

# 엔진피스톤의 기계적 성질의 향상에 관한 연구

## A Study on the Improvement of Mechanical Properties for an Engine Piston

김영호, 배원병(부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터), 김형식\*, 변홍석(부산대 대학원)

Young-Ho Kim, Won-Byong Bae (ERC/NSDM, Pusan National University)  
Hyeong-Sik Kim\*, Hong-Seok Byun (Graduate School, Pusan National University)

### ABSTRACT

In this experimental study, aluminum hot forging was conducted to get superior piston to cast piston. Cast structure of billet is destroyed, harmful defects is removed by forging process. We proposed the direction of die design by observing formability of product according to die shape. The microstructure of forged products with different preform was investigated to determine initial billet shape. We proposed appropriate heat treatment condition for improvement of mechanical properties

**Key Words** : Engine Piston(엔진 피스톤), Aluminum Hot Forging(알루미늄 열간단조), Mechanical Property(기계적 성질), Preform(예비성형체), Microstructure(현미경조직), Heat Treatment(열처리)

## 1. 서론

자동차 산업의 발전과 경량화에 따른 엔진의 성능을 향상시키려는 연구가 시작되면서 알루미늄 피스톤이 개발되었다. 피스톤은 연소실의 폭발압력을 커넥팅로드를 통해 크랭크축에 전달하는 역할을 하며 엔진의 성능에 큰 영향을 미친다. 피스톤은 실린더 내의 연소가스의 고압, 고온에 견디어야 하므로 필요한 강도와 열전도성 및 내마모성이 좋아야 한다.

국내에 사용되는 엔진 피스톤은 금형에 의한 중력주조로 생산되고 있다. 중력주조는 비교적 형상이 복잡한 것의 생산에 적합한 방식이지만, 제품의 내부에 기공을 포함하고 있고, 여러벌의 금형 사용에 따른 금형비용의 증가 및 제품간의 치수차이가 생키며, 응고수축에 의해 제품치수가 불규칙하다. 그리고 제품의 강도가 낮고 연신율이 적은 등 기계적 성질이 떨어진다.

지금까지의 연구들은 응력과 열적거동의 해석에 관한 연구들<sup>(1-3)</sup>과 피스톤-실린더 접촉면에서의 마모<sup>(4)</sup>, 피스톤의 피로수명<sup>(5)</sup>등에 관한 연구, 알루미늄 합금으로 제작되던 피스톤을 세라믹으로 제작하려는 연구<sup>(6)</sup>, 단조피스톤의 개발에 관한 연구<sup>(7)</sup>가 보고되고 있다. 그러나 자동차용 피스톤의 단조에 관한 연구가 미흡할 뿐 아니라 그 기계적 성질의 향상에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 승용차에 사용되는 피스톤을

단조에 의하여 생산하는 것을 목표로 하고 실험을 통하여 단조피스톤의 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 적절한 예비성형체를 제안하며, 열처리 조건을 찾으려고 한다.

## 2. 실험

### 2.1 소재

이 연구에서 사용된 소재는 현재 자동차용 피스톤에 쓰이는 알루미늄합금인 AC8A와 그 화학 성분비가 비슷한 Al 4032로 하였다.

### 2.2 가열

절단된 소재를 전기로(연속가열로, 길이 6m)를 사용하여, 약 460℃<sup>(8)</sup>에서 30분 동안 가열하였다.

### 2.3 단조

가열된 소재를 가능한 빨리 금형내로 넣을 수 있도록 로와 프레스의 위치를 잘 선정해야 한다.

이 연구에 사용된 프레스는 기계식프레스인 너클조인트 프레스(JKP, 630t)를 사용하였고, 단조속도는 20~30cm/s이다. 이 프레스는 두 개의 링크가 직선으로 근접할 때, 행정하사점 근처에서 큰 성형을 할 수 있는 장점을 가진다.

단조에 사용된 금형의 재질은 SKD61종으로 하였다. 펀치, 다이, 다이인서트의 경도는 H<sub>R</sub>C 52~53으로 하였고, 보강링은 H<sub>R</sub>C 50~51로 하였다. 금형의 예열온도는 210℃로 하였다.

