

볼 엔드밀을 이용한 크라운 치형을 갖는 직선 베벨기어 금형 가공

이강희⁺, 이기용⁺⁺, 안동규⁺⁺⁺, 박용복*
(논문접수일 2008. 9. 10, 심사완료일 2008. 12. 2)

Machining of Straight Bevel Gear Die with Crown Teeth Using Ball End Mill

Kang-Hee Lee⁺, Ki-Yong Lee⁺⁺, Dong-Gyu Ahn⁺⁺⁺, Yong-Bok Park*

Abstract

A lot of straight bevel gears have been manufactured by the cold forging process in order to improve the productivity and mechanical property of the product. The die for the cold forging of the gear needs high precision and reproducibility. In the study, cold forging die has been modeled by CAD/CAM and manufactured by machining center using ball end mill coated by (Al, Ti)N for heat-treated alloy steel(STD11, HRC 60). Through the measurement of the machined die, satisfactory dimensional accuracy and surface roughness were obtained. In the future, many 3-d cold forging dies will be directly machined instead of electric discharge machining.

Key Words : Straight bevel gear die(직선 베벨기어 금형), Crown teeth(크라운 치형), Ball end mill(볼 엔드밀), (Al, Ti)N-coated carbide tool((Al, Ti)N로 코팅된 초경공구), STD11

1. 서론

제조 현장에서는 생산성과 기계적 성질의 향상을 목적으로 과거에 주로 절삭에 의해 제조되는 많은 제품들이 소성가공기술의 발달로 단조 공정으로 개발되어 적용되는 사례가 많아졌다. 이 단조기술로 다양한 제품들이 생산되면서 단조

를 위한 도구인 금형에 대하여 높은 정밀도와 반복재현성 확보가 필요하게 되었다. 현재 냉간 단조용 금형의 제작은 열처리 후에 연마 공정이나 방전가공에 의해 주로 제작된다. 동력 전달용으로 사용되고 있는 직선 베벨기어의 경우도 절삭공정으로부터 소성가공 공정인 냉간 단조로 개발되어 생산되고 있다. 이 직선 베벨기어의 생산에 사용되는 금형 제

* 교신저자, 공주대학교 기계자동차공학부 (ybpak@kongju.ac.kr)
주소: 330-717 충청남도 천안시 부대동 275

+ 충남인력개발원 컴퓨터응용기계과

++ 한국생산기술연구원 광주연구센터

+++ 조선대학교 기계공학과

작은 기어 가공 전용기에서 방전가공용 전극을 방전 갭만큼 줄여 제작한다. 최근에는 CAD/CAM을 이용하여 직접 모델링하고 고속가공기로 전극봉을 가공/방전하여 베벨기어 금형을 개발한 사례도 있다⁽¹⁾. 공작기계와 공구의 발달은 제조업에서 제품의 고정밀도와 고속화를 실현하였고, 고정도의 열처리된 금형강의 가공에 대한 연구도 진행^(2,3)되는 등 고속가공에 대한 연구가 수행되고 있다. 그러나 열처리한 고정도의 합금공구강을 볼 엔드밀로 금형 제작에 직접 적용하는 응용연구보다 시편위주의 연구가 주로 이루어지고 있으며, 또한 전용 고속가공기를 이용한 연구가 대부분이다.

