

## 산업기계용 고밀도 Bevel Gear 제품화를 위한 성형성 연구

임 성 주\* · 윤 덕 재\* · 최 석 우\* · 박 훈 재\* · 김 승 수\* · 나 경 환\*

### Forming of High Density Bevel Gear for Industrial Machinery

S. J. Lim\*, D. J. Yoon\*, Seogou Choi\*, H. J. Park\*, S. S. Kim\*, and K. H. Na\*

**요약** 회전성형법은 프레스 축 중심에 대하여 일정한 각도로 경사진 요동축과 원추형상의 상부 금형을 축 중심에 대하여 회전시키고, 소재를 상승 가압하면 상부금형과 소재가 점진적으로 접촉하면서 제품을 성형하는 공정이다. 본 연구팀에서 개발된 회전 분말 단조 프레스(500kN)를 이용해서 산업용 고밀도 베벨기어의 성형성 실험을 수행하였다. 실험결과로 회전 분말단조 공정과 회전 분말성형 공정에서의 성형하중, 성형밀도, 경도, 미세조직 등의 변화를 조사하여 제품의 기계적 성질을 규명하고 실제로 산업 전반에 적용할 수 있는 가능성을 제시한다.

**Abstract** This study is concerned with the cold forging of sintered preform by rotary forging process and direct powder compacting process. An experiment has been carried out using the rotary powder forging press(500kN) which had been designed and equipped with the rotational conical die inclined to the central axis of the press at certain angle. The effect of process variables was observed and measured by several mechanical test, such as hardness distribution, density, and microstructure of the specimens. It is found that the highly densified P/M parts can be obtained and this process is very effective for improving quality of the powder products.

**Key Words** : Rotary forging, Powder forging, Powder Metallurgy, Bevel gear

#### 1. 서 론

최근 산업이 발전됨에 따라 복잡한 형상을 갖는 제품의 수요가 증가하고 있으며, 제품의 품질과 기계적 성질 등을 한층 높이기 위한 새로운 공정 개발이 요구되고 있다. 이들 중에 분말을 이용한 분말성형 공정은 원재료 이용률이 높고, 복잡한 형상의 제품 생산이 용이하며, 합금조성과 특성의 균일화, 후 가공비의 절감 및 대량생산을 통한 원가 절감 등의 장점을 갖는 공정으로 기존에는 소결제의 다공질성을 이용하는 필터류나 오일리스 베어링(Oilless bearing) 등의 제조공정으로 널리 적용되어 왔으나, 최근에는 일반적인 방법으로 제조하기 어려운 고용점 소재인 텅스텐과 영구자석, 분말 고속도 공구강과 같은 특수용도의 제품을 생산하기 위한 공정으로도 각광 받고 있으며, 일반 산업제품 및 기계류의 부품 생산에도 다양하게 적용되고 있는 추세에 있다.

그러나 분말 소결 제품은 공정상 잔존하는 기공으로 인하여 제품의 구성입자 밀도가 상대적으로 떨어지기 때문에 기존의 단조품이나 가공품에 비하여 낮은 충격 에너지, 피로특성 등 기계적 성질 저하와 소결(Sintering)처리 과정에서 기공의 감소로 인한 제품의 치수 변화 때문에 기어류와 같은 정밀제품이나 고강도를 요구하는 동작부품에는 제한적으로 적용되고 있으며, 특히 베벨 기어의 적용은 매우 어려운 공정으로 인식되고 있다[1-4].

이에 반하여 분말단조(powder forging)의 경우는 진밀도(Full density)에 가까운 고밀도를 얻을 수 있기 때문에 소결 부품의 기계적 특성의 한계성을 극복할 수 있으며, 그 방법으로는 일간 단조와 IIP 및 CIP공정 등에서 응용되고 있다[5]. 이와 같은 일반 단조프레스에 의한 단조법으로는 요구된 진밀도까지 도달하는데 한계가 있어 대부분 열간에서 단조작업이 이루어지기 때문에 장치 설비비와 투자비용의 증대, 제품의 생산성 저하, 생산원가의 상승 등 경쟁력이 떨어져 일부 제품을 제외하고는 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다. 그러

\*한국생산기술연구원 생산공정기술연구팀

본 논문은 1998년도 한국생산기술연구원 기본연구과제의 연구결과로 그 주요 내용은 프레스 축 중심에 대하여 일정한 각도로 경사진 요동축과 원추형상의 상부 금형을 점진적으로 접촉하면서 제품을 성형하는 회전성형법에 의한 산업용 고밀도 베벨기어의 성형성 실험을 수행하여 성형하중, 성형밀도, 경도, 미세조직 등의 변화를 조사하여 실제로 산업 전반에 적용할 수 있는 생산기술을 제시한 것이다.