특히, 금형설계시 고려해야 할 점은 제품을 금형내

에서 쉽게 뺄 수 있어야 하는데, 빼기구배의 크기, 녹아웃 핀의 크기와 위치를 잘 설정해야만 한다. 이는 제품을 완전히 성형하고 나서 금형으로부터 또는 펀치로부터 뺄 수 없는 경우가 발생하기 때문이다. 본 실험에서는 빼기 구배가 없을 경우(0°)와 있을 경우(2°)에 제품의 성형양상을 살펴보고자 한다.

이 실험에서 사용된 윤활제는 수용성 흑연으로 흑연을 물에 희석시켜 사용하였고, 윤활방법은 금형내에 윤활제를 충분히 고루 미칠 수 있는 스프레이 형태를 취하였다.

## 2.4 열처리

알루미늄 합금의 열처리는 기계적성질을 변화시키기 위하여 담금질 온도와 시효처리시간을 변화시킨다. 여기서는 고용체에서 석출강화 용질원자의 용체화처리, 시효에 필요한 과포화 고용체를 얻기 위한 담금질(quenching), 강화상(強化狀)을 석출하기 위한 시효처리를 하는 T6처리를 한다. Table 1은 Al 4032의 KS 열처리표준 조건과 작업의 경제성을 고려한 현장의 열처리조건을 나타내고 있다. 본 실험에서는 이를 고려하여 단조피스톤의 열처리 조건을 찾으려고 한다.

Table 1 heat treatment conditions

heat treatment condition	solution treatment	quenching	aging
K S	505~520℃	40~80℃	165~170℃ 12~18hr
Industry	520℃ 4hr	40℃	210℃ 4hr

### 2.4.1 용체화처리

용체화 처리에서는 시효처리에 관계하는 원소들의 용해도를 최대가 되도록 하며, 최대의 용해도가 존재하고 확산속도가 빠른 고상선 또는 공정온도 가까이에서 가장 효과적이며, 고상선 온도 아래에서 충분한 시간을 유지하고 주용질 원소를 완전히 고용화한다. 최대온도는 입자성장, 표면효과 및 작업의 경제성 등을 고려하여 설정해야 하며, 최저온도는 고용도 이상이어야 하며 그렇지 않으면 시효에 의하여 는 요구되는 성질에 도달되지 못한다. 최적의 열처리 영역은 매우 작으며 안전을 고려하면 ±5K 정도이다.

### 2.4.2 담금질(Quenching)

열처리성 알루미늄 합금은 다음 단계인 시효처리를 위하여 용질원자와 공공(vacancy)의 과포화도를 최대로 유지하기 위하여 용체화 처리 후 담금질한다. 최고강도와 대부분의 최대의 내식성은 가장 빠른 담금질속도에서 얻어진다. 물이 가장 광범위하게 사용되고 효과적인 담금질액이다. 조(槽, bath)의 크기는 비등이 일어나지 않을 정도로 충분히 커야 하며 필요하다면 물의 온도를 높임으로써 냉각속도를

감소시킬 수도 있다. 급속한 담금질로 얇은 제품은 비틀어지기 쉬우며 두꺼운 제품에는 해로운 잔류응력이 생기므로 주의를 요한다. 담금질에 의한 잔류응력의 크기는 냉각속도를 감소시킴으로써 감소되나 이렇게 하면 냉각과정에서 용질원자의 석출이 일어나 강도와 내식성이 떨어질 수도 있다. 또한 담금질 지연이 생기지 않도록 주의를 요하며, 특히 작은 것이라든가 얇은 제품은 담금질 지연에 민감함으로 담금질 지연이 생기지 않도록 해야 한다.

### 2.4.3 시효경화처리

시효처리는 열처리성 알루미늄합금에서 요구되는 성질을 얻기 위한 최종 열처리이다. 시효처리에서는 석출개시, 용질원자가 영역에 모여서 격자 뒤뜰림이 생기며 이로 인하여 경도가 증가되나 항복강도, 인장강도, 연신율은 변하지 않거나 또는 약간 감소된다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 성형

금형의 형상이 성형에 미치는 영향을 살펴보면, Fig.1은 인서트 빼기구배를 0°로 하였을 때, 성형되는 과정을 보여주고 있는데 성형이 진행되면서 스킨트 중심부로 소재가 오그라드는 현상이 생겨서 성형 결함으로 남게되며, 제품과 인서트 사이의 높은 마찰력 때문에 소재가 잘 빠지지 않는다..

