

알루미늄 주조/단조 공정을 이용한 자동차용 에어컨 컴프레서 피스톤의 생산에 관한 연구

이성모*, 왕신일*, 김효량*, 배원병**

A Study on the Production of a Compressor Piston for an Automobile Air-Conditioner using Aluminum Casting/Forging

Sung Mo Lee*, Shin Il Wang*, Hyo Ryang Kim*, and Won Byong Bae**

ABSTRACT

In this study, aluminum casting experiments are carried out to reduce the grain size of a cast preform and to spheroidize its dendritic structure by adding Ti+B and Zr, and to modify flaked eutectic silicon by adding Sr. And a finite element simulation is performed to determine an optimal configuration of the cast preform to be used in forging of a compressor piston for an automobile air-conditioner.

When 0.15% Ti+B, 0.25% Zr, and 0.05% Sr are added, respectively, into the molten aluminum alloy, the finest grain in casting of the preform is obtained. It is confirmed that the optimal configuration of the cast preform predicted by FEM simulation is very useful for forging the compressor piston. After forging the cast preform of the compressor piston, the microstructure and the hardness of the cast preform is compared with those of the cast/forged product.

Key Words : Compressor piston (컴프레서 피스톤), Casting/Forging (주조/단조), Microstructure (미세조직), Alloy addition (합금첨가), Modification (개량처리), Preform design (예비성형체 설계)

1. 서론

알루미늄은 자동차 산업분야에서 에너지 절약, 연비절감을 위한 경량화 소재로서 많은 관심을 보여왔지만 높은 제조비용으로 인해 자동차 등의 부품생산에 적극적으로 이용되지 못했다. 따라서 제조비용을 감소시키기 위한 노력의 일환으로 주조/단조라 하여 단조공정의 초기 재료 형상을 주물을 이용하여 만들고 이를 단조하는 방법이 사용되고

있다. 주조/단조는 초기 형상을 주물을 이용하여 만들기 때문에 자유로운 형상을 얻을 수 있어 초기 형상을 적절하게 설계하여 단 한번의 단조로 최종제품을 성형할 수 있는 것이 제일 큰 장점이다. 또한 단조공정의 단축으로 금형비가 감소되고, 플래쉬와 스크랩의 재활용이 가능하여 재료비가 절감된다^[1]. 주조/단조공정에서 주조된 예비성형체의 미세조직이 최종제품의 기계적 성질에 큰 영향을 미친다.

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 공과대학 기계공학부

따라서 본 연구에서는 예비성형체의 현미경조직을 미세화하기 위한 주조실험을 AHS-II(JIS4032와 유사)를 사용하여 수행하였다. 주조실험은 2단계로 수행하였는데, 1 단계는 미성형이나 수축공과 같은 결함이 없는 주물을 주조하기 위한 최적의 주조조건을 찾고, 이 최적 주조조건에서 수지상정을 없애고 주조조직을 구상화하기 위하여 Ti+B, Zr과 같은 합금원소를 첨가하는 것이다. 2 단계는 침상의 공정 Si을 개량화 처리하는 것이다. 개량화 처리시 탈가스 처리를 동시에 수행하였다.

단조제품의 기계적 성능을 향상시키기 위해서는 예비성형체가 균일하면서도 충분한 변형을 받도록 설계하여야 한다^[2]. 이를 위해 DEFORM 3D를 이용하여 유한요소해석을 하였다. 이를 자동차에어킨 컴프레서용 피스톤에 적용하여 예비성형체를 제안하고, 주조한 예비성형체를 가열 후 한번의 단조로 최종제품을 제조하였다. 주조/단조제품에 적합한 열처리 조건을 파악하고, 기존의 단조제품과 경도를 비교하였다.

