

## 가스분무 공정에 의한 고강도 과공정 Al-Si 합금 분말의 제조 및 특성 연구 II. 압출재 제조 및 기계적 특성

김용진·김진천<sup>a,\*</sup>

한국기계연구원 부설 재료기술연구소 분말재료연구센터  
<sup>a</sup>울산대학교 첨단소재공학부

## Fabrication and Properties of High Strength Hypereutectic Al-Si Powders by a Gas Atomization Process II. Extrusion and Mechanical Properties

Yong-Jin Kim and Jin-Chun Kim<sup>a,\*</sup>

Department of Powder Materials Research, Korea Institute of Materials Science,  
66 Sangnam-dong, Changwon 641-831, Korea

<sup>a</sup>School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received March 14, 2008; Accepted April 16, 2008)

**Abstract** The hypereutectic Al-20 wt%Si powders including some amount of Cu, Fe, Mg, Mn were prepared by a gas atomization process. In order to get highly densified Al-Si bulk specimens, the as-atomized and sieved powders were extruded at 500°C. Microstructure and tensile properties of the extruded Al-Si alloys were investigated in this study. Relative density of the extruded samples was over 98%. Ultimate tensile strength (UTS) in stress-strain curves of the extruded powders increased after T6 heat treatments. Elongation of the samples was also increased from 1.4% to 3.2%. The fracture surfaces of the tested pieces showed a fine microstructure and the average grain size was about 1 μm.

**Keywords :** Hypereutectic Al-Si alloy, Gas atomization, Hot extrusion, Tensile properties

### 1. 서 론

분말공정을 이용한 기계 구조용 분말 부품은 현재 자동차 응용에 있어 엔진 부품, 변속기 부품, 컴프레서 부품 등에 약 110개 이상 적용되고 있으나, 오일레스 베어링 등 몇몇 부품을 제외하고는 대부분 철 분말을 원료로 사용하는 철계 소결부품이다. 최근에는 에너지 소비의 최소화와 경량화를 위해 철계 자동차 부품을 알루미늄, 티타늄 계등 경량 분말 제품으로 대체하고자 하는 연구가 활발하다[1-3]. 기존의 철계 자동차용 분말 부품을 알루미늄, 티타늄 등 경량

분말부품으로 대체하기 위한 연구는 1970년대부터 미국, 일본 등의 국가연구소와 자동차 부품회사를 중심으로 집중적으로 연구되기 시작하였으며, 최근에는 TiC, SiC 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등 고경도의 분산강화입자를 혼합하여 고탄성, 고내마모의 분말부품을 제조하는 기술로 발전되어 왔다[4, 5].

알루미늄에 실리콘을 첨가한 Al-Si계 합금은 기계적 특성 향상뿐만 아니라, 내마모 특성을 크게 향상시킬 수 있다는 점에서 고강도 경량소재로 매우 적합하다[6-8]. 특히 과공정(hypereutectic, Si>12.6 wt.%) 조성은 일반적인 아공정(hypoeutectic) 합금에 비하여

\*Corresponding Author : [Tel : +82-52-259-2231; E-mail : jckimpml@ulsan.ac.kr]

내마모 소재로서의 가능성이 높지만, 경질의 Si 함량 증가에 따른 취성 증가로 가공성이 크게 떨어지고, 주조 시 조대한 Si의 입자성장을 피할 수 없다. 이에 따라 전통적인 주조공정으로는 과공정 Al-Si 합금에서 Si 입자의 성장 억제와 미세화에 한계가 있어, 분말야금 공정의 응용이 필요하다.

본 연구그룹은 우수한 기계적 특성을 보이는 과공정 Al-Si 합금에서 Si 입자의 미세화를 위한 가스분무(gas atomization) 공정기술을 응용하여 경량, 고강도, 내마모 Al-Si 합금분말 소재를 개발하고자 하며, 지난 1차 논문에서는 과공정 Al-Si 합금 분말의 제조 공정과 특성, 성형/소결이 가능한 첨가 원소 및 상용 혼합분말의 영향을 살펴보았다[9]. 본 2차 논문에서는 앞서 제조된 최적의 과공정 Al-Si 분말을 응용하여, 고밀도를 위한 압출 공정과 이들 압출재의 기계적 특성을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 과공정 조성인 Al-20 wt.%Si를 선택하였다. 목표 조성을 가지는 분말을 제조하기 위한 원료 분말의 특성과 제조 공정은 기 논문에 기술되었다[9]. 모든 원료소재는 99% 이상의 고순도를 사용하였으며, 합금원소로 Cu, Ni, Fe, Mg, Mn을 첨가하였다. Al-Si 합금분말의 제조는 고압의 가스분무법으로 제조하였으며, 제조 조건은 표 1에 나타내었다.

