

논문

# 급속응고법으로 제조한 과공정 Al-17Si-5Fe 합금 압출재의 미세조직 및 기계적 특성

김태준 \* · 김덕현 \*\* · 이세동 \*\* · 백아름 \*\* · 임수근 \*\*†

\*모스크바국립과학기술대학교, \*\*경상대학교

## Mechanical Characteristics and Microstructures of Hypereutectic Al-17Si-5Fe Extruded Alloys Prepared by Rapid Solidification Process

Tae-Jun KIM\*, Se-dong LEE\*\*, Ah-Ruem BECK\*\*, Duck-Hyun KIM\*\* and Su-Gun LIM\*\*†

\*Department of Ferrous alloy, Moscow National University of Science and Technology, Moscow, Russia

\*\*Department of Metallurgical and Materials Engineering, Gyeongsang National Univ., Jinju 52828, Republic of Korea

### Abstract

In this study, the mechanical characteristics and microstructure of hypereutectic Al-17Si-5Fe extruded alloys prepared by a rapid solidification process (RSP) were investigated. The hypereutectic Al alloy was fabricated by means of RSP and permanent casting. For RSP, the Al alloy melted at 920°C, cooling the specimens at a rate of 10<sup>6</sup>°C/s when the RSP was used, thus allowing the refining of primary Si particles more than when using permanent casting, at a rate of about 91%. We tested an extrusion RSP billet and a permanent-cast billet. Before the hot-extrusion process, heating to 450°C took place for one hour. The samples were then hot-extruded with a condition of extrusion ratio of 27 and a ram speed of 0.5 mm/s. Microstructural analyses of the extruded RSP method and the permanent casting method were carried out with OM and SEM-EDS mapping. The mechanical properties in both cases were evaluated by Vickers micro-hardness, wear resistance and tensile tests. It was found that when hypereutectic Al-17Si-5Fe alloys were fabricated by a rapid solidification method, it becomes possible to refine Si and intermetallic compounds. During the preparation of the hypereutectic Al-17Si-5Fe alloy by the rapid solidification method, the pressure of the melting crucible was low, and at faster drum speeds, smaller grain alloy flakes could be produced. Hot extrusion of the hypereutectic Al-17Si-5Fe alloy during the rapid solidification method required higher pressure levels than hot extrusion of the permanent mold-casted alloy. However, it was possible to produce an extruded material with a better surface than that of the hot extruded material processed by permanent mold casting.

**Key words:** Rapid Solidification process, Hypereutectic Al alloy, Hot- extruded, Amorphous, Microstructure

### 1. 서 론

Al-Si 합금은 주로 교통 및 운송 분야에 널리 활용되고 있다. 활용되는 이유는 구조성, 균열저항 등의 특성이 우수하기 때문이다[1].

Al-Si 합금에서 Si 함량은 4~25 wt.% 까지 다양하게 적용

되고 있다. Si 함량에 따라 아공정 (Si 12 wt.% 미만), 공정 (Si 12~13 wt.%), 과공정 (Si 14~25 Wt.%) 으로 분류한다. 이 중에서 과공정 Al-Si 합금은 낮은 밀도, 높은 강도, 우수한 내구성 및 내마모성, 낮은 열팽창계수를 가지고 있다. 이러한 특성을 가진 과공정 Al-Si 합금을 이용하면 기존의 Fe 계 부품 소재를 상당부분 대체 할 수 있을 것으로 기대하고

Received: Mar. 11, 2019 ; Revised: Mar. 18, 2019 ; Accepted: Apr. 22, 2019  
†Corresponding author: Su-Gun LIM (Gyeongsang Nat'l Univ.)  
Tel: 82-55-772-1664, Fax: 82-55-772-1670  
E-mail: suglim@gnu.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society  
2019. Vol. 39 No. 2, pp. 26-31  
<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2019.39.2.26>  
pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© Korea Foundry Society, All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다.

