

〈논 문〉

설계인자 보정방법에 의한 사출성형기어의 캐비티 설계

이성철* · 김충현* · 권오관* · 허용정**

(1996년 2월 10일 접수)

Cavity Design for Injection Molded Gears by the Compensation Method of Design Parameters

Sung Chul Lee, Choong Hyun Kim, Oh Kwan Kwon and Yong Jeong Huh

Key Words : Injection Molded Gears(사출 성형 기어), Gear Cavity(기어 캐비티), Shrinkage Rate(수축률), Chordal Thickness(활줄이두께)

Abstract

As plastics shrink when changing from a molten to a solid state, mold cavities must be made larger than the product specification. In making molded gears, the teeth in the cavity must be carefully compensated for shrinkage so that the teeth of gears will have the correct profile. Two compensation methods are widely used in the cavity design. One is the compensation of a module and the other is the modification of a pressure angle and profile shifting coefficient. These methods, however, do not provide a gear cavity with all design parameters for gears, and several parameters are determined by experience. In this paper, the new design technique, namely the compensation method of design parameters, was proposed, which is based on the three kinds of shrinkage rates obtained from the measuring data of the prototype of molded gears. Using the shrinkage rates in the tip circle, tooth height and tooth thickness, we calculate the whole design parameters of a gear cavity. Thus, the gear cavity is considered as a complete gear with the compensated module, pressure angle, profile shifting coefficient, clearance coefficient and backlash amount so that the formula of gears can be applied to the cavity design effectively. Experimental results show that more precision molded gears can be made by using the proposed design method.

1. 서 론

플라스틱기어는 무윤활로 운전이 가능하고 진동 및 소음 특성이 양호하고 내식성이 우수하여 각종 가전기기, 음향기기, 측정기기, 사무자동화기기, 계기류 등에 널리 사용되고 있다. 플라스틱기어의 제작에는 기계적 절삭과 사출성형의 두가지 방법이

사용되고 있는데 기계적 절삭은 크기가 큰 동력전달용 플라스틱기어나 사출성형이 어려운 열경화성 수지를 재료로 사용하는 기어의 가공에 활용되고, 소형의 플라스틱기어는 대부분 사출성형으로 제작하고 있다.⁽¹⁻³⁾

기어의 원활한 불림운동을 위해서는 치수뿐만 아니라 치형형상의 정밀도가 충분히 확보되어야 한다. 현재 국내에서 생산되고 있는 사출성형기어의 정밀도는 보통 KS5-7급 정도의 수준이나 외국문헌에는 KS2급 정도에 해당하는 정밀기어의 사출성형

*회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

**회원, 한국기술교육대학교 생산기계공학과

사례가 보고되어 있다.^(4,5)

플라스틱기어의 사출성형용 캐비티는 수지의 수축에 의한 변형을 고려해서 설계해야 한다. 수축률은 사출조건, 고분자 재료, 금형에서의 게이트 위치 등에 따라 달라지기 때문에 기어캐비티 설계시에는 대부분 피치원 크기에 상당하는 원판을 시사출하여 반경방향의 평균 수축률을 측정해서 사용하고 있다. 기어는 형상정밀도를 요구하기 때문에 기어캐비티의 크기를 단순히 선형적으로 증대시키면 응고시 이끝과 이뿌리 부분의 수축이 달라져서 사출기어의 치형형상이 왜곡되어 설계치형과는 전혀 다르게 된다.⁽⁶⁾ 스퍼기어의 캐비티 설계에 사용되고 있는 방법으로는 모듈을 보정하는 방법⁽⁷⁾과 압력각을 보정하는 방법^(8~10)이 있는데 전자는 피치원에서의 수축률을 기준으로 기어캐비티의 모듈 값만 변화시키고 후자는 압력각과 전위계수만 보정하고 있다. 기어캐비티를 설계하기 위해서는 모듈, 압력각, 잇수, 전위계수, 틈새계수, 백래시가 결정되어야 하는데 두 방법 모두 보정하는 인자이외의 설계인자에 대해서는 고려가 없기 때문에 캐비티 설계에 일련의 기어 설계공식을 그대로 적용할 수 없다. 또한 플라스틱기어에서는 금속제 기어보다 치의 처짐과 열팽창이 크기때문에 백래시가 중요하게 취급되어야 할 설계인자임에도 불구하고 모듈이나 압력각 보정방법에서는 이에 대한 고려가 없다. 백래시는 기어의 이두께를 감소시키든가 조립시 두 기어의 중심거리를 변경시켜 확보하는 두 가지 방법이 있지만 사출기어에서는 기어자체에서 백래시를 고려하고 중심거리는 고정된 것으로 설계하는 것이 편리하다.

본 연구에서는 스퍼기어의 캐비티 설계에 사용되고 있는 모듈 보정과 압력각 보정방법을 비교하여 문제점을 지적하고 이 방법들이 반경방향 수축률만을 캐비티 설계에 적용하는데 반하여 시사출 기어의 측정자료로부터 반경방향 수축률, 이높이 수축률, 이두께 수축률을 정의하고 이를 활용하여 기어캐비티의 모든 설계인자를 보정하는 새로운 설계방법을 제시하고자 한다.