합금조성은 표 2에서 제시한 바와 같이 본 연구그룹에서 개발한 소재 중 가장 소결 특성이 우수한 VN1과 VN4 합금을 선택하여, 최종 압출재를 제조하

Table 1. Processing parameters of gas atomization[9]

Atomization gas	N <sub>2</sub> (high purity), N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>
Atomization pressure	2 MPa, 3 MPa
Inner diameter of nozzle	2.5 mm
Pouring temperature	950°C

Table 2. Composition of VN1 and VN4 powders prepared in this study[9]

Alloy	Al	Si	Cu	Fe	Ni	Mg	Mn
VN1	bal	20	3.5	5.5	-	1.2	0.5
VN4	bal	20	-	5.5	-	1.2	0.5

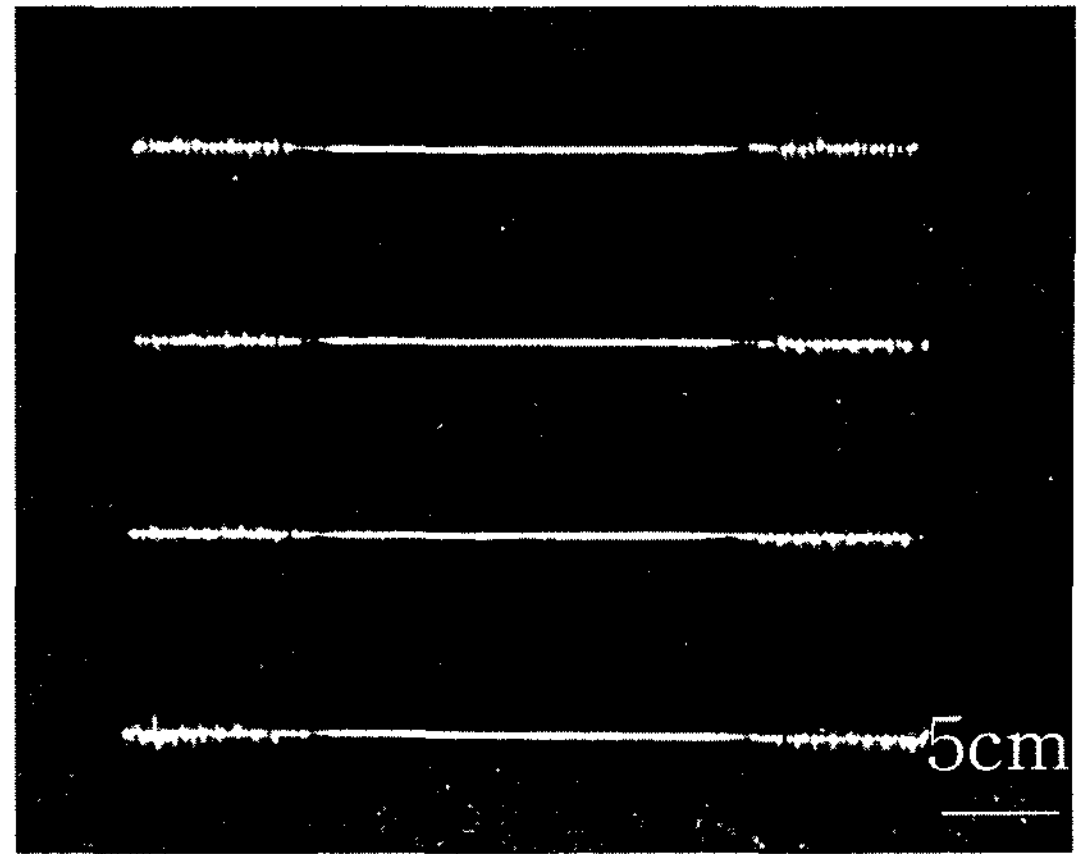


Fig. 1. Tensile specimens of the extruded VN 1 or 4 Al-Si samples.

였다. VN 4는 VN 1의 성분에 Cu를 제거한 성분으로 설계하였다. 이는 Cu의 효과를 규명함과 동시에 분말의 혼합성, 성형성과 소결성 변화를 규명하고자 하는 목적으로 설계된 것이다[9].

선택한 VN1 및 VN4 분말은 각각 제조한 원료분말과, 100 mesh(150 μm 이하) 및 200 mesh(75 μm 이하)로 분급, 입도를 달리하여 압출하였다. 각각의 분말을 직경 약 90 mm, 길이 100 mm 크기로 이론밀도의 약 80~85%가 되게 예비 성형체(billet)를 제조하여, 압출 시편으로 사용하였다. 압출은 800톤 압축기로 하였으며, 용이한 압출을 위하여 약 500°C에서 실시하였다. 압출 비는 약 10:1로 하였다.

