

# 전자교반을 응용한 Al-7%Si 알루미늄 소재의 레올로지 성형공정에 관한 연구

고재홍<sup>1</sup>·서판기<sup>2</sup>·강충길<sup>#</sup>

## A Study on Rheology Forming Process of Al-7%Si Alloy with Electromagnetic Application

J. H. Ko, P. K. Seo, C. G. Kang

### Abstract

This paper focuses on a rheo-forming of arm part fabricated by electromagnetic stirring system (EMS). This forming process take place under high pressure of high pressure die casting and thin walled casting is possible. Furthermore, the productivity is better than low pressure die casting because of shorter cycle time. The advantages of rheo-forming are performed in the semi solid state with laminar flow and the gas content is low, which makes welding possible. Therefore this research applies for arm part with EMS and has investigated the mechanical properties after T6 and T5 heat-treatment.

**Key Words :** Rheology Forming, Arm Part, Electromagnetic Stirring, Mechanical properties, Microstructure

### 1. 서 론

최근 자동차 및 산업용 부품의 경량화에 따른 연비 향상 및 오존층 파괴, 지구온난화 그리고 산성비 등을 포함하는 지구 환경문제를 개선하기 위하여 자동차 및 산업용 부품을 주철에서 알루미늄으로 전화하고자 하는 경량화 부품 연구가 활발히 이루어지고 있다[1~2]. 하지만, 부품 성형 공정에서 발생하는 알루미늄 조직의 수지상정 조직 및 액상편석 등으로 기계적 물성치가 균일하지 못하기 때문에 고기능성 부품 개발에 많은 어려움이 있다. 따라서, 이러한 낮은 기계적 물성치를 해결하기 위하여 전자교반시스템을 이용하여 고강도를 요구하는 경량화 자동차 부품을 생산할 수 있는 전자교반 성형기술이 요구되고 있다[3~4].

전자교반을 이용한 성형법은 용융금속을 응고 초기단계에서 강력하게 교반하여 응고 중에 발생하는 수지상 조직을 구형에 가까운 미세한 초정

고상입자로 만들어 공정 내에 균일하게 분산시킨 후 고액공존의 슬러리 상태로 만들어 금형 캐비티 속으로 사출실린더를 이용하여 부품을 충전하는 성형법이다.

현재까지 자동차 부품을 성형하는 방법 중에 다이캐스팅 방법은 두께가 얇고 형상이 복잡하면서 비교적 강도가 필요하지 않은 부품을 대량으로 생산할 때 유리한 성형법으로 사용되고 있으나 용탕이 금형 내부로 유입될 때 난류로 인한 공기의 포집과 수축에 의한 부품 내부에 결함을 가질 우려가 높아서 고강도를 요구하는 기능 부품에는 적합하지 않다. 저압주조의 경우 수지상정 조직과 편석현상으로 인한 불균일한 기계적 물성치 때문에 부품의 신뢰성, 불량률, 고기능성 부품 제조조건 제약 등의 단점이 있으며 성형 시간이 길어 생산성의 문제점을 가지고 있다. 그리고, 단조공정에 의한 부품들은 비교적 기계적 성질이 안정되어 있지만 성형 시 몇 단계의 공정을 거쳐

1. 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

2. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부, cgkang@pusan.ac.kr

야 하기 때문에 생산량이 한정되어 있고 정밀정형 부품의 생산이 어려운 단점을 가지고 있다[5-6].

따라서 본 연구에서는 저압주조기의 단점을 보완하기 위하여 개발한 장비를 이용하여 고상율과 결정립을 제어하면서 경량화 부품을 개발할 수 있는 새로운 성형방법을 제시하고자 한다.

저압주조법에서 이용하고 있는 성형압력보다 높은 압력에서 용탕에 전자교반을 가함으로써 저압주조 동안 발생하는 수지상정을 제거하며 슬리브에서 캐비티로 충전과정 동안 용탕의 층류유동을 유도하여 균일한 기계적 성질을 얻을 수 있는 성형공정을 개발함을 목적으로 한다.

## 2. 전자교반

### 2.1 전자교반 장치

본 연구에서는 현재 산업용으로 많이 사용되고 있는 A356 소재를 이용하여 전자교반시 A356 합금의 초정입자의 크기, 분포상태, 구상화 조직과 전류, 교반시간과의 관계를 규명하여 전자교반기술을 압 부품 성형공정에 적용할 수 있는 실험적 데이터를 구축하고자 하였다. 전자교반에는 수직형 교반과 수평형 교반이 있으며 본 연구에서는 수평형 전자교반기 (Electromagnetic stirrer) 를 사용하여 실험을 하였으며 Fig. 1은 본 실험에 사용되는 수평형 전자교반기의 개략도를 나타낸 그림이다.

본 연구의 수평식교반기는 3상 3극으로 제작하였으며 각각의 상은 Fig. 1의 그림과 같이 원주방향으로 위치시켜 전류가 코일을 따라 흐르게 되면 Fig. 2의 그림과 같이 원주방향으로 전자기력이 발생하게 된다.

본 연구의 전자교반기를 제작하기 위해서는 코일을 고정시키기 위한 코어의 설계, 제작이 우선적으로 이루어져야 한다. 코어는 코일을 감아 코일의 위치를 고정시켜주는 것으로 0.35mm 두께의 규소아연 강판을 층상으로 쌓아 제작한다.

전자교반기의 내경은 성형부품의 체적과 관계되므로 성형하고자 하는 부품의 체적에 맞도록 내경을 선정해야 하며 외경은 교반기의 전자기력과 관계되므로 내, 외경의 치수 선정이 중요하다.

