

## 나선형 기계 교반 레오로지 소재의 이용한 Thixoforging 공정

한수훈<sup>1</sup>, 정일갑<sup>1</sup>, 배정운<sup>1</sup>, 강충길<sup>#</sup>

### Thixoforging Process of Rheology Materials fabricated by Spiral Mechanical Stirring

S. H. Han<sup>1</sup>, I. K. Jung<sup>1</sup>, J. W. Bae<sup>1</sup>, C. G. Kang<sup>#</sup>

#### Abstract

A semi-solid forming technology has a lot of advantages compared to the die casting, squeeze casting and hot/cold forging, so semi-solid forming has been studied actively. Semi-solid forming has two methods. One is thixoforging with reheating of prepared billet, the other is rheoforging with cooled melt until semi-solid state. Thixoforging technology can produce non-dendritic alloys for semi-solid forming complex shaped parts in metal alloys. In this study, the thixoforging was experimented with made rheology materials by the spiral stirrer equipment. Rheology materials for forging were made by A356 casting aluminum alloy and A6061 wrought aluminum alloy. After experiment, forged samples were measured microstructure and were heat treated for high mechanical properties.

**Key Words** : Semi-solid Forming, Spiral stirrer equipment, Thixoforging, Microstructure, Mechanical Propertirs

#### 1. 서론

일반적으로 복잡한 형상의 부품은 주·단조를 통해 제조되어지나 주조품은 기공 등 많은 미세조직상의 결함을 가지고 있기 때문에 기계적 특성에 많은 한계가 있다. 반면, 열간단조 및 열간압출 등과 같은 고체 상태에서의 정형가공은 주조품의 미세결함을 제거하여 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 정미 부품 성형의 성형 압력이 높아지는 단점이 있으며 절삭 등의 후가공으로 인한 생산·경제성에 손실이 뒤따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 원소재로부터 최종 형상에 가장 가까운 부품(near-net shape)을 성형하기 위한 반응용 가공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

반응용 성형이란 액상과 고상이 공존하는 온도 영역 즉, 상태도 상에서 고상선과 액상선 사이의 온도영역에서 최종부품에 가깝게 성형하는 방법으로 텍소(Thixo) 성형법과 레오(Rheo) 성형법으로 분류하고 있다. 텍소 성형 공정은 제조된 빌렛을 재가열 과정을 거쳐 반응용 상태로 만들어 성형하는 방법이며, 레오 성형 공정은 용탕으로부터 온도를 강하시켜 반응용 상태로 만들어 성형하는 방법이다. 레오로지 소재 제조에 있어 응고시 발생하는 수지상 조직을 파쇄하여 입자를 구상화시켜 반응용 상태의 소재를 제조하기 위한 방법으로 기계 교반과 전자 교반의 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 나선형 기계 교반법으로 제작되어진 반응용 소재의 텍소포징 공정의 활용가능성을 알아보고자 주조용 A356 알루미늄 합금과

1. 부산대학교 정밀기계공학부

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

구조용 A6061 알루미늄 합금을 나선형 기계 교반 장치를 사용하여 빌렛 형태의 레오로지 소재를 제조하였다. 제조된 빌렛을 재가열하여 텍소포징 공정을 시행하였다. 텍소포징 공정을 통해 얻어진 제품의 미세조직을 관찰하고 T6 열처리 시행 후 기계적 성질을 검토하였다. 또한, 이러한 일련의 과정을 통하여 나선형 기계 교반을 통한 연속적인 레오로지 소재 제조와 제조된 소재의 텍소포징 공정 활용가능성을 파악하고 고강도 알루미늄 합금 부품의 개발에 관한 기초성형 데이터 베이스를 구축하고자 한다.

## 2. 실험

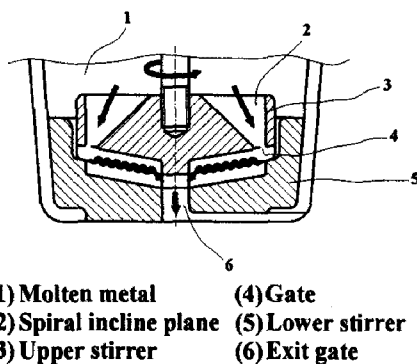
### 2.1 실험 방법

실험에 사용된 소재는 구조용 합금으로 주로 사용되는 A356 합금과 구조용 A6061 합금을 사용하였다. Table 1 은 A356 및 A6061 합금의 구성비를 나타낸 것이다[2].