과공정 Al-Si 소재를 이용하여 기존 Fe 계 소재를 대체하여 경량화를 달성하려는 연구가 계속 되어지고 있다. 최근 부품의 경량화 및 성능 향상을 위하여 과공정 Al-Si 소재로 대체하려는 연구들이 있다. 과공정 Al-Si 합금은 높은 강도와 경도 및 내마모성 등의 기계적 특성을 지니고 있어 베인용 소재로 활용하기에 적합하다. 하지만 이 합금은 일반적인 주조법으로 주조하였을 경우에는 응고과정 중 조대한 Si 입자와 편석이 발생하여 기계적 성질을 저하시킬 수 있다. 그리고 Si 상을 미세화하기 위하여 첨가하는 Cu와 Mg는 합금의 내식성을 저하시킬 수 있다. 강도 향상 및 열특성 향상을 위하여 첨가하는 Fe는 열적으로 안정적인 금속간 화합물을 생성시킬 수 있으나 이 또한 일반적인 주조법으로 주조하였을 경우에는 금속간 화합물이 조대해져 기계적 특성을 저하시킨다. 이렇게 일반적인 느린 응고속도에서는 초정 Si, 금속간 화합물이 조대하게 성장한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중에는 급속응고법을 이용한 주조방법이 있다. 과공정 Al-Si 합금 주조 시 급속응고법을 적용하면 초정 Si, 금속간 화합물 미세화, Fe의 고용도 증가, 비평형상 생성 등으로 강도와 경도 및 내마모 등의 특성 향상을 기대할 수 있다.

따라서 본 실험은 급속응고법을 이용한 과공정 Al-17Si-5Fe 합금을 제조하여 로터리 펌프 베인에 적용 가능한 소재 개발을 목표로 하였다. 급속응고법으로 제조된 합금 압출재를 일반 급형주조로 제조된 합금 압출재와 비교하여 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였으며 특히 급속응고 주조 조건이 합금의 조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 중점적으로 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 설계한 조성의 합금은 과공정 Al-17Si-5Fe 합금으로 자세한 조성을 Table 1에 나타내었다. 합금을 제조하기 위해 Al-25Si, Al-10Fe, Al-15Mn의 모합금과 순도 99.9% 이상의 Cu, Mg 을 이용하여 합금을 정량하였다. 합금은 전기저항로, 흑연도가니, 교반기를 사용하여  $\Phi 60 \times L120$  크기의 합금 ingot을 제조하였다.

본 연구에서 설계한 조성의 합금은 과공정 Al-17Si-5Fe 합금으로 자세한 조성은 ICP 분석을 통한 값을 Table 1에 나타내었다.

연구를 통하여 과공정 Al-17Si-5Fe 합금의 초정 Si 상과 Fe 금속간 화합물의 미세화 및 기계적 특성 향상을 목표로

하였다. 실험은 급속응고주조법을 이용하여 비평형상 flake를 제조하였다. 연구에서 사용한 급속응고장치는 분사법[2,3]과 단롤법[4]을 조합한 급속응고장치이며, 최초 고주파 유도 용해로를 이용하여 합금을 용해시키고 도가니 상단부의 파이프를 통하여 Ar 가스를 주입하여 용탕에 압력을 가하였다. 압력을 가한 용탕은 도가니 하단부 1 mm 크기의 노즐을 통해 분사되었다. 분사된 용탕은 atomizer Ar 가스에 의하여 1차로 냉각되고, 2차로 회전하고 있는 수냉된 copper drum에 부딪혀 flake를 형성하였다. 그 모식도는 Fig. 1에 나타내었다[5].

Flake 제조 제어조건으로는 도가니 상단에서 가하는 Ar 가스의 용탕에 가해지는 압력, Atomizer Ar 가스의 압력, Copper drum의 회전속도 총 3가지의 요소를 제어하여 실험하였다. 실험 제어조건 세부사항은 Table 2에 나타내었고 실제 flake의 제조에 성공했던 조건은 Table 3에 나타내었다. 각 조건에서 제조된 flake의 형태 및 미세조직을 광학현미경, 주사 전자 현미경(SEM)을 사용하여 관찰하고 이 후, 제조된 flake를 압출비 27:1, 압출온도 450°C, 압출속도 0.5 mm/s에서 압출을 진행하였고, 이후 기계적 특성평가를 위해 Vickers 경도기를 이용하여 각 온도에서 방향서에 따른 미소경도, 내마모성을 측정하기 위해, 적용하중 500 g, 60 rpm의 속도로 5000 cycle의 조건으로 내마모성을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 제작된 Al-17Si-5Fe 과공정 합금의 Ingot을 OM을 통한 미세조직 관찰한 결과이다. 분석결과 침상으로 존재

