

# 알루미늄 주조/단조 공정에서 주조조직 제어에 관한 연구

배원병\* , 강정윤\*\* , 이영석\*\*\* , 이성모\*\*\* , 홍창호\*\*\*\*

## A Study on the Control of Cast Microstructure in the Aluminum Casting/Forging Process

Won Byong Bae\*, Chung Yun Kang\*\*, Young Seok Lee\*\*\*, Sung Mo Lee\*\*\*, and Chang Ho Hong\*\*\*\*

### ABSTRACT

The scale of dendritic structure of a cast preform plays a key role in determining the mechanical properties of cast/forged products. In this study, casting experiments are carried out to reduce dendrite arm spacing(DAS) to smaller than  $20\mu\text{m}$  by increasing cooling rate of the mold and then to spheroidize dendritic structures by addition of alloying elements such as Zr and Ti+B.

From the casting experiments, appropriate casting conditions for producing the cast preform of a motorcycle connecting rod are obtained. To obtain fine microstructures of the cast preform, mold temperature must set to be low whilst cooling rate being high. When cooling rate is  $10^\circ\text{C}/\text{s}$ , the size of DAS is  $17.4\mu\text{m}$ . And the degree of spheroidization of a grain in the cast preform is described by aspect ratio, which is defined as the ratio of major and minor radii of an elliptical grain. When 0.5% Zr and 0.24% Ti+B are added to the molten aluminum alloy, the best aspect-ratio 0.75 is obtained.

After forging the cast preform of a motorcycle connecting rod, the microstructure and mechanical properties of the cast preform are compared with those of the cast/forged product. Cast/forged products are superior in microstructure and in mechanical properties such as ultimate strength, elongation, and hardness.

**Key Words :** Casting/Forging(주조/단조), Microstructure(미세조직), Cooling rate(냉각속도), Alloy addition(합금 첨가), Connecting rod(컨넥팅로드)

### 1. 서론

최근 자동차 부품의 경량화라는 시대적 요구가 높아지고 있는 가운데, 이런 시대적 요구를 만족시키기 위하여 경량화가 가능하고 높은 재활용 비율을 나타낼 수 있는 알루미늄 재료가 기존의 강재료를 대체할 수 있는 재료로서 사용량이 증대되고 있

다. 알루미늄 단조품은 다른 제조방법과 비교하여 기계적 성질이 뛰어나고 신뢰성이 높으며 안정성이 우수한 특성을 가지고 있다. 그러나 알루미늄 단조품은 다른 제조방법으로 만들어진 제품과 비교하여 비용이 높기 때문에 급속히 발전하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 알루미늄 단조품의 비용 절감을 위해서는 재료비를 절감하고, 공정을 단축시킬 수

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 금속공학과

\*\*\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\*\* 부산대학교 대학원 금속공학과

Table 1 Chemical compositions of A356

Composition		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb+Sn	Ti	Sr	Others	A/
Mass (%)	Max.	6.5	0.15	0.03	0.03	0.3	0.03	0.05	0.03	0.2	0.01	0.13	Rem.
	Min.	7.5				0.4					0.05		

있는 제조방법이 개발되어야 한다. 이에 부합되는 공정이 주조/단조 공정인데, 이 공정은 주조로 최종 제품형상에 가까운 예비성형체를 만들고, 이것을 성형하는 공정이다. 주조/단조 공정에서 예비성형체의 미세조직이 최종제품의 기계적성질에 큰 영향을 미친다<sup>(1)</sup>.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 2류차 컨벡팅 로드의 주조/단조공정에서 예비성형체의 현미경조직을 미세화하기 위한 주조실험을 수행하여 최적 주조조건을 알고자 하였다. 주조실험은 2단계로 수행하였는데, 1단계는 강제수냉에 의하여 DAS (dendrite arm spacing) 크기를 20 $\mu$ m이하로 줄이는 것이고<sup>(6),(12)</sup>, 2단계는 수지상정을 없애고 주조조직을 구상화하기 위하여 Zr, Ti+B과 같은 합금원소를 첨가하는 것이다<sup>(12)</sup>.

