

5. 내기어와 유성기어 시스템의 설계와 제작

기어는 산업 전반에 걸쳐 여러 분야에서 이용되고 있고, 특히 동력을 전달하는 기계장치에 많이 사용되고 있기 때문에 기계기술자라면 누구나 한번쯤 기어를 접해본경험이있을 것이다. 우리가타고 다니는 자동차만하더라도 다양한크기와종류의기어장치를사용하고있다.

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

연재 순서

1. 기어 기초
2. 평기어와 헬리컬 기어의 설계와 제작
3. 베벨 기어의 설계와 제작
4. 웜 기어의 설계와 제작
- 5. 내기어와 유성기어 시스템의 설계와 제작**
6. 기어 동력 전달 장치 설계 포인트
7. 기어 사고 사례와 그 원인

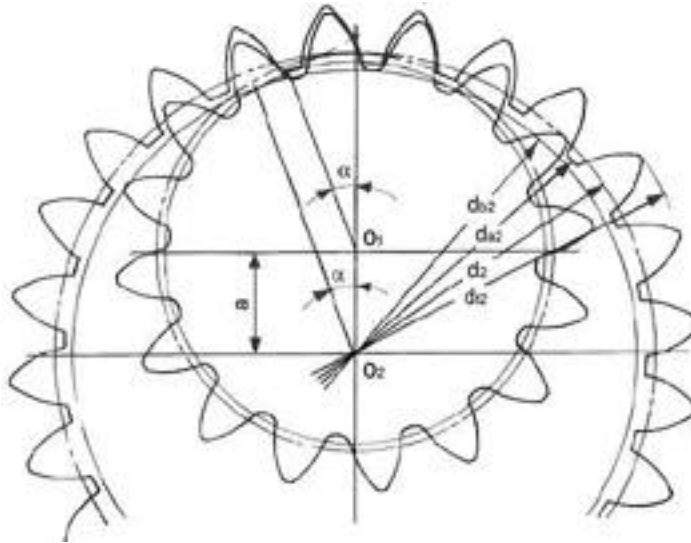
5. 내기어와 유성기어 시스템의 설계와 제작

(1) 내기어 (Internal Gear)

평기어는 외부에 기어 이가 있는 반면 내기어는 내부에 있어서 한 쌍의 외기어와 맞물려 동력을 전달한다.

내기어의 치수 계산은 평기어나 헬리컬 기어와 비슷하나 다만 내기어의 이끝원 직경은 평기어의 이뿌리원 직경에 해당하고 내기어의 이뿌리원 직경은 평기어의 이끝원 직경에 해당한다는 점이 다르다.

내기어는 일반 평기어나 헬리컬 기어에 비해 설치 공간을 적게 차지하지만 설계시 주의



<그림 1> 내기어

할 점이 몇가지 있다.

먼저 내기어와 외기어가 서로 맞물릴 때 다음 세 가지 간섭이 일어나지 않도록 설계해야 한다.

① 인벌루트 간섭(involute interference)

인벌루트 간섭이란 평기어의 이뿌리원과 내기어의 이끝원 사이에 간섭이 발생하는 현상을 말한다. 이것은 평기어의 잇수가 적을 때 주로 나타나며 <그림 2>에서 보듯이 피니언과 기어가 맞물릴 때, 내기어의 이끝이 평기어의 인벌루트 곡선과 부딪히는 현상이다. 이 현상을 방지하기 위해서는 다음 식이 만족되도록 설계해야 한다.

$$PI_1 \geq PB$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} \geq 1 - \frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1}$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{d_{g2}}{d_{k2}} \right)$$

여기서, α_2 = 내기어의 이끝원 압력각

α_1 = 물림압력각

d_{g2} = 내기어의 기초원

d_{k2} = 내기어의 이끝원 직경

Z_1 = 피니언 잇수

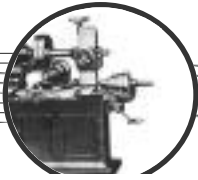
Z_2 = 내기어 잇수

내기어의 이끝원 압력각을 구하기 위해서는 내기어의 이끝원 직경(d_{k2})이 기초원 직경(d_{g2})보다 크거나 같아야만 한다. 압력각이 20°(인 표준내기어인 경우 잇수가 34이상이면 이끝원 직경이 기초원 직경보다 크다. 따라서 잇수 선정 시 이점을 고려해야 한다.