2. 기어캐비티의 보정방법

2.1 기존의 기어캐비티 보정방법

사출기어의 캐비티 설계방법으로 모듈 보정과 압력각 보정이 사용되고 있다. 모듈 보정방법에서는

수지의 반경방향 수축률 s 를 기준으로 캐비티의 모듈을 다음과 같이 산정한다.⁽⁷⁾

$$m^c = \frac{1}{1-s} m \quad (1)$$

여기서, m 은 모듈이며, 상첨자 c 는 캐비티에 대한 변수임을 나타낸다.

모듈 보정은 피치원의 수축을 고려한 것으로 기어의 이두께방향 수축은 선형으로 가정하고 있다. 따라서 모듈이 0.2에서 0.8 정도의 범위, 즉 이의 크기가 작은 경우에만 적용가능하며, 그 이상의 모듈에서는 치형 일부를 수정하지 않으면 정밀한 플라스틱 기어 사출이 어렵다.

압력각 보정방법은 기어캐비티의 압력각과 전위계수를 보정하는 방법으로 다음과 같은 식들이 발표되어 있다.^(8,9)

$$\begin{aligned} \cos \alpha^c &= \frac{1+2s}{1+s} \cos \alpha \\ x^c &= x + \frac{s}{2} [z + 2(1+x)] \end{aligned} \quad (2)$$

또는

$$\begin{aligned} \cos \alpha^c &= \frac{1}{1-s} \cos \alpha \\ x^c &= \frac{1}{\tan \alpha^c} \left[\frac{z}{2} (\text{inv } \alpha - \text{inv } \alpha^c) + x \tan \alpha \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, α 는 압력각, x 는 전위계수이고, z 는 잇수이다.

압력각 보정방법은 사출기어의 응고시 피치원의 수축보다 기초원의 수축이 약간 더 크다는 사실에 근거한 것으로 압력각 보정식은 피치원과 기초원 수축에 대한 실험결과에서 유도된 것이며, 피치원의 수축은 전위계수로 보정한다.

그러나 모듈 보정이나 압력각 보정방법에서는 보정하는 인자 이외의 재원은 설계자가 경험적으로 결정하여야 하며, 일련의 기어 설계공식을 그대로 적용할 수 없다.

2.2 설계인자 보정을 위한 수축률 산정

기어는 형상 정밀도를 필요로 하기 때문에 사출성형으로 제작하기 어려운 제품 중의 하나이다. 사출기어용 캐비티의 설계시 반경방향의 수축만 고려하는 것은 사출기어 치형의 정밀도 확보에 한계가 있으므로 치의 이높이와 이두께의 수축도 동시에 고려할 필요가 있다. 동일 재료의 수지라도 사출조건에 따라 수축특성이 달라지기 때문에 대부분의

경우 기어의 피치원 지름에 상당하는 크기의 원판을 시사출하여 수축률을 측정하고 이 값을 기준으로 캐비티를 설계한다.

본 연구에서는 시사출용 캐비티를 일차 제작하고 여기에서 사출된 기어의 수축특성을 측정하여 반경방향뿐만 아니라 이높이와 이두께에 대한 수축률을 산정하고 이들 수축률을 적용하여 기어캐비티를 재설계하는 방법을 정립한다. 필요한 측정데이터는 시사출기어의 이끝원 지름과 이높이에 따른 활줄이두께(chordal thickness)로 마이크로미터와 형상투영기(profile projector)를 사용하여 쉽게 측정할 수 있다.

기어캐비티는 소형의 내치차이기 때문에 호빙가공이 불가능하고 주로 와이어커팅으로 가공하기 때문에 사출기어의 이끝이나 이뿌리부분은 원호로 설계하고 있다.⁽¹⁰⁾ 시사출기어에서는 측정을 용이하게 하기 위하여 캐비티의 이끝과 이뿌리부분을 형상수정없이 설계한다. 따라서 기어캐비티의 이뿌리부분은 이뿌리원이 기초원보다 작은 경우에는 Fig. 1(a)에 도시한 바와 같이 이뿌리원, 직선, 인볼류트곡선으로 구성되고 그 반대의 경우에는 Fig. 1(b)에서와 같이 이뿌리원과 인볼류트 곡선으로 구성된다. 시사출기어에서 기초원의 위치를 확인하기 불가능하기 때문에 Fig. 2에 나타난 바와 같이 치형이 이뿌리원과 만나는 좌우의 두 점을 연결한 선을 기준으로 치의 이높이 및 이두께 계산과 측정을 실시한다. 형상 투영기를 사용하여 시사출기어를 측정할 때 이 기준선은 쉽게 구분할 수 있다.

플라스틱기어의 사출성형시 수축률을 다음과 같이 정의한다.

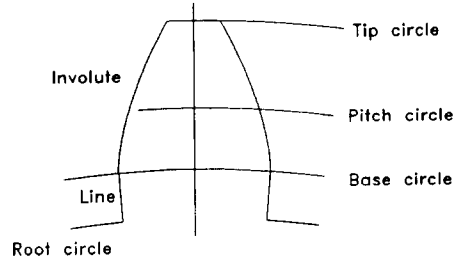
$$\bullet \text{ 반경방향 수축률} : s_r = \frac{d_a^c - \bar{d}_a}{d_a^c} \quad (4)$$

$$\bullet \text{ 이높이 수축률} : s_h = \frac{h_{\max}^c - \bar{h}_{\max}}{h_{\max}^c} \quad (5)$$

