흔의 폭을 측정하여 식 (1)에 의해 단위하중의 마찰 거리에 대한 비마모손실을 계산하였다. Fig. 1은 마모시험기의 개략도를 나타내고 있다. 또한 마모시험 후의 마모표면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

$$W_s = (B b_o^3) / (8rP_o L_o) \quad (1)$$

여기서 W_s : 비마모량, B : disc의 폭, b_o : 마모흔의 폭, r : disc의 반경, P_o : 하중, L_o : 마찰거리이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰속도의 영향

Fig. 2는 미끄럼 속도의 변화에 따른 AC8A합금과 금속복합재료의 비마모손실을 나타낸 것이다. 금속복합재료는 마찰속도

가 증가함에 따라 기지재료에 비해 내마모성이 크게 향상되어 SiCp/AC8A복합재료의 경우 마찰속도 3.53m/s에서는 기지재료에 비해 약 6배의 내마모성을 나타내고 있다.

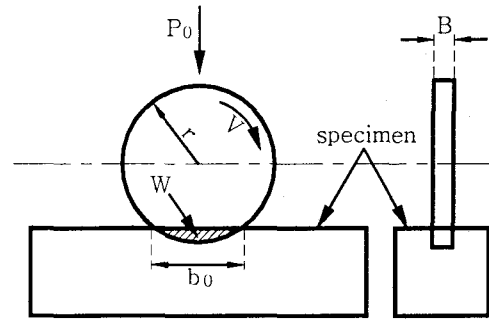


Fig. 1 Schematic illustration of wear tester

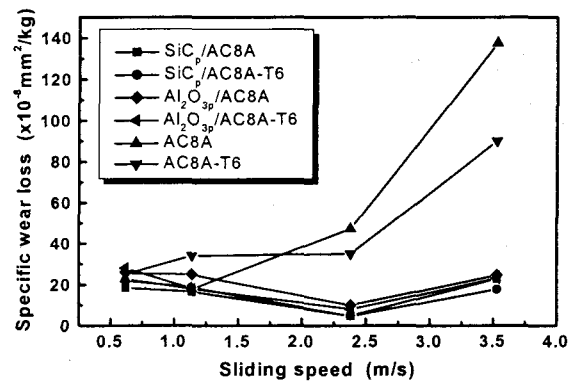


Fig. 2 Variation of specific wear loss of MMCs and AC8A alloy as a function of sliding speed

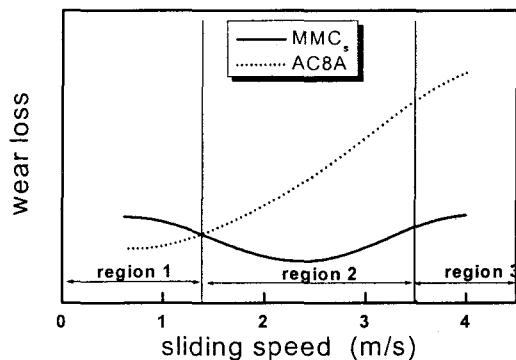


Fig. 3 Schematic illustration of wear loss with sliding speed for AC8A alloy and metal matrix composites

Fig. 3은 금속복합재료와 기지재료인 AC8A합금의 마모특성을 마찰속도 구간별로 나누어 도식적으로 비교한 것이다. 마찰속도

도가 0.62m/s에서 1.14m/s의 저속 영역 1에서는 기지재료가 복합재료보다 내마모성이 좋으나, 마찰속도 1.14m/s 이후부터 금속복합재료의 마모손실은 감소하는데 반해 기지재료의 경우 마모손실이 계속적으로 증가하게 되어 금속복합재료의 내마모성이 기지재료의 내마모성보다 우수하게 된다. 즉 영역 2에서 금속복합재료는 마모손실이 최소로 되는 천이속도를 나타내며 기지재료와의 마모손실 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 한편 마찰속도가 3.53m/s 이상의 고속영역 즉, 영역 3에서 금속복합재료는 저속영역과 비슷한 마모손실을 보이는데 반해 기지재료의 경우 마모손실은 더욱 크게 증가해 마모손실의 차이는 더욱 커지고 있다.