본 연구에서는 제작시간의 단축과 반복 재현성의 확보를 목적으로 방전가공에 의해 제작되던 냉간 단조용 직선 베벨기어 금형을 전용 고속가공기 대신 현재 제조 현장에서 주로 사용하고 있는 범용 머시닝센터를 이용하여, 열처리된 합금공구강(STD11, HRC 60)을 볼 엔드밀($\phi 2$)로 가공하는 연구를 수행하였다. 금형의 모델링은 CAD/CAM을 이용하여 모델링하고 가공 후 롤링 시험(Rolling Test)을 통해 검증된 데이터⁽⁴⁾를 이용하였다. 사전에 기초실험을 통하여 치수의 정밀도, 표면 거칠기, 형상정밀도를 확인하였다. 이를 토대로 직선 베벨기어 금형을 같은 절삭 조건으로 가공함으로써 기초 자료를 확보하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 논문의 실험에 사용된 도구는 CAD/CAM시스템과 가공용 머시닝센터 및 측정기로 구성되어 있다. CAD 프로그램인 Solid Works로 모델링 하였다. CAM프로그램은 Cimatron으로 NC코드를 생성하고 검증하였다. 가공용 머시닝센터는 화천 SIRIUS-550 모델을 사용하였다. 최고 회전수는 10,000 rpm이며, 최고 절삭속도는 24,000mm/min에 이른다. 공구의 재질은 MITSUBISHI사의 극초미립자 초경이며, (Al, Ti)N 코팅된 고정도용 볼 엔드밀로 HRC 60까지 가공이 가능한 것을 사용하였다. 시편과 금형은 STD 11재질로 가공 후 열처리하여 사용하였다. 실험 후 치수 측정기는 3차원 측정기, 표면조도기(독일 Mahr사 MFV-250), 진원도 측정기(일본 MITUTOYO사 RA-116), 공구현미경(일본 MITUTOYO사 MF-UA2010B)을 사용하였다.

2.1 시편 제작

베벨기어 금형을 직접 제작하기 전에 가공 시 공구의 변형으로 인한 최종 치수의 변화와 가공 후 측정이 곤란한 표면 거칠기와 형상정밀도를 사전에 파악하기 위해 가공용 시편

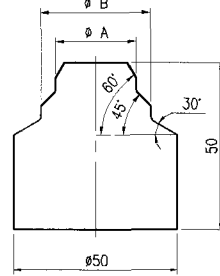


Fig. 1 Dimension of specimen

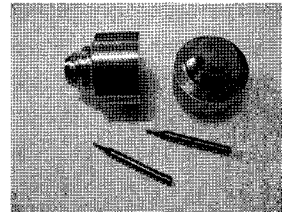


Fig. 2 Photograph of specimen and ball end mill

을 제작하였다. Fig. 1은 시편치수와 제작 완료된 시편 및 사용될 공구를 보여준다.

제작할 베벨기어 금형의 가공되는 면은 평면, 수직면 및 경사면으로 구분할 수 있다. 경사면의 가공은 기어 치저와 치선의 원추각으로 공구가 반복적으로 이동하면서 가공된다. 이때 가공되는 경사각도는 Fig. 3을 기준으로 환산하면 약 $47.0^{\circ} \sim 57.6^{\circ}$ 사이가 된다. 따라서 시편은 제작할 베벨기어 금형의 각도를 포함하는 30° , 45° , 60° 가 되게 설계하고 제작하였다. 재질은 냉간 단조용 금형의 재료로 많이 사용되고 있는 STD11을 사용하였다. 소재를 황삭 후에 열처리를 하였으며 경도는 HRC 60이 되었다. 최종적으로 베벨기어 금형의 열처리 후 가공 조건과 동일하게 하기 위해 CNC선반으로 가공하여 완성하였다(Fig. 2).

2.2 NC 코드 생성 및 가공

NC코드는 Cimatron을 이용하여 생성하였다. 가공 조건은 공구의 변형을 최소화하고 형상 정밀도를 확보하기 위해 동일한 반경의 공구인 R1 볼 엔드밀을 사용하여 중삭 가공공정과 정삭 가공공정으로 구분하였다. 중삭 가공공정은 열처리 변형과 황삭 가공에서 반경이 큰 볼 엔드밀을 사용함으로써 코너 부분에 많이 남는 절삭량을 전체적으로 일정하게 남기도록 할 수 있다. NC 코드 생성시 사용한 가공조건은 절입량은 0.25mm, 수직 스텝은 0.1mm이며 가공 후의 최종

정삭여유는 0.02mm으로 일정하게 하였다. 정삭 가공은 표면 거칠기를 기준으로 수평, 수직 스텝을 선정하였다. 최대 거칠기가 0.8μm을 기준으로 이론 최대 거칠기식과 수직, 수평 스텝식을 이용하여 계산하고, 정수화하였다. 평면에서는 수평 스텝을 0.05mm, 경사면에서는 수직 스텝을 0.03mm로 선정하였다. 이 때 식 (1)에 의한 이론 최대 표면 거칠기는 수평면에서 0.3μm, 경사면에서는 경사각이 30°가 가장 나쁘며 이때의 최대 거칠기는 0.45μm로 계산되었다. 공구의 회전수와 이송은 공구 업체의 추천 속도를 이용하여 본 실험에 사용된 장비에 맞게 비례적으로 낮추어 적용하였다.

