

자동차용 피스톤의 성형기술과 기계적 성질의 개선에 관한 연구

김길준*, 박종옥, 김영호(부산대학교 기계공학부)

A Study on the Forming Technologies for a Motor Piston and Improvement of Mechanical Properties

K. J. Kim, J. O. Park, Y. H. Kim(School of Mech. Eng. PNU)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the influences on mechanical properties of motor pistons manufactured by casting, conventional forging and powder forging, using the comparison of characteristics like microstructure, hardness, tensile strength, and elongation. To form conventional forging piston, the experiment of viscoplasticity was performed. As the model material, plasticine was used. To form powder forging piston, the shape of piston was simplified as simple cup shape. Material properties like workability, density variation before and after forging, and strain loci of material during forging were investigated. Powder forging and conventional forging technologies were effective to gain dense microstructure. In powder forging, distribution of such dense microstructure was uniform. For hardness, pistons from powder forging and conventional forging technologies were much better than that from casting. For tensile strength and elongation, powder forging and conventional forging technologies were also advantageous.

Key Words : Casting(주조), Conventional Forging(일반단조), Powder Forging(분말단조), Viscoplasticity(유동가시화)

1. 서론

자동차 산업의 발전과 경량화의 경향에 따라 알루미늄 피스톤이 개발되었고, 제품에 필요한 기계적 특성을 만족시키기 위하여 설계와 형상, 재료, 제작방법 등은 매우 다양해져 왔다. 차량용 피스톤의 생산을 위한 기존의 성형기술 중 널리 알려진 방법으로 주조법과 일반단조법이 있다. 국내에서 생산되는 자동차 및 이륜차의 피스톤은 전량 주조법^[1,2]에 의해 생산되고 있으나 주조피스톤은 내부에 기공을 포함하여 금속조직이 취약하고, 응고수축에 의해 제품치수가 불규칙하며, 제품의 강도가 낮고 연신율이 적은 등 기계적 성질이 떨어지는 단점을 가진다. 일반단조법으로 성형된 피스톤은 제품의 치수 및 형상이 일정하며, 금속조직이 상대적으로 치밀하고 경도 및 강도가 높아지는 등 기계적 성질이 향상된다. 분말단조법은 분말야금기술과 정밀단조기술의 장점만을 취합한 방법으로, 분말야금부품의 내부기공에 의한 기계적 특성의 한계를 극복하고 균일한 합금조성을 얻을 수 있으며, 일반단조기술의 불균일한 특성을 극복할 수 있다. 또한 밀폐다이

(closed die)에서 플래시 없는 정형단조공정을 거치므로 재료 회수율이 좋고 최종 기계가공 등의 공정단축으로 생산원가를 절감할 수 있다.

본 연구에서는 저자 등이 이미 실험으로 확립된 바 있는 피스톤 성형을 위한 일반단조법^[3]과 분말단조법^[4]을 이용하여 피스톤을 성형하고, 이들과 이미 상용화되어 산업체에서 생산되고 있는 주조피스톤을 가지고 조직, 경도, 인장강도, 연신율 등을 대상으로 비교, 분석하여 각 성형법이 가지는 특성과 제품의 기계적 성질에 미치는 영향등을 조사하는 것을 목적으로 한다.

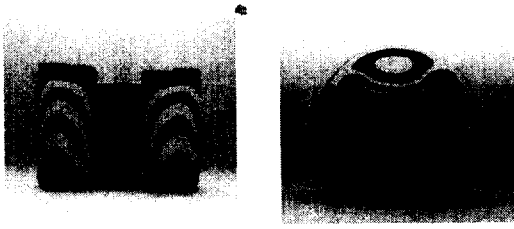
2. 피스톤의 성형

2.1 일반단조법

2.1.1 모델재료에 의한 유동 가시화

제품의 성형성과 내부유동을 파악하기 위하여 모델재료로서 플라스틱을 사용하였다. 백색과 흑색의 플라스틱을 교대로 적층하여 실린더 형상의 빌렛을 준비한 후, 단조 실험을 통하여 다이 캐비티의 충전여

부 및 단조된 제품의 내부유동 양상 등을 파악하였다. 수행된 실험의 수직 절단면과 수평절단면이 Fig. 1에 나타나 있다.



(a) Vertical Cross Section (b) Horizontal Cross Section
Fig. 1 Material Flow of Plasticine Forged Pistons

그림과 같이 피스톤 헤드의 반경 중심 부근에서 재료는 심하게 압축되어 외곽으로 퍼지고 핀보스와 스킨트를 성형하기 위해 헤드 윗부분으로 유동되는데, 핀보스 부분보다는 스킨트 부분의 재료가 더욱 심한 변형을 받으면서 유동하는 양상을 보인다. 이상에서 실린더 모양의 예비성형체를 사용했을 때 무리없이 피스톤 형상으로 성형됨을 알 수 있다.