2. 주조실험

2.1 실험소재

실험소재는 Al-Si 계 단조용 합금인 AHS-II로서, 내마모성이 우수하고 열팽창계수가 작아 각종 피스톤에 사용되고 있다. 하지만 현재까지는 소재 개발회사의 고유상표이지 규격화되어 있지 않다. Table 1에 AHS-II의 주요성분을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of AHS-II

Comp.	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	Al
Wt(%)	10.5	3.5	0.3	Max	Max	Max	Max	Bal.
	-	-	-	0.5	0.5	0.2	0.2	

2.2 실험장치 및 주조조건

주조실험을 위한 장치와 주조금형을 Fig. 1과 Fig.2에 나타내었다.

최적 주조조건을 찾기 위하여 Table 2에 제시한 것과 같이 금형온도, 용탕의 주입온도, 주입시간을 변화시키면서 실험하였다.

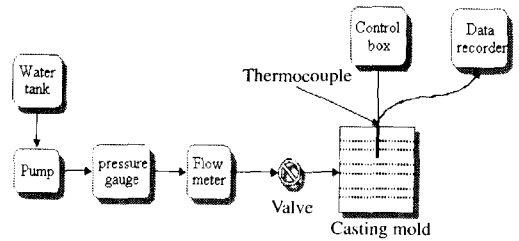


Fig. 1 Schematic diagram for the casting experiment

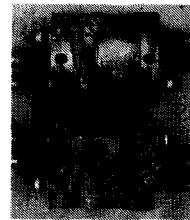


Fig. 2 Mold for the casting

Table 2 Casting conditions

Mold temperature (°C)	220, 260, 300
Molten temperature (°C)	770
Pouring time (sec)	5 ~ 20
Pouring temperature (°C)	680 ~ 720
Water flow-rate (l/min)	30
Water temperature (°C)	5

2.3 미세화 및 구상화 실험

주조시편에서 수지상정의 구상화는 주조/단조품의 기계적성질의 향상에 도움을 준다. 따라서 구상화를 위한 원소로 Ti+B과 Zr을 알루미늄 용탕에 각각 혹은 동시에 첨가하고 그들의 영향을 파악하였다^[3]. 결정립의 크기는 Jeffrie 법^[4]을 사용하여 결정립의 직경을 측정하였다. 또한 주조조직의 구상화 정도를 파악하기 위하여 타원형인 입자의 단반경과 장반경의 비인 형상비(aspect ratio)를 사용하였다.

2.4 개량처리 실험

피로강도를 약화시키는 침상 공정 Si을 섬유상의 공정 Si으로 바꾸기 위하여 미량의 Sr을 알루미늄 용탕에 첨가하여 개량처리를 하였고, 동시

에 탈가스 처리를 하였다. 탈가스제는 FOSECO 사의 DEGASER 790 을 사용하여 용탕 중량의 0.3%를 투입하였다.

알루미늄의 일반적인 용해온도는 750℃~850℃ 인데, 주입시의 온도는 액상선 가까운 온도에서 주입하는 것이 좋으므로 770℃로 설정하였다⁵⁾.

3. 예비성형체 설계 및 단조실험

3.1 예비성형체 설계

단조제품의 기계적 성질을 높이기 위하여 재료가 충분한 변형을 받으면서 금형내 충만성과 단조 결함을 피하기 위한 자동차 에어컨용 컴프레서 피스톤의 예비성형체를 제안하였다.

예비성형체의 형상은 제품을 양단 대단부와 웨브 부분으로 나누어 각 단면적의 비가 최종제품의 단면적의 1.3 배가 되도록 배분하여 Fig. 3 과 같은 계단형(stair type), 테이퍼형(tapered type)을 제안하였다⁶⁾. 제안된 예비성형체의 형상이 유용한가를 확인하기 위하여 상용 FEM 코드인 DEFORM-3D 를 이용하여 등온으로 해석하였다. 소재는 AHS-II, 금형은 H-13 을 사용하였다. 금형과 재료 사이의 마찰상수는 0.3, 소재온도는 450℃, 금형온도는 300℃로 하였다⁷⁾.