압출재의 기계적 특성은 압출재의 경도시험과 인장시험으로 평가하였다. 경도 특성은 압출재를 적당한 크기로 절단한 후 로크웰 경도 B 단위로 측정하였다. 인장시험은 그림 1과 같은 인장시편(직경 2.4 mm, 인장부 길이 14 mm)로 정밀 가공한 후, 515°C 에서 30분간 열처리 후 172°C에서 20 hr 풀림한 후 수냉하는 T6 열처리를 한 후 평가하였다. 인장시험에 의해 0.2% 항복강도(Yield Sstrength; YS)), 최대인장강도(Ultimate Tensile Strength; UTS) 값과 연신율을 측정하였다.

압출한 시편의 미세구조 및 Si 결정크기는 정밀 연마한 후 희석된 불화수소로 에칭하여 관찰하였으며, 인장시험한 시편의 파단면은 방계주사전자현미경(Field Emission-Scanning Electron Microscope: FE-SEM)으로 정밀 분석하였다.

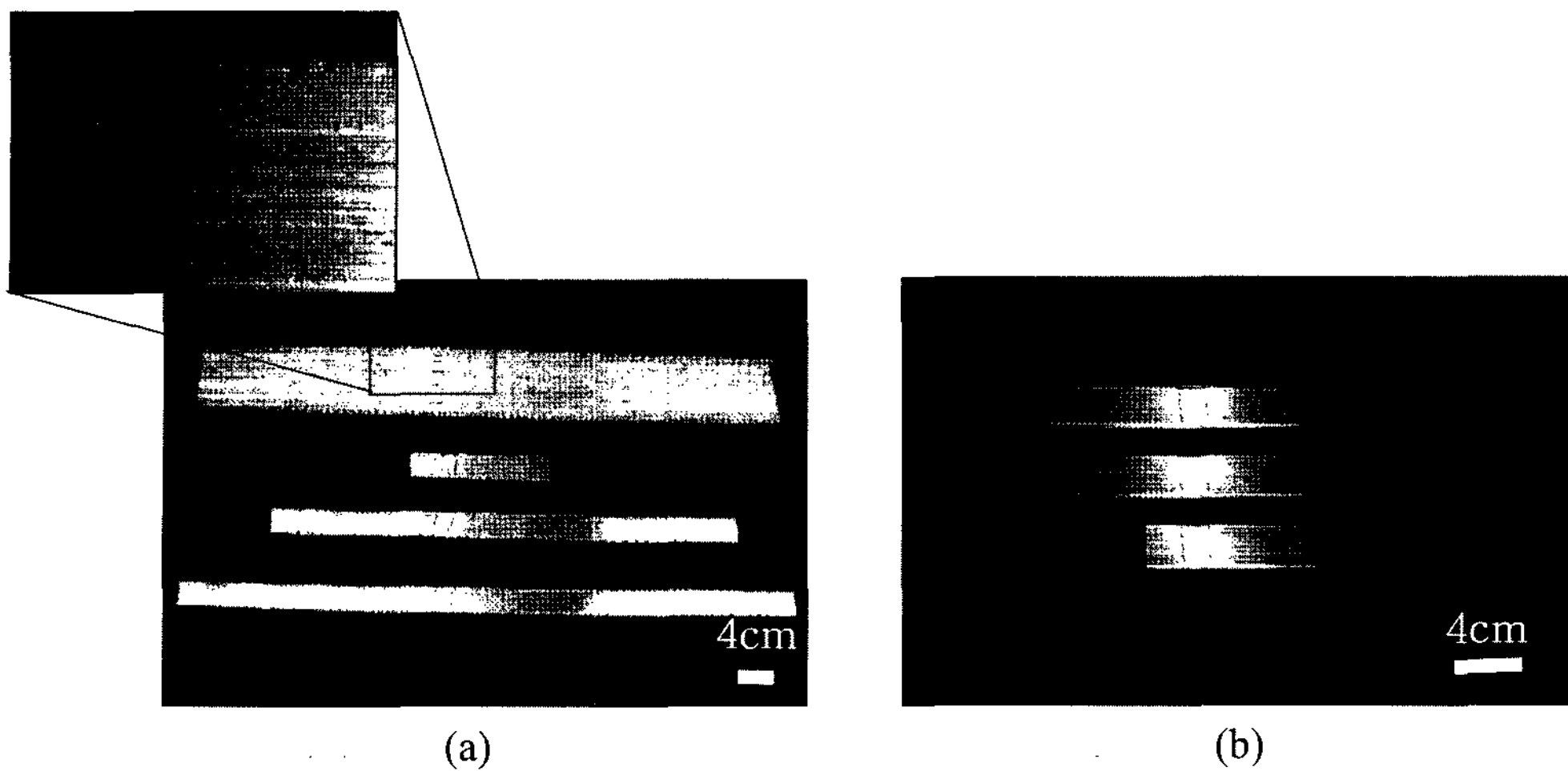


Fig. 2. Photos of the extruded Al-Si specimens with extrusion shape VN1; (a) Rectangular and (b) Round Cornered Rectangular.

