

주조/단조 기술을 이용한 알루미늄 쉬프트 포크 제조에 관한 연구

배원병*(부산대 기계공학부),
이승재(부산대 대학원 정밀기계공학과), 유민수(부산대 대학원 정밀기계공학과)

A Study on the Manufacturing of an Aluminum Shift-Fork by Casting/Forging Process

W. B. Bae(School of Mech. Eng, PNU),
S. J. Lee(Dept. of Precision & Mech. Eng, PNU), M. S. You(Dept. of Precision & Mech. Eng, PNU)

ABSTRACT

In this study, the casting/forging process was applied to the Shift-Fork, a manual transmission part of automobiles.

In the casting experiments, the effects of additives, Sr, Ti+B and Mg, on the mechanical properties and the microstructure of a cast preform were investigated. When 0.03% Sr were added into the molten aluminum alloy, the finest silicon-structure was observed in the cast preform and the highest tensile strength and elongation accomplished. And when 0.2% Ti+B were added into the molten Al-Si alloy, the highest values of tensile strength were obtained. The maximum hardness was in case of 0.2% Mg.

In the forging experiment, it was confirmed that the optimal configuration of the cast preform could be predicted by FE analysis. To minimize the cost as the press size, the compact shape of preform was proposed to reduce the volume of flash. The modification of shape in designing preform was performed to attain a satisfactory performance in the areas where the mechanical strength were more required.

By using FVM(Finite Volume Method) software, it was verified that a proposed casting design was available.

To identify the relationship between effective strain and mechanical properties of the final forged product, the compression test was performed. As the result, the tensile strength and elongation of a cast preform were much higher than before forging. The minimum forging temperature was found 400°C to save heating time.

Key Words : casting/forging(주조/단조), shift-fork(쉬프트포크), microstructure(미세조직)

1. 서론

최근 자원 및 에너지 절약, 환경문제가 대두되고 있는 가운데 경량화가 가능하고 재활용 비율이 높은 알루미늄 소재가 기존의 철(鐵)재 소재를 대체할 수 있는 재료로서 사용량이 증대되고 있지만, 높은 제조비용으로 인해 자동차에의 응용이 적극적으로 이루어지지 못했다. 따라서 알루미늄 단조품의 비용 절감을 위해서는 재료비의 절감과 생산성 향상을 위한 생산공정의 단축이 필요하다. 이에 적합한 생산

제조 기술로서 주조/단조 공정(casting/forging process)을 들 수 있다. 주조/단조 공정은 원재료(raw material)나 단조 스크랩(forging scrap) 등을 기본소재로 하여 최종 제품의 형상과 유사한 예비성형체(pre-form)를 주조로 만들고, 이것을 단 한 번의 마무리 단조로서 성형하는 제조공정이다.

현재 자동차 변속기 부품인 쉬프트포크는 가단 주철소재와 함께 알루미늄 소재의 제품이 생산되고

Table 1 The chemical compositions of ADC12

Composition	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Al
Mass (%)	9.6~12.0	1.5~3.5	max 0.3	max 0.03	0.3~0.6	max 0.5	max 0.5	-	Rem.

있다. 이 쉬프트포크는 과공정 알루미늄 합금인 R-14 소재를 사용하여 알루미늄 다이캐스팅 공정으로 제조되고 있으나 철제 제품에 비해서 기계적 성질이 부족하여 경량화 효과를 크게 얻을 수 없었다.

본 연구에서는 기존 제품이 가지는 기계적 성질을 더욱 향상시키기 위해서 주조/단조 공정을 통해 쉬프트포크를 제조하고자 한다.

주조실험은 ADC12를 소재로 하여 예비성형체의 현미경조직을 미세화하기 위해 3단계로 수행하였는데, 1단계에서는 Sr을 첨가하여 침상의 공정 Si을 개량처리실험이고, 2단계는 Ti+B첨가실험, 3단계는 열처리효과 증대를 위한 Mg 첨가 실험이다.

그리고 단조제품의 기계적 성질의 향상 위해서는 예비성형체의 주조조직을 제거하여야하는데⁽¹⁾ 이를 위해 예비성형체가 균일하면서도 충분한 변형을 받도록하고, 강도요구가 큰 제품의 영역은 추가적인 형상설계를 통해 큰 변형율을 얻도록 하였다.

