

급냉응고 Al-20Si-5Fe-2Ni 합금의 조직, 경도 및 마모특성에 관한 연구

이상용, 이정환, 이영선, 신평우*

한국기계연구원 재료공정연구부

*창원대학교 재료공학과

A study on the characteristics of microstructure, hardness and wear of rapidly solidified Al-20Si-5Fe-2Ni materials

S.Y.Lee, J.H.Lee, Y.S.Lee, P.W.Shin*

Department of materials processing, KIMM

* Department of materials engineering, Changwon national university

Abstract

Characteristics of microstructure, hardness and wear of two Al-20Si-5Fe-2Ni materials produced by powder metallurgy and spray forming respectively were studied at temperatures up to 560°C. Above 300°C, the microstructure of powder processed alloy became inhomogenous, whereas the spray formed alloy showed homogeneous microstructures. Hardness of both alloys was increased between 300°C~490°C in both alloy. It was interpreted that increase in hardness was mainly related to the formation of stable and fine intermetallic phase from metastable one. It was showed that homogeneity of microstructure in the rapidly solidified affected directly wear property.

1. 서론

고규소 알루미늄 합금은 내마모특성 및 저열팽창계수등으로 그 응용분야 및 수요가 증대하고 있으나 기존 주조 방법으로는 조직의 조대화를 피할수 없기 때문에 요구되는 특성에 부합되는 합금제조가 불가능하다. 이와 같은 문제를 해결하는 합금제조 방법으로 급냉응고법의 적용이 필수적이다. 급냉응고법의 대표적인 것으로 분말야금(powder metallurgy, P/M)법을 들 수 있다. 분말야금법은 공기, 질소 또는 불활성가스를 불어넣어 용융금속을 미세하게 분사시키며 가스에 의해 $10^3 \sim 10^5$ K/sec 정도의 급냉효과를 얻어 조직을 미세화하는 방법이다. 그러나 분말야금법에 의해 제조된 알루미늄 분말은 그 표면에 산화피막이 형성되어 있어 이를 제거하기 위해 보통 탈가스, 소결 또는 Hot pressing 등의 복잡한 공정을 거쳐야 한다. 분무성형(spray forming, S/F)법은 분말야금법과 유사한 방법으로 용융금속을 분사시키지만 분말야금법과 다른점은 분사된 용융입자의 대부분이 완전히 응고되기전 기판(substrate)에 적층되어 빌렛, 튜브등과 같은 형상으로 예비성형체를 제조할 수 있으며 거의 질소 분위기에서 이루어 진다. 분무성형법은 급냉응고에 의한 결정립제어를 통해 고품위 소재개발의 가능성 뿐 만 아니라 제조 공정이 분말야금법에 비해 크게 단축되는 장점이 있다. 편석의 가능성이 큰 합금을 분무성형법으로 제조하는 경우 편석이 적고 결정립 또한 미세화 시켜 기계적 성질을 크게 향상시킬 수 있는 공정 기술이다. 고규소 알루미늄 합금의 경우 다른 합금에 비해 분무성형법의 적용이 가장 빠른 발달속도를 보이고 있다. 알루미늄 합금의 분말야금법에서는 필수적으로 산화문제가 제기되지만 분무성형법에서는 이와 같은 문제가 적기 때문에 고품위 알루미늄 합금제조에 응용이 크게 확대되고 있다^(1,3). 분말야금법에 비