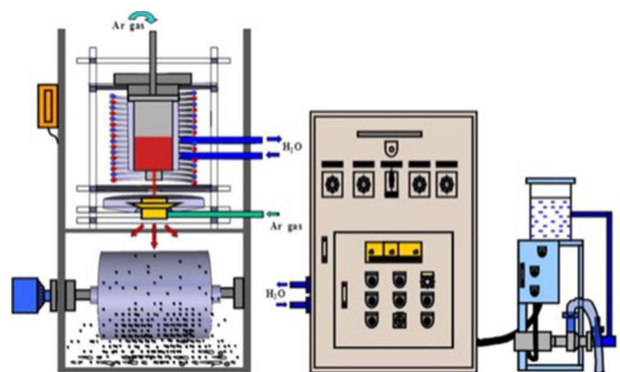


Fig. 1. Schematic diagram of Rapid Solidification Process.

Table 2. Rapidly solidification process conditions for hypereutectic Al-17Si-5Fe alloy flakes.

Melting temp.	Crucible pressure	Atomizer pressure	Drum speed
900°C	1 ~ 4 kgf/cm <sup>2</sup>	1 ~ 7 kgf/cm <sup>2</sup>	300 ~ 800 rpm

Table 1. Chemical Compositions of hypereutectic Al-17Si-5Fe alloy.

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
Contents (wt.%)	17	5	3.5	0.5	1	Bal.

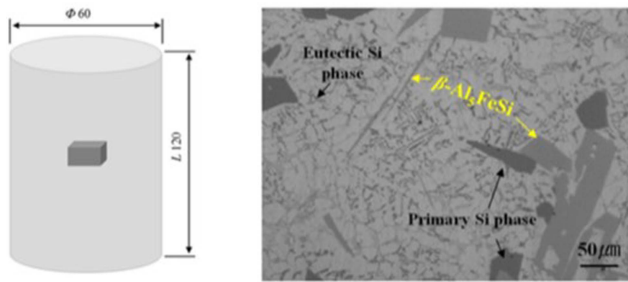


Fig. 2. Optical microstructures of hypereutectic Al-17Si-5Fe alloy by permanent mold casting.

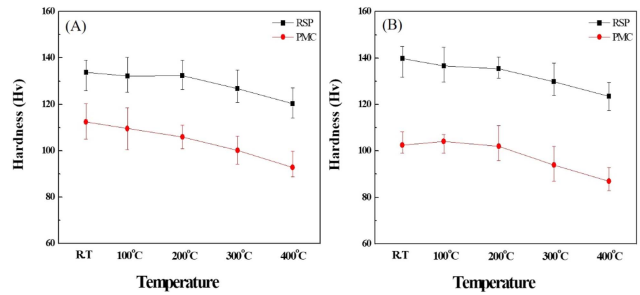


Fig. 3. Morphologies and microstructures hypereutectic Al-Si-Fe Al alloy flakes fabricated by rapid solidification process (by experimental order in table 4).

Table 3. Experimental order for Al alloy flakes production.

No.	Crucible Pressur (kgf/cm <sup>2</sup> )	Atomizer Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	Drum Speed (rpm)
1	4	4	300
2	3	4	300
3	4	4	600
4	4	7	600
5	3	7	600
6	1	4	600
7	1	4	800

하는 상은 금속간 화합물, 조대하게 존재하는 짙은 색은 Si 상, 비교적 미세하게 분포하고 있는 Si상을 관찰할 수 있었다[6].

Al-17Si-5Fe 합금 미세조직을 화상 분석(Imagin Analyzer)을 통해 평균 초정 Si의 크기를 측정해본 결과 약 57 μm인 것을 확인 할 수 있었다.

금형구조를 통해 주조된 과공정 Al-17Si-5Fe 합금 잉곳을 적절한 크기로 잘라 흑연도가니에 장입하였고 고주파 코일을 통해 용해시킨 후 급속응고법으로 Al 합금 flake를 제조하였다.

