

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

알루미늄 합금의 주조/단조 기술에 대한 기초연구

배원병*, 김영호*, 이영석**, 김맹수**

The Basic Study on the Casting/Forging Technology of Aluminum Alloy

Won Byong Bae*, Yung Ho Kim*, Young Seok Lee**, Maeng Su Kim**

ABSTRACT

An experimental study has been carried out to investigate casting process parameters which influence on the microstructures of cast preforms in casting/forging process of aluminum alloy. In the casting process, pouring temperature, pouring time, mold temperature, mold material, and, cooling method are selected as process parameters. With the cast preform, a forging test has been performed to compare mechanical properties of final products between casting/forging process and forging process.

From the experimental results, low mold temperature and water cooling method are favorable for obtaining minute microstructures of cast preforms. Casting defects included in cast preforms, such as pores and shrinkage cavity, are eliminated by the forging process. And comparing cast/forged products with conventionally forged products, the former are almost as same as the latter in mechanical characteristics.

Key Words : Casting/Forging(주조/단조), Microstructure(현미경조직), Permanent Mold Casting(금형주조), Cooling Method(냉각방법)

1. 서론

최근 지구 환경문제와 에너지 절감이 관심을 끌고 있는 가운데 자동차 부품의 경량화를 위하여 스프렌션, 블레이크, 휠 등의 단조강이나 주철 부품을 알루미늄 소재로 대체하는 것이 주요과제로 대두되고 있다. 그러나 알루미늄 단조품의 높은 생산비용 때문에 급속히 발전하지 못하고 있는 실정이다. 알루미늄 단조품의 높은 생산비는 강재료에 비해 알루미늄 재료가 비싼 것이 주원인인데, 알루미

늄 단조품의 생산비용을 다른 생산품과 비교하면, 강단조품에 비해 약 3.3배, 알루미늄 금형주조에 비해서는 약 1.8배의 생산비가 소요됨을 알 수 있다. 한편, 알루미늄 단조품의 경량화율은 강단조품에 비해 30%~50%, 알루미늄 금형주조에 비해서는 30% 정도 높인데 이런 점을 감안하더라도 비용 경쟁력은 갖출 수 없는 것이 사실이다. 따라서 알루미늄 단조품의 비용 절감을 위해서는 재료비의 절감, 생산성 향상을 위한 생산공정의 단축이 필요하다. 그에 합당한 생산제조 기술로서 주조/단조법을

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

들 수 있는데, 자전거의 크랭크, 언더 블래킷, 페달, 스테빌라이저 등에 주조/단조 기술이 실용화되고 있다. 주조/단조법의 장점은 첫째, 주조용 합금을 사용하므로 재료구입 비용이 적게 들고, 트리밍된 플래시 부분을 다시 녹여서 쓸 수 있으므로 압출재 소재를 사용할 때에 비해 재료비가 크게 줄어든다. 둘째, 제품 형상에 가까운 주조프리폼을 사용하여 단조하므로 마무리 단조만으로 최종 제품을 완성할 수 있어서 단조비 및 금형비가 삭감된다.

외국에서는 주조/단조에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 국내에서는 몇몇 생산업체에서 이 공정을 이용하고 있을 뿐, 체계적인 학문연구는 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 알루미늄 합금의 주조/단조 기술을 실제 제품에 적용하기에 앞서, 아령 형태의 알루미늄 주조/단조공정에서 최종 제품의 기계적 성질에 주로 영향을 미치는 주조프리폼의 미세 현미경조직을 얻기 위한 주조공정변수들을 파악하고, 그 공정변수들의 최적값을 알고자 하였다.