해 우수한 경제성에도 불구하고 현재까지는 분무성형법에 의해 제조된 고규소 알루미늄 합금의 일반적인 사용온도 범위인 300°C 정도까지는 기계적 성질이 미소한 차이로 열세인 것으로 나타나고 있다⁽³⁾. 그러나 300°C 이상에서 분말야금법과 분무성형법에 의해 제조된 고규소 알루미늄 합금의 조직, 경도 및 마모특성에 대한 비교는 정확히 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 분말야금법 및 분무성형법에 의해 제조된 Al-20Si-5Fe-2Ni 합금을 대상으로 고온영역에서의 조직과 경도 및 마모특성을 비교해 봄으로써 300°C 이상에서의 응용가능성을 검토해 보고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 독일 PEAK회사로 부터 그림 1과 같은 제조공정을 통해 각각 분말야금법 및 분무성형법으로 급냉응고 된 후 압출을 거친 Al-20Si-5Fe-2Ni 합금을 사용하였다. 표 1에는 압출소재에 대한 성분분석결과를 나타내었다. 고온에서의 조직변화를 보기위해 300°C ~ 560°C 범위에서 5~30분 가열하였으며 경도에 미치는 냉각속도의 영향을 보기위해 냉각방법도 수냉·공냉·로냉으로 변화시켰다. 가열처리된 소재의 경도는 HRB30T를 이용하여 측정하였다. 마모시험은 pin on disk형 시험기를 이용 무윤활 상태에서 수행하였다. 시편은 직경 1cm, 길이 1.5cm의 봉상형태였으며 실험의 정확성을 기하기 위하여 끝부분을 둥근 구형으로 가공하여 사용하였다. 상대재로는 SKD 11종의 원판(직경 4.2cm, 두께 8mm)을 사용하였으며 연마를 통해 조도를 일정하게 유지하였다. 시편의 온도는 외부에서 열전대(K-type)를 삽입하여 시편이 주행하는 부분의 표면온도를 측정하였다. 마모시험온도는 조직 및 경도의 변화가 심한 400°C ~ 490°C 사이의 온도인 400°C, 450°C, 480°C로 정하였으며 평가방법으로 각 조건에서의 마찰계수의 평균값을 구하여 비교하였다. 아울러 마모 부스러기(wear debris)를 SEM으로 관찰하여 마모특성과 조직과의 관계를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가열처리조직

그림 2에는 본 연구에 사용된 분말야금 및 분무적층 Al-20Si-5Fe-2Ni 합금에 대해 각각 급냉응고 및 압출된 상태의 조직을 나타내었다. 분말야금합금의 경우 급냉응고된 분말상태의 조직(그림 2a)을 보면 침상조직이 대부분이고 구형의 입자가 일부 포함되어 있다. SEM 및 XRD 분석에 의하면 구형의 입자는 초정 Si이며 침상조직은 준안정한 Al-Fe-Si 금속간 상(δ -Al₃FeSi₂)으로 나타났다. 침상조직과 초정 Si은 빠른 냉각속도로 인해 공정반응이 완료되지 않은 상태로 응고된 기지조직에 균일하게 분포되어 있다. 분무성형상태의 조직(그림 2b)은 초정 Si의 양 및 크기는 증가하고 침상조직은 길이에 있어 감소된 경향을 보이고 있다. 이와 같은 차이는 급냉응고 속도 및 응고특성의 차이로 설명할 수 있다. 즉 분무성형에서는 가스에 의해 분무된 액적이 완전히 응고되지 않은 상태에서 기판(substrate)에 적층되고 적층표면은 반응용상태로 존재하다가 냉각되므로 분말야금에 비해 냉각속도가 10¹~10² K/sec 정도 낮다. 따라서 분말야금합금이 분무성형합금에 비해 더 미세한 조직을 갖게 된다. 이와 같은 차이는 압출재의 조직의 크기에 그대도 유지된다. 분말야금합금과 분무성형합금의 초기 조직은 형상과 크기에 있어 차이는 있지만 상의 종류는 유사하며 압출후에는 침상조직이 압출온도(약 350°C) 및 극심한 소성변형(압출비 10:20:10으로 조직이 미세하게 부서지고 표면에너지 감소를 위해 거의 구형으로 변한다. 압출된 상태에서 입자크기는 분말야금합금이 평균 0.75 μ m, 분무성형합금이 1.25 μ m으로 SEM 및 Image Analyzer 분석을 통해 조사되었다. 이와 같은 입자크기의 차이는 상온~300°C 사이의 기계적성질에서 분말야금합금이 분무성형합금에 비해 약간 우세하게 나타나는 원인이 된다. 그림 3은 분말야금 및 분무성형 압출재를 300°C ~ 560°C 범위에서 30분간 가열후 냉각시킨 조직을 보여주고 있다. 분말야금 및 분무성형합금 모두 300°C ~ 490°C 범위에서는 조직의 형상 및 크기에 뚜렷한 변화가 관찰되지 않은 반면 560°C에서는 조대화가 일어나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 SEM 및 EPMA, XRD, DSC 분석에 의하면 300°C부터 Si의 Al기지내의 재용해가 진행되고 400°C 이상에서는 준안정한 Al-Fe-Si 금속간 상(δ -Al₃FeSi₂)이 안정한 β -Al₃FeSi 상으로의 변태가 촉진되며 480~490°C 이상에서는

