

주조/단조 공정에서 Al6061의 단조효과에 관한 연구

권오혁*, 배원병#, 조종래**

Forging Effect of Al6061 in Casting/Forging Process

Oh Hyuk Kwon*, Won Byong Bae#, Jong Rae Cho**

ABSTRACT

In this study, the casting/forging process was applied in manufacturing a low control arm, in order to prove that application of casting/forging process to Al6061 is likely to get the effect of light weight compared with existing steel products and to reduce the cost of materials. Firstly, In order to set up the optimum casting condition of the forging material, Al6061, casting experiments were carried out by controlling pouring temperature of the aluminum for casting, mold temperature, and pouring time. 700℃ pouring temperature, 300℃ mold temperature and 10-second pouring time were taken into account as the optimum casting conditions. With respect to a hot forging test, it is practiced on the basis of a temperature of materials, strain rate, and reduction rate so as to observe each microstructure and examine strain-stress curve simultaneously; examine tensile test and hardness test; eventually set up the optimum hot forging condition. A hot forging test, tensile test, hardness experiment, and microstructure observation were carried out on condition of 70% reduction rate, 500℃ temperature of materials, and 1 strain rate. As a result of those experiments, 330MPa tensile strength, 16.4% elongation, and 122.8Hv hardness were recorded. In order to get a sound preform which has no unfilling cavity and less flash, two preforms were proposed on the basis of volume rate of the final product; the optimum volume rate of preform for the low control arm was 115%.

In conclusion, it is confirmed that using the forging material rather than casting materials in casting/forging process is likely to get more superior mechanical properties. Compared with Al6061, performed by means of general forging, moreover, cast/forged Al6061 can not only stimulate productivity by reducing production processes, but cut down the cost of materials by reusing forging scraps.

Key Words : Al6061, Casting/Forging(주단조), Preform design(예비성형체 설계), Forging ratio(단조비)

1. 서론

최근 자원 및 에너지 절약, 환경문제가 대두

되고 있는 가운데 경량화가 가능하고 재활용 비율이 높은 알루미늄 소재가 기존의 철(鐵)계 소재를 대체할 수 있는 재료로서 사용량이 증대되고 있

접수일: 2005년 2월 11일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

부산대학교 기계공학부

Email : wbae@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2313

** 한국해양대학교 기계공학부

Table 1 The chemical composition of Al6061

Composition	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
Mass(%)	0.04~0.35	0.15~0.4	Max0.7	0.8~1.2	Max0.15	0.4~0.8	Max0.15	Max0.25	Remainder

다. 특히 국내 자동차산업 분야에서는 에너지 절약, 연비절감을 위한 경량화 소재로서 많은 관심을 보여 왔지만, 높은 제조비용으로 인해 자동차에의 응용이 적극적으로 이루어지지 못했다.¹

따라서 알루미늄 단조품의 재료비 절감과 생산성 향상을 위한 생산공정의 단축이 필요하다. 최근 이에 적합한 생산제조 기술로서 주조/단조공정을 들 수가 있다. 주조/단조공정은 원재료나 단조 스크랩등을 기본소재로 하여 최종 제품의 형상과 유사한 예비성형체를 주조로 만들고, 이것을 단 한 번의 마무리 단조로서 성형하는 공정이다. 현재 경량화의 일환으로 자동차 조향 장치 부품인 로어컨트롤암은 주로 주조용 알루미늄 소재인 A356을 적용하여, 저압주조 공정을 통해 제조되고 있으나 철계 제품에 비해서 기계적 성질이 부족하여 경량화 효과를 크게 얻을 수 없는 단점이 있다.^{2,3}

본 연구에서는 주조, 단조공정을 이용하여 Al6061의 자동차용 로어컨트롤암을 제조하기 위한 최적 공정조건(주조, 단조 및 열처리)을 파악하고, 단조결함이 없는 예비성형체를 설계하고자 하였다.⁴

2. 주조 및 단조 실험

2.1 실험소재

실험소재는 단조용 소재인 Al6061로서, 성형성, 내식성, 표면처리성이 뛰어나서 철도차량, 자동차부품계, 육상구조물, 선박 등에 사용되고 있으며, Table 1은 Al6061의 화학성분을 나타낸다.