김 등 (김수영 등, 1999)은 이러한 복합재료의 마모특성을, 일정한 마찰거리에 대하여 마모시험편과 상대마모재간의 접촉점에서의 마찰력이 마찰속도의 증가에 따라 점차 낮아지다가 일정해지는 것을 실험적으로 측정하고, 마모에 기여하는 실제 마찰력이 마모가 진행됨에 따라 접촉면적이 증가하면서 감소하기 때문이라고 해석하고 있다.

3.2 입자크기의 영향

Fig. 4는 입자크기 변화에 따른 SiC_p/AC8A복합재료의 미끄럼 속도에 대한 비마모손실을 나타내고 있다. 실험의 결과 마찰속도가 고속인 경우에는 비마모손실의 차이가 거의 없게 나타났으나 그 외의 경우는 입경이 클수록 내마모율이 향상되는 것으로 나타났다. 입경이 클수록 내마모율이 향상되는 결과로 보아, 큰 입자의 경우가 작은 입자 보다 소성변형에 더욱 유효하게 저항할 수 있다는 것을 알 수 있다.

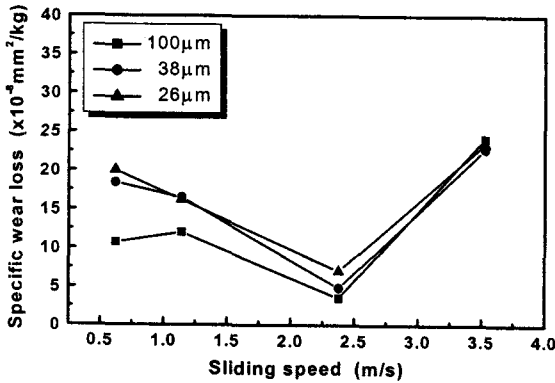


Fig. 4 Variation of specific wear loss of SiC_p/AC8A composites with change of particle size

Fig. 5는 강화상의 입자크기 변화에 따른 SiC_p/AC8A복합재료의 경도값을 나타낸 것이다. 입자크기에 따른 복합재료의 경도값은 입자의 직경이 작아짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 실험의 결과는 일반적인 금속재료의 마모이론에 적용되는 마모율은 재료의 경도에 역비례 한다는 Archard의 법칙과는 달리, 경도가 높은 작은 입자로 복합된 복합재료에서

마모손실이 증가하는 결과를 나타내고 있다. 한편 입자크기가 작을수록 경도값이 증가하는 것은 무가압침법의 제조특성으로, 입경이 작을수록 기지와 계면이 증가하여 계면방응생성물에 의한 결합력이 상승하기 때문이다.

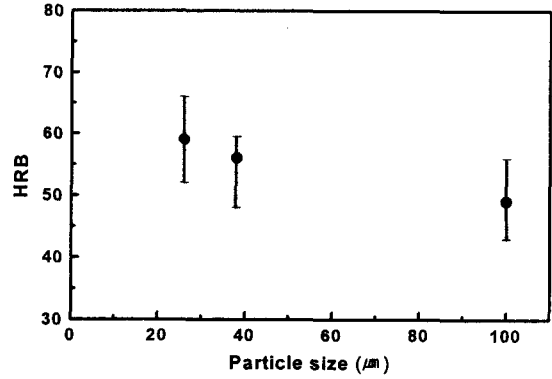


Fig. 5 Variation of hardness of SiC_p/AC8A composites with change of particle size

마모에 관련된 이론에는 접촉중인 여러개 돌출부의 응착에 기초한 식 (2)와 같은 Archard의 응착이론과, 재료는 층(layer)과 층이 마모되고 각 층은 N 개의 벗겨지기 쉬운 판(flake sheet)로 구성되어 있다고 가정하고, 이 층을 제거하기 위해서는 임계미끄럼거리(S_0)가 필요하다는 식 (3)와 같은 Suh의 박리 이론이 있다.

$$V = KLS/3H \quad (2)$$

여기서 V : 마모 체적, K : 강도계수 L : 접선하중, S : 미끄럼 거리, H : 표면의 비커스 경도이다.

$$V = N_1(S/S_{01})A_1h_1 + N_2(S/S_{02})A_2h_2 \quad (3)$$

여기서 h : 박리된 판의 평균 두께, A : 판의 평균 면적, 첨자 1, 2: 서로 미끄러지는 두 재료임.