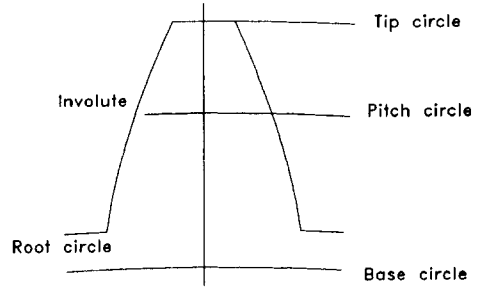
$$\bullet \text{ 이두께 수축률} : s_t = s_a h' + s_r \quad (6)$$

여기서, d_a^c 는 시사출용 캐비티의 이끝원 지름이고 h_{\max}^c 는 최대 이높이로 시사출용 캐비티의 설계제원에서 구해지며, \bar{d}_a 와 \bar{h}_{\max} 는 다수의 시사출기어를 측정해서 구한 평균값이다.

치형에서 이높이위치에 따른 반경방향 수축은 측정하기 어렵기 때문에 선형으로 가정하고 이높이에 따른 이두께 수축만 고려한다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 다수의 시사출 기어 치형에서 이높이 h_i 에 대한 활줄이두께 t_i 를 측정하고 평균값 \bar{t}_i 를 계산



(a) Root circle dia < Base circle dia



(b) Root circle dia > Base circle dia

Fig. 1 Configuration of prototype molded gears

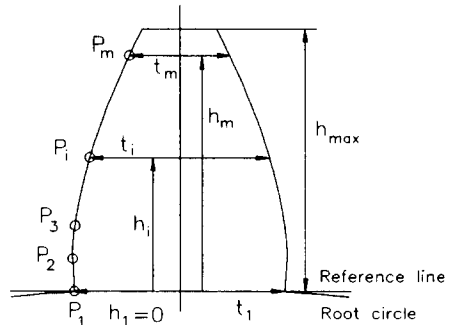


Fig. 2 Measurement of tooth height and chordal thickness

한다. 측정시 치형 표본에 따라 최대 이높이 h_{\max} 가 다르지만 이를 무시하고 무차원 이높이를 $h'_i = h_i / \bar{h}_{\max}$ 로 정의한다. 무차원 이높이 h'_i 대한 캐비티의 활줄이두께를 t_i^c 라 하면 다음과 같이 무차원 이높이에 대한 이두께 수축률 $s_t(h'_i)$ 가 계산된다.

$$s_t(h'_i) = \frac{t_i^c - \bar{t}_i}{\bar{t}_i}, \quad i=1, \dots, m \quad (7)$$

여기서, m 은 측정점의 개수이다. 이두께 수축을 캐비티 설계에 활용하기 위해서 식 (7)의 데이터를 최소자승법으로 선형화하면 식 (6)의 이두께

수축률계수 s_a 와 s_r 가 결정된다.

2.3 설계인자 보정에 의한 캐비티 설계

사출기어의 설계제원에 식 (4)~(6)으로 정의한 수축률을 적용하여 기어캐비티를 설계한다. 반경방향 및 이높이 수축률로부터 캐비티의 이끌원 지름 d_a^c , 최대 이높이 h_{max}^c 와 피치원 지름 d_f^c 는 다음과 같이 계산된다.

$$d_a^c = \frac{d_a}{1 - s_r} \tag{8}$$

$$h_{max}^c = \frac{h_{max}}{1 - s_h} \tag{9}$$

$$d_f^c = (d_a^c - 2h_{max}^c) + 2h_{\rho}^c h_{max}^c \tag{10}$$

여기서, h_{ρ}^c 는 기준선에서 피치원까지의 무차원 이높이로 사출기어의 설계제원에서 계산한다. 캐비티의 이끌원과 피치원 지름이 구해지면 모듈 m^c 와 전위계수 x^c 는 기어 설계공식으로부터 다음과 같이 계산된다.⁽¹¹⁾

$$m^c = \frac{d_f^c}{z} \tag{11}$$

$$x^c = \frac{d_a^c - d_f^c}{2m^c} - 1 \tag{12}$$

캐비티의 치형은 사출기어의 치형상에 위치한 두 점에 대응하는 캐비티 치형에서의 두 점을 구하고 이를 지나는 인볼류트곡선으로 설계한다. 무차원 이높이 h_1^c, h_2^c 에서 백래시를 고려하여 계산한 사출기어의 활줄이두께를 t_1, t_2 라 하면 이에 대응하는 캐비티의 활줄이두께는 이두께 수축률로부터 다음과 같이 계산된다.

$$t_1^c = \frac{t_1}{1 - s_t(h_1^c)} \tag{13}$$

$$t_2^c = \frac{t_2}{1 - s_t(h_2^c)} \tag{14}$$

여기서, 무차원 이높이 h_1^c, h_2^c 는 치형의 인볼류트 구간에 포함되어 있어야 한다.