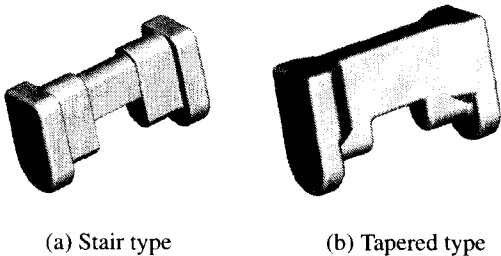


Fig. 3 Initial configurations of the cast preforms

처음 제안한 예비성형체의 변형양상에 대한 해석결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 계단형에서는 상부에 폴딩(folding)이 발생하였고, 테이퍼형에서는 국부적인 소재 부족으로 인한 금형내 미충만 현상과 폴딩이 발생하였다. 따라서 Fig. 5 와 같은 최종 예비성형체를 제안하였는데, Fig. 6 에서 보듯이 해석결과 결함이 발생하지 않았고 최대 단조하중은 158 톤이었다.

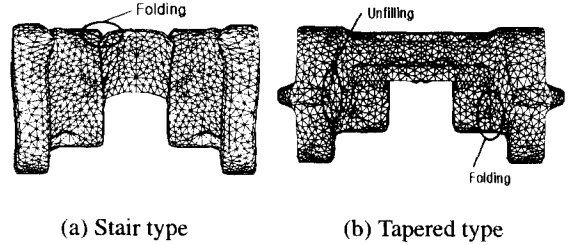


Fig. 4 Predicted deformation patterns of the initial cast preforms

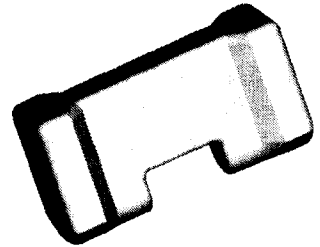


Fig. 5 Modified configuration of the cast preform

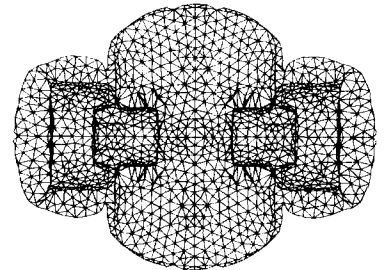
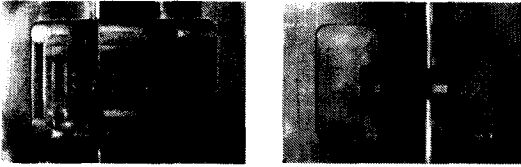


Fig. 6 Predicted deformation pattern of the modified cast preform

3.2 단조 실험

단조실험은 200ton 유압프레스에서 하였고, 단조실험에 사용한 금형은 Fig. 7 과 같다.

단조시 소재온도는 450℃, 금형의 온도는 300℃로 하여 실험하였다.



(a) Upper die (b) Lower die

Fig. 7 Die-set for forging the compressor piston

4. 결과 및 고찰

4.1 주조실험 결과

주조실험 결과 결함이 발생하지 않는 최적의 주조조건을 Table 3 에 나타내었다. 위의 최적주조 조건에서 주조조직의 구상화 및 공정 실리콘의 개량화 효과를 파악하기 위하여 주조품의 인장실험과 현미경조직 관찰한 결과를 아래에 기술한다.

Table 3 Optimal casting conditions

Mold temperature (°C)	300
Molten temperature (°C)	770
Pouring time (sec)	10~15
Pouring temperature (°C)	720
Water flow-rate (l/min)	30
Water temperature (°C)	5

(1) 미세화 및 구상화 실험

Fig. 8 은 형상비에 대한 첨가제의 영향을 나타낸다. Ti+B 과 Zr 을 각각 첨가하는 것보다 함께 첨가하는 것이 구상화에 더 효과적임을 알 수 있었다. 일정량 이상에서는 넣는 양에 비해 구상화효과가 떨어지는 것을 알 수 있었다. 실험을 통해 Ti+B 은 0.15%, Zr 은 0.25% 첨가하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있었다.

