

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

알루미늄 단조 피스톤의 개발에 관한 연구

김영호*, 배원병*, 김재철**, 김형식**

A Study on the Development of Aluminum Piston by Forging Process

Young-Ho Kim*, Won-Byong Bae*, Jae-Cheol Kim**, Hyeong-Sik Kim**

ABSTRACT

In this study, the development of an aluminum forged piston was tried to substitute the cast piston, in which there were internal defects such as blow hole and shrink pipe. A gasoline engine piston was chosen as an example for developing the forged piston.

Before aluminum forging, model material(plasticine) test was carried out to investigate the forgeability and internal flow pattern of the forged piston at room temperature. From the result of model material test, an aluminum piston to be forged was redesigned. The aluminum piston was forged in hot process. The quality of a forged piston was compared with that of a cast piston in the point of mechanical properties, internal defect and microstructure. It was proved that the forged piston was superior to the cast piston.

Key Words : Engine Piston(엔진 피스톤), Forging(단조), Model Material(모델 재료), Internal Defect(내부 결함), Microstructure(조직)

1. 서론

내연기관에 있어서 피스톤역할은 연소실의 폭발압력을 컨넥팅로드를 통해 크랭크축에 전달하는 것이다. 실린더와 적당한 간격을 유지하면서 고온, 고압, 고속의 조건으로 작동하기 때문에 충분한 강도, 경도 및 내마모성이 요구되고 있고 열팽창의 정도가 작아야 되는 부품이다 (Fig.1). 내연기관의 대표적인 사례인 자동차의 엔진 피스톤에는 알루미늄 합금이 많이 사용되는데 그 이유는 알루미늄합금은 경량이면서도 피스톤의 요구사항에 맞는 강도와 경도, 내마모성을 제공할 수 있고 열전도성도 우

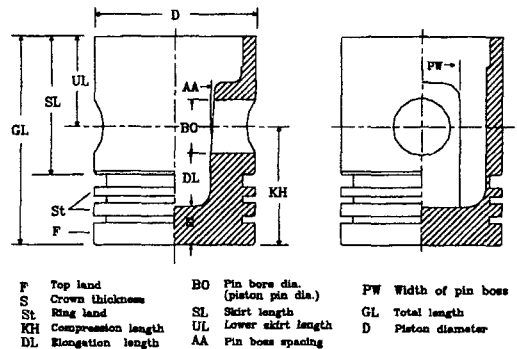


Fig.1 Configuration of an Engine Piston

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터
** 부산대학교 대학원

수해 열팽창에 강한 특징을 지니고 있기 때문이다.

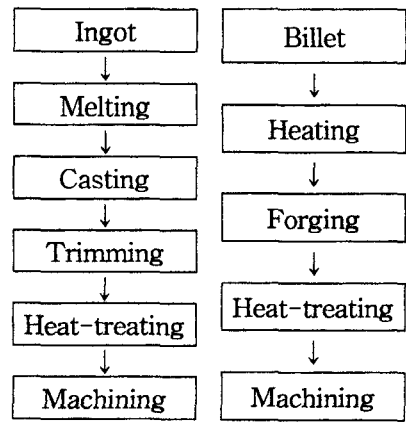
내연기관의 발달과 더불어 지금까지 피스톤과 실린더에 대한 많은 연구가 수행되었다. 우선, 설계의 기본이 되는 피스톤 내의 응력과 열팽창 해석에 관한 연구들⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾이 보고되어 있고, 트라이볼로지적인 관점에서 피스톤과 실린더 계면에서 발생하는 마찰⁽⁶⁾, 간극을 통하여 발생하는 블로-바이 현상(blow-by phenomenon)⁽⁷⁾에 관한 연구가 보고되었다. 또한, 전통적으로 엔진용 피스톤은 철 혹은 알루미늄 합금을 재료로 사용하는데 이를 세라믹 재료로 대체하려는 연구^{(4),(8),(9)}도 진행되고 있다. 그러나 상기의 연구들과는 대조적으로 피스톤의 생산 방식에 관한 연구는 미흡한 형편이다.