조직의 조대화가 지배적인 영향을 미치는 것으로 밝혀지고 있다⁽²⁾. 300℃~560℃ 사이의 복잡한 미세조직의 변화는 경도 및 마모특성에 직접영향을 미치는 것으로 나타난다. 광학현미경에서 관찰할 수 있는 분말야금합금과 분무성형합금의 조직에 있어 차이점은 조직의 불균일성을 들 수 있다. 즉 분말야금합금이 분무성형합금에 비해 온도가 증가할수록 조직이 불균일해지고 있음을 관찰할 수 있다. 이와 같은 현상은 특히 공기분위기에서 제조된 분말에서 일어나기 쉬운 것으로 알려져 있다. 즉 공기중에서 분말제조시 불활성 분위기에서 보다 제조된 분말 입자가 그 형상 및 크기에 있어 불규칙해지는 경향이 높으며 각각의 분말에서의 조직 및 조성의 차이를 야기한다. 분말제조후 탈가스, 소결 또는 Hot pressing 및 압출을 거치는 과정에서도 매우 세심한 분말입도 조건, 공정조건을 선정하지 않으면 조직 및 조성의 불균일성이 증폭될 수 있다고 본다. 분무성형합금의 경우 예비성형체로 적층시 일단 재용융과정을 거친후 냉각되어 조직 및 조성이 분말야금합금에 비해 훨씬 균일한 조직 및 조성이 얻어지게 된다.

3.2 경도특성

경도는 강도 및 마모특성과 밀접한 관련을 가지는 기계적 특성이다. 온도가 증가하면 경도는 감소하는 것이 일반적이다. 급냉용고 고규소 알루미늄 합금의 경우 그림 5, 6에서와 같이 온도증가에 따라 경도는 감소하지 않고 오히려 증가하는 경향을 보였다. 즉 상온에서 300℃까지 변화가 거의 없다가 300℃정도 부터 미소한 증가가 일어나며 350~400℃이상에서 뚜렷한 증가를 보이고 450~500℃사이에서 최대값을 나타내고 500℃이상에서는 급격히 감소하고 있다. 고온에서의 경도의 증가는 수냉시에 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이와 같은 경도증가를 냉각에 따른 잔류응력증가에 기인하는 것으로 해석 할 수 있으나 로냉과 같은 낮은 냉각속도에서도 경도의 뚜렷한 증가는 냉각효과로만 설명할 수 없다. 고규소 알루미늄 합금의 고온에서의 경도증가는 가열처리조직에서 언급한 바와 같이 미세조직의 변화와 직접적으로 관계가 있는 것으로 판단된다. 즉 300℃~350℃에서 활발해지는 준안정한 Al-Fe-Si상(δ -Al₄FeSi₂)의 안정한 상(β -Al₃FeSi)으로의 변태가 경도에 직접적으로 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 이와 같은 변태는 400℃~500℃에서 지배적인 조직변화기구로 밝혀지고 있다. 물론 이 온도범위에서도 입자성장은 일어나지만 그 영향은 500℃까지는 미미하며 500℃이상에서는 상변태보다는 입자의 조대화가 지배적인 영향을 미치게 된다는 것을 경도의 급격한 감소로 부터 알 수 있다. 냉각속도에따라 최대경도값을 나타내는 온도가 차이가 있는 것은 고온에서의 유지시간의 차이와 잔류응력 제거효과가 중첩된 결과라고 볼 수 있다. 분말야금합금이 분무성형합금에 비해 절대 경도값이 높게 나타나는 것은 입자크기의 차이에 기인하는 것으로 해석할 수 있다.