두 이론은 마모율이 마모표면의 경도에 의존하나 그렇지 않으나 근본적인 차이가 있는데, Archard의 식은 실제 금속복합재료의 실험결과와 일치하지 않는 경우가 많고, Suh의 박리모델은 마모율이 마모면의 경도에 직접적으로 의존하지 않으나 마모율을 정량적으로 예측할 수 없다는 단점이 있다.

Suh의 식 (3)에서 h 는 전위이론으로부터 식 (4)가 얻어질 수 있고, 박리된 판의 면적 A 는 식 (5)와 같은 관계가 있으므로, 마모체적 식 (3)은 식 (4)와 (5)에 의해 식 (6)이 된다.

$$h = \frac{Gb}{4\pi(1-\nu)\sigma_f} \quad (4)$$

여기서 G : 전단탄성계수, σ_f : 마찰응력, b : Burger's vector, ν : 뽀아송비

$$NA \propto L \quad (5)$$

$$V = \frac{b}{4\pi} \left[\frac{K_1 G_1}{\sigma_{f1} S_{01} (1 - \nu_1)} + \frac{K_2 G_2}{\sigma_{f2} S_{02} (1 - \nu_2)} \right] LS \quad (6)$$

여기서 K_1 과 K_2 : 기본적으로 표면 지형에 의존하는 상수이다.

이에 Zhang 등 (Zhang 등, 1995)은 입자강화 금속복합재료의 마모식으로 식 (6)와 유사한 식 (7)을 제시하고 있다.

$$V = c_1 LS \quad (7)$$

여기서 c_1 : 금속복합재료의 성질에 관련된 상수이다. c_1 는 복합재 입자의 평균자유경로(λ)의 역에 비례한다고 가정하면 λ 는 입자의 부피분율(V_f)과 평균입자직경(d)로부터 식 (8)이 되므로, 식 (7)은 식 (9)과 같이 된다.

$$\lambda = d \frac{(1 - V_f)}{V_f} \quad (8)$$

$$V = \frac{cLS}{\lambda} = \frac{cLSV_f}{(1 - V_f)d} \quad (9)$$

본 실험의 결과, 박리이론에 근거한 Zhang이 제시한 금속복합재료의 마모에 대한 모델은 유용함을 알 수 있다. 또한 내마모성에 대한 입자 크기의 영향에 대해, Zhang 등은 입자의 크기가 작을 경우 마모율은 주로 경도에 의해 영향을 받지만, 입자의 크기가 큰 복합재료에 있어서는 마모율은 입자크기에 대한 침투깊이에 영향을 받는다고 (Deuis 등, 1996) 해석하고 있다.

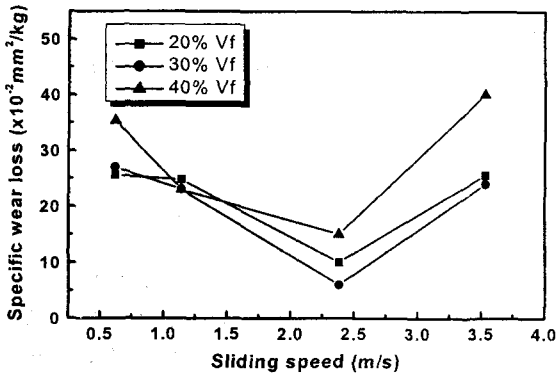


Fig. 6 Variation of specific wear loss of Al₂O_{3p}/AC8A composites with change of volume fraction

3.3 부피분율의 영향

Fig. 6은 부피분율 20%, 30% 및 40% Al₂O_{3p}/AC8A복합재료의 미끄럼 속도에 따른 비마모손실을 나타냈다. 전반적으로 부피분율이 작을수록 내마모율이 향상되는 결과를 보이고 있어, Zhang이 제시한 입자강화 금속복합재료의 마모에 대한 모델식에 따르는 것으로 나타났다.