2.1.2 재료선정 및 성형 실험

피스톤은 고온, 고압의 상태에서 고속으로 작동할 뿐 아니라, 실린더 벽과의 마찰을 일으키므로 높은 강도, 경도, 연신율, 내마모성, 내충격성, 내열성 등이 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 주조 및 일반 단조소재로서 일반적으로 자동차용 피스톤으로 사용되는 알루미늄 합금인 AC8A와 그 성분비가 유사한 Al 4032를 각각 사용하였다. 본 재료의 조성비는 Table 1과 같다. 또한 일반단조법에 의한 피스톤 성형의 실험조건들은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical Composition of Aluminum Alloys

Division	Chemical Composition										
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Fe	Ti	Zr	Al
AC8A	11.0-0.8	0.03	0.8	0.03	0.03	0.8	0.4	0.03	0.03	Rem	
	13.0	1.3	↓	1.3	↓	1.5	↓	↓	↓		
Al 4032	11.0-0.3	0.03	0.8	0.1	0.25	0.5	1.0	0.03	0.25	Rem	
	13.5	1.3	↓	1.3	↓	1.3	↓	↓	↓		

Table 2 Experiment Condition of Conventional Forging

	Condition		
Die Temp.	210℃		
Material Temp.	460℃		
Lubricant	graphite (m=0.3~0.4)		
Forging Device	630 ton mechanical press		
Heat Treatment	solution	quenching	ageing
	520℃-5hr	23℃	190℃-5hr

2.2 분말단조법

2.2.1 분말의 합금조성 및 실험조건

실험에 사용된 주 금속 분말은 1.5%의 윤활제를 함유하고 있는 Alumix 123 (독일, Ekart Co., Al-4.5Cu-0.5Mg-0.7Si)이며, 평균입도는 200mesh, 이론 밀도는 2.79이다. 여기에 추가로 필요한 기타 금속분말들을 첨가하였다. Table 2에 실험에 사용된 분말의 합금조성이 나타나 있다. 분말단조법에 의한 피스톤 성형의 실험조건들은 Table 4와 같다.

Table 3 Chemical Composition of Aluminum Alloys

Composition	Al	Cu	Si	Ni	Mn	Mg	Micro-wax
Weight-%	89.8	4.5	1.5	2.0	0.5	0.5	1.2

Table 4 Experiment Condition of Powder Forging

Process	Device	Condition		
Mixing	V-type Mixer	30rpm-30min		
Compacting	200ton hydraulic press	2ton/cm ²		
Die	Floating Die	Lubricant : Micro-wax		
Sintering	Division	Dewaxing	Sintering	Cooling
	Temperature (℃)	400	590	150
	Holding Time (min)	25~30	25	30
	Atmosphere	N2		
Forging	Division	Condition		
	Die Temp.	250℃		
	Material Temp.	450℃		
	Lubricant	graphite (m=0.3~0.4)		
	Forging Device	200 ton hydraulic press		
	heat treatment	solution	quenching	ageing
510℃-30min		23℃	170℃-18hr	

2.2.2 성형성(Workability) 평가

소결품의 성형성을 평가하기 위하여 업세팅 시험(upsetting test)을 행하였다. 시험중 금형과 시편의 온도는 실제 단조공정에서와 동일하도록 각각 250℃와 450℃를 유지시켰다. 다이나 시편간의 마찰을 줄이기 위하여 윤활제로 그래파이트를 사용하였다. 직경대 높이비(H/D)가 1.0, 1.2, 1.5인 각각의 경우에 대하여 시편의 자유표면에 크랙이 발생할 때까지 업세팅 한 후 최종 압축변형률과 인장변형률을 측정하였다.

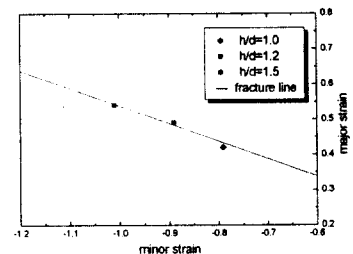


Fig. 2 Workability of the material

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 다공성 소결금속의 단조한계도 비다공성 금속의 단조한계와 같이 직선으로 볼 수 있으며, 이 직선의 기울기도 비다공성 금속의 경우와 마찬가지로 약 0.5이다.^{[1],[6]} 본 시험에서도 단조한계의 기울기는 약 0.5임이 확인되었다.

2.2.3 밀도 변화 및 변형률 경로

단조 전후의 재료의 밀도변화를 조사하기 위하여 제품 형상을 Fig. 3과 같은 직경 50mm, 높이 28mm, 벽 두께 5~8mm인 컵 모양으로 단순화하였다.