2.2 주조소재제조

알루미늄을 용해하기 위하여 알루미늄 주조시 일반적으로 사용되는 흑연도가니와 전기로를 사용하였다. 냉각효과를 고려하여 얼음물을 이용한 강제 냉각을 하였다. 주조법에는 크게 사형주조와 금형주조법이 있는데, 본 실험에서는 용융금속의 냉각효과를 고려하여 금형주조법을 사용하였다.

단조용 알루미늄인 Al6061에 적합한 주조조건에 대한 데이터가 없는 관계로 일반 주조용 알루미늄의 조건을 기본 데이터로 실험조건을 잡고 주조성 평가 실험을 수행하였다.⁵

2.3 고온압축실험

단조해석에 필요한 유동응력과 고온에서 재료의 거동을 분석하기 위해 글리블 시스템(Gleeble system)에서 고온압축실험을 수행하였다. 압축시편은 직경 10mm, 높이 15mm의 원주형 주물 시편을 금형주조로 제작하였다. 윤활제는 흑연시트(Grafoil)를 사용하였다. Table 2는 고온압축실험 조건이다.

Table 2 Conditions of the high-temperature compression

Material temperature(°C)	400, 450, 500, 550
Thermoelectric couple type	k-type
Strain rate(/sec)	0.1, 1, 3
Reduction rate(%)	30, 50, 70

2.4 기초단조실험

주조예비성형체의 단조효과 분석을 위해 주조된 Al6061소재(60mm×60mm×30mm)를 균질화 처리하여 200톤 유압프레스에서 압하량 30%, 45%, 60%와 70%로 자유단조하였다. Table 3은 기초단조실험의 시험조건을 나타내고, 사용된 윤활제는 고온압축시험과 같은 흑연시트(Grafoil)이다. 단조 후에 T6열처리한 시편에서 인장시편을 채취하여 시험하였고, 경도측정은 마이크로 비커스 경도기를 이용하였다.

2.5 열처리 실험

열처리 실험에서는 실제 현장에서 행해지는 열처리조건을 기초로 용체화처리 후 시효처리를 행하였다. 용체화처리는 10°C/sec 이상의 속도로

가열 530℃에서 4시간 유지한 후 냉수에서 담금질 유지시간이 10초를 넘지 않도록 하였다. 냉각

Table 3 Conditions of the upsetting test

Material	Al6061(as cast)
Dimensions(mm)	60×60×30
Material temperature(℃)	450
Die temperature(℃)	250
Reduction rate(%)	30, 45, 60, 70

지연시간을 수초 이내로 관리하는 이유는 냉각도중 석출이 결정입계를 따라 진행되어 재료가 취성화되고, 입계부식이 발생하는 문제를 방지하기 위함이다.⁶ 시효처리는 177℃에서 8시간 동안 유지한 후 공냉시키는 인공시효 처리를 행하였다.

2.6 미세조직 관찰

주조시편, 고온압축시편과 기초단조실험한 시편의 조직을 관찰하였다. 조직관찰을 위해 시편을 연마한 후 황산수용액(85cc H₂O + 10cc H₂SO₄ + 5cc HF)에서 20~25초 정도 부식시켰다.

2.7 예비성형체 설계

고온압축실험과 같은 조건에서 재료가 충분한 변형을 받으면서 금형내 충만성과 단조 결함을 피할 수 있는 예비성형체를 설계하기 위하여 DEFORM 2D로 이론 해석을 수행하였다. 해석에서 예비성체의 체적은 제품의 1.1~1.15배로 하였고, 제품 장착시 하중을 많이 받고, 단조시 형상변화가 많은 단면을 위주로 이론해석을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기초주조실험

단조용 알루미늄인 Al6061은 일반적인 주조용 알루미늄에 비해 주조성이 떨어진다. 용융온도와 금형온도가 낮고, 주입시간이 길수록 최적의 주조 조건이지만, 유동성과 기공의 문제를 해결하기 위해 주입온도(700℃, 720℃), 금형온도(280℃, 300℃)와 주입시간(10초, 15초)을 변수로 하여 수행

하였다. 이러한 조건으로 6가지의 실험을 수행한 결과 Table 4와 같은 적합한 주조조건을 찾을 수 있었다.