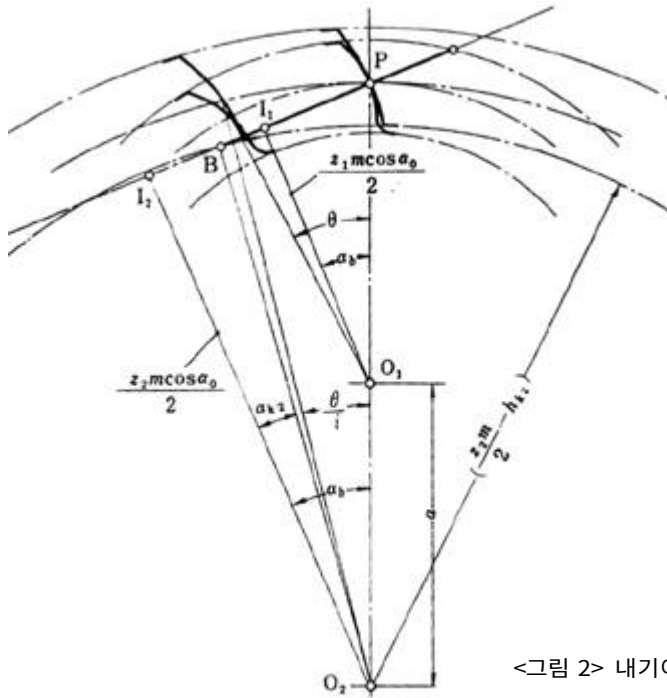
② 트로코이드 간섭(trochoidal interference)

내기어와 피니언의 잇수 차이가 적을 경우 인벌루트의 접촉이 끝나는 지점에서 피니언의 이끝이 내기어 사이에 간섭이 일어날 수 있다.

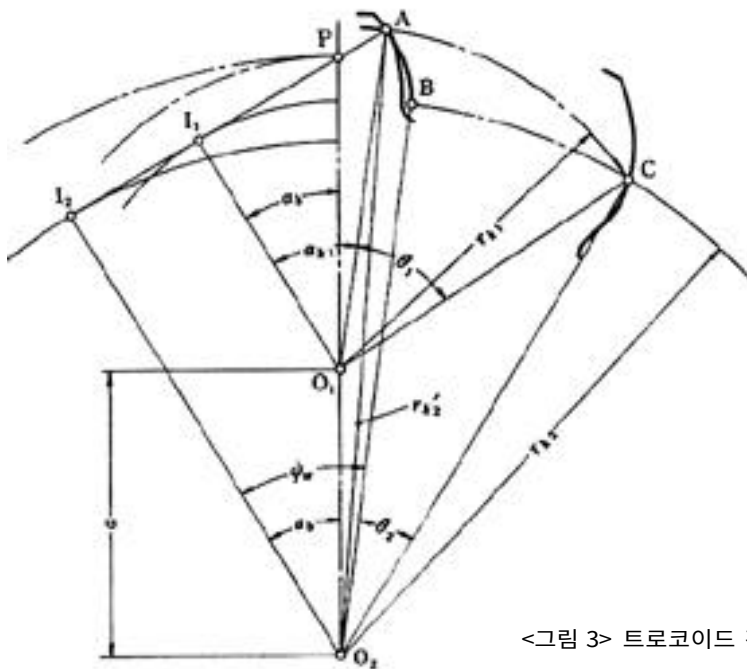
<그림 3>에서 피니언이 구동기어이고 내기어가 피동기어라면 인벌루트 접촉은 A 점에서 시작하여 C점에서 끝나게 된다. 이 때에 피니



