스파이럴과 스트레이트 베벨기어 가공 시 비용 및 생산성 비교연구

박창섭*, 양완석⁺, 김수진⁺⁺

(Manuscript received: Aug, 29, 2012 / Revised: Oct, 29, 2012 / Accepted: Oct, 31, 2012)

Comparative Study of the Manufacturing Cost and Productivity of Spiral and Straight Bevel Gear

Chang-Seop Park*, Yan-Seok Yang⁺, Su-Jin Kim⁺⁺

Abstract

The tractor front axle has the lower standard for noise and vibration relatively and it increase the possibility to develop of the alternative straight bevel gear of the expensive spiral bevel gear. The purpose of this paper is to compare of the spiral vs. the straight bevel gear manufacturing process. The manufacturing cost and productivity are compared after the spiral bevel gear of the tractor front axle is replaced of to the straight bevel gear. If spiral bevel gear is replaced to straight bevel gear, the cost is reduce 4.6% and productivity is increase 18%.

Key Words : Bevel gear(베벨기어), Straight(스트레이트), Spiral(스파이럴), Manufacturing process(제품가공), Cost(비용), Productivity(생산성)

1. 서론

교차하는 두 회전축 사이의 운동을 전달하는 베벨기어(Bevel Gear)는 치선이 직선인 스트레이트 베벨기어(Straight Bevel Gear)와 나선인 스파이럴 베벨기어(Spiral Bevel Gear)가 있다. 스트레이트 베벨기어는 가공이 쉽고 생산 비용이 낮아 차동 기어장치에 사용된다. 스파이럴 베벨기어는 접촉면이 부드럽게 변해 진동과 소음이 작고 고속에 적합하다⁽¹⁾.

트랙터 앞 차축 드라이브 기어의 구조는 Fig. 1과 같으며, 구동력이 휠 샤프트와 파이널 드라이브 기어(Final Drive Gear)를 거쳐 전달된다⁽²⁾. 베벨기어 및 피니언기어(Pinion Gear)는 세트로 구성되며 가공방법에 따라 스파이럴 베벨 혹은 스트레

이트 베벨로 구분이 된다.

본 연구는 소음이 작고 고속에 적용되는 자동차와 비교하여 비교적 낮은 필요조건을 가진 트랙터 앞 차축 파이널 드라이브 기어를 대상으로 한다. 현재 적용되고 있는 스파이럴 베벨기어의 필요조건을 검토하여, 이를 만족 하는 스트레이트 베벨기어를 설계하고 제작하여 필요조건 만족 여부를 확인 하고 두 가공의 비용을 비교하여 이에 따른 기대효과를 고찰하고자 한다.

기존 논문들은 두 베벨기어의 성능 특성 연구에만 집중되어 있다⁽³⁻⁵⁾. 본 논문은 두 가공이 모두 필요성능을 만족할 때, 비용 측면을 비교 하여 기어 설계 시 원가를 고려할 수 있도록 하고, 이용 가능한 가공 장비의 폭넓은 선택이 가능하도록 한다.

* 경상대학교 융합과학기술대학원 기계시스템학과

+ 경상대학교 기계공학부

++ 교신저자, 경상대학교 기계공학부

주소: 660-702 경남 진주시 진주대로 501

✉ Corresponding Author E-mail: sujinkim@gnu.ac.kr

Fig. 1 The Final Drive Gear of Tractor Front Axel

2. 스파이럴 대체 스트레이트 베벨기어 가공

2.1 가공 공정 비교

스파이럴 베벨기어와 스트레이트 베벨기어 그리고 스파이럴 피니언기어와 스트레이트 피니언기어를 가공하는 가장 일반적인 공정들을 Fig. 2에 나타내었다. 베벨기어와 피니언기어는 Fig. 2와 같이 소재 형상을 만드는 단조(Forging), 기어자리와 축 연결부를 정밀 가공하는 선삭(Turning), 스파이럴 치형을 만드는 스파이럴 베벨커팅(Bevel cutting)과 스트레이트 치형을 만드는 스트레이트 베벨커팅, 회전축과 연결되는 스플라인(Spline) 홈을 가공하는 브로칭(Broaching), 표면경도를 높이는 침탄(Carburizing) 열처리, 열처리 후 경도가 높아진 베어링 조립부를 정밀 가공하는 연삭(Grinding) 공정으로 만들어진다. Fig. 2의 베벨기어와 피니언기어 3D모델위에 구체적인 선삭 면, 베벨커팅 위치, 브로칭 위치, 연삭 면은 실선으로 표시하였다.