이렇게 제조된 예비성형체는 1회의 단조로 제품을 완성하고, 예비성형체와 주조/단조된 제품의 기계적 성질을 비교·검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험소재

실험소재는 Al-Si-Mg계 주조용 합금인 A356으로서, 주조성, 내식성, 내압성이 좋으며, 유압부품, 미션케이스, 플라이휠 하우징, 소형선박용 엔진 부품에 사용되고 있다. Table 1에 A356의 주요성분을 나타내었다.

### 2.2 주조실험

단조를 위한 예비성형체의 형상은 최종제품에 가까운 형상으로 단조율이 33%가 되게 설계하였다<sup>(2)</sup>. Fig. 1에 예비성형체의 형상을 나타내었다.

주조/단조품의 기계적 성질에 영향을 미치는 인자로서 예비성형체에서의 DAS의 크기가 중요하다. DAS의 크기에 크게 영향을 미치는 주조변수로서는 금형온도, 냉각속도를 들 수 있는데, DAS의 크기에 대한 각각의 영향을 알아보기 위하여 여러 조건으

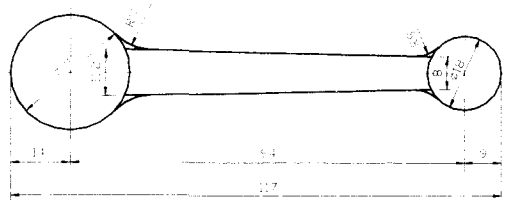


Fig. 1 Shape and dimensions of a cast preform

로 주조실험을 시행하였다<sup>(9),(12)</sup>. 또한 예비성형체에서 수지상정을 없애고 구상화시키는 것이 주조/단조품의 기계적 성질의 향상에 도움을 주므로 이에 대한 합금원소의 영향도 파악하였다.

주조시 용융금속의 냉각속도를 측정하기 위하여 열전대와 데이터 레코드를 이용하여 시간-온도 데이터를 얻어 냉각곡선 상에서의 응고 완료라고 생각되어지는 변곡점 바로 아래에서의 냉각곡선의 구배로서 냉각속도를 산출하는  $C_{\alpha}$ 법으로 냉각속도를 산출하였고, DAS의 측정방법으로는 2차지선법을 사용하였다<sup>(3)</sup>. 또한 주조조직의 구상화 정도를 파악하기 위하여 형상비(aspect ratio : 주조조직 입자의 가로와 세로의 비)를 사용하였는데, 형상비가 1에 가까울수록 구상화가 잘 되었다고 판단할 수 있다.

Table 2는 주조실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Casting conditions

Mold temperature(°C)	180 ~ 320
Molten temperature(°C)	740
Pouring time(sec)	1 ~ 5
Pouring temperature(°C)	600 ~ 680
Water flow-rate(l/min)	0, 10, 20, 30
Water temperature(°C)	5, 22

알루미늄의 일반적인 용해온도는 750°C ~ 850°C 인데<sup>(4)</sup>, 주입시의 온도를 고려하여 740°C로 설정하

였다.

주입온도는 미세한 조작성을 얻기 위해서 액상선 가까운 온도에서 주입하는 것이 좋다<sup>6)</sup>. 그러나 너무 낮으면 용융금속이 금형을 흘러 들어가면서 유동불량을 발생시키므로 적절한 주입온도를 설정해야 한다. 본 실험에서는 적당한 주입온도를 파악하기 위하여 680℃부터 실험을 하였다.

Fig. 2는 주조실험을 위한 장치를 나타낸 것이다. 주조금형은 카트리지 히터에 의해서 가열된다. 금형에 부착된 열전대에 의해 온도가 측정되고, 설정 온도까지 가열되도록 컨트롤 박스(control box)에서 금형의 온도를 제어한다. 이렇게 예열된 금형에 용융금속을 부은 다음, 펌프를 이용하여 금형을 강제 냉각시킨다. 실험동안 금형의 온도와 용융금속의 온도변화를 데이터 레코더를 통해 측정한다.

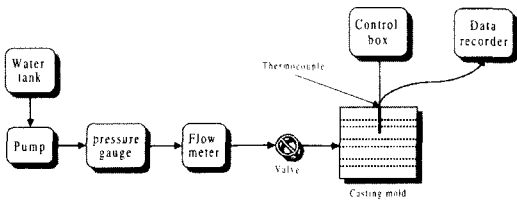


Fig. 2 Equipment for the casting experiment

Fig. 3은 완성된 주조금형을 나타내고 있다.

