4. 웜기어의 설계와 제작

기어는 산업 전반에 걸쳐 여러 분야에서 이용되고 있고, 특히 동력을 전달하는 기계장치에 많이 사용되고 있기 때문에기계기술자라면누구나 한번쯤 기어를 접해본경험이있을 것이다. 우리가타고 다니는 자동차만하더라도다양한크기와종류의기어장치를사용하고있다.
본 강좌는 기어에 대한 이론과 학문적인 측면보다는현장 실무자들이빠른 시간 내에 기어에 대해 이해하고 실무에적용할 수있는내용을위주로구성하였다. <편집자주>

김 영 순
기어텍이사

연재 순서

4. 웜기어의 설계와 제작

(1) 웜기어의 특징

웜기어는 베벨 기어처럼 구동 기어와 피동 기어의 중심축이 직각(90°)이며, 수직방향으로 동력을 전달할 때 사용한다.

웜기어는 베벨 기어나 헬리컬 기어와 달리 1조(組)의 맞물림으로 1/5~1/70 정도의 큰 기어 비율을 얻을 수 있다. 따라서 같은 동력을 전달하고자 할 때 베벨 기어나 헬리컬 기어를 사용하는 기계 장치에 비해 그 크기를 약 1/2로 줄일 수 있는 장점이 있다. 또 웜기어는 접촉에 의해 동력을 전달하기 때문에 다

른 기어에 비해 소음이나 진동이 매우 적은 편이다.

웜기어는 치면의 진행각이 적을 경우 웜휠로 웜을 회전할 수 없는 역전방지가 가능하다. 이러한 점은 자동제어나 역회전이 불필요한 경우 아주 유용하게 사용된다.

그러나 웜기어는 접촉에 의해 동력을 전달하기 때문에 치면의 마찰손실 동력이 커서 동력 전달효율이 낮다. 예를 들어, 기어비율이 1/5이고 피니언의 회전수가 1800rpm인 경우, 이론적인 효율이 98%인데 비해 같은 중심거리에서 기어비율을 1/70으로 할 경우 효율은 약 60%로 떨어진다.

웜기어의 또 하나의 단점으로는 웜휠의 재질을 주로 동합금계열을 사용하기 때문에 일반기어를 치절하는 전용기로 가공할 수 없다는 것이다. 웜휠의 재질이 치면수정이 불가능한 비철계열의 제품이므로 치형 수정은 주로 웜에 가해진다. 따라서 한 조의 웜과 웜휠을 가공하여 용한 경우 다른 웜기어와의 교환이 어렵다. 최근에는 이러한 점을 고려하여 표준화된 제품을 생산하는 경우가 많다.

(2) 웜기어의 종류

웜기어의 종류에는 원통형 웜기어와 장고형 웜기어가 있다.

① 원통형 웜기어(Cylindrical worm gear)

보통 많이 사용하는 웜기어로 원통에 나사가 있는 모양이다. 가공방법은 사용하는 공구에 따라 다르며 가공방법에 따라 치형의 종류가 구분된다.

버킹햄(Buckingham)은 5종류로 구분하였고, 일본치차공업협회(JGMA)는 4종류, 독일(DIN)은 4종류, 영국(BS)은 1종류만 규정하고 있다. 미국(AGMA)는 특별히 규정하지는 않았다.

<그림 1> 원통형 웜기어

② 장고형 웜기어(Hourglass worm gear)