Fig. 3 Shape and Dimension of Preform and Product

밀폐형 단조 금형을 사용하여 200t 유압식 프레스로 성형하였다. 소재 온도는 450℃로 하였고, 금형 예열 시스템을 사용하여 금형 온도를 250℃로 유지하였다. 윤활제로는 그래파이트를 사용하였다. 예비성형체를 3~5mm의 step으로 가압하여 각 부위의 변형률을 측정 한 후, 로에서 재가열하여 가압하는 방식으로 실험을 진행하였다. 성형후 제품을 T6 열처리하였다.

제품의 밀도를 아르키메데스법^[7]을 사용하여 측정한 결과, 단조전 프리폼의 평균밀도는 2.50였으며 단조후는 제품의 벽두가 2.76, 바닥두가 2.77로 비교적 균일한 밀도분포를 보였다. 단조 공정중 소재의 각 부위별 변형률 경로는 Fig. 4과 같다. 제품의 헤드부와 스킨부의 변형률을 측정하여 그래프상에 나타내었다. 또한 직선으로 표시된 것은 fracture line이다.

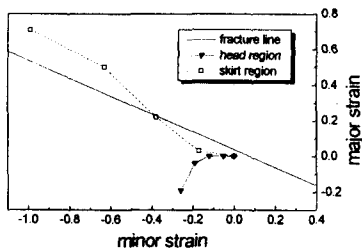


Fig. 4 Strain loci at the head and skirt region

본 실험과 같은 밀폐단조에서는 변형률 경로가 fracture line을 넘어가더라도 반드시 크랙이 발생한다고 볼 수는 없다. 다만, 재료의 기계적 성질을 높이기 위해서는 유동을 많이 일으키는 것이 유리하므로 fracture line을 벗어나지 않는 범위에서 변형률 경로가 긴 것이 바람직한 예비성형체라 할 수 있다. 그러나 실제 피스톤 제품의 경우 스킨 끝단의 자유표면적은

단순화된 컵모양 제품보다 적으므로 피스톤의 성형에서 결함발생이 크게 우려되는 수준은 아니다.

3. 결과 및 고찰

이상으로 일반단조법과 분말단조법을 적용하여 자동차용 피스톤을 성형하였고, 이들과 이미 상용화되어 산업체에서 생산되고 있는 주조피스톤을 가지고 조직, 경도, 인장강도, 연신율 등을 대상으로 비교, 분석하고자 한다. 비교대상인 주조피스톤은 현재 상용화되어 있는 일반 차량용 주조피스톤으로 중력주조에 의해 생산된 제품이다. 재질은 Table 1의 AC8A이며, 주조후 500℃에서 4시간, 70℃에서 담금질, 시효경화 4시간의 열처리가 행해졌다.

3.1 조직

주조, 일반단조, 분말단조 공법으로 성형된 피스톤의 헤드부와 보스부, 스킨부의 조직사진이 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4(a)와 같이 주조 피스톤에서는 전 부위에 걸쳐 수직상의 덴드라이트 조직을 형성하고 있으며, 일반단조와 분말단조 피스톤에 비해 조직이 치밀하지 못하다. Fig. 4(b)의 일반단조 피스톤 조직에서는 헤드부의 조직이 편치에 의해 압착되어진 상태를 보이며 상대적으로 작은 소성변형을 받은 보스부와 스킨부는 거의 균일한 조직형태를 보이고 있다. Fig. 4(c)의 분말단조 피스톤 조직에서는 소결 후 예비성형체에 남아있던 기공이 단조 공정을 통하여 모두 소멸하고 공용화합물에 의한 공정조직과 석출강화에 의한 매우 조밀하고 미세한 조직을 관찰할 수 있다.

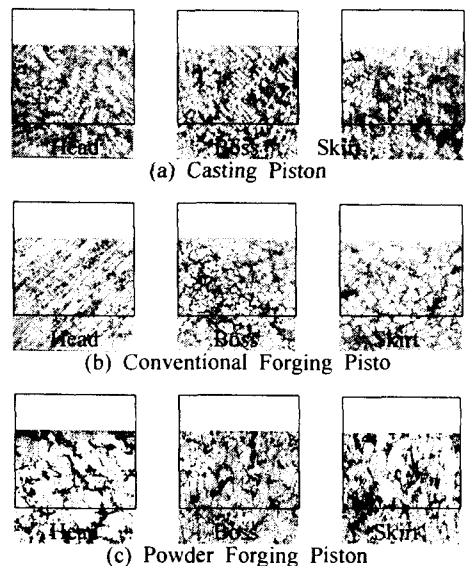


Fig. 4 Microstructures of Casting, Conventional Forging, and Powder Forging Pistons

3.2 경도

피스톤에서 경도는 내충격성과 내마모성에 직접적인 영향을 주는 중요한 인자이다. Fig. 5에 피스톤 헤드부에서의 경도가 표시되어 있다. 분말단조 피스톤과 일반단조 피스톤에서 경도의 증가를 보이며, 분말단조 피스톤이 일반단조 피스톤에 비해 다소 높음을 알 수 있다.

