

분말단조법에 의한 알루미늄 합금 피스톤 개발

강대용*, 박종옥*, 김길준*, 김영호**, 조진래**, 이종헌***

The Development of Aluminium Alloy Piston by Powder Forging Method

Dae-Yong Kang*, Jong-Ok Park*, Kil-Jun Kim*, Young-Ho Kim**, Jin-Rae Cho**, Jong-Heon Lee***

ABSTRACT

Powder Forging technology is being developed rapidly because of its economic merits and the possibility of lightening parts by replacing steel parts with aluminium ones, especially in automotive parts manufacturing. Recently, Powder Forging process is widely used for manufacturing primary mechanical parts as a combined technology of P/M and precision hot forging. This paper describes the process conditions for the powder forging of Aluminium alloy piston. For example, powder alloy design, preform design by FEM simulation, cold compaction of specimens and preform, sintering of preform, powder forging process. The characteristics of sintered products and final forged piston ones are investigated with tensile strength, hardness, ductility, and so on. Eventually, its results prove the improved mechanical properties of the piston produced by powder forging technology.

Key Words : Powder Forging(분말단조), Sintering(소결), Compacting(냉간성형), Preform Design(예비성형체 설계), Aluminium Alloy Piston(알루미늄 합금 피스톤)

1. 서론

분말야금법으로 제조된 제품은 10~20%정도 내부기공을 함유하고 있어 일반적인 기계가공품에 비해 연성, 피로강도, 충격강도가 떨어지는 취약점을 가지고 있다.^[1] 따라서 제품의 치수 및 적용면에서 많은 제한이 따른다. 이런 단점을 극복하기 위한 방안으로서 분말단조법은 소결에 의해 제조된 예비성형체를 곧바로 정밀 열간단조함으로써 성형체 전역에 진밀화를 꾀할 수 있어 기계적강도 및 특성의 한계를 극복할 수 있다. 또한 분말소결품의 장점인 합금조성 및 특성의 균일화와 정밀 제어단조에 의해 플래시부위를 최소화 함으로써 공정단축

의 잇점과 단조시 정밀온도제어에 의해 결정립의 미세화를 동시에 살릴 수 있어 종래 분말야금법의 적용상의 한계를 더욱 확장시킬 수 있는 방법이다.

기존의 열간단조에 비해 거의 정형으로 단조함으로써 재료이용률의 증대 및 후가공 절차를 대폭 감소시킬 수 있어 결과적으로 생산단가를 줄일 수 있으며, 자동차 핵심부품들의 경량화의 실현 가능성을 더욱 넓힐 수 있는 공법중의 하나이다.

국외의 연구활동으로서는 대체적으로 선진국을 중심으로 이론적 기초연구 및 분말단조부품의 성형 기술의 연구가 활발히 전개되어 오고 있다.

Iwata^[2]에 의해 압출성형된 알루미늄 분말단조 피스톤 개발 및 합금개발의 연구가 진행되었으며

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 경남정보대학 기계시스템학부

Danninger^[1]에 의해 알루미늄합금 캠축의 벨트풀리의 소결특성 및 과정과 여러 복합재가 재료의 내마모성에 미치는 영향이 조사되었다. Crawford^[4]는 슬래브법을 이용하여 분말재료의 압력전달에 관한 연구를 수행하였으며 Sutradhar^[5]는 소결된 알루미늄 예비성형체의 냉간 밀폐단조과정에 대해 슬래브법을 적용함과 동시에 실험적 연구를 동시에 수행하였다.

국내에서는 철계 분말을 이용한 자동차 부품의 분말단조 적용기술^[11] 및 유한요소해석에 의한 예비성형체 설계기술^[6]에 관한 연구가 이루어 졌으며 소결분말금속의 변형시 밀도분포 예측을 통한 소성 변형 거동의 유한요소해석^[7], 다공성 소결금속의 난조한계해석^[8], 소결분말금속의 항복합수 및 이분적 연구^[9]가 이루어진 바 있으나, 알루미늄합금 분말의 소결 및 분말단조 성형기술과 이론적 해석에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구의 목적은 고강도 알루미늄합금 분말단조 피스톤의 개발 및 공구구축을 목적으로 기초적 실험 및 소결에 의한 합금조성비의 결정, 유한요소해석 시뮬레이션(Simulation)에 의한 예비성형체 설계, 단조실험에 의한 제품의 성형 및 특성평가 등을 행하는 것이다.