Fig. 9 는 결정립 크기에 대한 첨가제의 영향을 나타낸다. Ti+B 과 Zr 을 각각 첨가하는 것보다 함께 첨가하는 것이 미세화에 더 효과적임을 알 수 있었다. 그러나 어느 일정한 값 이상에서는 결정립 크기가 더 이상 미세화되지 않는 것을 알 수 있었다. 실험을 통해 Ti+B 은 0.15%, Zr 은 0.25% 첨가하는 하였을 때 90 μm 로 가장 미세화 됨을 알 수 있었다.

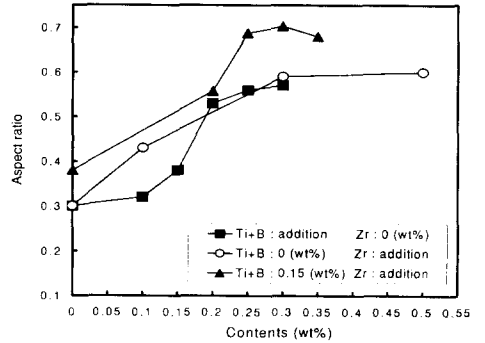


Fig. 8 Effect of Ti+B and Zr contents on the aspect ratio of the cast specimen

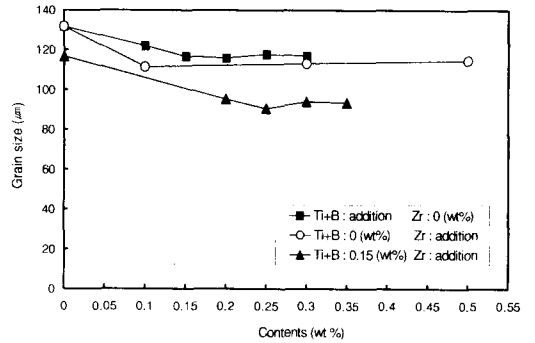


Fig. 9 Effect of Ti+B and Zr contents on the grain size of the cast specimen

Fig. 10 과 Fig. 11 은 인장강도와 연신율에 대한 첨가제의 영향을 나타낸다. Ti+B 은 0.15%, Zr 은 0.25%를 동시에 첨가하였을 때 인장강도가 가장 높게 나타났다. 하지만 연신율은 증가하지 않음을 알 수 있었다.

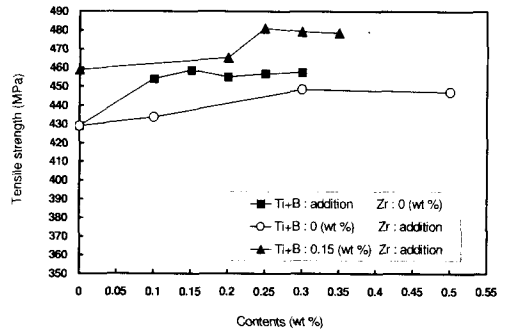


Fig. 10 Effect of Ti+B and Zr contents on the tensile strength of the cast specimen

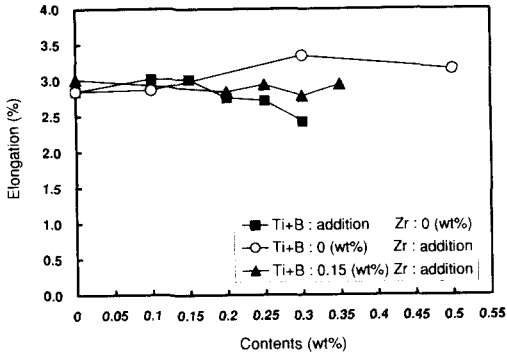


Fig. 11 Effect of Ti+B and Zr contents on the elongation of the cast specimen

(2) 개량처리 실험^[8]

Ti+B 과 Zr 을 각각 0.15%, 0.25% 첨가한 후 Sr 을 첨가하여 침상 공정 Si 을 개량처리 하였다.

