

〈論 文〉

내치차 절삭시의 치형오차에 관한 연구

박 천 경* · 최 영 석**

(1990년 9월 22일 접수)

A Study on Tooth Profile Error in Internal Gear Shaping

Chun Kyung Park and Young Suk Choi

Key Words : Internal Gear Shaping(내치차 가공), Tooth Profile Error(치형오차), Pitch Point Error(피치점에서의 치형오차), Cutting Tooth Profile(절삭치형), Eccentric Error(편심오차), Interference(간섭)

Abstract

In this study, the simulation program is developed where the tooth profile error in internal gear shaping is calculated considering several factors which affect it. This factors are the circular feed of the pinion cutter, the interference by the geometric conditions of the cutter and the internal gear, the deviation from the theoretical involute profile of the cutter and the eccentricity of the cutter and the internal gear. With this program, the effects are investigated which the geometric conditions and the cutting conditions in internal gear shaping have on the tooth profile error of the internal gear. The condition for the minimization of it is derived and then the results of simulation are adequately verified by measurements of internal gears cut by a pinion cutter.

1. 서 론

내치차(internal gear)는 소형 구동장치가 필수적인 항공 및 자동차산업에서 널리 사용된다. 내치차는 그 기하학적 형상으로 인해 랙형 커터(rack type cutter)나 호브(hob)가공이 불가능하여 주로 피니언 커터(pinion cutter)로 가공되지만 치면연삭과 같은 치면 다듬질 가공에서 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 내치차의 치면정밀도는 피니언 커터로 절삭하는 단계에서 검토되어야 한다⁽¹⁾.

지금까지, 피니언 커터로 내치차를 가공할 때 간섭(interference) 및 언더컷(under cut)을 피하기 위한 커터와 치차의 잇수에 대해서는 많은 연구⁽²⁻³⁾가 있었으나 이것은 커터의 치형이 이론적인

인벌류트 치형과 일치한다는 가정하에서의 조건이므로 커터의 치형이 경사각(rake angle) 및 가공상의 이유로 인해 이론적인 인벌류트 치형에서 벗어난다면 적용하기 어렵다. 또한 이러한 조건으로 내치차 가공시 발생하는 치형오차를 정량적으로 평가할 수는 없다. 이것을 정량적으로 평가하기 위해서는 내치차 절삭과정(internal gear shaping)을 해석하여야 하는데 이러한 연구는 Shunmugam⁽¹⁾의 연구외에는 별로 볼 수가 없다. 그러나 Shunmugam의 해석절차는 커터의 치형을 완전한 이론적인 인벌류트로 가정하고 있어 커터 치형의 변화 또는 편심 등의 영향을 고려할 수 없으며 또한 가공상의 조건, 즉 원주방향의 이송으로 인한 치면의 불규칙성(irregularity) 등은 전혀 고려할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 내치차의 절삭가공에서 발생하는 치형오차를 대상으로 이에영향을 미치는 제반 조건 중, 커터의 이론적인 인벌류트 치형으로부

*정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

**서울대학교 대학원

터의 편차, 커터와 내치차의 잇수에 의한 간섭, 창성과정 (generating process) 중 원주방향 이송 (circular feed), 커터와 기어의 편심 등을 고려하여 치형오차를 구하는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 그리고 이 프로그램을 이용하여, 커터의 경사각, 커터의 재연삭으로 인한 전위계수의 변화, 커터와 기어의 잇수 및 편심 등과 같은 기하학적 조건 및 원주방향 이송과 같은 가공조건이 기어의 치형오차에 미치는 영향을 분석하고 이를 최소화하는 조건을 유도하여 양질의 내치차 생산에 기여하고자 한다.

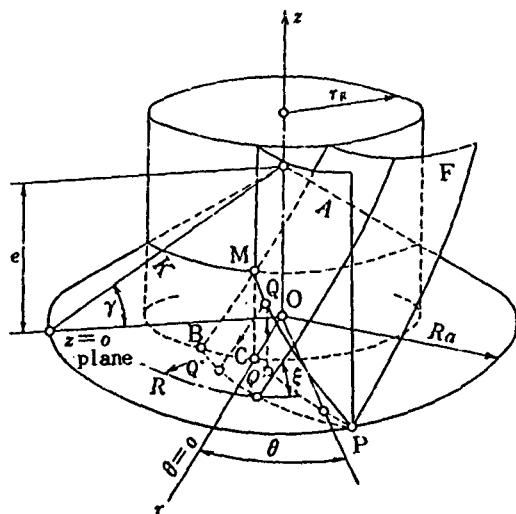
2. 피니언 커터의 기하학적 이론

피니언 커터는 치차모양을 한 공구로서 잇질의 한쪽끝에 절삭날을 형성한 것이다. 보통 고속도강으로 제작되고, 치면과 외주를 연삭하여 절삭날에 측면여유각 (side relief angle), 전면여유각 (tip relief angle), 경사각 (rake angle) 을 준다. 절삭날이 둔화되면 경사면을 연삭하여 예리하게 한다. 이 절삭날이 축방향으로 왕복운동을 하여 한개의 가상치면을 형성하고, 이 가상치차와 치차소재를 잇수비의 역수로 강제 회전시켜, 가상치차의 방해가 되는 부분을 치차소재에서 제거하여, 치차소재에 치면을 창성시킨다.