피스톤은 금형에 의한 중력주조⁽¹⁰⁾, 스퀴즈 캐스팅(squeeze casting)⁽¹¹⁾, 단조⁽¹²⁾를 통한 기계가공으로 생산되고 최근 분말야금법⁽⁹⁾에 의한 생산 가능성도 대두되고 있다. 국내의 자동차 및 이륜차에 사용되는 엔진 피스톤은 전량 금형에 의한 중력주조로 생산되고 있다. Fig.2 (a)에 표시된 것과 같이 잉곳(ingot)형태의 원소재를 용해하여 주형에 붓고 응고시킨후 열처리, 가공을 통하여 제품이 완성된다. 중력 주조는 비교적 형상이 복잡한 피스톤의 생산에 적합한 방법이지만 다음과 같은 문제점으로 현장에서는 어려움을 안고 있다. 첫째, 주조된 제품은 내부에 기공을 포함하고 있다. 이것은 절삭 가공후 표면에 노출되어 불량품이 되거나 완성된 피스톤 내부에 남은 경우 작동중 크랙의 원인이 되고 있어서 피스톤의 수명을 단축시킨다(Fig.3). 둘째, 피스톤은 대량생산되는 부품이기 때문에 생산성의 확보는 중요한 고려사항이다. 잉곳을 용해하여 주형에 붓고 응고시키는 시간이 길기 때문에 한벌의 주형에서 두 개의 제품을 주조하고 이러한 주형을 5~6 벌 동시에 사용하여 같은 제품을 주조하는데 이는 금형비용의 증가를 유발하며 또한 각 금형간의 미소한 치수차이, 혹은 응고수축에 의한 치수차이등의 원인으로 제품은 치수가 다르게 되고 대단히 정밀한 치수를 요구하는 기계가공라인으로 투입되기 전에 분류작업을 거치게 된다.

이러한 문제들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 알루미늄 열간 단조를 통하여 피스톤을 제작하려고 하는데 실제 피스톤 생산에 단조를 적용하는 사례는 독일 등에서 찾아볼 수 있지만 국내는 아직 없다. 이것은 주조 피스톤을 주로 사용하고 있는 미국이나 일본의 기술의 도입후 엔진 및 피스톤에 대한 연구 개발이 부족한 결과라고 사료된다. 단조를 적용할 경우 주조공정에서 발생하는 문제

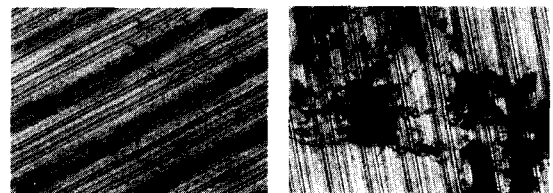
를 해결할 수 있고 단조공법의 특성에 따라 우수한 품질의 피스톤생산이 기대된다.

본 연구에서는 피스톤의 생산에 단조를 적용함으로써 중력주조에서 발생하는 내부기포에 의한 불량을 극복하고 기계적 성질이 우수한 피스톤을 생산하는 방안을 제시하였다. 복잡한 형상인 피스톤 성형의 이론적인 해석에는 아직 한계가 있기 때문에 실험적인 측면에서 단조피스톤의 개발에 대한 연구를 수행한다. 먼저, 모델재료인 플라스틱신을 사용하여 피스톤 성형실험을 한다. 강도와 경도, 연신율, 단조성이 우수한 알루미늄 합금 소재를 선정하고 열간 단조를 통해 피스톤형상을 성형하며 열처리와 기계가공을 통해 최종적인 시제품을 제작한다. 단조된 시제품과 기존의 주조품의 기계적 성질, 금속조직, 내부 결함 상태를 비교 검토하고자 한다.