식 (13), (14)로 캐비티의 활줄이두께가 계산되면 이를 만족하는 인볼류트곡선은 다음과 같은 방법으로 구한다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 기어캐비티 중심을 기준으로 한 좌표계에서 원점으로부터 무차원 이높이가 h_1^c, h_2^c 인 활줄선까지의 거리 g_1, g_2 는 다음과 같이 계산되며,

$$g_1 = \frac{1}{2}(d_a^c - 2h_{max}^c) + h_1^c h_{max}^c \tag{15}$$

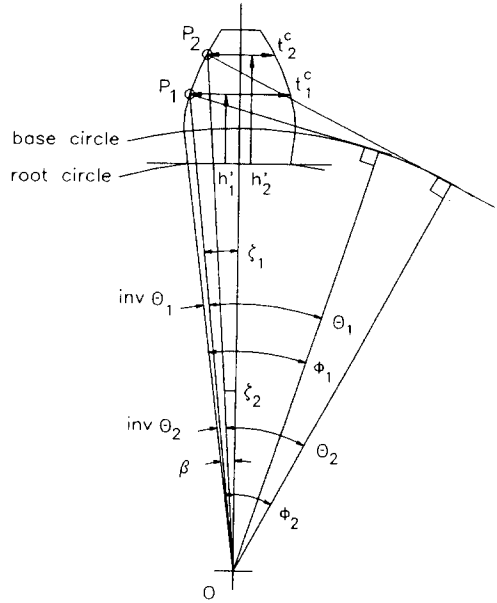


Fig. 3 Tooth geometry of the gear cavity

$$g_2 = \frac{1}{2}(d_a^c - 2h_{max}^c) + h_2^c h_{max}^c \tag{16}$$

이에 따라 활줄이두께가 t_1^c, t_2^c 인 캐비티 치형상의 점 P_1, P_2 의 위치가 결정된다. 원점을 중심으로 하고 P_1 을 지나는 원의 지름 d_1, P_2 를 지나는 원의 지름 d_2 및 P_1 과 P_2 점이 축과 이루는 각 ζ_1, ζ_2 는 다음과 같이 계산된다.

$$d_1 = \sqrt{(2g_1)^2 + (t_1^c)^2}, \quad d_2 = \sqrt{(2g_2)^2 + (t_2^c)^2} \tag{17}$$

$$\zeta_1 = \tan^{-1} \frac{t_1^c}{2g_1}, \quad \zeta_2 = \tan^{-1} \frac{t_2^c}{2g_2} \tag{18}$$

인볼류트곡선의 시작점이 축과 이루는 각을 β 라 하고, P_1 과 P_2 점의 구름각(roll angle)을 각각 ϕ_1, ϕ_2 라 하면 다음 식이 만족되어야 한다.

$$\text{inv } \theta_1 + \zeta_1 = \beta \tag{19}$$

$$\text{inv } \theta_2 + \zeta_2 = \beta \tag{20}$$

여기서,

$$\theta_1 = \tan^{-1} \phi_1, \quad \theta_2 = \tan^{-1} \phi_2 \tag{21}$$

기어캐비티의 기초원 지름을 d_f^c 라 하면 인볼류트 곡선의 특성인 다음 관계식이 만족되어야 한다.

$$d_f^c = d_1 \cos \theta_1 \tag{22}$$

$$d_f^c = d_2 \cos \theta_2 \tag{23}$$

식 (19), (20)과 식 (22), (23)에서 β 와 d_f^c 를 소거하면 다음 식이 얻어진다.

$$\text{inv } \theta_1 - \text{inv } \theta_2 = -\zeta_1 + \zeta_2 \quad (24)$$

$$d_1 \cos \theta_1 - d_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (25)$$

이 두 식에서 미지변수 θ_1 , θ_2 는 뉴턴방법 등에 의해 수치적으로 해를 구하고 이를 식 (19) 또는 (20)에 대입하면 인볼류트곡선의 시작점이 축과 이루는 각 β 가 구해지고, 식 (22) 또는 (23)에 대입하면 캐비티의 기초원 지름 d_b^c 가 계산된다.

캐비티의 압력각은 기초원 지름과 피치원 지름의 관계로부터 다음과 같이 결정된다.

$$\alpha^c = \cos^{-1} \frac{d_b^c}{d_f^c} \quad (26)$$

그리고 캐비티 피치원에서의 원호 이두께 s_b^c 는 다음과 같으므로

$$s_b^c = (\beta - \text{inv } \alpha^c) d_f^c \quad (27)$$

피치원에서의 백래시 j_f^c 는 다음과 같이 계산된다.

$$j_f^c = \frac{\pi m^c}{2} + 2x^c m^c \tan \alpha^c - s_b^c \quad (28)$$

여기서, 백래시는 표준 이두께와의 차를 나타낸다.⁽¹²⁾

이뿌리원 지름 d_f^c 는 기초원과 이뿌리원의 관계에 따라 달라진다. 이뿌리원이 기초원보다 작은 경우에는 다음과 같이 계산되며

$$d_f^c = \frac{d_a^c - 2h_{\max}^c}{\cos \beta} \quad (29)$$

이뿌리원이 기초원보다 큰 경우에는 다음 식을

만족하는 값을 수치적으로 계산하여 이뿌리원 지름을 구한다.

$$d_f^c = \frac{d_a^c - 2h_{\max}^c}{\cos \zeta} \quad (30)$$

여기서,

$$\zeta = \beta - \text{inv} \left(\cos^{-1} \frac{d_b^c}{d_f^c} \right) \quad (31)$$

이뿌리원 지름과 이끝원 지름으로부터 치의 총이높이 h_w^c 는 다음과 같이 계산되며

$$h_w^c = \frac{1}{2} (d_a^c - d_f^c) \quad (32)$$

틈새계수는 설계공식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$c_k^c = \frac{h_w^c - 2m^c}{m^c} \quad (33)$$

이상과 같이 반경방향, 이높이 및 이두께 수축률에 의거하여 기어의 기본 설계인자인 모듈, 압력각, 전위계수, 백래시 및 틈새계수를 보정하였다. 계산시 기어의 설계공식에 적합하게 캐비티 설계인자를 상호 보정하였기 때문에 기어캐비티의 제원설계에는 일련의 기어설계 공식을 그대로 사용할 수 있다.

