

3. 베벨 기어의 설계와 제작

기어는 산업 전반에 걸쳐 여러 분야에서 이용되고 있고, 특히 동력을 전달하는 기계장치에 많이 사용되고 있기 때문에 기계기술자라면 누구나 한번쯤 기어를 접해본 경험이 있을 것이다. 우리가 타고 다니는 자동차만 하더라도 다양한 크기와 종류의 기어장치를 사용하고 있다.

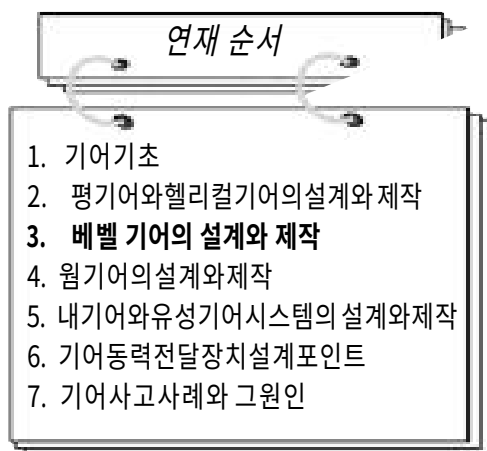
본 강좌는 기어에 대한 이론과 학문적인 측면보다는 현장 실무자들이 빠른 시간 내에 기어에 대해 이해하고 실무에 적용할 수 있는 내용을 위주로 구성하였다. <편집자주>

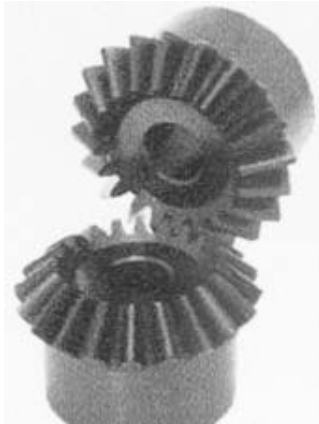
김 영 순
기어텍이사

(1) 베벨 기어의 종류

① 직선 베벨 기어(Straight bevel gear)
베벨 기어 가운데 가장 간단한 형상을 가지며 이줄기가 피치 원추면과 일치하고 기어의 테이퍼가 직선 형태이다. 직선 베벨 기어는 서로 맞물릴 때 이의 위쪽에서 시작하여 이뿌리 방향으로 물림이 진행되며 베벨 기어 가운데 가장 가공이 쉽고 간단하며 제작비가 적게 든다. 특히 베벨 기어의 피니언과 기어의 잇수가 같은 기어를 마이터 기어(Miter gear)라 한다.

직선 베벨 기어는 대개 창성방식의 기계로 가공되지만 기어의 정밀도가 중요하지 않은





<그림 1> 마이터 기어



<그림 2> 직선 베벨 기어

경우 밀링 머신으로 치절하기도 한다.

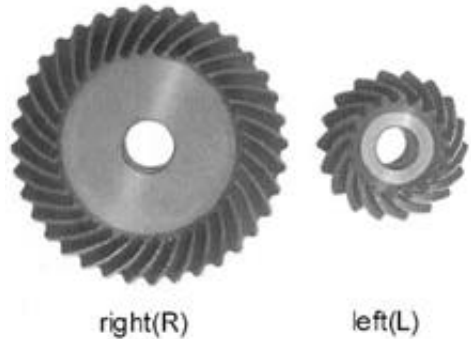
베벨 기어는 전동축이 서로 엇갈려 동력을 전달하고자 할 때 사용하며, 그 각이 90.인 경우가 많다.

직선 베벨 기어는 연마시 래핑(Lapping) 방법을 많이 사용한다. 셰이빙(Shaving)은 직선 베벨 기어 연마에 적합하지 않다.

- ② 스파이럴 베벨 기어(Spiral bevel gear)
이줄기가 나선 모양으로 된 베벨 기어로 한



<그림 3> 스파이럴 베벨 기어



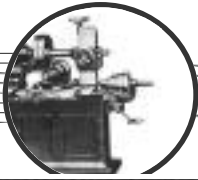
<그림 4> 비틀림 방향

번에 접촉하는 물림길이가 크기 때문에 직선 베벨 기어에 비해 운동이 부드럽다. 특히 고속에서 맞물릴 때 진동이나 소음을 줄일 수 있다. 스파이럴 베벨 기어의 비틀림 방향은 <그림 4>와 같이 정의하는데 왼쪽이 우(右) 방향이고 오른쪽이 좌(左) 방향의 비틀림이다.