본 연구에서는 최대 중량 3kg 이 가능하도록 내경 140mm, 외경 400mm 로 하여 코어를 제작하였으며 각각의 상을 고정하기 위하여 240 개의 규소

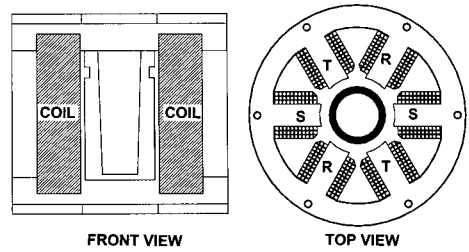
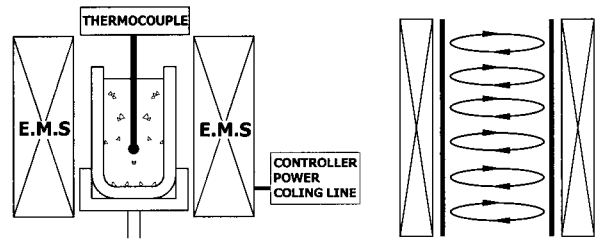


Fig. 1 Appearance of horizontal electromagnetic stirrer



(a) Electromagnetic stirrer (b) Stirring direction

Fig. 2 The schematic diagram of electromagnetic stirrer

아연 강판을 층상으로 쌓아 총 6 개의 상을 고정할 수 있는 코어를 제작하였다. 전자교반 코일은 전자교반 동안 용탕의 복사열로 인하여 급속히 온도가 상승하기 때문에 코일 내부에 냉각수 라인을 설치하여 코일의 손상을 방지하였다.

전자교반기에 사용된 코일은 두께 1mm, 7×7mm의 도전성이 우수한 구리를 사용하였다. 코어 사이로 코일을 감은 후 코일에 3 상 (Phase) 의 전기와 코일 내부로 흐를 수 있는 냉각수를 연결시킨다. 냉각수와 전기를 연결시킨 후 전류를 가변할 수 있는 컨트롤러를 연결하여 전자교반기를 제작하였다.

전자교반기의 전자기력을 측정하기 위하여 가우스미터(Gauss-meter)를 사용하여 각 부분에 대하여 전자기력을 확인하였다. Fig. 3 은 가우스미터를 이용하여 교반기 내부의 위치에 따라서 입력전류에 따른 자속밀도의 관계를 나타낸 결과값이다. 전자교반기의 상, 중, 하 위치에서 가우스미터를 이용하여 교반전류에 따른 자속밀도를 측정한 결과 교반전류에 따라 자속밀도가 비례적으로 증가하는 것이 관찰되었으며 최고전류인 100A 일 때 1500Gauss 값이 측정되었다. 이 결과는  $B=\mu I R$  ( $\mu$ : 유도자자기계수, R: 전자교반 반경거리, I: 교반전류) 와 일치하는 결과이며 1500Gauss 보다 더 높은 자속밀도를 얻기 위해서는 현재 상용주파수값

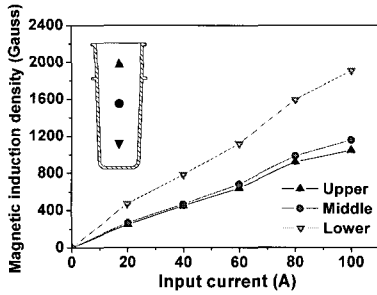


Fig. 3 Measured magnetic flux density according to stirring current

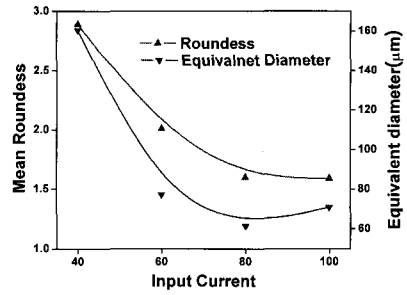


Fig. 6 The mean roundness and mean equivalent diameter according to current ( $T_p = 655^\circ\text{C}$ ,  $t_s = 60\text{sec}$ )

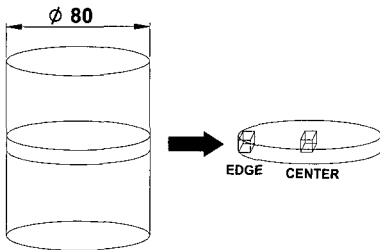


Fig. 4 Positions for observing the microstructure and macrostructure after electromagnetic stirring

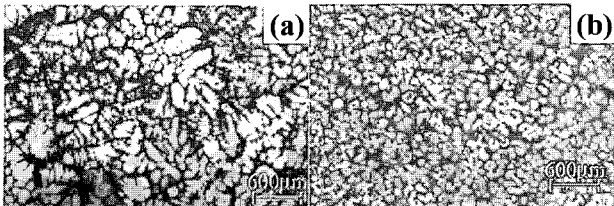


Fig. 5 The comparison of micro/macrostructure with and without stirring: (a) as-cast; (b)  $C = 60\text{A}$ ,  $t_s = 60\text{sec}$ )

인 60Hz 에서 저주파대역으로 변조시켜 교반한다면 더 높은 자속밀도 값을 얻을 수 있다.

## 2.2 전자교반 실험

본 연구의 전자교반 실험은 A356 합금을 전기로에서 용해한 후 용탕을 꺼내어 전자교반장치에 넣고 교반한다. 전자교반 실험의 변수로는 교반전류(C), 교반시간( $t_s$ ), 용탕온도( $T_p$ )이며 각각의 실험조건을 변화시켜 최적의 전자교반 조건을 찾고자 하였으며 제작된 빌렛은 Fig. 4 와 같이 빌렛의 중간부분에서 중심부와 가장자리부분의 초정입자크기 및 분포상태, 구형화 정도를 관찰하였다.

Fig. 5는 A356 합금의 용탕상태에서 응고시킨 as-cast와 60A의 교반전류를 60sec동안 교반하여 제

작한 빌렛의 미세조직을 관찰한 것이다. As-cast 상태의 조직에서는 용탕의 응고과정에서 발생된 수직상 조직으로 불규칙한 방향으로 생성되었으며 초정입자의 크기가 조대한 반면에 전자교반된 소재의 미세조직을 관찰한 결과 미세한 구형의 초정입자들이 공정 조직 내에 균일하게 분포된 것이 관찰되었다. 미세조직 관찰방법은 35g의  $\text{FeCl}_3$  35g(물 200ml)의 수용액과  $\text{HNO}_3$ 를 차례로 에칭을 하여 거시조직을 관찰하였으며 미세조직은 시편을 절단하여 마운팅 과 폴리싱 공정을 거쳐 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였다.