Fig. 12 는 인장특성에 대한 Sr 첨가량의 영향을 나타낸다. Sr 첨가 후 유지시간은 10 분으로 하였다. 인장강도는 Sr 첨가량에 따라 큰 변화가 없는 반면 연신율은 Sr 을 첨가하지 않았을 경우 2.9% 에서 Sr 첨가량이 0.05%일 때 3.7%로 28%정도 향상됨을 알 수 있었다. 하지만 Sr 이 0.1%이상 첨가 되었을 경우 미세한 섬유상 공정 Si 이 상호 접촉된 판상형태로 복귀되는 과도한 개량화 현상이 발생하여 연신율이 다시 감소함을 알 수 있었다

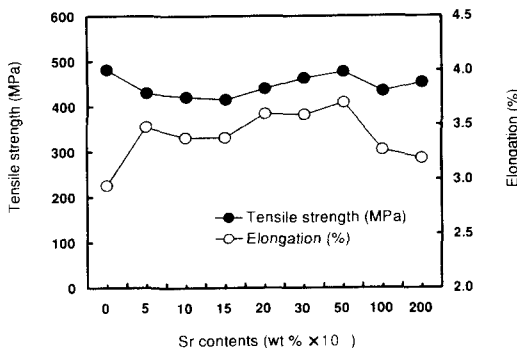


Fig. 12 Effect of Sr contents on the tensile properties of the cast specimen.

Fig. 13 은 인장특성에 대한 Sr 첨가 후 유지시간의 영향을 나타낸다. Sr 첨가량은 0.015%로 하였다. 인장강도는 증가하지 않았으나, 유지시간을 20

분으로 하였을 때 개량처리하지 않은 경우에 비해 연신율이 35% 증가하였다. 충분한 개량처리가 이루어지지 않은 상태에서 Sr 에 의한 주물의 미세한 기포의 양이 증대되므로 개량 효과를 얻기 위해 유지시간이 필요하다고 생각된다. 유지시간이 20 분이 되면서 공정 Si 의 개량 효과를 충분히 얻을 수 있으므로 연신율의 증가를 관찰할 수 있다.

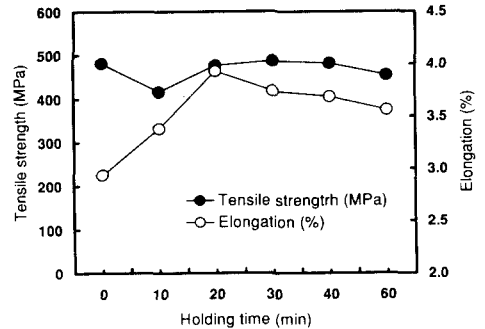
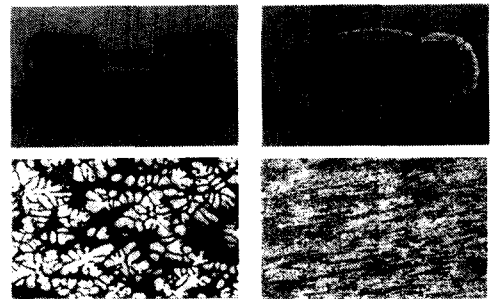


Fig. 13 Effect of holding time on the tensile properties of the cast specimen

4.2 단조실험 결과

개선된 형상의 예비성형체를 주조하여 단조실험을 한 결과, 단조결함이 발생하지 않았으며 성형하중은 161 톤으로 유한요소 해석을 통해 예측된 성형하중과 잘 일치하였다.

Fig. 14 는 예비성형체와 주조/단조품의 외관사진과 내부 조직사진을 나타낸 것이다. 주조조직이 단조를 함으로써 주조조직이 파괴되고 치밀해진 것을 알 수 있다.