Table 4 Final casting conditions of Al6061

Mold temperature(℃)	300
Molten-metal temperature(℃)	730
Pouring time(sec)	10
Pouring temperature(℃)	700
Water flow-rate(ℓ/min)	30
Water temperature(℃)	5

3.2 고온압축실험

응력-변형률 곡선과 미세조직을 관찰하기 위해 실시한 고온압축실험에서 시편은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 배불림현상이 별로 없이 아주 양호한 것으로 나타났다. Fig. 2에서는 응력-변형률 곡선을 보여준다. 온도가 증가함에 따라 응력이 감소하고 변형률 속도가 증가할수록 응력이 증가하는 일반적인 열간 물성치를 나타내고 있다. 그러나, 응력이 최대점에 도달 한 후 낮아지지 않고 거의 일정하게 유지되므로 재결정보다는 회복에 가까운 거동을 나타냄을 알 수 있다.

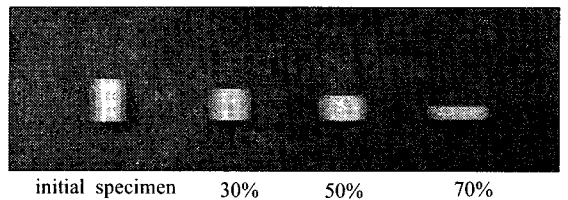


Fig. 1 Specimens according to reduction rate after high-temperature compression test

3.3 기초단조실험

3.3.1 인장실험

Fig. 3과 Fig. 4는 주조소재를 단조한 후 압하량에 따른 인장강도와 연신율의 변화를 각각 나타내고 있다. 압하량이 증가할수록 인장강도와 연신율은 증가하고 있다. Table 5에서 Al6061과 A356의 주조, 압연과 주조/단조 시편들의 인장강도, 연

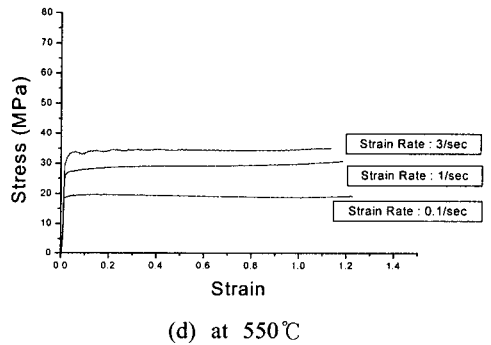
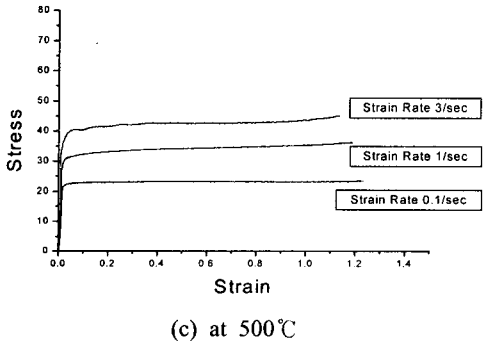
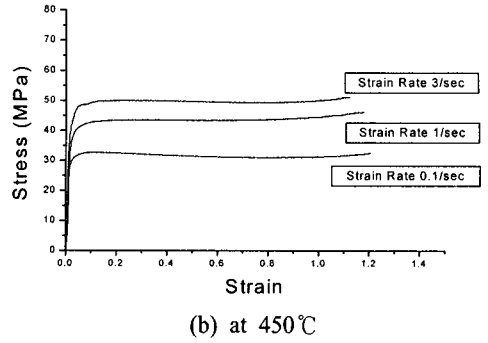
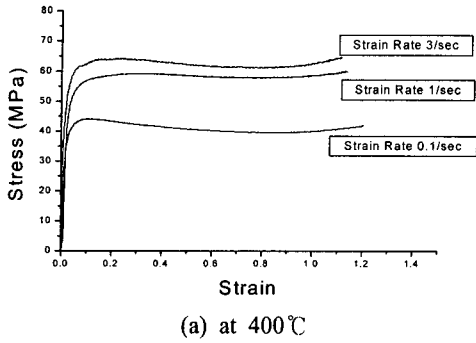


