

베어링의 로브형상과 절삭력 모델링

윤문철*(부경대), 조현덕(경일대), 김성근(호서대),

Bearing Lobe Profile and Cutting Force Modeling

M. C. Yoon* (PuKyong National University)

H. D. Cho (Kyung il University), S. K. Kim (Hoseo University)

Abstract- A modeling of machined geometry and cutting force was proposed for the case of round shape machining, and the effects of internally machined profile are analyzed and its reliability was verified by the experiments of roundness tester, especially in boring operation in lathe. Also, harmonic cutting force model was proposed with the parameter of specific cutting force, chip width and chip thickness, and in this study, we can see that bored workpiece profile was also mapped into cutting force signal with this model. In general, we can calculate the theoretical lobe profile with arbitrary multilobe. But in real experiments, the most frequently measured numbers are 3 and 5 lobe profile in experiments. With this results, we can predict that these results may be applied to round shape machining such as drilling, boring, ball screw and internal grinding operation with the same method.

Key words - harmonic vibration, lobe profile, misalignment, setting error, round shape operation, runout, specific cutting force, vibration mode, waviness,

1. 서 론

일반적으로 저어널 베어링의 제작은 기계가공으로 하고 있으며, 특히 드릴 및 보오링 가공후 연삭가공 등의 입자가공으로 정삭을 하여 제작하고 있다. 베어링을 가공하기 위한 드릴링이나 보오링, 선반가공, 볼스크루가공, 내경연삭 등은 가공후의 형상이 둥근형상(round shape)의 특징을 나타낸다. 이들 가공법으로 베어링을 가공한 후 베어링의 형상을 살펴보면, 그 외부형상(profile)이 가공구멍의 기준원(base circle)에 대하여 진동하는 파형(waviness)을 나타내고 있으며 특히 저어널베어링의 경우에도 최종의 연삭가공 등의 내경 입자가공 후에도 베어링의 형상에는 이와 같은 현

상이 나타난다. 따라서 이와 같은 형상의 예측과 원인 규명은 매우 중요하고 특히 파형에 따라 가공부품의 베어링성능 및 부하용량에 많은 영향을 미치게 된다. 특히 이 형상에 관련되는 둥근형상의 슬라이딩 베어링 경우 가공후에 파형에 따라 슬라이딩 베어링의 부하용량 및 그 베어링 특성이 달라지게 된다. 이 원인은 본 연구에 의하면 베어링 가공공구와 공작물이 부착된 스피들축의 회전오차에 따른 진동이 그 주된 원인이고, 결국 이 스피들축과 공구의 진동에 의한 회전오차는 가공물의 형상에 지대한 영향을 미치게 된다. 베어링 가공용 공작물이 회전축에 물려 보오링되는 경우에는 가공물의 중심이 일정하게 고정되지 않고 원래 일정하여야 하는 이 점을 중심으로 공전

단, D_a, D_t 는 공작물의 중심계적 및 공구의 진폭
 ω_a, ω_t 는 공작물의 중심계적 및 공구의 회전
 주파수

또 P' 점을 가공할 시의 가공칩 두께 t_o 는

$$t_o = t_m - \frac{D_a}{2} \sin(\omega_a t + \phi_a) - \frac{D_t}{2} \sin(\omega_t t + \phi_t) \quad (5)$$

이고 여기서 t_m 은 가공깊이이고 진동에 의한
 미소 절삭력의 변화를 고려한 절삭력 F 는 칩의
 두께 t_o 및 폭 b 의 곱인 단면적에 비례한다. 즉

$$F = K_s b (t_m + t_o) = K_s b \left(t_m + \frac{D_a}{2} \sin(\omega_a t + \phi_a) - \frac{D_t}{2} \sin(\omega_t t + \phi_t) \right) \quad (6)$$

단, b 는 절삭폭, K_s 는 비절삭력(N/mm^2)

베어링 가공에서 생성되는 불안정한 채터 주파
 수도 로브 파형형상(lobe waviness)의 한 가지의
 형태이고, 공구와 공작물사이의 관계에서 진동 및
 파형도의 형상관계는

$$f_s = \frac{S N}{60} \quad (7)$$

로 되며 여기서 f_s 는 채터 주파수이고 S 는 가공
 면의 파형형상의 로브의 수 이다.

