

# 전자교반을 응용한 알루미늄 레오로지 소재의 간접단조공정

오세웅<sup>1</sup>, 강성식<sup>1</sup>, 강충길<sup>#</sup>

## Indirect Forging Process with Aluminum Rheology Material by Electromagnetic Stirring System

S. W. Oh, S. S. Kang, C. G. Kang

### Abstract

A semi-solid forming processing has been developed for manufacturing near net-shape components. The semi-solid forming has two methods. One is thixo-forming with reheating prepared billet, the other is rheo-forming with cooled melt until semi-solid state. In indirect forging processing, this experiment used aluminum rheology materials by electromagnetic stirring system. Rheology material is made by Al6061. An experiment has variation factors which are pressure, solid-fraction, stirring current and stirring time. Forged samples are found microstructures and mechanical properties. Forged samples are accomplished heat treatment T6 for high mechanical properties.

**Key Words** : Indirect forging, Al6061 alloy, Electromagnetic stirring (EMS), Heat treatment T6

### 1. 서 론

준정형(near net-shape) 가공기술의 장점을 가진 반용융 성형공정(semi-solid forming processing)은 일반적인 주조와 단조공정을 개선할 수 있는 생산 공정으로 발전해 왔다. 액상보다 낮은 온도를 가지는 반용융 상태는 비뉴턴 유체의 전단-두껍기(shear-thickening)와 비슷해서 자유표면을 안정화시키는 경향이 있다. 반용융 상태는 미소의 응고 입자가 존재하기 때문에 총 응고시간을 단축시켜 제품의 생산주기를 줄일 수 있으며, 점성력이 존재해 충전이 균일하며, 재료내부의 기공 및 가스를 포함한 결함이 적은 편이다. 반용융은 금속 소재에 적용되는 성형공정인 단조, 압출, 압연, 박판 연주로도 생산이 가능하다. 이런 경우 기계의 작

은 힘으로도 성형을 할 수 있으며, 제품 형상을 완성시킬 수 있다[1].

반용융 성형은 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 1971년 MIT에서 Fleming과 Spencer가 처음으로 제안한 이후[2] Toyoshima는 고상율에 따른 단조공정의 실험연구가 진행되었고 A356 합금의 Rheo-slurry의 전자교반 조건과 투입온도에 따른 초정 거동을 관찰하였다[3-6]. Atkinson는 중간 단조와 반용융 단조를 비교 연구를 하였고 고액 공존영역에서 등온유지 시간에 따른 조직변화를 관찰하였으며 구조용 합금을 이용한 텍소포밍 실험에서 T6 열처리를 통한 강도개선을 조사하였다[7-9].

본 연구는 구조용 합금인 Al6061을 전자교반력을 이용하여 레오로지 소재로 만든 후 간접식

1. 부산대학교 기계공학부  
#. 부산대학교 기계공학부  
E-mail : cgkang@pusan.ac.kr

단조공정에서 제품의 성형 조건을 알아보고, 성형 후 조직 관찰과 함께 열처리 전후의 인장강도 비교 기계적 특성을 검토하여 간접식 단조공정의 최적 성형조건을 제시하고자 한다.