므로 분말제품의 밀도를 향상시켜 제품 품질을 안정시키고, 새로운 생산체계를 구축하여 다품종 소량생산에 대응하는 것은 분말 소결 업체들의 공통된 당면과제 중의 하나로 대두되고 있다고 볼 수 있다.

최근 선진국에서는 회전단조 프레스(Rotary forging press)가 개발되어 널리 보급됨에 따라 회전성형법의 장점을 이용하여 분말 단조공정을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다[6]. 회전성형법은 프레스의 축 중심에 대하여 일정한 각도로 경사진 요동축과 원추형상의 상부 금형(Upper die)을 축 중심에 대하여 회전시키고, 소재를 상부 가압하면 상부 금형과 소재가 점진적(Incremental)으로 접촉하면서 제품을 성형하는 공정으로 일반 단조 공정과 달리 소재를 극부적으로 반복 가압하여 제품을 성형함으로써 발생하는 전단 변형층(Shear zone)이 분말 소재의 기공을 줄이는데 효과적[7]이며 가공 한계를 극복할 수 있어 제품의 질적 향상과 생산원가를 절감하는데 매우 우수한 공정으로 인식되고 있다. 또한 극부 가압으로 제품을 생산하기 때문에 보다 작은 하중으로 같은 제품을 생산할 수 있고 장치 및 금형의 단순화가 용이하고, 분말 소재로부터 직접 제품 생산이 가능하여 제품의 리드 시간을 줄이고 다품종 소량생산이 가능한 공정으로 주목받고 있다[8-10].

베벨 기어는 전용 공작기계인 호핑 머신이나 기어 세이퍼에 의해 대량으로 생산되는 평치차와 비교하면 고가인 기어라 할 수 있다. 이 때문에 베벨 기어의 비절삭 가공법에 의한 제품생산에 관한 연구는 오래 전부터 수행되어 왔으며, 그 중의 베벨기어 형 단조에 관한 연구 결과는 종래 프레스를 이용하여 열간에서 성형된 제품에 관한 것이 대부분이다.

따라서 본 연구에서는 새로운 공정인 회전성형법에 의한 회전 분말단조(Rotary powder forging) 기술을 적용하여 산업용 냉간 분말 베벨기어(Bevel gear)의 성형성 실험을 수행한 후 그 결과로 성형하중, 경도, 밀도, 미세조직 등의 변화를 조사하여 제품의 기계적 성질을 규명하고 실제로 산업전반에 적용할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

성형성 실험은 Figure 1의 형상과 Table 1의 제원을 갖는 베벨 기어를 Figure 2와 같이 두 종류의 성형 공정으로 실험을 수행하였다. 첫 번째 성형공정은 회전 분말단조공정(Rotary powder forging process)으로 Figure 2의 (a)와 같이 일반 분말 소결 공정과 같은 분말, 성형, 예비소결, 풀림, 윤활 처리 공정 후 회전 분말

단조 및 재소결 공정순으로 수행하였다. 회전 분말단조의 예비 성형체(Preform)는 Figure 3과 같은 단축 프레스 금형셋트에서 압축성형(Compacting) 후 아르곤(Ar)가스 분위기 속에서 1120℃로 30분간 예비 소결하였다.

두 번째 성형공정은 회전 분말성형 공정(Direct cone compacting process)으로 Figure 2(b)와 같이 회전 분말단조 프레스에서 분말을 금형에 장입한 후 상부 금형을 0°로 세워 1차 직접 분말 압축(Direct cone compacting) 후 다시 상부 금형을 6°로 기울여 회전 분말단조를 수행하였다. 그리고 회전 분말단조된 성형 제품은 모두 1100℃에서 60분 동안 재소결(Resintering)하였다.