스파이럴 베벨기어와 피니언기어를 만드는 경우는 Fig. 3(a)의 스파이럴 베벨커팅 공정을 이용해 스파이럴 치형을 만들게 되고, 스트레이트 베벨기어와 피니언기어를 만드는 경우는 Fig. 3(b)의 스트레이트 베벨커팅 공정을 이용하게 된다.

베벨기어는 포메이팅(Formating) 가공타입으로, 기어 형상을 절삭하기 위해 기어와 기어 사이에 커터가 직선으로 절삭하여 기어형상을 완성한다. 피니언기어는 제네레이팅(Generating) 가공타입으로, 기어 형상을 절삭하기 위해 기어와 기어 사이에 직선으로 커터가 절삭하고 다시 좌, 우로 커터를 조절하여 기어 형상을 완성한다.

2.2 스파이럴 대체 스트레이트 베벨기어 설계

개발 기준이 되는 스파이럴 베벨기어 및 피니언기어의 각각의 제원은 기어 이의 크기를 나타내는 모듈(Module), 피치원에

Fig. 2 Manufacturing Process

Fig. 3 Spiral vs. Straight Bevel Cutting Process

접하는 접선과 두 기어의 작용선이 이루는 압력각(Pressure angle), 기어의 이 줄기가 비틀린 정도를 나타내는 비틀림각(Helix angle), 기어이수(Number of Tooth)가 있다. 현재 적용되고 있는 스파이럴 베벨기어와 피니언기어를 스트레이트 베벨기어와 스트레이트 피니언기어로 설계 하여 제원을 Table 1에 나타내었다.

두 기어의 필요조건은⁽⁶⁾ 기어가 하중을 받을 때, 두 기어가 접촉할 때 기어의 표면이 설계된 수명시간 내에 견딜 수 있는 하중을 결정하는 면압강도(Flank Pressure)와 이 뿌리 부분에서 발생하는 응력 값인 굽힘강도(Bending Strength)이다.

Table 2는 스파이럴 베벨기어 및 피니언기어의 필요조건에 대하여 대체 적용할 수 있는 스트레이트 베벨기어 및 피니언기어의 강도를 K社의 KISS 프로그램으로 설계하여 검토한 결과이다. 스파이럴 베벨기어와 피니언기어의 면압강도는 312

Table 1 Spiral vs. Straight Bevel Gear Specification

		Spiral Gear	Straight Gear
Module		5.5	6.5
Pressure angle		20°	20°
Helix angle		5°	0°
Number of Tooth	Pinion	10T	10T
	Bevel	51T	43T

Table 2 Spiral vs. Straight Bevel Gear Strength (kgf/mm²)

		Spiral Gear	Straight Gear
Flank Pressure		312	344
Bending Strength	Pinion	155	180
	Bevel	145	169

kgf/mm²이며, 스트레이트 베벨기어와 피니언기어의 면압강도는 344kgf/mm²의 결과 값을 얻어 면압강도 조건을 만족하였다. 스파이럴 베벨기어 굽힘강도는 145kgf/mm²이고, 스파이럴 피니언기어 굽힘강도는 155kgf/mm²이다. 스트레이트 베벨기어 굽힘강도는 169kgf/mm² 이고, 스트레힘강도 조건을 만족하였다.