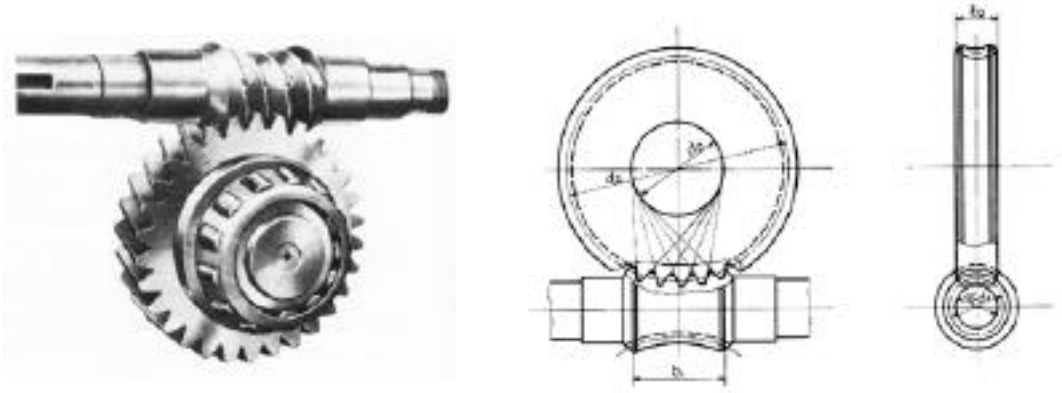
모양이 장고처럼 생겼다고 하여 일명 장고형 웜이라 부르며 미국에서는 Double enveloping worm이라 부른다.

장고형 웜기어는 <그림 2>에서 보듯이 웜이 축방향을 따라 원형을 유지하고 있기 때문에 특수한 가공방법을 사용해야만 한다. 장고형 웜기어는 동시에 물리는 잇수가 많아서 부하용량이 커지는 반면 치면에 열이 발행하기 쉽다는 제약이 따른다. 따라서 장고형 웜기어는 고속회전에는 부적합하다.

장고형 웜기어는 그 발명자의 이름을 붙인 힌들리(Hindley) 웜, 로렌츠(Lorenz) 웜, 콘(Cone) 웜 등이 있다.

(3) 웜기어의 치형

다음 <표 1>은 각국의 웜 치형에 관한 것이다.



<그림 2> 장고형 웜기어

<표 1> 각국의 웜 치형

치 형	JGMA	DIN	BS	AGMA
台形 치형	1형	A		
바이트 치절웜	2형	N		특별한 규정이
프라이스 치절웜	3형	K		없음.
인벌루트 웜	4형	E	인벌루트 웜	
특수 치형		H		

① JGMA(일본) 규격의 치형

가. 1형 치형

웜을 축방향 단면으로 자를 때 치면이 직선인 형태의 치형이다. 이것은 DIN 규격의 A형과 같다.

가공방법은 바이트의 직선 면이 축방향과 일치하도록 하여 치절한다. 따라서 축방향 압력각은 경사각과 동일하다. 웜의 진행각이 너무 크거나 작아도 가공시 문제가 발생하기 쉽다.

1형 치형은 치절 후 연마없이 사용하기 때문에 기어의 정도(精度)가 중요하지 않을 때 채택하는 것이 좋다.

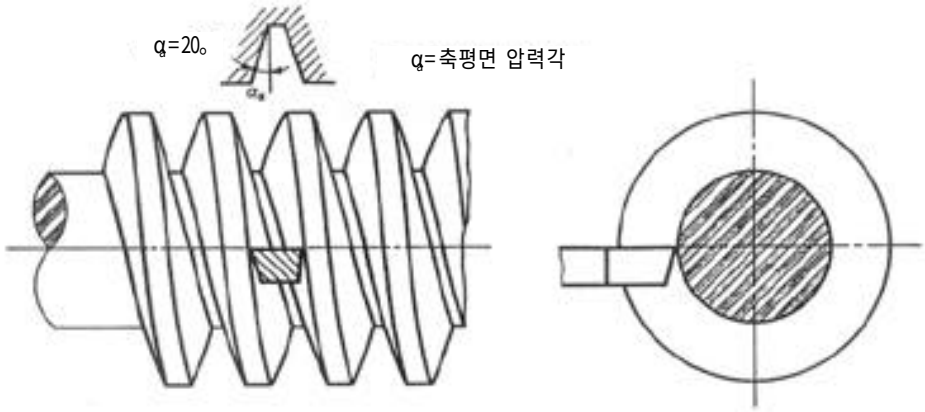
이 치형의 축직각 압력각은 바이트의 압력각과 같다. 바이트의 압력각은 보통 20°를 사용하지만 14.5°나 22.5°를 사용하기도 한다.