## 2.3 전자교반 결과

A356 합금을 용해시켜 전자교반한 결과 Fig. 6 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 교반전류가 60A 에서 미세하고 구상화된 초정입자를 얻을 수 있었으나 교반전류가 80A 이상일 경우에는 초정입자들이 다시 조대화되는 것을 관찰할 수 있었으며 이것은 전자교반력에 의해서 파쇄된 초정입자들이 재결합되어 조대화되는 것으로 판단이 된다. 초기 용탕온도가 미세조직에 미치는 영향을 관찰한 결과  $675^\circ\text{C}$  이상의 용탕온도에서는 액상상태에서의 교반으로 인하여 조대한 조직을 관찰하였으나  $655^\circ\text{C}$ 의 용탕온도에서 교반한 결과 미세하고 구상화된 초정입자를 관찰할 수 있었다. 교반시간에 따른 미세조직의 변화를 관찰한 결과 교반시간이 길수록 조직이 미세화됨을 알 수 있으나 60 sec 이상으로 교반한 경우 파쇄된 조직들이 결합하여 조직이 점점 조대화됨을 알 수 있었다[7~8].

그 결과 전자교반을 이용한 압 부품성형의 교반조건은 용탕의 온도가  $655^\circ\text{C}$  범위에서 응고과정에서 교반하여 성형하는 것이 기계적 물성치가 우수한 압 부품을 성형할 수 있을 것으로 판단이 된다.

### 3. 금형 설계

전자교반을 이용하여 레올로지 소재를 성형하는 방법은 수지상정 조직을 미세화하고 구상화된 고상입자로 만들어 성형하는 방법으로 액상에서 성형하는 방법보다 응고시간이 짧아서 수축결함을 줄일 수 있고 성형 시 금형에 받는 열충격을 줄일 수 있으며, 응고시간이 감소하므로 내부기공을 획기적으로 개선할 수 있다. 또한, 점성이 액체상태 보다 더 높으므로 충전 시 유동형태가 난류로 발달하지 않기 때문에 용탕의 흐름에 기인하는 유동불량이 적어지는 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 이러한 특성을 고려하여 압 부품의 금형 제작은 구조해석 전용코드인 MAGMASoft 를 이용하여 충전 및 응고 해석을 통한 구조결함을 미리 예측함으로써 최적화된 금형설계 방안을 마련하여 본 연구의 금형제작에 이용하였다. Fig. 7 은 게이트(Gate)와 오버플로우(Overflow)의 형상과 위치를 나타낸 그림이다.

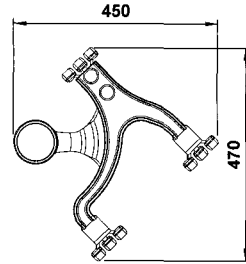


Fig. 7 Geometry of runner system and arm part dimension

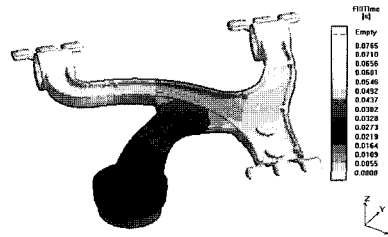


Fig. 8 Filling time distribution of arm part

Fig. 8 은 압 부품의 충전시간의 분포를 나타낸 것이다. 충전시간은 0.0764sec, 게이트부 통과시간은 약 0.0437sec 이며, 제품부 충전시간은 0.0327 sec 이다. 충전시간에 따른 캐비티내부의 용탕의 유동변화는 오버플로우가 최종 충전되는 양호한 충전양상을 보이고 있으며, 짧은 충전시간으로 캐비티내부의 용탕의 온도편차가 약 3°C이내의 양호한 결과로 나타났으며, 최종 충전시 금형내 소재온도가 최저 609°C로 액상률 75% 이하에서 충전이 완료되고 있다.

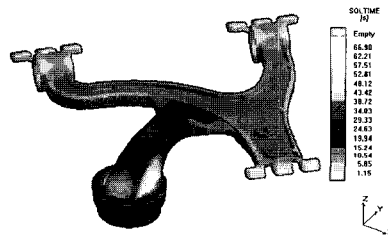


Fig. 9 Solidification time distribution of arm part

Fig. 9는 압 부품의 응고시간의 분포를 나타낸 것이다. 압 부품의 최종 응고 시간은 66.9sec이며 제품부는 최종 충전 후 16.37sec후 모든 응고가 완료되었으며, 제품부에서 게이트부로의 방향성 응고를 보임을 알 수 있다. 이를 통해, 실제 제품성형에서의 충전 후 가압시간의 조건을 확보할 수 있었다. Fig. 10는 압 부품의 열점(Hot spot)의 분포를 나타낸 것이다. 게이트부로의 방향성 응고로 인하여 대부분의 열점분포가 게이트 및 오버플로우에 발생되었으며, 열점이 발생한 부위는 수축공의 발생할 가능성이 높으므로 Fig. 11과 같은 위치에 히팅라인(Heating line)을 설치하여 금형의 온도강하를 막음과 동시에 부품의 응고양상의 제어와 금형의 열적 안정화를 도모하였다.



Fig.10 Hotspot distribution of arm part

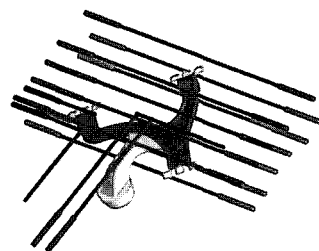


Fig. 11 Heating line at arm part

## 4. 실험

### 4.1 실험방법

전자교반을 이용하여 성형하는 방법은 전자교반을 할 수 있는 비자성체 소재의 슬리브(sleeve) 제작이 중요하다. 현재 비자성체 소재로 많이 사용하고 있는 소재는 19%의 크롬(Cr)과 9%의 니켈(Ni)을 함유하고 있는 STS 304이다. STS 304 소재의 특징은 상온에서 비자성체 성질을 가지고 있으며 소재 가공이 우수하여 전자교반용 슬리브로 설계 제작하였다. 슬리브의 내경은 전자교반 실험에서 컵의 직경과 같은 80mm이며 슬리브의 외경은 130mm로 하여 제작하였다. Fig. 12는 본 실험인 전자교반성형의 개략도이다.