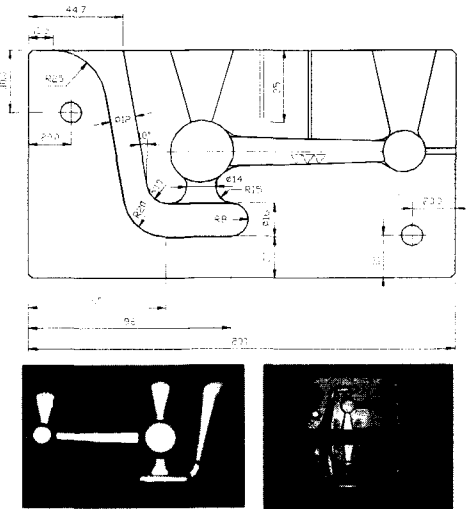


Fig. 3 Casting mold for the cast preform

처음 주조금형을 설계했을 때는 소단부만 압탕을 설치하여 가스구멍의 역할을 함께 하도록 하였는데, 대단부와 소단부에 완전히 성형되지 않는 부분이 나타났다.

이는 용융금속을 금형에 주입시켰을 때, 가스가 완전히 빠져나가지 못했기 때문이다. 그래서 1차 수정시에는 대단부, 웨브부분과 소단부에 가스구멍을 설치하였다. 그 결과 가스에 의한 결함은 발생되지 않았으나, 대단부에 용융금속의 부족한 양을 충족시켜 주지 못한 결과이다. 따라서 최종적으로 대단부에도 소단부와 마찬가지로 압탕을 설치한 결과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 표면 결함이 없는 예비성형체를 제조하였다.

### 2.3 단조실험

단조실험은 200ton 유압프레스에서 하였고, Fig. 4에 단조금형을 나타내었다.

단조시 소재온도는 450℃로 가열하였고, 금형의 온도는 300℃로 하여 실험을 하였다.

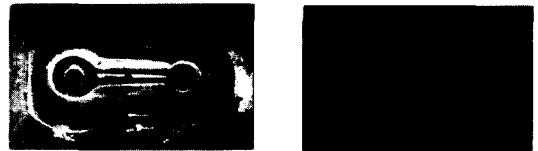
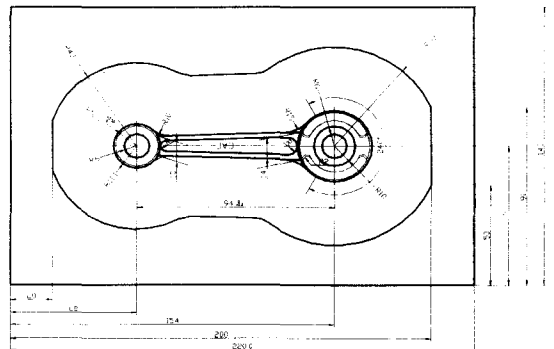


Fig. 4 Die-set for forging experiment

## 3 결과 및 고찰

### 3.1 주조실험 결과

실험결과 주입온도가 640℃미만일 때와 금형온도가 200℃미만일 때, 성형이 되지 않는 것을 볼 수

있었다. 따라서 주입온도를 640℃로 하고, 금형온도 200℃, 260℃, 320℃일 때의 DAS의 크기를 비교하였다.

Fig. 5는 DAS의 크기에 대한 금형온도의 영향을 나타낸 그래프이다. 금형온도가 200℃일 때, DAS의 크기가 24.3μm였고, 260℃일 때는 24.8μm였고, 320℃일 때는 26.0μm였다. 금형온도에 의해서는 DAS의 크기를 20μm보다 작아지게 하는 데는 한계가 있음을 알 수 있다.