웜의 치직각 단면과 축직각 사이에는 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\tan \alpha_t = \tan \alpha_x \cdot \cos \gamma$$

여기서, γ= 웜의 진행각

나. 2형 치형



<그림 3> 1형 웜

웜의 치직각 단면에 수직으로 바이트를 세워서 치절한 치형으로 DIN의 N형과 같은 모양이다. 이 경우는 웜의 진행각이 작아도 가공에 큰 지장을 받지 않는다.

웜의 치직각 단면 압력각이 바이트의 압력각보다 약간 작으며 진행각이 커질수록 그 차이도 커진다.

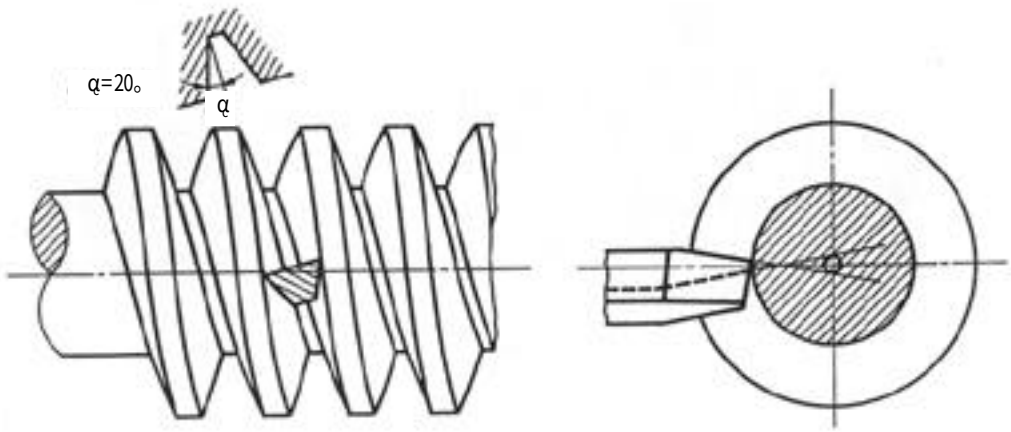
다. 3형 치형

<그림 5>와 같이 압력각 20°를 가진 프라이스 커터의 중심축을 웜의 중심축에서 진행각만큼 회전시켜 치절하여 생성되는 치형이다.

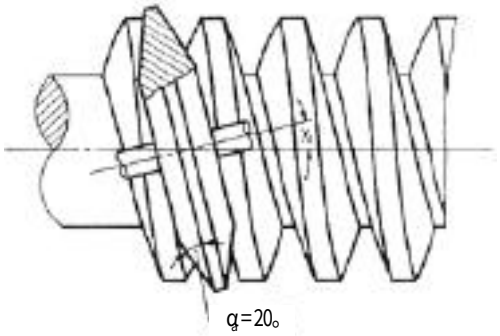
이 치형을 연마로 마무리할 경우 연마석의 직경은 웜의 피치원직경에 비해 충분히 큰 것을 사용하도록 한다.