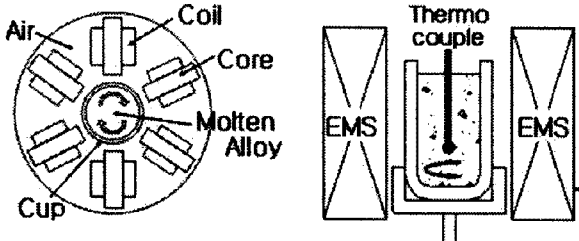


Fig. 1 Schematic diagrams of electromagnetic stirrer

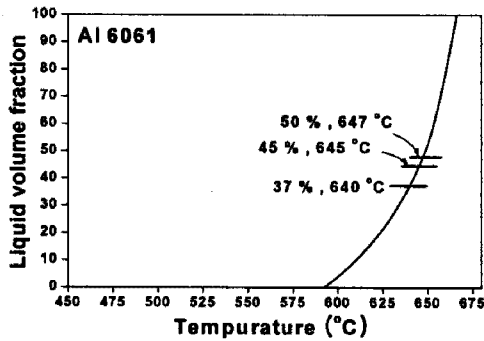
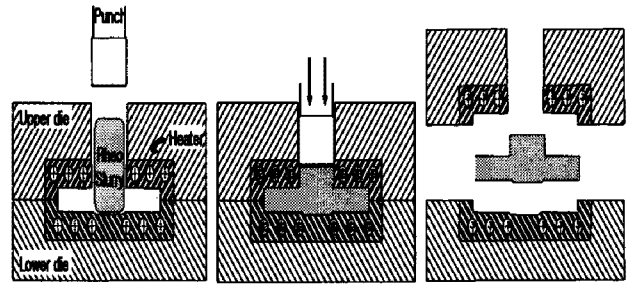


Fig. 2 Liquid volume fraction of Al6061 with DSC

## 2. 실험

Fig. 1 은 수직형 전자교반 장치(Electromagnetic system, EMS)의 개략도와 구성을 나타낸 것이다. 전자교반 장치는 3 상(Phase)이 원주방향으로 위치하여 교반력의 방향이 원주방향으로 작용한다. 이 교반력은 응고 중에 생성되는 수지상의 조직을 파괴하고 고상입자의 크기를 제어하게 된다. 전자교반 실험을 위하여 Al6061 소재를 먼저 도가니로(Furnace)에 넣고 용해를 시킨 후 전자교반 장치 안에 위치한 비자성체 컵에 용탕을 넣는다. 용탕의 온도 및 냉각속도를 측정하기 위하여 열전대(K-type)를 이용하여 교반시 온도를 측정하였다. 전자교반 동안 교반 입력전류를 과도하게 상승시킬 경우 원심력으로 인하여 용탕이 넘쳐흐를 위험이 있어 가우스메타(Gauss-meter)를 사용하여 교반 입력전류를 서서히 올려 60A 로 유지하였다. Fig. 2 는 열량분석기를 이용하여 Al6061 의 온도별 액상률을 조사한 것이다. 이 분석표를 참고하여 액상률 37%, 45%, 50%의 온도인 640°C, 645°C, 647°C에서 전자교반을 한 Rheo-slurry 를 만들었다.



(a)Inserting (b)Forming (c)Extracting

Fig. 3 Schematic of indirect rheo-forging process

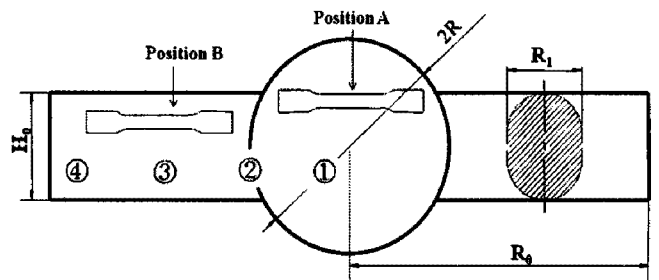


Fig. 4 Specimen to tensile test  
( $R_0=120\text{mm}$ ,  $R_1=30\text{mm}$ ,  $H_0=40\text{mm}$ )

Fig. 3 은 간접단조의 성형공정의 개략도를 나타낸 것이다. 실험전 금형의 온도는 카트리지 히터를 사용하여 250°C로 유지하였다. 클램프 실린더 압력으로 금형의 형체력을 높인 상태에서 Rheo-slurry 를 투입을 한다(Fig. 3(a)). 소재투입 후 150 ~ 250MPa 의 펀치 가압력으로 소재를 가압하였다(Fig. 3(b)). 성형 후 제품의 취출은 하측 금형에 위치한 이젝터핀(ejector pin)을 이용하였다(Fig. 3(c)). Fig. 4 는 성형된 제품의 위치 A 와 위치 B 에서 인장시험용 시편을 ASTM E 8M 규격으로 제작하고, T6 열처리 전후의 결과를 비교하였다. ①~④위치에서는 조직 관찰을 하였다. T6 열처리 조건은 530°C에서 1.5hr 동안 용체화 처리를 한 후 급랭을 하였고 177°C에서 8 시간 동안 시효처리 하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5 는 각 온도별 가압력의 성형 가능 구간을 조사한 것이다. 'X'는 성형이 불가능한 것을 표