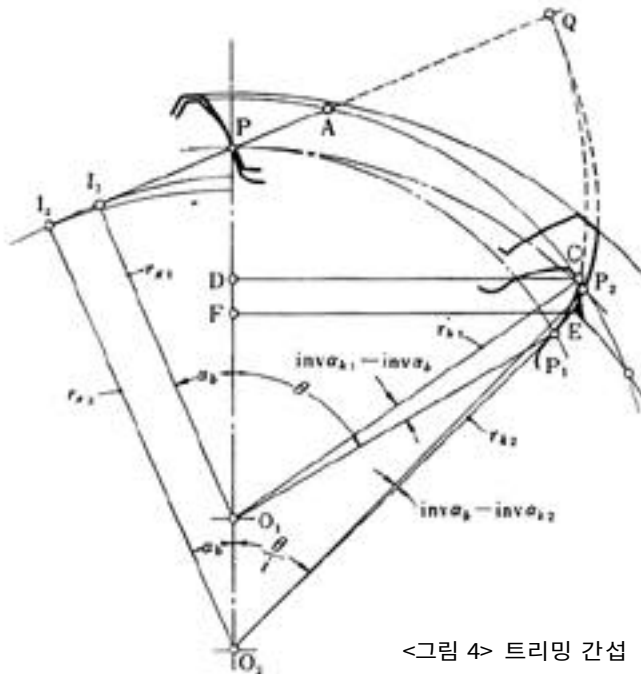
기어 강좌



<그림 2> 내기어의 인벌루트 간섭



<그림 3> 트로코이드 간섭



〈그림 4〉 트리밍 간섭

언의 이끝이 내기어의 이끝을 빠져나가면서 내기어의 트로코이드 부분에서 간섭이 발생한다. 즉 내기어의 이끝이 피니언의 이끝보다 먼저 C점을 통과하게 되어 이러한 간섭이 일어난다.

트로코이드 부분에서 간섭이 일어나지 않도록 하려면 다음 식이 성립되어야 한다.

$$\phi \geq \phi \geq \frac{Z_2}{Z_1}$$

압력각이 20.인 표준 내기어와 표준 평기어의 잇수 차이가 9개 이상인 경우는 트로코이드 간섭을 줄일 수 있다.

③ 트리밍 간섭(trimming 또는 radial interference)

내기어와 피니언의 잇수 차이가 적을 때 발생할 수 있는 또 하나의 현상은 트리밍 간섭

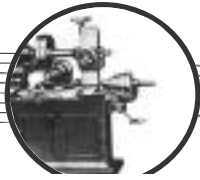
이다. 이것은 피니언이 기어와 맞물리기 위하여 반경방향으로 움직일 때 일어나기 쉽다.

피니언과 기어를 조립할 때 기어 잇수와 어텐덤의 비율에 따라 반경방향이나 축방향 중 하나를 선택하여 조립해야 한다.

예를 들어 기어 잇수가 19, 피니언 잇수가 12일 때 반경방향으로 축방향으로 피니언을 조립해야만 한다.

트리밍 간섭을 피하기 위해서는 〈그림 4〉에서 직선 CD가 EF보다 적어야만 한다. 즉 기어의 어텐덤을 조정하여 피니언과의 간섭을 피할 수 있다. 더들리(Dudley)는 [HAND BOOK OF PRACTICAL GEAR DESIGN]에, 압력각이 20.인 경우, 트리밍 간섭을 피할 수 있는 피니언과 기어의 잇수와 어텐덤을 <표 1>과 같이 추천하고 있다.