라. 4형 치형

<그림 6>에서 보듯이 기초원을 원통으로 한



<그림 4> 2형 웜



<그림 5> 3형 웜

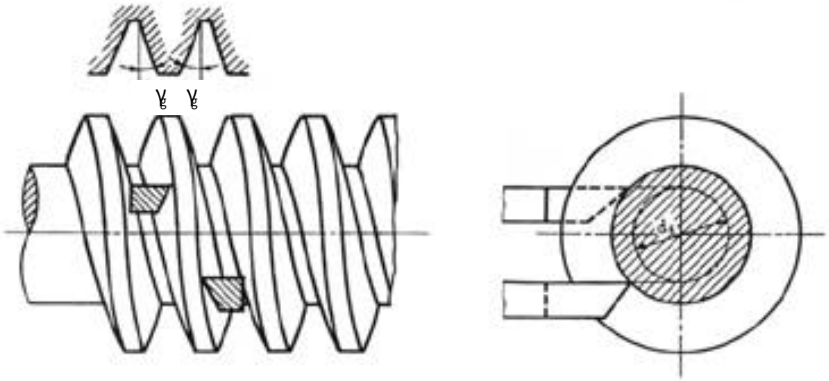
인벌루트 곡선(헬리코이드 곡선)을 이용한 치형으로 DIN의 E와 같은 치형이다. BS(영국 규격)는 이 치형만을 규정하고 있다.

② DIN의 치형

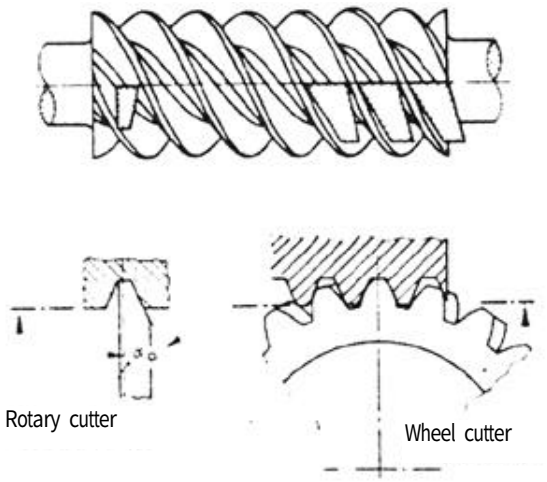
가. A형 (Straight sided axial worm type)

ZA형으로 표시하며, 이 치형은 축직각 단면으로 자를 때 치형이 직선인 형태로 로터리 커터(Rotary cutter)나 밀링, 스카이빙(skyving)으로 가공이 가능하다.

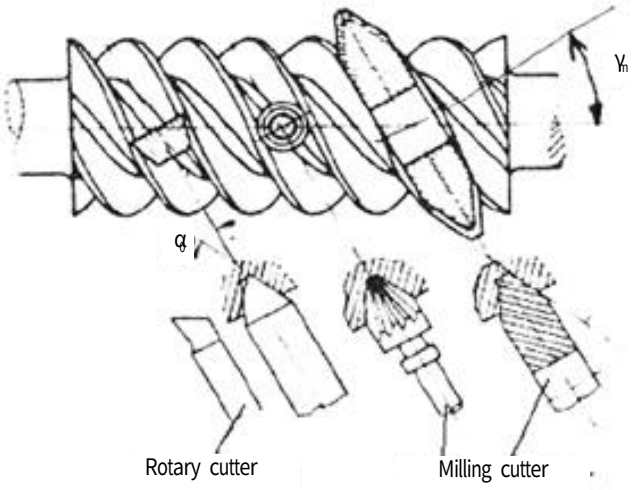
나. N형 (Straight sided normal worm type)