커터의 외주와 측면에는 여유각이 설정되어 있어서, 경사면을 재연삭하면 가상치차의 모양이 작게 된다. 즉, 인벌류트 치차용 피니언 커터에는 재연삭을 한 커터와 하지 않은 커터사이에 음전위와 양전위치차의 관계가 있다.

커터에는 측면여유각과 경사각을 가지고 있으므로 커터자신의 축직각 단면내에 존재하는 기본치형과 왕복운동에 의해서 나타나는 치형은 서로 다르다. 가상치차의 치형은 절삭되는 치차와 올바르게 물려 돌아가는 치형이 되어야 한다. 따라서 이 치형을 절삭치형이라 부르고 있다⁽⁷⁾.

피삭치차의 성질이 결정되면 이것과 바르게 물려 돌아가는 가상치차의 성질을 정할 수 있다. 절삭날은 이 가상치차의 치면상에도 있고 경사면인 원추면상에도 있어야 한다. 따라서 Fig. 1과 같이 가상치차의 치면 A와 경사면 K의 교선 MQP가 절삭날이 된다. 이 절삭날을 커터 이 (tooth) 의 나사면 F (반경 R을 가지는 원통 상에서의 리드 각) 를 따라 축에 수직인 z=0인 평면에 투영한



CP: tooth profile of imaginary gear (cutting tooth profile)

A: tooth face of imaginary gear rake face (conical face)

MP: cutting edge

F: tooth face of cutter

BP: basic tooth profile of cutter

Fig. 1 Structure of a straight pinion cutter

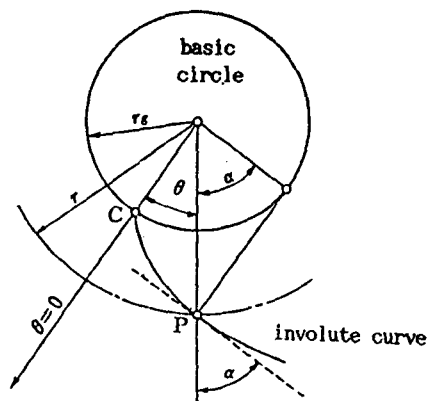


Fig. 2 Cutting tooth profile of involute curve

BQ'P가 커터의 기본 치형이 된다. 이 기본치형을 가지도록 커터의 치면을 연삭하며 치형측정도 기본치형에 대하여 측정한다. 가상치차의 치면 A에서 z=0인 평면 상에서의 치형이 절삭치형 CQ'P인데, 이 치형은 인벌류트 곡선이 되므로, 인벌류트의 시작점 C를 $\theta=0$ 의 방향으로 하고 Fig. 1, Fig. 2의 기호를 정하면 인벌류트 성질로부터^(5-7,10,12)

$$\theta = \tan \alpha - \alpha = \frac{\sqrt{(r/r_g)^2 - 1}}{-\tan^{-1} \sqrt{(r/r_g)^2 - 1}} \quad (1)$$

로 되고, 가상치차의 치면 A 의 방정식은 식 (1)과 같이 된다. 경사면 K 의 방정식은

$$r = (e - z) \cot \gamma \quad (2)$$

로 되고 치면 A 와 원추면 K 의 교선 즉, 절삭날 MQP 의 방정식은 식 (1)과 (2)를 연립시키면 된다.

다음으로 치형상의 한점 P 를 통과하고 반경 R 의 원통상에서 리드각이 ξ 인 나선면 F 에서 리드 S 는 다음과 같은 식으로 표시한다.

$$S = 2\pi R \tan \xi \quad (3)$$

절삭날 MQP 상의 한점 $Q(r, \theta, z)$ 를 F 를 따라 $z=0$ 인 평면상에 투영하면 투영점 Q'' 는 그 각좌표 θ 가 Q 점의 각좌표 θ 보다 (-)방향으로 각 $\phi = 2\pi z / (2\pi R \tan \xi)$ 만큼 회전한 것이므로 투영곡선 $BQ''P$ 의 방정식은

$$\theta = \theta - Z \cot \xi / R \quad (4)$$

로 표시된다. 이 식에서 θ 와 z 를 식 (1)과 (2)를 사용하여 소거하면 기본치형의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\theta = \frac{\sqrt{(r/r_g)^2 - 1} - \tan^{-1} \sqrt{(r/r_g)^2 - 1}}{-\frac{e - r \tan \gamma}{R} \cot \xi} \quad (5)$$

식 (5)에서 구한 기본치형을 갖는 커터를 만들 수 있다면 이론상 완전한 피니언 커터가 되지만 일반적으로 이 기본치형을 이루도록 커터를 연삭하는 것은 어려우므로 이 기본치형에 근사한 인벌류트 치형으로 연삭하여 커터의 가공을 용이하게 하고 있다. 따라서, 반경 R 에서 기본치형 $BQ''P$ 에 접하도록 한개의 인벌류트 곡선을 택하였을 때, 그 기초원 반경을 r_{gc} 라 하면 다음과 같이 된다⁽⁷⁾.

$$r_{gc} = R \cos[\tan^{-1}\{\tan \alpha + \cot \xi \tan \gamma\}] \quad (6)$$

Fig. 3은 기본치형을 대응 인벌류트 치형으로 근사시켰을 때 이론적인 인벌류트절삭치형으로부터 실제 절삭치형의 편차를 보인 그림인데 이끝부분과 이뿌리부분이 약간 팽창한 모양을 보이고 있다.

