

급속응고 Al-20wt%Si-5wt%Fe 합금분말 압출재의 강도에 관한 연구

김택수 · 홍순직 · 김원태 · 천병선
충남대학교 급속응고 신소재연구소

Fabrication of Rapidly Solidified Al-20wt%Si-5wt%Fe Alloy Powder and Mechanical Properties of its Extrudates

T. S. Kim, S. J. Hong, W. T. Kim and B. S. Chun
Rapidly Solidified Research Center, Chungnam National University,
Taejeon 305-764, Korea
(Received February 16, 1994)

ABSTRACT Optical microstructures and mechanical properties of N₂ gas atomized Al-20Si-5Fe alloying powder and its hot extrudates were studied on 3 different types of powder size distribution. This powder showed the size distribution of 10~210 μm. Also the microstructures of α-Al, primary and eutectic Si and needle shaped intermetallic compounds were observed by optical microscope. These needle shaped intermetallic compounds were identified as δ-Al₄FeSi₂ by XRD and EDX analysis. The ultimate tensile strength(UTS) of these alloy extrudates was increased from 324 to 390 MPa with decreasing powder size range from 120~210 μm to 10~64 μm. A value of Micro-vickers hardness was similar to the result of UTS. These extrudates showed better wear resistance than those of Al-20Si-2X(X=Ni, Cr, Zr), although they are insensitive to the size distribution. These results indicate that the presentation of δ-Al₄FeSi₂ intermetallic compounds contributed to the wear resistance improvement.

1. 서 론

과공정 Al-Si 합금은 높은 체적분율을 갖는 Si 입자들이 Al 합금기지에 분산되어 있기 때문에 내마모성 및 인장강도가 우수하고 열팽창 계수가 작아서 자동차산업 및 전자산업 등의 많은 분야에 응용되고 있다. 그러나 고 Si-Al 합금제조시 나타나는 초정 Si의 조대화는 기계적 성질을 크게 저하시키기 때문에, AlCuP, Na, Sr 등의 원소 첨가에 의한 개량치리로 초정 Si를 미세화시키는 방법^{1,2)}과, 급속응고법³⁻⁵⁾을 이용하여 초정 Si를 미세화하고 균일분산 시킴으로서 인장강도와 연성 및 내마모성을 향상시키고자 하는 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 급속응고법은 입자의 미세화, 급속간 화합물 등과 같은 준안정 석출물의 미세화 및 균일분산, 용질원자의

고용증대 등 많은 장점이 있기 때문에 고 Si-Al 합금에 천이원소를 첨가하여 상온 및 고온에서의 물리적, 기계적 성질을 향상시킬 수 있다.⁶⁻⁸⁾ 본 연구에서는 고온에서 열팽창 계수가 작으면서 인장강도와 내마모성을 개선시키기 위하여 Al-20wt%Si 합금에 Fe⁹⁾를 5wt% 첨가한 후 급속응고법에 의해 제조한 분말의 특성을 조사하고 분말 압출재의 미세조직 및 기계적 성질과 관련하여 기초연구를 행하였다.

2. 실험방법

대기중에서 고주파 유도로를 이용하여 Al-20wt% Si-5wt%Fe 모합금을 제조한 후 그림 1과 같이 불활성 N₂ 가스를 냉매로한 급속응고 분무장치에 의해

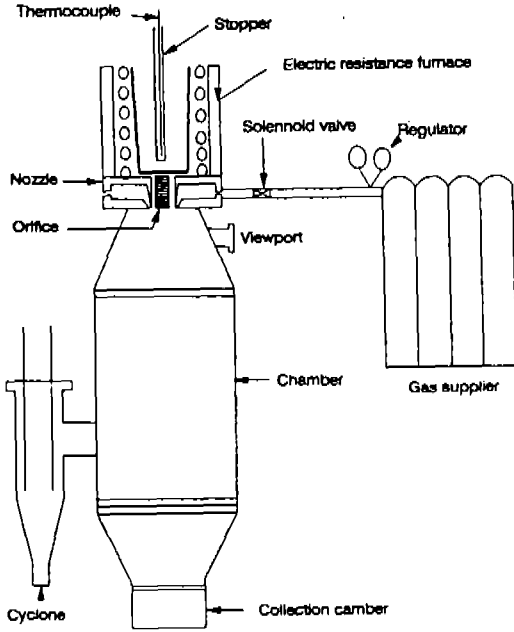


Fig. 1. Schematic diagram of gas atomizer.

