

원통가공시 가공형상 모델링의 특성연구

윤문철*, 조현덕**, 김성근***, 김종수****

A Study on the Characteristics of Machined Profile Modeling in Cylindrical Shape Machining

Moon-Chul Yoon*, Hyun-Deog Cho**, Seong-Kun Kim***, Jong-Su Kim****

Abstract

In this paper, we have discussed on the characteristics and modeling of machined geometry which was established for the case of round shape machining, also the effects of externally machined profile are analyzed and its modeling reliability was verified by the experiments of roundness testing, especially in lathe operation. In this study, we established a harmonic geometric model with the parameter harmonic function. In general, we can calculate the theoretical roundness profile with an arbitrary multilobe parameter. But in real experiments, only 2-5 lobe profile was frequently measured. the most frequently measured ones are 3 and 5 lobe profile in experiments. With these results, we can predict that these results may be applied to round shape machining such as turning, drilling, boring, ball screw and cylindrical grinding operation in bearing and shaft making operation with the same method. In this study, simulation and experimental work were performed to show the profile behaviors. we can apply these new modeling methods in real process for the prediction of part profile behaviors machined such as in round shape machining operation.

Key Words : Lobe profile(로브형상), round shape operation(둥근형상가공), waviness(파형도), vibration mode(진동모우드), setting error(고정오차), runout(런아웃)

1. 서론

축이나 구멍등 둥근형상가공을 하기 위한 선반가공, 드릴 가공, 원통연삭에서 가공후의 가공면 형상(profile)이 둥근형상(round shape)의 특징을 나타낸다. 이들 가공법으로 원통형상의 가공물을 가공한 후 형상을 정밀하게 측정하여보면, 그 형상이 거의 진원에 가깝지 못하고 가공물 형상의

기준원(base circle)을 기준으로 진동하는 파형(waviness)을 나타내고 있으며, 특히 축이나 이와 함께 조립된 저어널베어링의 경우에도 최종의 내외경 원통 연삭가공 후에도 그 가공형상면에서 이와 같은 현상이 나타난다. 이 현상은 베어링의 윤활효과와 부하용량에 상당한 영향을 미치며, 따라서 이와 같은 형상의 예측과 원인 규명은 매우 중요하다. 특히 파형에 따라 원통축부의 베어링 성능 및 부하용량은

* 부경대학교 기계자동차공학부
** 경일대학교 기계공학부
*** 호서대학교 기계공학부
**** 한국기계연구원 산업기술연구부

윤활공학에 많이 다루는 분야이다. 이런 형상은 일반적으로 진원도 측정용 형상측정기로 가공된 형상 특성을 측정할 수 있다. 그 동안 원통형의 부품에 대하여 그 형상 진원도에 대하여는 많은 학자들이 연구하였으나 그 결과는 주로 실험에 의한 진원도 결과데이터의 분석에 국한되어 있었고⁽¹⁻³⁾ 아직 그 분명한 이론적인 정의는 하지 못하고 있다. 그 중 S. J. Lee⁽⁴⁾는 드릴작업에서 드릴축이 타원형으로 진동하고 두 개의 드릴날이 같은 지점을 통과한다고 가정하여 홀수개의 로브형상모델을 제시하여 실험과 비교 분석하였다. 형상특성은 드릴뿐 아니라 외경가공작업의 경우에도 적용할 수 있다. 또한 로브의 형상특성에 있어서 홀수개 뿐 아니라 짝수개의 로브 형상도 측정되고 있으며 따라서 홀수나 짝수의 관계없이 나타낼 수 있는 모델이 필요하다. 이 원인들은 본 연구의 결과에 의하면 선반가공에서 가공공구와 공작물이 부착된 스피들축의 회전오차에 따른 진동이 그 주된 원인이고, 결국 이 스피들축과 공구의 진동에 의한 회전오차는 가공물의 형상을 결정하게 된다. 선반에서 축과 같은 원통형 공작물이 회전축에 물려 외경가공 되는 경우에는 구멍가공에 적용한 S. J. Lee의 실험결과와 같이 가공이 시작될 때 가공물의 중심이 일정하지 않고, 이 중심은 절대적인 원점을 중심으로 원형이나 타원형태 혹은 임의의 형태로 공전하고, 결국 회전축의 회전각도에 따라 반경방향으로 진동하면서 가공된다. 또한 가공물의 회전축 속도가 50Hz 라면 3000 rev/min의 속도가 되고 일반적으로 측정되는 신호의 동적인 외란보다는 낮은 범위의 주파수 특성을 나타내게 된다. 가공형상의 반경방향 진폭도 마찬가지로 주파수특성에 그대로 전사되어 나타나게 된다. 이 진동의 주요 원인은 선반 주축의 척에 고정시키는 고정 (setting error) 오차나 센터사이의 misalignment, 스피들의 runout과 그 외의 불안정한 접촉조건으로 고정된 경우라고 알려져 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 결국, 이 오차 원인들은 원통 가공부위의 반경방향 진동을 야기시키며, 따라서 이 원통가공용 공작물의 운동과 외경가공하는 공구의 상대적인 운동기구에 의하여 생성된 자취가 가공형상차이로 나타나게 된다. 본 연구에서는 원통가공 메카니즘을 상대적인 공작물과 공구의 진동메카니즘으로 정의하여 이러한 형상이 생성되는 수학적 모델을 제안하여 분석하고자 한다. 즉 공구와 공작물의 상대적인 운동을 간단한 조화함수의 운동으로 표현하고 이를 해석한 원통가공형상과 실제 가공된 원통공작물의 모양을 진원도 측정기로 측정한 원통 가공물의 로브형상 진원도와 일치하는 것을 보여 이런 조화진동 형상모델의 타당성을 제시하고 그 특성을 분석하고자 한다.