3. 가공형상 및 절삭력의 해석 및 고찰

3.1 가공형상

본 연구에서 가공형상과 절삭력의 계산은
 Visual Basic 으로 작성하였고, 이를 처리하기 위
 해서 DTVEE 소프트웨어를 이용하여 쉽게 분석
 할 수 있도록 처리 프로그램을 작성하였다. 해석
 한 결과 다음과 같은 내용을 고찰할 수 있었다.
 Fig.2 (a)-(h) 는 식(3)(4)에 의하여 $D_a/D_t = 1$ 의
 경우의 가공형상으로 로브의 수가 없는 것 부터
 8개 까지 계산하였다. 물론 9개 이상도 계산 가능
 하였고 실험에 의한 결과는 대부분이 5개 이하로

나타났다. 그 이유는 6개 로브는 3개의 로브의 조
 합으로 볼 수 있으므로 3로브에 포함되고, 8개는
 4개나 2개의 형상에 포함되는 것으로 볼 수 있다.
 또한 실험에 의한 로브의 수가 5개 이하라는 것
 은 대부분의 공작물과 공구의 진동은 5개 이하가
 되도록 회전수 ω_a 와 ω_t 조합으로 회전하고 있
 으며 ω_a 와 ω_t 에 따라 형상이 생성이 된다.

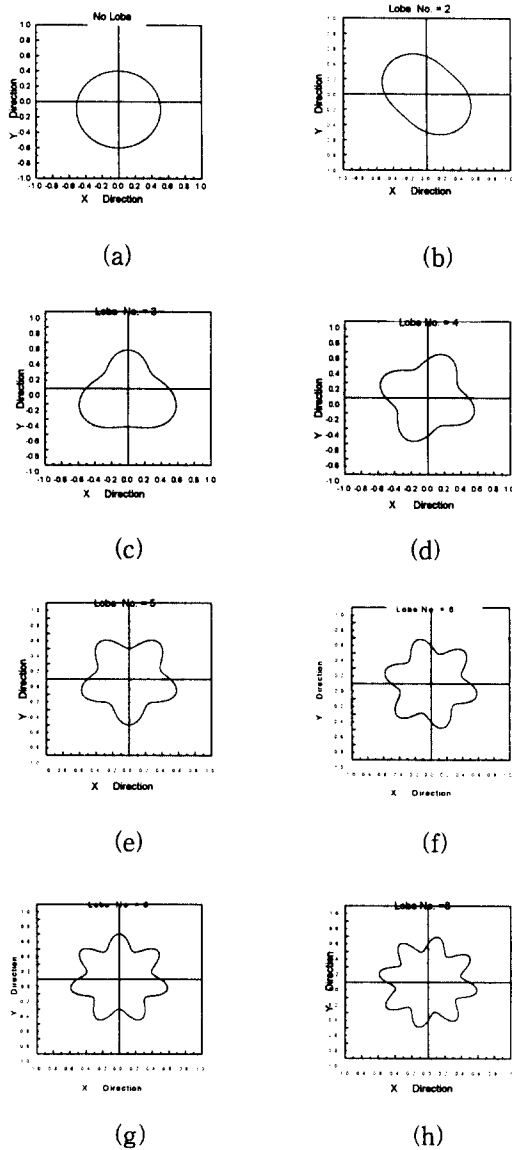


Fig.2 Theoretical profiles for lobe 2-8 with equal revolute deviation.

Fig.3 (a)-(h) 는 식(3)(4)에 의하여 $D_a/D_t = 0.5$ 의 경우 계산된 가공형상으로 로브의 수가 없는 것부터 8개까지 계산하였다. 물론 Fig.2의 현상과 유사한 로브의 형상이 나타나나 각 로브의 크기가 달라지는 것을 알 수 있다. 이론적으로도 9개 이상도 가능하였으나 실험에 의한 결과는 대부분이 5개 이하로 나타났고 그 이유는 Fig.2의 경우와 마찬가지로 6개 로브는 3개의 로브의 조합으로 볼 수 있으므로 3로브에 포함되고 있으며 마찬가지로 8개는 4개나 2개의 형상에 포함되는 것으로 볼 수 있기 때문에 단지 로브의 모양이 작아지면 이는 2개나 3개의 로브의 형상에 포함됨을 알 수 있다. 대부분의 공작물과 공구의 진동은 5개 이하가 되도록 회전수 ω_a 와 ω_t 로 회전하고 있으며 ω_a 와 ω_t 에 따라 진동모우드가 생성된다. 그리고 그림에서 로브의 형상이 그림의 중심보다 약간 아래로 쳐져 있는 것은 초기의 ω_a 나 ω_t 의 한 조건에서 작은 회전수의 한번 회전시 다른 회전수는 로브의 회전수에 해당하므로, 낮은 회전수의 위치가 90도의 범위에서 두회전수의 진폭의 방향이 반대가 되어 가장 작음을