공구의 변형은 상방향 하향절삭이 곡면 경사위치가 변화에 대하여 가장 양호한 결과를 얻은 연구⁽⁵⁾가 있으나, 본 연구에서는 제품의 특성을 고려하여 하방향, 하향절삭 조건을 적용하였다. 고속가공을 이용한 고경도 소재 가공시 냉각방법에

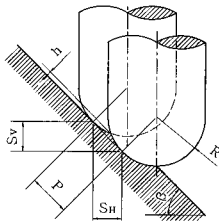


Fig. 3 Relation of surface roughness and ball end mill on inclined plane

Table 1 Experimental conditions

Item	Semi-finish cut	Finish cut
Spindle Speed (rpm)	5000	5500
Feed (mm/min)	400	450
Feed per Tooth (mm/tooth)	0.02	0.02
Depth of Cut (mm)	0.25	0.03
Pick Feed (mm)	0.29-0.5	0.03~0.06
Tool	4날 -R1 ball end mill 극초미립자 초경, miracle(Al, Ti)N 코팅	
Coolant	Dry Air(5Kg _f /cm ²)	
Workpiece	STD 11(HRC 60)	

의한 가공 특성에서 건식 냉각 방식이 정상적인 마멸로 바람직하다는 연구 결과⁽⁶⁾에 의해 공기에 의한 냉각 방식을 택하였다. 사용된 공구와 가공 조건은 Table 1과 같다. Cimatron을 이용하여 모의 가공과 검증은 마친 후 NC데이터를 생성하였다. 생성된 데이터는 DNC를 이용하여 RS-232C로 머시닝센터에 전송하면서 가공을 하였다.

이론 최대 표면거칠기 h 는

$$h = R[1 - \cos\{\sin^{-1}(\frac{P}{2R})\}] \quad (1)$$

수직 스텝 S_V 와 수평 스텝 S_H 는

$$S_V = \sin\beta[2R \cdot \sin\{\cos^{-1}(\frac{R-h}{R})\}] \quad (2)$$

$$S_H = \cos\beta[2R \cdot \sin\{\cos^{-1}(\frac{R-h}{R})\}] \quad (3)$$

$$P = \frac{S_V}{\sin\beta} = \frac{S_H}{\cos\beta} \quad (4)$$

2.3 실험 결과 고찰

2.3.1 치수

경사면의 가공시 경사위치가 작을수록 공구의 변형이 증가하는 경향⁽⁵⁾이 있는 연구 결과에 따라 치수의 변화를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 경사면의 치수는 배제하고 직접 측정이 가능한 직선부위만 측정하여 치수의 변화를 확인하였다. 도면 치수 그대로 Solid Works에서 모델링 하였고, Cimatron으로 NC데이터를 생성하고 가공하였기 때문에 도면 치수를 기준 치수로 하였다. 직접 측정이 가능한 Fig. 1 A, B부의 2개 부위만 측정된 결과는 두 부위 동일하게 0.02mm가 크게 측정되었다. 기준 치수 대비 지름이 증가됨을 알 수 있었다. 이는 엔드밀 가공시 공구의 변형에 따른 일반적인 형태를 나타내고 있다.

2.3.2 표면거칠기

가공후의 표면거칠기는 시편의 평면부와 경사면으로 구분하여 측정하였고 최대 표면거칠기로 비교하였다, 평면부는 수평 스텝을 기준으로 가공하였으며, 표면 거칠기는 실제 측정값이 이론 계산값보다 약 6.4배가 크게 측정되었다. 경사면의 경우는 절삭 깊이를 수직 스텝을 고정하여 가공하는 레이어(등고선)가공을 하였다. 동일 수직 스텝을 적용한 경우는 식 (1)과 (4)에 의해 경사각이 클수록 최대 표면거칠기가 양호한 것으로 계산된다.