냉각속도가 10^2 K/sec 이상으로하여 미세한 분말을 제조하고, 입도에 따른 Al 합금분말의 급속응고 조직을 조사하기 위하여 분말 입자크기가 40, 80, 200 μm 인 분말의 미세조직을 광학 현미경으로 관찰하였다. 급속응고된 분말의 모상 및 석출상을 XRD와 EDX 분석장치를 이용하여 조사하였다.

분말입도 분포에 따른 압출재의 미세조직 및 기계적 성질을 조사하기 위하여 분말을 10~62 μm , 63~120 μm , 121~210 μm 의 3종류로 분급하고 Al canning법을 이용하여, 이론밀도가 60~70% 되도록 160 MPa의 압력으로 냉간성형 하였다. 분말표면의 수화물과 가스를 제거하기 위하여 약 673 K, 10^{-2} torr의 진공 분위기에서 탈가스 처리를 행한 후 밀봉하였고 약 673 K에서 1시간 유지한 후 20:1의 압출비로 열간 압출을 행하였다.

압출재의 기계적 성질을 조사하기 위하여 미소경도 시험, 내마모 시험 및 상온과 고온에서 인장시험을 하였다. 인장시험은 ASTM-subsize 시험편을 가공하여 cross head speed가 0.5 mm/min인 Instron 시험기로 상온과 473 K, 573 K에서 행하였고, 마모상대재는 원통형의 S45C 탄소공구강의 소준 열처리재를 정밀가공하여 사용하였으며 Ohgoshi형 마모

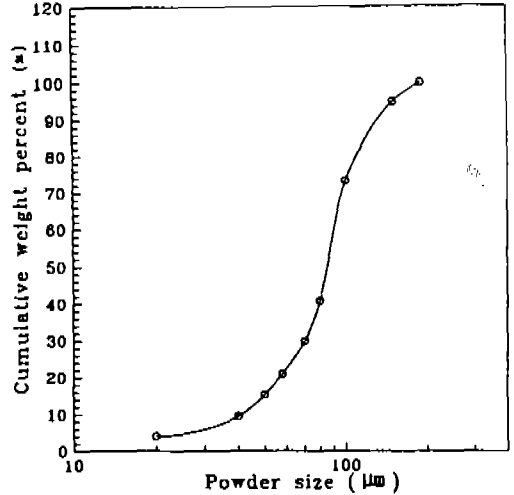


Fig. 2. Cumulative plots for determining medium particle sizes of atomized Al-20Si-5Fe alloy powder.

시험기를 이용하여 마모거리와 하중을 각각 100 m와 2.1 kg으로 일정하게 유지하고 마모 주행속도(sliding speed)를 0.5~3.2 m/s로 변화시키면서 내마모성을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 분말의 입도분포와 미세구조

그림 2는 분사압력 0.8 MPa의 질소가스를 냉매로 하여 급속응고 분무장치에 의해 제조한 Al-20Si-5Fe 합금 분말의 입도분포를 나타낸 것으로써, 분말입자 크기는 10~200 μm 범위의 입도분포로서, 평균입도는 대략 70~80 μm 이었다. 동일한 조건에서 Al-20Si 합금에 천이원소인 Ni, Zr, Cr을 각각 2 wt%씩 첨가하여 같은 조건으로 제조한 분말의 입도분포¹⁰⁾는 합금조성과는 무관하고, 용탕의 온도, 용탕노즐의 직경과, 분무가스의 유속, 압력 및 분사각 등의 급속응고 분무조건에 의해서 영향을 받는다고 사료된다.³⁾