본 실험에 이용된 회전 분말단조 프레스의 외관은 Figure 4와 같으며 사양은 Table 2와 같다.

축 중심에 대하여 일정 경사각인 요동축(Rocking shaft)은 경사각을 0~6° 범위로 조절이 가능하며 자전운동(Spin motion)과 궤도운동(Orbital motion)이 가능하도록 설계 제작되었다.

요동축에 조립된 상부 금형은 요동축의 요동 운동에 따라 제품의 상부면을 점진적으로 성형하기 때문에 일반 단축프레스로는 불가능한 전단 영역의 이동으로 인

Table 1. Dimensions of bevel gear

Items	Specifications
Module(M)	4.106
Pressure angle	22° 30'
Number of teeth	10
Pitch diameter	φ 41.06
Pitch angle(δ)	35° 32'
Total height(H)	13.5
Outside diameter(D)	φ 41
Teeth height(h)	8.5
Face angle(α)	48° 29'

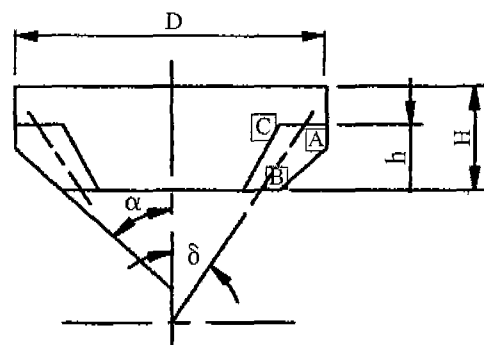


Figure 1. Bevel gear.

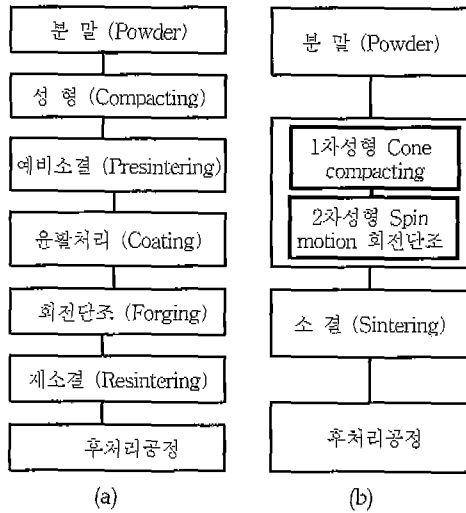


Figure 2. Manufacturing process for powder materials (a) Rotary powder forging, (b) Direct cone compacting.

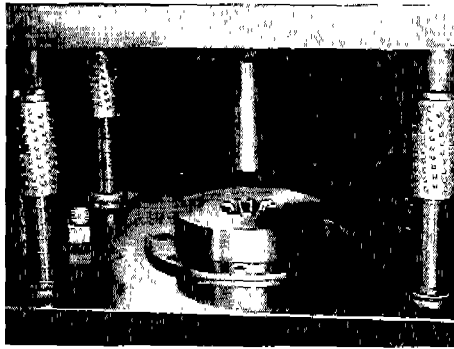


Figure 3. Powder compacting die.



Figure 4. Rotary powder forging press.

하여 성형되는 소재의 기공(Porosity)이 메워지는 현상이 발생하기 때문에 가공 한계를 극복하여 제품의 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 장점을 갖는 프레스로서

개발된 회전 분말단조 프레스의 최대 성형하중은 50톤급이다.

본 실험에 적용된 금형 및 이젝터의 형상은 Figure 5와 같으며, 이젝터 형상은 밀도 향상을 위하여 밀면을 기어 형상으로 하였으며, 금형의 경사각은 6°, 운동모양은 케도운동으로 1회전당 가압량을 0.3 mm/rev로 성형하였다.