측정값은 이론 계산값보다 경사각이 30°에서는 약 8배,

45°에서는 약 12배, 60°에서는 9.2배 정도로 높게 측정되었다. 그러나 실제 측정된 값은 4μm이내의 양호한 가공면을 확보하였다. 경사면에서의 최대 표면거칠기는 Fig. 4에서 계산된 이론 거칠기와 측정값을 보여 주고 있다.

가공품의 표면거칠기에 영향을 주는 요인으로는 CAM S/W에서 면 공차, 공구의 변형, 마모, 떨림, 기계의 정밀도 등을 생각할 수 있다.

면 공차는 곡면 모델링 제품의 NC데이터 생성 시 기준면에서의 허용 범위로 표현된다. 이는 표면거칠기에 직접 관계가 되며 면 공차를 작게 할수록 모델링 제품에 근접하게 되지만 NC 데이터의 길이가 길어지며, 또한 가공시간이 길어지는 단점이 있어 적절히 제품과 경제성을 고려하여 면 공차를 설정할 필요가 있다. 가공 조건에서 면 공차를 3μm으로 설정하여 NC데이터를 생성하고 가공하였다. 시편의 경우는 곡면과 달리 경사면이 직선부이기 때문에 적은 영향을 준 것으로 판단된다. Wang⁽⁵⁾ 등은 경사면에 대한 표면 거칠기는 경사위치가 작을수록 양호한 표면거칠기의 연구 결과를 얻었다. 경사위치가 클 경우 공구의 바깥날로 절삭이 이루어질 때 절삭속도가 최대가 되고 이러한 과도한 절삭속도는 공구의 미세한 떨림이나 채터링 현상을 일으키는 원인이 되며, 가공시 채터링은 표면거칠기에 악영향을 줄 수 있는 중요한 요소로 분석하였다. 본 연구에서는 위 연구와 달

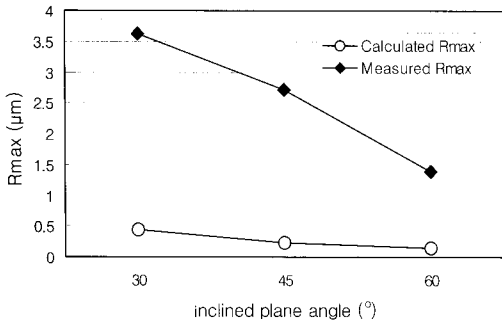


Fig. 4 Surface roughness on inclined plane

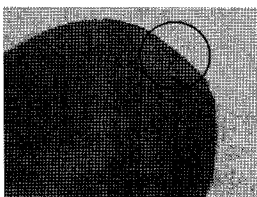


Fig. 5 Chipping of ball end mill

리 동일한 레이어(등고선)의 경우는 경사각이 클수록 이론 최대 표면거칠기는 좋아진다는 것과 같이 동일한 경향으로 실험 결과를 얻었다. 이론값보다 측정값이 높은 것은 면 공차, 공구의 변형, 치핑의 영향, 공구의 떨림, 기계의 정밀도 등 복합적인 원인의 결과로 사료된다. Fig. 5의 원형 부분은 가공 후 공구의 끝이 미세하게 떨어져나간 치핑을 보여 주고 있다.

2.3.3 진원도 및 동심도

Fig. 6은 각 부위별 진원도 측정 결과를 보여준다. 수직부와 경사면부를 비교하였을 때 수직부위가 양호한 진원도를 보여 주고 있으며, 지름이 작을수록 미소하지만 양호한 결과를 나타냈다. 경사부의 경우는 8.1~9.4μm으로 45°의 경우가 높고 30°와 60°의 경우가 낮게 측정되었다. 진원도의 크기는 표면 거칠기와 달리 원으로 된 곡선으로 면 공차가 직접적인 영향을 미친다고 판단된다. 측정된 값은 면 공차와 공구의 변형과 치핑 및 공구의 떨림, 기계의 정밀도 등 복합적 원인으로 나타난 결과로 생각할 수 있다. 각 부위별 진원도와 더불어 형상 정밀도를 알기 위해 동심도를 측정하였다.