Jeong[7] 과 Kim[8]의 연구에서는 급속응고장치를 이용하여 몰드 상단부에 가하는 Ar 가스 압력(분사압력), Atomizer 가스의 압력, 드럼의 회전속도 등을 제어함으로써 flake의 모양과 두께를 제어 할 수 있다고 보고하였다. 따라서, 위의 연구자들의 실험을 참고하여 용탕에 가하는 압력, Atomizer의 압력, 수냉 된 드럼의 회전 속도(rpm) 3가지 조건을 제어하여 Al 합금 flake의 제조가 가능한 조건을 설정하였다.

설정 후 실험을 통하여 합금 flake의 제조가 가능하였고 그 조건은 Table. 3에 표시하였다. Fig. 3는 제조된 Al 합금 flake의 형상과 미세조직을 나타낸 사진이다.

초기에 제작한 1~3번 조건의 flake의 경우 비교적 크고 두꺼운 flake가 제조되었다. 1~3번 조건은 몰드 상단을 통해서 용탕에 가하는 Ar 가스의 압력이 높아 도가니 하단부의

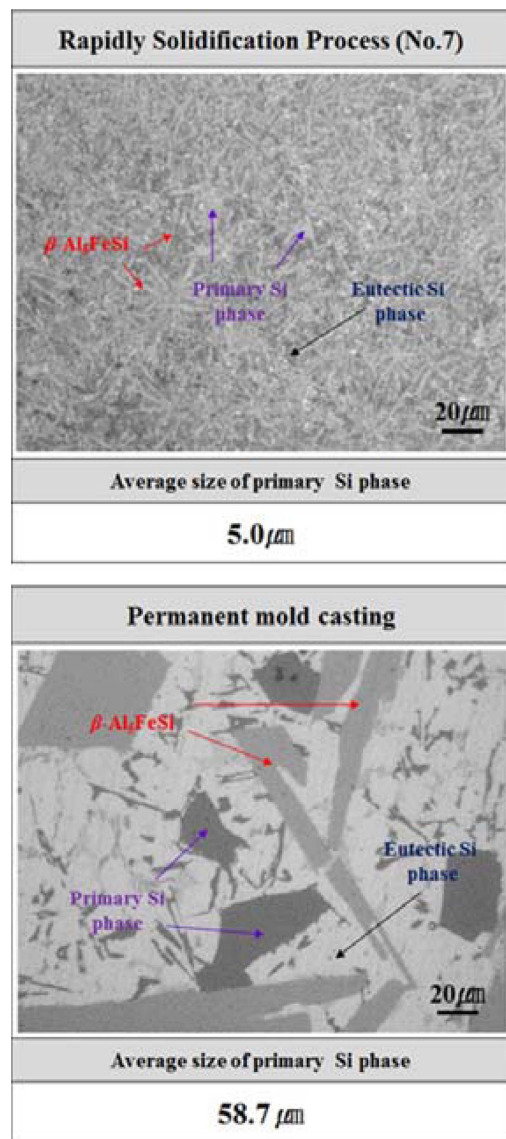


Fig. 4. Comparison on primary Si phase size of hypereutectic Al-Si-Fe Al alloy ingot and flakes.

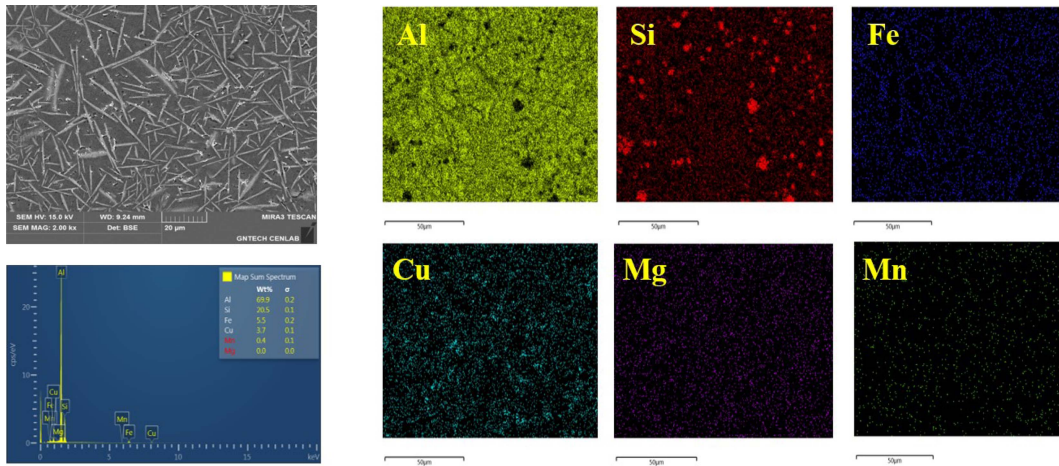


Fig. 5. SEM-EDS mapping analysis of hypereutectic Al-Si-Fe Al alloy flakes produced by rapid solidification process.