단조실험에서는 금형온도가 단조성에 미치는 영향을 확인하였으며 주조/단조품의 경도 향상을 위한 적절한 열처리 조건을 파악하였다.

2. 실험

2.1 실험소재

실험에 사용된 소재는 기계적 성질이 우수하고 주조성이 좋아 각종 자동차용 부품에 사용되고 있는 Al-Si계 다이캐스팅 소재인 ADC12으로 하였다. Table 1에 ADC12의 주요성분을 나타내었다.

2.2 기초 주조실험

용융금속의 냉각효과를 고려하여 금형주조법을 사용하여 용탕온도는 주입후 주물의 조직미세화를 고려하여 750°C를 설정하였고,⁽²⁾ 용탕 주입온도는 710°C, 주입시간은 8초, 금형온도 320°C로 주조조건을 설정하였다.⁽³⁾

미세한 층상 섬유형태로 공정Si 개량화를 위해 Al-10%Sr을 사용하였다.⁽⁴⁾

또한 주조조직의 미세화 및 구상화를 위해 수지상정을 없애주는 Ti+B을 사용하였다.⁽⁵⁾

열처리는 ADC12의 경우 Mg성분이 없으므로 Mg을 첨가하여 열처리효과를 향상시켰다. Mg의 경우 용탕온도에서 높은 증기압을 나타내므로 Al이나 다른 첨가제와 같이 첨가하면 첨가효과가 급속히 상실

되므로 용탕주비 30~40초 전에 첨가하였다.

3. 예비성형체 설계

단조제품의 기계적 성질을 높이기 위하여 재료가 충분한 변형을 받으면서 금형내 충만성과 단조 결함을 피하기 위한 쉬프트포크의 예비성형체를 제안하였다. 예비성형체는 체적비가 최종제품의 약 1.17배가 되도록 설계하였다.

단조 공정 해석을 위한 입력 데이터를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Input data for the forging simulation of the Shift-Fork

Material	ADC12
Material temperature	430 °C
Stress-strain rate relation	$\sigma = 140 \varepsilon^{-0.15}$
Punch velocity(mm/sec)	10
Simulation mode	Isothermal
Friction factor(m)	0.3

4. 제품의 제조

4.1 주조

탕구에 기울기를 주어 용탕이 주형벽과 유리되어 난류와 공기의 혼입을 방지하였고, 탕구비는 탕구 단면의 넓이가 154mm², 탕도 넓이가 314mm², 주입구의 넓이가 352mm²로 1:2:2로 설계하였다. 압탕설계는 유동이 마지막으로 흘러나가는 제품부로부터 압탕부로의 유동 면적을 고려하여 수행하였다. 그리하여 유동 면적을 달리하는 두 가지 모델을 두고 응고해석을 하였다. 주조공정 해석을 위한 입력 데이터를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Input data for the cast preform design

Mold	Steel
Cast alloy	ADC12
Pouring temperature	650 °C
Filling time	10 sec
Punch velocity(mm/sec)	0.02cal/cm ² sec °C
Mesh Resolution	3×10 ⁶

4.2 단조

단조금형은 상·하부 다이와 다이홀더에 장착된 가트리지 히터(cartridge heater)로 가열된다. 금형온도의 체크는 상부 다이(upper die)와 하부 다이(lower die)에 설치된 열전대를 통하여 컨트롤 박스(control box)에서 제어된다. 또한 가이드 핀(guide pin)으로 성형 시 상부 다이와 하부 다이의 중심을 맞춘다.

본 실험에서 금형온도는 400°C, 소재온도는 43 0°C로 하였다.

4.3 열처리

적절한 높은 온도에 의한 기계적 성질 저하나, 공정 석출물이 미고용되는 현상을 막기 위해 용체화처리 조건을 찾고, 열처리성 알루미늄합금에서 요구되는 성질을 얻기 위한 시효처리 조건을 찾으려 했다. Table 4은 용체화 처리와 시효처리 조건이다.