2.3 스트레이트 베벨기어 측정

스파이럴 베벨 및 피니언기어의 필요조건을 만족하는 스트레이트 베벨 및 피니언기어를 제작하여 Fig. 4의 기어 측정 장치로 단일 피치(Pitch Variation), 인접 피치(Pitch Error), 누적 피치(Accumulative Pitch Error), 흔들림(Run Out)을 측정하였다⁽⁷⁻⁸⁾. 스트레이트 베벨기어는 Fig. 4(a)와 같이 스트레이트 피니언기어는 Fig. 4(b)와 같이 측정하여, 측정 데이터를 일반적으로 농기계 기어의 기준인 JIS(Japanese Industrial Standards) 4급과 비교하여 Table 3에 나타내었다. 스트레이트 베벨기어의 단일피치 오차 23~27μm < 62μm, 인접피치 오차 39~45μm < 81μm, 누적피치 오차 157~194μm < 250μm, 흔들림 오차 165μm < 200μm 는 모두 JIS 4급 기준 보다 작아 기준 품질을 만족하고 있다. 스트레이트 피니언기어의 측정 오차들 역시 모두 JIS 4급 기준 보다 작아 품질을 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Straight Bevel & Pinion Gear Inspection (μm)

Item	Bevel Gear		Pinion Gear	
	JIS4	Data	JIS4	Data
Pitch Variation	62	23~27	56	46~42
Pitch Error	81	39~45	73	68~61
Acc. Pit. Er.	250	157~194	230	101~106
Run Out	200	165	100	77

(a) Bevel gear inspection

(b) Pinion gear inspection

(c) Contact area inspection

Fig. 4 Straight Bevel & Pinion Gear Inspection

접촉 검사는 서로 맞물리고 있는 기어를 계속해서 회전시켰을 때 생기는 접촉 형상과 위치를 보고 검사한다. 베벨기어와 피니언기어의 접촉이 좋지 못 할 경우 소음과 진동 혹은 구동전달에 문제가 발생 할 수 있다⁽⁹⁾. 스트레이트 베벨기어 및 피니언기어 샘플 제품의 접촉 검사 결과가 Fig. 4(c)와 같이 접촉 기준을 만족하고 있다.

3. 가공비용 및 생산성 비교 분석

3.1 비용 시간 계산 방법

경영학에서는 일반적으로 제조비용은 재료비, 가공비, 인건비 등의 합으로 계산 된다⁽¹⁰⁾. 베벨기어의 경우는 세부적인 항목의 계산방법이 발표된바 없고 비용 계산이 기업의 경험에 많이 의존하고 있어 수학적 접근이 필요하다. 본 연구에서는 재료비와 단조비용은 무게, 선삭공정은 가공시간, 베벨가공 공정은 치의 개수, 브로치 공정은 절삭시간, 침탄은 무게를 기준으로 식 (1)을 만들어, 베벨기어의 가공비용을 계산할 수 있도록 했다.

$$P_T/N = C_M M_M + C_P M_M + C_T T_T + C_G N_G + C_B T_B + C_C M_C \quad (1)$$

P_T : 총비용(W), N : 생산량(개), C_M : 재료비(W/kg)

M_M : 재료무게(kg), C_P : 단조비(W/kg), C_T : 선삭비(W/min)

T_T : 선삭시간(min), C_G : 베벨비용(W/T), N_G : 이수(T)
 C_B : 브로칭비(W/min), T_B : 브로칭시간(min)
 C_C : 침탄비(W/kg), M_C : 기어무게(kg)

재료비와 단조비용은 원소재의 무게, 침탄비용은 최종 제품의 무게로부터 계산되며, 비용의 기준인 무게는 Fig. 2의 3D모델에서 계산되었다.

선삭가공, 베벨가공, 브로칭 공정은 각각 가공시간으로부터 비용이 계산된다. 그중 선삭가공의 특성은 치형이 가공될 부분과 축과 베어링이 조립될 면을 정삭하는 것으로, 선삭가공 비용계산에 사용되는 가공시간은 가공면적을 선삭속도와 이송속도의 곱으로 나누고 준비시간을 더해 식 (2)와 같이 예측할 수 있다⁽¹²⁾.

$$T_T = t_{t0} + a_t / (v_t f_t) \quad (2)$$

T_T : 선삭시간(min),
 t_{t0} : 준비시간(min), a_t : 선삭면적(mm²)
 v_t : 선삭속도(mm/min), f_t : 이송속도(mm/rev)