피니언 커터는 구입 직후의 직경이 클 때와 재연삭하여 직경이 작아졌을 때에도 같은 이두께와 이높이의 치차를 절삭할 수 있어야 한다. 따라서 피

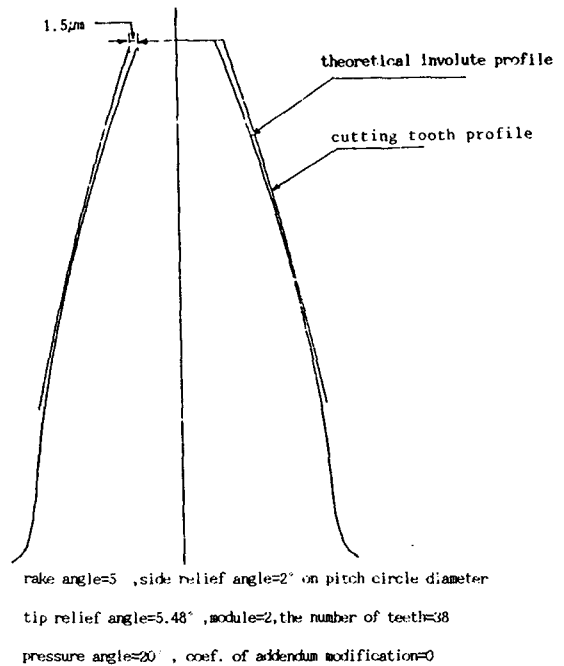


Fig. 3 Cutting tooth profile variation of a straight pinion cutter

니언 커터는 피삭치차의 잇수와 전위계수에 따라 각각 다른 형태의 외주여유면이 필요하다. 그런데 이러한 모든 커터를 가공한다는 것은 불가능한 일 이므로 보통은 피니언 커터가 랙을 창성 절삭할 때, 같은 이두께와 이높이의 랙을 절삭할 수 있도록 외주 여유면을 전면 여유각 θ 의 원추면으로 연삭한다^(2,7).

$$\tan \theta = \cot \xi \cot \alpha_0 = \tan \epsilon \cot \alpha_0 \quad (7)$$

여기서, 측면여유각 $\epsilon = 90^\circ - \xi$

랙의 압력각; α_0

3. 내치차 절삭 과정의 시뮬레이션 알고리즘

Shunmugam⁽¹⁾의 알고리즘은 커터의 절삭치형을 이론적인 인벌류트 치형으로 가정하였다. 즉, 커터의 경사각 및 여유각으로 인한 커터의 치형오차를 고려하지 않았다. 또한, 커터 및 내치차 소재의 세팅시 발생하는 편심과 같은 구조상의 문제와 원주 방향 및 반경방향 이송과 같은 가공 조건 등의 영향은 무시하였다. 즉, 커터와 내치차의 잇수에 따라 발생하는 간섭만을 고려하여 치형오차를 구하고 있다.

그러나 본 연구에서는 커터 절삭치형의 인벌류트 곡선으로 부터의 편차, 원주방향이송, 커터와 내치차의 편심 등과 같은 기하학적 조건과 가공조건을 고려하였다.

이러한 요소를 고려하기 위해서는 각 절삭 행정마다 생성되는 치차소재의 치형을 수치적으로 구해야만 하는데, 본 연구에서는 내치차의 생성과정을 운동학적으로 해석하여 전 행정에서 형성된 치형과 다음 행정에서의 커터치형을 비교하여 다음 행정에서 생성된 치형을 구하였다. 커터와 치차소재의 원주방향 이송은 현장에서는 커터의 1회전당 행정수 H 로 표시되지만 계산속도와 편이를 고려하여 커터와 치차소재의 피치원 직경에서의 원주거리(mm/stroke)로 환산하였다⁽⁸⁾.

귀환 행정시의 간섭(trimming)은 커터 헤드 또는 내치차 소재의 이탈(relieving)각도와 거리로써 피할 수 있는 것으로 가정하였다.

커터와 치차소재의 편심은 그 기하학적 중심과 회전중심을 편심량만큼 떨어지게 하였다. 다음은 본연구에서 개발한 알고리즘의 흐름도(flow chart)이다.