### 3. 결과 및 고찰

일반적으로 압출재는 예비 성형체를 고압출비로 압출하기 때문에 내부에 큰 소성변형이 발생한다. 이때 압출되는 시편의 외부 특성은 압출다이 형상과 압출소재 자체의 결정구조, 강도등의 특성에 따라 결정된다. 고강도 Al-20 wt.% Si 소재를 그림 2(a)에서와 같이 압출재 형상을 직사각형 형으로 할 경우 압출재의 모서리부분에서 부분적인 압출 응력의 불균일성과 압출재가 압출다이에서 방출시 급격한 응력방출로 측면 결함(side clack)이 형성된 모습을 보여준다. 이러한 측면결합은 적절한 압출운할재의 사용이나, 압출다이의 형상을 곡면 처리하여 제거할 수 있다. 그림 2(b)는 압출재의 모서리 부분을 약간의 곡면을 준 경우 고강도의 소재임에도 불구하고, 매우 매끄러운 형상으로 압출되는 것을 확인하였다.

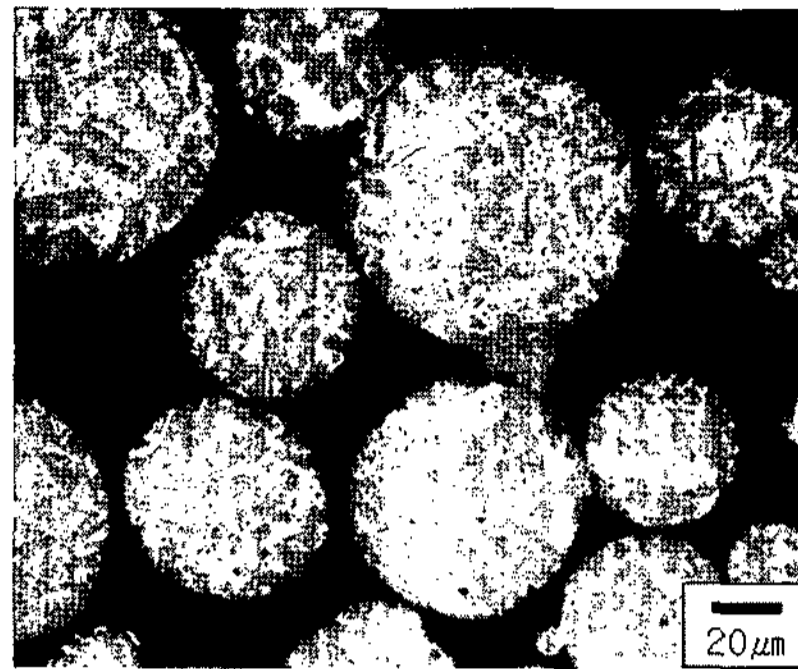
각각의 분말에서 압출 후 압출재의 상대밀도(relative density) 및 경도 특성을 표 3에 나타내었다. 표에서 나타낸 바와 같이 모두 98% 이상의 밀도를

얻을 수 있었다. 압출재의 경도는 분말 조성 및 크기에 따라 차이가 있었다. 분급되지 않은 분무 분말 VN1 또는 VN 4 압출재의 경도는 80HRB이하의 값을 보였으며, 150  $\mu\text{m}$  이하로 분급된 분말의 압출재의 경도는 각각 91HRB, 85HRB이며, 75  $\mu\text{m}$ 이하로 분급된 분말은 각각 95HRB, 89HRB을 보였다. 원료 분말이 미세할수록 압출 경도는 높게 나타났다. 이들의 압출재의 경도 특성은 1차 논문에서 제시한 국내외 상용 Al-Si 베인 제품의 경도값인 HRB 90~95 값과 거의 일치하였다[9].