3.3 마모특성

분말야금법과 분무성형법에 의해 각각 제조된 두 Al-20Si-5Fe-2Ni소재 모두 약 400~490℃ 범위에서 경도증가현상이 나타났으며 500℃이상에서는 경도가 급격히 감소하였다. 경도상승은 마모저항의 증가를 일으키며 따라서 마찰계수도 그에 상응하여 낮아진다. 분말야금 및 분무성형 Al-20Si-5Fe-2Ni 소재에 대해 상온에서 수행한 마모실험 결과⁽⁴⁾에서는 분말야금합금이 분무성형합금보다 마모저항성이 큰 것으로 나타났으며 이는 분말야금합금의 입자가 더 미세한 것에 기인한다고 사려된다. 본 실험에서 수행된 고온 마모시험에서는 조직 및 경도의 변화가 심한 400~490℃범위에서 마모시험조건에 따라 분말야금 및 분무성형 Al-20Si-5Fe-2Ni소재의 마모특성이 상온과는 다르게 나타났다.

그림 6에는 분말야금 및 분무성형합금의 주행속도 100rpm에서의 마모시 마찰계수에 미치는 온도의 영향을 나타내었다. 400℃, 450℃에서는 분말야금합금의 내마모성이 분무성형합금보다 우수한 것으로 나타났으나 450℃~480℃에서는 분말야금합금의 내마모성이 온도가 증가할수록 크게 떨어져 분무성형합금과 유사한 마찰계수값을 보이고 있다. 달리 표현하면 분무성형합금은 온도증가에 따라 마찰계수값이 일정하게 변하는 반면, 분말야금합금은 특정온도범위에서 비교적 급격히 변화한다. 이는 조직관찰에서 언급한 바와 같이 분말야금합금의 조직이 고온에서 불균일해지는

현상과 관련이 있음을 의미하며, 뒤에 언급될 400℃ 및 450℃에서의 주행속도에 따른 마모특성 변화와 마모 debris의 SEM 조직관찰결과와 잘 일치한다.

그림 7은 400℃ 수행한 분말야금 및 분무성형합금에 대한 마모시험에서 주행속도에 따른 평균 마찰계수를 측정한 결과이다. 분무성형합금에서는 주행속도가 증가함에 따라 마찰계수가 일정하게 감소하였다. 반면 분말야금합금에서는 100rpm~300rpm 구간에서는 주행속도가 증가할수록 마찰계수값이 감소하였으나 300rpm 이상에서는 급격히 증가하여 분무성형합금보다 마찰계수가 커지는 것을 볼 수 있다. 450℃에서는(그림 8) 주행속도가 증가할수록 분말야금합금의 마찰계수는 더 커져 600rpm에서 분무성형합금의 마찰계수값과 0.1이상의 차이를 보였다. 결과적으로 분무성형합금이 400℃~450℃ 구간에서는 분말야금합금에 비해 고속일수록 내마모성이 우수해지고 있음을 알 수 있다.