2. 가공형상모델

원통가공에서 가공물의 중심은 초기의 저속에서는 공작물 중심이 중심방향으로 가로지르는 모양으로 운동도 할 수 있으며, 그외의 불규칙한 공전을 하게 되고 이 운동은 정상상태로 되면 거의 원형에 가까운 운동을 하게 된다.⁽⁴⁾ 따라서 이 원형으로 가정 한 이상화한 모델은 Fig. 1과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 원통형 공작물의 중심궤적이 공전하지 않게되는 절대적인 좌표중심을 O_c 라고 하고 공전하는 궤적을 원형의 조화함수로 가정하고 공작물 회전 중심의 공전궤적의 순간위치에서의 중심을 O_i 라고 하면 이 두점의 공전반경을 나타내는 거리 $R_o(t)$ 는 $O_c - O_i$ 이고 공전주파수를 ω_o 라 하면 공전점의 x, y 점을 벡터로 나타내면 다음과 같다.

$$\vec{r}_o(t) = R_o(t)e^{(i\omega_o t + \phi_o)} \quad (1)$$

외경가공용 공구의 날이 고정된 위치를 $O'(T')$ 라고 하고 이 공구가 x 방향의 강성이 약하게 되면 x 방향으로 진동하게 되고 그림에서 $R'_i(t) = R_i$ 의 진폭으로 진동을 한다. 또 이 진폭을 고려하여 O_i 와 $T(T')$ 점 O_i 와의 거리를 $R(t)$ 라 하고 $R'(t)$ 과 상관관계에 있는 좌표는 O'_i 라고 표현한다. 또한 주로 x 방향으로 ω 로 진동하는 공구의 가공위치 T' 의 x 좌표는 공작물 회전순간 O_i 를 중심으로 $R'(t)$ 의 반경으로 ω 의 각속도로 회전하므로 T' 의 자취가 가공면의 형상을 나타내고 이 위치의 좌표

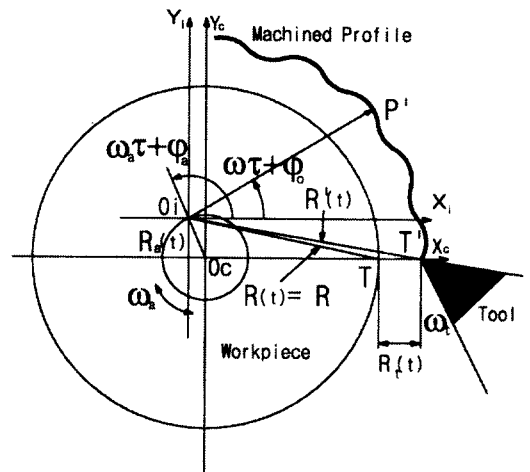


Fig. 1 Round shape lobe profile generated by the relative motion of tool and workpiece