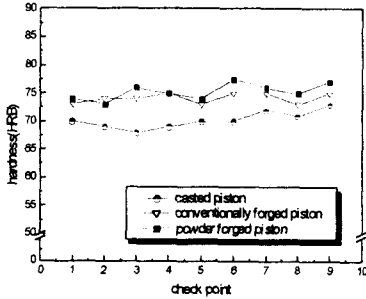


Fig. 5 Hardness on Head Region of pistons

3.3 인장강도 및 연신율

각 성형법으로부터의 피스톤들에 대하여 인장강도 및 연신율을 평가한 결과가 Table 4에 나타나 있다. 시험은 기계식 MTS(Material Test System)에서 수행되었다. 분말단조 피스톤의 인장강도는 다른 성형법에 비하여 매우 높은 값을 나타내고 있으며 일반단조 공법에 의해서도 주조피스톤보다 높은 인장강도를 얻을 수 있었다. 연신율은 분말단조 피스톤과 일반단조 피스톤이 주조 피스톤보다 각각 3.3배, 5.6배 높은 값을 보이고 있다. 이로부터 분말단조와 일반단조로 성형된 피스톤이 충격에 의한 파괴에 더 강하다는 것을 알 수 있다.

Table 4 Comparison on Mechanical Properties of Pistons

Mechanical Properties	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)
Casting Piston	232	2.4
Conventional Forging Piston	299	13.4
Powder Forging Piston	500	8.0

4. 결론

본 연구에서는 일반단조법과 분말단조법을 이용하여 피스톤을 성형하였고, 이들과 이미 상용화되어 산업체에서 생산되고 있는 주조피스톤을 가지고 조직, 경도, 인장강도, 연신율 등을 대상으로 비교, 분석하여 각 성형법이 가지는 특성과 제품의 기계적

성질에 미치는 영향등을 조사하였다. 피스톤 형상의 원활한 성형을 위해 일반단조법에서는 백색과 흑색으로 적층된 플라스틱으로 유동가시화를 행하였고, 분말단조법에서는 소결재의 성형성, 단조 전후의 밀도변화, 변형률 경로 등을 얻기 위한 실험들을 행하였다.

일반단조법의 경우 단조공정을 거침으로써 주조법에 비해서 더 치밀한 조직을 얻을 수 있었는데 특히 헤드부에서의 심하게 압착된 조직형태를 주목할 만하다. 분말단조법의 경우는 소결시에 미리 형성된 미세한 입계가 단조공정을 통하여 더욱 압착되고 조밀화되었으며 이러한 조직형태는 제품내에 균일하게 분포되었다. 분말단조법을 통해서도 제품의 충분한 기계적 성질 확보가 가능하므로, 조직의 균일한 분포 측면에서 분말단조법이 유리하다고 볼 수 있다.

헤드부의 경도를 측정한 결과, 주조법에 비하여 분말단조법이나 일반단조법이 경도의 상승을 가져옴을 확인하였으며 이는 단조공정에서의 편치의 가압에 의한 직접적인 효과이다.

인장강도와 연신율에서도 분말단조법과 일반단조법이 주조법에 비하여 매우 유리하며, 인장강도는 분말단조법이, 연신율은 일반단조법이 가장 유리한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 小松二郎, "알루미늄合金의金型鑄造," 輕金屬, 第35卷, 第7號, pp. 428-435, 1985.
2. Yue, T. M., Chadwick, G. A., "Squeeze casting of light alloys and their composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 58, pp.302-307, 1996.
3. 김영호, 배원병, 김형식, 변홍석, "자동차용 피스톤의 제조기술에 관한 실험적 연구," 한국정밀공학회지, 제15권, 제11호, pp.83-92, 1998.
4. 강대용, 박종욱, 김길준, 김영호, 조진래, 이종현, "분말단조법에 의한 알루미늄 합금 피스톤 개발," 한국정밀공학회지, 제17권, 제8호, pp.87-93, 2000.
5. 한홍남, 오규환, 이동녕, "다공성 소결금속의 단조한계해석," 단조기술의 진보, 제2회 단조심포지움, pp.64-71, 1995.
6. Kuhn, H. A., Ferguson, B. L., "Powder Forging," *Metal Powder Industries Federation*, pp92-99, 1990.
7. 김문일, 이동희 "粉末冶金·燒結機構," 청문각, pp.229-239, 1998.