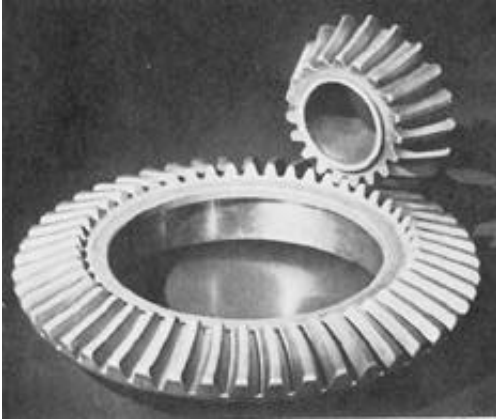
스파이럴 베벨 기어의 비틀림각은 보통 0~50.이며 표준 비틀림각은 35., 자동차용은 35~40.를 사용한다.

압력각은 16., 17.5., 20., 22.5.로 가공할 수 있으나 20.를 가장 많이 사용한다.

- ③ 제롤 베벨 기어(Zerol bevel gear)
그리슨 사(社)가 개발한 기어로 스파이럴



기어 강좌



<그림 5> 제롤 베벨 기어

베벨 기어 가운데 이줄기의 비틀림 각도가 0.인 것을 말한다. 치폭 방향으로 기어의 이줄기가 약간 곡선 형상을 이룬다는 점이 직선 베벨 기어와의 차이점이다. 이것은 제롤 베벨 기어는 직선 베벨 기어와 다른 기계로 가공되기 때문이다. 직선 베벨 기어의 절삭공구는 직선상에서 앞 뒤로 움직이지만 제롤은 페이스 밀(face mill)처럼 회전공구(rotary cutter)를 사용한다. 즉 제롤의 곡선 형태는 이 공구의 곡률 반경에 의해 형성된다.

제롤 기어의 프로파일은 인벌루트 형상과 비슷하며 압력각은 치폭에 따라 약간씩 변화

한다. 제롤 기어는 연마와 래핑 두 가지로 마무리할 수 있다.

제롤 기어는 주로 속도가 높을 때 직선 베벨 기어 대신 사용하면 약간의 중첩 효과를 얻을 수 있기 때문에 부드러운 물림을 얻게 된다.

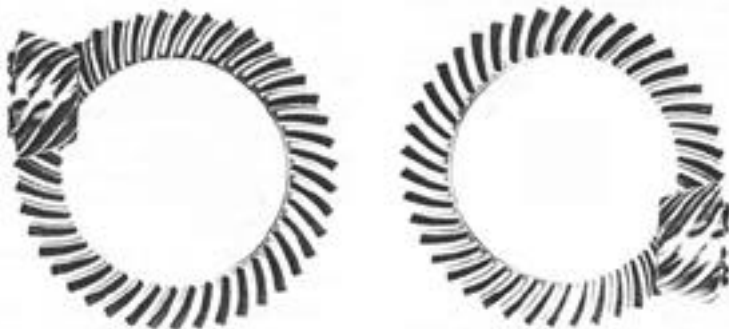
회전 방향이 변해도 추력 방향이 바뀌지 않기 때문에 원활한 회전이 요구되는 장소에 직선 베벨 기어 대신에 사용할 수 있다.

④ 하이포이드 기어(Hypoid gear)

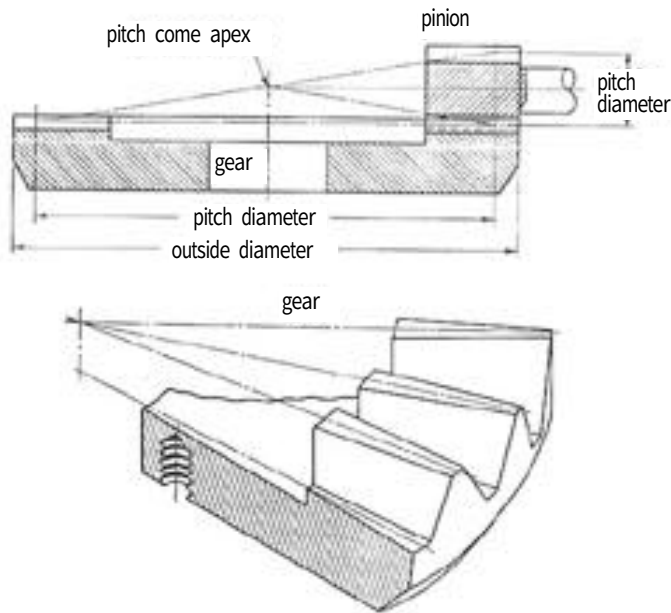
스파이럴 베벨 기어와 동일한 형상을 하고 있지만 물림 위치가 약간 다르다. 즉 피니언과 기어의 중심축이 교차하지도 않으면서 엇갈려 있다. 피니언의 중심축이 기어의 중심축에서 벗어난 것을 오프셋(offset)이라 하며 비틀림 방향에 따라 오프셋 방향이 정해진다.