치형오차의 정의는 KS B 1405와 같이 설정하였

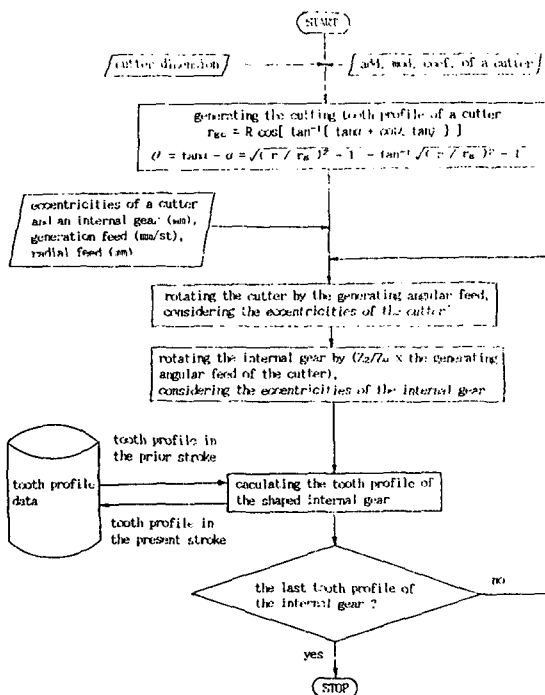


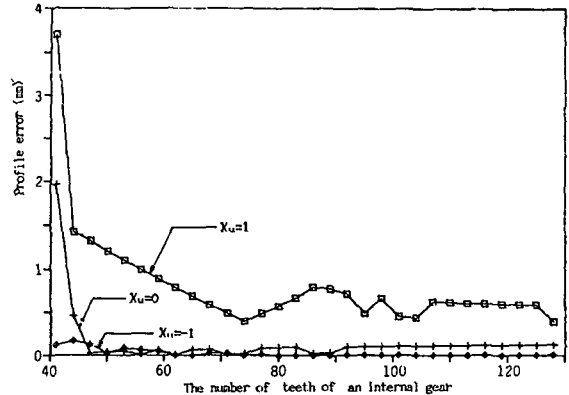
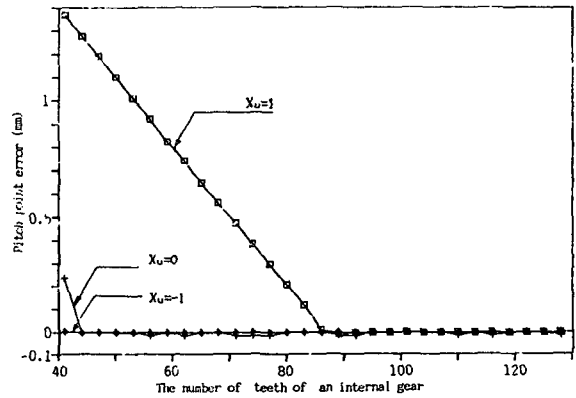
Fig. 4 Flow chart of the algorithm of this paper

다. 하지만, KS B 1405에서는 이뿌리와 이끝 근처를 이끝 모따기(chamfering)와 이물림 작용을 고려하여 제외시켰으나, 본 연구에서는 이끝 부분에서의 간섭을 고려하기 위해 이뿌리 근처만 제외시켰다.

4. 시뮬레이션 결과의 고찰

4.1 Shunmugam⁽¹⁾의 알고리즘과 본 연구의 알고리즘과의 비교

Fig. 5는 Shunmugam의 알고리즘으로 구한 피치점에서의 오차와 치형오차이고 Fig. 6은 본 연구의 알고리즘으로 구한 값들이다. 그림에서 사용한 기호 m 은 모듈, α_0 는 기준 압력각, X_u 와 X_2 는 커터와 내치차의 전위 계수 Z_u 와 Z_2 는 커터와 내치



$m=2, \alpha_0=20^\circ, Z_u=38, X_2=0$, cutting profile of theoretical involute tooth profile

Fig. 5 Variations of pitch point error and profile error calculated by Shunmugam's algorithm

차의 잇수이다. Fig. 5에서는 오차값들이 내치차의 잇수에 따라 변하는 경향이 Fig. 6과 유사하지만 Fig. 6에 비해 그 값들이 급변하고 요동하는 현상을 나타내고 있다.

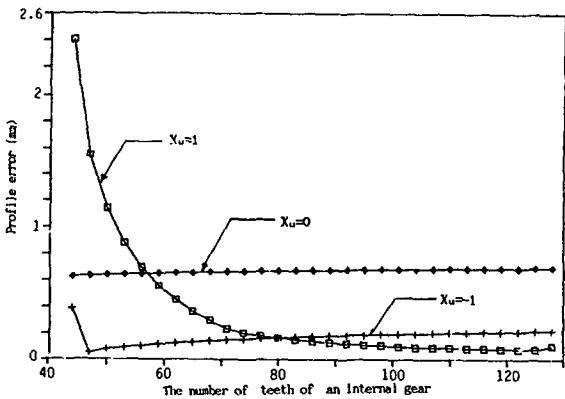
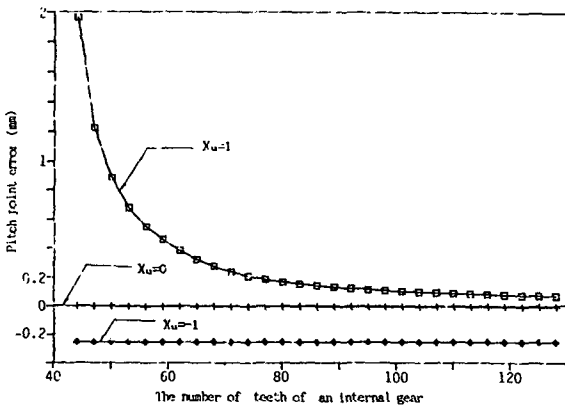
일반적으로 내치차와 커터의 간섭한계는 이론적으로 커터의 잇수에 대해 내치차의 잇수가 하한계를 나타내므로 내치차의 잇수가 증가됨에 따라 오차값들이 요동없이 점진적으로 감소하는 경향을 보여야 한다고 생각된다⁽²⁻⁶⁾.