는 각각 식(1)의 x, y 좌표이다. 따라서 O_i 를 시점 O'_i 를 종점으로하는 $\vec{r}(t)$ 벡터의 자취가 가공된 형상이라고 할 수 있으며 그 자취를 나타내는 식은^(4,8)

$$\vec{r}_1(t) = \vec{r}_a(t) + \vec{r}'(t) \quad (2)$$

$$= R_a(t)e^{i(\omega_a t + \phi_a)} + R'(t)e^{i(\omega' t + \phi')} \quad (3)$$

단,

$$R'(t)^2 = (R + R_i(t)\cos(\omega_i t + \phi_i) - R_a(t)\cos(\omega_a t + \phi_a))^2 + R_a^2(t)\sin^2(\omega_a t + \phi_a) \quad (4)$$

으로 정의된다. 날이 1개인 공구가 1 회전후 같은 지점을 통과하기 위해서는 즉 원통공작물의 z 방향으로 로브의 수가 일정한 개수가 반복될 때 공구가 1 회전 후 위치는 같은 위치에 오게되며 이 경우에는 폐쇄형의 로브형상이라 볼 수 있고, 이 때의 조건은 각각

$$\vec{r}_1(t) = \vec{r}_1(t + \Delta t) \quad (5)$$

단, $\Delta t = \frac{2\pi}{\omega}$ 이다.

그러나 1 회전후의 가공위치가 일치하지 않을 수도 있고, 즉 폐쇄형이 아닐 경우에는 식(2),(3)에 의해 형상이 직접 결정된다. 두 경우 모두 원통 가공물의 로브형상은 중심 O_c 로부터의 반경방향의 크기를 나타내므로 로브형상 파형 반경 $R_h(t)$ 는

$$R_h(t) = |\vec{r}_1(t)| \quad (6)$$

으로 표현되고 두 경우 로브의 고유 주파수는 식(2)(3)에서 다음의 각각의 경우 나타나게 된다. 즉 $\omega_a/\omega = n$ 혹은 $\omega_i/\omega = n$ 가 되면 로브형상은 자연수 n 개의 고유모우드가 생성이 된다.

3. 가공형상 모델링의 해석 및 고찰

Fig. 2 (a)-(h)는 식(2)-(4)에 의하여 R_a/R_i 가 매우 작은 경우이고, 계산된 가공형상으로 로브의 수가 없는 것부터 8개까지 나타내었다. 식에 의하여 9개 이상도 계산과 그래픽 출력이 가능하였고 본 논문에서는 나타내지 않았으나 이론형상은 그대로 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 실험에 의한 결과는 대부분이 5개 이하로 나타났다. 그 이유는 6개 로브는 공전반경이나 공구진폭이 작아 약한 모우드가 나타나지 않는 경우로 3개나 2개의 로브형상에 포함된 것으로 볼 수 있고, 달리 정의한다면 실험에 의한

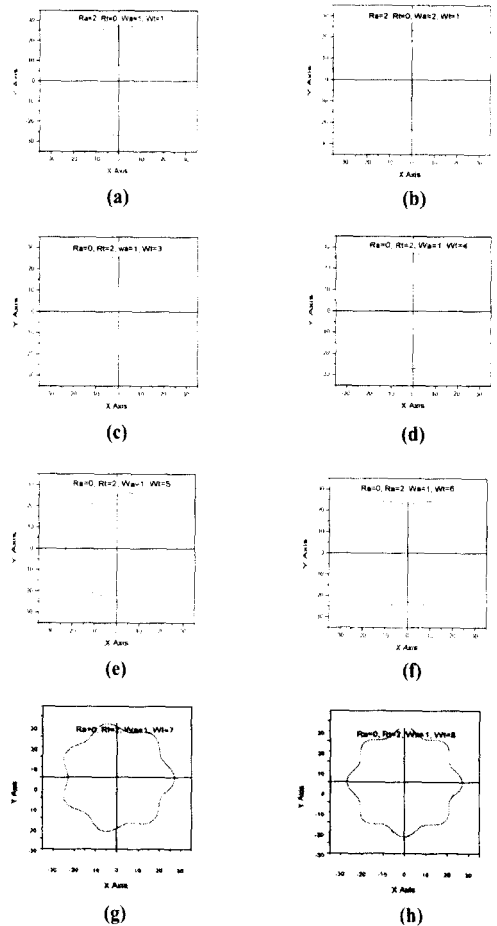


Fig. 2 Theoretical profiles for lobe 2-8 with equal revolute deviation with proposed model

로브의 수가 5개 이하라는 것은 대부분의 공작물과 공구의 진동은 5개 이하가 되도록 공전반경 R_a 와 공구진폭 R_i , 회전수 ω_a 와 ω 로 회전하고 있으며 결국은 공작물 한 바퀴 회전할 동안의 공작물 및 공구의 회전수 즉 ω_a/ω 와 ω_i/ω 에 따라 가공형상의 진동모우드가 생성됨을 알 수 있다.