3. 기어캐비티 보정방법에 대한 평가

모듈 보정과 압력각 보정방법을 비교하기 위하여 각각의 방법으로 캐비티를 설계하고 캐비티와 설계

Table 1 Cavity design by the compensation of module and pressure angle

Design parameters	Molded gear	Cavity CM	Cavity CP
Module	1.5	1.5328	1.5
Pressure angle (deg)	20	20	16.3865
Number of teeth	32	32	32
Profile shifting coefficient	0	0	0.3638
Clearance coefficient	0.25	-	-
Amount of backlash (μm)	150	150	150
Dia. of tip circle	51	52.115	52.115
Dia. of root circle	44.25	45.218	45.218

CM : Compensation of module, CP : Compensation of pressure angle.

기어와의 수축특성을 살펴본다. 기어의 제원과 모듈 보정 및 압력각 보정방법으로 설계한 캐비티의 제원은 Table 1과 같다. 캐비티 설계시 수축률은 $s=0.0214[\text{mm}/\text{mm}]$ 을 사용하였으며, 백래시는 기어와 동일한 값으로 하고 틱새계수 대신 이뿌리원과 이끝원의 지름을 설계제원으로 사용하였다.

Fig. 4는 캐비티 치형과 사출하고자 하는 기어 치형의 활줄이두께를 비교한 것이며, Fig. 5는 무차원 이높이에 대한 이두께 수축률을 계산한 결과이다. 모듈 보정방법은 치의 이높이 수축이 주된 고려대상으로 이두께 수축은 거의 일정하게 된다. 압력각 보정방법은 이두께의 수축을 대상으로 하고

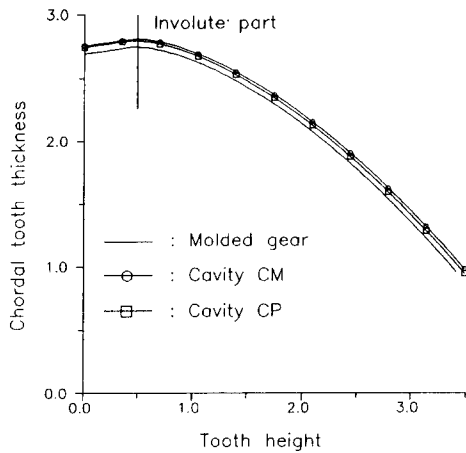


Fig. 4 Variation of the chordal thickness along the tooth height

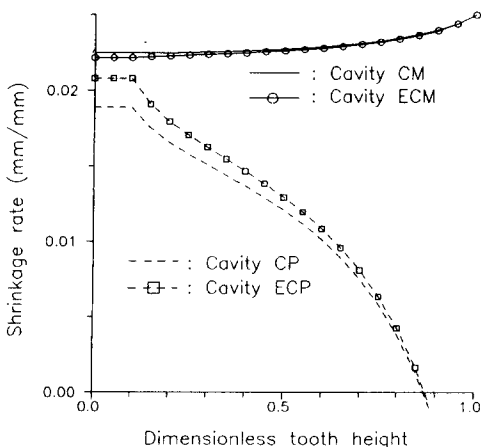


Fig. 5 Variation of the shrinkage rate along the dimensionless tooth height

있으나 반경방향 수축은 전위계수로 대처하기 때문에 경우에 따라서는 전위계수가 매우 커지며, 캐비티의 이끝 부분 이두께가 사출기어의 이두께 보다 작아지는 등의 문제점이 있다. Fig. 5를 살펴보면 모듈 보정방법에서 이두께 수축률은 이높이에 따라 약간 증가되고 압력각 보정방법에서는 급격히 감소하는 경향을 보여, 두 보정방법이 서로 다른 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

설계인자 보정방법을 평가하기 위하여 모듈 보정 및 압력각 보정에 의한 캐비티와 설계기어를 대상으로 설계 수축률을 계산하고 이를 설계인자 보정방법에 적용하여 캐비티를 재설계한다.

모듈 보정방법에 의한 캐비티의 설계 수축률을 계산하면 다음과 같다.

- 반경방향 수축률 : $s_r=0.0214$
- 이높이 수축률 : $s_h=0.0214$
- 이두께 수축률 : $s_t=0.0022h'+0.0217$

이두께 수축률은 Fig. 5에서 치형의 인볼류트 구간에서의 수축률을 선형화한 것이다.

한편, 압력각 보정방법에서의 설계 수축률은 다음과 같이 계산된다.