그림 3(a)~(c)는 제조된 Al-20Si-5Fe 합금분말 중에서 분말입자 크기가 200, 80 및 40 μm 의 분말을 채취한 후 연마한 다음 Keller 시약으로 부식하여 관찰한 미세조직으로서, 200 μm 에서는 α -Al, 조대한 초정 Si, 작은 크기의 공정 Si 및 침상형의 석출상으로 혼합되어 있고 냉각응고 과정에서 가스의 방

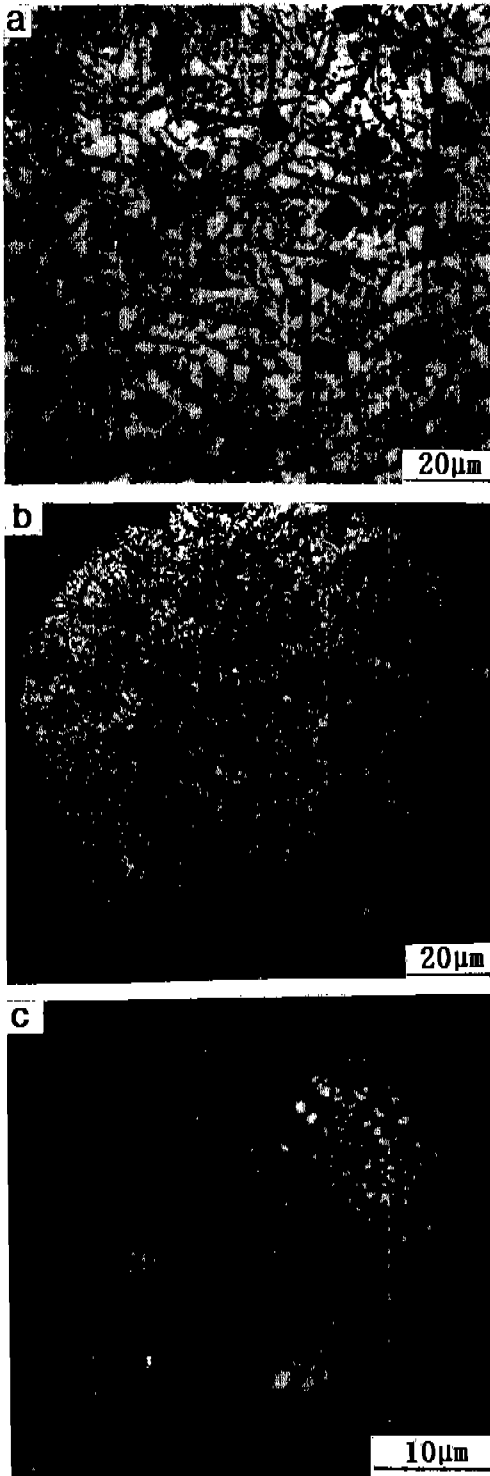


Fig. 3. Optical micrographs of gas atomized Al-20Si-5Fe alloy powder. (a) 200 μm, (b) 80 μm, (c) 40 μm.

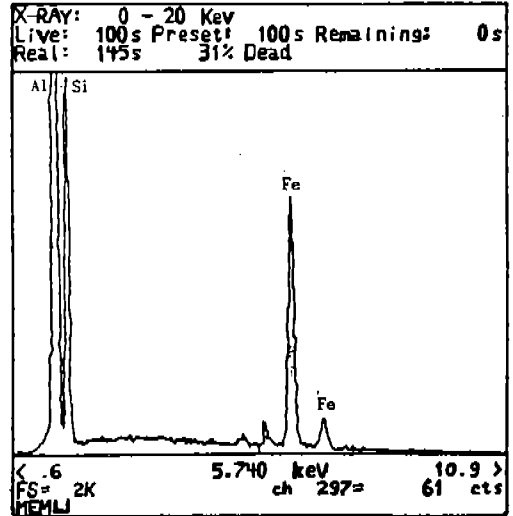


Fig. 4. EDX analysis of a needle shaped particle in Al-20Si-5Fe alloy powder.