따라서 이러한 난점을 해결하기 위해 빼기구배(2°)를 주었다.(Fig.2)

빼기구배를 주었을 경우, 최종 제품은 Fig.2과 같고, Fig.1에서 나타난 성형 결함이 제거 되었으며 양호한 제품을 얻을 수 있었다.

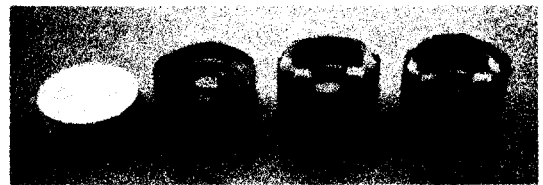


Fig.1 Initial billet and sequential forged products without draft angle



Fig.2 Initial billet and sequential forged products with draft angle (2°)

### 3.2 예비성형체에 의한 기계적 성질의 향상

#### 3.2.1 예비성형체

본 실험에서는 먼저 주조봉을 절삭한 후, 각각의 예비성형체에 따라 Fig.3와 같이 절단·가공하였다.

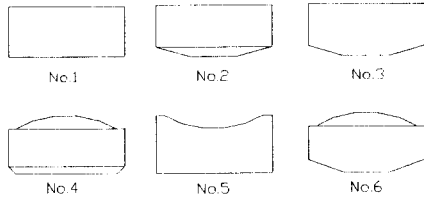


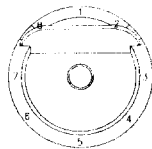
Fig.3 Configurations of preforms for piston forging

#### 3.2.2 경도

피스톤은 높은 압력과 온도에 견디어야 하므로 헤드 부분의 기계적 성질이 특히 중요하다. 또한 헤드 각부의 기계적 성질이 균일해야 한다. Table 2는 열처리를 한 예비성형체에 따른 헤드의 표면경도를 보여주고 있다. Table 2에서 알 수 있듯이 예비성형체 No.4일 때의 경도값이 가장 높고, 헤드의 소성변형을 적게 받은 No.5의 경도값이 가장 낮음을 볼 수 있다. No.4는 성형시 전체적으로 소성변형을 많이 받을 수 있도록 설계되었으며, No.6은 많은 변형 및 핀 보스부분의 체적을 줄여 스킵트 부분의 성형이 쉽게 되도록 한 결과 양호한 경도를 얻을 수 있었다.

Table 2 hardness on the surface of forged piston head with preforms HrB

position preform	1	2	3	4	5	6	7	8	Avg.
No.1	75.5	76.3	78.8	76.9	77.2	78.2	78.7	76.5	77.3
No.2	77.6	75.4	78.3	77.7	75.0	76.4	75.6	75.4	76.4
No.3	78.3	77.4	78.8	78.3	79.3	78.7	80.2	78.8	78.7
No.4	79.1	78.7	79.4	79.8	77.8	80.6	78.2	79.9	79.2
No.5	64.3	75.7	77.9	77.2	75.3	78.0	75.3	75.3	74.9
No.6	77.2	77.7	78.2	76.8	77.5	74.2	77.5	77.3	77.1



#### 3.2.3 조직

단조는 주조조직을 파괴하고 주조의 유해한 결함을 제거하여 단조조직을 얻어 기계적 성질을 향상시키는 것이 목적이다. 그러나 예비성형체의 형상에 따라서 소성변형의 차이를 가져오게 되는데 이로 인한 현미경 조직의 차이를 일으키게 된다. 따라서 소성

변형을 충분히 일으킬 수 있는 예비성형체를 선정함으로써 보다 우수한 단조품을 얻고자 성형된 제품의 조직을 Fig.4과 같이 헤드의 가장자리에서 관찰하였다.

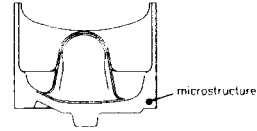


Fig.4 The position of microstructure investigation

Fig.5 ~ Fig.10은 Fig.3에 해당하는 각 예비성형체의 성형 후 조직을 보여주고 있다.