2. 합금조성비의 결정

분말로 성형된 예비성형체는 분포된 기공의 함유로 인하여 일반적으로 압출된 열간단조재에 비해 성형중 크랙(crack) 및 파단(fracture)이 문제시 된다. 따라서 합금조성비의 결정에 있어 기계적 강도 및 특성뿐만 아니라 단조성을 충분히 확보해야 한다.^[6]

2.1 분말의 혼합(Mixing) 및 압분체 성형(Compaction)

실험에 사용된 분말은 독일 ECKART 사의 것으로 평균 크기는 200mesh(입경 150 μm 이하) 이다. 분말은 V-type 혼합기에서 혼합되어, 유압식 200t 프레스에서 Compacting 되었다. 일반적인 알루미늄의 Compacting은 2~4ton/cm²의 범위에서 이루어지지만^[10] 본 실험에서는 성형압을 2ton/cm²으로 일정하게 두었다. 일반적으로 원통형시편 및 예비성형체의 상·하 밀도분포의 균일화를 위해, 복동식 금형압축장치를 사용하나 본 논문에서는 단동식 프레스

에서 복동식의 효과를 낼 수 있도록 Fig. 1와 같은 부유다이(Floating Die)를 설계, 제작하였다.

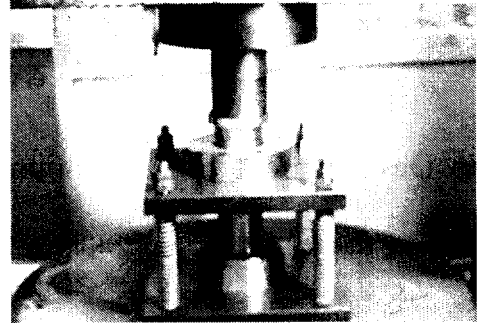


Fig. 1 Floating die for compaction

2.2 소결(Sintering)

적절한 엔진용 피스톤 단조재 개발을 위한 알루미늄합금의 조성비를 결정하기 위하여 소결실험을 행하였다. 실리콘(Si)을 제외한 나머지 성분의 조성비는 고정하였으며 합금성분은 상온강도보다는 피스톤의 사용환경에 맞게 고온강도를 고려하여 Mn, Ni 성분을 첨가하였다. 경도 및 내마모성의 증대를 위해 실리콘을 1~2%(mass) 첨가하였으며, 소결성 및 상온강도 확보를 위해 Cu를 4.5% 첨가하였다.

합금성분에 따른 소결조건을 구축하기 위해 실리콘 함량, 온도, 시간의 세 조건을 변수로 하였다. 실리콘의 함량은 공정조성을 고려하여 증량비로 1, 1.5, 2%의 세가지로, 온도는 첨가성분간의 공정온도를 기준하여 560, 580, 600℃의 세 구간을 두었으며, 시간은 생산성을 고려하여 20, 25, 30분으로 두어, 총 9회의 27가지 변수에 대해서 이루어 졌다.

소결과정 중 압분체(Green Compact)는 400℃에서 왁스 제거(Dewaxing)를 위해 30분간 유지된 후, 곧바로 소결온도까지 상승시켜 20~30분간 소결되었으며, 그 뒤 재료를 150℃로 냉각 후 40℃까지 공랭하였다. 분위기 가스로는 질소(N₂)를 사용하였다.

소결된 재료는 합금성분에 따른 강도 및 특성을 관찰하기 위해 T6 열처리되었다. 열처리된 재료는 인장강도, 연신율, 경도와 미세조직을 관찰함으로써 각각의 변수에 따른 기계적 성질 및 특성의 변화가 조사되었다.