따라서, Shunmugam의 알고리즘에 의한 오차값 산출은 내치차의 잇수에 따른 경향이 급변하고 요동하므로 다소 부정확하다고 생각된다. 이러한 부정확한 결과는 내치차잇수에 대한 전체절삭깊이 (whole depth of cut)의 변동으로 내차차 치형에

영향을 미치는 커터 치형상의 범위가 변하기 때문으로 생각된다.

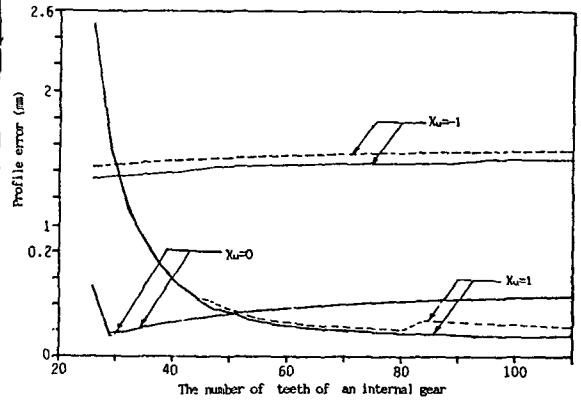
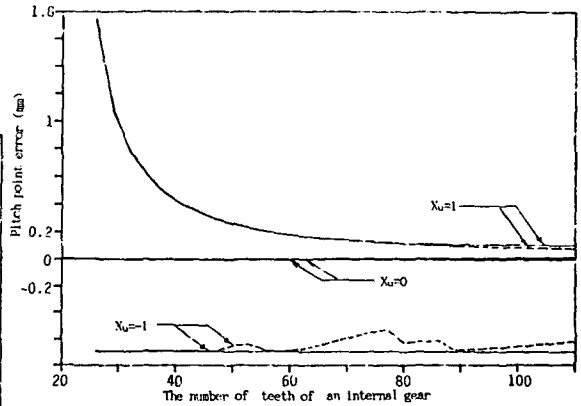
4.2 커터의 경사각 및 여유각으로 인한 커터 절삭치형의 이론적인 인벌류트로부터 커터의 편차에 대한 영향

커터의 경사각 및 여유각으로 인한 커터 절삭치형의 이론적인 인벌류트곡선으로부터의 편차를 고려한 피치점에서의 오차와 치형오차를 각 커터의 잇수에 대해 구하고 그 편차를 고려하지 않은 오차값들과 비교한 결과, 커터의 잇수가 많을 때는 커



$m=2, \alpha_0=20^\circ, Z_u=38, X_2=0$, circular feed=1 mm/st, cutting profile of theoretical involute tooth profile

Fig. 6 Variations of pitch point error and profile error calculated by the algorithm of this paper



$m=2, \alpha_0=20^\circ, Z_u=20, X_2=0$, circular feed=1 mm/st,

— : cutting profile deviated from theoretical involute tooth profile, rake angle=5°, side relief angle=2°

... : cutting profile of theoretical involute tooth profile

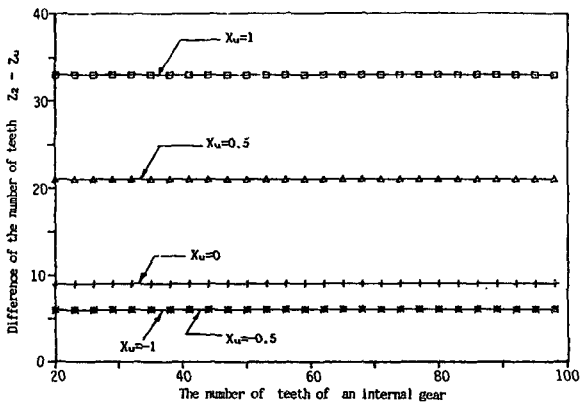
Fig. 7 Variations of pitch point error and profile error

터의 절삭치형의 변화가 오차에 미치는 영향이 거의 없고 커터의 잇수가 적을 때는 커터의 절삭치형의 변화에 대하여 피치점에서의 오차와 치형오차가 다소 크게 반응하는 커터의 전위계수와 내치차의 잇수 범위가 있었다. 그 예로서 Fig. 7에 커터의 잇수 $Z_u=20$ 에 대해 커터의 절삭치형이 이론적인 인벌류트로부터 벗어난 경우와 이론적인 인벌류트인 경우의 치형오차와 피치점에서의 오차를 서로 비교하여 나타내었다.

그 한계 잇수차는 커터의 잇수에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있으며 커터의 재연삭량에 따라 감소하고 있다. 따라서 커터의 재연삭량이 많지 않으면 치형오차가 급증할 염려가 있으므로 재연삭량을 제한해야만 한다.