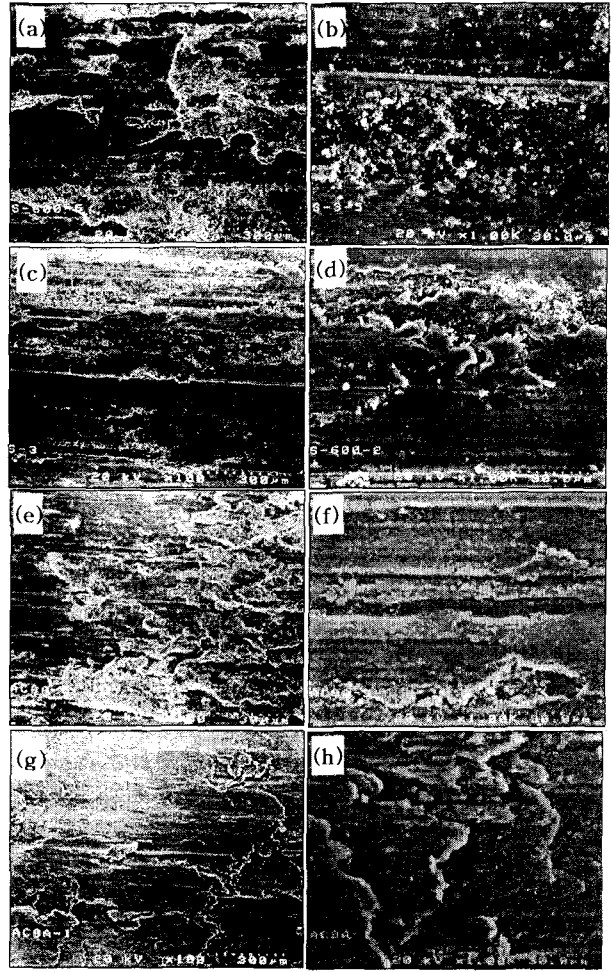


Fig. 7 SEM micrograph of worn surface of SiC_p/AC8A composites and AC8A alloy with different sliding speed : (a),(b),(c),(d) SiC_p/AC8A composites and (e),(f),(g),(h) AC8A alloy, (a),(b),(e),(f) 0.62m/s and (c),(d),(g),(h) 3.53m/s

부피분율에 따른 복합재료의 경도를 측정된 결과 부피분율이 20%, 30% 및 40%로 증가함에 따라 평균경도는 66, 90 및 105 HRB로 증가하였는데, 부피분율의 내마모율에 미치는 영향 역시 Archard의 응착이론에 근거한 식과는 상반된 결과를 나타내고 있다 (Venkataraman 등, 1996, Cordovilla, 1996).

한편 복합재료의 기공율을 점산법에 의해 측정된 결과 부피분율이 증가함에 따라 평균기공율은 각각 2.2%, 2.7%, 7.7%로 증가하는 것으로 나타났는데 (김재동 등, 2000), Fig. 6에서 부피분율이 40%인 복합재료의 경우 비마모손실이 상당량 증가하는 것은, 복합재료 내의 기공이 마찰시 균열의 핵으로 작용하여 마모를 가중시킨 결과라고 생각된다.

3.4 마모기구 해석

Fig. 7은 SiCp/AC8A복합재료와 기지재료인 AC8A합금의 마찰속도에 따른 마모흔을 비교한 것이다. SiCp/AC8A복합재료의 경우 마찰속도에 무관하게 전반적으로 연삭마모를 보이고 있으나, 마찰속도가 3.52m/s의 경우 고배율의 사진 Fig. 7(d)에서 일부 접촉부분에서 재료의 경미한 응착 현상이 보이고 있다. 한편 저배율 사진 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이, 마찰속도가 0.62m/s로 저속인 경우 마찰시간이 길어짐으로 인해 마모면이 산화된 산화마모의 형상도 보이고 있다.