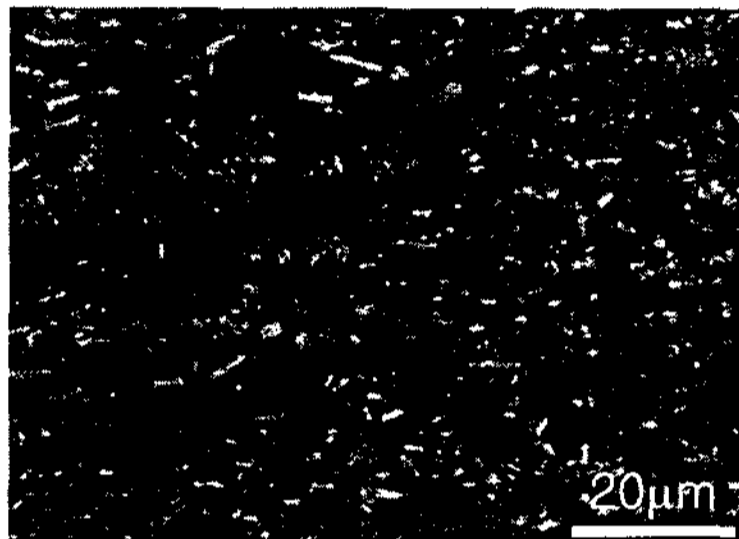
그림 3은 가스분무법으로 제조한 분말(a)과 분말압출재 ((b), (c))의 미세 조직이다. 그림 3과 같이 가스분무한 상태의 분말의 경우 금속용융체로부터 급속응고하여 제조되었음에도 불구하고 초정 Si의 결정립이 5~8  $\mu\text{m}$ 로 다소 큰 입자를 가졌다[9]. 그러나 압출재에서는 초정 Si의 크기는 압출 시의 강한 소성변형에 기인하여 2~3  $\mu\text{m}$ 으로 매우 미세해 졌음을 보여준다. 또한 초정의 Si 입자는 강한 소성변형으로 화살표로 표기한 압출 방향으로 배열되었음을 보여준다.

Table 3. Properties of the Extruded Al-Si Specimens

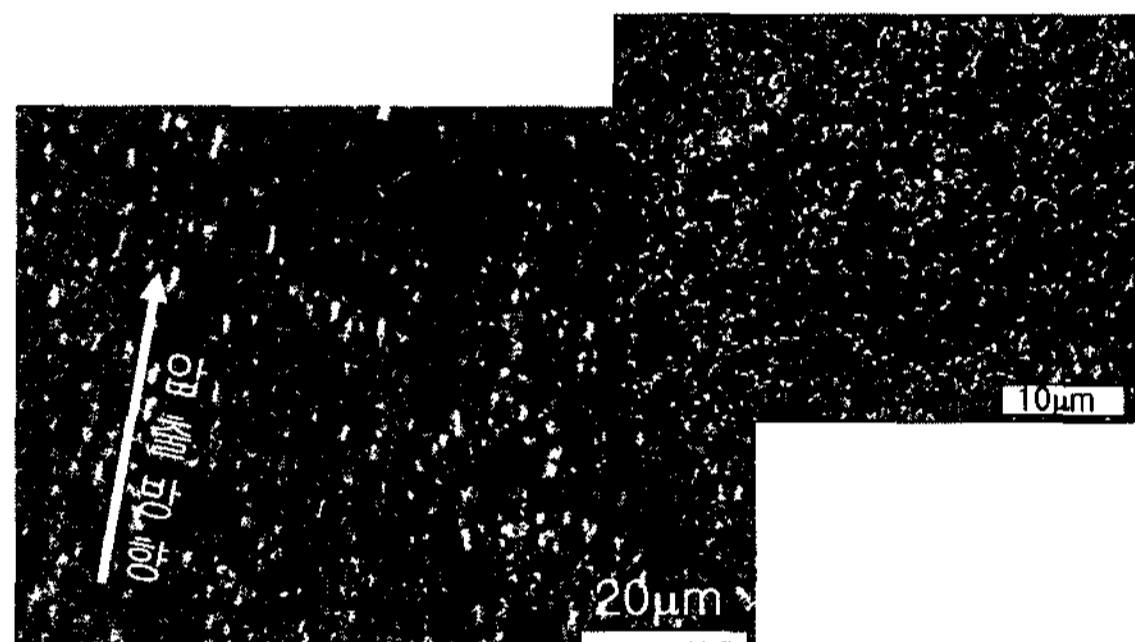
Specimens	Relative density (%)	Hardness (HRB)		
		As-atomized powder	-150 $\mu\text{m}$ (100 mesh) powder	-75 $\mu\text{m}$ (200 mesh) powder
VN1	99	79.0	91	95
VN4	98	74.0	85	89



(a) As-atomized VN1 powders



(b) Cross-section



(c) Parallel direction

Fig. 3. Microstructure of the as-atomized powders(a) and the extruded Al-Si specimens VN1((b) and (c)).

Table 4. Tensile properties of the extruded VN1 and VN4 Al-Si specimens

Specimen	Yield Strength 0.2% (MPa)		UTS (MPa)		Strain (%)	
	As extruded	T6 treated	As extruded	T6 treated	As extruded	T6 treated
VN1 (-100 mesh)	438.3	298.2	454.0	520.2	1.4	3.5
VN1 (-200 mesh)	445.0	417.7	476.0	532.6	1.5	3.6
VN4 (-100 mesh)	411.2	277.9	479.5	489.9	1.8	4.3
VN4 (-200 mesh)	432.5	318.8	493.5	458.8	2.4	3.2

