

컵형상 분말단조품의 예비성형체 형상에 따른 단조효과에 관한 연구

박종옥*, 김영호**, 조진래**, 이종헌***

A Study on Forging Effect of Cup-Shaped Powder Forging Product According to the Shape of Preforms

Jong-Ok Park*, Young-Ho Kim**, Jin-Rae Cho **, Jong-Heun Lee***

ABSTRACT

The purpose of this paper is to compare the forging effects according to the shape of preforms of cup shaped powder forging product, and extend the application of powder forging technology to more complicated cup-shaped products like pistons. In order to this, preforms are provided by compacting, sintering, and machining in various shapes, then forged to final shape of products. The workability for sintered aluminium powder material is examined. Density and strain loci of forged products are compared, and the most effective shape of preform is proposed. The preform for a piston of 50mm in diameter is provided and hot forged to final product.

Key Words : Powder forging(분말단조), Cup-shaped product(컵형상 제품), Density distribution(밀도분포), Workability(성형성), Aluminium alloy piston(알루미늄 합금 피스톤)

1. 서론

분말단조법(powder forging)은 분말야금기술과 정밀단조기술의 장점만을 이용한 신공법이다. 소결 부품이 가지는 기계적 특성의 한계를 극복하고 합금조성 및 특성의 균일화를 위해 정밀단조 과정을 거친다. 또한 분말단조법으로 성형된 제품들은 밀폐다이(closed die)에서 플래시 없는 정형단조공정을 거치므로 재료 회수율이 좋고 최종 기계가공의 삭감으로 생산원가의 절감을 기대할 수 있다. 또한 구멍을 가지거나 다소 복잡한 형상의 제품도 재료의 손실이 적거나 없이 생산 가능하다.^[1]

분말단조법은 크게 열간 재압축(hot repressing), 플래시 없는 밀폐단조(closed die forging without flash), 플래시 있는 일반단조(forging with flash)의 3가지로 나눌 수 있다.

첫째로, 열간 재압축 공정에서는 예비성형체(preform)의 중량을 엄격히 관리할 필요가 있다. 또한 이러한 공정에서는 다이와 예비성형체 간의 마찰이 커져 다이 및 툴(tool)의 마모가 촉진된다. 둘째로, 플래시 없는 밀폐단조는 분말단조법 중 산업체에서 가장 널리 이용되고 있는 방법의 하나로서 예비성형체의 중량과 형상을 엄격히 관리해야 한다. 셋째로, 플래시(flash) 있는 일반단조는 기

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 경남정보대학 기계시스템학부

존의 단조법에서 접근하는 방법으로 상기의 두 방법들에 비해 정밀정형이 아니며, 예비성형체의 중량과 형상의 관리도 상대적으로 덜 중요하다.^[2]

국외에서는 차량용 피스톤^[3], 기어류^[4], 오일펌프용 부품^[5], 속업소버용 부품 등의 생산에 본 공법의 적용이 활발히 이루어지고 있다. 국내에서는 본 공법을 이용하여 철(Fe)계 분말을 베이스로 엔진용 커넥팅로드를 생산하는 예가 있으나, 그 외의 제품 생산 예는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 컵형상 분말단조품의 예비성형체 형상에 따른 단조효과를 비교하여 이들 중 최적의 형상을 찾음으로써, 피스톤과 같이 기본적으로 컵 형상을 가진 제품들로 분말단조품의 적용을 확장시키는 것이다. 이를 위하여 5가지 형태의 예비성형체를 분말야금법으로 제작한 후, 밀폐단조로 제품을 성형하여 성형품의 밀도 변화 및 공정 중 각 부위의 변형률 경로들을 비교, 고찰하였다. 또한 연구 결과를 참조하여 직경 50mm인 피스톤에 대한 예비성형체를 제작한 후 열간 단조로 제품을 성형하였다.

2. 분말단조공정

분말단조공정은 기본적으로 재료 혼합, 압분체 (green compact) 제작, 소결, 단조의 4가지로 이루어진다. 단조공정에서의 적절한 예비성형체 제작을 위해 전 과정에서 공정변수 최적화는 매우 중요하며 그 결정인자 또한 매우 다양하다.

2.1 압분체 성형(Compacting)

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, 이론밀도는 2.79g/cm³, 충전율은 37.41% 정도이다.