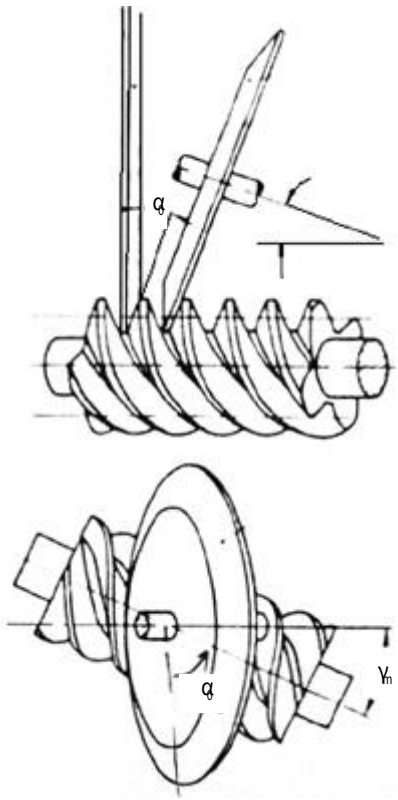
<그림 6> 4형 웜



<그림 7> A형 웜



<그림 8> N형 웜



<그림 9> I형 웜

ZN형으로 표시하며 치직각 단면에서 볼 때 치면이 직선인 형태이다. 웜의 축방향에서 진행각만큼 커터의 각을 경사지게 하여 가공함으로 얻어지는 치형이며, 커터의 치절면은 항상 직선이다. 이 치형은 로터리 커터나 적은 밀링 커터 등을 이용하여 가공할 수 있다.

다. I형 웜 (Involute helicoid worm)

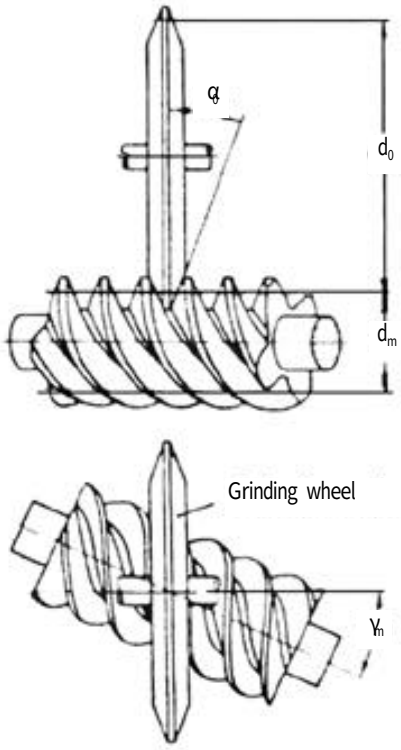
ZI형으로 표시하며 웜의 치형이 인벌루트 헬리코이드이다. 이 치형을 연마할 때 연마석은 축방향에서 진행각만큼 경사지게 하고 다시 축방향과 나란한 방향에서 압력각만큼 경사지도록 설치한다. 이 치형은 호빙을 이용하여 치면을 창성한 뒤 연마로 마무리하여 더욱 정확한 치형을 얻거나 치형을 수정할 수 있다. 전용 웜 그라인딩 머신이 있는 경우는 이 치형을 사용하는 것이 좋다.

라. K형 웜 (Milled helicoid worm)

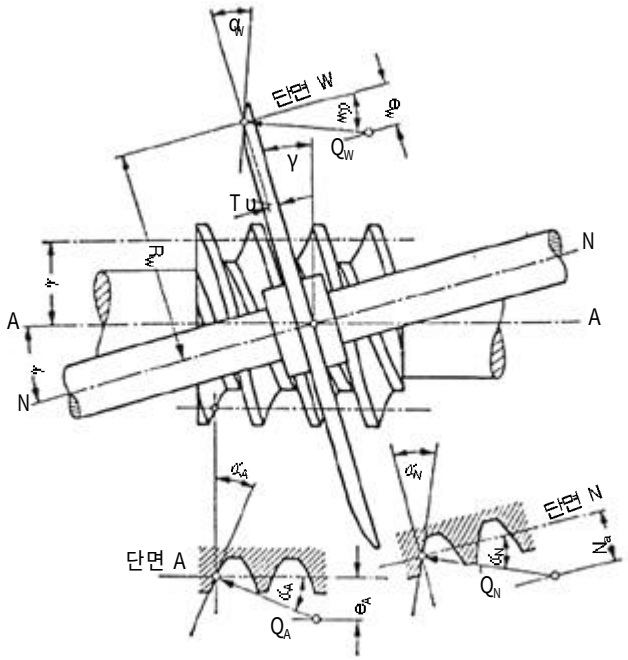
ZK형으로 표시하기도 한다. 이 치형은 웜을 진행각만큼 경사지도록 하여 로터리 커터의 양쪽 치절면이 웜 치면과 만나게 하여 치절할 때 생성된다. 따라서 이 치형은 3차원의 커브를 그리며 커터의 직경이 커질수록 I형과 비슷한 모양이 된다.