2.3 실험결과

84 ϕ × 20mm의 원통형으로 냉간 압축성형된 후 여러 조건에 따라 소결된 재료는 곧 각각의 소결변수 및 첨가성분에 따라 기계적 특성 및 강도 평가 작업을 거쳤으며, 각각의 실험은 4개의 시편으로 그 오차범위가 5%를 넘지 않는 평균값을 취하였다. 각각의 변수의 평가는 생산성과 직결되는 소결시간과 피스톤의 특성상 인장강도에 그 우선순위를 두었다.

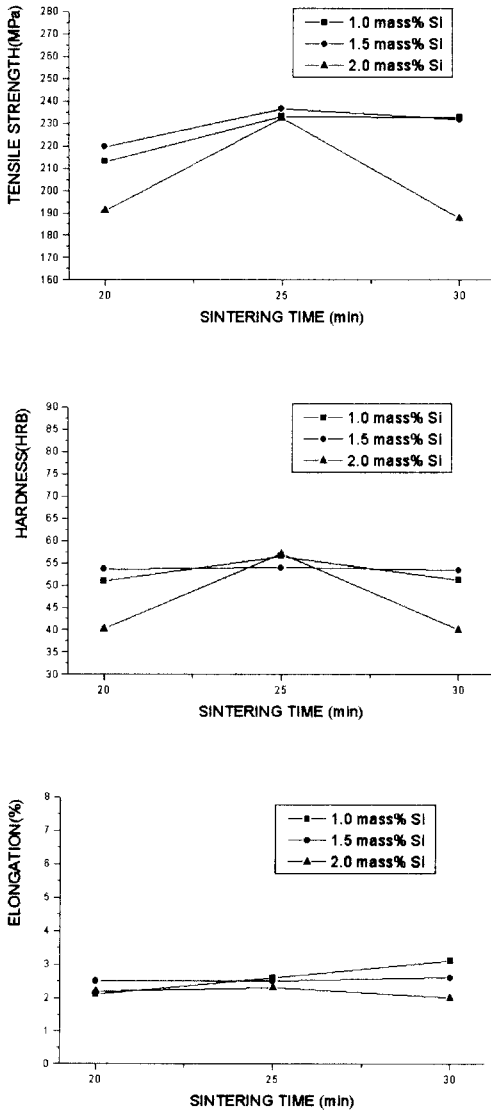


Fig 2a. Mechanical strength & characteristics of sintered specimens (sintering temp.: 560OC)

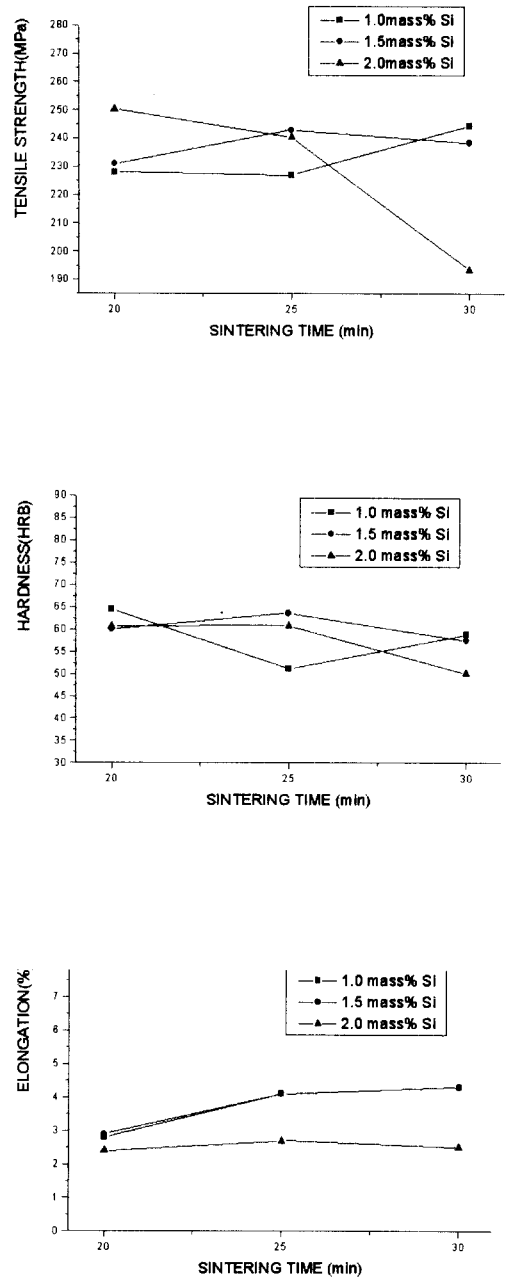


Fig. 2b Mechanical strength & characteristics of sintered specimens (sintering temp.: 580°C)