2. 주조프리폼 제조 및 단조실험

2.1. 소재

실험소재로서는 단조성, 절삭성, 용접성이 좋고, 내식성이 우수하여 자동차의 회전부품에 주로 이용되고 있는 Al6061을 사용하였으며, 그 성분을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of Al6061

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Standard	0.4 -0.8	0.7 Max.	0.15 -0.4	0.15 Max.	0.8 -1.2	0.04 -0.35	0.25 Max.	0.15 Max.	Remainder
Sample	0.68	0.14	0.3	0.1	1.01	0.22	0.05	0.01	

2.2. 주조실험

주조에 있어서 주조품에 영향을 미치는 주요한 요인으로서 용탕온도, 주입온도, 주입시간, 금형온도, 냉각방법 등을 들 수 있는데, Fig. 1에 나타난 주조프리폼을 제작하는 데 있어서 최적의 주조조건을 파악하기 위하여 Table 2와 같은 조건으로 주조실험을 행했다.

Fig. 2는 주조프리폼 제조를 위한 주조금형을 나타내고 있다. 주조금형의 가열은 카트리지 히터를 이용하여 희망 온도까지 가열한다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 한 번에 주조프리폼을 두 개 만들 수 있도록 설계하였다.

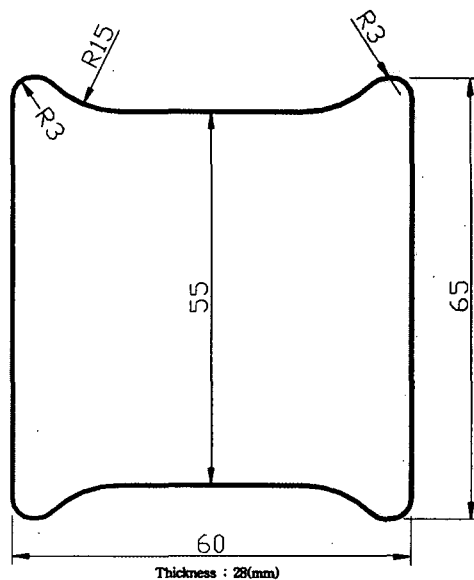


Fig. 1 Dimensions of the cast preform

Table 2 Casting conditions of the preform

Melting temperature(℃)	740
Pouring temperature(℃)	660~690
Pouring time(sec)	5~9
Mold temperature(℃)	200, 300, 350
Mold material	Cast-iron Phosphor bronze
Cooling system	air cooling water cooling

2.3. 단조실험

단조실험은 금형온도를 200℃, 250℃로 하고, 소재가 열온도를 450℃로 하여 하였으며, 단조실험에 사용된 금형을 Fig. 3에 나타내고, Fig. 4는 주조/단조품의 형상과 치수를 나타내고 있다.

2.4. 열처리

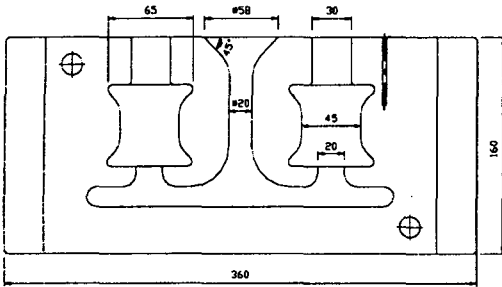
주조되거나 단조된 제품은 내부 잔류 응력을 제거하고, 경도와 강도를 증가시키며, 마모와 충격 저항성을 높이기 위해 제품에 대해 용체화처리와 인공시효처리를 함께 행하는 T-6열처리를 한다.

3. 결과 및 고찰

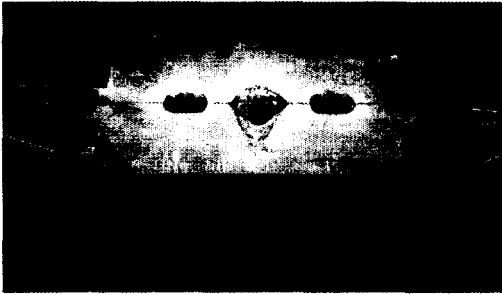
3.1. 주입온도

주입온도가 기계적 성질에 영향을 주는 원인이 되므로, 그 결정은 매우 중요하다. 주입온도가 높을 때, 용융금속의 가스 흡수가 심하므로 기포(blow hole)의 원인이 되며, 수축이 커서 균열을 일으키기 쉽다. 주입온도가 낮을 때, 압탕(riser), 플로 오프(flow off) 등에 의한 충분한 보급이 이루어지기 전에 응고되므로 불량률의 원인이 되고, 유동성도 나빠므로 용융금속의 흐름이 나쁘다.