베벨기어 단위 이 가공시간은 공정상수에 이의 크기를 나타내는 모듈과 이 폭을 곱해 식 (3)과 같이 계산되며, 단위 이 가공비용은 가공시간에 고정비와 시간에 비례하는 비용을 곱하는 식 (4)로 계산되고, 베벨가공 비용은 단위 이 가공비용에 이수를 곱해서 계산된다.

$$T_G = t_g m_g w_g / 60 \quad (3)$$

T_G : 이 가공시간(min)
 t_g : 공정상수(s/mm²)
 m_g : 모듈(mm/T) w_g : 이 폭(mm)

$$C_G = c_{g0} + c_{g1} T_G \quad (4)$$

C_G : 단위 이 가공비용(W/T)
 c_{g0} : 고정비상수(W/T) c_{g1} : 시간비상수(W/min)

식 (3)과 식 (4)에 이용된 구체적인 공정별 상수는 Table 4에 정리하였다. Table 4와 같이 포메팅 가공타입을 사용하는 베벨

Table 4 Bevel cutting equation constants

Eq.	Constant	Straight Bevel	Pinion(times)	Spiral(times)
(3)	t_g	0.527s/mm ²	2.5	1.18
(4)	c_{g0}	75W/T	1.94	1.2
(4)	c_{g1}	175W/min	1	1.2

기어보다 제너레이팅 가공 타입을 사용해야하는 피니언기어의 가공시간이 2.5배 더 소요되고 고정비용이 약 1.9배 더 소요된다. 또한 같은 가공 시간이 소요될 때 스트레이트 베벨가공 보다는 상대적으로 고가의 장비를 사용하는 스파이럴 베벨가공이 1.2배 더 비싸다.

브로칭 공정의 절삭시간은 5~30초로 아주 짧고 대부분 시간은 되돌림, 브로칭 조작, 소재 장착에 소요되므로 식 (5)로 계산된다⁽¹²⁾.

$$T_B = t_{b0} + l_b / v_b \quad (5)$$

T_B : 브로칭 공정의 절삭시간(min)
 t_{b0} : 준비시간(min), l_b : 브로칭길이(mm)
 v_b : 브로칭속도(mm/min)

3.2 공정별 비용 비교 결과

3D 모델로 무게를 계산하고 식 (2)~(5)로 시간을 계산한 후, 각 공정의 무게기준 비용과 시간기준 비용을 베벨 및 피니언기

Fig. 5 Spiral vs. Straight Bevel Gear Cost

Table 5 Spiral vs. Straight Bevel Gear Cost (W/ea)

Process	Spiral Bevel Gear	Straight Bevel Gear	Difference
Material	1,400/kg×14.5kg =20,300	1,400/kg×14.4kg =20,160	-140
Forging	1,100/kg×4.5kg =4,950	1,100/kg×4.4kg =4,840	-110
Turning	335/min×15.2min =5,092	335/min×14.7min =4,925	-167
Broaching	400/min×1min =400	400/min×1min =400	0
Bevel Cutting	300/T×51T =15,300	250/T×43T =10,750	-4,550
Carburizing	850/kg×11.8kg =10,030	850/kg×10.82kg =9,197	-833
Total	56,072	50,272	-5,800

어 모두 스파이럴 가공과 스트레이트 가공을 각 300개 이상 생산할 때 S사의 기준을 적용 하여, 제품별로 각 공정의 비용을 계산하였다.

베벨기어를 스파이럴에서 스트레이트 가공으로 변경할 때 공정별 비용을 Fig. 5와 Table 5에 나타내었다. 두 가공의 비용 비교 결과는 스파이럴 가공을 적용 할 때보다 스트레이트 가공으로 적용 할 경우 베벨 커팅 에서만 8.1%비용이 감소하여 전체 공정비용은 10.3%가 감소하였다.

피니언기어를 스파이럴에서 스트레이트 가공으로 변경할 때 공정별 비용을 Fig. 6과 Table 6에 나타내었다. 베벨커팅에서는 4.3%감소하였지만, 스파이럴 피니언기어 이 폭 보다 스트레이트 피니언기어의 이 폭이 3.5mm 커져 소재 무게가 증가해 소재비용에서 11%, 단조공정에서 8.6%가 증가하해, 전체 공정비용은 21% 증가하였다.