피니언 커터(pinion cutter)로 내기어를 치절할 경우에도 피니언 커터 잇수와 내기어의 잇수 차이에 의해 트리밍 간섭이 발생하여 커



기어 강좌

<표 1> 내기어(internal spur gear)의 최소 잇수와 어텐덤 비율

피니언 잇수	피니언의 어텐덤	최소 기어 잇수		기어 어텐덤			
		축방향 조립시	반경방향 조립시	최소기어 비율	기어비율 =2	기어비율 =4	기어비율 =8
12	1.35	19	26	0.472	0.510	0.582	0.616
	1.51	19	26	0.390	0.412	0.451	0.471
13	1.29	20	27	0.507	0.556	0.635	0.673
	1.47	20	27	0.419	0.445	0.488	0.509
14	1.23	21	28	0.543	0.601	0.688	0.729
	1.43	21	28	0.447	0.479	0.525	0.548
15	1.18	22	30	0.574	0.642	0.733	0.777
	1.40	22	30	0.470	0.506	0.554	0.577
16	1.12	23	32	0.608	0.688	0.786	0.834
	1.38	23	32	0.487	0.526	0.574	0.597
17	1.06	24	33	0.642	0.734	0.839	0.890
	1.36	24	33	0.505	0.546	0.594	0.617
18	1.00	25	34	0.676	0.779	0.892	0.947
	1.35	25	34	0.516	0.558	0.605	0.628
19	1.00	27	35	0.702	0.792	0.808	0.950
	1.33	27	35	0.539	0.578	0.625	0.648
20	1.00	28	36	0.713	0.802	0.903	0.952
	1.32	28	36	0.550	0.590	0.636	0.658
22	1.00	30	39	0.733	0.821	0.912	0.957
	1.29	30	39	0.577	0.621	0.666	0.688
24	1.00	32	41	0.750	0.836	0.920	0.960
	1.07	32	41	0.599	0.644	0.687	0.709
26	1.00	34	43	0.766	0.849	0.926	0.963
	1.25	34	43	0.620	0.666	0.709	0.729
30	1.00	38	47	0.792	0.870	0.936	0.968
	1.22	38	47	0.654	0.702	0.741	0.761
40	1.00	48	57	0.836	0.903	0.952	0.976
	1.17	48	57	0.718	0.764	0.797	0.814

터를 파손시키는 일이 일어날 수 있다. 따라서 피니언 커터를 이용하여 내기어를 창성할 때에는 피니언 커터 잇수 선정에 주의해야 한다.

<표 2>는 트리밍 간섭을 피하기 위한 내기어 잇수에 따른 최소 피니언 커터 잇수이다.

여기서 Z_c = 피니언 커터 잇수

<표 2>에서 피니언 커터 잇수가 15~22개인 경우 인벌루트 간섭이 발생할 수 있으므로 주의한다.

내기어는 평기어나 헬리컬 기어에 비해 접

<표 2> 트리밍 한계 내기어 잇수

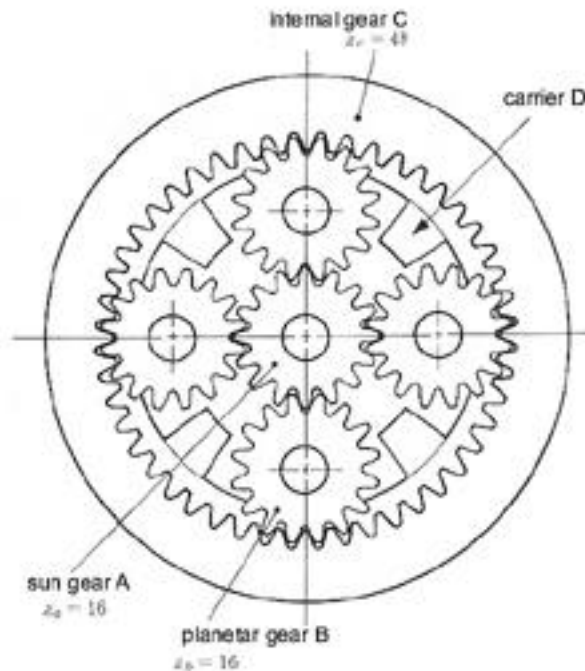
Zc	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27
Z2	34	34	35	36	37	38	39	40	42	43	45
Zc	28	30	31	32	33	34	35	38	40	42	44
Z2	46	48	49	50	51	52	53	56	58	60	62
Zc	48	50	56	60	64	66	80	96	100		
Z2	66	68	74	78	82	84	98	114	118		

촉면적이 넓기 때문에 큰 동력을 전달하기가 좋지만 앞에서 설명한 세 가지 간섭이 일어나지 않도록 설계해야 한다.

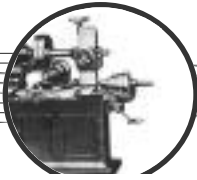
(2) 유성기어(planetary gears)