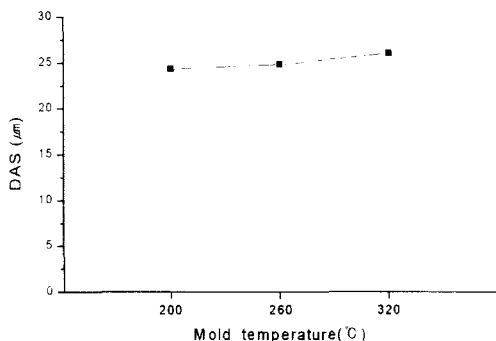


Fig. 5 Effect of mold temperature on the DAS of cast preforms

DAS의 크기를 작게 하기 위해서 금형에 물을 흘려 보내어 강제냉각을 하였다. 이 때 사용한 물의 온도는 각각 5℃와 22℃였다. 그 결과 금형을 통과하는 유량에 따라서 냉각속도가 빨라지는 것을 알 수 있었다. 공냉일 때는 4.6℃/s, 유량이 10//min일 때는 5.0℃/s, 20//min일 때는 6.8℃/s, 30//min일 때는 8.0℃/s 였고, 물의 온도가 5℃이고 유량이 30//min일 때의 냉각속도는 10.0℃/s였다. Fig. 6은 DAS의 크기에 대한 냉각속도의 영향을 나타낸 것이다. 냉각속도가 8℃/s 일 때, DAS의 크기가 18.1 μm였고, 냉각속도가 10.0℃/s 일 때 17.4μm였다.

냉각속도를 제어하여 DAS의 크기가 17.4μm인 예비성형체를 제조하였는데, 이것에는 수지상정이 남아 있어서 단조 후 제품의 기계적 성질에 좋지 않은 영향을 미친다. 따라서 Zr과 Ti+B와 같은 합금원소를 첨가하여 수지상정을 없애고 주조조직을 구상화하였다<sup>(12)</sup>. 그 결과를 Fig. 7~8에 나타내었다.

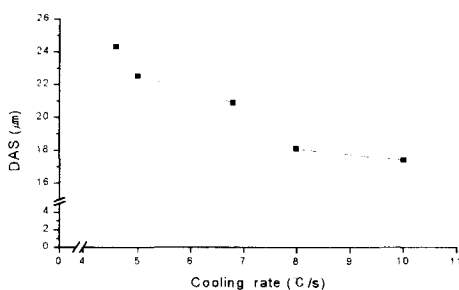


Fig. 6 Effect of cooling rate on the DAS of cast preforms

Fig. 7~8에 보는 바와 같이 Zr과 Ti+B를 각각 첨가하는 것보다 함께 첨가하는 것이 훨씬 더 효과적임을 알 수 있었다. 또한 합금원소의 양을 많이 넣으면 넣을수록 형상비가 1에 가까워져 구상화가 더 잘 되는 것을 알 수 있다. 그러나 어느 일정한 값 이상에서는 넣는 양에 비해 구상화되는 정도가 떨어지는 것을 알 수 있었다. 실험을 통해 Zr은 0.5%, Ti+B은 0.24%를 첨가하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있었다.

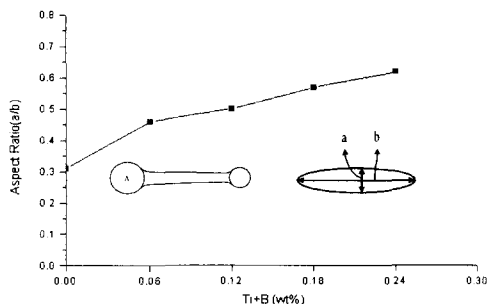


Fig. 7 Effect of Ti+B content on the aspect ratio of cast preforms

Fig. 9는 합금원소를 첨가한 시편으로 압축실험을 한 후, T6열처리를 하여 경도를 측정된 결과이다. 합금원소를 첨가하지 않았을 때보다 합금원소를 첨가했을 때의 경도값이 약 20%정도 향상된 것을 알 수 있다.

Fig. 10~11은 인장특성에 미치는 합금원소의 영향을 나타낸 그래프이다. 합금원소를 첨가하지 않았을 때보다 합금원소를 첨가했을 때의 인장강도

와 인신율이 모두 향상된 것을 알 수 있었다.

이것은 합금원소를 첨가하여 예비성형제를 구상화하는 것이 주조/단조품의 기계적 성질을 향상시키는 것임을 나타내는 것이다.