Table 2. Specification of rotary powder forging press

Specification		
Upper die motion	Orbital, Spin motion	
Inclination angle	0 - 6°	
Pressing force (KN)	Max	500
	Working	400
	Ejecting	120
Speed	Rocking shaft rotating speed(rpm)	0-300
	Lower die rotating speed(rpm)	0-75
	Spiral feed(mm/rev)	0-3
	Main ram speed (mm/sec)	0-25
	Ejecting speed (mm/sec)	0-10
Pressure (MPa)	Main	17
	Working	14
	Ejecting	14
Day light(mm)	200	
Orbital main motor	15 kW × 6P	
Length × Width × Height(mm)	900 × 900 × 2500	
Weight press(Ton)	5	



Figure 5. Dies and ejector of bevel gear.

성형중에 금형 면과 소재 사이에 마찰을 줄여 성형하중의 감소와 제품 취출시 성형체의 파손을 방지하도록 냉간 단조용 윤활제로서 많이 사용되고 있는 MoS<sub>2</sub>를 시편에 도포하였다.

Fig. 6은 회전분말 단조된 제품을 보여주고 있다.

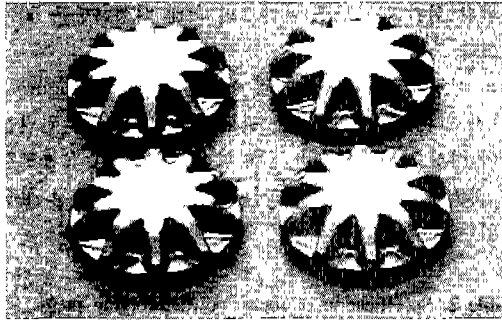


Figure 6. Products.

### 3. 결과 및 고찰

두 성형 공정에 의한 실험을 통하여 성형된 베벨기어 제품의 밀도, 미세조직, 경도 변화 등 다음과 같은 결과를 얻었다.

#### (1) 미세 조직과 밀도

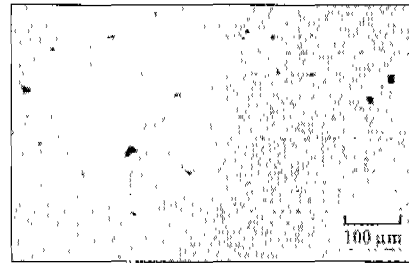
Table 3은 회전 분말성형 공정에 의하여 성형된 베벨기어의 소결 전·후의 밀도 변화로서 소결전의 밀도가 94.14%이고 소결 후 밀도가 95.16%로 밀도변화가 작게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 소결 전후 치수 변화가 작은 것을 의미하는 것으로 단조 성형공정에서 고밀도의 제품을 얻는 것이 소결후의 밀도변화에 큰 영향을 주지 않게 되므로 제품의 치수정밀도가 우수한 제품을 얻기 위해서는 고밀도로 성형하는 것이 중요하다.

Figure 7은 회전 분말성형 공정에 의하여 성형된 베벨기어를 소결 후 Figure 1의 그림과 같이 이끝면(B)과 이뿌리면의 안쪽(C)부 및 이뿌리면 외부(A)를 100배율로 확대 촬영한 기공분포 사진이다. 사진에서 검고 작게 보이는 것이 기공으로 상부면과 하부면의 기공 분포 차이가 거의 없는 것으로 나타나고 있으므로 상하부분이 균일하게 성형된 것으로 사료된다. 또한 이뿌리면 안쪽(C)에서 기공의 크기가 약간 크게 보이고 있으나, 전체적으로 볼 때 균일하게 치밀화된 것으로 판단된다.

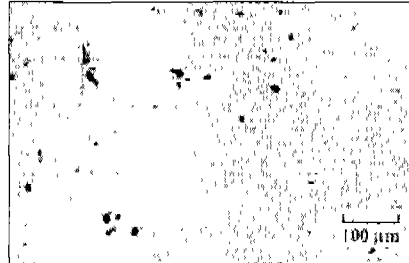
Table 4는 회전 분말단조 공정에서 성형된 베벨기어의 단조 전후의 밀도변화를 보여주고 있다. 여기서 단조 전의 밀도가 86.1%, 단조 후 밀도가 95.6%로 크게 상

Table 3. Density change of before and after sintering

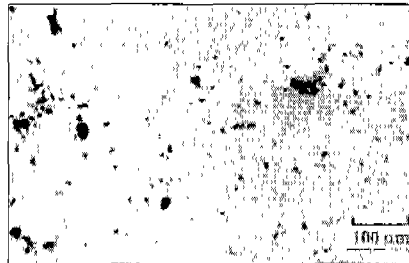
Process	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Relative Density(%)
Before Sintering	7.39	94.14
After Sintering	7.47	95.16



(A) Part of Fig. 1



(B) Part of Fig. 1



(C) Part of Fig. 1

Figure 7. Porosity distribution (Rotary forging after direct cone compacting).