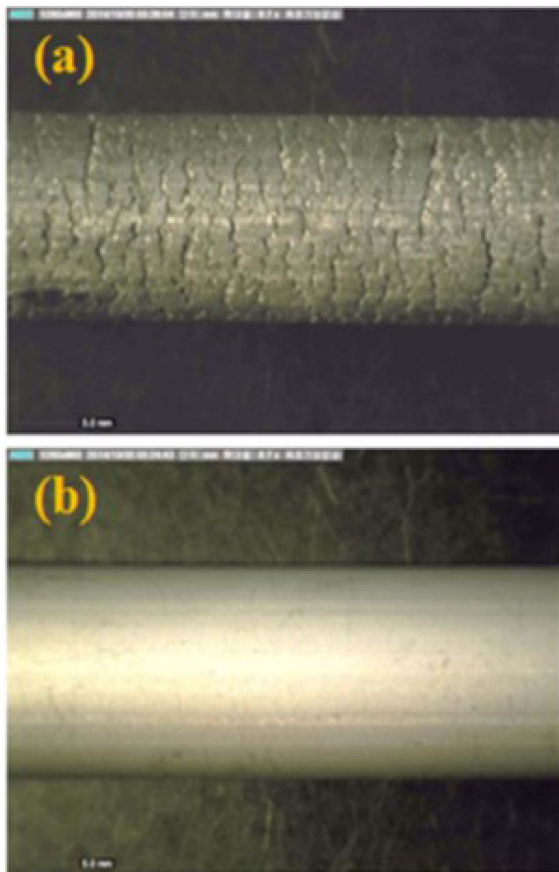


Fig. 6. Surface of as-extruded Al-Si-Fe alloy ; (a) PMC and (b) RSP.

노즐을 통해 많은 양의 용탕이 분사되었다.

이로 인하여 상대적으로 두께가 두껍고 큰 형태의 flake가 제조되었다고 판단하였다. 앞선 1~3번의 조건을 이용한

Table 4. Results of wear resistance test (weight reduction rate) measurement.

Sample type	Weight before test (g)	Weight after test (g)	Weight reduction (g)	Weight reduction rate (%)
PMC	5.486	4.480	0.006	0.109
RSP	5.275	5.273	0.002	0.038

실험을 참고하여 용탕에 가하는 압력을 감소시켜 4~6번의 실험을 진행하였다. 그 결과 이전 1~3번 조건을 사용한 실험에 비해서 얇은 두께의 flake를 제조할 수 있었다. 하지만 제조된 flake는 드럼 회전 방향으로 길쭉한 모양의 리본 형상으로 제조되었다. 그 원인으로서는 용탕이 최종적으로 부딪히는 Copper drum의 회전속도가 낮아서 리본 형상의 flake가 제조되었을 것으로 판단하였다. Jeong의 연구 결과 [7]에서는 drum의 회전 속도가 빠를수록 급속응고된 flake의 형상과 응집현상이 줄어들었다고 보고하였다. 앞선 연구 결과와 그리고 1~6번 실험을 통해 고찰해본 결과, 용탕에 가하는 압력이 적절해야 하고 Copper drum의 회전속도가 빨라야 두께가 얇고 작은 형태의 flake를 제조 할 수 있을 것으로 판단하였다. 이후 여러 가지 조건을 설정하여 7번 조건으로 실험하였고 그 결과 비교적 작은 크기의 flake를 제조할 수 있었다.

Fig. 4는 일반 금형주조로 제조한 합금의 빌렛과 급속응고로 제조한 합금의 flake 미세조직을 비교한 사진이다. 미세조직 중에서 초정 Si의 크기를 비교해본 결과 7번 조건으로 제조한 합금 flake의 초정 Si의 크기가 일반 금형주조에 비해 50 µm이상 미세화 되었다.