**Table 1 Chemical composition of A356 and A6061 alloys**

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	others
A356	Min 6.50	-	-	-	0.25	-	-	-	-	0.05
	Max 7.500	0.200	0.200	0.100	0.45	-	-	0.100	0.20	0.15
A6061	Min 0.40	-	0.15	-	0.800	0.04	-	-	-	0.05
	Max 0.800	0.700	0.400	0.151	0.200	0.35	-	0.250	0.15	0.15

레오로지 소재를 제작하기 위한 나선형 기계 교반 장치의 구성은 Fig. 1 과 같다.



- (1) Molten metal
- (2) Spiral incline plane
- (3) Upper stirrer
- (4) Gate
- (5) Lower stirrer
- (6) Exit gate

**Fig. 1 Moving direction of molten metal during mechanical stirring to control of solid fraction**

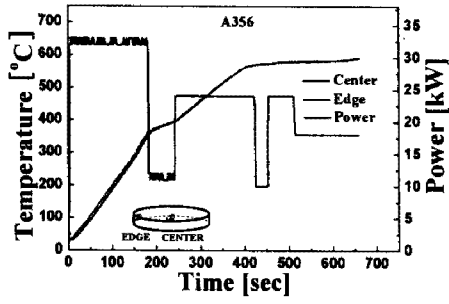
먼저 전기로에 용해되어 있는 용탕을 나선형 기계 교반 장치에 주입한다. 주입된 용탕은 상부 교반자의 나선형의 경사로를 따라 게이트를 통과하게 되고 상부교반자와 하부교반자의 나선형상의 홈에서 와류흐름이 발생 중심방향으로 흘러가 출구를 거쳐 나오게 된다. 레오로지 소재 제조 시 교반조건은 A356 합금의 경우 교반시간 300 sec, 교반속도 60 rpm, 용탕온도 620 °C 로, A6061 합금은 교반시간 300 sec, 교반속도 60 rpm, 용탕온도 650 °C 로 시행하였다. 이 조건에서 A356 합금은 등가치름 40 ~ 90 μm, 구상화 정도 2.0, 비커스경도 50 Hv 를, A6061 합금은 등가치름 45 ~ 65 μm, 구상화 정도 1.4 ~ 1.6, 비커스 경도 60 Hv 의 양호한 소재를 얻을 수 있었다[4]~[5].

제조한 소재는 산업화 검증을 위하여 텍소포징 성형 실험을 수행하였다. 텍소포징 성형 실험을 위하여 온도, 시간 및 전력량을 조절할 수 있는 50 kW 고주파 유도 가열 장비를 사용하여 레오로지 소재를 재가열 하였다. Table 2 는 텍소포징 성형 실험을 위한 재가열 조건을 나타낸 것이다. A356 합금은 595 °C, A6061 합금은 652 °C 를 목표로 각 6 단계의 조절로써 목표온도에 도달하도록 하였고 소재의 선단부와 중앙부에 온도센서를 설치하고 검출되는 두 위치의 온도가 같이 상승하여 목표한 온도에 수렴하도록 가열시간과 전력량을 결정하여 가열하였다[3].

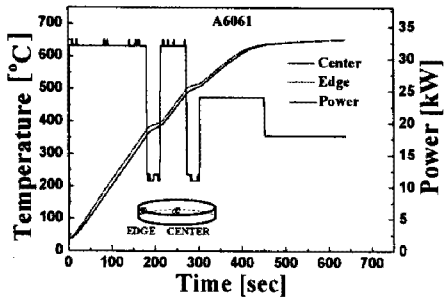
**Table 2 The reheating conditions of A356 and A6061 alloys**

A356	Step	1	2	3	4	5	6
	595 °C	Time(sec)	180	60	180	30	60
	Power(kW)	35	10	25	8	25	18
A6061	Step	1	2	3	4	5	6
	652 °C	Time(sec)	180	30	60	30	150
	Power(kW)	35	10	35	10	25	18

Fig. 2 는 Table 2 에서 설정한 조건으로 재가열을 실시하였을 때 전력량과 시간에 대하여 레오로지 소재의 선단부와 중앙부에서 측정된 온도가 거의 같이 상승하여 목표온도에 수렴하는 것을 보여주고 있다. 재가열된 소재는 Fig. 3 에 보이는 바와 같이 다단 형상을 가진 금형과 재가열된 소재에 압력을 가할 수 있도록 장치된 프레스를 사용하여 150 MPa 의 가압력을 가하여 텍소포징 성형 실험을 수행하였다.