출에 의해 국부적으로 공동(cavity)이 형성되어 있음을 알 수 있다. 분말입자 크기가 80 μm로 작아짐에 따라 초정 Si과 침상형 석출상이 미세화 되었으며, 40 μm로 더욱 작아지면 초정 Si과 석출상은 볼 수 없고 degenerate 수지상이라고 생각되는 수지상 사이에 아주 미세한 공정조직이 존재함을 관찰할 수가 있다. 이와 같이 분말입자 크기가 감소할수록 조직이 미세화되는 것은 분말의 비표면적이 증가되어 냉각 속도가 크게 증가하였기 때문이며, 일반적으로 Al 합금분말에서 분말크기가 150 μm에서 50 μm로 감소할 때 냉각속도는 2×10^4 에서 6×10^4 K/s로 증가한다고 알려져 있다.¹¹⁾

동일한 조건에서 제조한 Al-20Si 2원계 합금의 미소조직과 비교할 때 53~88 μm 범위의 분말크기에서는 초정 Si 크기가 5 μm에서 4 μm로 감소하였고, α-Al의 양도 감소하였으며, 미세한 공정 Si은 증가하였는데, 이는 침상형의 조대한 석출상 ($\delta\text{-Al}_3\text{FeSi}_2$)의 출현에 기인한다고 생각된다. 미세분말입자에서 핵생성 전에 일어나는 높은 액상의 과냉과 Al-Si 합금계에서의 비대칭 coupled zone에 기인하여 미세한 공정조직으로 둘러싸인 α-Al 수지상 조직이 관찰되었다. 만일 액상이 coupled zone 이하에서 과냉되면 초정 α-Al이 핵생성되어 수지상 형태로 신속하게 성장한다. α-Al 수지상이 급속하게 성장

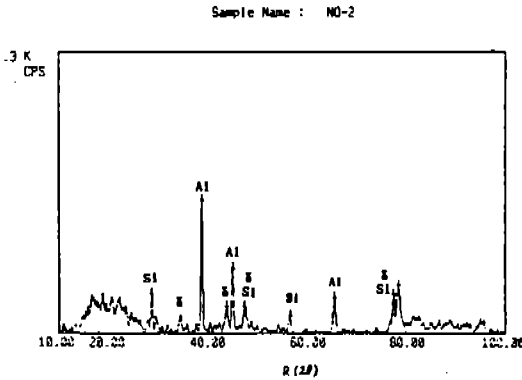


Fig. 5. XRD analysis of Al-20Si-5Fe alloy powder.

되면, 액상의 과냉 정도가 감소하게되어 α-Al 수지상 주위에 미세한 Al-Si 공정조직이 형성된다. 모서리보다 중앙에서 미세한 수지상이 나타나는 것은 성장시 액상의 과냉 정도가 감소하여 α-Al 수지상의 성장속도가 작아졌음을 알 수 있다.

그림 3과 4의 (a)와 (b)에 나타난 것과 같은 침상형의 조대한 석출상을 EDX로 분석한 것으로, 이 석출물은 Al, Si 및 Fe를 함유하고 있으며 평형상인 δ-Al₄FeSi₂¹²⁾라고 사료된다. 그림 5는 Al-20Si-5Fe 합금분말의 X-선 회절 도형으로서, Al, Si 및 δAl₄FeSi₂에 의해 생성된 것으로 해석할 수 있다. 따라서 Al-20Si-5Fe 합금분말에서 관찰된 침상형의 석출물은 a=6.14 Å, c=9.49 Å인 정방정 구조의 Al₄FeSi₂ 상으로 확인되었다. 이와 같은 금속간 화합물의 생성으로 인하여 Al-20Si-5Fe 합금분말에서 관찰된 초정 Si의 크기는 액상형태의 Si이 δ상을 형성하기 때문에 Al-20Si 분말에서의 초정 Si보다 작아졌다.