(a) Casting Process (b) Forging Process

Fig. 2 Casting and Forging Processes of Piston Production



(a) Normal Machined Surface (b) Defective Machined Surface

Fig. 3 Defects on the Machined Surface of Cast Pistons

2. 단조실험

개발의 대상은 1800cc급 승용차용엔진(현대자동차

(주) β -engine)에서 사용되는 피스톤인데, 현재 금형에 의한 중력주조후 열처리와 절삭가공을 통하여 대량생산되고 있다.

본 연구에서는 실제 알루미늄 열간단조를 수행하기전 피스톤형상의 성형성과 내부유동을 파악하기 위하여 모델재료인 플라스틱(영국 Harbutt사)을 사용하여 예비 실험을 수행한다. 그 다음 알루미늄 재료로 열간에서 피스톤 형상을 단조한뒤 열처리를 통하여 기계적 성질의 향상과 치수의 안정화를 부여하고 최종적으로 절삭가공한다.

2.1 모델 재료 성형 실험

백색과 흑색의 플라스틱을 잘 반죽하여 압연공정에서 얻은 디스크형 소재를 적층하여 내부유동을 가시화하였다. 윤활제로는 시제품과 금형의 분리가 용이한 탈크파우더(Talc powder)를 사용하였고 실험은 모델재료 성형용 프레스에서 균일한 램(ram) 속도(1mm/s)에서 수행하였다. 실험을 통해 성형 하중과 다이 캐비티(die cavity)의 충전여부, 단조된 제품의 내부유동 양상 등을 알고자 한다.

2.2 알루미늄 단조실험

(1) 소재의 선정

소재의 선정은 피스톤개발에서 대단히 중요한 문제이다. 고온·고압상태에서 고속으로 실린더벽과 마찰을 일으키며 운동하는 피스톤용의 합금은 강도, 경도, 연신율, 내마모성, 내충격성, 저열팽창 등이 요구된다. 또한 단조용 합금은 우수한 단조성이 확보되어야 한다. Table 1에 기존 주조용 합금의 성분과 개발에 사용된 단조용 합금이 표시되어 있다.

Table 1 Aluminum Alloys for Cast and Forged Pistons

	(Wt %)											
	Cu	Si	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Mg	Al
Forged	1.28	7.03	0.29	0.23	0.02	0.03	0.1	-	-	0.07	0.37	Rem.
Cast	0.8-	11.0-	below	below	below	0.8-	below	below	below	below	0.8-	Rem.
	1.3	13.0	0.03	0.4	0.03	1.5	0.2	0.03	0.03	0.03	1.3	

(2) 실험 장치 및 방법

피스톤 형상을 성형하기 위해 설계된 금형은 SKD 61 종류로 제작되었다. 성형은 후방압출과 플래시를 가진 밀폐형 단조가 혼합된 형태이다. 소재는 전기유도로에서

480℃로 가열되고 금형은 240℃에서 1시간동안 예열한다. 실험에 사용되어진 프레스는 600톤의 성형하중을 가진 유압식이다. 초기 소재를 1회의 스트로크에서 최종제품으로 성형하는데 핀보스가 완전히 후방압출되어 다이 캐비티를 채우는 순간부터 하중은 급격히 증가하여 피스톤헤드부의 최종두께까지 성형하는데는 약 500톤의 하중이 걸렸다. 윤활제는 수성 그래파이트(graphite)를 사용하였다. Fig.4는 금형의 개략도를 보이고 있다.

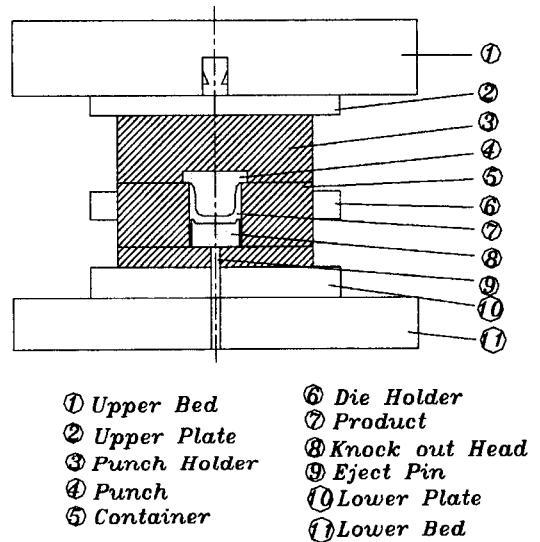


Fig. 4 Schematic Diagram of Press and Die

(3) 열처리

단조된 피스톤 제품은 단조공정에서 발생하는 내부잔류응력을 제거하고 기계적 성질의 향상을 위하여 3단계 열처리과정(T-6)을 거친다.