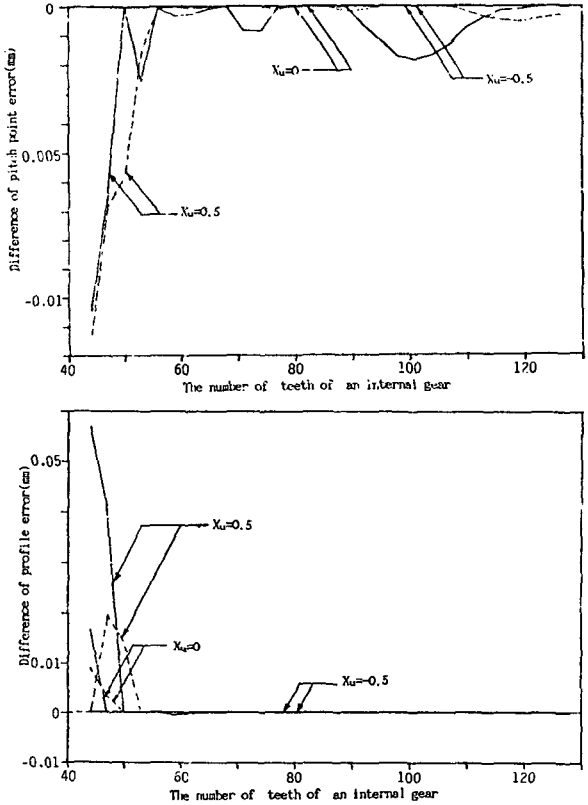
4.4 원주방향 이송이 피치점에서의 오차와 치형오차에 미치는 영향

원주방향 이송은 치면의 불규칙성을 야기시켜 치형오차 및 피치점에서의 오차에 영향을 미칠 수 있으므로 다듬질 절삭시 내치차의 등급에 따라 적절히 설정할 필요가 있다⁽⁹⁾. 즉, 요구되는 내치차의 정밀도를 유지하면서 절삭시간을 최소로 할 수 있는 원주방향 이송을 택해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 필요에 의해 원주방향 이송의 크기를 변화시켜 치형정밀도에 미치는 영향을 조사하



$m=2, \alpha_0=20^\circ, X_2=0$, circular feed = 1mm/st, cutting profile deviated from theoretical involute tooth profile, rake angle = 5°, side relief angle = 2°

Fig. 8 Suggested Z_2 for minimum pitch point error and minimum profile error



$m=2, \alpha_0=20^\circ, Z_u=38, X_2=0$, cutting profile deviated from theoretical involute tooth profile, rake angle = 5°, side relief angle = 2°

Fig. 9 Differences of pitch point error and profile error

였다.

Fig. 9에 원주방향 이송을 1mm/st에서 2mm/st로 2배 증가시켰을 때와 0.5mm/st에서 1mm/st로 2배 증가시켰을 때, 피치점에서의 오차와 치형오차의 증가한 양들을 보여주고 있다. Fig. 9에 의하면 원주방향 이송을 2배로 증가시켰을 때 피치점에서의 오차는 감소하고 치형오차는 증가하고 있다. 이것은 원주방향 이송의 증가로 치면의 불규칙성의 높이가 증가하여 치형오차가 미소량 증가했기 때문으로 생각되며 피치점에서의 오차가 감소한 것은 피치점에서 불규칙성의 위치가 이동되어 감소된 것으로 생각된다.

또한, 내치차의 잇수가 증가하면, 원주방향 이송

의 증가로 인한 피치점에서의 오차와 치형오차의 증가는 없고 또한 커터의 전위계수가 0 또는 음의 값이 되면 그 오차들의 증가는 거의 없다. 이것은 원주방향 이송으로 인한 치면 불규칙성의 곡률반경의 크기에 내치차의 피치원 직경의 크기와 커터의 이의 크기가 영향을 주기 때문으로 생각된다.

따라서, 커터의 전위계수가 크고 내치차의 잇수가 적을때는 원주방향 이송이 치형오차 또는 이두께오차에 크게 영향을 미치므로, 원주방향 이송을 본 연구의 시뮬레이션 등을 이용하여 최적으로 선택할 필요가 있다.