암 금형의 부품 성형성과 기계적 물성치를 비교평가하기 위하여 Table 1의 조건으로 실험을 하였다. 일반적인 주조공정에서의 열처리방법과 기계적 물성치는 여러 문헌에 이미 발표되어 있으며[9-10] 본 연구에서는 여러 문헌의 실험 결과를 바탕으로 하여 전자교반을 이용한 성형공정의 적합한 열처리와 조업조건을 찾고자 하였다.

전자교반을 이용한 성형실험을 하기 위해 A356

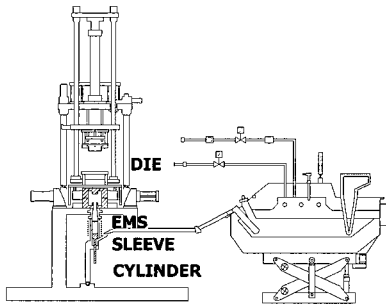


Fig.12 Schematic diagram for casting with EMS

합금을 용해/보온로에 700℃의 온도로 용해시킨다. 그러나, 700℃에 용해된 용탕은 용탕 내부에 불순물과 기포 등이 존재한다. 이러한 불순물 및 기포가 캐비티(Cavity) 속으로 유입 시 부품의 기계적 물성치를 현저히 저하시키므로 질소 가스를 주입시켜 용탕 내부의 산화물을 제거시킨다.

용탕의 산화물 제거를 위한 질소의 버블 작업은 3-4 분 동안 하며 버블 작업 후 용탕표면의 산화물을 래들을 이용하여 제거하고 10 분 정도의 용탕 안정시간을 두어 성형작업을 한다. 제작이 완료된 암 금형은 금형이동용 대차를 이용하여 금형을 증압주조기에 장착한다. 금형 장착 시 주의할 점은 금형의 중심이 장비의 중심과 맞지 않으면 슬리브의 팁과 금형 슬리브 사이의 간섭이 생겨 팁(Tip)이 파손된다. 파손된 팁을 사용하여 성형하게 되면 파손된 팁 사이로 알루미늄 용탕이 침투하여 슬리브의 내경에 손상을 주게 된다.

그러므로, 금형 장착 시 금형의 중심과 증압주조기의 중심이 일치하도록 주의하여 암 금형을 장착하여야 한다. 정량급탕장치로부터 슬리브로 용탕의 주입을 위하여 금형의 게이트 홀에 용탕 공급장치를 설치하여 슬리브에 용탕의 주입하였다. 용탕 공급장치에 의하여 용탕 주입이 완료된 후 실험조건에 따라서 전자교반을 이용한 성형실험을 한다.

증압주조기에 장착이 완료된 암 금형은 증압주조기의 유압실린더에 의해서 상하 방향으로 금형의 분리가 가능하도록 되어 있다. 그리고 슬리브 내부로 주입된 용탕은 슬리브 외곽을 둘러싸고 있는 전자교반기에 의하여 실험 조건에 따라서 전자교반을 한 후 금형의 캐비티 내부로 유압실린더에 의하여 충전된다.

Table 1 The experimental conditions to fabricate arm part

No.	Pouring temperature ( $T_p$ ) (°C)	Die / sleeve temperature ( $T_d$ ) (°C)	Injection velocity (V) (m/s)	Injection pressure (P) (bar)	Stirring current (C) (A)	Stirring time, $t_s$ (sec)	Heat treatment condition
1	700	220	<u>0.2</u>	450	0	0	T5, T6
2	700	220	<u>0.3</u>	450	0	0	T5, T6
3	700	220	<u>0.5</u>	450	0	0	T5, T6
4	700	220	<u>0.3</u>	450	<b>40</b>	<u>20</u>	T5, T6
5	700	220	0.3	450	<b>40</b>	<u>30</u>	T5, T6
6	700	220	0.3	450	<b>60</b>	<u>20</u>	T5, T6
7	700	220	0.3	450	<b>60</b>	<u>30</u>	T5, T6

이렇게 충전이 완료된 부품을 취출하기 위해서 금형의 상판에는 이젝트 플레이트(Eject plate)가 부착되어 있으며 중압주조기의 이젝트 유압실린더의 작동으로 금형의 이젝트 플레이트가 작동이 되어 암 부품 취출이 가능하게 한다.

전자교반을 이용한 성형공정의 한 사이클을 완료하여 취출된 암 부품은 냉각수에 의하여 퀀칭(Quenching) 작업을 한다. 보통 냉각수의 온도는 15℃의 냉각수 온도가 적합하며 가능한 냉각수의 온도는 일정하게 유지하여 퀀칭 작업을 한다. 퀀칭 작업을 완료한 암 부품의 각각의 부분의 미세조직을 관찰하기 위하여 5×5mm의 크기로 절단 후 마운팅 작업과 폴리싱 작업 후 광학현미경에 의하여 조직관찰을 하였다. 또한, T5나 T6의 열처리공정을 통하여 기계적인 물성치를 조사하였다. T6 열처리 방법은 510℃-540℃의 온도에서 보통 4 hr 용체화 처리와 150℃-190℃ 온도에서 8hr 시효처리 방법이며 T5 열처리는 용체화 과정없이 150℃-190℃ 온도에서 8hr 시효과정을 통하여 기계적 성질을 높이는 방법이다.

본 실험에서는 전자교반하여 성형된 암 부품을 T5 와 T6 열처리하여 연신율, 항복강도 그리고 인장강도 값을 비교하여 전자교반성형법으로 제조한 부품에 적합한 열처리 조건을 찾고자 하였다.