AC8A합금의 경우는 마찰속도가 0.62m/s로 저속인 경우 Fig. 7(f)에서 보이는 바와 같이 마모면에 굵은 자국이나 홈자국이 나타나는 연삭마모를 보이고 있지만, 마찰속도가 3.53m/s의 고속으로 가면서 Fig. 7(h)에서와 같이 마모면이 밀리고 마찰열에 의해 용융이 일어나는 응착마모를 보이고 있다.

Fig. 8은 미끄럼 속도에 따른 전단응력의 변화와 소성유동 깊이의 관계를 도식화 한 것이다. 마모재가 받는 전단응력은 마모표면에서 가장 크며 하중방향에서 멀어짐에 따라 감소하는데 반해, 마모재의 강도는 하중방향에서 멀어짐에 따라 마찰열의 저하로 증가하게 된다. 마모재의 소성변형은 회전디스크에 의한 전단응력이 마모재의 강도보다 클 때 일어나므로, 소성유동의 깊이는 전단응력과 마모재의 위치에 따른 강도에 의해 결정되어질 것이다. 한편 미끄럼 속도의 증가에 따라 마찰열은 증가하고 마모재의 강도는 감소하게 되는데 이에 따라 전단소성유동이 증가하여 소성유동의 깊이는 증가하게 될 것이다.

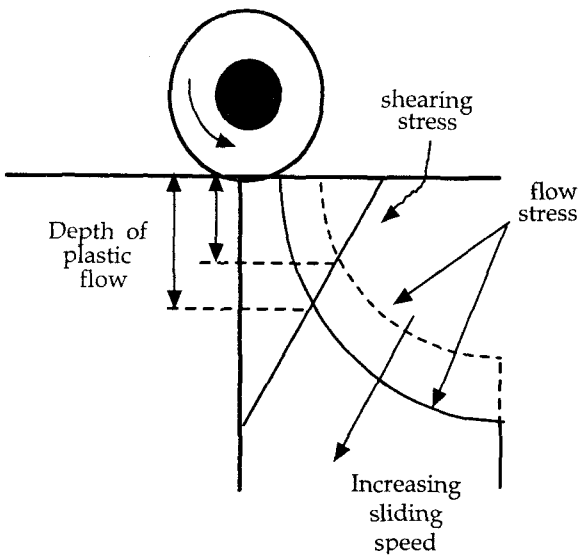


Fig. 8 Schematic illustration of relation between depth of plastic flow and shearing stress with sliding speed

Fig. 9는 AC8A합금의 고속(3.52m/s) 마찰시의 마모면 Fig. 7(h)를 도식화한 것이다. 그림에서 마모면이 미끄럼 방향으로 길이 L 만큼 밀리는 것을 볼 수 있는데 이것은 전단소성유동 응력에 의한 밀림으로 볼 수 있으며, 이러한 밀림면이 h 만큼

의 층이 진 것을 볼 수 있는데 이것은 소성유동의 깊이에 해당될 것이다.