① 유성기어 장치의 특징

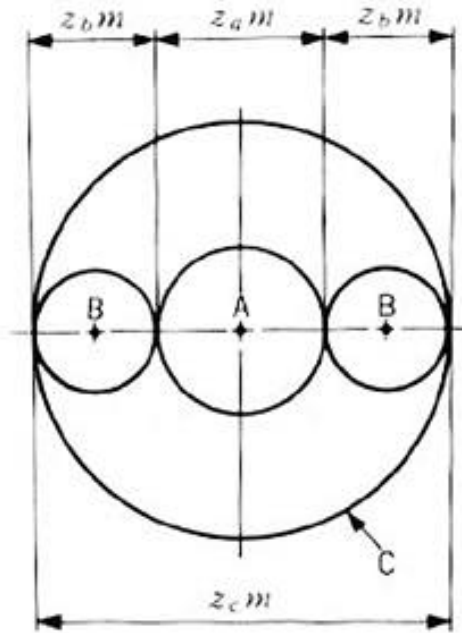
내기어를 이용하여 동력을 전달할 수 있는 또 하나의 기어 장치로는 유성기어가 있다. 유성기어 중 가장 기본적인 시스템은 한 개의 태양기어(sun gear)와 한 개의 내기어 그리



<그림 5> 유성기어 장치



기어 강좌



<그림 6>

고 여러 개의 유성기어로 구성된다. 태양기어란 입력축과 연결되어 동력을 전달하는 기어를 말하며 유성기어는 태양기어와 접촉하여 내기어에 동력을 전달하며 내기어와 태양기어 사이에 위치한다. 유성기어는 태양기어와 접촉하여 스스로 자전하는 회전운동을 하지만 동시에 유성기어들을 연결하는 링크에 의해 내기어 주위를 공전한다.

유성기어 장치는 입력축과 출력축이 동일 직선상에 위치할 수 있고 여러 개의 유성기어를 이용하여 하중을 나누어 전달한다. 따라서 유성기어를 이용하여 동력전달장치를 설계하면 다른 기어를 이용한 것보다 크기가 적고 큰 기어비율을 가진 기계를 설계할 수 있다. 그러나 유성기어가 균등한 하중을 받도록 가공이나 조립이 이루어지지 않으면 오히려 기어가 빨리 파손되는 원인이 될 수 있다.

유성기어 장치는 구동과 피동기어를 달리 선택함에 따라 다양한 기어 비율을 얻을 수

있을 뿐만 아니라 여러가지의 특수한 구조를 설계하는데도 많이 사용할 수 있다.

② 유성기어 장치의 잇수 조건

유성기어 장치는 태양기어와 유성기어, 내기어의 잇수가 다음에 설명할 세 가지 조건에 맞지 않으면 조립이 불가능할 뿐 아니라 작동이 되지 않는다. 따라서 유성기어 장치를 설계할 때는 가장 먼저 이 조건을 검토해야만 한다.

첫째로 내기어의 중심거리와 태양기어와 유성기어의 중심거리 조건이 일치해야 한다. 즉 <그림 6>에서 태양기어와 내기어의 중심거리는 유성기어와 내기어의 중심거리와 같아야 한다.

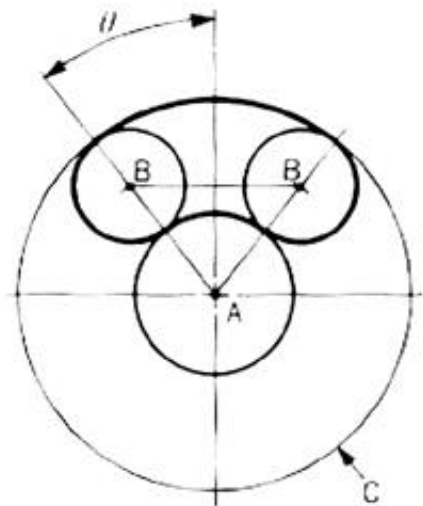
$$Z_c = Z_a + 2Z_b$$

여기서, Z_c = 내기어(C)

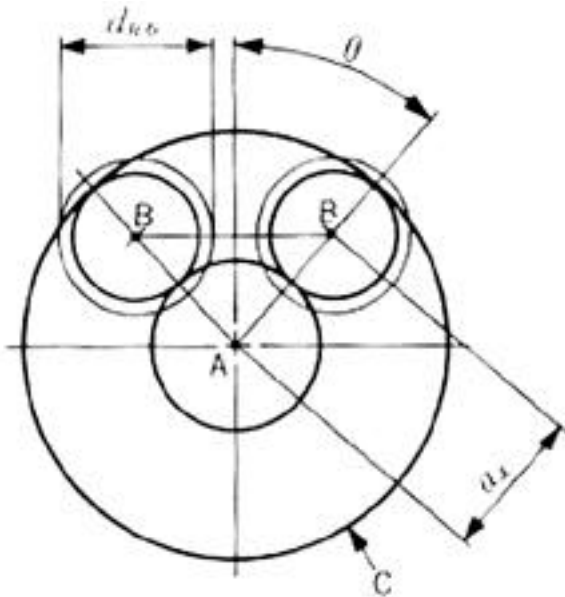
Z_a = 태양기어(A)