## 4.2 실험결과

### 4.2.1 사출조건에의 영향

Fig. 13은 전자교반 성형장비에서 각각의 성형조건에 따라 성형된 암 부품의 사진이다.

300bar의 사출압력과 0.2m/s의 사출속도로 성형한 경우 저속의 충전속도로 인하여 슬리브에서 금형으로 충전되는 동안 용탕의 응고로 인하여 부품부에 미성형이 발생하고 충전압력이 전달되지 않았기 때문에 표면이 양호하지 않았다. 부품의 사출속도를 0.2m/s에서 0.3m/s로 증가시켜 실험한 결과 미성형이 발생되지 않았으며 부품의 표면상태도 양호한 것으로 관찰되었다.

사출속도를 0.3m/s에서 0.5m/s로 증가시켜 실험한 결과 고속 충전으로 인하여 금형 파팅 부분으로 용탕의 비산이 발생되었으며 부품 표면 또한 양호하지 못한 결과를 얻었다.

성형압력의 영향을 관찰하기 위하여 성형압력을 450bar로 증압한 결과 사출압력이 높을수록 표면 상태는 양호해지는 결과를 얻을 수 있었다.

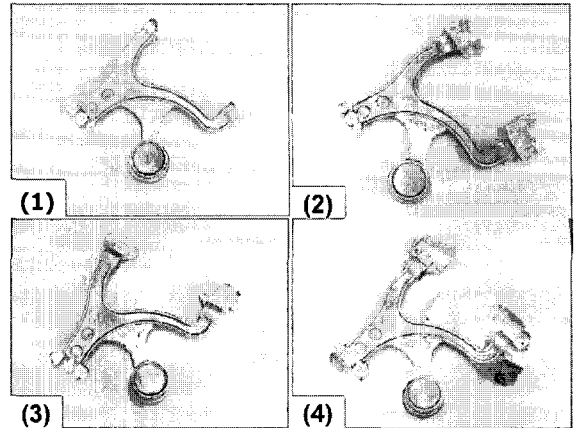


Fig.13 Photographs of arm part according to velocity and pressure: (1) 0.2m/s, 300bar ; (2) 0.3m/s, 300bar; (3) 0.3m/s, 450bar; (4) 0.5m/s, 450bar

### 4.2.2 교반시간의 영향

전자교반을 하지 않고 성형한 암 부품의 결과 성형압력이 450bar에서, 0.3m/s의 사출속도에서 가장 양호한 암 부품을 얻을 수 있었다. 전자교반을 이용한 암 성형실험은 사출압력 450bar와 사출속도 0.3m/s에서 전자교반시간과 전자교반전류를 변수로 하여 실험을 하였으며 전자교반된 부품의 미세조직과 기계적 물성치를 비교하여 최적의 전자교반 성형조건을 데이터화 하고자 하였다.

Fig. 14은 교반한 암 부품과 교반하지 않고 성형한 암 부품의 미세조직을 비교한 것이다. 전자교반을 하지 않고 성형한 암 부품은 일반적인 주조조직인 수지상 조직이 관찰되고 초정과 공정 조직이 불균일하게 분포되어 있다. 그러나 전자교반을 하여 성형한 암 부품의 조직은 미세한 초정조직이 구상화 되어 공정조직에 고루 분포되었다.

Fig. 15는 교반시간에 따른 암 부품의 미세조직을 관찰하기 위해서 교반전류를 100A로 하고, 교반시간을 5sec, 10sec, 15sec, 20sec의 시간으로 교반하여 성형한 부품의 미세조직으로 전자교반시간이 증가할수록 초정입자의 크기가 미세화되고 구상화됨을 관찰할 수 있었다. 그러나, 교반시간이 15sec이상의 시간에서는 슬리브 내에서 용탕의 응고로 인한 부품의 미성형 때문에 15sec내에서 강력하게 교반한 뒤 성형하는 것이 미세하고 구상화된 조직을 얻을 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

교반전류에 대한 미세조직을 비교 관찰하기 위하여 슬리브에 용탕을 충전한 뒤 전자교반하지

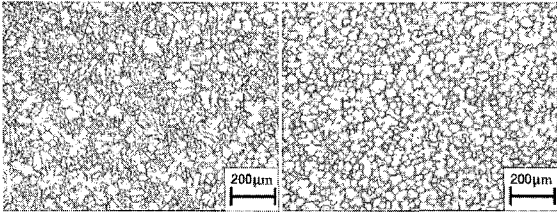


Fig.14 The comparison of the microstructure with and without stirring: (a) Without stirring; (b) C: 100A ; t<sub>s</sub>: 15sec)

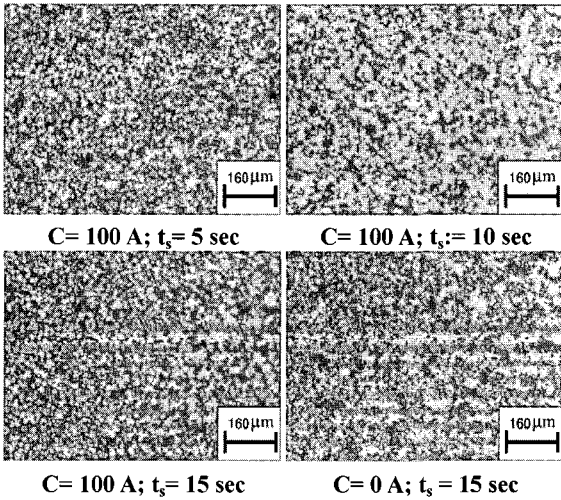


Fig.15 The comparison of the macrostructure according to stirring time in arm part (C= 100A)

않고 15sec 동안 유지한 후 성형한 압 부품의 미세조직은 초정입자들이 구상화는 되었으나 초정입자들이 공정조직 내에 균일하게 분포되지 않고 액상편석이 발생함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 16 은 전자교반하여 성형한 압 부품의 미세조직 관찰 위치를 나타낸 그림이다. 미세조직 관찰 위치는 최종 충전 위치이며, 압력전달이 어렵고, 금형 내로 유입된 소재의 온도가 가장 낮은 위치로 결함이 주로 발생하는 위치이다.