일반적으로, 알루미늄 압분체는 2~5ton/cm²이 면 정상적인 성형이 가능하며 이 범위에서 약 0.92g/cm³~0.95g/cm³의 상대밀도를 얻을 수 있다고 알려져 있다.^[6] 본 실험에서는 여러 가지 형상의 예비성형체에 대하여 단조공정이 밀도상승에 얼마나 효율적으로 기여하는가를 조사하기 위해 가압하중을 2ton/cm²으로 고정하였으며, 이때 아르키메데스법(함침법)^[7]에 의한 상대밀도 측정 결과 압분체의 상대밀도는 0.89g/cm³였다.

원통형시편 및 예비성형체의 상·하 밀도분포의 균일화를 위해, 복동식 금형압축장치를 사용하나 본 논문에서는 단동식 프레스에서 복동식의 효과를 낼 수 있도록 Fig. 1와 같은 부유다이(Floating Die)를 설계, 제작하였다.^[8]

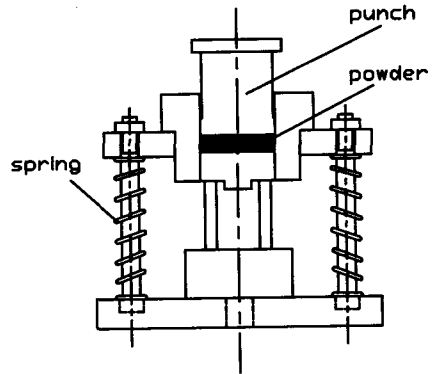


Fig. 1 Description of floating die set

2.2 소결(Sintering)

제품의 소결 과정은 크게 예열, 본열, 냉각의 3단계로 이루어진다. 예열의 목적은 압분체가 함유하고 있는 윤활제의 제거이며 원활한 소결을 위해서 이는 필수적이다. 일반적으로 양산체에서 사용하는 소결로는 이들 각각의 온도조건을 가진 3개의 zone을 가지고 있고, conveyer belt를 이용하여 제품들을 이송시킴으로써 연속적인 소결 공정이 가능하도록 하고 있으나, 본 연구에서는 하나의 분위기로(furnace)에서 3가지 작업들을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 소결 조건들이 Table 1에 나타나 있으며 소결 후 압분체의 상대밀도는 0.90g/cm³로 측정되었다.

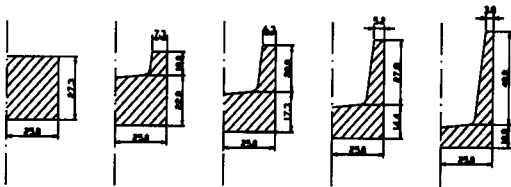
Table 1 Sintering conditions

process condition	Dewaxing	Sintering	Cooling
Temperature (°C)	400	590	150
Holding Time (min)	25~30	25	30
Atmosphere	N ₂		

2.3 예비성형체 제작

제품 형상은 직경 50mm, 높이 30mm, 벽부 두께 5~8mm인 단순 컵 모양으로 하였다. 이러한 최종 제품을 단조공정으로 제작하기 위한 예비성형체의 형상으로는 Fig. 2와 같은 몇 가지를 생각할 수 있다. Fig. 2(a)는 단순 실린더형으로서 compacting 및 소결이 용이하다는 장점을 가지고 있으나, 밀폐형 다리로 후방압출시 불완전한 다이채움의 문제가 발생할 수 있다.

Fig. 2(b), (c)는 이를 보완하기 위한 예비성형체로 후방압출 될 벽부를 가지고 있어 완전한 다이채움이 가능할 것이다. Fig. 2(d)는 예비성형체 내면의 형상 및 치수가 최종제품의 것, 즉 펀치의 것과 동일하다. 그러므로 본 예비성형체를 사용한 단조는 후방압출이 아닌 열간 재압축 공정이며, 예비성형체의 내면 바닥부(bottom)와 벽부(wall)가 동시에 압축되는 형태적 특징을 가지고 있다. 이들 바닥부와 벽부는 높이의 차가 매우 크므로 압축에 따른 진밀화의 정도도 많은 차이를 보일 것이나 본 예비성형체의 형상은 이를 무시하고 있다. Fig. 2(e)는 이러한 문제를 감안하여 예비성형체의 내면 바닥부와 벽부의 압축률에 차이를 둔 것이다. 즉, 단조 성형시 펀치는 벽부에 먼저 접촉하여 이 부위를 가압하기 시작하고, 그 후 펀치가 내면 바닥부에 닿게 되면, 그 때부터는 바닥부와와 벽부가 동시에 가압된다. 본 연구에서 결정한 예비성형체 형상들은 크게 Fig. 2(a)~(c)의 밀폐단조 형태와, Fig. 2(d), (e)의 열간 재압축 형태로 나눌 수 있다.