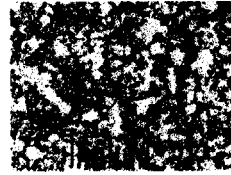


Fig.5 PREFORM No.1

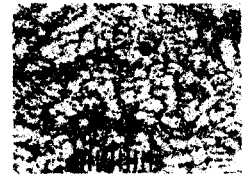


Fig.6 PREFORM No.2

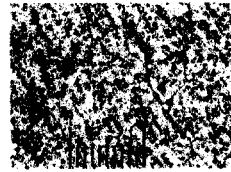


Fig.7 PREFORM No.3



Fig.8 PREFORM No.4

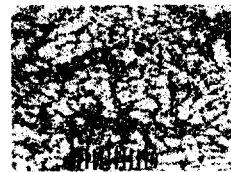


Fig.9 PREFORM No.5

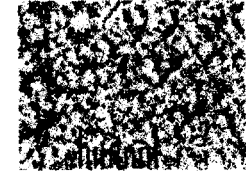


Fig.10 PREFORM No.6

단조후 제품의 조직은 미세해지고, 치밀해지기는 하지만, 제품 전체적으로 미세하고 치밀한 것은 아니며 또한 기계적성질도 균일한 것은 아니다. 특히 Fig.5은 주조조직이 완전히 파괴되지 않았으며 조직이 치밀하지 못함을 알 수 있고, Fig.6와 Fig.9는 어느정도 주조조직이 파괴되었지만 주조조직이 여전히 있음을 알 수 있다. 위의 Fig.5-Fig.10 중에서 Fig.10의 조직이 가장 치밀하며, 주조조직이 많이 파괴되었음을 알 수 있다. 이는 주조에 의해 만들어진 Al 4032 소재가 열간 단조시 주조조직이 파괴되어 주조결함이 제거되었을 뿐만아니라 헤드부분에 많은 소성변형을 받았음을 알 수 있다. 따라서 조직관찰

을 통하여 예비성형체로써 No.3, No.6이 적절함을 알 수 있었다.

### 3.3 열처리에 의한 기계적 성질의 향상

#### 3.3.1 경도 검사

적절한 열처리 조건을 찾기위해 예비성형체 No.2의 성형품에 대해 Table 3과 같이 용체화처리 시간과 담금질 온도 및 인공시효처리 시간에 따라 경도 검사를 하였다. Table 3의 열처리 조건에 따른 각각의 경도값을 Table 4, 5에 보여주고 있다. 열처리 결과 520℃에서 용체화처리를 4시간 한 뒤, 물 23℃에서 담금질을 하고, 190℃에서 인공시효처리를 5시간 한 경우의 경도가 가장 우수함을 보인다. 그러나 인공시효처리시 온도가 높을 경우(여기서, 210℃), 경도에 좋지 않은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Table 3 Heat treatment condition I, II for experiment

Pro-duct	Condition I			Condition II		
	T4 520℃	Quen. 5min	T5 190℃	T4 520℃	Quen. 5min	T5 210℃
1	4hr	23℃	5hr	6hr	23℃	6hr
2	4hr	43℃	5hr	6hr	43℃	6hr
3	4hr	60℃	5hr	6hr	60℃	6hr
4	4hr	23℃	6hr	5hr	23℃	6hr
5	4hr	43℃	6hr	5hr	43℃	6hr
6	4hr	60℃	6hr	5hr	60℃	6hr
7	4hr	23℃	7hr	4hr	23℃	6hr
8	4hr	43℃	7hr	4hr	43℃	6hr
9	4hr	60℃	7hr	4hr	60℃	6hr

Table 4 hardness on the surface of piston head according to heat treatment condition (I) H<sub>R</sub>B