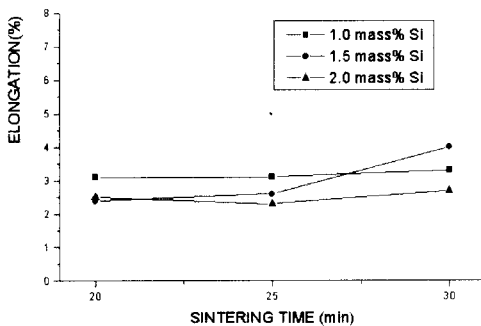
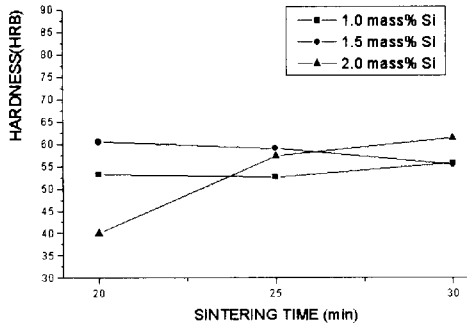
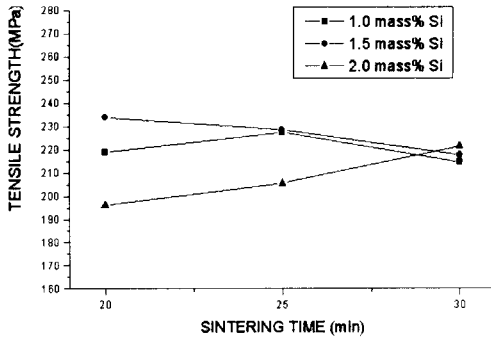


Fig 2c. Mechanical strength & characteristics of sintered specimens (sintering temp.: 600OC)

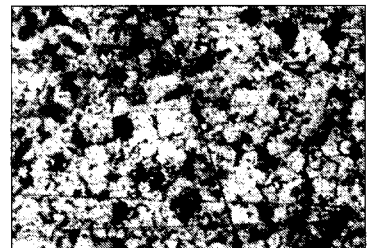
각각의 소결변수에 따른 인장강도, 경도, 연신율의 변화들이 Fig. 2에 나타나 있는데, 전체적인 절대값을 비교하여 볼 때 소결온도 580℃에서 가장 큰 값을 보이고 있다. 또한 인장강도 및 연신율은 소결시간이 증가함에 따라 증가하며, 동시에 경도는 다소 감소하는 경향을 보이고 있다.

이상의 강도 및 특성평가를 통해 최종적으로 결정된 엔진 피스톤용 분말단조재의 합금조성비가 Table 1에 나타나 있다.

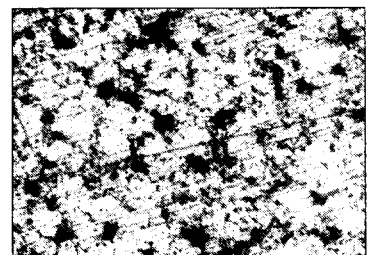
Table 1 The composition finally determined