Z_b = 유성기어(B)

둘째로 유성기어는 동일한 비율로 배치되어



<그림 7>



<그림 8>

야 한다.

$$\frac{Z_a + Z_c}{N} = \text{정수 (여기서 } N = \text{유성기어 개수)}$$

세째로 유성기어와 내기어가 맞물릴 때 유성기어 외경이 간섭이 받지 않아야 한다. 유성기어가 내기어와 균등한 비율로 맞물린다 해도 내기어에서 발생하는 세 가지 간섭 중 한 가지라도 발생한다면 원활한 기어의 맞물림이 이루어지지 않는다.

$$Z_b + 2(Z_a + Z_b) \sin \frac{180^\circ}{N}$$

$$d_{kb} < 2a_x \sin \theta$$

여기서, d_{kb} = 유성기어의 이끝원 직경
 a_x = 태양기어와 유성기어의 중심 거리

태양기어의 잇수가 16이고 유성기어 잇수가 16이면 내기어의 잇수는 첫번째 조건에 따라 48이 되어야 한다.

두번째 조건을 만족시키기 위해서는 유성기어의 개수는 2나 4가 되어야 한다. 유성기어가 3개나 5개인 경우는 두번째 조건에서 태양기어와 내기어 잇수를 더한 값을 나누었을 때 정수가 되지 않으므로 사용하면 안된다. 이 경우 유성기어 장치의 조립 자체가 불가능하다. 유성기어 장치를 설계하는 초보자의 경우는 특히 유성기어 개수를 결정하는데 조심해야 한다.

③ 유성기어 장치의 기어비율

유성기어 장치는 고정시키는 기어에 따라 기어 비율이 달라진다. 먼저 가장 기본적인 유성기어 장치의 기어비율을 알아보겠다.

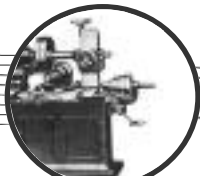
- 내기어를 고정시킨 경우

유성기어 장치를 간단하게 <그림 5>와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 내기어(C)를 고정시키면 동력은 입력축인 태양기어 A에서 출력축인 캐리어(carrier) D로 전달된다. 이 때 각 기어의 속도전달비는 <표 3>과 같이 계산된다.

<표 3>에서 번호 3을 근거로 기어비율을 계산한다.

$$\text{기어비율} = \frac{\frac{Z_a}{Z_c}}{1 + \frac{Z_a}{Z_c}} = \frac{1}{\frac{Z_c}{Z_a} + 1}$$

($Z_a = 16$, $Z_b = 16$, $Z_c = 48$ 이라면 기어비율은 1/4가 된다.)



기어 강좌

<표 3> 내기어를 고정시킨 경우의 속도전달비

번 호	설 명	태양기어 Za	유성기어 Zb	내기어 Zc	캐리어 1
1	캐리어를 고정하고 태양기어를 1회전시킴	+1	-Za/Zb	-Za/Zc	0
2	전체를 +Za/Zc만큼 회전시킴	Za/Zc	Za/Zc	Za/Zc	Za/Zc
3	1과 2의 경우를 더함	1+Za/Zc	Za/Zc-Za/Zb	0(고정)	Za/Zc

<표 4>태양기어를 고정시킨 경우의 속도전달비

번 호	설 명	태양기어 Za	유성기어 Zb	내기어 Zc	캐리어 1
1	캐리어를 고정하고 태양기어를 1회전시킴	+1	-Za/Zb	-Za/Zc	0
2	전체를 1회전시킴	-1	-1	-1	-1
3	1과 2의 경우를 더함	0(고정)	-Za/Zb-1	-Za/Zc-1	-1

- 태양기어를 고정시킨 경우
태양기어를 고정시키고 내기어를 입력축, 캐리어를 출력축으로 할 경우 속도전달비는 <표 4>와 같이 계산한다.

$$\text{기어비율} = \frac{-1}{-\frac{Z_a}{Z_c}-1} = \frac{1}{\frac{Z_c}{Z_a}+1}$$

(Za=16, Zb=16, Zc=48이라면 기어비율은 1/1.333이 된다.)