하이포이드 기어는 일반 스파이럴 기어에 비해 큰 기어비율을 얻을 수 있다. 또한 피니언과 기어의 피치원 직경이 잇수에 비례하지 않는 특징을 가지고 있다. 피니언의 잇수는 보통 10이하를 사용한다.

하이포이드 기어 이의 양측면은 서로 다른 압력각과 프로파일 곡률반경을 가지는데 이것은 비대칭인 가공공구를 사용해서라기 보다는 하이포이드 기어의 특별한 기하학적 특성 때문이다.



<그림 6> 하이포이드 기어의 오프셋 방향



<그림 7> 페이스 기어

자동차용에 사용될 경우에는 21. 15 ; 트랙터나 트럭에 사용되는 경우는 22. 30 톨 사용한다.

⑤ 페이스 기어(Face gear)

페이스 기어의 피니언은 일반적인 인벌루트 치형을 갖는 평기어와 같다. 기어는 피니언과 같은 모양을 가진 절삭공구로 가공한다. 페이스 기어의 피니언은 일반 평기어나 헬리컬 기어를 사용하고 기어는 원반 모양이기 때문에 페이스 기어라 부른다.

페이스 기어는 피니언의 중심 축과 만나게 할 수도 있고 서로 엇갈리게 할 수도 있다. 피니언은 일반 평기어의 호브로 가공이 가능하고 피니언의 설치 위치가 중요한 문제가 되지 않으므로 설치가 용이하다.

(2) 베벨 기어의 치수 결정

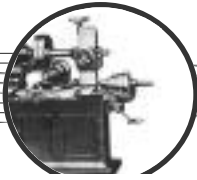
① 용어 설명

베벨 기어를 축에 직각인 단면으로 자르면 <그림 8>과 같은 형상이 된다. 베벨 기어는 교차축 사이에서 동력을 전달할 때 많이 사용하고 피니언과 기어의 중심축 사이의 각(축각, shaft angle)이 90. 인 경우가 가장 많으나 그 외의 각에서도 사용할 수 있다.

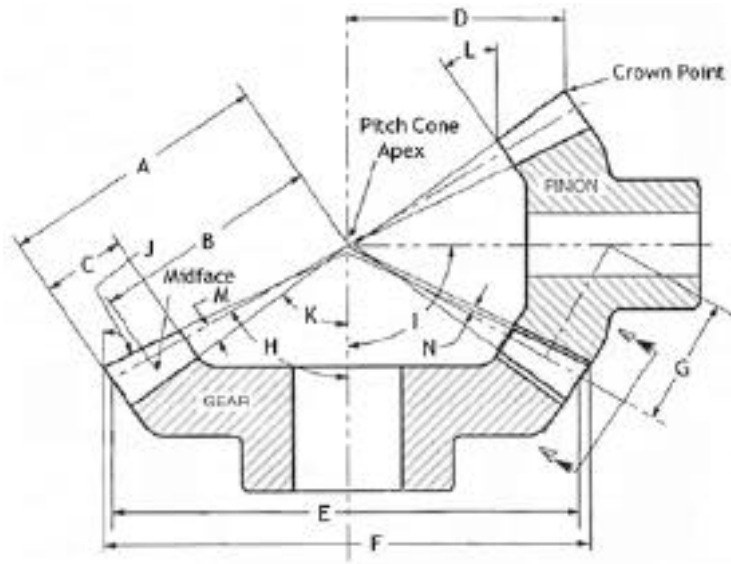
베벨 기어의 크기는 헬리컬 기어와 달리 기어 이의 끝부분, 즉 가장 큰 축직각 모듈로 정해진다.

예를 들어 베벨 기어 외단부의 축직각 모듈이 10이라면 이의 크기가 가장 작은 내단부의 축직각 모듈은 8정도가 된다. 베벨 기어에서 사용하는 모듈의 크기는 평기어에서 사용하는 값을 그대로 사용해도 무방하지만, 베벨 기어를 위해 표준값을 사용하는 것은 그리 큰 도움이 되지 못한다.