- 반경방향 수축률 : $s_r=0.0214$
- 이높이 수축률 : $s_h=0.0213$
- 이두께 수축률 : $s_t=-0.0252h'+0.0238$

각각의 보정방법에서의 설계 수축률을 사용하여 설계인자 보정방법으로 캐비티를 재설계한 결과를 Table 2에 제시하였다. 설계인자 보정방법이 타당하다면 재설계한 캐비티는 원래 캐비티에 등가되어야 한다. 등가캐비티 설계결과를 살펴보면 두 경우 모두 모듈에 대한 보정값이 크고 압력각이나 전위계수 보정값은 작은 것을 알 수 있는데, 이것은 설계인자 보정방법에서 반경방향 수축률에 의하여 피치원 지름을 일차적으로 결정하기 때문이며, 압력각은 이끝부분과 이뿌리부분에서의 이두께 수축률 차이를 고려한 것이나 실제 수축률 차이에 의한 이두께의 변화량은 작기 때문에 설계기어에 근접한 값이 된다. 또한 전위량은 기하학적으로 기준 피치원에서 이끝원과 이뿌리원까지의 거리를 결정하는 것으로 설계기어와 캐비티의 전위계수 차이가 크면 기준 피치원에서 이뿌리원까지의 반경방향 수축과 이끝원까지의 반경방향 수축이 매우 다른 의미를 가지기 때문에 캐비티의 전위계수는 설계 기어와 유사한 값이 물리적으로 타당하다.

각 보정방법의 캐비티와 설계인자 보정방법으로

Table 2 Equivalent cavity design by the compensation of design parameters

Design parameters	Molded gear	Cavity ECM	Cavity ECP
Module	1.5	1.5332	1.5332
Pressure angle (deg)	20	19.8261	20.0108
Number of teeth	32	32	32
Profile shifting coefficient	0	0.0180	0.0179
Clearance coefficient	0.25	0.2524	0.2526
Amount of backlash (μm)	150	151.15	176.15

ECM : Equivalent to the compensation of module.

ECP : Equivalent to the compensation of pressure angle.

재설계한 등가 캐비티의 이두께 수축특성은 Fig. 5에 비교되어 있다. 설계인자 보정방법에 의한 모듈 보정 등가 캐비티는 원래의 모듈 보정 캐비티와 거의 동일한 수축 특성을 보이며, 압력각 보정 등가 캐비티도 이두께부분에서의 오차 이외에는 전반적으로 압력각 보정 캐비티와 일치하고 있다. 따라서 시사출 기어의 재원을 측정하여 실제 수축률을 구해서 설계인자 보정방법으로 캐비티를 설계하면 정밀한 기어 사출이 가능하다.

4. 사출기어의 치형오차 측정

캐비티 설계방법에 따른 치형오차를 비교하기 위하여 폴리아세탈 재료를 사용하여 사출기어를 제작하였다. 사출조건은 사출시간 4.5초, 냉각시간 15초, 사출압력 90 kg/cm^2 로 설정하고 3점 게이트를 사용하였다. 모듈 보정, 압력각 보정 및 설계인자 보정방법을 각각 적용한 3개의 캐비티를 제작하여 사출하였으며, 사출시의 오차를 최소화 하기 위하여 동일한 사출기를 사용하였고 사출조건도 일정하

게 유지하였다.

모듈 보정방법으로 설계제작한 캐비티를 CM, 압력각을 보정한 캐비티를 CP라 하고 설계인자 보정방법을 적용한 캐비티를 CD로 표기한다. 캐비티 CM과 CP는 원판을 시사출하여 측정된 반경방향 수축률 $s=0.0214$ 를 사용하여 설계한 것으로 재원은 Table 1과 같다. 캐비티 CD는 설계인자 보정방법으로 캐비티를 재설계한 것으로 캐비티 CP에서 사출된 기어에서 측정된 Table 4의 수축률을 사용하여 계산하였다. 설계인자 보정방법으로 캐비티 CD를 설계한 결과는 다음과 같다.

- 모듈 : $m^c=1.5342$
- 잇수 : $z=32$
- 압력각 : $\alpha^c=19.9696$
- 전위계수 : $x^c=0.0061$
- 틈새계수 : $c_k^c=0.2260$
- 백래시 : $j_f^c=172\mu\text{m}$

Fig. 6은 각 캐비티 치형의 이두께에 대한 가공오차를 측정된 결과로 가공오차는 0.25% 이내로 캐비티 치형은 원주 피치오차를 기준으로 한 Table 3의 조건표⁽¹³⁾에서 KS2급 정도에 해당됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 캐비티에서 사출된 기어를 측정하여 이두께 수축률을 계산한 결과이며, 측정 수축률이 기 때문에 캐비티 종류와는 무관한 값이다. 수축률 제산시 사출기어의 이두께는 각 캐비티에서 사출된 기어 20개를 임의로 선정하여 기어당 3개의 치형을 대상으로 형상투영기에서 50배 확대하여 이눈이에 따라 측정된 평균값을 사용하였다. 이두께 수축률은 캐비티의 가공오차, 사출조건 미세한 변화, 측정오차 등이 영향을 미치는데 캐비티와 무관하게

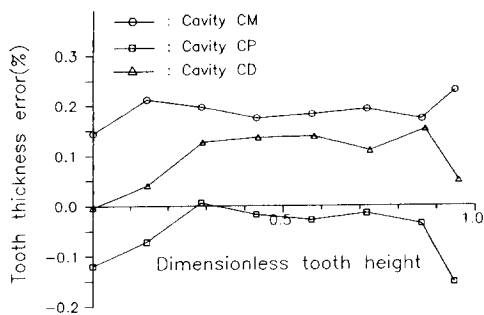


Fig. 6 Machining error of the cavity teeth

Table 3 Tooth profile error and gear quality

KS quality	Profile error	Circular pitch	Error
0	3 μm		0.13%
1	4		0.17
2	6		0.25
3	9	2.356 mm	0.38
4	13		0.55
5	18		0.76
6	25		1.06
7	35		1.48
8	50		2.12