4.5 커터와 내치차의 편심오차위치가 피치점에서의 오차와 치형오차에 미치는 영향

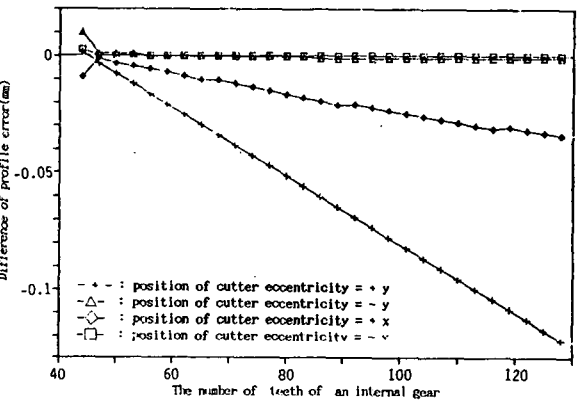
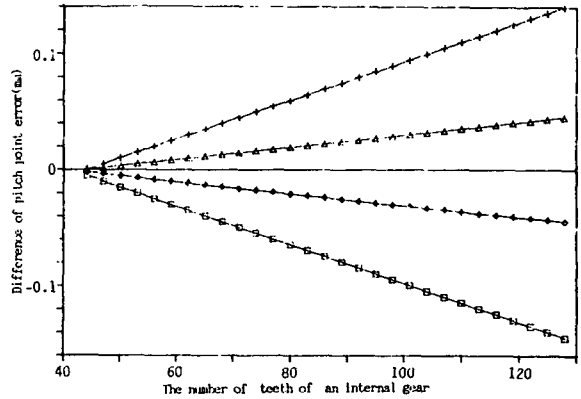
치차 가공기에 피니언 커터와 내치차 소재를 설치할 때 커터와 소재의 편심오차는 피할 수 없는 오차 중의 하나이다⁽¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 커터와 소재에 편심이 존재할 때 편심의 위치가 내치차의 치형오차와 피치점에서의 오차에 미치는 영향을 분석하여 커터와 소재를 설치할 때 그 오차들을 최소화 할 수 있는 편심위치를 결정하려 한다.

커터와 내치차의 원주방향 이송의 방향은 시계 반대방향으로 하고, 커터와 내치차의 중심거리 방향으로 y축을 택했으며, 그와 직각방향을 x축으로 택하였다. y축의 (+)방향은 내치차 쪽으로 정했으며 x축의 (+)방향은 오른 좌표계(right handed coordinate)를 이루도록 택했다.

커터와 내치차 소재의 편심량은 0.005mm로 일정한 것으로 가정했다.

Fig. 10에, 커터에만 편심이 존재하고 그 위치가 y축으로 (+), (-)방향, x축으로(+), (-)방향의 경우 또는 내치차 소재에만 편심이 존재하고 그 위치가 y축으로 (-), (+)방향, x축으로 (-), (+)방향일 경우의 피치점에서의 오차 및 치형오차가 커터와 내치차에 편심이 없는 경우의 오차에서 증가한 양들을 나타내었다.

커터의 절삭치형이 표준치형인 경우에는 Fig. 6에 의해서 피치점에서의 오차와 치형 오차가 편심이 없을 경우 내치차의 잇수에 관계없이 0과 0.6 mm정도 된다. 따라서 치형정밀도에 가장 좋은 결과를 가져오는 편심위치는, 편심에 의한 피치점에서의 오차 증가량이 0에 가깝고 치형오차 증가량이 최소인 위치라야만 한다.



$m=2, a_0=20^\circ, Z_u=38, X_2=0, X_u=0$
 amount of eccentricity=0.005mm
 cutting profile deviated from theoretical involute tooth profile, rake angle=5°, side relief angle=2°

Fig. 10 Differences of pitch point error and profile error

따라서 피치점에서의 오차인 경우는 ±y방향이 고 치형오차의 경우에는 -x방향이 치형정밀도에 좋다. 따라서 편심위치를 2사분면 또는 3사분면의 중앙정도를 택하면 좋다.

이와같이 커터의 전위계수와 내치차의 잇수가 결정되면 치형정밀도에 가장 좋은 영향을 주는 편심 위치를 결정할 수 있다.

5. 절삭된 내치차의 측정데이터와 시뮬레이션 결과의 비교

모듈을 5, 압력각 20°, 잇수, 13, 경사각 5°, 축

Table 1 Measured profile error of an internal gear

Radius(mm)		52	53	54
Profile error(mm) (mm)	Maximum measurement over 2 pins	-0.046	-0.046	-0.047
	Minimum measurement over 2 pins	-0.016	-0.016	-0.017
	Average value of measurement over 2 pins	-0.030	-0.030	-0.031

면 여유각 2°, 전위 계수 0.65인 피니언 커터로 잇수 20, 전위계수 0.8, 내경 100mm의 내치차 3개를 절삭하고 각 내치차에 대해 오버 핀(over pin) 치수를 측정하였다. 절삭깊이 분배는 동일하게 하여 3회 절삭하였으며 원주방향 이송은 황삭을 할 때 $H=900$, 다듬질 절삭을 할 때 $H=1100$ 으로 하였다.

측정한 오버 핀 치수의 최대치와 최소치는 각각 90.58mm, 90.42mm이고 평균치는 90.49mm이다. 측정된 내치차는 전위계수가 +0.8이므로 기준 피치원이 이끌원으로 되어 있어, 이물림에서 가장 중요한 물림 피치원은 짝으로 되는 소치차의 치수에 따라 다르지만 대강 반경 52~54mm에서 형성된다고 생각된다. 따라서, 오버 핀 치수의 최대값, 최소값, 평균값에 대해 반경 52, 53, 54mm에서 치형오차로 환산하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1을 보면, 각 반경에 대해 치형오차가 거의 일정한데 이것은 오버핀 치수로부터 원호 이두계를 환산하는 과정에서 측정된 내치차의 치형을 이론적 인벌류트로 가정하였기 때문으로 생각된다⁶⁾.

다음으로 절삭된 치차의 오버 핀 치수 측정 결과로부터 치형오차를 계산한 값과 본 연구의 치차 절삭과정 시뮬레이션으로 부터 계산된 치형 오차값을 비교하기 위해, 각 반경에서의 치형오차를 본 연구의 시뮬레이션 프로그램으로 계산하여 Table 2에 나타내었다.

