

크라운 치형을 갖는 직선 베벨기어의 제작 및 검증을 위한 CAD/CAM 시스템 활용

이강희¹, 박용복^{2*}

Application of CAD/CAM System to the Manufacturing and the Verification of Straight Bevel Gear with Crown Teeth

Kang-Hee Lee¹ and Yong-Bok Park^{2*}

요 약 자동차용 직선 베벨기어는 대량으로 생산되고 있기 때문에 생산성 향상을 위해 기어가공용 전용기에서 직접 가공하던 것을 냉간 단조 제조방식으로 변경되어 생산되고 있다. 시행착오를 최소화하여 단조에 의한 정확한 최종 형상의 정밀 제품을 조기에 개발하고, 반복 재현성을 확보하는 방법으로 CAD/CAM 시스템의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 CAD/CAM 시스템을 활용하여 크라운 치형을 갖는 직선 베벨기어를 모델링 한다. 이를 토대로 NC 데이터 생성과 검증을 통해 가공품을 사전에 예측할 한 후 물림시험의 결과를 통해 마스터 기어를 제작한다. 이러한 마스터 기어를 통하여 금형제작이나 가공에 필요한 지그제작을 가능하게 한다.

Abstract The straight bevel gear for automobile part has been manufactured by the cold forging instead of the gear machining tool for the mass production. The application to CAD/CAM system has been necessary in order to develop the precision product quickly by forging through the minimization of trial and error and confirm the reproducibility. In the study, the straight bevel gear with the crown teeth has been modelled by the CAD/CAM system. The master gear after the gearing test has been machined after the modelling, NC data generation and verification. The die for forging and the jig for machining has been manufactured using the master gear.

Key Words : CAD/CAM, Straight Bevel gear, 3D Modeling, Master gear, Crown teeth, verification

1. 서론

동력을 전달하는 중요한 기계요소 중 하나인 직선 베벨 기어는 자동차, 산업기계, 운반용 기계, 공작기계 등 산업의 여러 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다. 일반적인 제작 방법으로는 기어소재를 기어 가공용 전용기계에서 절삭 가공하는 것이다. 최근에는 소성가공기술의 발달과 생산성 향상의 목적으로 자동차용 직선 베벨기어의 경우는 열간 단조와 냉간 단조 사이징 방식을 결합한 공정 등 다양한 방법의 소성가공방식으로 제조를 하고 있다.

이 소성가공에 사용되고 있는 직선 베벨기어 금형은 과거에는 기어 가공용 전용기계에서 방전가공용 전극을 방전 갭만큼 줄여서 제작하였다. 이 방법은 반복재현성이

부족하여 금형을 제작할 때마다 제품의 검증이 필요하였다.

CAD/CAM 분야의 발달은 마스터(Master)가 되는 기어를 3차원측정기에서 측정하여 기어의 치면 데이터로 금형을 제작함으로써 반복재현성을 실현하였다고 소개하고 있다.^[1]

따라서 생산 현장에서는 정확한 치수의 최종형상 제품을 시행착오 없이 조기에 개발하고 생산할 수 있는 방법이 필요하며, 반복재현성을 보장하는 정보를 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 직선 베벨기어 제작에 반복재현성을 확보하기 위하여 CAD/CAM 시스템을 활용하였다. 기어를 직접 모델링하고, S/W의 검증 기능을 이용하여 모델링을 확인 및 예측한 후에 머시닝센터에서 직접 가공하는 방법으로 제작하였다. 물림시험(Rolling Test)에서 치면 접촉 상태와 백래시의 확인을 통하여 마스터 기어로 확보하였다. 이 마스터 기어는 단조용 금형의 제작과 가공에 필요한 치공구 제작을 가능하게 한다.

¹공주대학교 대학원 기계공학과

²공주대학교 기계자동차공학부

*교신저자: 박용복(ybpark@kongju.ac.kr)

2. 모델링 및 가공

본 논문의 실험에 사용된 도구는 CAD/CAM 시스템, 머시닝센터로 구성되어 있으며, CAD 프로그램인 Auto CAD는 인벌류트 곡선을 그리고 Solid Works는 3차원 모델링을 하였다. CAM 프로그램은 Cimatron S/W를 이용하여, 모델링의 검증과 NC코드를 생성하였다. 검증된 데이터는 RS-232C를 통한 DNC작업으로 머시닝센터에서 직접 가공하였다.