(1)-(8)의 위치는 다른 부품이 결합되는 부위로 코어금형이 부착되며 부품의 형상이 원형이므로 재료의 유동 시 겹침이 발생할 수 있다. Fig. 13 에서의 (9)-(10) 위치는 게이트에서의 충전거리가 (1)-(8) 부위에 비해서 짧지만 후속부가 존재하므로 응고 시 수축결함이 발생할 수 있는 부위이다. 이러한 결함 예상부위의 미세조직을 관찰함으로써 사출조건 및 압력조건을 변경하여 양호한 부품을 성형할 수 있다.

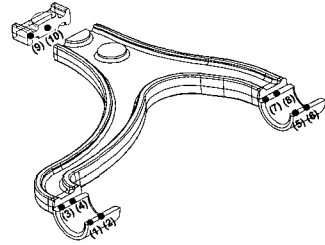


Fig.16 Experimental position to investigate the microstructure

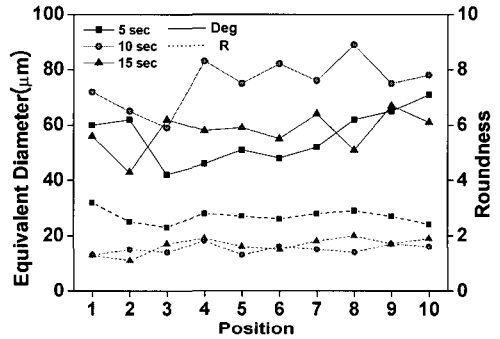


Fig.17 Equivalent diameter at each position according to stirring time during electromagnetic stirring (C= 100A)

등가지름이란 구상의 면적에 대응하는 원의 지름을 말하는 것으로 다음과 같다.

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

여기서,  $D_{eq}$  : 등가지름(equivalent diameter), A: 구상의 단면적(area of globule)이다.

구상화정도(R)는 구상조직의 둘레와 구상조직과 같은 면적을 가지는 원둘레의 비로 다음과 같다.

$$R = \frac{p^2}{4\pi A}$$

여기서, R: 구상화정도(roundness), p: 구상의 둘레(perimeter), A: 구상의 단면적(area of globule)이다.

Fig. 17 는 교반시간에 따른 압 부품의 미세조직을 상분석기를 통하여 등가지름, 구상화정도를 나타낸 것이다.

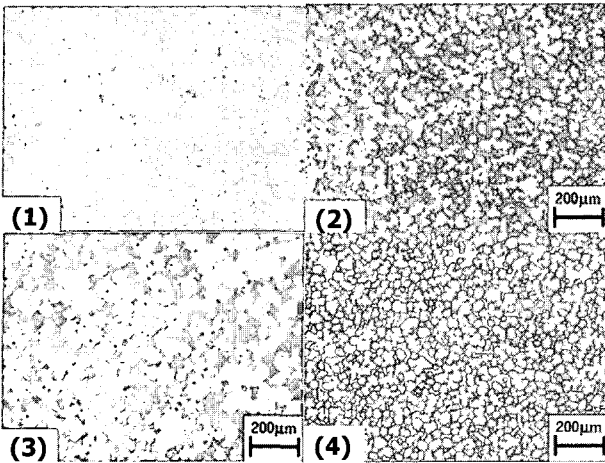


Fig.18 The comparison of the macrostructure according to stirring current in arm part : (1) Without stirring ; (2) C= 40A,  $t_s= 15\text{sec}$ ; C= 60A;  $t_s= 15\text{sec}$ ; C= 100A,  $t_s= 15\text{sec}$

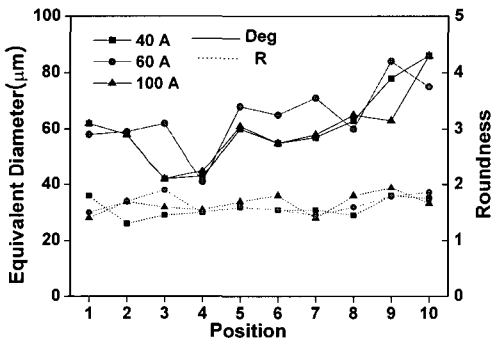


Fig.19 Equivalent diameter and mean roundness at each position according to stirring current( $t_s= 15\text{sec}$ )

#### 4.2.3 교반전류의 영향

Fig. 18, 19 는 교반전류에 대한 압 부품의 미세 조직의 영향을 관찰하기 위하여 교반전류를 40A, 60A, 100A 로 변화시켜 15sec 동안 교반한 압 부품을 Fig. 16 의 각각의 위치에서 관찰한 조직사진과 초정입자의 등가지름 및 구상화 정도를 나타낸 것이다. 각각의 위치에서 등가지름 및 구상화 정도를 측정된 결과 초정입자의 크기는 40µm-80µm 의 미세한 초정입자를 얻을 수 있었으며 교반전류에 대한 등가지름의 차이는 크게 나타나지 않았다. 그리고, 교반전류에 따라 성형된 압 부품은 1.4-1.8 범위의 구상화된 초정입자를 관찰 할 수 있었으며 교반전류가 구상화 정도에 큰 영향을