① 용체화처리

용체화처리의 주된 목적은 합금원소들의 고용화를 이루는 것이다. 제품은 470℃에서 4시간 유지되나 소재의 급격한 가열은 온도의 불균일한 상승을 초래해 비틀림 등을 수반하므로 소재가 장입될 때 노의 온도를 300℃이하로 유지해야 한다.

② 담금질

용체화처리후 제품은 합금원소의 최대한의 과포화를 이루기 위해 상온으로 급랭되는데 이를 위해서 순수한 물이 사용된다. 소재의 급격한 냉각은 치수의 불안정화, 잔류응력 및 크랙 등을 유발하기 때문에 소입시 물의 온도는 50℃이상으로 유지하는 것이 바람직하다. 소입처리까지

의 과정을 통해 재료는 기계적성질이 향상되고, 부식에 대한 저항이 증대된다.

③ 시효경화

시효경화처리는 마지막 단계의 열처리로 다시 인공시효경화와 자연시효경화로 나누어 진다. 먼저 소재를 170℃에서 2시간 유지시킴으로써 절삭성, 경도를 향상시키고 치수의 안정화를 꾀할 수있다. 인공시효경화가 끝난 제품은 최대의 강도를 얻기 위해 상온에서 공랭되는 자연시효처리를 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델재료의 상온 성형실험

Fig.5은 모델재료 플라스틱신을 이용한 단조실험으로 얻어진 하중곡선이다. 펀치 스트로크 16.5mm에서 하중의 상승폭이 뛰는 것은 재료가 펀치의 단이 진 부분에 도달하여 성형되는 시점이다. 스트로크 27mm 부근에서 하중은 거의 수직적으로 상승하게 되는데 이것은 핀보스를 성형하는 다이 캐비티가 다 차고 핀보스와 90° 방향에 있는 스커트의 끝 부분으로 재료가 유동되는 시점이며 이후 피스톤 헤드의 정해진 두께까지 펀치가 이동하며 플래시가 생성된다.

Fig.6은 플라스틱신 시제품의 절단면 유동을 보여주고 있다. (a)는 핀보스 부분과 스커터 부분의 수직 절단면이고 (b)는 피스톤 헤드 부터의 수평 절단면이다. 그림과 같이 재료가 겹쳐지는 경우도 있으나, 크랙(crack)이 없이 유동이 원활히 이루어져 원하는 형상의 제품이 성형되었다. 피스톤 헤드의 반경 중심 부근에서 재료는 심하게

압축되어 외곽으로 퍼지고 핀보스와 스커트를 성형하기 위해 헤드 상방으로 유동되는데, 핀보스 부분 보다는 스커트 부분의 재료가 더욱 심한 변형을 받으면서 유동한다. 특히, 피스톤의 내벽면에서 스커트와 핀보스가 만나는 지점은 초기에 적층된 상위 두 층의 흑색과 백색의 플라스틱신이 대단히 얇게 분포되어 있는 것을 관찰할 수 있는데 이러한 심한 변형이 과도하게 되면 제품의 크랙이나 공구 수명의 단축 등의 원인이 될 수 있다.