마. H형 웜

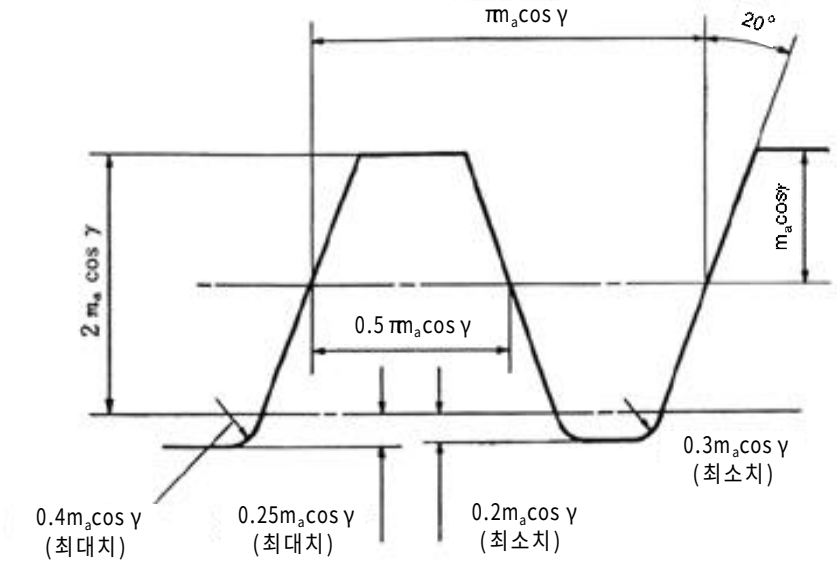
일명 CAVEX 웜이라 부르기도 한다. 이 치형의 특징은 웜의 치면이 인벌루트 치형처럼 볼록 형태가 아니라 오목한 형태라는 것이다. 따라서 웜휠과 맞물릴 때 많은 면적이 동시에 접촉하게 되어 큰 하중을 전달할 수 있다.



<그림 10> K형 웜



<그림 11> H형 치형의 단면



<그림 12> BS 기준 Rack 의 치직각 단면

<표 2> 축방향 모듈 표준값(JGMA)

제1계열	제2계열	제3계열	제1계열	제2계열	제3계열
1.00				5.60	
	1.12				6.00
1.25			6.30		
	1.40			7.10	
		1.50	8.00		
1.60			9.00		
	1.80		10.00		
2.00				11.20	
	2.24				12.00
2.50			12.50		
	2.80			14.00	
		3.00	16.00		
3.15				18.00	
	3.55		20.00		
4.00					22.00
	4.50			22.40	
5.00			25.00		

H형은 독일의 니만(Niemann) 교수가 발표한 치형이다.

- 축직각 단면 치형 A와 공구 치형 W의 관계식

$$\alpha_A = \tan\alpha_A = \frac{\tan\alpha_W}{\cos\gamma} 1- \left[\frac{w\tan^2\gamma(1+\tan^2\alpha_w)}{R_w t_{an}\alpha_w}\right]$$

$$\rho_w : \frac{1}{\rho_A} = \frac{1}{\cos\gamma}\left(\frac{\cos\alpha A}{\cos\ \alpha w}\right)^3$$

$$\left[\frac{1}{\rho_w} + \frac{\tan^2\gamma}{R_w \sin\alpha_w} - \frac{\sin^2\gamma\cos^3\alpha w}{\gamma\tan\alpha_w}\right]$$

$$e_A = \rho_A \sin\alpha_A$$

(4) 웜기어의 치수 결정

① 모듈 표준값

<그림 12>는 BS(영국)에서 정한 웜기어의 기준랙으로 치직각 단면 기준이다.