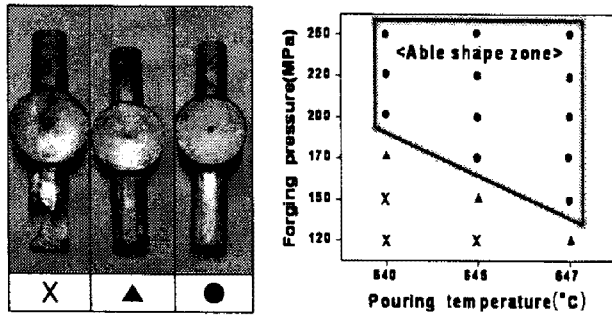
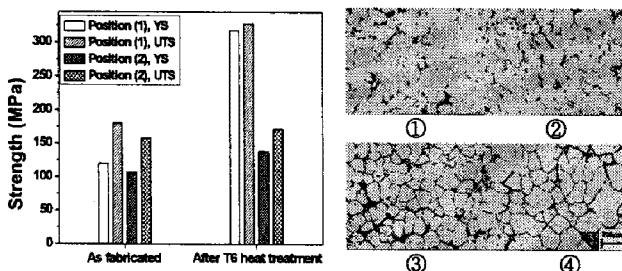
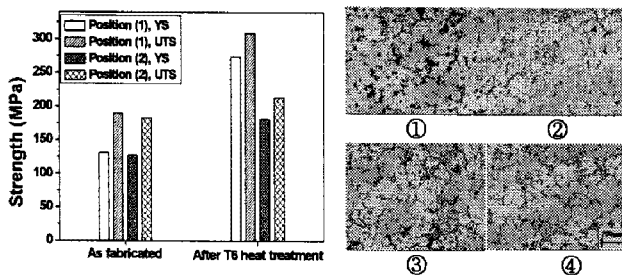


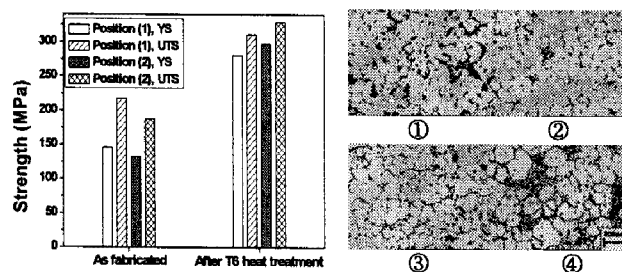
Fig. 5 Able shaping condition



(A) Pouring temperature at 640°C



(B) Pouring temperature at 645°C



(C) Pouring temperature at 647°C

Fig. 6 Strength and microstructure  
(Constant forging pressure at 220MPa)

실험 조건 중 640°C에서는 200MPa 이상, 645°C에서는 170MPa 이상, 647°C에서는 150MPa 이상에서 표면이 뛰어난 성형 제품을 얻었다. 실험 중 가장 높은 온도였던 647°C의 경우 Fig. 4에 표시한 위치 A는 가압력을 직접적으로 받는 위치로 150MPa 이상이면 응고시 발생할 수 있는 수축공 등을 충분히 압착시킬 수 있고, 위치 B는 외형적으로는 120MPa의 압력으로 충전이 되지만 수축공을 압착시키거나 밀도를 높여 내부 결함을 방지하기 위해서는 170MPa 이상의 가압력이 필요하다. 즉 170MPa 이상의 가압력에선 위치 A의 강도와 유사해 지기 때문에 제품 전체의 강도를 평균화 하기 위한 최소 가압력이 된다.

온도별 가압력이 각기 다른 성형제품에 대한 열처리 전후의 인장강도를 조사 하였으며 인장강도가 가장 높게 나타난 조건을 Fig. 6에 나타내었다. 위치 B의 인장강도는 성형조건 640°C 가압력 200MPa에서 가장 큰 인장강도를 가졌다. Fig. 6(A)는 열처리 전후 인장강도와 조직사진을 나타낸 것이다. 위치 A와 위치 B의 최대인장강도는 141MPa과 194MPa이었으며, 열처리 후 최대인장강도는 179MPa과 349MPa로 측정되었다. 645°C의 성형조건에서 위치 B의 인장강도가 가장 높게 나타난 가압조건은 220MPa이었으며, Fig. 6(B)는 열처리 전후 인장강도와 조직사진을 나타낸 것이다. 위치 A와 위치 B의 최대인장강도는 183MPa과 190MPa이었으며, 열처리 후 최대인장강도는 214MPa과 309MPa로 향상되었다. 성형조건 647°C에서 위치 B의 인장강도가 가장 높게 나타난 가압조건은 220MPa이었으며, Fig. 6(C)는 열처리 전후 인장강도 비교와 조직사진을 나타낸 것이다. 위치 A와 위치 B의 최대인장강도는 187MPa과 217MPa이었으며, 열처리 후 최대인장강도는 328MPa과 310MPa로 향상되었다.