마모특성과 마찰계수값의 연관성은 마모시험후의 debris의 조직을 관찰해 봄으로써 더욱 확실하게 나타났다. 본 실험에서 사용한 pin on disk형 시험기는 마모 debris들이 용이하게 제거되므로 수집하기가 힘들었다. 실제로 연삭마모시 나오는 작은 debris는 쉽게 제거되고 제거되지 않고 시편 표면이나 상대재 표면에 남아있는 상대적으로 그 크기가 큰 판상의 debris들을 수집하여 관찰하였다. 분말야금합금은 300rpm을 전후하여 내마모특성이 급격히 저하되는 반면, 분무성형합금은 고속에서도 내마모특성이 지속적으로 향상되는 데 이와 같은 반전현상이 두드러지는 400℃, 450℃에서 300 및 600rpm의 조건에서 실험한 시편을 선택하여 마모debris를 SEM으로 관찰하였으며 그림 9에는 450℃에서의 SEM조직을 나타내었다. 분말야금합금의 마모 debris(그림 9a)는 소성변형을 일으켜 길게 늘어져 있는 것과 덩어리 채로 빠져 나간 것들이 있는데 덩어리 채로 빠져 나간 것들은 기지조직과 Si입자 및 금속간 상들이 서로 뒤엉켜져 있다. 일부debris에는 균열이 보이는데 이는 표면의 마찰열에 의해 생성된 열응력으로 발생된다⁽⁵⁾. 내마모특성이 상당히 떨어지는 고속(600rpm)에서의 분말야금합금의 debris는 대부분 덩어리 채로 이탈되고 있고, seizure현상이 아주 심하게 나타나 있는 것도 관찰되어 마모면의 손상된 부분과 일치하고 있다. seizure현상은 대체적으로 소성변형이 일어난 다음 단계에 일어나며 내마모특성에 악영향을 끼친다^(6,7). 분무성형합금의 마모debris는 고속일수록 이탈된 debris들이 덩어리 채로 빠져 나오기보다는 소성변형에 의해 길게 늘어지거나 퍼져 있다. 또한 600rpm에서의 마모 debris에서는 덩어리 채로 빠져나온 것들을 거의 찾아 볼 수 없고 seizure현상도 관찰되지 않았다.

분말야금 및 분무성형합금의 고온에서의 마모특성의 차이는 조직의 균일성에서의 차이로 설명할 수 있다. 분말야금합금의 경우 냉각속도에 의해 더 미세한 분산상을 얻을 수 있지만 조직의 균일성이 분무성형합금에 비해 떨어지며 이와 같은 차이는 고온으로 갈수록 커진다. 분무성형합금은 입자간의 결합력도 강하며 미세기공과 산화가 거의 없고 분산상은 상대적으로 크지만 구형에 가깝고 아주 균일하게 분포되어 있다. 즉, 400℃~450℃, 300rpm에서는 상대적으로 분산상이 미세한 분말야금합금이 마모저항에 기여하지만 주행속도가 증가하면 조직의 불균일성으로 인해 쉽게 덩어리채로 기지조직에서 이탈하게 되며 "sezure"현상도 나타난다. 이에 비해 분무성형합금은 분산상의 크기는 상대적으로 크지만 균일한 조직과 연성의 증가로 고속에서도 마모에 대한 저항이 커진다.

4. 결론

분말야금법과 분무성형법에 의해 각각 제조된 고규소 Al합금(Al-20Si-5Fe-2Ni)에 대해 고온에서의 조직과 경도 및 마모특성의 관계를 분석하였다. 입자크기로 볼때는 분말야금합금이 분무성형합금에 비해 미세한 것으로 나타났다. 이는 두 제조공정에서의 냉각속도의 차이에 기인하며 따라서 상온~300℃ 범위에서 분말야금합금의 기계적성질이 분무성형합금에 비해 우수하게 나타난다. 그러나 300℃ 이상의 온도에서는 분말야금합금의 조직은 불균일해지는 경향이 크고 이것은 경도, 마모특성에 악영향을 미치는 것으로 분석되었다. 따라서, 300℃ 이상의 사용온도의 경우 분말야금합금의 조직 및 조성이 균일하지 않은 상태에서는 적정치 않다. 반면 분무성형합금의 경우

300~490℃ 범위에서도 조직은 균일하게 유지되고 있고 상변태로 인한 경도 및 마모특성의 향상도 얻어질 수 있어 300℃ 이상의 고온에서의 사용범위도 확대될수 있는 장점을 가지고 있다고 판단된다.