베벨 기어 이를 치직각 단면으로 자르면 그 형상이 평기어와 비슷한 인벌루트 곡선으로 이루어진 것을 볼 수 있다.



기어 강좌



A = 외단 원추거리, B = 평균 원추거리, C = 치폭
D = 원추정점에서 외단 이끝까지 거리, E = 피치원 직경, F = 외단부 이끝원 직경
G = 평균 정면 피치원 직경, H = 피치원추각, I = 축각, J = 치선각
, K = 이뿌리각, L = 소재의 각도, M = 이뿌리 원추각, N = 틈새

<그림 8> 베벨 기어의 축직각 단면

<그림 8>에서 H를 피치 원추각이라 하는데 이것은 기어의 피치원 직경을 지름으로 하는 원뿔이 원추의 정점(pitch cone apex)에서 만날 때 중심축과 이루는 각이라 할 수 있다.

과거에는 이끝선과 이뿌리선이 원추정점에서 교차하도록 설계되었으나 현재는 기어의 이끝선이 피니언의 이뿌리선과 평행이 되도록 설계한다. 이것은 과거 설계 방식에서 틈새를 테이퍼 형상을 이루게 하는 것보다 틈새를 항상 동일하도록 하는 방식이 더 나은 절삭공구를 설계하는데 도움이 되기 때문이다.

② 베벨 피니언의 크기와 잇수 선정

베벨 기어의 크기를 정하기 위해서는 먼저 피니언의 대략적인 피치원 직경을 구해야 한다. 여기에서는 두 가지 방법을 소개하겠다.

첫째는 Dudley가 [Handbook of Practical Gear Design]에서 제시한 방법으로 Q와 K 계수를 이용한다.

$$d^2F = \frac{1.91 \times 10^7 Q}{(u+1)^2 K} = \frac{1.91 \times 10^7 P}{K \times n_1} \times \frac{(u+1)}{u}$$

여기서,

d = 피니언의 피치원 직경, mm

F = 치폭, mm <표 1> 참조

$$Q = Q \text{ factor} = \frac{kW}{n_1} \times \frac{(u+1)^3}{n}$$

n_1 = 피니언의 회전수, rpm

u = 기어비율

K = K factor, <표 2> 참조

P = 전달동력, kW

<표 1> 기어비율에 따른 베벨 피니언과 치폭 관계

기어비율	외단 원추거리의 0.3배를 근거로 한 치폭
1	0.212d
1.5	0.270d
2	0.335d
3	0.474d
4	0.618d
5	0.765d
6	0.912d
7	1.061d

<표 2> 베벨 기어를 위한 K- Factor 값

	피니언의 피치원직경	기어 비율	원주속도	
			5m/s	20m/s
스파이럴 베벨 기어 HRC 58	Z_2/Z_1	K factor(N/mm ²)		
	50	1	3.93	3.45
		3	3.38	2.96
	100	1	3.27	2.90
		3	2.79	2.48
	250	1	2.72	2.41
		3	2.38	2.10
스파이럴 베벨 기어 피니언 BHN 245 기어 BHN 210	50	1	1.83	1.62
		3	1.65	1.46
	100	1	1.41	1.24
		3	1.23	1.08
	250	1	1.12	0.99
		3	0.94	0.83
직선 베벨 기어 피니언 BHN 245 기어 BHN 210	50	1	0.86	-
		3	0.77	-
	100	1	0.83	-
		3	0.76	-
	250	1	0.79	-
		3	0.72	-



기어 강좌

예제 1) 전달동력이 45kW이고 입력축 회전수가 1750rpm, 기어비율을 3으로 할 때 필요한 피니언의 크기를 구하시오.

$$d^2 F = \frac{1.91 \times 10^7 P}{K \times n_1} \times \frac{(u+1)}{u}$$

$$= \frac{1.91 \times 10^7 \times 45 \times (3+1)}{3.38 \times 1850 \times 3} = 193744.7$$

$$d^2(0.474d) = 193744.7$$

$$d^3 = 408744.1$$

$$d = \sqrt[3]{408744.1} = 74.2$$

두번째 방법은 베벨 기어의 응력계산에 대한 규격 AGMA2003에 있는 식을 이용하는 방법이다.

AGMA2003에 있는 굽힘응력과 면압응력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$s_t = \frac{2T_p K_a}{K_v} \frac{1}{F d m} \frac{K_s K_m}{K_x J}$$

$$s_c = C_p C_p \sqrt{\quad}$$

여기에서 각종 계수와 기본값을 다음과 같이 정하여 위 식에 대입하면 피니언의 피치원 직경을 구할 수 있다.