Al6061의 용융온도 범위가 582~652℃이므로, 용탕온도는 740℃로 설정해 두고, 주입시 온도를 바꾸어 가면서 실험을 행했다. 주입온도가 660℃이하가 되면 용융금속이 금형을 흘러들어 가면서 굳어져서 완전히 성형이 되지 않았다(Fig. 5). 여러 번의 실험을 거쳐 주입온도가 680℃가 적당함을 알 수 있었다.



(a) Cross-sectional view of the casting mold



(b) Assembly of the casting mold

Fig. 2 Mold for the cast preform

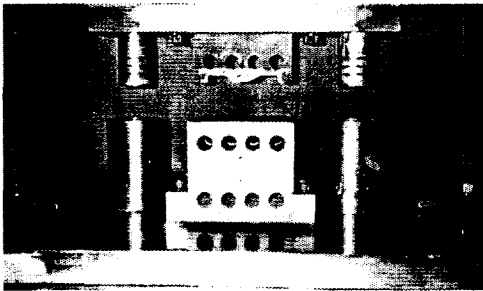


Fig. 3 Forging die set

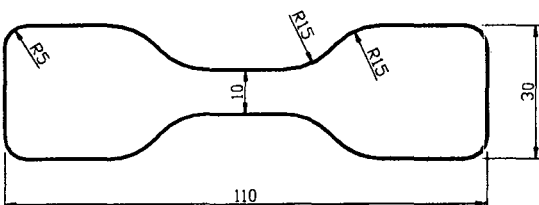


Fig. 4 Dimensions of the cast/forged product

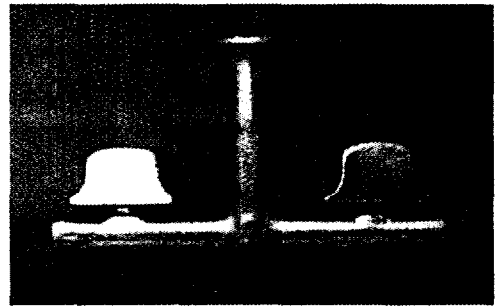


Fig. 5 Imperfectly cast preform

(Mold temp. : 300℃, Pouring time : 6sec, Pouring temp. : 640℃)



Fig. 6 Imperfectly cast preform

(Mold temp. : 300℃, Pouring time : 4sec, Pouring temp. : 680℃)

3.2. 주입시간

주입속도라고도 하며, 주형에 쇳물을 주입할 때 걸리는 시간으로 초(sec)로 표시한다. 주입은 고요하게 그리고 빨리 하는 것이 필요하므로 쇳물이 소용돌이를 일으키지 않도록 주조방안을 세워야 한다.

주입시간이 5초 미만일 때는 주조프리폼의 가운데 수축공이 발생했다(Fig. 6). 이것은 용융금속이 주조금형으로 흘러 들어가면서 가스가 발생하는데 이 가스가 주조금형을 완전히 빠져나가지 못해서 발생하는 것이다. 또한 주입시간이 9초 이상이 되면 성형이 완전히 되지 않았다. 그 결과 주입시간은 6초가 적당하다.