Compo s-ition	Al	Cu	Si	Ni	Mn	Mg	micro -wax
mass%	89.8	4.5	1.5	2.0	0.5	0.5	1.2

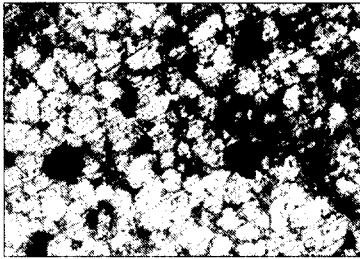
Fig. 3은 소결시간 25분에서의 각각의 소결 온도에 따른 재료 표면 50배 확대한 사진이다. 소결온도와 소결시간이 증가할수록 공융화합물의 작용이 더욱 활성화되어 두터운 공정조직을 나타나고 있으며, 표면에 미세하게 분포한 석출물과 기공을 관찰할 수 있다. 알루미늄분말은 제조상 표면에 안정된 산화층인 알루미늄(Al_2O_3)층을 형성하게 되어 소결후에도 알루미늄이 조직상 분산강화제로서 분포하게 되며 제품의 내마모성 향상에 다소 기여할 수 있게 된다.



(a) 560℃



(b) 580℃



(c) 600℃

Fig. 3 Micro-structure according to sintering temperature(Si 1.5%, sintering time 25min)

전체적인 실험결과들을 종합하여, 적정 소결조건은 Si 1.5%, 소결온도 580℃, 소결시간 25분으로 결정되었다.

3. FEM 시뮬레이션을 이용한 예비성형체 설계

소성가공 문제의 해석에 널리 사용되는 상용 해석 툴의 하나인 DEFORM을 이용하여 유한요소해석을 행하였다. 예비성형체의 상대밀도와 마찰계수를 구하기 위하여 함침법을 이용한 아르키메데스 원리에 의한 상대밀도 측정실험(KS규격 D0033) 및 링압축 시험을 행하였다. 시험결과 예비성형체의 상대밀도와 마찰계수로 각각 0.92과 0.28을 얻어 이들을 시뮬레이션에 적용하였다.

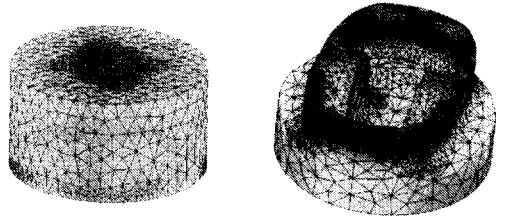
또한, 450℃에서의 소재의 유동응력은 변형률 속도(strain-rate)의 함수로 가정하였으며 시뮬레이션에 사용된 유동응력식은 열간 MTS(Material Test System)에 의한 실험으로 결정하였다. 실험에 의해 결정된 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 36.5 \bar{\epsilon}^{0.115}$$

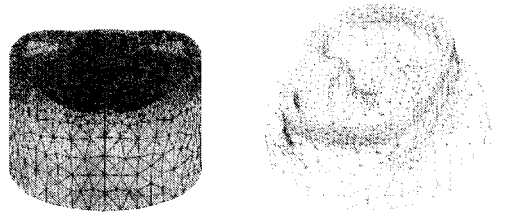
Fig. 4에 유한요소해석의 결과로서 예비성형체 형상 및 성형과정이 나타나 있다. Fig. 4(a)에서 보여지듯이 원통형의 시편으로써는 스킵트(skirt) 끝단에서의 다이 채움이 불완전하였으며 진밀화 또한 어려움을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 4(b)에서와 같이 스킵트 끝단의 살두께의 적정량을 예비성형체에 미리 부여함으로써 완전한 다이 채움 및 진밀화를

이룰 수 있었으며 부여된 살두께는 인장변형률을 0.9에서 0.45의 값으로 절반으로 감소시킨다.

또한 예비성형체의 기하학에서 보스(boss) 끝단과 스킵트 끝단의 연결부위의 굴곡이 심하면 상승 속도의 차이에 의해 최종 밀폐 가압시 접힘(Folding)이 발생할 우려가 있으므로 기하학의 연속성을 고려하여 예비성형체의 설계가 이루어졌다.



(a) Cylindrical preform and the result of simulation



(b) Modified preform and the result of simulation
Fig. 4 Designed preform and the result of simulation

4. 단조실험

4.1 실험방법

예비성형체의 단조실험은 200mm/sec이상의 다이속도를 가지는 유압식 200t 고속프레스에서 수행되었으며, 다이온도와 소재온도를 변수로 다이온도는 250℃, 300℃의 두 가지, 소재온도는 420℃, 450℃, 480℃의 세 가지로 취하였다. 예비실험을 수행한 결과 다이온도 250℃이하와 소재온도 420℃이하에서는 유동응력의 감소로 인한 크랙 등 결함이 발생하여 단조변수에서 제외하였다.