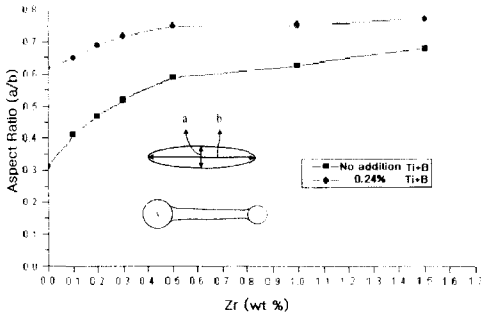


Fig. 8 Effect of Zr and Ti+B contents on the aspect ratio of cast preforms

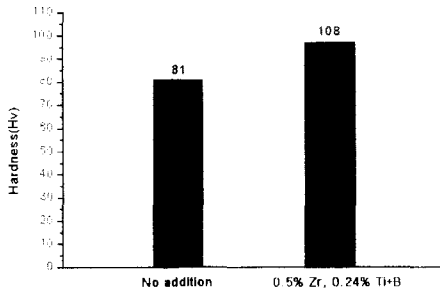


Fig. 9 Effect of additives on the hardness of a cast/forged product (T6 heat - treatment)

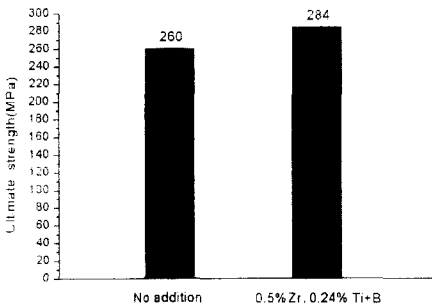


Fig. 10 Effect of additives on the ultimate strength of a cast/forged product (T6 heat-treatment)

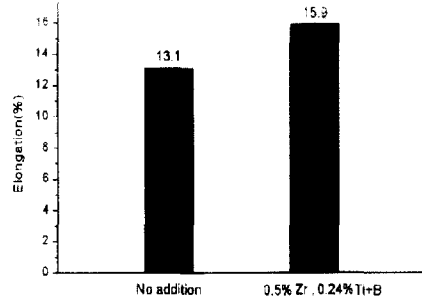


Fig. 11 Effect of additives on the elongation of a cast/forged product (T6 heat-treatment)

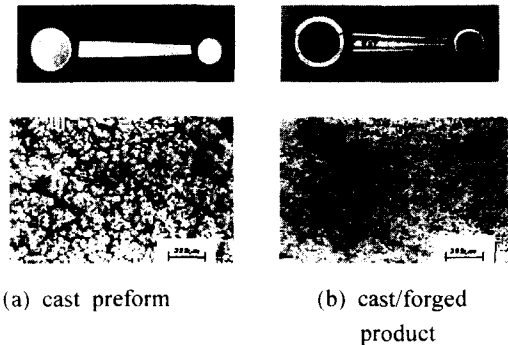
Table 3에 DAS 크기를 20 $\mu$ m 이하로 줄이기 위한 최적의 주조조건을 나타내었다.

Table 3 Optimum casting conditions

Mold temperature(°C)	200
Molten temperature(°C)	740
Pouring time(sec)	2~3
Pouring temperature(°C)	640
Water flow-rate(l/min)	30
Water temperature(°C)	5

### 3.2 단조실험 결과

Fig. 12는 예비성형체와 주조/단조품의 외관사진과 내부 조직사진을 나타낸 것이다. 주조조직이 단조를 함으로써 치밀해진 것을 알 수 있다.



(a) cast preform

(b) cast/forged product

Fig. 12 Cast preform and cast/forged product

Fig. 13~ Fig. 14는 예비성형체와 주조/단조품의 인장특성을 비교한 그래프이다. 예비성형체를 단조함으로써 인장강도와 연신율이 각각 28%, 80%향상된 것을 알 수 있었다.

또한 현재 SCM420으로 만들어 사용하는 컨벡팅 로드의 중량이 92g인 것에 비해, A356으로 제조한 컨벡팅 로드의 중량은 34g으로 약 37%의 경량화를 달성할 수 있었다. Table 4에 A356과 SCM420으로 제조한 컨벡팅 로드의 기계적 성능을 비교하여 나타내었다. SCM420과 비교해 볼 때 기계적 성능은 떨어지지만, A356을 강제 수냉과 합금원소인 Zr과 Ti+B를 첨가하여 기계적 성능을 향상시킬 수 있었다.