<표 2>는 일본기어공업협회(JGMA)가 정한 축방향 모듈 표준값이다. 웜기어를 표준화할 때는 이와 같이 기준 모듈을 정하여 사용하면 편리하다.

표준값을 사용하는 것이 관리에 편리하지만, 웜기어는 설계 특성상 표준값 이외의 모듈을 사용하는 경우도 종종 있다. 이 경우 웜을 가공할 때는 플라이 커터(Fly cutter)를 이용하고 웜휠은 싱글 호브를 제작하여 사용하는 것이 경제적이다.

AGMA는 웜의 축방향 모듈을 인치 단위

로 1/4, 5/16, 3/8, 1/2, 5/8, 3/4, 1, 11/4, 11/2, 13/4, 2로 사용한다.

BS는 제1계열과 제2계열로 나누어 축직각 모듈 표준값을 규정하고 있다.

웜기어의 표준 모듈로 축방향 모듈을 사용하는 이유는 웜휠의 치수계산시 치직각 방향보다는 축방향 모듈이 계산에 편리하고 가공도 대부분이 축직각 모듈을 기준으로 하기 때문이다.

② 웜의 기준피치원 직경

BS와 JGMA는 지름계수(JGMA = Q, BS = q, Diameter factor)를 이용하여 웜의 기준피치원 직경을 결정하고 있다.

$$d_1 = m_a \cdot Q = m_a \cdot q$$

JGMA는 Q값을 규정하고 있지 않지만 BS는 다음과 같이 규정하고 있다.

6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 20

모듈이 동일한 경우 웜의 피치원 직경이 적고 진행각을 크게 설계하는 것이 전달효율을 높이는 한 가지 방법이다. 따라서 웜의 이뿌리원 직경이 원하는 강도 허용값 범주에 있는 경우 지름계수는 작은 값을 선택하도록 한다.

AGMA에는 직경계수에 대한 규정이 없고 웜의 평균직경(mean diameter = 웜 나사의 작용깊이 중간지점에서의 직경을 말함)을 구하는 식이 나와 있다.

$$d_{m\ max} = \frac{C^{0.875}}{1.07}$$

$$d_{m\ min} = \frac{C^{0.875}}{2.0}$$

여기서, C = 중심거리

니만(Nimann)은 먼저 이뿌리원 직경을 구하였다.

$$d_{i1} = 0.6C^{0.85}$$

그 후 모듈을 구하여 웜과 웜휠의 각 치수를 계산한다.

$$m = \frac{2a - d_{il}}{Z_2 + 2.4}$$

$$d_1 = d_{i1} + 2.4 \times m$$

$$d_{a1} = d_1 + 2m$$

여기서, d_{a1} = 웜의 외경

③ 웜의 줄수와 웜휠의 잇수 결정

BS에는 범용 웜의 줄수를 다음 공식으로 구하여 가장 근접한 정수를 사용한다.

$$i = \frac{Z_2}{Z_w}$$

$$Z_w = \frac{7 + 12\sqrt{\ }}{i}$$

여기서, i = 기어비율

C = 중심거리(inch)

웜휠의 잇수는 절하(언더컷, undercut)가 발생하지 않도록 18이상을 사용한다. 특히 웜의 줄수가 2이상인 경우는 웜휠의 잇수를 웜의 줄수로 나누어 무한 소수가 되게 하는 것이 좋다.

잇수 비율이 정수가 될 경우 주기적인 피치오차가 발생하기 쉽기 때문에 잇수를 한 개 감소시켜서 정하는 것이 좋다.

상세한 치수결정과 웜기어에서 발생하는 하중과 가공방법 등은 다음 호에 계속 연재하겠다.

· 문의 (032)584-0430