굽힘응력의 경우 :

$$m = d/Z_1 \quad K_m = 1.58 \quad K_v = 0.84 \quad J = 0.3$$

$$F = 0.15d \cdot (1 + u^2)^{0.5} \quad K_s = 1$$

$$K_a = 1 \quad K_x = 1$$

면압응력의 경우 :

$$C_p = 60.6 \quad C_b = 0.634 \quad C_a = 1 \quad C_s = 1 \quad C_{xc} = 1$$

$$C_f = 1 \quad C_v = 1 \quad I = 0.1$$

$$Z_1 = 57.26 / (1 + u^2)^{0.5}, \text{ 피니언의 잇수}$$

위의 값들을 AGMA2003의 면압응력과 굽힘응력을 구하는 식에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

굽힘응력의 경우 :

$$d = 17 \sqrt[3]{\quad} \quad (SF = \text{안전율})$$

면압응력의 경우 :

$$d = 67.7 \sqrt[3]{\quad} \quad (SF = \text{안전율})$$

여기서 계산된 값 중에서 큰 것을 베벨 피니언의 피치원 직경으로 사용한다.

예제 2) 전달동력이 45kW이고 입력축 회전수가 1750rpm, 기어비율을 3으로 할 때 필요한 피니언의 크기를 구하시오. (재질 = SCM415, 열처리 = 침탄, 굽힘허용응력 = 140 kg/mm², 면압허용응력 = 42 kg/mm²)

$$T_p = \frac{974000 \times 45}{1750} = 25045.7 (\text{kg} \cdot \text{mm})$$

$$d = 17 \sqrt[3]{\quad} = 66.4$$

$$d = 67.7 \sqrt[3]{\quad} = 50.1$$

따라서 피니언의 피치원 직경 $d = 66.4 \text{mm}$ 로 결정한다.

피니언의 피치원 직경을 결정한 다음, 잇수를 선정해야 하는데, 이 때 <그림 9, 10>에 있는 그래프(AGMA2005)를 참고하거나 위에 언급한 식을 이용하여 구한다.

$$Z_1 = \frac{57.26}{\sqrt{\quad}} = \frac{57.26}{\sqrt{\quad}} = 18.1$$

따라서 베벨 피니언의 잇수는 18보다 큰 19
정도로 결정한다.

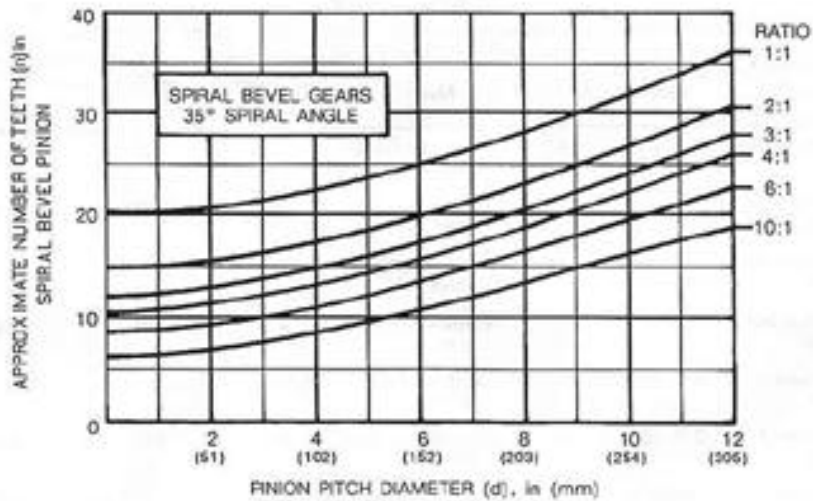
베벨 기어의 잇수(Z_2) = 피니언의 잇수(Z_1)
x 기어비율(u)