3.3. 주조금형온도

금형온도가 200℃에서는 용융금속이 금형 내부로 흘러 들어가면서 굳어져서 성형이 완전히 되지 않았다(Fig. 7). 금형온도에 따른 주조프리폼 조직의 미세화에 대한 영향을 살펴보기 위해 금형온도를 300℃와 350℃로 설정하여 주조실험을 행하여 주조프리폼의 조직사진을 관찰했다.

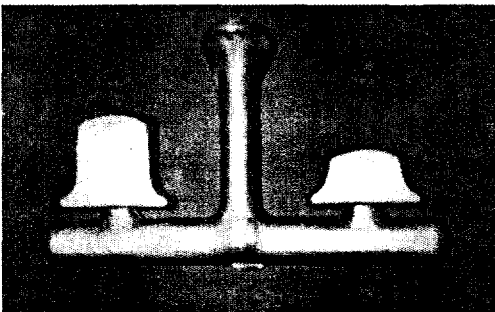


Fig. 7 Imperfectly cast preform

(Mold temp. : 200℃, Pouring time : 6sec, Pouring temp. : 680℃)

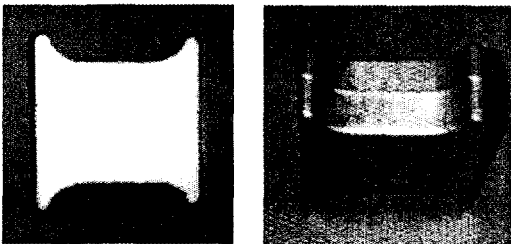
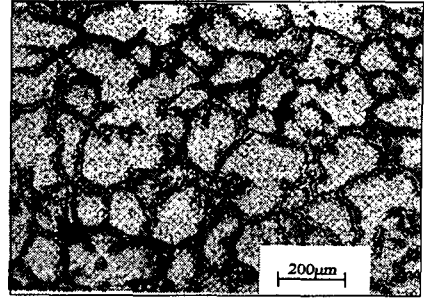
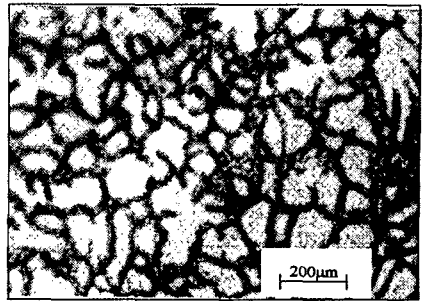


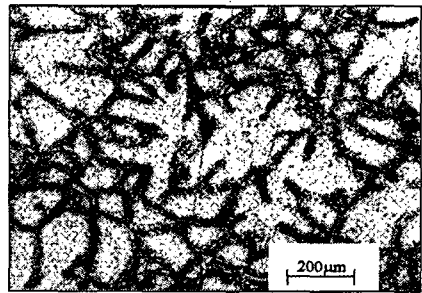
Fig. 8 Perfectly cast preform



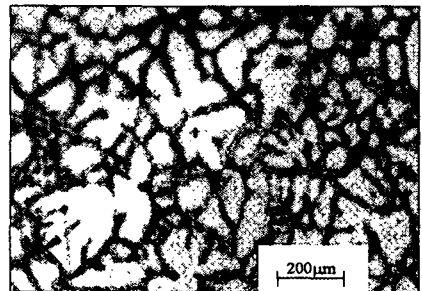
(a) Mold Temp. : 300℃, air cooling
(grain size : 126.32 μm)



(b) Mold Temp. : 300℃, water cooling
(grain size : 115.64 μm)



(c) Mold Temp. : 350℃, air cooling
(grain size : 132.82 μm)



(d) Mold Temp. : 350℃, water cooling
(grain size : 122.81 μm)

Fig. 9 Effect of cooling method and mold temperature on microstructures of cast preforms

Fig. 8은 주입온도, 주입시간, 금형온도의 주조조건들을 고려하여 주조결합이 발생하지 않는 주조조건(주입온도 : 680℃, 주입시간 : 6초, 금형온도 : 300℃)에서 제조된 주조프리폼을 나타내고 있다.