Fig. 3(a)-(f)의 그림은 식(2)-(4)에 의하여 $R_a/R_i = \infty$ ($R_i = 0$)의 경우 계산된 가공형상으로 로브의 수가 없는 것부터 6개까지 계산하였다. 물론 Fig. 2 의 현상과 유사한 로브의 형상이 나타났고 각 로브의 크기가 약간 달라지는 것을 알 수 있다. 즉 로브의 비대칭정도 나타내게 된다. 이론적으로도 Fig. 2 와 같이 7개 이상도 가능하였으

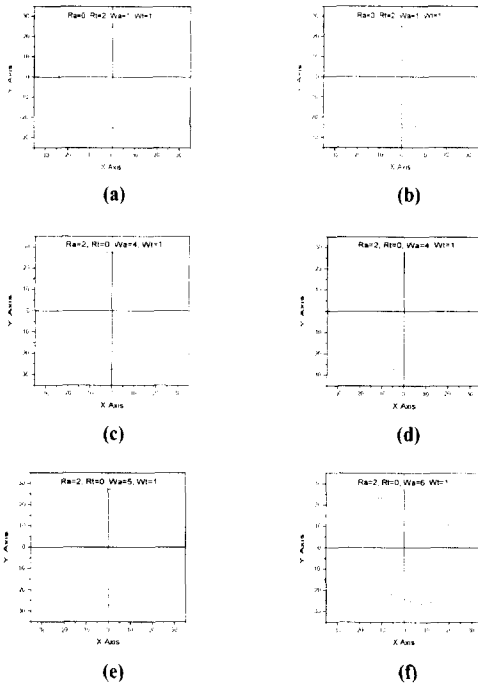


Fig. 3 Theoretical profiles for lobe 2-6 with unequal revolute deviation with proposed model

나 실험에 의한 결과는 대부분이 5개 이하로 나타났으므로 그이상은 나타내지 않았다. 5개 이하로만 나타난 주요한 이유는 Fig. 2의 경우와 마찬가지로 6개이상의 고차의 로브형상은 저차의 로브형상인 3개나 2개의 형상에 포함되는 것으로 볼 수 있기 때문이다. 즉 고차의 R_a , R_i 의 크기가 상대적으로 작아지게 운동하는 것으로 생각되며 즉 그 고차의 모우드는 나타나지 않게되고, 이때 각각 2개나 3개의 저차의 로브형상에 포함 됨을 볼 수 있다. 또한 실험에서 대부분의 형상이 5개 이하로 나타나는 것은 그때의 공작물과 공구의 진동이 5개 이하가 되도록 상대적인 회전수조건 $\omega_a/\omega (\leq 5)$ 혹은 $\omega_i/\omega (\leq 5)$ 로 회전하고 있는 경우라 생각이 되며, 즉 R_a , R_i , ω_a 와 ω_i 에 따라 진동모우드가 생성된다. 그리고 그림에서 로브의 형상이 그림의 중심보다 약간 오른쪽으로 치우쳐 있는 것은 초기의 위상조건이 0° 로 주어져서 나타나는 현상이고 실제 가공시에는 이 위치를 지정할 수 없다고 사료된다. 분석결과 또한 로브의 개수는 ω_a/ω 혹은 ω_i/ω 에 의하여 결정되고 위치는 위상차에 따라 결정되며 그 때의 공전 진폭과 공구진폭이 없다면 그 로브의 개수를 나타