$$Z_2 = 19 \times 3 = 57$$

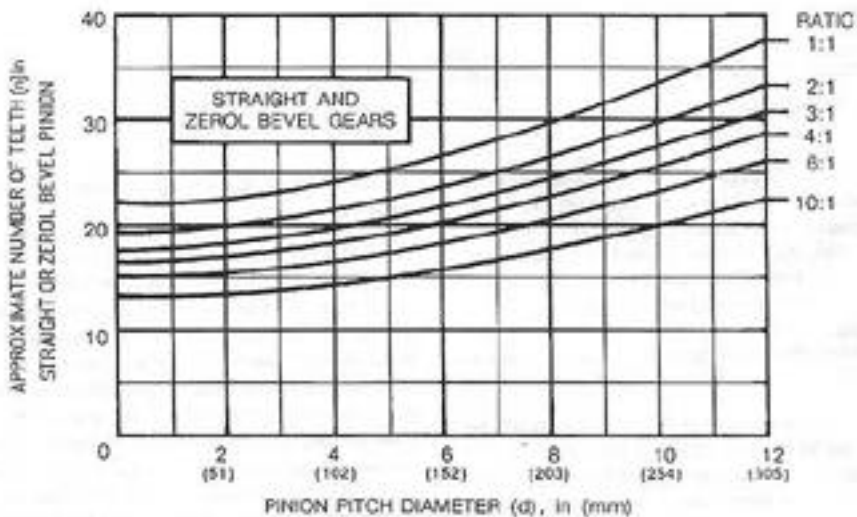
피니언의 최소 잇수는 언더컷을 피하기 위
해 기어비율에 따라 다르지만 기어 종류에 따
라 대략 다음과 같이 정한다.

- 직선 베벨 기어인 경우

■압력각 20. 일 때, 피니언의 최소잇수



<그림 9> 스파이럴과 하이포이드 베벨 기어의 피니언 잇수 선정



<그림 10> 직선과 제롤 베벨 기어의 피니언 잇수 선정



기어 강좌

$$= 14 - 16$$

■ 압력각 25. 일 때, 피니언의 최소잇수
= 12 - 13

- 제를 베벨 기어인 경우

■ 압력각 22.5. 일 때, 피니언의 최소잇수
= 14 - 16

■ 압력각 25. 일 때, 피니언의 최소잇수 =
13

- 스파이럴 베벨 기어인 경우

■ 압력각 20. 일 때, 피니언의 최소잇수
= 12

- 스파이럴 베벨 기어인 경우

■ 압력각 20. 일 때, 피니언의 최소잇수
= 12

피니언의 최소 잇수가 위에 언급한 값들보다 적은 경우는 어덴덤 계수(Addendum Factor)를 변경하여 사용한다. 특히 하이포이드 경우는 피니언의 잇수를 적게 사용하는 경우가 많기 때문에 주의해야 한다.

③ 이의 크기 결정

베벨 피니언과 기어의 잇수, 피니언의 피치원 직경을 결정하였으므로 이제 축직각 모듈을 구할 수 있다.

피니언의 피치원 직경은 Dudley 방식으로 구한 값을 사용하도록 한다.

$$m = \frac{d}{Z_1} = \frac{74.2}{19} = 3.9$$

여기에서,

m = 축직각 모듈

모듈을 결정한 후, 피니언과 기어의 총 이높이를 정하고 어덴덤과 디덴덤을 구한다. 베벨 기어에서는 기어의 종류에 따라 작용깊이와 총 이높이가 다르다<표 3>.

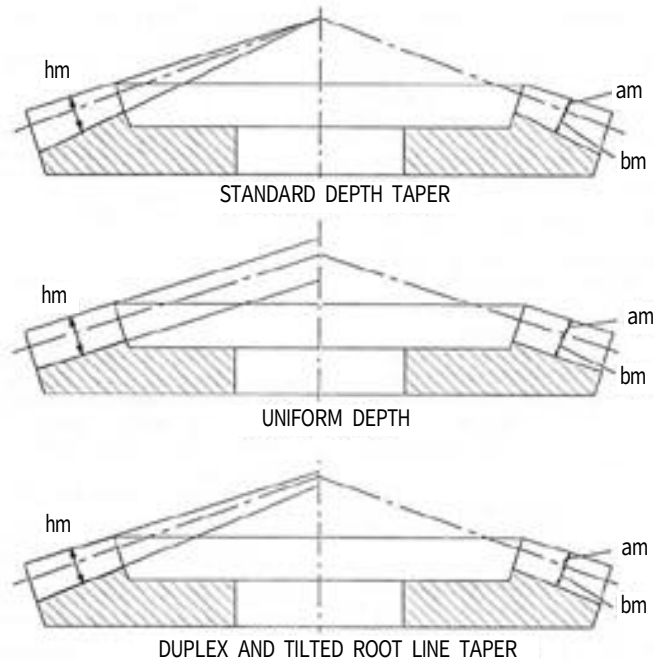
또한 베벨 기어는 피니언과 기어의 어덴덤이 다르다.