스파이럴 베벨 및 피니언기어의 공정비용 합은 ₩68,818이고 스트레이트의 합은 ₩65,682로 스파이럴 베벨 및 피니언기

어 세트를 규격을 만족하는 스트레이트 베벨 및 피니언기어세트로 바꾸면 전체적인 생산 비용은 4.6% 절감된다.

3.3 생산성 비교 결과

제품의 대량 생산 시간은 가장 느린 공정의 영향을 받음으로, 생산성 비교는 전체 공정 중에 가공시간이 가장 오래 걸리는 베벨가공 공정 시간을 기준으로 하였다. 베벨기어와 피니언기어의 스파이럴 가공과 스트레이트 가공에 대한 각 생산량을 기어 이 가공 시간과 생산효율을 기준으로 하여 식 (6)을 만들어 각 생산량을 계산하였다.

$$N = T_D / (T_M \times N_G) \times E_P \quad (6)$$

N: 생산량(개), T_D : 가동시간(min/d)

T_M : 기어 이 가공 시간(min/t)

N_G : 이수(T), E_P : 생산효율(%)

Fig. 6 Spiral vs. Straight Pinion Gear Cost

Table 6 Spiral vs. Straight Pinion Gear Cost (₩/ea)

Process	Spiral Pinion Gear	Straight Pinion Gear	Difference
Material	1,400×1.3kg =1,820	1,400×2.3kg =3,220	+1,400
Forging	1,100/kg×1.3kg =1,430	1,100/kg×2.3kg =2,530	+1,100
Turning	335/min×3.5min =1,173	335/min×4min =1,340	+167
Broaching	400/min×0.5min =200	400/min×0.5min =200	0
Bevel Cutting	700/T×10T =7,000	670/T×10T =6,700	-300
Carburizing	850/kg×0.85kg =723	850/kg×1.2kg =1,020	+297
Grinding	400/min×1min =400	400/min×1min =400	0
Total	12,746	15,410	+2,664

Table 7과 Table 8에서 스파이럴 가공을 스트레이트 가공으로 바꿀 경우 베벨기어 커팅 시간은 51분에서 43분으로 8분 감소하지만, 피니언기어 커팅 시간은 25분에서 30분으로 5분 증가한다. 이것은 베벨기어의 이수는 감소했지만, 피니언기어의 이수는 동일하면서 이 폭이 증가한데 기인한다.

두 기어를 개별 부품으로 본다면 Table 7의 베벨기어는 생산성이 18.8% 증가하고 Table 7의 피니언기어는 생산성이 16.5%

Table 7 Spiral vs. Straight Bevel Gear Annual Production Quantity(ea/y)

Process	Spiral Bevel Gear	Straight Bevel Gear	Difference
Cutting Time	1min/1T×51T/ea =51min/ea	1min/1T×43T/ea =43min/ea	-8min/ea
Day (8hours)	480min/51min/ea ×0.85%=8ea/d	480min/43min/ea ×0.85%=9.5ea/d	+1.5ea/d
Year (220days)	8ea/d×220d/y =1,760ea/y	9.5ea/d×220d/y =2,090ea/y	+330ea/y +18.8%

Table 8 Spiral vs. Straight Pinion Gear Annual Production Quantity(ea/y)

Process	Spiral Bevel Gear	Straight Bevel Gear	Difference
Cutting Time	2.5min/T×10T/ea =25min/ea	3min/1T×10T/ea =30min/ea	+5min/ea
Day (8hours)	480min/25min/ea ×85%=16.3ea/d	480min/30min/ea ×85%=13.6ea/d	-2.7ea/d
Year (220days)	16.3ea/d×220d/y =3,586ea/y	13.6ea/d×220d/y =2,992ea/y	-594ea/y -16.5%

감소한다. 하지만 두 기어는 항상 세트로, 즉 수량이 같게 가공되어 공급됨으로, 커팅 시간이 오래 걸리는 베벨기어의 영향만을 받아 Table 7과 같이 스파이럴 가공 1,760개에서 스트레이트 가공 2,090개로 세트 생산성이 18.8%가 증가하게 된다.