(a) Cast perform (b) Cast/forged product

Fig. 14 Photos and microstructures of the cast perform and the cast/forged product of the compressor piston

주조/단조된 제품의 경도를 향상 시키기 위하여 용체화처리와 인공시효처리를 함께 하는 T6 열처리를 하였다. 여러 가지 열처리 조건하에서 실험을 하여 경도를 측정한 결과 본 실험에서는 용체화처리는 500°C-4h, 급냉온도는 상온(20°C), 시효처리는 170°C-7h 가 적절함을 알 수 있었다. Fig. 15 에 주조/단조품과 기존의 단조 공정으로 제조된 제품의 경도를 비교하였다. 최종제품의 요구되는 경도는 76HR_B 이고, T6 열처리후 주조/단조품의 경도는 80HR_B 으로 기존제품의 규격을 만족함을 알 수 있었다.

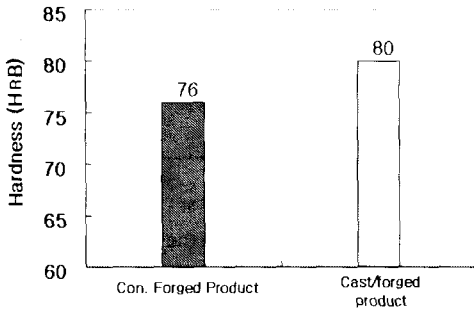


Fig. 15 Comparison of hardness between the cast/forged product and the conventionally forged product

열처리후에 다듬어진 완제품은 Fig. 16 과 같다.



Fig. 16 Final product of the compressor piston for an automobile air-conditioner

5. 결론

자동차용 에어컨 컴프레서 피스톤을 주조/단조 공정으로 제조하기 위해서 주조조직의 구상화 및 개량화를 위한 주조실험, 단조에 적합한 예비성형체의 형상설계, 주조된 예비성형체의 단조실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주조조직을 구상화하기 위한 첨가제는 Ti+B 과 Zr 을 동시에 첨가하는 것이 좋으며, 그 양은 각각 0.15%와 0.25%가 적절하였다.
2. 주조조직의 개량처리는 Sr 0.05%가 적정량이었고, 첨가 후 유지시간은 20 분이 적정시간이었다.
3. 3 차원 유한요소해석을 통해 자동차용 에어컨 컴프레서 피스톤의 단조를 위한 예비성형체를 제안할 수 있었고 해석결과와 단조 실험 결과가 잘 일치하였다.
4. 단조된 제품의 용체화처리는 500°C-4h, 급냉온도는 상온(20°C), 시효처리는 170°C-7h 가 적절함을 알 수 있었다
5. 알루미늄 주조/단조 공정으로 제조한 자동차용 에어컨 컴프레서 피스톤의 경도가 기존 단조로 제조한 제품의 규격을 충분히 만족시킴을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. "알루미늄/철의 주조단조," 열조형기술, pp. 95 - 105, 1995, 3.
2. 김대용, 윤성만, 오수익, "알루미늄 주물을 이용한 단조 공정 연구," 한국소성가공학회 '97 추계 학술대회 논문집, pp. 138-141, 1997.
3. 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," 輕金屬 第 45 卷, 第 7 號, pp. 385-390, 1995.
4. 배원병, 김영호, "알루미늄 주조/단조 기술 개발 (I)," ERC/NSDM 연구보고서, 부산대학교, 97K3-0909-01-03-3, 1998, 2.
5. 神戸 洋史, 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. Teruie Takemasu, Victor Vazquez, Brett Painter, Taylan Altan, "Investigation of metal flow and

preform optimization in flashless forging of a connection rod," J. Mat. Proc. Tech., Vol. 59 pp. 95-105, 1996.

7. Howard E. Boyer, Timothy L. Gall, Metal Handbook, Desk Edition, 2nd printing, 1985.
8. 주대현, 김명호, "Sr 에 의한 아공정 Al-Si 합금의 개량처리," 주조, 제 15 권 제 3 호 pp. 209-219, 1995.