2.1 CAD를 이용한 모델링

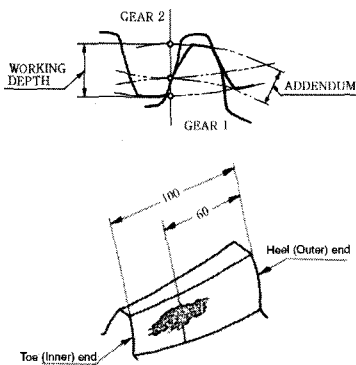
직선 베벨기어는 표준 직선 베벨기어와 그리슨식 직선 베벨기어가 있다. 그리슨식 직선 베벨기어는 치면에 크라운이 있으며, Coniflex 기어라고도 하고 그리슨의 Coniflex 전용기에 의해 만들어진다. 따라서 표준 직선 베벨기어와 그리슨식 베벨기어의 계산은 별도의 식으로 계산된다.^[2]

차량용 차동기어는 그리슨 전용기에 의해 가공되어 만들어진 그리슨식 직선 베벨기어가 사용되고 있으며, 치면이 크라운 형태를 갖고 있다.^{[2][3]}

본 연구에 사용된 직선 베벨기어는 표 1과 같이 표준 직선 베벨기어 사양을 사용하였으며, 피니언 기어의 치면은 크라운을 갖는 치형이며 사이드 기어의 치면은 직선 치형이다.

따라서 피니언 기어는 그림 1의 치면 접촉부의 기준에 부합하는 크라운 형태로 사이드 기어는 직선 형태의 치형이 되게 직선 베벨기어를 모델링 하였다.

인벌류트 곡선은 J.H. Kuang 등의 논문에 인용된 식^[4]를 이용하여 만든 프로그램으로 Gear Profile Generator v0.8^[5]을 사용하여 작도하였다.



[그림 1] 치면 접촉부 기준^[2]

[표 1] 직선 베벨기어의 사양

구분	Pinion Gear	Side Gear
모듈	3.25	3.25
압력각	20°	20°
잇수	15	19
축각	90°	
피치원경	φ 48.750	φ 61.750
어텐덤	3.25	3.25
디텐덤	4.06	4.06
원추거리	39.3371	39.3371
피치 원추각	38°17'24''	51°42'36''
치선 원추각	43°0'47''	56°30'7''
치저 원추각	32°23'38''	45°17'34''
백래시	0.15-0.2	

베벨기어의 치형은 상당 스퍼기어에 해당하는 형태를 갖는다. 따라서 표 1을 기준으로 하여 상당스퍼기어의 반지름 즉 백코운 반지름(back cone radius)과 상당 스퍼기어를 환산^[6]하여 피치원경에서의 인벌류트 곡선을 작도하고 확인하였다.(그림 2)

$$R_e = \frac{D}{2\cos\gamma} \quad (1)$$

$$Z_e = \frac{2\pi R_e}{p} = \frac{\pi D}{p} \cdot \frac{1}{\cos\gamma} = \frac{Z}{\cos\gamma} \quad (2)$$

여기서,

R_e : 백코운 반지름(back cone radius),

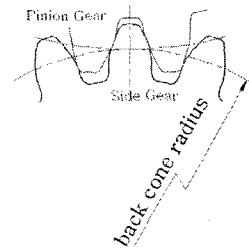
D : 베벨기어의 피치원 지름

γ : 피치 원추각

p : 베벨기어의 대단부 치형의 피치

Z : 베벨기어의 잇수

Z_e : 베벨기어의 상당 스퍼기어의 잇수



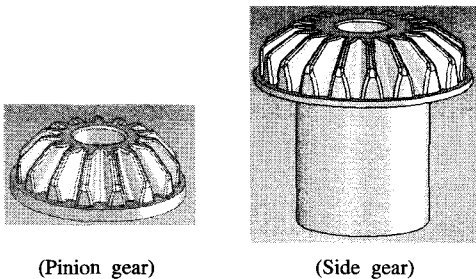
[그림 2] 치형 곡선

3차원의 형상의 베벨기어를 모델링하기 위해 피니언 기어와 사이드 기어 각각의 대단부와 소단부의 백 코운 반지름(back cone radius)에서의 모듈과 어덴텀, 디텐덤을 계산하여 그 때의 값을 입력하여 인벌류트 곡선으로 그렸다. 그려진 각각의 인벌류트 곡선은 Auto CAD에서 편집 후 3차원 CAD인 Solid Works를 이용하여 로프트 컷으로 모델링 하였다. 특히 피니언 기어의 경우는 치면 접촉부를 요구하는 수준으로 맞추기 위해 크라운 형태로 모델링을 하였다.