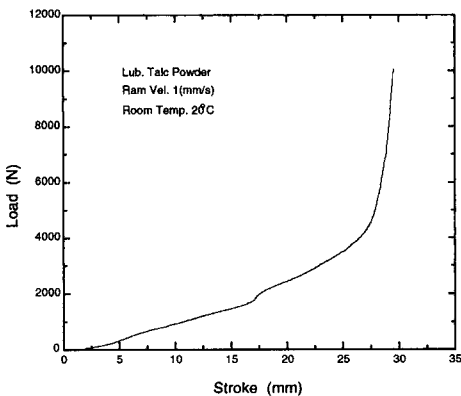


Fig. 5 Load-stroke Diagram of Piston Forging with Plasticine Billets

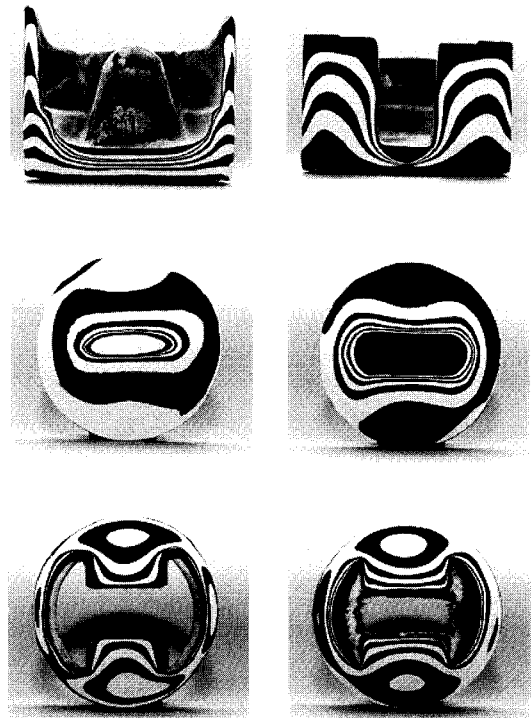


Fig. 6 Material Flow Patterns of Plasticine Forged Pistons

3.2 알루미늄 열간단조 실험

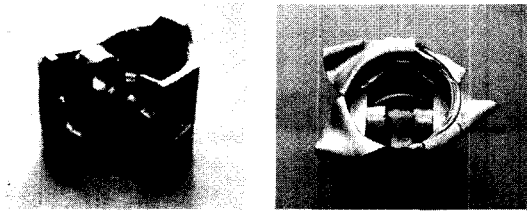
Fig.7은 기계가공 전후의 구조와 단조 피스톤을 보여주고 있다. 단조 피스톤에서 핀보스 양쪽 외곽에 있는 평평한 부분은 기계 가공되었다.

피스톤에서 경도는 내충격성과 내마모성에 직접적인 영향을 주는 중요한 사항이다.

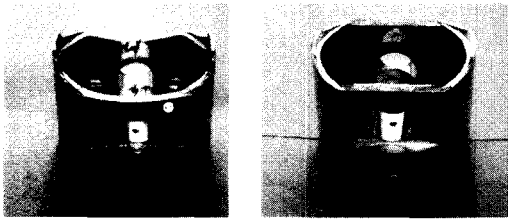
Table 2는 부위별로 측정된 단조 피스톤 헤드 부분의 경도이다. 열처리에 의하여 경도는 크게 향상되었고 이 값은 기존의 주조 양산품 보다 우수함을 알 수 있다.

Table 3에는 주조 양산품과 단조 시제품의 강도와 연신율을 보여주고 있는데 강도는 두 경우가 거의 비슷하지만 연신율에 있어서 단조품이 우수하다. 이러한 결과는 단조 피스톤이 충격에 의한 크랙에 강하다는 것을 말하고 있다.