Table 4 Conditions for solution and aging treatments

	temp(°C)	time(t)
solution treat	480, 500, 520, 540	2, 4, 6, 8
aging treat	160, 180, 200	4, 6, 8, 10

5. 결과 및 고찰

5.1 주조실험

5.1.1 개량 처리

Sr을 첨가하여 침상 공정 Si을 개량처리 하였다. Fig. 1과 Fig. 2은 인장특성과 연신률에 대한 Sr 첨가량의 영향을 나타낸다. Sr 첨가량이 0.03%일 경우 Sr을 첨가하지 않았을 경우보다 인장강도의 경우 235MPa에서 320MPa로 36%, 연신률의 경우 1.7%에서 2.22%로 30%가 향상되었다.

Sr 첨가 후 유지시간은 20분으로 하였다. 유지시간이 20분보다 작은 경우는 충분한 개량처리가 이루어지지 않은 상태이며 20분이상의 경우 미세기포의 양이 증대되므로 인장강도와 연신율이 약간 감소하는 것으로 생각된다.

5.1.2 미세화 및 구상화

주조조직을 미세화 및 구상화하기 위하여 Ti+B을 첨가하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 인장강도와 연신율에 대한 첨가제의 영향을 나타낸다. Ti+B은 0.2% 첨가하였을 때 인장강도가 330MPa로써 가장 높게 나타났다. 하지만 연신율의 경우는 Ti+B은 0.25%에서 연신율 1.7%로 가장 낮았다.

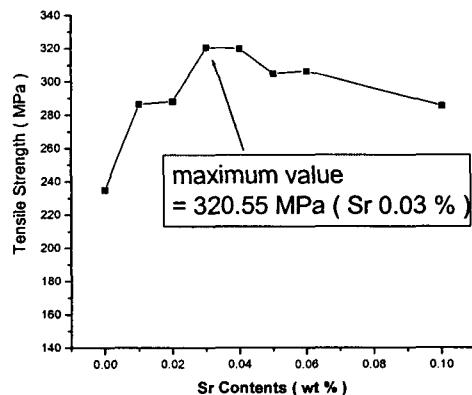


Fig. 1 Effect of Sr contents on the tensile strength of a cast specimen

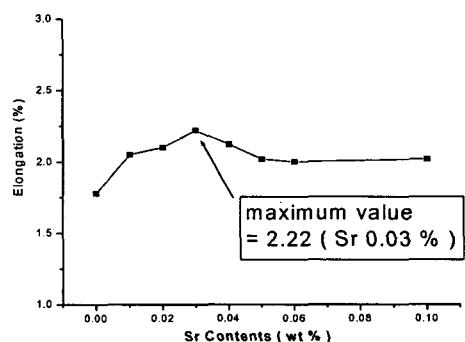


Fig. 2 Effect of Sr contents on the elongation of a cast specimen

5.1.3 열처리효과

Sr 0.03%, Ti+B 0.2%를 각각 첨가한 후, Mg을 다시 첨가하여 열처리효과를 향상시켰다.

본 실험에서 사용된 소재의 적절한 열처리 조건은 용체화처리는 520°C-4h, 시효처리는 180°C-8h임을 알 수 있었다.

5.2 기초단조실험

인장강도 및 연신률이 유효변형률의 크기에 따라 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 주조된 시편보다 강도가 유효변형률이 1.0일 때 인장강도가 375Mpa로 약 15%, 연신률이 2.35로 약 30% 증가하는 것을 확인할 수 있다.

5.3 예비성형체 설계

Fig. 5는 제안된 예비성형체에 대한 단조 시뮬레이션 결과이다.