표 4에서는 각각의 V1 및 V4 분말을 분급하여 압출한 시편의 인장 특성을 제시하였다. VN1 분말은 입도가 미세할수록 항복강도는 438.3 MPa에서 445.0 MPa로 증가하였으며, 최대 인장강도도 454.0 MPa에서 476.0 MPa값으로 증가함을 알 수 있다. 이때 연신율은 모두 약 1.5% 이하로 매우 낮은 값을 보였다. 한편 이 시편을 T6 열처리 한 경우에는 항복강도값은 감소하였으나, 최대 인장강도는 증가하였고, 특히 연신율은 3.5% 이상으로 열처리 전과 대비 약 50% 이상 증가하였다. VN1에서 Cu와 Ni을 제거한 VN4 조성의 압출 재는 200 mesh로 분급한 경우 항복강도

는 약 432.5 MPa, 최대 인장 강도는 493.5 MPa을 나타내었다. 이들 시편을 T6열처리 한 경우 VN1과 달리 항복강도와 최대 인장강도는 감소하였으나, 연신율은 약 3.2% 이상으로 증가하였다.

1차논문에서 기술한 바와 같이[9] Cu 원소는 Al-Si 합금원소에서 성형성과 압축성을 향상시키는 목적으로 첨가하였으나, Cu를 첨가하지 않은 VN4가 가장 우수한 성형성을 보였다. 또한 일반 소결 실험에서도 Cu를 첨가한 경우 시편 외형에 다량의 Al 액상의 용출(extruded) 현상이 발생하여 매끈한 최종 시편을 얻기에 매우 어려웠다. 그러나 본 논문의 압출

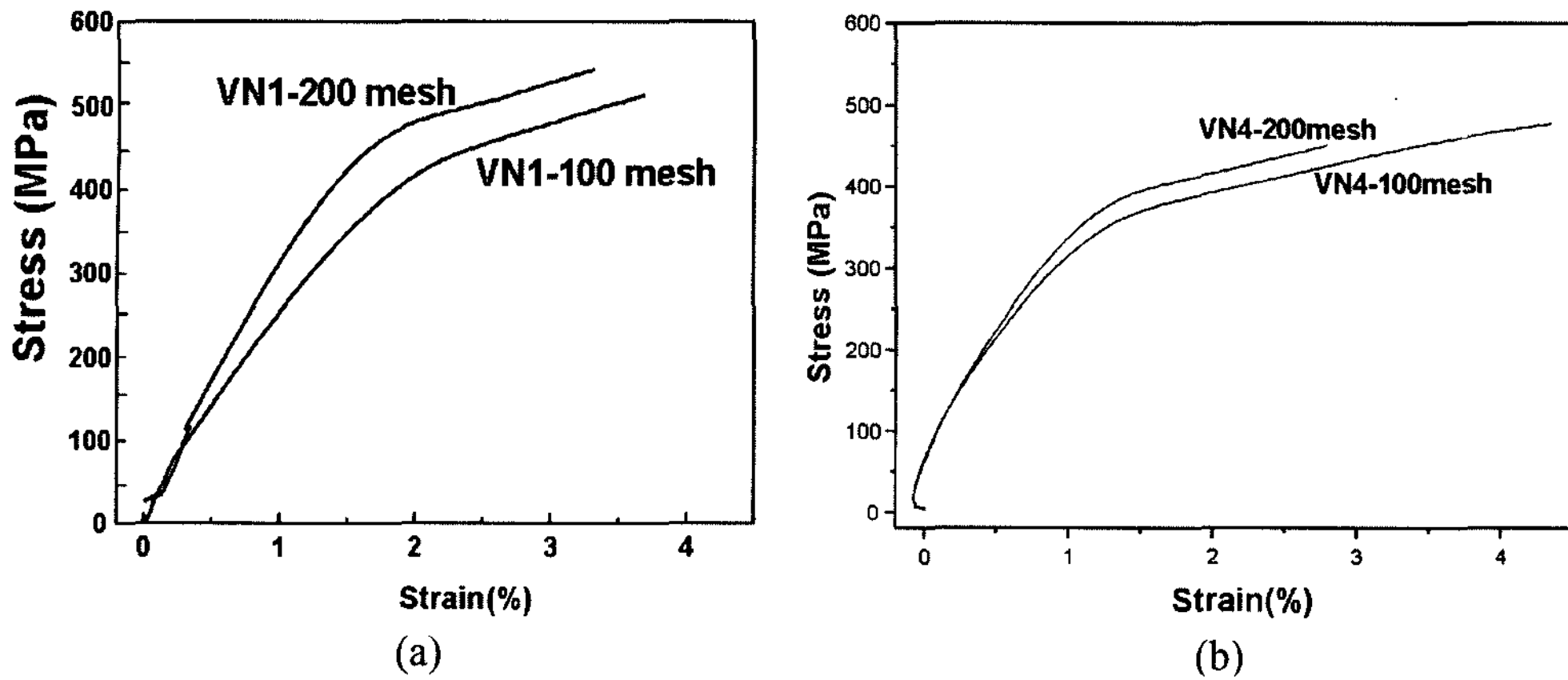


Fig. 4. Stress-strain curve of the extruded Al-Si Specimens; (a) VN1 and (b) VN4.