3.2. 압출재의 미세구조와 기계적 성질

그림 6(a)~(c)는 냉간성형과 탈가스 공정을 거친 분말 압출재의 미세조직을 나타낸 것으로, Al 기지 내에는 초정 Si과 미세하고 구형인 Si 입자 및 δ-Al₄FeSi₂가 존재하고 있다. 그림 6(a)는 초기분말 입도가 121~210 μm인 경우로서, 분말에서 관찰되었던 조대하고 침상형의 초정 Si 및 δ 석출상이 압출에 의해 미세화되고 구형화를 이루고 있음을 볼 수 있다. (b)는 63~120 μm의 조직으로 121~210 μm의 경우보다 다소 미세화되었으며, 10~62 μm 분말의 압출재 조직인 (c)에서는 초정 Si, δ 석출상 및 공정조직이

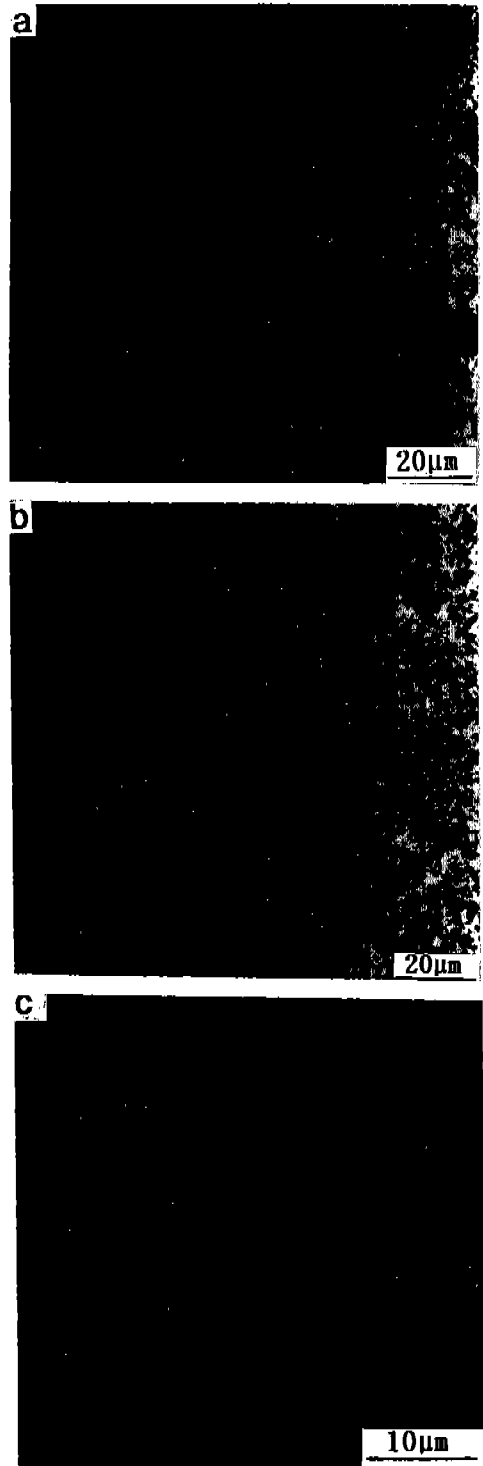


Fig. 6. Optical micrographs of Al-20Si-5Fe alloy powder extrudates. (a) 121~210 μm, (b) 63~120 μm, (c) 10~62 μm.

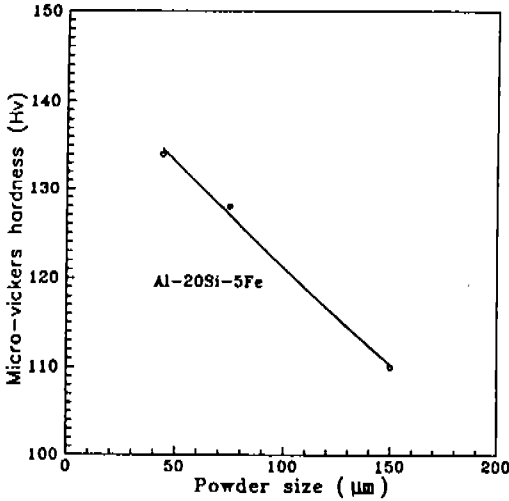


Fig. 7. Variations of microvickers hardness on the particle size distribution of Al-20Si-5Fe alloy extrudates.