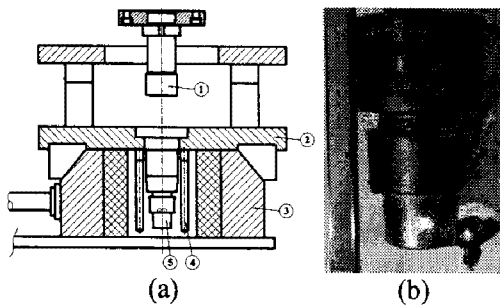


(a) A356 alloy to 595 °C



(b) A6061 alloy to 652 °C

Fig. 2 Relationship between input power and measured temperature during reheating for thixoforging process



①Punch, ②Clamp, ③Die, ④Cartridge heater, ⑤Cavity

Fig. 3 Schematics of thixoforging die and thixo-forged sample

## 2.2 실험 결과

직접식 텍소포징 성형 실험 결과 Fig. 3 에서 보여주는 형상의 제품을 얻었으며 Fig. 4 에 표시한 위치 (a) ~ (d) 에서 A356 및 A6061 합금의 미세조직을 관찰하였다. 성형된 제품을 Table 3 에 나타낸 열처리 조건으로 T6 열처리를 실시하였으며 Fig. 4 에 표시한 Position 1, 2 에서 인장 시편을 가공하여 T6 열처리 전, 후의 인장 시험을 수행하였다.

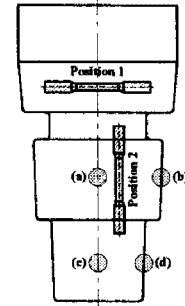


Fig. 4 The positions of sample to observe the microstructures and tensile tests

Table 3 The T6 heat-treatment conditions of A356 and A6061 alloys

	A356	A6061
Solution heat-treatment	520 °C 3Hr	530 °C 1.5Hr
Ageing	170 °C 6Hr	177 °C 8Hr

Fig. 6 은 성형 실험 후 Fig. 5 에 표시한 위치 (a), (d) 에서 A356 합금과 A6061 합금의 미세조직을 관찰한 것이다.

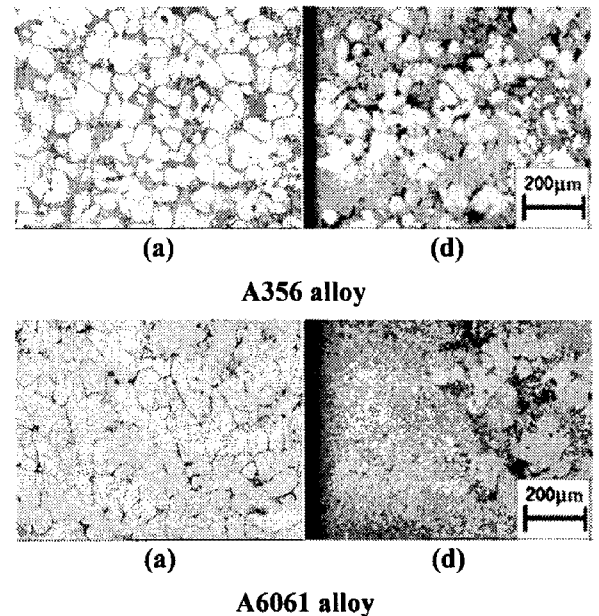


Fig. 5 Microstructures of A6061 and A356 alloys after thixoforging process

A356 시편 조직은 재가열된 소재에 성형 압력을 가하였을 때, 유동성이 좋은 액상이 먼저 금형의 캐비티에 충전이 되어 (d) 위치에서 액상편석이 나타났으며, (c) 위치에서는 액상과 고상이 고루 분포하였다. 상대적으로 늦게 충전이 되는 (b)