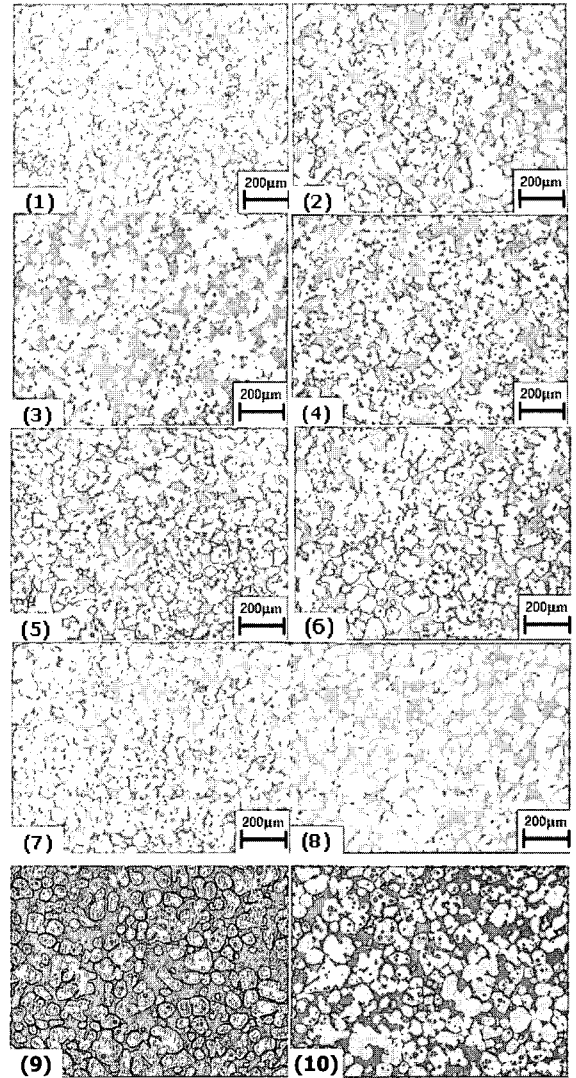


Fig.20 Microstructures at each position according to each point (C= 60A;  $t_s= 10\text{sec}$ )

주지 못함을 알 수 있었다. 이것은 교반전류가 40A에서 이미 전자교반력에 의하여 수지상 조직이 파쇄되었으며 교반전류를 점점 더 증가할수록 이미 파쇄된 수지상 조직들이 재결합되는 현상으로 사료된다. 그리고, 전자교반에 의하여 이미 파쇄된 초정입자들이 금형 내부로 충전되는 동안 구상화된 입자들이 재결합 또는 성장으로 인하여 최종 제조된 압 부품의 각 위치에 대한 구상화 정도는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

압 부품의 구상화 정도는 40A 이상의 교반전류에서 교반한 뒤 금형 캐비티 내부로 충전 후 취



출되는 동안에 급형의 온도와 켄칭온도에 크게 영향이 있는 것으로 사료된다.

Fig. 20은 60A의 교반전류를 10sec 동안 교반하여 성형한 부품을 각각의 위치(Fig.16)에서 5mm×5mm 크기의 시편을 제작하여 미세조직을 관찰한 사진이다. 미세조직을 관찰한 결과 부품의 전체부분에 대하여 초정입자들이 고루 분포하는 것을 관찰하였으며 분포된 초정입자들은 전자교반에 의해서 미세하고 구상화되어 있음을 알 수 있었다.

Fig. 21은 전자교반하여 성형한 부품의 기계적 물성치 값을 조사하기 위하여 인장시편을 채취한 위치를 나타낸 것이다. (1)-(2)과 (5)-(6) 위치는 양쪽 부위부와 인접한 위치이고, (7)-(8) 위치는 후육부가 있는 부분이며, (3)-(4) 위치는 게이트와 가까운 위치이다. 인장시편은 ASTM E 8M 봉상규격을 사용하였으며, 표점거리는 20mm, 직경은 4mm이다. 인장실험은 25Ton MTS 장비를 사용하였고, 표점거리 내의 변형율을 정밀하게 측정하기 위해서 변위계를 부착하여 1mm/min의 속도로 실험하였다.

Table 2는 전자교반하여 성형한 압 부품과 전자교반하지 않고 성형한 압 부품의 기계적 물성치 값을 정리한 것이다.

기계적 물성치를 측정한 결과 40A의 교반전류를 10sec 동안 교반하여 성형한 부품에서 연신율 8.1%, 항복강도 300MPa, 인장강도 332MPa의 높은 기계적 물성치를 얻을 수 있었으며 전자교반을 하지 않고 성형한 압 부품과 전자교반공정을 거쳐 성형한 부품의 기계적 물성치값을 비교한 결과 연신율은 6.9%에서 8.1%, 인장강도 215MPa에서 332MPa의 더 높은 기계적 물성치 값을 얻을 수 있었다. 그러나 전자교반시 성형 중에 주의할 점은 전자교반시 강력한 교반력에 의하여 용탕의 회전이 발생이 되며 용탕의 회전동안 용탕내부로 공기가 유입이 되어 부품의 기계적 성질을 저하시키는 요인이 되었다.

이것은 강력한 교반력에 의하여 전자교반 동안 용탕내부로 공기의 유입 또는 산화물 등이 혼입이 되어 기계적 물성치에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

#### 4.2.4 결함분석 및 기계적성질

슬리브로 공급된 용탕이 전자교반력에 의하여 원주방향으로 교반되고 전자교반력이 증가함에 따라 용탕의 원심력에 의하여 중간이 움푹 패이

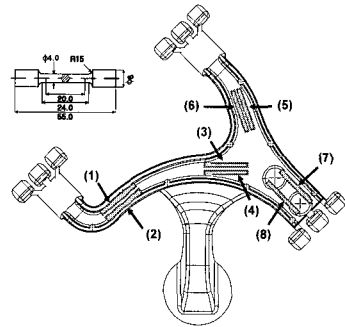


Fig.21 Experimental position to investigate the mechanical properties

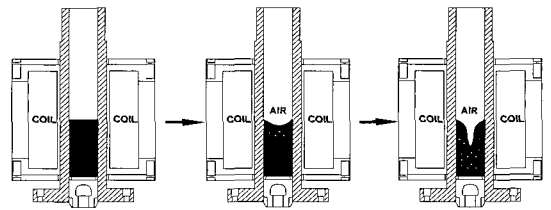


Fig.22 The behavior of molten metal inside sleeve during stirring

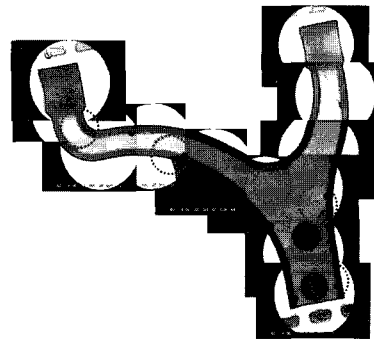


Fig.23 Positions for X-ray observation

게 되어 공기가 유입이 된다. 이렇게 유입된 공기가 부품 속으로 포집되어 부품의 기포 결함을 준 것으로 사료된다. Fig. 22는 전자교반 동안 공기 및 산화물의 유입에 대한 그림을 나타낸 것이다.