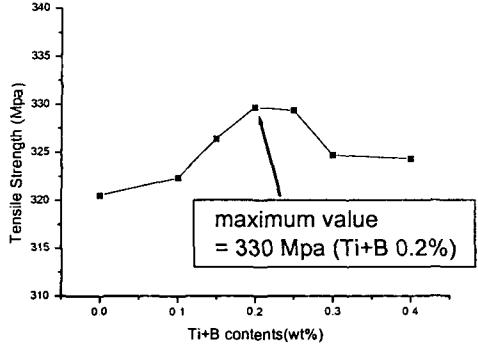


Fig. 3 Effect of Ti+B contents on the tensile strength of a cast specimen

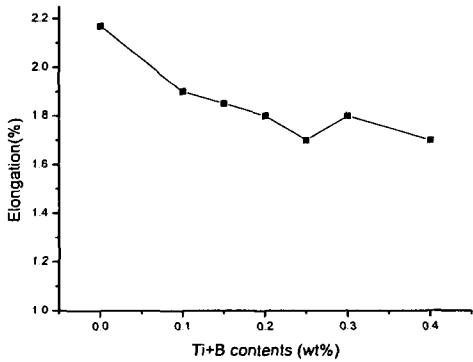


Fig. 4 Effect of Ti+B contents on the elongation of a cast specimen

이선 결과이다. 제안된 예비성형체에서는 플래시량을 적정수준으로 줄이는 한편, 플래시 감소로 충분한 변형률이 발생되지 못할 거라 예상되는 부분에서 높은 변형률을 얻도록 하기 위하여 예비성형체의 형상을 결정하였다. 제안된 예비성형체에서는 2개의 원형축을 1개의 비원형축으로 연결하여 성형시 전단변형이 최대한 발생하게끔 하였다. 그리고 제품신뢰도를 높이기 위하여 힘을 많이 받게되는 쇼프트포크의 양팔 부위의 강도를 높이기 위하여 단면이 계단식으로 되어있는 것을 사각형으로 합쳐 높은 전단변형이 발생하도록 하였다. 최종적으로 부피제어보다는 형상변경을 통해 플래시량까지 줄일 수 있었다.

5.4 제품 제조

5.4.1 주조

제품부로부터 압탕부로의 유동 면적을 달리하는

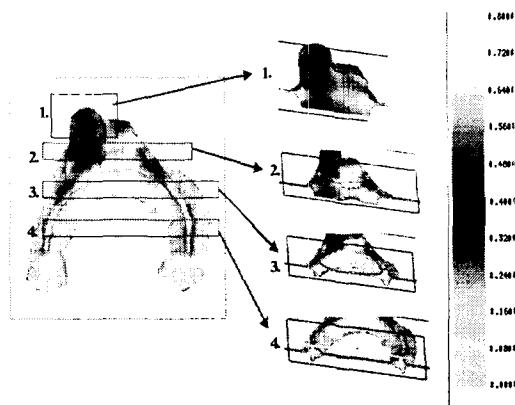


Fig. 5 Strain distribution of a forged product

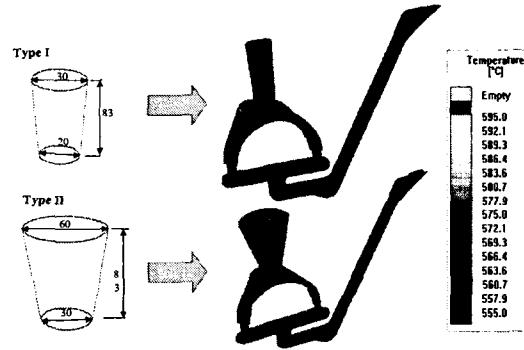


Fig. 6 Theoretical results for two casting plans

두 가지 모델에 대한 응고해석 결과가 Fig. 6에 나타내었다. 해석결과 제 1안의 경우 유동 면적이 충분하지 못하여 제품 내에 수축공과 같은 주조결함이 발생하였다. 예비성형체는 첨가제들의 최적첨가량을 첨가하여 주조하였다. Fig. 7은 주조된 예비성형체를 보여주고 있다.

5.4.2 단조

주조한 예비성형체를 전기로에서 450°C로 30분간 가열한 후 200ton 유압프레스로 단조하였다.

Fig. 8은 단조후 제품 각 영역별 조직사진을 보여 준다. 유한요소해석 결과와 마찬가지로, 하중을 많이 받게되는 제품 영역(Area 3. ~ Area. 6)에서 매우 치밀한 조직이 발견되는 것을 알 수 있다.