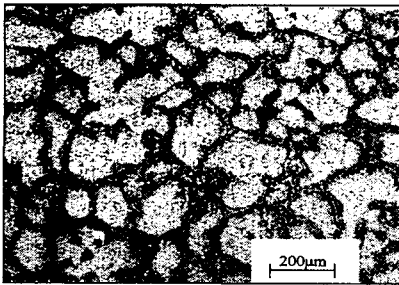
3.4. 주조프리폼의 조직사진

주조프리폼에서 결정립의 크기는 주조/단조품의 기계적 성질에 영향을 미치므로, 주조프리폼의 조직을 미세화하는 것이 중요하다.

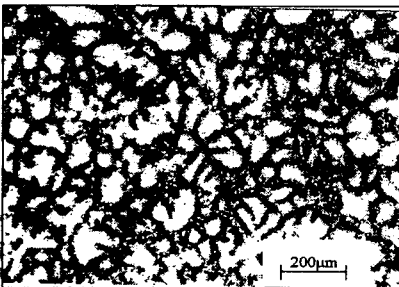
Fig. 9는 금형온도와 냉각방법에 따른 주조프리폼의 조직사진을 나타낸 것인데, 결정립 크기의 측정은 구적법(Jeffrie's Method)을 사용하였다. 그림에서 보듯이 금형온도는 350℃일 때보다 300℃일 때가 주조조직이 미세화된 것을 볼 수 있고, 공냉보다는 수냉한 것이 주조조직이 미세화되었다.

Fig. 10은 금형재료에 따른 주조프리폼의 조직사진을 나타낸 것이다. 금형재료가 주철일 때보다 열전달이 빠른 인청동을 사용했을 때 주조조직이 미세화된 것을 볼 수가 있다.

이상의 실험결과를 기초로 하여 본 실험에서 사용한 주



(a) Cast-iron mold : 126.32 μm



(b) Phosphor bronze mold : 97.08 μm

Fig. 10 Effect of mold material on microstructures of cast preforms (Mold temperature: 300℃, Cooling system: Air cooling)

Table 3 Optimal casting conditions of the preform

Melting temperature(℃)	740
Pouring temperature(℃)	680
Pouring time(sec)	6
Mold temperature(℃)	300

조프리폼을 제작하는 데 있어서 최적의 주조조건을 찾아서 Table 3에 나타내었다.

3.5. 단조금형온도

단조실험은 소재온도를 450℃, 금형온도를 200℃, 250℃로 하여 실험을 행했는데, 금형온도가 200℃일 때, 제품의 일부에 균열이 발생하였고, 하중도 200ton유압프레스의 용량을 초과하여 성형이 되지 않았다(Fig. 11). 그래서 금형온도를 250℃로 하여 단조실험을 한 결과 제품도 결합 없이 성형이 잘 되었고, 성형하중도 약 160ton이었다. Fig. 12는 최종 주조/단조품의 외관사진이다.

Fig. 13은 주조/단조시와 일반 단조시의 하중을 비교한 것이다. 주조/단조시의 하중이 일반 단조시의 하중보다 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 주조프리폼과 주조/단조된 제품의 조직사진을 나타낸 것인데, 주조프리폼에서 나타난 내부 기공이



Fig. 11 Imperfectly cast/forged product



Fig. 12 Perfectly cast/forged product

단조를 함으로써 거의 없어진 것을 확인할 수 있으며, 조직도 치밀해진 것을 알 수 있다.

Table 4는 주조프리폼, 주조/단조품과 일반 단조품과의 기계적 성질을 비교한 것이다. 주조/단조품의 기계적 성질은 일반 단조품에 비해 다소 떨어지긴 하지만, 연신율은 일반 단조품의 83%, 인장강도는 일반 단조품의 91%이고, 주조프리폼에 비해서는 우수함을 알 수 있다.