<표 3> 베벨 기어의 크기

기어 종류	축직각모듈(m)	압력각	작용깊이	총이높이직선
직선	0.4 - 25.4	20.	2	2.188+0.05/m
스파이럴	1.27 - 25.4	20.	1.7	1.888
	1.27 - 25.4	16.	1.7	1.888
제를	0.4 - 5	20.	2	
	0.8 - 5	22.5.	2	2.188+0.05/m
	1.27 - 5	25.	2	

<표 4> 베벨 기어의 어덴덤(Addendum)

기어종류	어덴덤
직선과 제를 베벨 기어	$0.54m + 0.46m / u^2$
스파이럴 베벨 기어	$0.54m + 0.39m / u^2$



<그림 11> 베벨 기어의 테이퍼 형상

④ 치폭 결정

베벨 기어의 치폭을 결정하기 위해서 먼저 원추거리와 피니언과 기어의 피치 원추각을 계산한다(직선 스파이럴 제를 베벨 기어의 경우임).

$$\delta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Sigma}{Z_1/Z_2 + \cos \Sigma} \right)$$

$$\delta_2 = \Sigma - \delta_1$$

$$R_e = \frac{d_2}{2 \times \sin \delta_2}$$

여기서,

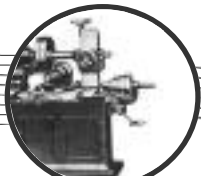
Σ = 축각, δ_1 = 피니언의 피치 원추각,
 δ_2 = 기어의 피치 원추각

Z_2 = 기어의 잇수 Z_1 = 피니언의 잇수 d_2 =
 기어의 피치원 직경

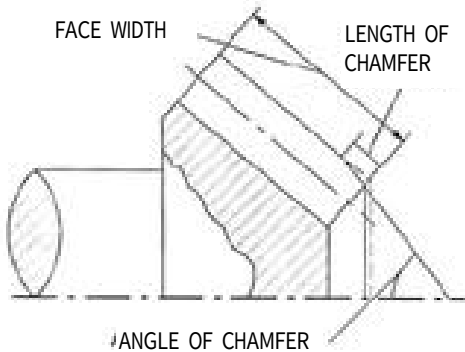
R_e = 외단 원추거리

직선 베벨 기어의 치폭은 외단 원추거리의 30%보다 적거나 원주피치의 3.18배를 초과하지 않는 것이 좋다. AGMA2005에서는 직선과 스파이럴인 경우는 외단 원추거리의 30%, 제를인 경우는 25%를 넘지 않도록 규정하고 있다. 이러한 값을 넘는 치폭을 갖도록 설계한 경우는 기어 이를 치절하거나 기어를 조립할 때 문제가 발생하거나 운전시 하중 분담 능력이 떨어질 가능성이 높다.

하이포이드 기어의 경우는 치수 계산에서 많은 항목을 계산해야 하고 또한 피니언의 치수가 잇수에 비례하지 않기 때문에 수동으로 계산하는 것은 많은 시간을 소요하게 된다. 따라서 프로그램을 작성하여 사용하는 것이



기어 강좌



<그림 12> 피니언의 이끝 모따기

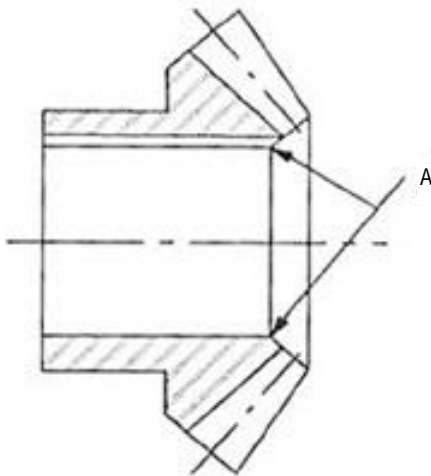
좋다. 계산식은 각종 기어 편람에 상세히 소개되어 있기 때문에 여기에서는 생략하겠다.

⑤ 기어 이의 형태

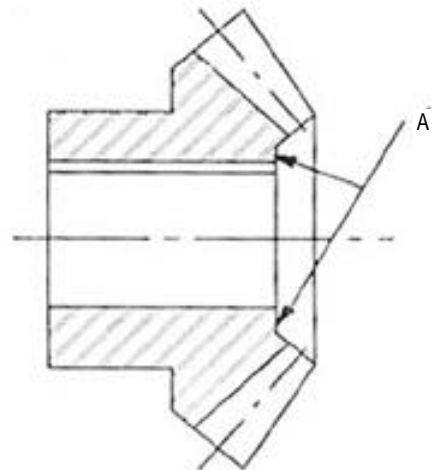
베벨 기어 이는 다음 <그림 11>과 같이 세 가지의 테이퍼 형태를 갖는다.