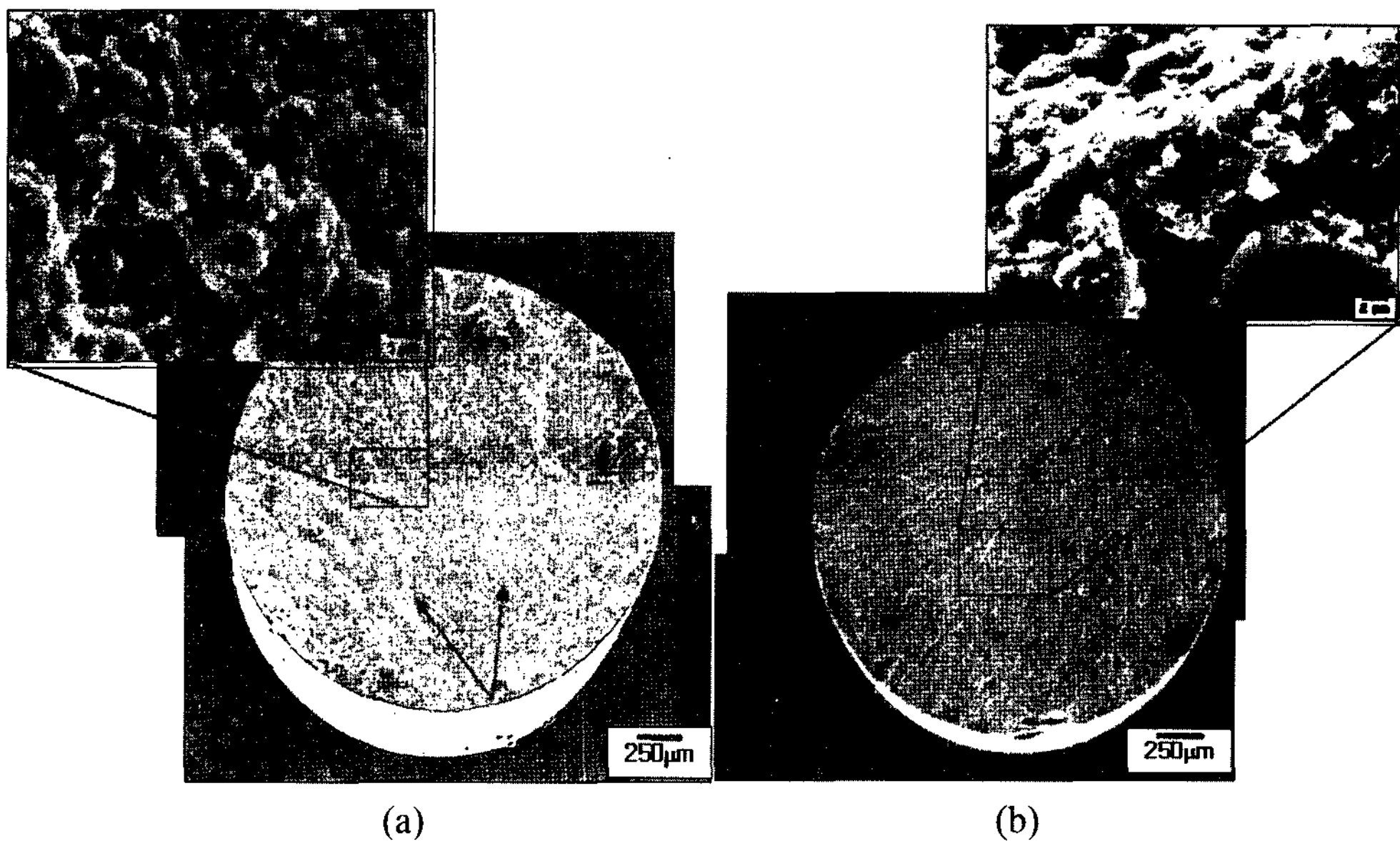


Fig. 5. Fractographs of the extruded Al-Si specimens; (a) VN4 -100 mesh and (b) VN 4 -200 mesh.

재는 일반소결 공정을 따르지 않으므로 Al의 용출과 같은 현상은 일어나지 않았다. 따라서 Cu가 기지상에서 고온압출 중이나 T6 열처리시 Al과 반응하여 석출강화를 일으켜 Cu가 함유된 VN1합금이 VN4합금보다 더 높은 항복강도와 인장강도를 보인 것으로 판단된다. 그림 4에서는 T6 열처리한 각각의 인장시편의 응력-변형률 변화를 보여준다.