[그림 3] 모델링 과정

그림 3은 생성된 인벌류트 곡선을 수정하고 편집 한 후에 Solid Works에 삽입하고, 이를 이용하여 로프트 컷과 원형패턴을 이용하여 피니언 기어를 모델링 하는 것이며, 그림 4는 모델링이 완성된 피니언 기어와 사이드 기어를 보여준다.

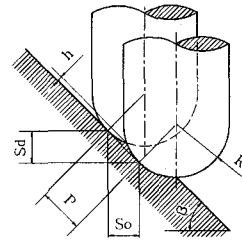


[그림 4] 모델링 완성품

2.2 CAM를 이용한 검증

NC코드와 시뮬레이션을 통한 검증은 Cimatron S/W를 이용하였다. 원형소재를 이용하여 치형 부분만 가공하는 것으로 설정하여 황삭, 중삭, 정삭을 하였다. 소프트웨어를 이용한 사전 모의가공으로 공구의 간섭 여부와 가공 시간 등을 확인하였으며, 검증 시뮬레이션으로 치면 접촉부 패턴을 확인 후 포스트프로세서를 통해 NC데이터를 생성하였다.

CAM S/W를 이용한 가공조건 중에서 정삭의 경우는 최종 제품의 정밀도와 가공면 조도에 많은 영향을 주기 때문에 조건을 충분히 고려하여야 한다. 곡면 가공에서 볼 엔드밀을 이용하여 가공할 경우에는 h부의 미가공 부위를 남기게 되며, 이 높이는 이론가공면 조도가 된다.



[그림 5] 경사면에서 볼 엔드밀과 이론 가공면 조도

본 연구에서는 주어진 가공면 조도를 기준으로 가공에 필요한 수평방향의 공구경로 이송량인 S_0 와 수직방향의 공구 이송량인 S_d 를 공작물의 경사각인 β 을 고려하여 다음 식을 유도하고 이용하였다.

이론 가공면 조도는

$$h = R \left[1 - \cos \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{P}{2R} \right) \right\} \right] \quad (3)$$

피크 피드 피치(P)식으로 변환하면

$$P = 2R \cdot \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right) \right\} \quad (4)$$

$S_d = P \times \sin \beta$, $S_o = P \times \cos \beta$ 을 각각 (4)식에 대입하면

$$S_d = \sin \beta \left[2R \cdot \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right) \right\} \right] \quad (5)$$

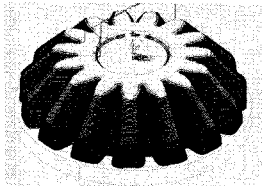
$$S_o = \cos \beta \left[2R \cdot \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{R-h}{R} \right) \right\} \right] \quad (6)$$

일반적으로 경사면의 곡면을 가공할 경우에는 상기 식 (5), (6)에 의하여 수직과 수평의 이송량을 계산할 수 있다. 만약 동일한 공구반경을 갖는 볼 엔드밀을 사용하여 요구되는 이론 가공면 조도를 얻기 위해 이송량을 계산한다면 45°를 경계로 한다.

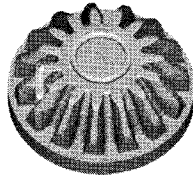
본 제품인 피니언 기어와 사이드 기어를 가공할 때 사용되는 공구는 황삭은 $\phi 6$ 볼 엔드밀, 중삭은 $\phi 3$ 볼 엔드밀, 정삭은 $\phi 2$ 볼 엔드밀을 사용하였다. 정삭에서는 평면인 상부와 하부는 수평영역 가공으로 수평 이송량을 주었고, 치형 부분이 있는 경사면은 각도와 공구의 경로를 고려하여 선정하였다. 상기식의 경사각으로 환산하면 피

니언은 47°, 사이드는 33.48°로 각각 수직과 수평가공이 가공시간을 줄일 수 있다. 그러나 제품의 특성과 가공시 공구 경로를 고려할 때 대칭인 형상으로 전체적으로 일정한 치수와 가공면 조도를 확보하기 위해 다소 시간이 많이 소요 되더라도 수직 이송값으로 가공되는 레이어 가공(일명 등고선가공)으로 NC데이터를 생성하였다. 이론 가공면 조도를 연마면의 최대 거칠기 값인 6.3 μ m을 기준으로 피니언은 수직 이송량을 0.16으로 계산되어 0.15로, 사이드는 0.12로 계산되어 0.1로 설정하였고, 제품의 정도에 영향을 주는 공차는 0.005로 설정하고, 하향 방향으로 가공되게 하였다.

그림 6은 검증을 이용한 피니언 기어의 정삭공구 경로를 보여주고 있으며, 그림 7은 공구의 간섭과 움직임을 확인하는 모의가공을 보여주고 있다.