Fig. 2 Stress-strain curves of the compressed specimen for various billet- temperatures at 70% reduction rate

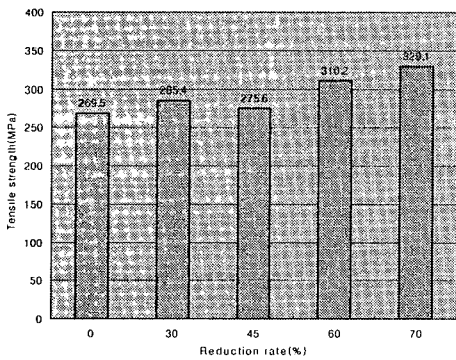


Fig. 3 Tensile strength according to reduction rate

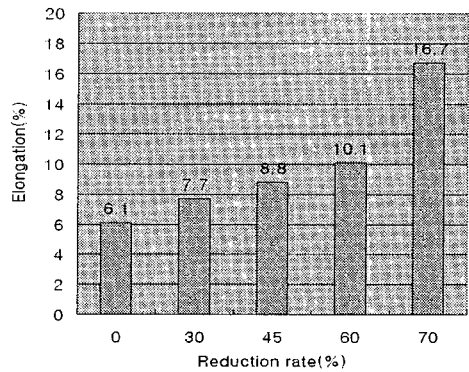


Fig. 4 Elongation according to reduction rate

신율과 경도를 살펴보면, 주조 후 압하율 70%로 단조된 Al6061 시편의 기계적 성질이 가장 우수한 것을 알 수 있다.

또한 압하율 60%이상에서는 로어컨트롤암에서 요구되는 인장강도 및 연신율(인장강도 310MPa, 연신율 10%)을 충분히 만족하였다.

Table 5 Mechanical properties of the T6-heat-treated specimens

Reduction	Tensile Strength(Mpa)	Elongation(%)	Hardness(Hv)
Al6061 (cast)	258.3	6.2	92.1
Al6061 (cast/forged)	329.1	16.7	120.6
Al6061 (rolled)	316.5	14.5	115.3
A356 (cast)	192	10.8	—
A356 (cast/forged)	241	15.8	—

3.3.2 미세조직

Al6061소재의 최적열처리 조건인 용체화처리 조건 530℃-4h, 시효처리 조건 177℃-8h로 주조 및 단조 후의 제품에 적용하였다. Fig. 5는 조직사진을 보여준다. 미세조직은 압하량이 높을수록 주조조직은 단련조직으로 재결정이 일어났다. 특히 압하량 70%일 때는 단조조직에서 재결정이 생성되는 것으로 보이고, 편석제어가 잘되어, 석출물이 균일하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

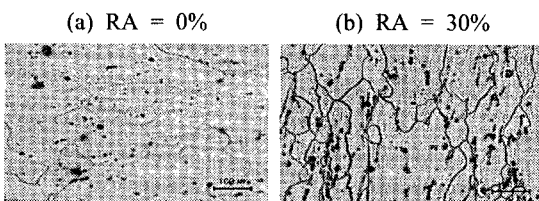
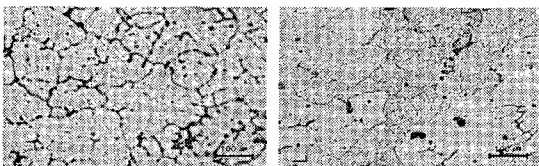


Fig. 5 Microstructures of Al6061 according to reduction rate

3.4 예비성형체 설계

Fig. 6은 관심 대상인 로어암과 예비형상 설계를 위한 한 단면의 위치를 나타내고 있다. 주조/단조공정에서는 주조로써 최종제품에 가까운 예비성형체를 만들어 단 한번의 마무리 단조로써 최종 제품을 만드는 공정이므로, 주조 예비성형체를 2가지로 Fig. 7과 같이 제안하였다. Fig. 8은 이 주조 예비성형체를 이용하여 압하율 60%로 단조한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 7의 제 I안은 예비성형체의 체적을 최종 제품의 1.10배로 취한 것이고, 제 II안은 1.15배로 한 것이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 제 I안은 프래시(flash)의 양이 적고, 미충만 부위가 존재하였다. 그렇지만, 제 II안은 제 I안에서 발생한 미충만 영역에 해당하는 예비성형체의 국부체적을 증가시키는 체적제어를 한 결과 균일한 단조형상이 나오고 결함이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 제 II안을 예비성형체로 선택하였다.