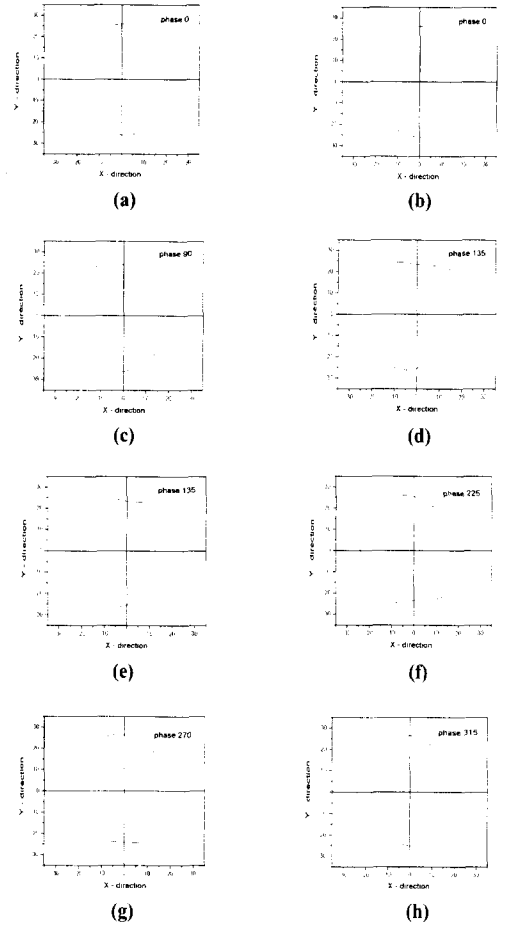


Fig. 4 Theoretical profiles for lobe with initial phase deviation

내는 고유모우드는 사라진 Fig. 2-3(a)와 같이 진원의 가공형상을 나타나게 된다. Fig. 3의 (d)-(f) 그림은 기준원에서의 반경방향의 진동을 크게한 결과로 조금 이상한 형태로 나왔으나, 기준원의 크기를 상대적으로 반경방향 진동보다 크게하면 진원도 그림은 그 형상이 거의 원형에 가까워지는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 4는 공작물과 공구의 위치상태를 나타내는 조건이 각각 $R_a=0$, $\omega_a=5$ 와 $R_i=1$, $\omega_i=3$ 인 경우 초기위상의 위치를 각각 변화시켜 가공형상의 변동상태를 나타낸 것이다. 물론 2개에서 고차의 로브개수까지 모두 나타낼 수 있었으나 본 연구에서는 3개와 5개의 모우드가 생성될 수 있는 경우를 나타냈고 각각의 경우 위상의 변화가 로브의 형상과 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 즉

가공형상은 공전진폭, 공구진폭 뿐 아니라 공작물이 어디에 위치하고 있는가를 보여주는 초기위상상태에 따라 가공형상정도가 상당히 다르게 나올 수 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서 가공형상의 프로파일을 계산하기 위한 프로그래머는 *visual c* 으로 작성하였고, 이를 손쉽게 데이터 처리하기 위해서 *DTVEE* 소프트웨어를 이용하여 *interfacing* 처리하여 분석할 수 있도록 하였고 Fig. 5는 이를 해석할 수 있는 전체 프로그램의 실행을 스크린 메뉴 형태로 나타낸 것으로 프로그램의 초기화면과 처리한 샘플 예를 보여주고 있다. 본 연구에서 개발된 프로그램으로 해석한 결과 진원도 특성을 분석하고 고찰할 수 있었고 실험과 비교할 수도 있었다.

Fig. 6은 마찬가지로 식(6)에 의하여 공작물과 공구의 위치상태를 나타내는 조건이 각각 $R_a = 1, \omega_a = 4$ 와 $R_r = 2, \omega_r = 3$ 인 경우 초기위상의 위치를 각각 변화