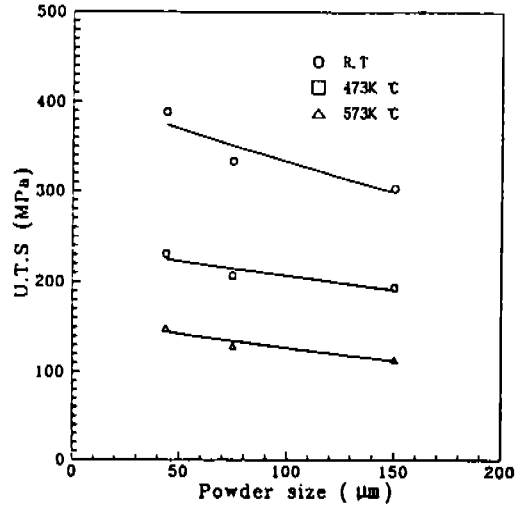


Fig. 8. Variations of ultimate tensile strengths on the particle size distribution of Al-20Si-5Fe alloy extrudates.

상당히 미세해져 있다. 조대한 초정 Si과 δ-Al₄FeSi₂ 결정은 압출공정에 의해 작게 분쇄되고 균일하게 분산되어 압출재의 조직이 미세하고 석출물의 균일한 분포가 형성된 것으로 보아, 압출가공에서 초기 분말 입도가 증가할수록 압출재의 입자크기가 조대화되었다. Al-Si-Fe계 금속간 화합물은 열간단조시 분쇄되지 않아 기계적 성질을 해친다고 알려져 있으나,¹³⁾ 급속응고 분무기술에 의해 제조된 분말은 압출공정에서 Al 기지의 커다란 소성 변형 때문에 금속간 화합물이 작은 입자로 분쇄되어 균일한 분포가 형성되므로 압출재의 기계적 성질을 향상시킨다고 사료된다.

그림 7은 분말 압출재의 미소경도를 나타낸 것으로서, 미세한 분말일수록 냉각속도가 증대되어 용질 원자의 과포화 고용과 석출물의 미세화 등에 의하여 급속응고 분말의 입도가 작을수록 경도값이 증가하였다. 그림 8은 상온과 473 K, 573 K에서의 입도분포에 따른 압출재의 인장강도(Ultimate Tensile Strength)를 나타낸 것이다. 입도가 10~62 μm에서 121~210 μm 증가할수록 분말 압출재의 인장강도는 약 390 MPa에서 약 324 MPa로 감소하고 있으며, 이는 인장강도가 초정 Si과 δ-Al₄FeSi₂의 크기 및 분포에 크게 의존하는데 기인하는 반면, 573 K에서의 인장강도는 상온에 비해 약 1/2 이하로 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 초정 Si과 δ-Al₄

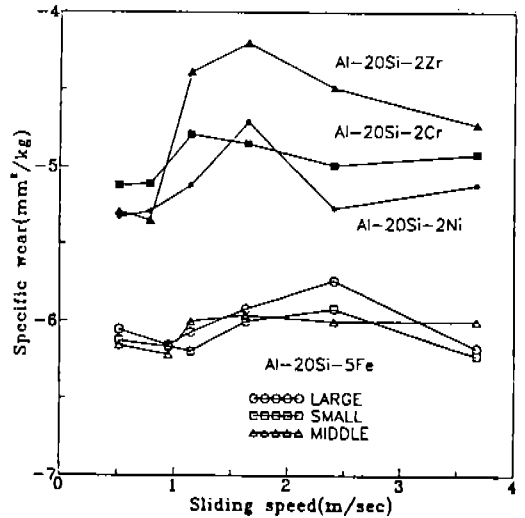


Fig. 9. Variations of specific wear of extrudates with sliding speed.