5. 참고문헌

- (1) Metal Powder Report, Jan. 1994, p.26
- (2) J. Zhou, J.Duszczuk, B.M.Korevaar, 1991, J. of Mat. Science, 26, p.5275
- (3) F.Hehmann, et.al., 1990, Proc. of PM World Congress, Vol.1, p.216
- (4) 박원욱 외, 1995, "신용고 성형기술 개발 및 응용", 과학기술처 연구보고서
- (5) D.J.Fredrick, J.H.Huang, 1982, Wear 79, p.107
- (6) K. Kondoh, Y.Takeda, 1993,Proc. of PM World Congress, p.567
- (7) P.J.Blaus, 1989, "Friction and Wear Transitions of Materials", Noyes Publication

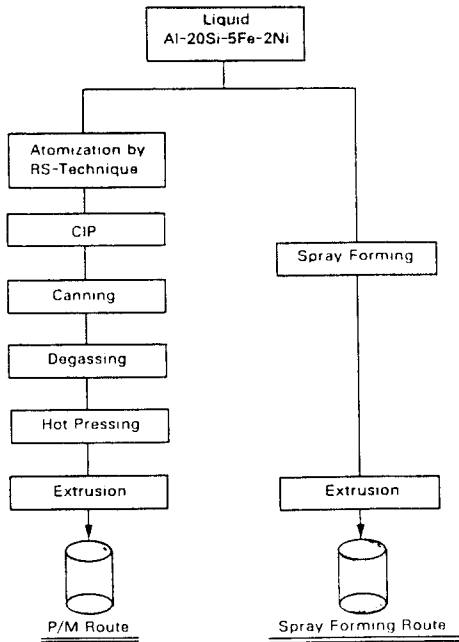


Table 1. Chemical composition of powder processed(P/M) and spray formed(S/F) Al-20Si-5Fe-2Ni extrudates

Production process	Chemical composition in wt.%						
	Al	Si	Fe	Ni	O ₂	N ₂	C
P/M	Balance	20.0	5.36	2.01	0.024	0.046	0.003
S/F	Balance	20.4	5.11	1.87	0.013	0.017	0.001