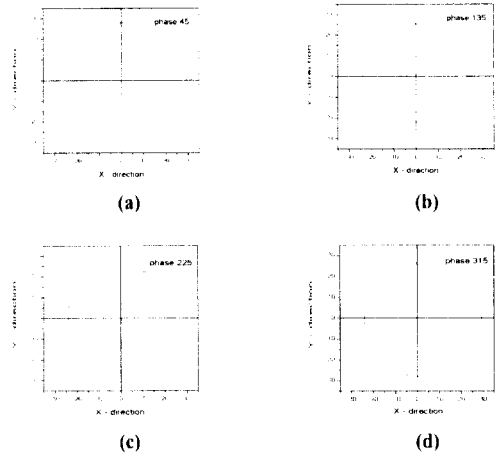
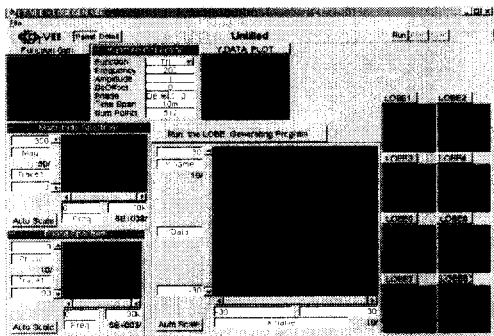
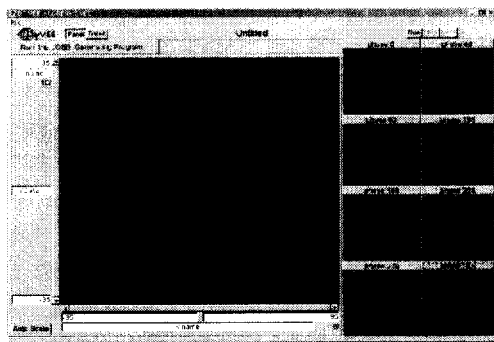


Fig. 6 Theoretical profiles for lobe with different vibration mode and initial phase deviation



(a)



(b)

Fig. 5 Configuration of developed profile prediction program for menu start. (a) for lobe with different mode. (b) for lobe with different initial phase

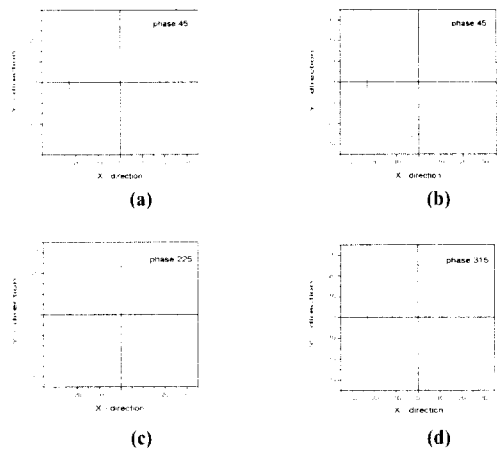


Fig. 7 Theoretical profiles for lobe with different vibration mode and initial phase deviation

시켜 가공형상의 변동상태를 나타낸 것이다.

마찬가지로 Fig. 7은 식(6)에 의하여 공작물과 공구의 위치상태를 나타내는 조건이 각각 $R_a = 2, \omega_a = 4$ 와 $R_r = 1, \omega_r = 3$ 인 경우 초기위상의 위치를 각각 변화시켜 가공형상의 변동상태를 나타낸 것이다. 물론 드문경우 이나 짝수개의 4개와 3개가 나타날 수 있는 경우를 나타내고 있다. 각각의 경우 마찬가지로 공작물 공전반경, 공구의 진폭, 또 초기위상의 변화가 로브의 형상과 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 그림에서 4개짜리의 모우드들 강조

한 결과로 보여지며 실제의 형상은 드물게 측정된다. 결국 홀 수개나 짝수개나 가공형상은 가공물 공전반경과 공구 진폭 뿐 아니라 공작물의 초기 위치에 따라 다르게 나타나고, 즉 초기위상상태에 따라서도 마찬가지로 가공형상정도가 상당히 다르게 나올 수 있음을 보여주고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