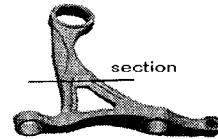
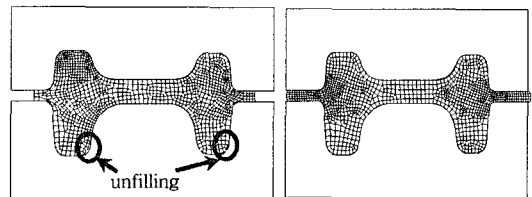


Fig. 6 Lower arm and section



(a) Preform I (b) Preform II

Fig. 7 Proposed preforms



(a) Preform I (b) Preform II

Fig. 8 Deformed shapes of proposed preforms

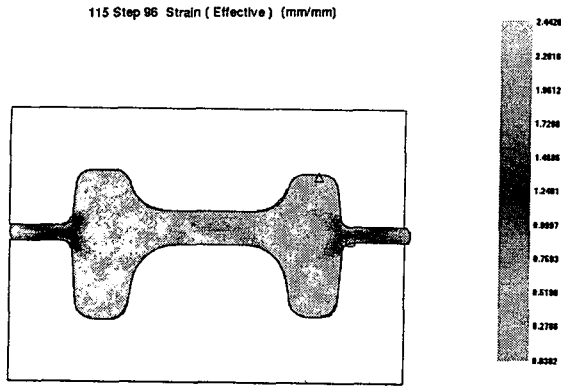


Fig. 9 Strain distribution of a forged preform

Fig. 9는 선정된 예비성형체에 대한 압하율 60%에서 단조시플래이션 수행한 변형을 분포를 보여준다. 제품 장착시 하중이 작게 가해지는 일부 표면을 제외하고는 충분한 변형을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 Al6061에 적합한 주조/단조 공정을 개발하기 위하여 주조실험, 고온압축실험, 기초단조실험 등을 수행하고, 앞의 실험을 통해 얻어낸 물성치를 이용하여 예비성형체 설계를 위한 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 로어컨트롤암의 기존경량화 소재인 A356대신 Al6061을 적용하여 더욱 우수한 물성치를 가지면서 기존 철계 제품보다 경량화 효과를 향상시킬 수 있는 주조/단조 공정조건을 확립하였다.
- 2) Al6061을 자동차부품소재로 사용할 때, 인장강도는 주조/단조된 A356에 비해 높지만 연신율은 주조상태에서 매우 낮기 때문에 압하량 60% 이상의 단조비가 요구된다.
- 3) 로어컨트롤암의 예비성형체는 최종제품부피의 115%가 적합하다.

후기

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단 지방대 육성지원사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, J. H., "Precision Forging Technology of Automobile Components," Korea-Germany Techno- Mart, Busan, pp. 273-288, 1998.
2. Bae, W. B., Yu, M. S. and Kwon, O. H., "A Study on the Manufacture of Lower Control Arm by Casting/Forging Process," Proc. of KSTP Spring Conference, pp. 139-142, 2003.
3. Bae, W. B., Kang, J. Y., Lee, Y. S., Lee, S. M. and Hong, C. H., "A Study on the Control of Cast Microstructure in the Aluminum Casting/Forging Process," J. of KSPE, Vol. 16, No. 9, pp. 41-47, 1999.
4. Kim, D. Y., Yun, S. M. and Oh, S.E., "A Study on the Casting Process by the Aluminum Castings," Proc. of KSTP Fall Conference, pp. 138-141, 1997.
5. Yum, Y. H., "Modern Manufacturing Processes," Dong-Myeong Sa, Seoul, 1994.
6. Jo, S. H., Kim, Y. S., Yu, Y. C., Lim, S. H. and Oh, S. E., "Prediction of Strain Resistance on the High Temperature Deformation of Al6061," J. of KIM, Vol. 36, No. 4, pp. 502-508, 1998.