위치에서는 금형의 벽면부에만 액상이 존재하였으며, (a) 위치에서는 고상과 액상의 구별이 뚜렷하게 나타났다. A6061 시편 조직에서도 (d) 위치에서 대부분의 액상편석이 나타났으며, (c) 위치에서는 액상과 고상의 고루 분포하였다. (b) 위치에서는 금형의 벽면부에만 액상이 존재하는 것을 보였고, (a) 위치에서는 고상만이 나타나는 것을 보이고 있다.

Fig. 6 은 A356 및 A6061 합금의 T6 열처리 전, 후의 인장시험 결과이다. T6 열처리 후에 열처리 전과 비교하여 각각 105 MPa, 100 MPa 향상된 인장강도 320 MPa 와 330 MPa 이 측정되었다.

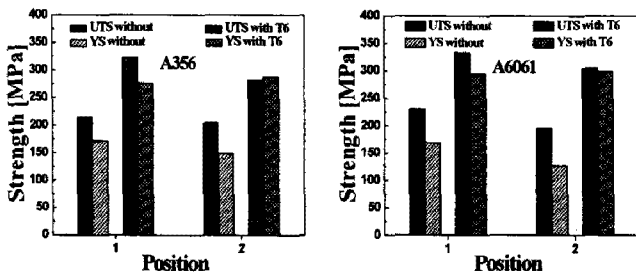


Fig. 6 The strength of A356 and A6061 alloys of obtained specimen at each position

Fig. 7 는 A356 및 A6061 합금의 T6 열처리 전, 후의 연신률을 나타낸 것이다. A356 합금은 열처리 후 7.0 % 로 측정되었고, A6061 합금은 열처리 후 9.5 % 로 측정되었다.

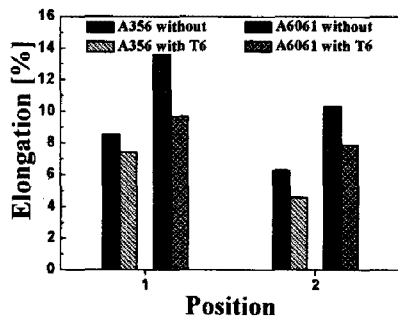


Fig. 7 The elongation of A356 and A6061 alloys at each position

### 3. 결론

나선형 기계 교반을 이용하여 A356 및 A6061 합금의 레오로지 소재를 제조한 후 텍소포징 성형 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 나선형 기계 교반법으로 제조된 레오로지 소재를 150 MPa 의 가압력으로 텍소포징 성형 실험을 수행하여 A356 합금은 인장강도 320 MPa, 연신률 7 % 를, A6061 합금은 인장강도 330 MPa, 연신률 9.5 % 의 측정값을 얻을 수 있었다.

(2) 고액공존 구간에서 나선형 기계 교반법을 이용하여 주·구조용 알루미늄 합금을 대상으로 연속적인 레오로지 소재를 제조한 후 텍소포징 성형 가능성 평가를 하였고, 향후 제품생산에 적용이 가능한 데이터 베이스를 구축하였다.

### 후기

본 연구는 산업자원부 지원하의 신기술실용화 기술개발사업과제의 지원으로 수행되었습니다

### 참고 문헌

- [1] M. C. Flemings, 1991, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State", Metallurgical Transaction A. Volume 22A, pp. 957 ~ 981.
- [2] Howard E. Boyer and Timothy L. Gall, 1985, "Metals handbook Desk Edition", American Society for Metals.
- [3] W. G. Cho, C. G. Kang, 2000, "Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys", Journal of Materials Processing Technology, 105, pp. 269 ~ 277.
- [4] Wang Deqing, Shi Ziyuan and Zou Longjiang, 2003, "A liquid aluminum corrosion resistance surface on steel substrate", Applied Surface Science, Vol. 214, pp. 304 ~ 311.
- [5] 서판기, 고재홍, 강충길, 2005, "가압회전식 장비를 이용한 A356 합금의 미세조직과 재가열 특성", 2005년도 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 227 ~ 230.