- 캐리어를 고정시킨 경우
캐리어를 고정시키면 유성기어는 제자리에서 자전만 하고 내기어 주위를 따라 공전하지

는 못한다. 이때는 태양기어가 입력축이 되고 내기어가 출력축이 된다.

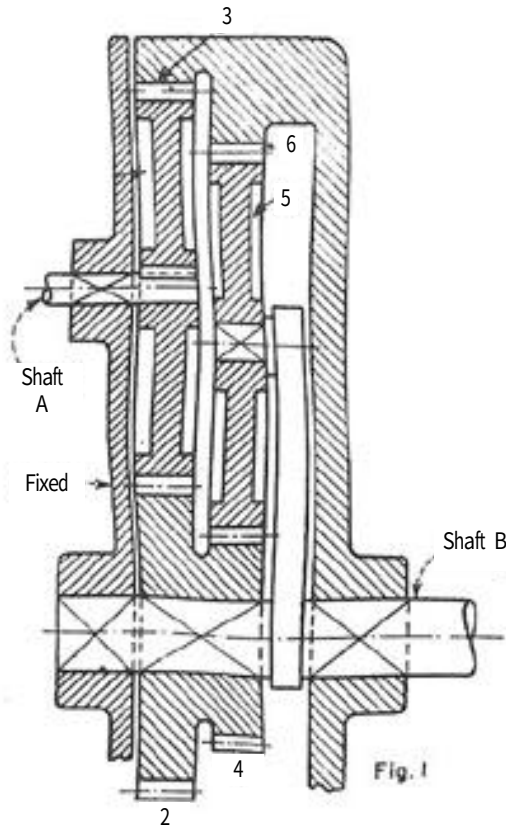
$$\text{기어비율} = -\frac{Z_a}{Z_c}$$

(Za=16, Zb=16, Zc=48이라면 기어비율은 -1/3이 된다.)

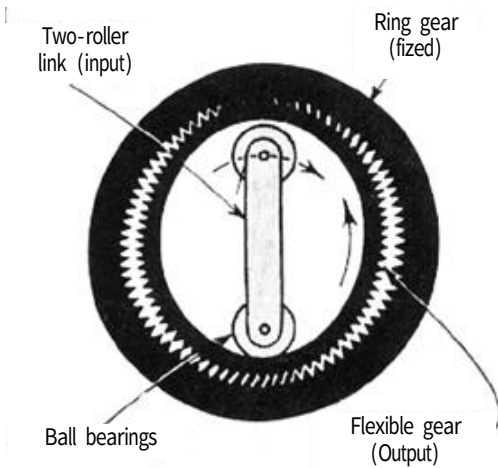
④ 여러 종류의 유성기어 장치

유성기어 장치를 가장 먼저 사용한 사람은 제임스 와트(James Watt)로 그는 1782년에 내연기관의 크랭크운동에 이 유성기어장치를 이용하였다고 한다.

유성기어 장치는 면적을 작게 차지할 뿐 아



<그림 9> 차동기어



<그림 10> 하모닉 기어

니라 경량으로 설계할 수 있다는 장점 때문에 압축기나 송풍기, 원심분리기와 항공기의 변환 기관과 고속회전과 고효율이 요구되는 장치에 다양하게 사용되고 있다.

유성기어 장치는 앞에서 살펴본 가장 기본적인 구조 외에도 매우 다양한 구조로 사용되고 있다. 특히 차동 유성기어 장치를 이용하면 2단계 유성기어 장치만으로도 매우 큰 기어비율을 얻을 수 있기 때문에 자동차나 항공기계 등 큰 기어비율이 요구되는 곳에 사용되기도 한다.

<그림 10>는 단순한 구조로 상당히 큰 기어비율을 얻을 수 있는 하모닉 기어(harmonic gear)이다. 