원통형 가공물의 외곽형상을 가공하기 위하여 본 연구에서 사용된 공작기계는 대우중공업의 PUMA10 NC선반에서 수행하였고 공작물의 재질은 SM45C이고 공작물 직경은 $D = 40$ mm로 하였다. 사용된 공구홀더는 sandvik 사의 PSBNL을 사용하였고 인서트는 SNMA 타입으로 P20 정도의 초경으로 선삭하였고, 공작물을 가공 후 이 형상을 Rank Taylor Hobson 사의 진원도 측정기로 측정하여 이론적으로 계산된 형상과 비교하였다. 이때 절삭속도 $V = 57, 70, 80$ m/min, 이송속도 $f = 145, 158, 172, 180, 190$ mm/min, 절삭깊이는 $d = 1$ mm의 실험 조건으로 수행하였다. 일반적으로 선반가공 매카니즘은 가공물과 공구의 상대진동 결과이고, 결국 공구와 공작물의 진동에 의하여 가공물의 외곽 가공부의 형상이 다각형으로 나타나며 공구쪽의 강성이 크게되면 공구의 진동이 상대적으로 작아지고 있었다. 이 다각형 로브 형상은 주로 공작물 회전축인 스피indle축의 회전오차에서 생성되고 $\omega_a / \omega = n$ 혹은 $\omega_r / \omega = n$ 의 조건을 만족하는 특성을 나타나게 된다는 이론적인 배경과 비교하였다. 본 실험에 의한 결과로는 주로 로브형상의 수가 3개와 5개가 가장 흔하게 측정되었고, 한 개의 구멍에 일정한 로브의 수가 측정되는 것이 아니라 여러 개가 공존하였고 이는 공구와 공작물 사이의 진동상태가 일정하지 않고 변할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉 이송되면서 공작물이나 공구사이의 동적강성이 변하고 이 변화는 상대적인 변위로 나타나 로브의 가공형상이 창성된다고 할 수 있다. 이는 공작물의 축방향, 즉 가공길이 z방향으로 공구가 이송되면서 가공될 때 항상 일정하지 않고 임의의 로브에 상당하는 공전진폭과 공구진폭 및 각각의 진동수 조건으로 진동을 하기 때문이라고 사료된다. 또한 각각의 측정 형상을 분석한 결과 이론적으로 계산한 결과와 같이 진원도의 로브의 형상이 2-5개까지의 다각형 로브의 형상을 관측할 수 있었으나 주된 모양새는 2, 3개와 5개가 측정되었다. 물론 짝수개의 2개와 4개의 로브도 관찰되었다.

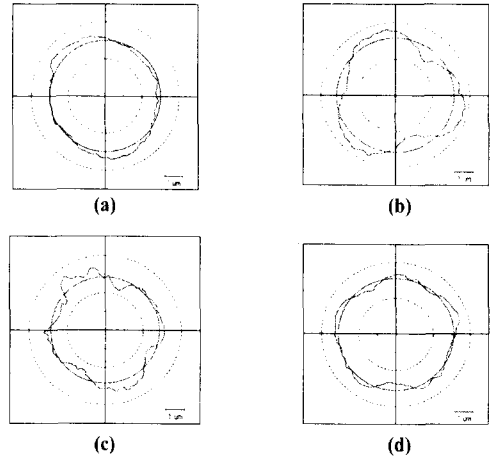


Fig. 8 (a)-(d) Experimental lobe profiles for lobe 2-5 ($V = 70$ m/min, $f = 190$ mm/min)

Fig. 8 은 $V = 70$ m/min, $f = 190$ mm/min의 절삭조건에서 선반가공된 가공물을 측정된 결과이다. 가공형상을 분석한 결과 로브의 수가 2개에서 5개가 실제로 측정되었고 이것들과 이론적인 모델링 결과와 분석하였다. 이때 사용된 형상측정기는 Rank Taylor Hobson 사의 진원도 측정기를 사용하였다. 그림에서도 공작물의 회전에 의한 회전 편차항을 나타내는 조금 불규칙한 형상이 나타났고 이는 Fig. 2 및 Fig. 3의 결과와 어느정도 잘 들어 맞게 되어 있어 앞에서 제시한 형상모델이 타당성이 있음을 알 수 있다. Fig. 8(a)-(d)는 로브의 수가 2-5개인 경우의 진원도이다. Fig. 8(b)는 대칭형으로 Fig. 2(c)의 경우와 유사하다고 볼 수 있다. 이론에서 진폭 R_r 를 높여주면 실험결과와 같이 대칭형의 경우에는 Fig. 2(a)-(h)와 비슷하고 이 경우는 R_a 가 R_r 보다 상당히 작게 운동하는 경우이다. 물론 계산된 모델링 결과는 공작물의 마모나 가공시의 동적특성에 의한 고주파의 특성은 고려하지 않았으나 이것을 고려하면 실제 실험한 경우와 비슷한 형상이라고 할 수 있고 역으로 실험 결과를 *curve fitting* 하면 Fig. 8(a)-(d)는 Fig. 2의 각각의 형상과 유사하게 된다고 볼 수 있다. 주로 실험조건에서는 거의 좌우 대칭형상으로 측정되었고 단지 Fig. 8(a)(c)에서는 조금 비대칭성을 나타 내었다. 또 그림에서 특성이 조금 파먹은 듯한 형상은 가공시 공작물과 공구의 *adhesion* 이후의 불규칙한 파단에 의한 결과로 사료된다. Fig. 8(c)는 드물게 측정된 것으로 4개 짜리 로브형상의 결과로 부드러운 폐쇄형을 완벽하게 이루