<그림 11>의 가장 위에 있는 형상을 표준치로 부르며 많이 사용한다. 중간은 등고치로 이뿌리각과 이끝각이 0으로 테이퍼가 평행을 이룬다. 가장 아래의 형태는 이뿌리선이 약간 경사를 이루어 원추정점을 벗어나고 있다.

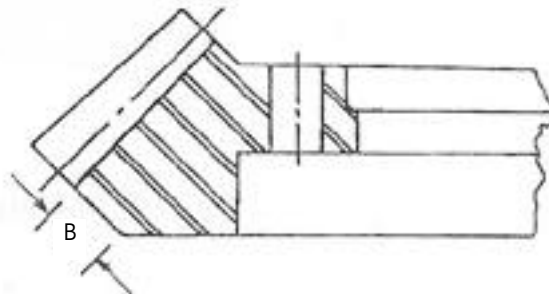
베벨 기어의 테이퍼 형상에 따라 치절 공구



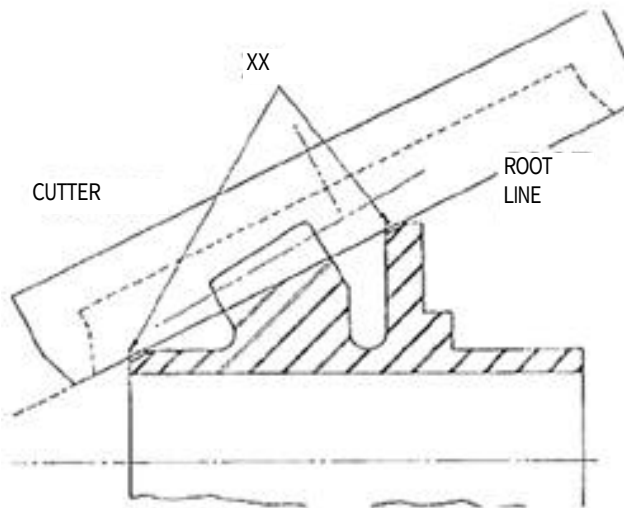
<그림 13> 잘못된 설계



<그림 14> 적합한 설계



<그림 15> 기어 두께 최소값



<그림 16> 커터 여유값을 확보하기

(cutter)의 반지름이 결정된다. 직선 베벨 기어를 제외한 모든 베벨 기어는 페이스 커터(face cutter)로 가공되며 이 경우 커터의 반지름은 치절 기계에 따라 결정된다.

기타 베벨 기어의 치수는 기어 관련 서적에 잘 나와있으므로 여기서는 상세히 기술하지 않겠다.

(3) 베벨 기어 설계 주의사항

베벨 기어를 설계할 때는 일반 헬리컬 기어에 비해 특별히 몇 가지 사항을 조심해야 한다.

첫째, 베벨 기어를 치절할 때 공구의 끝이 간섭을 받지 않도록 한다.

<그림 11>에서 보듯이 피니언의 크기가 작아서 안쪽 치꼭이 원추정점에 가까운 경우는 안쪽 치꼭에 모따기를 하는 것이 좋다.

둘째, 기어를 축과 조립하거나 기어를 다듬질할 때 기어 조립여유면을 확보하도록 설계한다.

<그림 12>에서 A부분에 조립할 여유가 없

는 것을 볼 수 있다. <그림 13>과 같이 기어를 연마하거나 축과 조립할 때 여유값이 있도록 설계해야만 한다.

셋째, 베벨 기어의 외단부 이뿌리 부분에서 기어의 축 방향 끝까지 두께(B)는 최소한 총 이높이 이상이 되도록 한다.

기어의 리브 부분이 일체형이 아니라 볼트로 체결한 경우는 볼트 구멍의 바닥에서 기어 이뿌리선까지 거리가 총 이높이의 1/3 이상이 되도록 한다.

넷째, 베벨 기어를 축과 일체형(이를 shank type이라 함)으로 설계할 때는 축 끝부분에 가공 후 잘라낼 수 있는 여유분을 두어 센터(center) 구멍이 있도록 한다. 구멍의 크기는 척을 물릴 수 있을 만큼 커야 한다. 다른 방법으로는 축 끝에 돌출 나사를 두는 것도 좋다.

다섯째, 기어를 치절하는 공구가 부딪히지 않도록 주의한다. <그림 15>에서와 같이 커터가 기어의 간섭을 받지 않도록 설계해야 한다. 

문의 : (02)584-0430
<http://www.geateh.co.kr>