Fig. 23는 전자교반에 의하여 성형된 부품을 Toshiba Tosray-150 HS 모델의 X-ray 장비를 사용하여 부품 내부를 관찰 하였다. 부품내부를 관찰한 결과 기포가 많이 발견되었다. 이러한 압 부품 내부의 결함은 기계적 물성치를 감소시키므로 기포 및 산화물의 유입을 방지하기 위해서는 전자교반

Table 2 The mechanical properties of arm part with and without stirring according to each condition

P	V	A	T <sub>s</sub>	Heat treatment condition	Elongation (%)		YS (MPa)		UTS (MPa)	
					max	ave	max	ave	max	ave
450	0.3	0	0	T6 (4Hr at 520°C 8Hr at 160°C)	6.9	5.1	-	-	215	194
450	0.5	0	0	T6 (4Hr at 520°C 8Hr at 160°C)	6.4	3.9	-	-	250	201
450	0.3	40	<u>10</u>	T6 (4Hr at 520°C 8Hr at 160°C)	8.1	6.5	300	167	332	232
450	0.3	40	<u>20</u>	T6 (4Hr at 520°C 8Hr at 160°C)	6.2	5.07	360	308	456	361
450	0.3	<u>60</u>	10	T6 (4Hr at 520°C 8Hr at 160°C)	6.4	5.54	298	243	345	301
450	0.3	<u>60</u>	20	T6 (4Hr at 520°C 8Hr at 160°C)	6.8	5.37	212	273	317	318
450	0.3	60	<u>10</u>	T5 (8 Hr at 170°C)	8.5	5.52	209	228	315	287
450	0.3	60	<u>20</u>	T5 (8 Hr at 170°C)	9.8	5.14	180	272	291	230

초기에 약한 전류값으로 교반한 뒤 용탕의 온도가 고액공존 영역에서 강력하게 교반하는 것이 기포발생을 억제할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

A356 합금을 사용하여 전자교반 기술을 레올로지 성형공정에 적용하여 압 부품을 성형한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 교반전류가 증가함에 따라 자속밀도가 증가하여 용탕의 교반이 활발히 진행되어 초정의 구상화 정도 및 미세화가 향상되었다.

(2) 전자교반중에 소재의 위치에 상관없이 교반이 이루어짐을 확인 할 수 있었지만 교반되는 위치가 가장자리가 가운데 부위에 비해 전자기 교반기에 의한 영향이 적게 나타남을 알 수 있었다.

(3) 전자교반 실험에서 655°C의 용탕온도를 60 A의 교반전류를 60sec 동안 교반하여 제작한 시편을 관찰한 결과 미세하고 구상화된 초정입자를 얻을 수 있었으며 공정 내에 미세한 Si 입자들이 고루 분포하였다.

(4) MAGMAsoft를 사용하여 압 부품의 충전 및 응고 해석을 하였으며 해석결과를 바탕으로 주조 결함을 미리 예측함으로써 최적화된 금형 설계 방안을 마련 하였다.

(5) 미세조직과 인장강도와의 관계를 관찰한 결과 미세한 초정입자와 균일한 공정조직을 가진 압 부품이 더 높은 기계적 물성치를 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 지원하의 국가지정연구실-Thixo-Rheo 성형연구실(NRL)-사업 과제와 (주)동서기전의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] O. Shinobo, 1994, Research activities in rheo technology Ltd., Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Institute of Industrial Science University of Tokyo, Japan, pp. 7~18.
- [2] C. G. Kang, P. K. Seo, Y. P. Jeon, 2005, Thixo die-casting process for fabrication of thin-type component with wrought aluminum alloys and its formability limitation, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 160, pp. 59~69.
- [3] K. Sukumaran, B. C. Pai, M. Chakraborty, 2004, The effect of isothermal mechanical stirring on an Al-Si alloy in the semisolid condition, Mater. Sci. Eng. Vol. 369, pp. 275~283.
- [4] 강충길, 서판기, 손영익, 2002, 반응용 다이 캐스팅 공정에 있어서 속도 제어방법이 부품의 특성에 미치는 영향, 대한기계학회 논문집 A, 제 26 권, 제 10 호, pp. 2034~2043.
- [5] G. Chairmetta, L. Zanardi, 1996, Production of structural components by thixoforming aluminum alloys, Proc. of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid

- Processing of Alloys and Composites, Sheffield, D.H. Kirkwood, P. Kapranos, Eds., Univ. of Sheffield, UK, pp. 235~244.
- [6] K. P. Young, R. Fitze, 1994, Semi-Solid Metal Cast Aluminum Automotive Components, Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 155~176.
- [7] 고재홍, 서판기, 최우식, 강충길, 2004, 수평식 전자교반을 이용한 A356 합금의 결정립제어, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 111~114.
- [8] 임성철, 윤의박, 1992, 전자교반시 Al-7wt%Si 합금의 초정입자에 미치는 유동의 영향 한국주조공학회 논문집 제 16 권, 제 6 호 pp. 565~575.
- [9] D. A. Pinsky, P. O. Charreyron, 1993, Alternate reduce weight in automotives, advanced materials and process, Vol. 6, pp. 146~147.
- [10] 강효경, 천병욱, 최창욱, 1993 AC4C 합금의 기계적 성질에 미치는 주조조건과 열처리의 영향에 관한 연구 한국주조공학회 논문집 제 13 권, 제 5 호, pp. 64~75.