지 못한 형상으로 볼 수 있다. 이들은 Fig. 2(d), Fig. 3(d)의 형상과 특성이 유사하다고 할 수 있다. Fig. 8(d)는 5개 짜리로 3개 짜리와 마찬가지로 혼하게 측정되었고 거의 대칭형에 가까운 5개의 로브 형상결과이다. 이것은 Fig. 2(e)와 Fig. 3의 5개인 경우와 유사한 형상특성을 나타내고 있다. 따라서 실험결과를 분석하여 보면 대부분의 주축 회전은 3개나 5개의 로브가 형성되는 조화진동의 조건으로 진동함을 보여 주고 있고 또 그 운동은 진폭의 크기가 조금 불규칙하게 진동함을 알 수 있었다.

5. 결 론

NC선반에서 가공된 둥근형상가공의 형상모델을 제시하고 이를 분석할 수 있는 프로그램을 작성하여 분석하였으며 그 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 원통의 외곽을 가공시의 형상모델링에 의한 결과와 본 실험조건에 의한 형상은 비교적 잘 일치하였으며 따라서 이 제안 모델은 타당하다. 또한 선반가공의 경우 가공물의 중심은 정상안정상태로 될 때 조화함수의 형태로 회전한다.
- (2) 원통가공시의 공작물 공전반경과 공구의 진폭, 또한 각각의 고유진동수가 공작물의 최종 형상을 결정하게 되고 로브의 개수는 ω_1/ω , ω_2/ω 의 수와 일치하며 두 진폭중에서 큰쪽에서 그 로브의 고유형상 특성이 뚜렷하게 결정된다.
- (3) 공작물 중심의 공전주파수와 공구의 진동 주파수가 로브의 수를 결정하는 지배적인 변수이고 그 형상의 특성은 $R_o/R_i \approx 0$ 의 상태로 가공되는 경우 반경 및 회전방향으로 대칭형상으로 나타나고 $R_o/R_i \approx \infty$ 이면 형상이 비대칭의 형태로 찌그러져 나타난다. 따라서, 가공물을 대칭형상으로 얻기 위해서는 $R_o/R_i \approx 0$ 즉, 공전진폭이 상대적으로 작도록 하고 선반구조는 주축부의 베어링 강성크도록 설계되어야 한다.

후 기

본 연구는 1999년도 부경대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구 되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) H. Kato and Y. Nakano, "Transfer of Roundness Error from Center and Center Hole to Workpiece in Cylindrical Grinding and its Control", *Annals of the CIRP*, Vol.34, No.1, 1985.
- (2) T. Oiwa and A. Kyusojin, "Development of precise cylindrical grinding by ball centers: constant stiffness between ball and center hole", *Precision Eng.*, Vol.12, pp. 37~42, 1990.
- (3) D. M. Longanbach and T. R. Kurfess, "Real-Time Measurement for an Internal Grinding System", *Trans. of NAMRI/SME*, Vol.26, 1998.
- (4) S. J. Lee, K. F. Eman and S. M. Wu, "An Analysis of the Drill Wandering Motion", *Journal of Engineering for Industry*, Vol.109, pp. 297~305, 1987.
- (5) T. Oiwa and A. Kyusojin, "Development of precise cylindrical grinding by ball centers: effect of dynamic stiffness on work profile", *Precision Eng.*, Vol.14, No.4, pp. 237~242, 1992.
- (6) W. Gao, S. Kiyono and T. Sugawara, "High-accuracy roundness measurement by a new error separation method", *J. of the ASPE*, Vol.21, pp. 123~133, 1997.
- (7) 윤문철, 조현덕, 김성근, "베어링의 로브형상과 절삭력 모델링", 한국윤활학회 추계학술대회 논문집, pp. 343~349, 1998.
- (8) 윤문철, "선반가공에 의한 진원도 가공형상의 모델링에 관한 연구", 부경대학교 논문집, 제4권, 제2호, 1999.
- (9) 윤문철, 김종수, 조희근, 김영국, "둥근형상가공의 진원도 특성에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 1999.
- (10) 김성철, 박희건, 이웅석, "엔드밀에 의한 원통가공시 절삭조건에 따른 진원도의 실험적 연구", 한국공작기계학회, 제8권, 제4호, 1999.