유한요소 해석을 통해 예측된 하중과 실제 단조하중을 비교한 그래프이다. 주조/단조공정의 하중 예측 결과는 168ton이었고 실제 성형하중은 180ton이었으며, 해석결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

5.4.3 열처리 및 경도측정

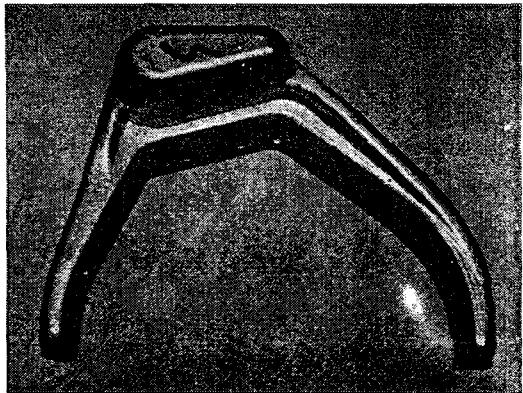


Fig. 7 A cast preform

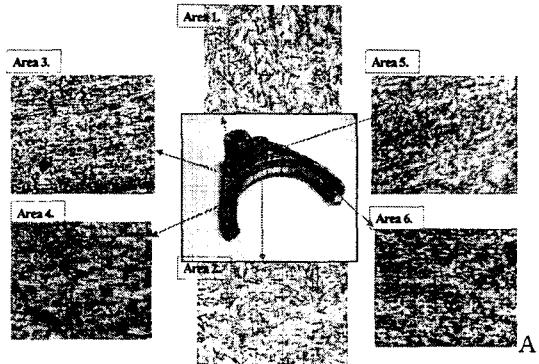


Fig. 8 Microstructures of a forged product

DC12소재의 최적열처리 조건인 용체화처리 조건 500°C-4h, 시효처리 조건 180°C-8h로 주조 및 단조 후의 제품에 적용하였다. 열처리된 주단조제품은 83 HRB로서 70 HRB의 다이캐스팅 제품에비해서 우수한 경도값을 가짐을 알 수 있었다. 현재 생산 중인 가단 주철, 다이캐스팅 그리고 주단조 제품의 경도비교를 Fig. 9에 나타내었다.

6. 결론

본연구에서는 자동차 변속기용 알루미늄 쉬프트포크를 주조/단조로 생산하기 위하여 주조실험, 예비성형체 설계, 단조실험, 열처리 실험등을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공정 Si을 개량처리하기 위한 최적의 Sr량은 0.03%이고, 최적 유지시간은 20분이었다.
2. 0.03%의 Sr를 첨가했을 때 주조조직의 미세화를 위한 최적의 첨가제량은 Ti+B은 0.2% 였다.
3. 열처리효과 증대를 위해 Mg를 0.2% 첨가하였을 때 가장 높은 경도값을 얻을 수 있었다.

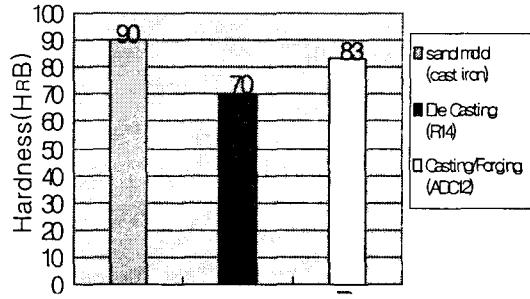


Fig. 9 Comparison of the hardness of shift-forks according to casting processes

4. 열처리 결과 용체화처리는 500°C-4h, 시효처리는 180°C-8h가 적절함을 알 수 있었다.
5. 3차원 유한요소해석을 통해 제안된 예비성형체의 형상이 제품실험 결과 적절함을 알 수 있었다.
6. 3차원 응고해석을 통해 제안된 주조방안이 타당함을 실제 예비성형체 주조결과로서 알수 있었다.
7. 열처리된 쉬프트포크 주조/단조 제품의 경도가 기존 알루미늄 제품보다 우수함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의해 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 김대용, 윤성만, 오수익, "알루미늄 주물을 이용한 단조 공정 연구", 한국소성가공학회 '97추계학술대회 논문집 pp.138-141, 1997
2. 廉永夏, 最新機械工作法, 東明社, 1994.
3. Howard E. Boyer, Timothy L. Gall, Metal Handbook, Desk Edition, 1985, 2nd printing
4. 김원배, 김지훈, 예병준, "Al 합금의 응고(IV) - 아공정 Al-Si 합금의 개량화 특성", 주조, 제18권 제6호, pp.604-612, 1998. 12
5. 才川 清二, 中井 清之, 杉浦 泰夫, 神尾 彰彦 "ZrおよびTiによる結晶粒微細化したAl-Li-Mg鑄造合金の組織と機械的性質," 軽金属 第45卷 第7號, pp.385-390, 1995