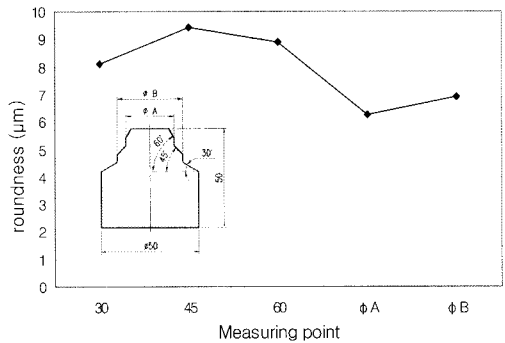


Fig. 6 Roundness result

동심도 <Conc_1> : 4.164μm

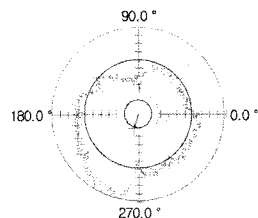


Fig. 7 Concentricity result

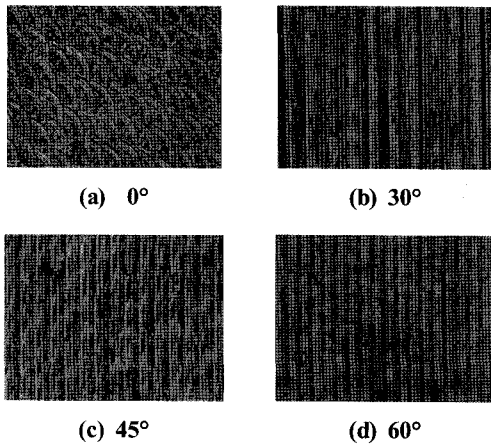


Fig. 8 Surface texture according to inclination angle

측정부는 수직부인 Fig. 1의 A, B부로 측정결과 4.164 μm 으로 양호한 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 7).

Fig. 8은 공구 현미경을 이용하여 340배의 배율로 평면부와 경사부의 각도 부위별로 촬영하였다. 평면부의 경우는 공구의 절입 깊이에 따라 공구 중심의 절삭속도와 외부의 속도 차이로 중심부에서는 가공되지 않고 외부만 가공됨으로서 이송의 자리가 분명하게 보이고 있으며, 경사부의 경우는 30°에서 60°로 증가하면서 골의 간격은 좁아짐을 알 수 있다. 이는 수직 스텝을 일정하게 하였을 때 피크 피드가 경사각과 관계가 있으며, 경사각이 클수록 피크 피드가 작아져 표면 최대 거칠기가 좋아지는 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 표면 형상만 관찰한 경우는 30°와 60°의 경우는 일정한 골의 형태를 보여 주고 있으며, 45°의 경우는 다소 불규칙한 면을 보여 주고 있다.

3. 베벨기어 금형 가공

베벨기어를 냉간 단조로 성형하기 위해서는 성형시 높은 변형저항 때문에 발생하는 금형 압력을 견디기 위해 보통 2중 또는 3중 보강으로 금형을 제작한다. 본 연구에는 2중 보강 형태의 금형으로 제작 하였다. 베벨기어 형상이 있는 인서트의 경우는 STD 11, 보강링은 SCM440의 재질을 사용하였다. 보강링은 선반에서 황삭 가공을 하고 열처리한 후 연마하여 제작을 완료하였으며, 인서트의 경우는 선삭으로 황삭 가공을 하고 베벨기어의 치형은 머시닝센터를 이용하여 가공한 후 열처리를 하였다. 열처리된 인서트는 외부를 연마한 후에 보강링에 압입하였다. 열처리되고 압입된 금형

을 중삭가공과 정삭 가공을 하는 공정으로 금형을 가공하여 열처리시의 변형과 압입시 발생할 수 있는 변형량을 제거하는 치수로 제작하였다.