(a) (b) (c) (d) (e)
Fig. 2 Shape and dimension of preforms

단순 실린더형으로 compacting과 소결공정을 거친 소결품들은 Fig. 2와 같은 형상으로 절삭가공 되

었다. 각 예비성형체의 치수는 모든 예비성형체들의 상대밀도와 중량이 동일하다는 조건하에 계산되었다.

2.4 제품 성형 실험

Fig. 3과 같은 밀폐형 단조 금형을 사용하여 여러 종류의 예비성형체들을 200t 유압식 프레스로 성형하였다. 소재 온도는 450℃, 금형 예열 시스템을 사용하여 금형 온도를 250℃로 유지하였으며, 윤활제로는 그레파이트를 사용하였다. 각 예비성형체들을 5mm 또는 3mm의 step으로 가압하여 각 부위의 변형률을 측정 한 후, 로에서 재가열하여 가압하는 방식으로 실험을 진행하였다. 각 예비성형체들의 성형시, 최종 step에서의 성형하중은 90ton을 넘지 않도록 하였다. 성형후 제품들을 T6 열처리(용체화처리:510℃± 5℃-30분,시효처리:170℃± 5℃-18시간)하였다.

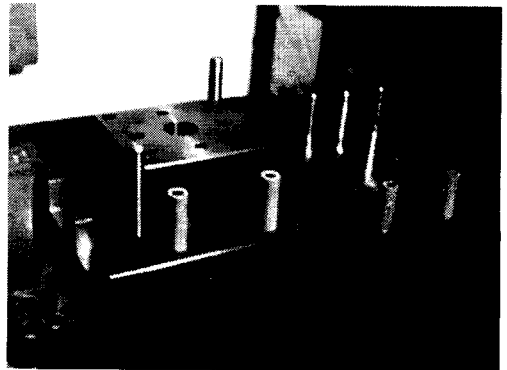


Fig. 3 Forging die set

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재료의 성형성(Workability) 평가

소결품의 성형성을 평가하기 위한 업세팅(upsetting) 시험을 행하였다. 실험중 시편의 온도는 실제 단조공정에서와 동일한 450℃를 유지시켰다. 다이와 시편간의 마찰을 줄이기 위한 윤활제로 그레파이트를 사용하였다. 직경대 높이비(H/D)가 1.0, 1.2, 1.5인 각각의 경우에 대하여 시편의 자유표면에 크랙이 발생할 때까지 업세팅 한 후 최종 압축 변형률과 인장변형률을 측정하였다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 다공성 소결금속의 단조한계도 비

다공성 금속의 단조한계와 같이 직선으로 볼 수 있으며, 이 직선의 기울기도 비다공성 금속의 경우와 마찬가지로 약 0.5이다.^{[9],[10]} 본 시험에서도 단조한계의 기울기는 약 0.5임이 확인되었다.

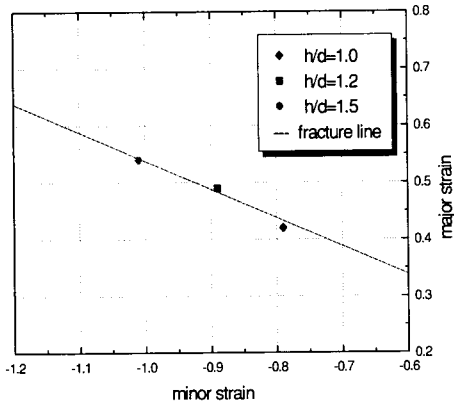


Fig. 4 Workability of the material

3.2 밀도 변화

단조후의 밀도를 아르키메데스법^[7]을 사용하여 부위별로 측정된 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 단조전 프리폼 평균 상대밀도는 0.90g/cm³이다.