단조품의 강도 및 특성평가와 최종 제품전역의 진밀화를 판단하기 위한 상대밀도 측정실험 또한 부위에 따라 수행되었다. 인장 및 경도시험에 사용된 재료는 모두 T6 열처리되었으며, 인장시편형상은 KS규격 14(A) 시편규격에 따랐다.

단조실험에 사용된 금형의 구조가 Fig. 5에 보여지고 있다.

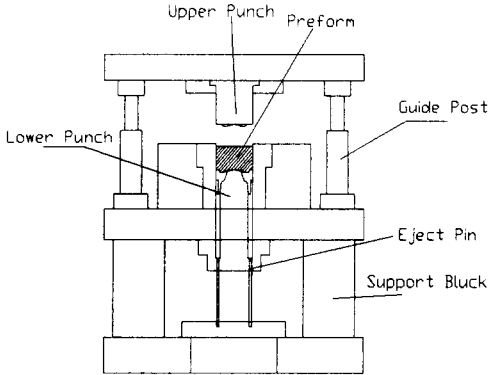


Fig. 5 Schematic diagram of powder forging die

실험에 사용한 3가지 종류의 예비성형체는 Fig. 6(a), (b), (c)와 같다.

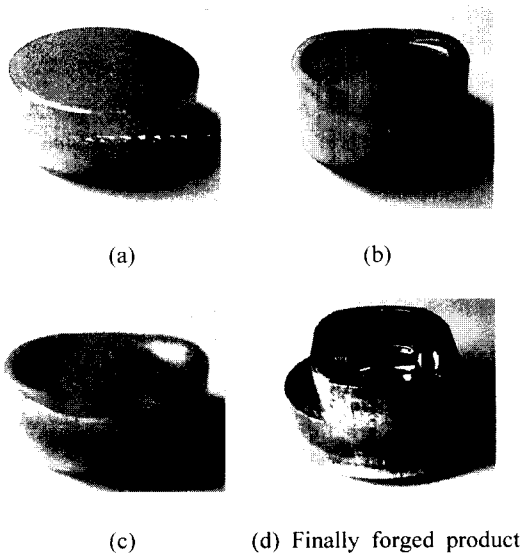


Fig. 6 Preforms and forged piston

Fig. 6(a) 예비성형체는 외형상 스커트 끝단의 성형에 큰 문제는 없었으며, Fig. 6(b) 예비성형체의 경우는 단조 성형 후 스커트 끝단에 크랙이 발생하였다. 이는 진밀화를 위해 미리 높여진 부위에서

냉간압축성형에서 취출시 탄성회복에 의한 미세한 크랙이 내부에 잔존하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 최종 단조를 위해 가급적 급격한 기하학적 변화를 줄이는 방향으로 Fig. 6(c)와 같이 예비성형체의 형상을 수정하였다. Fig. 6(c) 예비성형체를 사용한 결과 (d)와 같이 완전한 피스톤 제품을 성형할 수 있었다.

4.2 단조품의 특성평가

각각의 실험변수에 대한 최종 상대밀도값은 피스톤의 헤드부와 보스부에서는 Fig. 6(a) 예비성형체와 (c) 예비성형체에서 동일하게 0.99의 값을 나타내었으나, 스커트부에서는 (a) 예비성형체가 0.97로 진밀화에 다소 취약함을 보였으며 (c) 예비성형체에서는 0.99의 값으로 진밀화가 양호하게 이루어졌음을 알 수 있었다.