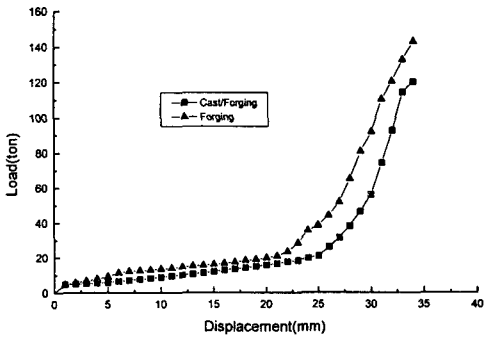


Fig. 13 Load-Displacement curves of casting/forging and conventional forging processes

Table 4 Mechanical properties of a cast preform, a cast/forged product and a conventionally-forged product

	Cast preform		cast/forged product		Conventionally forged product	
	Before H.T.	After H.T.	Before H.T.	After H.T.	Before H.T.	After H.T.
Ultimated strength(MPa)	131.72	278.84	189.50	285.25	197.12	305.57
Elongation (%)	6.95	3.27	13.80	12.60	15.72	16.36
Hardness (HR-15T)	52.18	77.94	65.45	81.32	66.25	82.06

* H.T. : Heat Treatment

4. 결론

주조/단조 공정에서 주조/단조품의 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 조직이 미세화되어야 한다. 주조프리폼의 조직을 미세화하기 위해서는 용탕의 주입온도와 주조금형의 가열온도를 낮게 설정하는 것이 좋고, 공냉보다는 수냉과 같이 강제냉각에 의한 방법이 낫다. 또한 주조/단조에 의한 제품의 기계적 성질은 일반 단조법에 의해 제조된 제품과 비교하여 상당히 접근하고 있는 것을 볼 수 있었다.

Reference

1. R.W.Truxell, "Cast Preforms Crop Costs on Automotive Forgings," Steel, pp. 37-41, 1968.
2. A. C. Hobdell and A.Thomas, "Approaches to Cheaper Forgings," Metal Forming, pp. 17-25, 1969.
3. T. A. Dean, "Manufacture of Coal Cutter Picks by a Casting/Forging Process," Advanced Technology of Plasticity, vol. 1, pp. 97-101, 1990.
4. Shnichiro Fujikawa, Yukiyoishi Kitamura and Saburo Shimamura, "Application of Numerical Methods for the Aluminum Casting/Forging Process," J. Mater. Proc. Tech., pp. 93-110, 1991.
5. 櫻天久之, "コンフォミックス法の今後の展開," 第19回 アルミニウム鍛造委員会, pp. 1-33, 1994
6. 이종남, 주조공학, 보성문화사, 1987.
7. 홍준표, 박익민, 최정철 공역, 주조응고, 반도출판사, 1996.

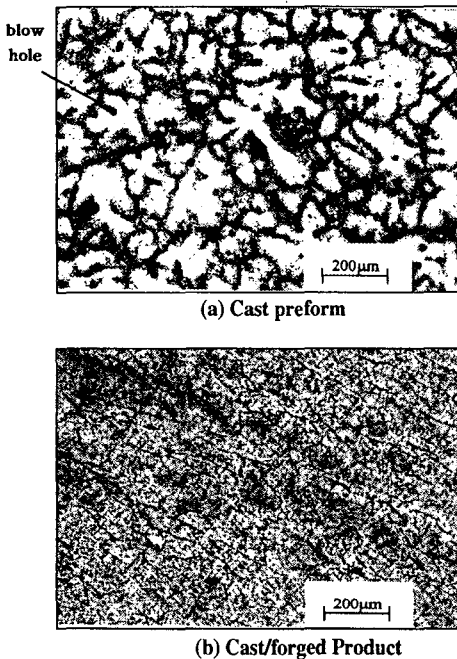


Fig. 14 Comparison of microstructure between a cast preform and a cast/forged product