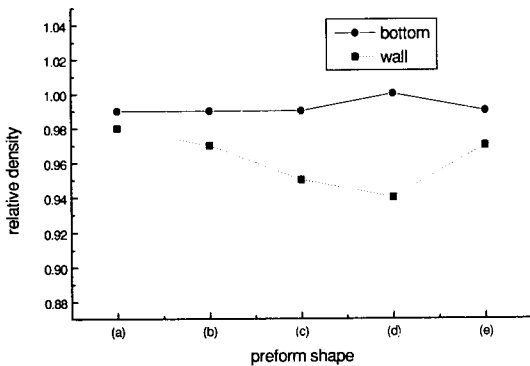


Fig. 5 Density distribution of the products

Fig. 5는 예비성형체의 형상에 따른 밀도의 상승효과와 분포의 차이를 보여준다.

예비성형체 (a)는 제품의 바닥부와 벽부에서 고른 밀도분포를 보인다. 제품의 안정된 기계적 성질을 위해서는 이와 같이 제품내의 밀도분포가 균일한 것이 좋다. 예비성형체 (a)가 가지는 또 한가지

잇점은 단순 실린더 형상으로 compacting이 상대적으로 빠르고 용이하다는 것이다. 그러나, 이 경우 벽부 선단에서의 다이 채움(die filling)이 완전히 이루어지지 않았다. 특히 벽부의 두께가 높이에 비해 작은 제품에 적용할 경우 이는 더욱 어려운 문제가 된다. 그러므로 이러한 형태의 예비성형체는 원활한 다이채움을 위해 성형하중을 더 높이는 등의 별도의 방안이나 후처리 기계가공이 필요하게 된다.

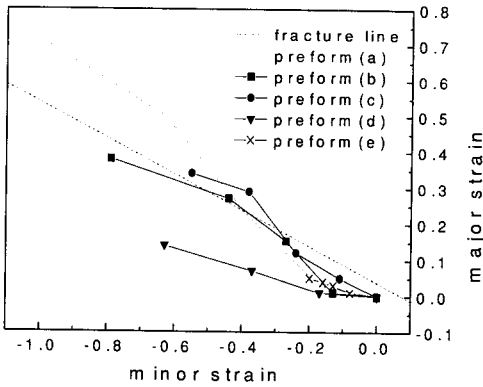
예비 예비성형체 (b)는 바닥부와 벽부에서의 밀도분포가 비교적 균일하며, 완전한 다이 채움도 이루어졌다.

예비성형체 (c)와 (d)는 밀도분포가 매우 불균일함을 보인다. 특히 예비성형체 (d)의 경우 바닥부와 벽부의 밀도차가 가장 큰데, 이는 펀치가 예비성형체의 벽부와 바닥부를 가압하는 시점이 동일하여 바닥부가 먼저 진밀화에 이르기 때문에 발생하는 결함이다.

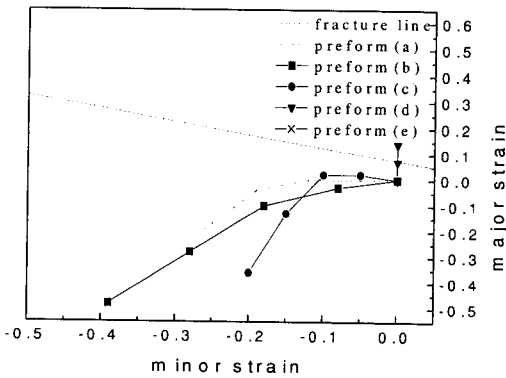
예비성형체 (e)는 이러한 문제를 해결하기 위한 것으로, 펀치가 벽부를 먼저 가압하기 시작하는 형태이다. 그 결과 바닥부와 벽부의 밀도차는 현저히 줄어 예비성형체 (b)와 동일한 정도로 나타났다. 그러나 이 경우 제품 안쪽의 바닥부와 벽부 경계면에서 폴딩(folding)이 발생하였는데 이는 예비성형체의 벽부 높이가 너무 높았기 때문으로, 이러한 형태의 예비성형체를 사용할 때는 적절한 벽부 높이를 결정하는 것이 중요한 설계 과제 중의 하나가 된다. 또한 이와 같이 직경에 비해 벽부의 높이가 커지는 경우는 compacting시 균일한 밀도분포에 불리하다.