Table 2에 다이온도 및 예비성형체의 온도에 따라 평가된 인장강도값 및 경도값이 나타나 있다. 인장강도와 경도값은 다이온도가 낮을수록, 예비성형체의 온도가 낮을수록 높은 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 2 The mechanical properties and strength of powder forged piston according to forging condition

Die temp. (°C)	Preform temp.(°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation(%)	HRB (avg.)
250	420	630	8.0	77.5
	450	580	7.2	75.8
	480	600	7.0	74.2
300	420	560	6.4	75.8
	450	530	5.5	71.2
	480	530	5.9	68.0

실험결과로부터 최적의 단조조건은 다이온도 250°C, 예비성형체 온도 420°C임을 알 수 있다.

Table 3은 본 연구에서 개발한 분말단조 피스톤의 인장강도 및 경도를 본 연구진이 앞서 개발한 바 있는 단조 피스톤^[11] 및 일반 주조 피스톤과 비교한 것이다. 본 연구에서 개발한 분말단조 피스톤의 인장강도는 주조 피스톤의 약 2.7배, 단조 피스

톤의 약 2.1배가 되고, 경도는 주조 피스톤보다는 다소 높고 단조 피스톤과는 대등함을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of pistons on mechanical properties

	Tensile strength (MPa)	Hardness (HRB)
Casted Piston	232	69~73
Forged Piston	299	70~80
Powder Forged Piston	630	77.5

5. 결론

본 연구에서는 기초적 실험 및 소결에 의한 합금조성비 결정, 유한요소해석에 의한 예비성형체 설계, 소결체의 변형거동 해석, 단조실험에 의한 제품의 성형 및 특성평가 등을 행하여 고강도 엔진용 알루미늄 합금 피스톤을 개발하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 실험을 통하여 기계적 강도 및 특성 면에서 알루미늄 분말단조 피스톤에 적합한 합금조성비를 제시하였다.

2. 유한요소해석을 통하여 피스톤의 전역에서 진화 및 다이채움, 결합배제 등을 고려한 예비성형체 형상을 제시하였다.

3. 실험적·해석적으로 구축된 공정조건에 의해 분말단조법을 이용한 고강도 엔진용 알루미늄 합금 피스톤을 개발하였다.

4. 공정변수들의 최적조건을 제시함으로써 분말단조법에 대한 전반적인 공정을 구축하였다.

후기

본 연구는 한국학술진흥재단 기계공학연구사업(과제번호:1998-018-E00127) 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, J. H., Lee, Y. S., Chung, H. S., "Development of Bevel Gear by Powder Forging Process," Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol. 4, No. 4, pp. 258-267, 1997.
2. Y. Iwata, S. Mae, Y. Urai, T. Tsunoda, "Aluminium Alloy having an Excellent Forgibility," United States Patent[19], P. N. 4889557, Dec. 26, 1989.
3. H. Danninger, "Sintered Aluminium camshaft belt pulleys," M. P. R. June, pp. 46-52, 1993.
4. R. J. Crawford, D. Paul, "Pressures transmitted through Polymetric powders subjected to solid phase compaction," Polymer, Vol. 21, pp. 138-139, 1980.2.
5. G. Sutradhar, A. A. Bashashwan, A. K. Jha, S. Kumar, "Closed die axisymmetric forging of sintered aluminium preforms, J. Materials Processing Technology," Vol. 68, pp. 19-22, 1997.
6. Park, J. J., Lee, J. H., Chung, H. S., "Preform Design for Forging of a P/M Connecting Rod," Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol. 2, No. 1, pp. 19-28, 1995.
7. Kim, H. S., Han, H. N., Oh, K. H., "Thermo-Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Powder Hot Forging," J. of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol. 4, No. 2, pp. 83-89, 1997.
8. 한홍남, 오규환, 이동녕, "다공성 소결금속의 단조한계해석," 단조기술의 진보, 이동녕·박종진 편, 한국소성가공학회, pp. 64-71, 1995.
9. Oh, H. K., Lee, J. K., "A Study of the Extrusion of Sintered Porous Metal," J. of Mechanical Working Technology, Vol. 11, pp. 53-69, 1985.
10. "燒結機械部品-その設計と製造," 日本 粉末冶金工業會, 1987.
11. 김영호, 배원병, 김형식, 변홍석, "자동차용 피스톤의 제조기술에 관한 실험적 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 11, pp. 13-22, 1998.