3.1 모델링 및 검증

본 연구에 사용된 금형의 베벨 기어는 Table 2의 사양에 준해 CAD/CAM을 이용하여 모델링하고 가공 후 물림 시험을 통해 검증된 데이터⁽⁴⁾의 크라운을 갖는 직선 베벨기어의 모델을 이용하여 Solid Works를 이용하여 금형을 3차원 모델링하였다(Fig. 9).

시뮬레이션을 통한 검증과 NC코드 생성은 Cimatron을 이용하였다. 열처리 후 치형 부분만 가공하는 것으로 설정하여 중삭, 정삭가공을 하였다. 가공조건은 기초실험과 동일한 조건인 Table 1을 기준으로 하였으며, 소프트웨어를 이용한 사전 모의가공으로 공구의 간섭 여부와 가공시간 등을 확인하였으며, 검증 시뮬레이션으로 치면 접촉부 패턴을 확인 후 포스트프로세서를 통해 NC데이터를 생성하였다. Fig. 10은 Cimatron에서 금형을 가공하기 위한 정삭 가공공정의 공구

Table 2 Specification of straight bevel gear

Item	Pinion Gear
Module	3.25
Pressure Angle	20°
Number of Teeth	15
Pitch Diameter	$\phi 48.750$
Addendum	3.25
Dedendum	4.06
Cone Distance	39.3371
Pitch Cone Angle	38°17'24"
Outer Cone Angle	43°0'47"
Root Cone Angle	32°23'38"

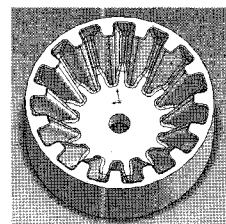


Fig. 9 Modeling of straight bevel gear die

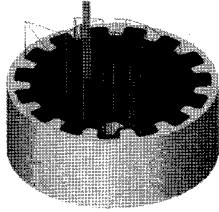


Fig. 10 Tool path for finish cutting

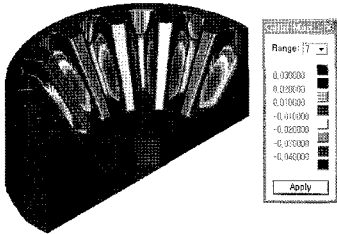
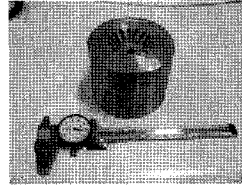
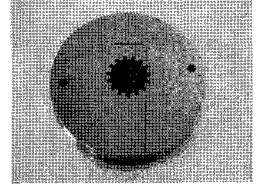


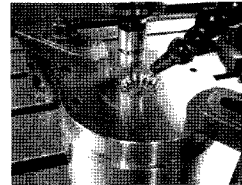
Fig. 11 Verification of crown teeth



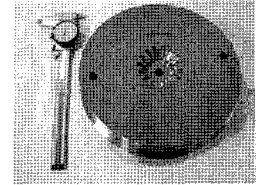
(a) Rough cut



(b) Shrink fit of insert and shrink ring



(c) Finish cut



(d) Completed die after machining

Fig. 12 Manufacturing process for bevel gear die

경로를 보여주고 있다.

크라운 치형을 갖는 직선 베벨기어는 피치 원추각상의 치면이 볼록렌즈와 같이 중앙부가 볼록한 크라운 형태를 갖고 있으며, 조립된 기어의 접촉을 중앙영역으로 되게 한다. 따라서 금형의 경우는 중앙부가 주변영역보다 낮은 크라운 형태를 필요로 한다. Fig. 11은 CAM 시스템의 검증 기능으로 금형의 치면부 크라운을 확인하는 그림이다. 직선 베벨기어 금형의 모델링을 기준으로 치수 변위를 0.01로 하여 비교하였다. 비교 결과 0.03mm의 크라운을 갖는 치형의 금형을 확인할 수 있었다.

3.2 머시닝센터에 의한 가공

Cimatron을 이용하여 모의 가공과 치수 검증을 마친 후 NC데이터를 생성하였다 데이터는 RS-232C로 머시닝센터에 전송하면서 가공하였다. Fig. 12는 금형 제작 과정을 보여 주고 있다.