7번 조건으로 설정된 flake의 미세조직을 EDS Mapping을 통하여 분석하였고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 분석



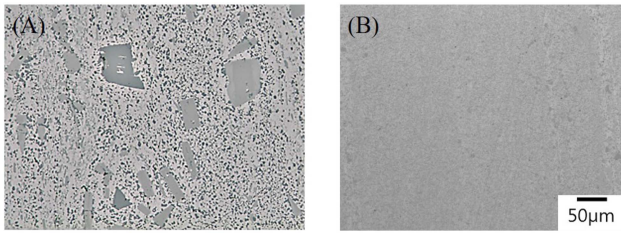


Fig. 7. Optical Microstructures of (a) Permanent Method Extrusion rod and (b) RSP Method Extrusion rod.

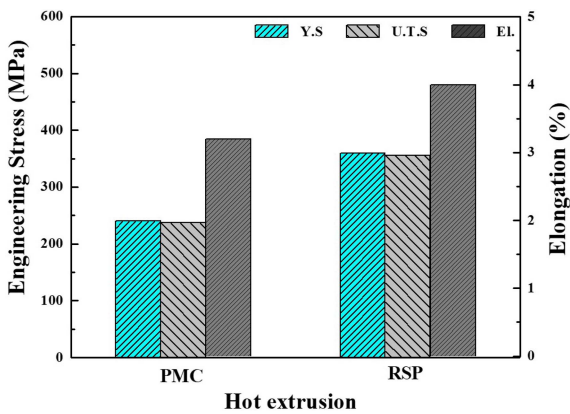


Fig. 8. Comparison on tensile strength of as-extruded alloy bars (PMC, RSP).

결과 flake에는 일반 금형주조와 동일하게 Al 기지조직, 초정 및 공정 Si, 침상으로 존재하는 Fe 와 Cu, 그리고 Mg 와 Mn은 조직 내 고르게 분포하는 것을 관찰하였다. EDS 성분분석 결과는 대체로 목표했던 성분과 유사했으나 약간의 차이가 발생하였다. 이 차이는 주조 시 소실로 약간의 차이가 발생한 것이라 판단한다.

이 후, 7번 조건으로 설정된 flake를 압출을 진행하였을 때, 일반 주조 공정과 RSP 공정 압출재의 표면을 Fig. 6 에 나타내었다. 일반 금형주조 압출재는 표면에 미세한 크랙이 발생하였고 급속응고 flake 압출재는 크랙이 없이 건전하게 제조되었다. 이는 압출재 간의 미세조직 차이 때문에, 발생한거라 판단하였다.

Fig. 7은 RSP 방식과 일반 금형주조 방식으로 제조한 압출재 종단면 미세조직 사진이다. 일반 금형주조 방식의 압출재는 보다 조대한 β상이 남아 있는 반면, RSP 방식으로 제조된 압출재의 경우 조대한 β상이 보이지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 압출재의 표면 크랙은 압출 공정 중 높은 마찰에 의한 표면 온도 상승에 따라 일부 표면에서 국부 용해에 의한 크랙이 발생하는 것으로 알려져 있지만 본 실험에서는 Fe 첨가로 인하여 성형성이 감소하였고 합금 계면과 컨테이너 사이의 마찰력의 증가,

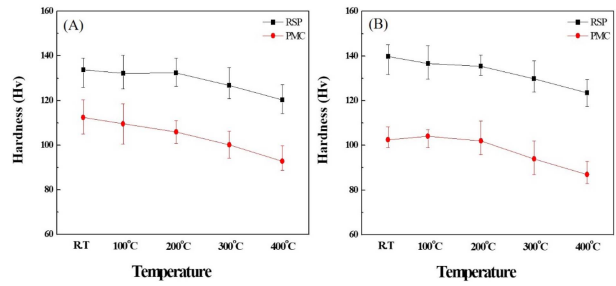


Fig. 9. Vicker's hardness of as-extruded Al alloy bars about different temperature : (A) Transverse Direction and (B) Logitudinal Direction.

그리고 조대한 초정 Si 상이 크랙을 유발하였을 것이라 판단 된다.

Fig. 8은 일반 금형주조 합금 압출재와 급속응고 주조 합금 압출재의 인장시험 결과이다. 인장강도, 항복강도 연실을 또한 급속응고 압출재가 더 높게 측정되었다. 급속응고주조법으로 제조한 합금 flake의 미세한 초정 Si의 미세화는 이 취약한 Si 상을 미세하고 고르게 분포시켜 인장특성을 향상시키는 효과가 있다[9]. 이는, RSP 과정을 거치며 Si 미세화에 따른 효과라고 판단하였다.