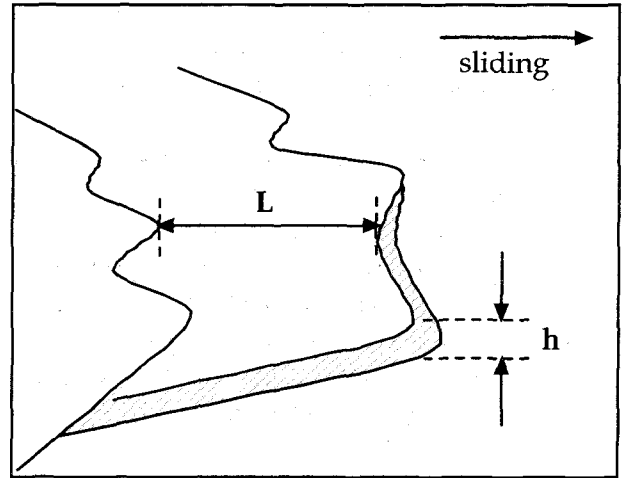


Fig. 9 Schematic illustration of wear pattern developed on wear of AC8A alloy

4. 결론

무가압합침법으로 제조한 입자강화 금속복합재료의 마찰속도 변화에 따른 강화입자 크기와 부피분율의 마모저항에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SiCp/AC8A복합재료는 기지재료인 AC8A합금에 비해 고속의 마찰속도에서 약 5.5~6배의 우수한 내마모성을 나타냈고, 강화상 입자의 크기가 증대됨에 따라 내마모성이 향상되었다.
- (2) Al₂O_{3p}/AC8A복합재료는 강화상의 부피분율이 증대함에 따라 경도는 증가하였고, 반면에 내마모율은 감소하였다.
- (3) AC8A합금은 마찰속도가 증가함에 따라 계속 마모손실이 증가하는데 반해, 입자강화 금속복합재료는 저속에서는 AC8A합금에 비해 내마모성이 저하하였으나 중속 영역에서 마모손실이 최소가 되는 천이점이 나타났으며, 고속에서도 저속에서와 비슷한 마모손실을 나타냈다.
- (4) AC8A합금의 경우 마찰속도가 저속인 경우 연삭마모를 보이지만, 마찰속도가 고속으로 가면서 마모면이 밀리고 용융이 일어나는 응착마모를 나타냈으며, SiCp/AC8A복합재료는 고속마찰시 일부 국소지역에서 응착에 의한 마모면이 발견되거나 전반적으로 연삭마모의 마모면을 나타냈다.

후 기

본 연구는 경상대학교 해양산업연구소의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다

참 고 문 헌

- Zhang, Z. F., Zhang, L. C. and MAI, Y. W. (1995), "Wear of ceramic particle-reinforced metal-matrix. part 1 Wear mechanism", J. of Mat. Sci., Vol. 30, pp. 1961-1966.
- Ma, Z. Y., Liang, Y. N., Lu, Y. X. and Bi. J. (1996), "Sliding wear behaviour of SiC particle reinforced 2024 aluminium alloy composites", Mat. Sci. and Tech., Vol.12, pp.751-756
- Cordovilla, G., Narciso, J. and Louis, E. (1996), "Abrasive wear resistance of aluminium alloy/ceramic particulate composites", Wear, Vol. 197, pp. 170-177.
- Sannino. A. P and Rack. H. J. (1996), "Tribological investigation of 2009 Al-20 vol.% SiCp/17-4 PH Part I: Composite performance", Wear, vol. 197, pp. 151-159.
- 김수영, 조영기, 이희태, 조경목 (1999), "SiC 입자강화 알루미늄 복합재료의 마멸특성", 대한금속학회, 제37권 제4호, pp.474-481.
- Zhang, Z. F., Zhang, L. C. and MAI, Y. W. (1995), "Particle effects on friction and wear of aluminium matrix composites", J. of Mat. Sci., Vol. 30, pp. 5999-6004.
- Deuis. R. L., Subramanian. C, and Yellup, J. M. (1996), "Abrasive wear of aluminium composites-a review", Wear, Vol.201, pp. 132-144.
- Venkataraman. B. and Sundararajan. G. (1996), "The sliding wear behaviour of Al-SiC particulate composites.- Macro behaviour", Acta. Mater., Vol. 44, No. 2, pp. 451-460.
- Cordovilla, G., Narciso, J. and Louis, E. (1996), "Abrasive wear resistance of aluminium alloy/ceramic particulate composites", Wear, Vol. 197, pp. 170-177.
- 김재동, 고성위, 정해용(2000), "무가압침침법에 의한 Al₂O₃p/AC8A복합재료의 제조 및 특성", 한국복합재료학회, 제13권 6호, pp.1-8

2002년 10월 17일 원고 접수

2002년 11월 1일 최종 수정본 채택