Pro-duct	Position												Avg.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	77.5	79.8	77.8	76.9	78.2	77.3	77.9	77.8	78.1	76.7	77.2	76.5	77.6
2	75.6	73.7	72.1	71.4	75.6	72.0	72.8	71.7	73.7	74.6	74.2	72.2	73.3
3	71.0	70.7	70.5	66.4	63.8	62.0	63.1	61.6	65.3	71.7	71.2	70.3	67.3
4	72.8	69.9	69.3	68.3	73.8	71.4	73.8	67.2	74.4	73.3	72.0	70.9	71.4
5	72.2	72.8	72.6	71.7	68.7	66.7	70.3	67.6	65.8	71.4	69.0	71.3	70.0
6	67.2	66.7	62.5	69.9	68.1	67.2	64.7	62.6	68.1	69.8	67.8	68.7	66.9
7	71.7	72.3	71.6	71.6	72.8	70.7	70.4	70.9	70.8	68.0	73.4	73.0	71.4
8	70.3	69.9	70.0	69.7	71.4	71.5	74.6	70.7	70.0	70.1	68.5	69.9	70.6
9	73.1	70.2	70.6	71.5	72.4	72.1	70.3	71.0	72.4	71.6	70.9	71.2	71.4

Table 5 hardness on the surface of piston head according to heat treatment condition (II) H<sub>R</sub>B

Pro-duct	Position												Avg.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	69.5	67.0	69.0	67.1	68.4	66.6	68.3	67.6	67.9	67.6	70.1	69.4	67.9
2	58.5	61.0	62.5	60.1	59.2	60.4	62.0	61.5	62.4	62.2	61.6	62.4	61.2
3	57.9	58.9	60.5	60.0	60.1	58.5	60.9	60.0	61.7	61.0	62.4	60.5	60.2
4	63.7	64.5	66.2	65.0	64.6	64.6	66.6	65.0	64.9	65.4	66.1	65.4	65.1
5	61.9	62.4	63.0	62.2	63.0	63.5	63.6	63.6	64.2	64.1	62.6	64.6	63.2
6	59.1	60.9	61.0	59.4	59.8	60.4	61.5	60.4	61.1	62.3	61.3	60.2	60.6
7	65.4	67.1	67.3	67.7	67.3	65.8	66.5	65.7	66.3	65.4	66.0	67.2	66.5
8	63.2	63.5	64.2	63.1	63.1	64.6	65.0	63.8	63.4	63.6	63.5	63.9	63.7
9	65.1	65.9	65.6	65.5	65.6	65.0	66.4	64.6	65.5	65.0	66.1	65.7	65.6

### 4. 결론

자동차용 엔진 피스톤을 알루미늄 합금 Al 4032를 사용하여 열간단조에 의해 제작하였다.

인서트와 빼기구배에 따른 제품의 성형양상 및 특성을 관찰하였고, 예비성형체의 형상에 따른 크라운 부위의 경도 및 현미경조직을 관찰하였으며, 열처리 조건이 제품에 미치는 영향을 관찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자동차용 엔진 피스톤을 단조에 의해 제작함으로써 주조품에 비해 우수한 피스톤을 얻을 수 있었다.
2. 빼기구배를 줌으로써 성형하중(약35% 감소)을 상당히 줄일 수 있었을 뿐만 아니라 성형결함을 없앨 수 있었다.
3. 적절한 예비성형체(preform)를 선택함으로써 주조조직을 완전히 파괴하였을 뿐만아니라, 제품의 기계적성질을 향상시킬 수 있었다.
4. 단조피스톤에 적합한 열처리 조건을 찾았다.

### References

1. C.H.Li, "Thermo-elastic behaviour of aluminum diesel engine piston", SAE Paper 860163, pp.1883-1893, 1982
2. S.J.Lee, "The analysis on thermal and gas loading stresses of the piston by finite element method", InHa Univ. Master Degree Thesis, 1990
3. D.H.Hong, "Thermo-mechanical behavior of the cylinder block and piston of spark ignition engines : A Numerical Analysis", Korea Uni. Master Degree Thesis, 1987
4. 김청균, "트라이볼로지 관점에서 본 피스톤-실린더계의 연구 개발", 대한기계학회지, 제32권 11호, pp.910-916, 1992
5. W. Sander and S. Schoeckle, "Design and fatigue life evaluation of piston for high BEMP diesel engines", SAE Paper 790857 pp.115-129, 1979
6. 김태우, "구조 세라믹의 개발과 응용", 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp327-333, 1994
7. Y.H.Kim, W.B.Bae, J.C.Kim, H.S.Kim, "A Study on the Development of Aluminum Piston by Forging Process", J. of KSPE, Vol.14. No.9. pp.30-36, Sept. 1997
8. 關口 常久, "アルミニウムの鍛造", 輕金屬, 44卷, 12, 741-758, 1994