FeSi₂의 균일한 분산과는 무관하게 온도가 상승할수록 기지의 연화를 일으키기 때문이다.⁴⁾ 특히, 약 573 K에서는 합금의 강도에 큰 영향을 미치는 변형 경화와 동적회복이 균형을 이루기 시작하므로 인장강도가 상당히 저하되고, 인장강도는 압출온도가 증가함에 따라 Al 기지의 미세조직과 분산된 초정 Si의 조대화 때문에 인장강도 역시 감소한다고 알려져

있다.⁴⁾

분말 입도분포가 121~210 μm에서 10~62 μm으로 작아질수록 연신률이 5.6%에서 4.3%으로 낮아졌는데, 이것은 분말 크기가 작을수록 표면적이 증가하고 경도가 높으므로 압출성형이 어려워지기 때문에 더 큰 압출비가 요구된다. 압출비와 관련하여, 좋은 단조성을 얻기 위하여 압출비가 최저 10 이상이 필요하며, 압출비가 30~40 정도로 증가할수록 더욱 이상적인 단조성을 얻을 수 있다고 보고되고 있다.¹⁴⁾

그림 9는 입도에 따른 Al-20Si-5Fe 합금분말 압출재의 내마모성을 나타낸 것으로서, sliding 거리를 100 m, 하중을 2.1 kg으로 고정하고 sliding speed를 0.5 m/sec로부터 3.6 m/sec로 변화시켰을 때 입도에 따른 내마모성에는 거의 차이를 보이지 않았다. Al-20Si-5Fe의 내마모성이 Al-20Si-2X(X= Ni, Cr, Zr) 합금¹¹⁾보다 우수함을 알 수 있다. 이것은 강도가 크면서 모상과의 결합력이 우수한 δ-Al₄FeSi₂ 입자가 내마모성을 향상시키는데 기여한 것으로 생각된다.

4. 결 론

급속응고법으로 제조한 Al-20wt%Si-5wt%Fe 합금분말의 미세조직과 압출재 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분말의 입자크기가 감소할수록 초정 Si과 침상형 δ-Al₄FeSi₂ 급속간 화합물이 미세하게 분포되었다.
- 2) 분말입도가 감소할수록 압출재의 경도는 Hv110에서 Hv135로 증가하였으며, 인장강도는 300 MPa에서 400 MPa로 증가하였다.

3) 분말 입도분포의 변화는 압출재의 내마모성에 크게 영향을 미치지 않았으며, Ni, Cr, Zr 첨가 합금보다 내마모성이 향상되었다.

참 고 문 헌

1. F. Yilmaz and R. Elliott: J. Mater. Sci., **24** (1989) 2065
2. M. D. Hanna, S. Lu, and A. Hellawell: Met. Trans. A, **15A** (1984) 459
3. J. L. Estrada and J. Duszczyk: J. Mater. Sci., **25** (1990) 886
4. J. Zhou, J. Duszczyk and B. M. Korevaar: J. Mater. Sci., **25** (1990) 541
5. S. Das, A. H. Yegneswaran and P. K. Rohatgi: J. Mater. Sci., **22** (1987) 3173
6. J. Zhou, J. Duszczyk and B. M. Korevaar: J. Mater. Sci., **26** (1991) 824
7. J. Zhou, J. Duszczyk and B. M. Korevaar: J. Mater. Sci., **27** (1992) 3856
8. M. A. Zaidi and T. Sheppard: Powder Metall., **27** (1984) 221
9. Y. Takeda, Y. Odaniay and T. Hayashi: *Report of Sumitomo Electric, Industries*, **27**, Japan, 392
10. 김관식: 충남대학교, 석사학위논문 (1993)
11. Y. Odani and K. Akechi: Metal Powder Report (1983) 186
12. Mondofolo: *Structure and Properties of Al Alloys* (1984) 534
13. T. Hayashi: *Sumitomo Electric Technical Review*, No. 34 (1992) 107
14. Y. Takeda, T. Hayashi, Y. Odani and K. Akecoi: *Report of Sumitomo Electric Industries, Japan* (1988) 533