이두께에 대한 전반적인 수축경향은 동일한 양상을 보이고 있으므로 측정결과는 만족할만 하다. Fig. 7을 살펴보면 이높이에 따른 이두께 수축률은 감소

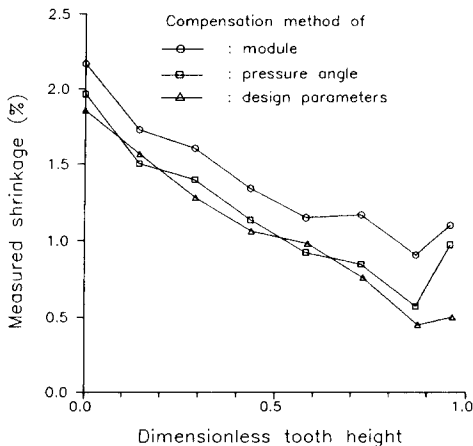


Fig. 7 Mean shrinkage rate between molded gears and cavities

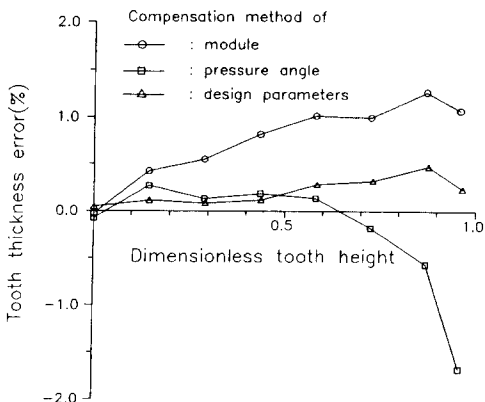


Fig. 8 Profile error between ideal and molded gears

되다가 이끝 부분에서는 수축률이 증가되는 양상을 보이고 있는데 이는 이끝 부분에서 급속한 냉각이 이루어지기 때문으로 생각된다.

Fig. 5와 7을 비교해보면 모듈보정 방법에서 설계 수축률은 이높이 증가에 따라 약간 증가되나 측정 수축률은 감소되기 때문에 이높이 증가에 따라 사출기어의 이두께는 설계치보다 커질 것으로 예상되고, 압력각 보정방법은 설계 수축률과 측정 수축률이 이높이에 따라 감소되지만 중간 이상의 이높이에 대해서는 설계 수축률이 급격히 감소되므로 사출기어의 이두께는 설계치보다 적어질 것으로 예상되며, 이는 사출기어의 치형오차를 도시한 Fig. 8의 결과와 일치한다.

Table 4는 사출기어를 측정하여 수축률을 계산한 결과이다. 사출기어의 외경 및 최대 이높이는 100개를 측정하여 평균값을 구하고 이로부터 반경방향 수축률 s_r 과 이높이 수축률 s_h 를 계산하였다. 이두께 수축률은 Fig. 6의 측정결과에서 이뿌리 부분과 이끝부분에 근접한 두 측정점을 데이터에서 제외시키고 최소자승법으로 계산하여 선형화한 것이다.

측정결과 이높이 수축률은 반경방향 수축률의 약 50% 정도에 해당하며, 이는 피치원과 기초원의 수축률이 서로 다름을 의미한다. 따라서 모듈보정 방법은 피치원의 수축만을 대상으로 하고 기초원에 대해서는 고려가 없기 때문에 사출기어 치형의 오차가 클 것으로 생각된다.

한편, 압력각 보정방법은 피치원과 기초원의 수축이 다른 것을 고려하고 있으나 다음과 같은 문제점이 지적된다. 식 (2)의 압력각 보정식은 반경방향 수축률 s_r 에 대해 캐비티의 피치원 지름과 기초

Table 4 Shrinkage rate between molded gears and cavities

Shrinkage rate(%)	Cavity CM	Cavity CP	Cavity CD
Radial : s_r	2.224	2.262	2.284
Tooth height : s_h	1.115	1.175	1.181
Tooth thickness : s_a	-1.100	-1.283	-1.409
: s_f	1.875	1.715	1.737

원 지름을 다음과 같이 계산한 것이다.

$$d_f = (1 + s_r) d_b, \quad d_s = (1 + 2s_r) d_b \quad (34)$$

압력각 보정방법에서는 압력각뿐만 아니라 전위 계수도 보정하여 치의 전체 이높이를 고려하지만, 식 (34)를 살펴보면 캐비티의 피치원에서 기초원까지의 거리가 사출기어의 피치원에서 기초원 거리보다 작아지는 문제점이 있으며, 이에 대한 설명은 결여되어 있다.

Fig. 8은 설계기어와 사출된 기어와의 이두께 오차를 나타낸 것이다. 캐비티 CM에서 사출된 기어의 치형오차는 약 1.3%, CP에서 사출된 기어는 약 1.8%로 치형오차 측면에서는 KS7 급 정도로 평가된다. 캐비티 CP의 오차가 큰 것은 이끝부분에서의 오차가 크기 때문이며 전반적으로는 CM보다 치형오차가 양호함을 알 수 있다. 한편, 설계인자 보정방법으로 설계한 캐비티 CD에서 사출된 기어의 치형오차는 약 0.5%로 KS4 급에 해당되어 정밀도가 향상되었음을 알 수 있다. 캐비티 치형의 정밀도가 KS2 급에 해당하기 때문에 사출시의 오차를 감안하면 KS4 급은 당해 캐비티로 제작할 수 있는 최대의 치형정밀도로 생각된다.