Fig. 1 Processing routes for Al-20Si-5Fe-2Ni extrudate production

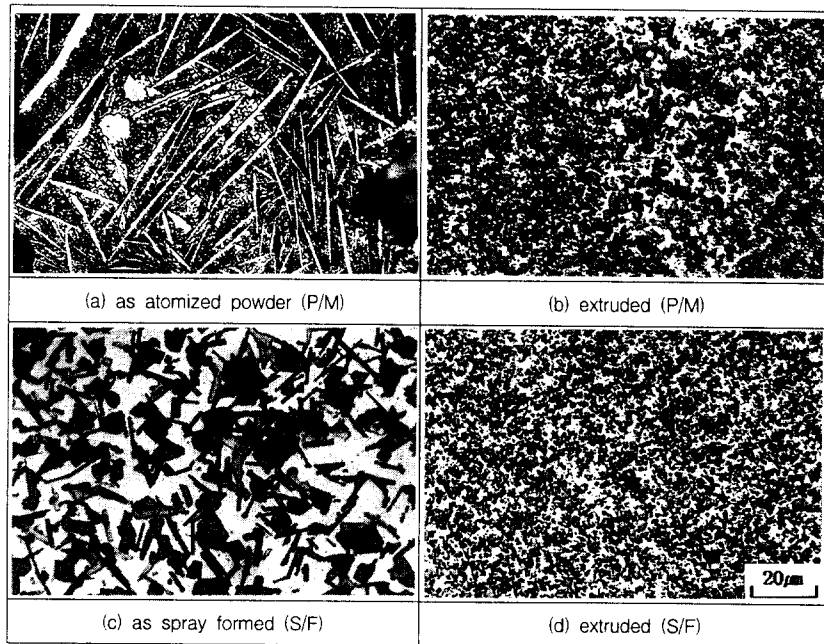


Fig. 2 Microstructures of rapidly solidified Al-20Si-5Fe-2Ni materials

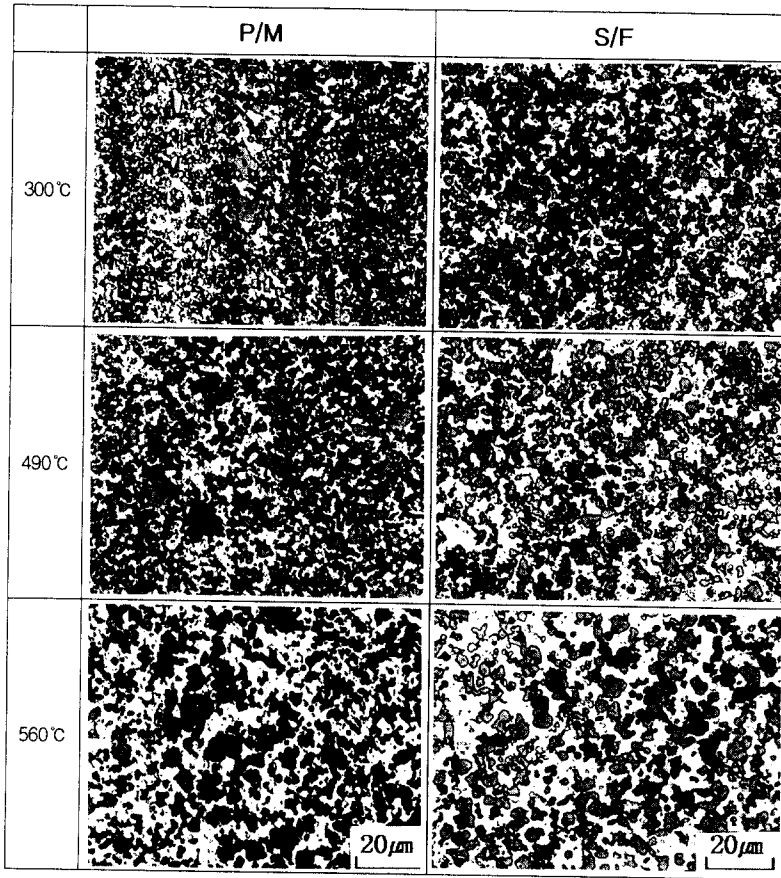


Fig. 3 Microstructure of the powder processed(P/M) and the spray formed (S/F) Al-20Si-5Fe-2Ni alloys

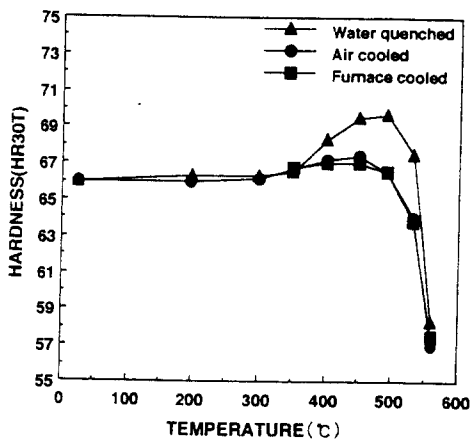


Fig. 4 Effect of temperature and cooling rate on hardness of P/M Al-20Si-5Fe-2Ni

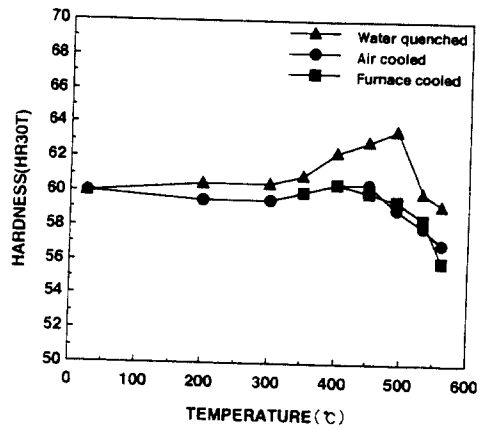


Fig. 5 Effect of temperature and cooling rate on hardness of S/F Al-20Si-5Fe-2Ni

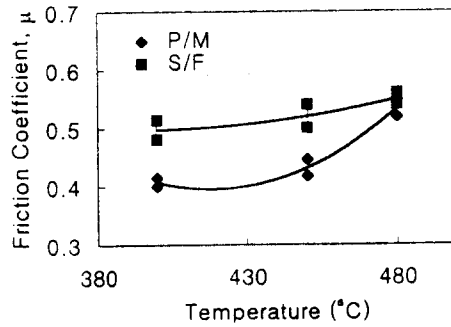


Fig.6 Friction factor of the powder processed(P/M) and the spray formed (S/F) Al-20Si-5Fe-2Ni as a function of temperature