• Before machining



• After machining



(a) Cast Product

(b) Forged Product

Fig. 7 Cast and Forged Pistons Before and After Machining

Table 2 Hardness of Cast and Forged Pistons

		(HRB)									
Forged	F	37.1	32.4	35.6	36.7	31.4	31.0	35.6	36.1	39.1	40.2
	T-6	68.1	68.9	67.2	68.5	68.7	69.7	68.3	69.3	67.0	69.1
Cast	T-6	avg. 52.0									

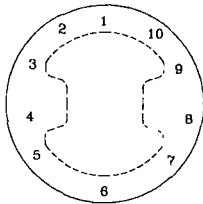
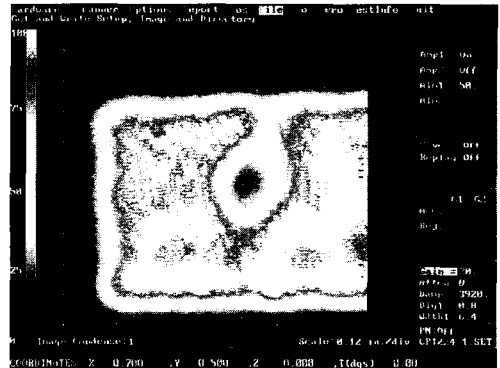


Table 3 Strength and Elongation of Cast and Forged Pistons

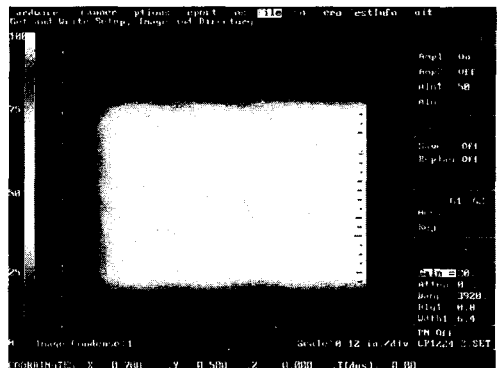
	Strength(MPa)	Elongation(%)
Forged	314	12
Cast	323	0.5

Fig.3의 (a)는 정상적인 피스톤의 가공면이고 (b)는 중력 주조 피스톤에서 발생하는 기포가 가공표면에 노출되는 경우이다. 이러한 불량은 제품의 양산에 있어서 대단히 나쁜 결과를 초래한다. Fig.8에서 단조 피스톤 헤드 부분의 초음파 검사 결과, 결함이 포함되지 않은 양호한 제품이 얻어짐을 알 수 있다.

Fig.9 (a)는 주조품의 부위별 조직이며 (b)는 단조품의 부위별 조직을 보여주고 있다. 먼저, 주조품의 조직을 관찰할 때, 세 부위의 결정형태는 거의 균일하게 수지상정(dendrite)을 형성하고 있다. 용탕이 응고할 때 순수 알루미늄의 수지상정이 먼저 응고하고 이후 수지상정 사이의 공간에 Al-Si 공정이 채워진다. 단조 피스톤의 조직에서는, 편치 선단부에 의하여 심하게 압착되는 ①부분의 결정이 길게 일그러져 있고 비교적 작은 소성변형을 받게 되는 ②, ③부분은 거의 균일한 조직 형태를 취하고 있다. 단조 피스톤의 조직에서도 사진 속의 흰색 영역은 순수



(a) Cast Piston with Internal Defects



(b) Forged Piston without Internal Defects

Fig. 8 Comparison of Internal Defects between Cast and Forged Pistons

알루미늄이 응고한 부분이며, 입계에 존재하는 회색 부분은 Si와 Si화합물들의 응고체이다. 조직의 관찰을 통하여 단조피스톤의 조직이 치밀하게 분포되어 있음을 알 수가 있다. 이는 연신율과 경도의 치수가 단조 피스톤에서 우수하게 나왔다는 사실을 뒷받침한다고 고찰된다.

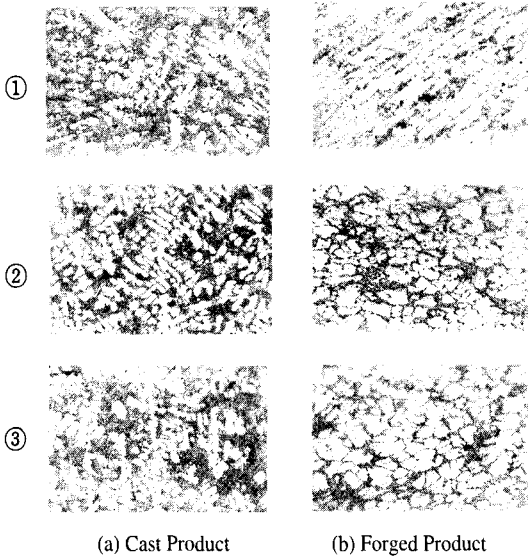
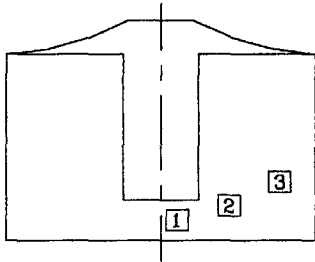