위치 A의 조직사진은 위치 ①이며, 위치 B의 조직사진은 위치 ③이다. 각 위치에서 조직사진을 관찰한 결과 위치 ③은 액상과 고상이 고루 분포되어 가장 좋은 인장강도를 보이고 있으며, 위치 ①은 가압 부분이었지만 조직의 변화가 거의 없었기 때문에 위치 A와 위치 B의 인장강도가 유사하게 나왔다.

시 한 것이며, 성형이 가능하였지만 외형상으로 작은 흠집이 있는 것을 '▲', 표면이 뛰어난 것을 '●'로 표시 하였다.

#### 4. 결 론

전자교반을 이용한 Al6061 레오로지 소재의 반용융 간접식 단조공정에서 제품성형성 평가와 기계적 성질의 향상에 관한 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 각 온도 조건에서 표면이 뛰어난 성형제품은 성형조건 640℃에서 200MPa 이상, 645℃에서 170MPa 이상, 647℃에선 150MPa 이상에서 얻을 수 있었다.
- (2) 온도별 조건에서 가압력 증가에 따라, 인장강도도 증가함을 알 수 있었으며, 성형조건 640℃에서 220MPa, 645℃와 645℃에선 250MPa에서 오히려 인장강도가 저하되었다. 각 조건에서 일정이상의 높은 가압력은 반용융 소재의 액상을 비산시키고, 금형 캐비티 안에는 고상의 소재만 남기 때문이다.
- (3) T6 열처리 후 액상률이 37%인 640℃일 때 가장 높은 인장강도 349MPa를 가졌지만 가압부와 비가압부의 인장강도 편차가 컸다. 하지만 액상률이 50%인 647℃에선 가압부와 비가압부의 인장강도 편차가 가장 적었다. 이는 반용융 소재의 액상율이 높으면 층류유동을 하여 고상과 액상이 고르게 분포됨을 조직사진 관찰을 통해 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 지정 Thixo/Rheo 성형 국가지정연구실(NRL) 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. B. Brown, M. C. Flemings, dated Jan. 1993, Net-Shape Forming Via Semi-Solid Processing, *Advanced Materials & Processes*, pp. 36~40.
- [2] M. C. Flemings, 1992, Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22A, pp.957~981..
- [3] S. Toyoshima, Y. Takashashi, 1991, A Numerical Simulation of Forming Process for Semi-solid Materials, *ISIJ*, Vol. 3, pp.557~582.
- [4] G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen, 1994, SSM-firming of Usually Wrought Aluminium Alloy, *The 3rd Int. Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 107~116.
- [5] E. J. Zoqui, M. Paes and E. Es-Sadiqi, 2002, Macro- and microstructure analysis of SSM A356 produced by electromagnetic stirring, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pp. 365~373.
- [6] LIU Zheng, MAO Weiming, ZHAO Zhengduo, 2006, Research on semi-solid slurry of a hypoeutectic Al-Si alloy prepared by low superheat pouring and weak electromagnetic stirring, *RARE METALS*, Vol. 25, No. 2, pp. 177~183.
- [7] S.Y. Lee, J.H. Lee, Y.S. Lee, 2001, Characterization of Al 7075 alloys after cold working and heating in the semi-solid temperature range, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 42~47
- [8] Y.O. Yoon, Y.J. Kim, S.K. Kim, H.H. Jo, 2005, Microstructure Control of AA7075 Alloy for Thixoextrusion, *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol. 25, No. 6, pp. 249~253.
- [9] S. Chayong, H. V. Atkinson and P. Kapranos, 2005, Thixoforming 7075 aluminium alloys, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 390, Issues 1-2, pp. 3~12.