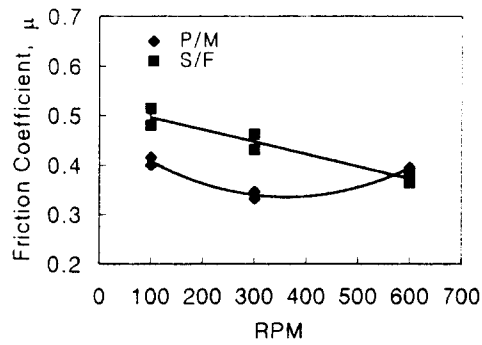


Fig.7 Friction factor of the powder processed(P/M) and the spray formed (S/F) Al-20Si-5Fe-2Ni at 400°C as a function of sliding speed

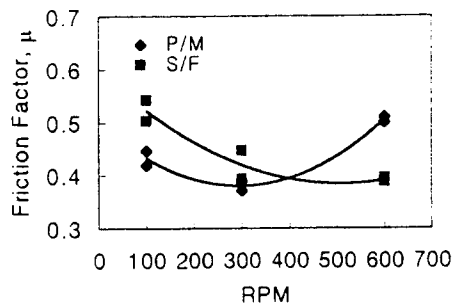


Fig.8 Friction factor of the powder processed(P/M) and the spray formed (S/F) Al-20Si-5Fe-2Ni at 450°C as a function of sliding speed

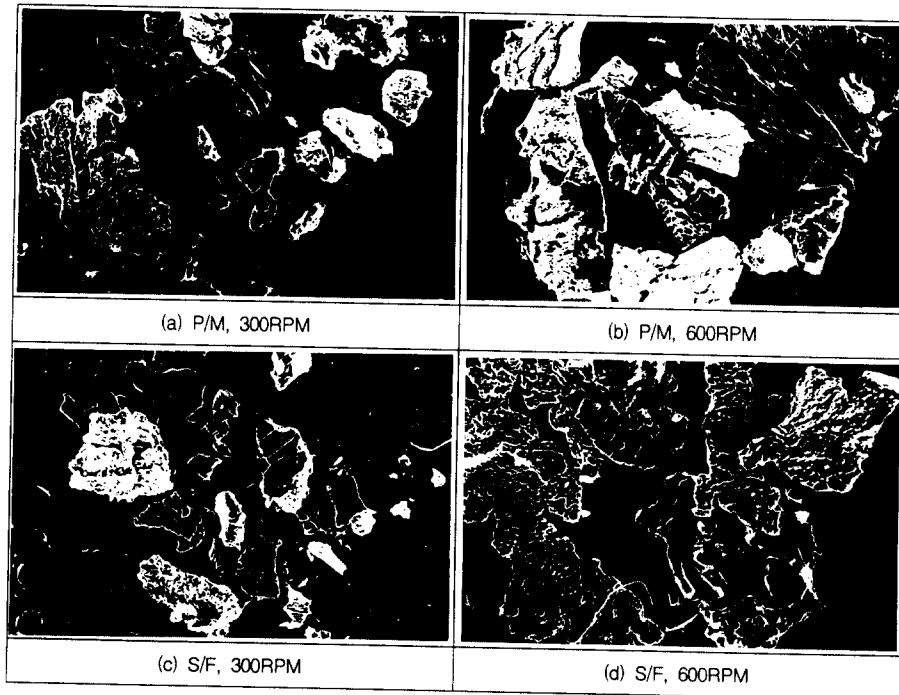


Fig. 9 SEM photographs of wear debris of the gas atomized(P/M) and the spray formed(S/F) AL-20Si-5Fe-2Ni after wear test for 500sec at 450°C