Fig. 9 Comparison of Microstructures between Cast and Forged Pistons

4. 결 론

중력 주조법에 의하여 양산되고 있는 자동차용 알루미늄 피스톤이 열간 단조에 의하여 제작되었다. 우선 모델 재료 플라스틱을 사용하여 피스톤 내부의 유동을 관찰하였고, 실제 재료를 사용하여 단조된 시제품을 기존 주조 피스톤과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 플라스틱 실험 결과 기존 주조 피스톤을 대체하기 위해 설계된 단조용 금형에서 단조를 수행하였을 때

재료는 원활한 내부 유동을 보이며 피스톤 형상이 성형되었다.

2. 중력 주조에서 발생하던 내부 결함은 단조를 적용하였을 때 제거되었다.
3. 개발된 피스톤의 강도는 기존 주조 피스톤과 거의 같은 수준이나 경도와 연신율에서는 개발된 단조 피스톤이 우수하였다.
4. 조직을 검사한 결과 단조 피스톤의 조직이 주조 피스톤의 조직에 비하여 치밀하게 분포되었다.

단조피스톤의 적용은 본 연구의 대상인 승용차용 엔진 뿐만 아니라 고출력을 요하는 디젤엔진, 극한 상황에서 작동하는 경주용 자동차 엔진, 주조시 탕구가 작기 때문에 불량률이 특히 높은 이륜차 엔진용 피스톤 등에 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

References

1. C. H. Li, "Thermoelastic Behaviour of Aluminum Diesel Engine Piston", SAE Paper 860163, pp.1883-1893, 1982.
2. W. Sander and S. Schoeckle, "Design and Fatigue Life Evaluation of Piston for High BMEP Diesel Engines", SAE Paper 790857 pp.115-129, 1979.
3. R. Munro, "Some Diesel Piston Features in Design Analysis and Experiment", SAE Paper 790858, pp.11-143, 1979.
4. W. Bryzik and R. Kamo, The Adiabatic Engine: Past, Present, Future Developments, Soc. of Auto. Eng., pp17-35, 1984.
5. Y. Enomoto, S. Furuhashi, and K. Minakami, "Heat Loss to Combustion Chamber Wall of 4-Stroke Gasoline Engine", Bulletin of JSME, Vol.28, No.238, pp.647-665, 1985.
6. M. Hoshi, "Reducing Friction Losses in Automobile Engines", Tribology Int. Vol.17, No.4, pp.185-189, 1984.
7. J. A. McGeehan, "A Survey of the Mechanical Design Factors Affecting Engine Oil Consumption", SAE paper 790864, 1979.
8. D. A. Parker, "Ceramic Technology-Applica-

- tion to Engine Components", Proc. Instr. Mech. Engrs., Vol.199, No.A3, pp135-150, 1985.
9. 김태우, "구조 세라믹의 개발과 응용", 대한기계학회지, 제 34권, 제 5호, pp327-333, 1994
 10. 小松二郎, "アルミニウム合金の金型鑄造", 經金屬, 35卷, 7, pp428-435, 1985.
 11. T. M. Yue, G. A. Chadwick, "Squeeze casting of light alloys and their composites", J. of Materials Processing Technology, Vol.58, pp.302-307, 1996.
 12. 山下 幸一, 横川 和明, "アルミニウムの鍛造", 經金屬, 39卷, 12, pp930-944, 1989.