Fig. 9는 온도에 따른 비커스 경도 측정값 결과이다. RSP 방식으로 제조된 압출재가 전 온도 범위에서 약 20에서 30 정도 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 온도가 증가함에 따라 재료의 연화가 발생하였으며, RSP와 일반주조법의 경도차이는 미세조직의 미세화 차이에 따른 차이를 보이는것으로 판단하였다.

과공정 Al-17Si-5Fe 합금의 내마모성을 조사하기 위해서 적용하중 500g, 60rpm의 속도로 5000 cycle 실험을 하고 그 마모량의 변화를 Table 5에 나타내었다. 마모시험 결과 마모량은 일반금형주조 압출재가 급속응고주조 압출재 보다 마모량이 높았다. 실험결과를 통하여 경도 상승으로 인하여 마모량 또한 감소하는 경향을 보였다. 이것은 기지조직의 경도상승이 내마모성을 향상시킨 것으로 판단된다. 이와 같이 급속응고 압출재의 경우에는 초정 Si와 급속간 화합물이 미세하고 고르게 분포하고 있기 때문이다. 이것은 정출상에 집중되는 응력을 분산시키는 효과가 있기 때문에 경도 및 강도가 상승한 것으로 판단한다. 기지조직의 경도상승과 마모량이 감소하는 것은 일반금형주조 시편과 급속응고주조 시편의 마모량 차이에서도 확인이 가능하다

#### 4. 결 론

과공정 Al-17Si-5Fe 합금을 금형주조 및 급속응고법으로 제조하여, 이를 압출하여 특성평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 과공정 Al-17Si-5Fe 합금을 급속응고법에 의해 제조한 결과 일반주조에 의해 조대해진 초정 Si 및 금속간 화합물을 미세화 시킬 수 있었다.

2) 급속응고법에 의한 과공정 Al-17Si-5Fe 합금 제조 시 용해도가니의 압력은 낮고, Drum speed 가 빠를수록 작은 입자의 합금 flake를 제조할 수 있다.

3) 급속응고법에 의해 제조된 과공정 Al-17Si-5Fe 합금의 열간 압출은 일반 주조합금의 열간 압출보다 높은 압력이 요구되었으나 일반 주조합금의 열간 압출재보다 건전한 압출재를 제조할 수 있었다.

4) 급속응고법에 의해 제조된 열간 압출재의 경우 대부분 기계적 특성이 일반 주조합금보다 우수했으며, 이는 미세조직의 영향이라 판단된다.

### References

- [1] Materials Park, ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International OH (1990).
- [2] J. S. Thompson, J. Inst. Metals, "A study of process variables in the production of aluminium powder by atomization", **74** (1948) 101.
- [3] P. Furrer and H. Warlomont, Z. Met. alk., "Microstructure and properties of aluminium alloys after rapid solidification. II. Extension of solid solubility influence of thermal treatments, mechanical properties", **62** (1971) 100.
- [4] Transmet Corp., Pamphlet : "Transmet Facilities and Capabilities" OH (1983).
- [5] Jeong IS, Master's thesis, Graduate school of Gyeongsang National University, "Microstructure and mechanical properties of CNT/AZ31 composite prepared by mechanical alloying" (2011) 13.
- [6] Park JS, Master's thesis, Graduate school of Inha University, "A study on the mechanical and thermal properties of spray-cast hypereutectic Al-Si-Fe alloys" (2006)
- [7] Jeong YS and Lim SG, J. Kor. Inst. Met. & Mater, "Fabrication of splat quenched Al 7075-Mn extrusions and effect of manganese on the aging behavior", **38** (2001) 693-698.
- [8] Kim SJ and Lim SG, J. Kor. Inst. Met. & Mater, "Effect of Zr on Aging Behavior and Mechanical Properties of Splat Quenched and Extruded Al7075 - 2wt.% Mn Alloy", **39** (2009) 50-58.
- [9] J.L. Jorstad, "Temperature Effects on the fatigue behavior of an aluminium-silicon alloy", **92** (1984) 573.