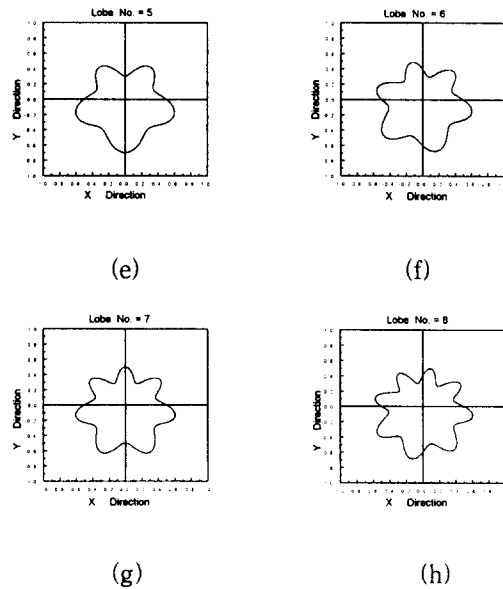
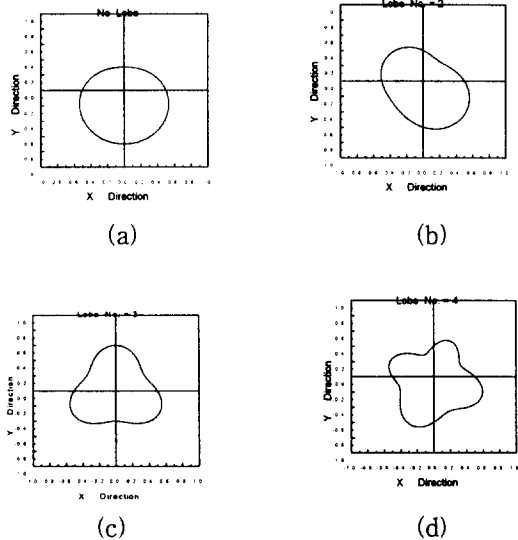
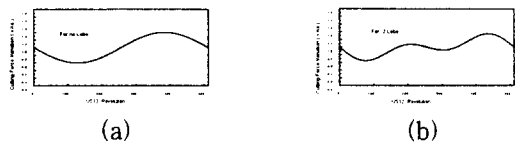


Fig.3 Theoretical profiles for lobe 2-8 with unequal revoluted deviation.

나타내고 270도의 범위에서는 같은 방향이 되어 가장 크게됨을 알 수 있다. 또한 로브의 위치는 위상 ω_a 와 ω_t 에 의하여 결정됨을 알 수 있다.

3.2 절삭력

Fig.4은 식(6)에 의하여 Fig.3의 각각의 경우 절삭력의 변동상태를 나타내고 있으며, 이 변화가 로브의 형상과 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 결국 절삭력의 동적인 성분 중 잡음을 제외한 대부분의 성분은 이런 가공물의 형상가공시 절삭깊이의 두께 변화에 따른 변화로 볼 수 있고 절삭력에도 로브의 모우드가 그대로 매핑이 되는 것을 알 수 있다.



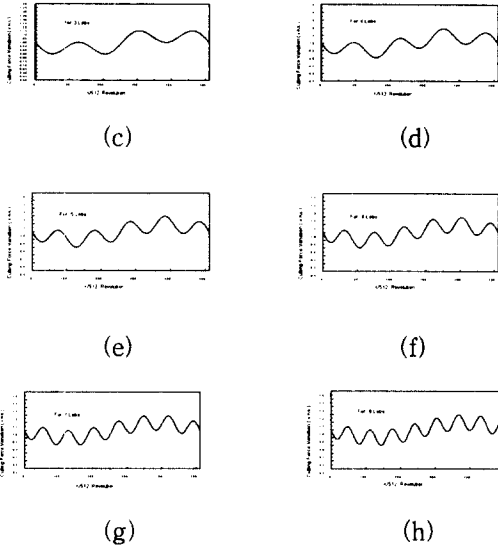


Fig.4 Theoretical cutting force profiles for lobe 2-8 with unequal revolute deviation.

Fig.2의 경우의 절삭력의 신호는 Fig.5의 결과와 같이 낮은 주파수의 진동이 없이 고주파의 로브만 나타내는 일정한 일직선 형태의 로브 진동만 나타났고 이를 로브가 8개인 경우(Fig.2(h))의 경우는 절삭력이 Fig.5(h)와 같이 계산되었다.