3.4 가공 장비의 폭 넓은 선택

본 연구로 필요조건을 만족하는 스파이럴 및 스트레이트 베벨기어의 설계와 생산성 및 비용예측이 가능하므로 두 공정을 모두 고려할 경우 사내 및 협력사 장비의 가동률을 고려해 시간과 비용을 최소화 할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 트랙터 앞 차축용 스파이럴 베벨기어와 피니언기어를 규격과 성능을 만족하는 스트레이트 베벨기어와 피니언기어로 바꾸어 적용 할 경우 생산성과 비용 효과를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스트레이트 베벨기어 이 수는 스파이럴 베벨기어 이 수보다 줄어 가공 시간이 감소하여 생산성이 18.8% 높아지며, 스트레이트 피니언기어 이 폭은 스파이럴 피니언기어 보다 커져서 가공시간이 증가되어 생산성은 16.5% 낮아진다.
- (2) 베벨기어와 피니언기어는 둘을 조립해 세트로 공급은 하기 때문에, 실제 세트를 기준으로 한 생산성은 스트레이트 베벨기어 세트가 스파이럴 베벨기어 세트보다 18.8% 높아진다.
- (3) 스트레이트 베벨기어의 생산 비용이 스파이럴 베벨기어보다 10.3% 감소하며, 스트레이트 피니언기어의 생산 비용이 이 폭의 증가로 스파이럴 피니언기어보다 21% 증가해, 전체적인 생산 비용은 스트레이트 베벨기어 세트가 4.6% 절감 된다.
- (4) 비교 연구로 트랙터 앞 차축 기어 설계 시 스파이럴 가공과 스트레이트 가공 장비의 가동률과 경제성을 고려해 적절한 공정을 선택하여 적용 할 수 있게 된다.

References

- (1) Earle. J. H., 1988, Graphics for Engineers, Addison-Wesley, America.
- (2) Ryu, K. H., 2004, Tractor Engineering Principles, Moon Un Dang., Korea.
- (3) Kim, H. Y., Kim, M. G., Cho, J. R., Bae, W.B., and Lee, J. H., 2004, "A Study on Distortion Induced by Elasticity and Heat Treatment of Automotive Bevel Gears," *The Korean Society for Technology of Plasticity Spring Conference*, pp. 170~173.
- (4) Kim, M. K., Kang, W. J., Cho, J. R., Lee, J. H., and Bae, W. B., 2003, "A Study on The Elastic Deformation of Forged Bevel Gears and Die," *The Korean Society for Technology of Plasticity Spring Conference*, pp. 34~37.
- (5) Park, J. J., Lee, J. H., and Lee, Y. S., 1996, "FEM Analysis of Closed-Die Forging of a Bevel Gear," *The Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 20, pp. 2458~2467.
- (6) Tsai, Y. C., and Hsu, W. Y., 2007, *The Study on the Design of Spiral Bevel Gear Sets with Circular-Arc Contact Paths and Tooth Profiles*, A Thesis for a Master, National Sun Yat-Sen University, China.
- (7) Simon, V. V., 2010, *Influence of Tooth Modifications on Tooth contact in Face-Hobbed Spiral Bevel Gear*, A Thesis for a Master, Budapest University of Technology and Economics, Hungary.
- (8) Guenther, A., 2011, "Interpretation of Bevel Gear Topography Measurements," *Annals of the CIRP Annals*, Vol. 60, No.1, pp. 551~554.
- (9) Park, H. S., and Lee, G. B., 2000, "Cost Estimation System for Design Evolution," *KSPE Fall Conference*, pp. 281~284.
- (10) Park, C. S., Yang, Y. S., and Kim, S. J., 2012, "Comparative study of the manufacturing process of spiral and straight bevel gear for tractor," *KSMTE Spring Conference*, pp. 301.
- (11) Degarmo, E. P., Black, J. T., and Kohser, R. A., 2003, *Materials and Processes in Manufacturing*, Wiley, USA.