Table 4. Density change of before and after rotary forging

Process	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Relative Density(%)
Before Rotary forging	6.76	86.1
After Rotary forging	7.51	95.6

승한 것을 알 수 있으며, 최종 밀도값은 회전 분말성형한 경우와 유사한 결과를 보여 주고 있다.

Figure 8은 회전 분말단조된 베벨기어를 Figure 1의 그림과 같이 회전 분말단조 전 후의 이끝면(B)과 단조 후의 이뿌리면 안쪽(C)부를 100배율로 확대 촬영한 기공분포 사진이다. 단조 후의 이끝면(B)의 기공이 단조 전 이끝면(B)에 비하여 단조 후 기공이 월등히 감소되어 조직이 치밀화 된 것을 볼 수 있으며, 회전 분말성형한 결과와 마찬가지로 이끝면(B)과 이뿌리면의 안쪽(C)의 기공 분포 차가 거의 없는 것으로 나타나고 있어 기어의 상하부분에서 균일하게 성형된 것으로 사료되어지

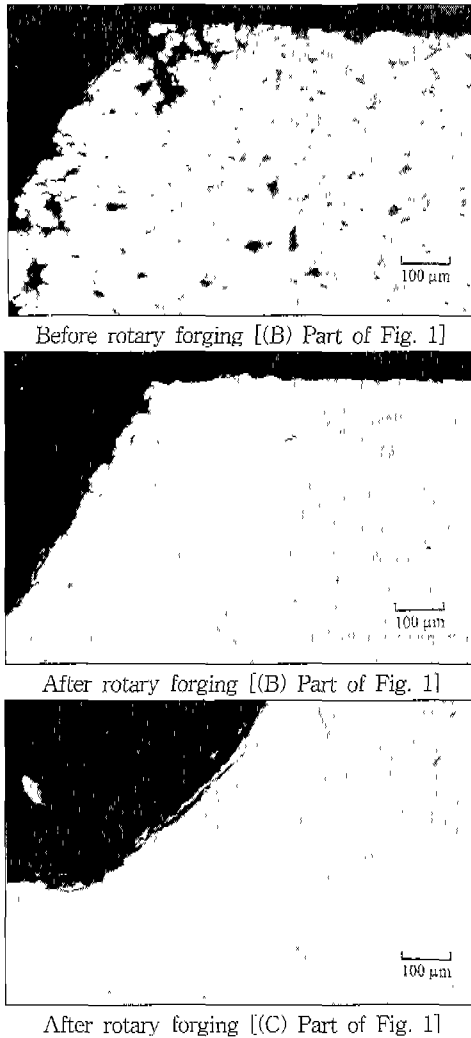


Figure 8. Porosity distribution after Rotary forging.

며 예비 성형체를 만든 후 회전 단조한 경우가 이뿌리 부분에서 좀더 균일하게 치밀화된 것으로 판단된다.

따라서 회전성형법에 의한 분말 성형공정은 냉간에서도 고밀도의 제품을 얻을 수 있어, 회전성형법의 우수성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

(2) 성형하중

회전 분말성형 공정에서 1차 성형(Direct cone compacting)은 14톤이고, 2차 성형(Repressing)은 12.8톤의 성형하중이 소요되었다. 1차 성형에서는 밀도가 낮음에도 불구하고 2차 성형보다 큰 성형 하중을 나타내고 있다[8]. 이것은 1차 성형은 성형품을 전면 압축으로 큰 하중이 요구되는 반면 2차 성형은 회전단조 공정에 의한 점진성형 방식으로 작은 하중으로 성형밀도가 95%

까지 상승되었다. 회전단조공정은 일반 단조공정보다 작은 하중으로 고밀도의 제품을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

(3) 경도분포

베벨 기어를 성형하여 소결시킨 후의 밀도가 95%인 제품을 Figure 9의 하단그림과 같이 이빨 부분과 이뿌리면의 상하면 및 중심 부근에서의 경도를 측정하였다. Figure 9는 회전 분말성형한 경우와 회전 분말단조 후의 경도값을 나타내고 있다.