그림 5는 인장 시험한 VN4 분말 -100 mesh와 -200 mesh 압출 시편의 파괴면 미세구조를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 거시적 미세구조에서는 Al-20 wt.Si 분말 압출재의 높은 Si 함량으로 인

하여, 화살표로 표시한 부분에서 파괴가 시작되어 시편내부로 급격히 전파되는 전형적인 취성파괴 거동을 보여주고 있다. 이들 파괴면 형상은 V자 모양의 셰브론 표시(chvron marking)가 균열의 시작점에서 부채꼴 모양으로 연속적으로 퍼져나가는 것을 보여준다. 앞선 인장시험의 기계적 특성의 차이에도 불구하고 미세구조에서는 입도에 따라 큰 차이점을 확인할 수 없다. 이는 압출 시 강한 소성변형으로 기지상이 균일하게 변형되었기 때문이라 판단된다.

한편, 고배율의 FE-SEM 미세구조에서는 미세한 Al의 결정립들이 작은 구형 덩플(micro dimple)의 형

태를 가지는 연성파괴 거동을 보여주고 있다. 특히 결정립의 크기는 500°C의 고온임에도 불구하고, 약 1 μm 이하로 매우 미세한 값을 보여주고 있다. 이러한 미세한 결정립의 형성은 그림 3에서 제시한 바와 같이 가스분무한 Al-Si 분말에서 단상의 Al 기지상 분산되었던 초정 Si이 압출시 강한 소성변형으로 급격히 분쇄되면서, Al 기지를 급격히 미세화 시키는 효과 때문이라 판단되며, T6 열처리에서 이러한 미세한 결정립이 지속적으로 유지된 것은 균일하게 분산된 미세한 Si 입자가 Al 결정립 성장을 억제하는 효과 때문이라 판단된다.

일반적으로 Al 합금 계에선 결정립크기가 약 1 μm 이하의 서브 마이크론을 가질 경우 미세한 결정립에 의한 고온 초소성현상이 나타난다고 알려져 있다. 이러한 초소성 특성은 고함량의 Si를 가지는 과공정 Al-Si합금의 소성가공성 연구에 매우 중요하기 때문에 추후 지속적인 연구가 요구된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 경량 고강도 특성을 가지는 과공정의 Al-Si 합금분말을 가스분무공정으로 제조하고, 제조된 분말을 고온 압출하여 압출재의 미세구조와 기계적 특성을 분석하였다. 합금 조성은 Al-20 wt.%Si-5.5Fe-1.2Mg-0.5Mn을 선택하였으며, 이들 기본 조성에 3.5% Cu 성분을 VN 1합금에는 첨가하고, VN 4 합금에서는 Cu를 제거한 성분으로 설계하였다. 압출 시편은 큰 소성변형으로 내부에서 급격한 초정 Si 입자의 크기 감소를 일으켜, 최종적으로 약 2~3 μm의 미세한 크기를 가졌다. 압출한 시편의 항복강도는 약 400 MPa 이상을 가졌으면, T6 열처리 한 경우 연신율은 약 1.5%에서 최대 4.3%까지 증가하였다.

Al 기지내에 석출경화를 일으키는 Cu 원소의 영향으로 VN1 합금이 T6 열처리시 더 높은 항복강도와 인장강도를 가짐을 확인하였다. 인장시험 후 파단면의 미세구조에서는 거시적으로는 취성파괴거동을 보였지만, 미시적으로는 Al 기지상내의 구형담철을 확인할 수 있었다. 500°C에서 열처리 후 상온 인장임에도 불구하고, Al 기지상이 1 μm이하의 매우 미세한 결정립을 가짐을 확인하였다.

#### 감사의 글

“본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.”

#### 참고문헌

- [1] Aluminum Industry Technology Roadmap, the Aluminum Association, Washington, (2003).
- [2] J. M. Torralba, C. E. da Costa, F. Velasco: J. Materials Processing Technology, **133** (2003) 203.
- [3] Automotive Light weighting Materials, FY 2002 Progress Report, (2002).
- [4] Z. J. Huang, B. Yang, H. Cui and J. S. Zhang: Materials Science and Engineering, A **351** (2003) 15.
- [5] J.-C. Kim, Yoshinori Nishida, H. Arima and Teiichi Ando: Materials Letters, **57** (2003) 1689.
- [6] H. Yamagata: Materials Science Forum, **797** (1999) 304.
- [7] K. H. Min, D. G. Kim, S. Y. Chang, T. W. Lim and Y. D. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **10** (2003) 40 (Korean).
- [8] M. S. Gong, E. T. Bae, K. H. Min, Panyu, S. Y. Chang and Y. D. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **11** (2004) 69 (Korean).
- [9] Y. J. Kim and J. C. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **12** (2005) 296 (Korean).