3.3 변형을 경로

단조 공정중 소재의 벽부 선단과 바닥부 외면에서의 부위별 변형을 경로는 Fig. 6과 같다. 그래프상의 점선으로 표시된 것은 fracture line이다. 본 실험과 같은 밀폐단조에서는 변형을 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 변형을 경로가 긴 것이 바람직한 예비성형체라 할 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때, Fig. 6의 예비성형체 (b)가 가장 양호함을 알 수 있다.



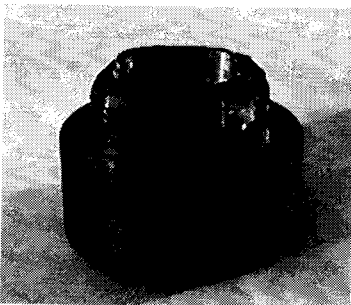
(a) Strain loci at the bottom



(b) Strain loci at the wall

Fig. 6 Strain loci during forging process

밀도와 변형을 경로의 평가를 통해 설계된 예비성형체와 최종 단조품이 Fig. 7에 나타나 있다.



(a) Preform



(b) Powder forged piston

Fig. 7 Preform and powder forged piston

4. 결론

본 연구에서는 컵형상 분말단조품을 위한 예비성형체의 형상에 따른 단조효과를 비교, 고찰하기 위하여 밀도변화와 단조품 각 부위의 변형을 경로를 조사하였다. 또한 연구 결과를 참조하여 직경 50mm인 피스톤에 대한 예비성형체를 제작한 후 열간 단조로 제품을 성형하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

원통형 예비성형체로 성형한 제품은 성형 하중에 대하여 밀도상승 효과가 크고 매우 균일한 밀도분포를 가지나, 제품의 벽부 선단에서의 다이 채움이 상대적으로 어렵고, 바닥부 외면에서 fracture가 발생함을 알 수 있었고, 높은 벽부를 가진 예비성형체로 성형한 제품은 벽부의 밀도상승 효과가 떨어져 균일한 밀도분포를 가진 제품을 성형하는데 어려움이 있음을 알 수 있다.

또한, 열간 재압축 형태의 예비성형체로 성형한 제품에는 벽부와 바닥부의 경계면에서 폴딩현상이 발생하여 제품에 큰 결함이 발생하므로 적당한 예비성형체라 할 수 없다. 적당한 높이의 벽부를 가진 예비성형체로 성형한 제품은 벽부 선단에서의 다이 채움과 밀도상승 효과 및 균일한 밀도분포를 모두 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 이를 통해, 적절한 예비성형체의 형상을 예측하고 자동차용 엔진 피스톤을 성형, 제작하였다.

참고문헌

1. 이정환, 이상용, 이영선, "자동차 부품의 정밀단

- 조기술," Proc. of '98 Korean-German Technomart for Automotive Technologies, PNU, pp. 275-288, Sept. 22-23; 1998.
2. Downey, C. L., Kuhn, H. A., "Designing P/M Preforms for Forging Axisymmetric Parts," International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 128-135, 1975.
 3. Iwata, Y., Mae, S., Urai, Y., Tsunoda, T., "Aluminium Alloy having an Excellent Forgibility," United States Patent[19], P. N. 4889557, Dec. 26, 1989.
 4. 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.
 5. Danninger, H., "Sintered Aluminium camshaft belt pulleys," M. P. R., pp.46-52, June, 1993.
 6. 서상기, 박원욱, 이강을, 임현일, "P/M법에 의한 알루미늄 소결제품의 제조공정 개발," 한국기계연구소, pp. 24-29.
 7. 김문일, 이동희 "粉末冶金·燒結機構," 청문각, pp.229-239, 1998,.
 8. 日本粉末冶金工業會, "燒結機械部品-その設計と製造-", 技術書院, pp. 33-47, 1987.
 9. 한홍남, 오규환, 이동녕, "다공성 소결금속의 단조한계해석," 단조기술의 진보, 제2회 단조심포지움, pp. 64-71, 1995.
 10. Kuhn, H. A., Ferguson, B. L., "Powder Forging," Metal Powder Industries Federation, pp. 92-99, 1990.