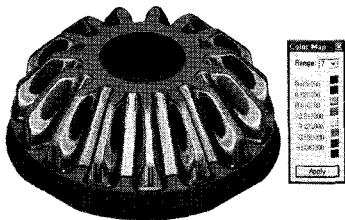
[그림 6] 정삭 공구경로



[그림 7] 모의 가공

그림 8은 CAM S/W를 이용하여 피니언 기어의 치수를 검증하였다. 치면의 크라운 부위와 각 부위의 치수를 확인하기 위하여 치면에 크라운을 주지 않은 모델링을 기준으로 치수의 변위를 0.01로 하여 비교하였다.

그림 1의 치면 접촉부 기준에 부합하게 0.03정도의 크라운 형태를 분명하게 확인할 수 있었다.



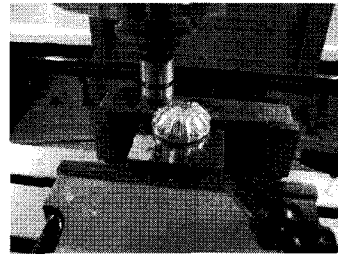
[그림 8] 치수 검증

2.3 머시닝센터에 의한 가공

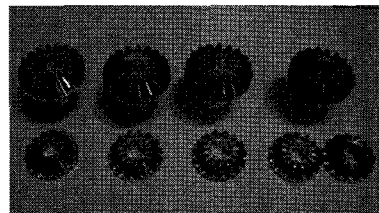
모의 가공과 치수 검증을 마친 후 CAM S/W를 통해 생성된 NC데이터는 DNC를 이용하여 RS-232C로 머시닝센터에 전송하면서 가공을 하였다. 소재는 절삭성이 좋은 A6061-T6를 사용하였으며, 가공조건은 황삭은 ϕ 6 볼 엔드밀을 사용하여 회전수는 3000rpm, 이송은 400mm/min,

중삭은 ϕ 3 볼 엔드밀을 사용하여 회전수는 3500rpm, 이송은 350mm/min, 정삭은 ϕ 2 볼 엔드밀을 사용하여 회전수는 4000rpm, 이송은 250mm/min으로 가공하였다. 모의 가공에서 피니언기어의 경우는 약 3시간10분, 사이드는 4시간 40분이 예측 되었으나 실제 가공시간은 각각 3시간 30분과 5시간 10분으로 20-30분이 더 소요 되었다. 이는 황삭, 중삭, 정삭의 공정마다 준비시간과 초기 절삭시 안전과 공구의 파손을 피하기 위해 싱글 블록 운전과 이송속도를 조정하면서 가공한 결과로 사료된다.

그림 9는 기계에서 가공 되고 있는 모습을 보여주고, 그림 10은 실험에 의해 가공 완료된 제품들을 보여주고 있다.



[그림 9] 기계 가공



[그림 10] 가공 제품

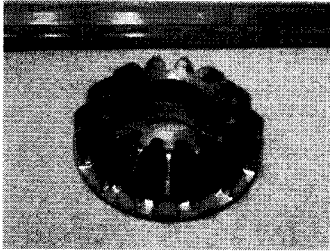
3. 물림시험(Rolling Test)

가공 완료된 피니언 기어와 사이드 기어를 베벨기어의 평가방법중의 하나인 물림시험(Rolling Test)을 행하였다. 크라운이 있는 기어의 치면 접촉부 레벨 기준(JIS B 1741)은 A레벨의 경우 치높이 방향의 접촉은 유효치 높이의 50%이상, 치폭 방향의 접촉은 치선 길이의 40% 이상으로 하고 있다.^[2]

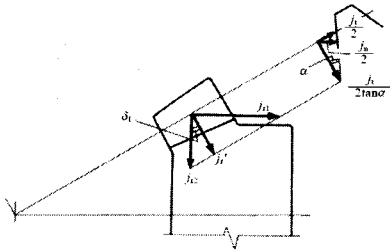
본 시험결과 피니언 기어는 그림 11의 사진에 보여 주고 있으며, 치형 길이 약 15mm에 접촉부가 7mm전후의 접촉함으로서 46% 접촉하였으며, 유효높이는 50%이상 접촉함을 볼 수 있었다.