Table 4 Comparison of mechanical properties between A356 and SCM420

	A356	SCM420
Ultimate Strength(MPa)	284	980
Elongation(%)	16	12
Hardness(Hv)	107.8	580
Fatigue Limit(MPa)	50	450
Weight(g)	34	92

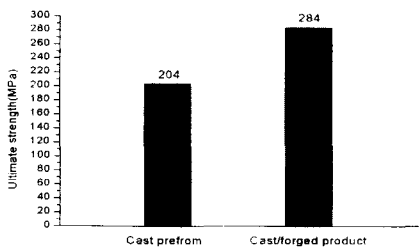


Fig. 13 Comparison of ultimate strength between a cast preform and a cast/forged product

### 3.3 열처리 결과

주조/단조된 제품의 경도를 향상시키기 위하여 용체화처리와 인공시효처리를 함께 하는 T6열처리

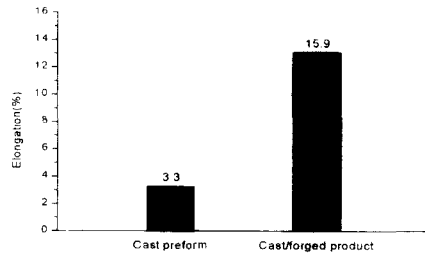


Fig. 14 Comparison of elongation between a cast preform and a cast/forged product

를 하였다<sup>(13)</sup>. 여러 가지 열처리 조건하에서 실험을 하여 경도를 측정한 결과 본 실험에서는 용체화처리는 540℃-4h, 급냉온도는 50℃, 시효처리는 160℃-8h가 적절함을 알 수 있었다.

### 4. 결론

주조/단조공정에서 예비성형체의 조직을 미세화하고 구상화하기 위하여 강제 수냉과 합금원소(Zr과 Ti+B)를 첨가하여 2류차 컨벡팅 로드의 주조 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용융금속의 냉각속도를 10℃/s로 할 때, DAS를 17.4μm까지 낮출 수 있었다.
2. 합금원소는 Zr과 Ti+B를 함께 첨가하는 것이 좋으며, 그 양은 각각 0.5%와 0.24%가 적절하였다.
3. 주조/단조된 알루미늄 컨벡팅 로드의 중량은 기존 강제의 37%정도로 경량화되었다.

### 후기

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

### 참고문헌

1. "알루미늄/철의 주조단조," 열조형기술, pp.95-105, 1995, 3.
2. S.Komatsu, S.Yahata, K.Fukui, & T.Tokoshima, "Development of aluminum alloy roller type valve

- rocker arm by casting and forging technique," SAE Technical Paper Series, No.890554, pp.1-6, 1989.
3. Shinichiro Fujikawa, Yukiyoishi Kitamura and Saburo Shimamura, "Application of numerical methods for the aluminum casting/forging process," J. Mat. Proc. Tech., vol. 27, pp.93-110, 1991.
  4. 櫻天久之, "コンフォミックス法の 以後の 展開," 第19回 アルミニウム鍛造委員会, pp.1-33, 1994.
  5. 神戸 洋史, 榊 和夫, 吉岡 英夫, 三部 隆宏, 北岡 山治, 藤井 拓己, "鑄造鍛造 プロセスによるアルミニウムロードホイールの實用化," 輕金屬 第48卷, 第 2號, pp.103-108, 1998.
  6. 山本 秀雄, 關口 常口, "各種アルミニウム合金の鑄造鍛造," 第12回 アルミニウム鍛造技術講座, pp.1-8, 1992.
  7. 김현영, UBET를 이용한 형단조 예비가공형 설계, 서울대학교 대학원, 1991.
  8. 廉永夏, 最新機械工作法, 東明社, 1994.
  9. 田良 一, 早田智臣, 山根英 一, 梅田高照, "AC4CH 알루미늄合金의低溫注湯による結晶粒微細化," 鑄造工學, 第69卷, 第7號, pp.549-555, 1997.
  10. 輕金屬協會, "アルミニウムのデンヅライトアームスペーシングと冷却速度測定法," 1998.
  11. 姜孝京, 官原広都, 大城桂作, "Al-Si-Cu系鑄造合金の凝固組織に及ぼすSr及びTi+B添加と冷却速度の影響," 鑄造工學, 第69卷, 第5號, pp.383-390, 1997.
  12. 朴正雄, 李榮培, 金屬熱處理原理, 文連堂, pp.352-365, 1990.