3.3 실험 결과 및 고찰

3차원측정기를 이용하여 금형의 내경을 측정하였다. 가공 후의 치수는 기준치수 대비 0.02-0.03mm 작게 가공이 되었다. 시편 외경의 경우는 0.02mm 크게 나오는 경향과 동일하다고 할 수 있다. 내경 측정에서 오차가 나오는 것은 기어의 이수가 홀수이기 때문에 측정요소와 위치에 따라 약간의 측정 오차가 발생된 것으로 생각된다.

기하학적인 기어의 특성상 표면 거칠기와 형상 정밀도는 직접 측정할 수가 없었다. 따라서 시편의 결과로 추정하였다. 표면 거칠기의 경우는 경사각이 시편에서 30°경우가 최대 약 3.62 μ m 발생되고 각도가 커지면서 표면 거칠기가 좋아지는 경향이 있었다. 실제 베벨기어 금형의 경우는 약47°~57.6°로 가공된다. 시편에서 45°의 경우 2.71 μ m의 결과를 얻었다. 따라서 금형의 경우는 최대 2.71 μ m 이내로 가공이 된 것으로 판단되며, 상당히 양호한 표면 거칠기를 확보하였다. 진원도와 동심도 등 형상정밀도의 경우는 시편의 결과로 유추한다면 10 μ m 이내 가공이 이루어진 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 열처리된 고경도의 STD11(HRC 60) 직선 베벨기어 금형을 머시닝센터에서 볼 엔드밀로 제작하였다. 치수는 직접 측정하였으며, 기어의 특성상 측정이 어려운 부분은 시편을 통해 사전에 최대 거칠기, 진원도, 동심도를 측정하여 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방전에 의해 제작되던 베벨기어 금형을 머시닝센터에서 고경도용 볼 엔드밀을 사용하여 황삭-열처리-중삭-정삭 공정으로 제작이 가능하였다. 이를 통해 가공시간의 단축과 반복 재현성을 확보하였다.
- (2) 가공된 치수는 공구 변형에 의해 0.02mm 정도 외경은

크게, 내경은 작게 가공되었다.

- (3) 최대 표면거칠기의 경우 수직 스텝을 일정하게 했을 경우 각도가 크게 될수록 양호하였으며 측정값이 이론값보다 8-12배 정도 크게 측정되었지만 4 μm 이내로 양호하게 가공되었다.
- (4) 진원도의 경우는 수직부위와 경사부위 및 각도에 따른 차이가 미소하였다.
- (5) 향후 고경도의 합금 공구강 소재를 이용한 3차원 형상의 금형 제작에 CAD/CAM과 고경도용 볼 앤드밀을 이용한 제작을 가능하게 하였다.

참고 문헌

- (1) Lee, K. O., Chin, M. H., Jae, J. S., and Kang, S. S., 2003, "Development of Accurate Bevel Gear Die," *Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Spring Conference*, pp. 43~46.
- (2) Koshy, P., Dewes, R. C., and Aspinwall, D. K., 2002, "High Speed End Milling of Hardened AISI D2 Tool Steel (~58 HRC)," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, No. 2, pp. 266~273.
- (3) Kita, Y., Furuike, H., Kakino, Y., Nakagawa, H., and Hirogaki, T., 2001, "Basic Study of Ball End Milling on Hardened Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, No. 1/3, pp. 240~243.
- (4) Lee, K. H. and Park, Y. B., 2008, "Application of CAD/CAM System to the Manufacturing and the Verification of Straight Bevel Gear with Crown Teeth," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 9, No. 2, pp. 270~275.
- (5) Wang, D. H. and Park, H. C., 2001, "Tool Deflection and Geometric Accuracy to the Change of Inclination Position Angle during Machining Sculptured Surface," *Transactions of the Korea Society of Machining Tool Engineers*, Vol. 10, No. 4, pp. 55~64.
- (6) Lim, Y. U., Kim, J. S., Kang, M. C., and Park, H. Y., 2001, "Improvement Technique of Machinability in machining High-hardened Core Part through High Speed Machining," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, pp. 88~93.