Table 1과 Table 2를 비교하면, 반경 53,54mm에서 현격한 차를 볼 수 있는데, 이것은 오버 핀 치수를 원호 이두개로 환산한 과정에서, 측정된 내치차의 치형을 이론상의 인벌류트 치형으로 가정했기 때문으로 생각되고 반경 52mm에서의 치형오차는 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 미소한 차이는 절삭력의 동적, 정적 영향과 커터 및 치차 소재를 설치할 때 발생하는 편심오차때문으로 생각

된다. 위의 비교 검토는 물림 피치원 부근의 치형오차 밖에 비교할 수 없으므로 치형전체의 비교를 위해서, 지름피치 6/8(저치), 압력각 20°, 잇수 30, 경사각 5°, 측면 여유각 2°인 피니언 커터로 잇수 72, 전위계수 0, 지름피치 6/8(저치)의 내치차를 절삭하고 그 치형을 측정하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

내치차 가공시 절삭깊이 분배는 동일하게 했고 3회 절삭하였다. 원주방향이송은 황삭을 할 때 $H=800$, 다듬질 절삭을 할 때 $H=1000$ 으로 하였다.

Table 3에 내치차의 중심을 원점으로 하고 y축을 이흠의 수직이등분선으로 하여 치형을 측정된 수치 데이터와 시뮬레이션으로 구한 수치 데이터를 비교하여 나타내었다.

Table 2 Profile error at each radius of internal gear calculated by simulation program

Radius(mm)	52	53	54
Profile error(mm)	-0.035	0.001	0.012

Table 3 Numerical data of the tooth profile of internal gear

y Coordinate (mm)	x coordinate(mm)	
	Measured value	Simulated value
149.09	4.36	4.31
149.82	4.12	4.11
150.54	3.89	3.90
151.57	3.66	3.68
152.00	3.46	3.44
152.73	3.22	3.20
153.45	2.99	2.94
154.18	3.00	2.67
154.91	2.43	2.39
155.63	2.13	2.09
156.36	1.81	1.79

Table 3에 의하면, 시뮬레이션에 의해 구한 치형과 측정된 치형은 비교적 잘 일치하고 있다. 또한, 측정된 내치차의 다른 이(tooth)들에 대해서도 Table 3과 거의 같은 결과를 얻었다. 측정치형과 시뮬레이션된 치형 사이의 미소한 차이는 측정오차와 절삭력에 의한 커터와 치차 소재의 중심거리 변동과 같은 가공오차에 기인한다고 생각된다.

6. 결 론

내치차 절삭가공 과정에서 치형오차를 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 커터 절삭치형의 인벌류트 곡선으로 부터의 편차, 원주방향 이송, 커터와 내치차의 치수 및 편심 등과 같은 기하학적 조건과 가공조건을 고려하는 내치차 형상과정의 시뮬레이션 해석절차를 개발했으며, Shunmugam⁽¹⁾의 해석절차와 비교하여 보다 안정되고 우수함을 확인하였다.

(2) 내치차의 치형오차와 피치점에서의 오차에 대한 커터와 내치차 잇수차의 한계값을 제안하였다.

(3) 요구하는 치형정밀도를 얻을 수 있는 원주방향 이송의 선택을 가능하게 하였다.

(4) 치형 정밀도를 향상시킬 수 있는 편심위치의 방향을 제안하였다.

참 고 문 헌

(1) Shunmugam, M.S., 1981, "Profile Deviation in Internal Gear Shaping", Int. J. Mach. Tool Des. Res.,

Vol. 22, pp. 31~39.

(2) Colbourne, J.R., 1983, "Gear-Tooth Interference", Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design. Transaction of the ASME. Vol. 105, pp. 298~301.

(3) Srinivasan, N. and Shunmugam, M.S., 1983, "Limiting Conditions in Gear-Shaping Process", Int. J. Prod. Res., Vol. 21, No. 4, pp. 543~561.

(4) Srinivasan, N., 1983, "Limiting Conditions in Gear Shaping for Corrected Involute Gears", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 4, pp. 227~235.

(5) Buckingham, Earle, 1949, "Analytical Mechanics of Gears", Dover Publications, New York.

(6) Merritt, H.E., 1971, "Gear Engineering", John Wiley & Sons, New York.

(7) 和栗明, 1980, "齒車の設計, 製作とその耐久力", 養賢堂, 東京.

(8) Colvin, Fred H., 1943, "Gear Cutting Practice", McGraw-Hill Book Company, New York and London.

(9) Sankaranarayanasamy, K. and Shunmugam, M. S., 1988, "Minimum Achievable Quality of Involute Gears in Generation Process", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 28, No. 1, pp. 1~10.

(10) Michael George W., 1966, "Precision Gearing", John Wiley & Sons, New York.

(11) Yasutsune, Ariura, Hua, Chiu and Yoji, Umezaki, 1987, "Improvement of Gear Accuracy in Gear Hobbing", Bullet. of JSME, Vol. 30, pp. 168~174.

(12) Pudly, Darle W., 1954, "Practical Gear Design", McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto and London.