회전 분말성형 공정에 의해 성형된 제품과 회전 분말단조 공정에 성형된 제품 모두 직접 상부 금형과 접촉하는 부위에서 밀어질수록 치형 부분과 중심부분 사이에서 경도값이 비슷하게 나타나고 있어 제품 전체가 균일하고 치밀화된 것으로 판단된다.

4. 결론

점진 성형방식에 의한 산업용 분말 베벨 기어의 성형성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 작은 성형력으로 고밀도 제품을 얻을 수 있었다.
- (2) 직접 분말을 압축한 후 회전단조를 실시하는 회전 분말성형 공정과 분말을 예비 성형체로 만든 후 회전 분말단조 공정을 실시한 경우 모두 고밀도의 제품을 얻을 수 있었다.
- (3) 분말 베벨 기어를 점진 성형법에 적용 실험한 결과 제품의 상하면에서 조직이 균일하게 치밀화되었고, 경도분포도 균일한 제품을 얻을 수 있었다.

Process	Hardness(Hv)		
	C	B	A
Direct cone compacting	68	65	60
	52	52	48
	40	42	45
Rotary powder forging	66	73	62
	55	61	55
	61	53	51

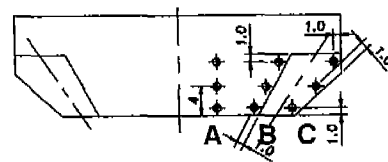


Figure 9. Distribute of hardness.

(4) 회전성형 방식에 의한 냉간 분말단조 공정은 기존 분말야금 공정에 추가되는 공정으로 공정추가에 대한 부담이 있지만, 제품의 고밀도화 시키는데 적용되고 있는 열간 제가압 방법 등과 비교하면 생산공정의 단축과 고밀도 제품을 보다 쉽게 얻을 수 있어 향후 제품개발의 가능성이 크다고 판단된다.

### 후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 '98기본과제(산업기계용 고밀도 Bevel Gear 제품화를 위한 성형성 연구) 연구 결과의 일부를 수록한 내용입니다.

### 참 고 문 헌

[1] S. Corso and V. Giordano, "Development of differential pinion gear by PM hot forging process", Powder Metallurgy, Vol. 21, No. 3, pp. 158-161, 1977.

[2] G. Petzow, H. E. Exner, "A Retrospective of Powder Technology", Powder Metallurgy International, Vol. 21, No. 2, pp. 9-13, 1989.

[3] 정형식, 이정환, 이동원, 이영선, 박종진, "분말 단조기술의 현황", 대한금속학회보, Vol. 6, No. 4,

pp. 362-375, 1993.

[4] Tohn P. Cook, Oxidation, Reduction and Decarburization of Metal Powder Preforms, Hoeganaes Corporation, 1972.

[5] W. J. Huppmann and M. Hirschvogel, "Powder forging", International Metals Reviews 1978, No. 5, pp. 209-235, 1978.

[6] P. M. Standring, "Rotary forging-a technical review", Met. J., pp. 9-16, 1989.

[7] P. M. Standring, etal, "Plastic deformation produced during the indentation phase of rotary forging", Metals Technology, Vol, 7, pp. 159-166, 1980.

[8] 윤덕재, 임성주, 최석우, 나경환, "회전성형법에서 Rotary Powder Compacting공정에 관한 특성 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 6, No. 3, pp. 227-232, 1997.

[9] P. M. Standring, "The Rotary Consolidation Loose Powder to high Density", The Materials, Revolution Through the 90'S Powder Metal Matrix Composites CONF., pp. 17.1-17. 11, 1989.

[10] Jerzy Pregowski, "Rotary cold repressing", '90 Advances in powder metallurgy, Vol. 1, pp. 341-355, 1990.