Fig. 9는 설계기어와 캐비티 CD의 형상을 도시한 것이다. 좌측에 있는 치형은 측정을 위한 시사출용으로 이뿌리부분을 이끝원과 직선으로 구성한 것이며, 우측의 치형은 필릿(fillet)을 완전원호로 설계한 것이다. 설계인자 보정방법에서는 모든 설

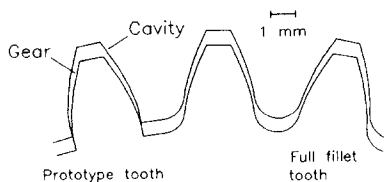


Fig. 9 Cavity design by the compensation method of design parameters

계인자가 결정되기 때문에 다른 방법에 비해 이뿌리나 이끝부분 치형의 수정설계가 용이한 장점이 있다.

5. 결 론

사출기어의 캐비티 설계에 사용되고 있는 모듈 보정방법과 압력각 보정방법을 비교, 검토하고 이 방법들이 일부의 설계인자만 보정하는 단점을 갖는데 반하여 캐비티의 모든 설계인자를 보정하는 새로운 설계방법을 제안하였다. 본 연구의 설계인자 보정방법에서는 반경방향, 이높이 및 이두께 수축률에 대한 데이터가 필요하며, 이들 데이터는 시사출 기어의 측정을 통해서 얻을 수 있다. 설계인자 보정방법에서는 백래시도 설계인자에 포함되어 있으며, 모든 설계인자가 상호보정되기 때문에 일련의 기어 설계공식을 충분히 활용할 수 있고 이뿌리부분의 완전원호 설계 등의 치형수정을 효과적으로 행할 수 있다.

동일한 기어를 대상으로 모듈 보정과 압력각 보정방법으로 캐비티를 설계 제작하고 사출된 기어를 측정하여 모듈이나 압력각 보정은 설계 수축률과 측정 수축률이 서로 다름을 보였고, 두 방법이 이두께의 수축 측면에서는 전혀 다른 결과가 나타남을 입증하였다. 사출된 기어를 측정하여 반경방향, 이높이 및 이두께 수축률을 구해서 설계인자 보정방법으로 캐비티를 재설계하여 사출기어를 제작한 결과, 기존방법에 비하여 치형의 정밀도향상을 기할 수 있었다.

설계인자 보정방법은 상세한 수축률 정보를 필요로 하기 때문에 적용 초기에는 시사출용 캐비티를 제작하고 여기에서 사출된 기어를 측정해야 하는 번거로움이 있지만 사출조건, 기어재료, 모듈, 피치원지름 등에 대한 수축률의 데이터베이스를 충분히 구축해두면 설계단계에서 바로 활용이 가능하다.

후 기

이 연구는 과학기술처 지원으로 수행된 “플라스틱기어의 설계 및 제작기술 개발” 연구의 일부이며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Michalec, G. W., 1966, *Precision Gearing*, John Wiley & Sons, New York, pp. 492~494.
- (2) Dvorak, P. J., 1988, “More Bite for Plastic Gears,” *Machine Design*, Jan. 21, pp. 75~80.
- (3) 岩崎壽, 1984, “プラスチックによる齒車の小形輕量化設計,” *機械設計*, 第28卷, 第11號, pp. 65~79.
- (4) 梶原晃, 1981, “精密樹脂齒車における射出成形金型の設計製造,” *機械技術*, 第29卷, 第2號, pp. 102~105.
- (5) 芝宮良雄, 1992, “成形精度總合JIS2級エンブラ齒車の量産技術,” *プラスチック工業技術研究會*, 第6回 精密プラスチック齒車の射出成形技術と應用技術講演會, pp. 5-1~5-12.
- (6) Adams, C. E., 1986, *Plastics Gearing - Selection and Application-*, Marcel Dekker, New York, pp. 110~112.
- (7) 上野清, 1989, “プラスチック精密齒車の金型設計製作上の問題點-事例研究,” *プラスチック工業技術研究會*, 第3回 엔프라精密齒車用金型和射出成形技術講演會, pp. 1-1~1-11.
- (8) 武士保貞助, 1989, “成形プラスチック齒車の精度-JIS2級齒車成形へのアプローチ,” *プラスチック工業技術研究會*, 第3回 엔프라精密齒車用金型和射出成形技術講演會, pp. 2-11~2-13.
- (9) 増澤芳紀, 1988, “射出成形齒車の精度と測定技術,” *プラスチック工業技術研究會*, 第2回 射出成形齒車の高精度化と低騒音設計講演會, pp. 6-1~6-9.
- (10) Mckinlay, W. and Pierson, S. D., 1994, *Plastics Gearing*, ABA/PGT Pub., Manchester.
- (11) Townsend, D. P., 1991, *Dudley's Gear Handbook*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- (12) 한국공업표준협회, KS B1411 스퍼기어 및 헬리컬기어의 백래시.
- (13) 한국공업표준협회, KS B1405 스퍼기어 및 헬리컬기어의 정밀도.