이 결과는 CAD/CAM S/W에서 모델링하고 검증한 결

과와 실제 가공한 제품의 결과가 잘 일치함을 보여주고 있다. (그림 8, 그림 11)



[그림 11] 치면 접촉부 사진



[그림 12] 직선 베벨기어의 백래시

맞물린 직선 베벨기어에서의 백래시 관계는 다음 식들로 표현된다.^[2]

$$j_n = j_t \cos \alpha \quad (7)$$

$$j_r' = \frac{j_t}{2 \tan \alpha} \quad (8)$$

$$j_{r1} = \frac{j_t}{2 \tan \alpha \sin \delta_1} \quad (9)$$

$$j_{r2} = \frac{j_t}{2 \tan \alpha \sin \delta_2} \quad (10)$$

여기서

j_t : 피치선상의 원주 백래시

j_n : 백래시

j_r : 레이디얼 백래시

j_{r1} : 피니어 중심선방향의 레이디얼 백래시

j_{r2} : 기어 중심선방향의 레이디얼 백래시

백래시의 측정은 피니언 기어와 사이드 기어를 도면에 준한 조립 거리로 정확히 맞춘 상태로 상기 식 (9), (10)의 레이디얼 백래시가 없다고 가정하여 측정한 결과 0.13

~0.14의 측정값이 나왔다.

백래시는 옵셋을 이용하여 도면 치수인 0.15~0.2를 충족할 수 있는 0.16이 되게 NC 데이터를 생성하고 가공하였다. 측정 결과와는 0.02~0.03의 차이를 보이고 있으며 이는 최종 정삭공정에서 지름이 2mm인 볼 엔드밀이 공구홀더에서 가공깊이 14mm이상을 확보한 20mm가 돌출하여 가공함으로써 외팔보형태의 공구가 절삭저항에 의해 공구의 휨 변형 발생으로 가공치수에 영향을 미친 것으로 생각된다. 이는 향후 보정이 필요함을 알 수 있었다.

4. 결론

CAD/CAM 시스템을 이용하여 피니언 기어를 치면 접촉부의 기준에 부합하는 크라운 형태가 되게 직선 베벨 기어를 직접 모델링하고, 검증 한후 가공하였다. 가공품을 물림 시험으로 확인 한 결과 소프트웨어로 검증한 결과와 직접 제작한 제품의 치면 접촉부 패턴은 일치하였으며, 백래시의 경우는 적게 측정되었다. 이 결과로부터

- 1) 크라운 치형을 갖는 직선 베벨기어의 제작에 CAD S/W를 이용하여 직접 모델링한 후 적용할 수 있으며,
- 2) 모델링 된 제품은 CAM S/W의 검증 기능을 활용하여 치면 접촉에 대한 패턴 형상이 사전에 확인 가능하다는 것을 실험으로 입증하였고,
- 3) 백래시의 경우는 공구의 변형으로 차이가 보이며, 추후 공구 변형에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.
- 4) CAD/CAM 시스템의 활용으로 반복재현성을 확보함으로써 개발 기간의 단축과 시행착오를 줄일 수 있으며 향후 소성가공분야의 금형제작에 필요한 전극봉 제작이나 단조품 가공시 필요한 지그제작에 활용할 수 있을 것이다. 특수 장비와 공구를 이용한 다면 직접 소성가공에 필요한 금형제작의 가능성을 제시해 본다.

참고문헌

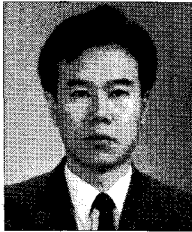
- [1] 육성진, "금형의 관점에서 본 냉간단조의 고정도화", 월간 프레스 기술, pp.33-47, 2월, 2004.
- [2] Stock Drive Products / Sterling Instrument "Handbook of Metric Drive Component", 2003.
- [3] Dr. Hermann J. Stadtfeld, "Straight Bevel Gear on

Phoenix Machines Using Coniflx Tools", The Gleason Works, 2007.

- [4] J.H. Kuang and Y. T. Yang, "An Estimate of Mesh Stiffness and Load Sharing Ratio of a Spur Gear Pair", International Power Transmission and Gearing Conference-Volume 1, DE-Vol.43-1, pp.1-9, 1992.
- [5] 김동호, "Gear Profile Generator v0.8", 2006.
- [6] 정선모, 한동철, "표준기계설계학". 동명사, p.622, 1992.

박 용 복(Yong-Bok Park)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1987-1991년 : 한국중공업,KIST, 한국생산기술연구원
- 1995년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 9월 - 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

소성가공, 유한요소법, CAD/CAM/CAE

이 강 희(Kang-Hee Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 한밭대학교 기계공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 공주대학교 기계공학과 (박사과정 수료)
- 1994년 - 현재 : 충남인력개발원 컴퓨터응용기계과

<관심분야>

소성가공, 유한요소법, CAD/CAM/CAE