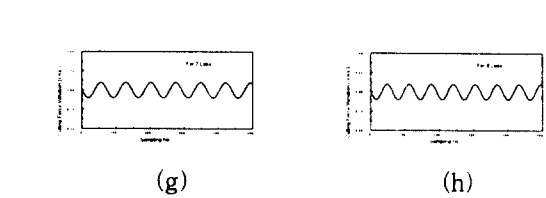
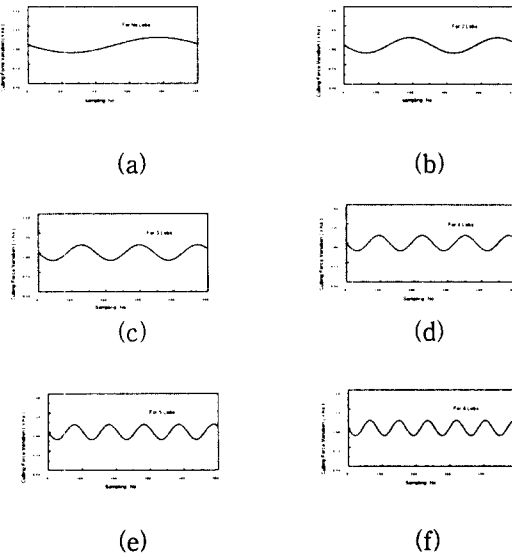


Fig.5 Theoretical cutting force profiles for lobe 2-8 with equal revolute deviation.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 가공형상

본 연구에서는 베어링의 외륜 내부형상을 나타내는 보어링 가공된 구멍 형상을 진원도 측정기로 측정하여 이론적으로 계산된 형상과 비교하였다. 이때 사용된 공작기계는 PUMA10 NC선반에서 수행하였고 공작물의 재질은 SM45C이다. 공구는 P20 초경을 사용하였고 가공된 형상을 측정하였고 이때 절삭조건은 $V = 58, 65, 71, 80$ m/min, $f = 146, 160, 172, 181, 193, 205$ mm/min로 하였다. 보어링 등의 구멍가공과 등근 형상의 가공의 경우 가공물과 공구의 진동메카니즘은 유사하다고 볼 수 있고, 결국 공구와 공작물의 상대적인 진동에 의하여 베어링 가공부의 형상이 다각형으로 나타난다. 공구쪽의 강성이 크게되면 공구의 진동이 상대적으로 작아지고 이 다각형 형상은 주로 공작물 스핀들축의 회전오차에서 생성되고 식(7)의 조건을 만족하는 특성을 나타내게 된다. 본 실험에 의한 결과로는 주로 로브형상의 수가 3개와 5개가 가장 흔하게 측정되었고, 한 개의 구멍에 일정한 로브의 수가 측정되는 것이 아니라 여러 개가 공존하는 것을 알 수 있다. 이것은 베어링의 측방향으로 공구가 이동하면서 가공될 때 항상 일정하지 않고 임의의 로브에 상당하는 불규칙한 진동을 하기 때문이라고 사료된다. 또한 각각의 측정 형상을 분석한 결과 이론적으로 계산한 결과와 같이 베어링 로브의 형상이

2-6개 까지의 다각형 로브의 형상을 관측할 수 있었다. Fig.6 은 각각의 절삭조건에서 구멍가공된 가공물을 측정하여 가공형상을 분석한 결과 로브의 수가 2개에서 6개가 실제로 측정되었다. 이때 사용된 형상측정기는 Rank Taylor Hobson사의 진원도 측정기를 사용하였다. 그림에서도 공작물의 회전에 의한 회전 편차항을 나타내는 조금 불규칙한 형상이 나타났고 이는 Fig.2 및 Fig.3 의 결과와 어느정도 잘 들어 맞게 되어 있어 앞에서 제시한 절삭력 모델이 타당성이 있음을 알 수 있다.

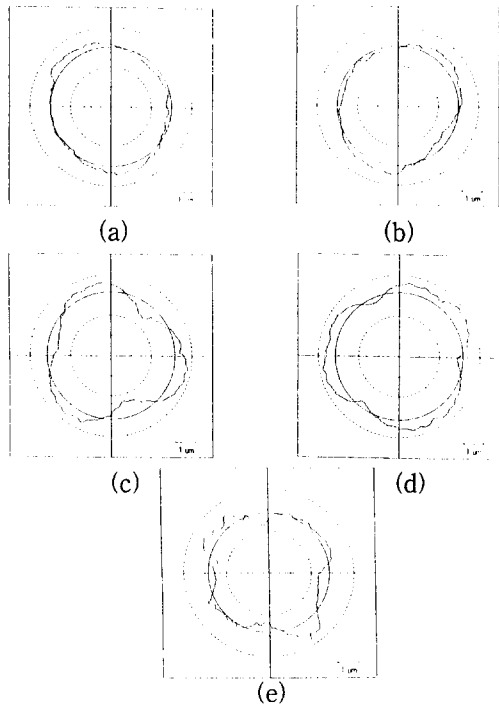


Fig.6(a)-(e) Experimental Lobe profiles for lobe 2-6 ($V = 71$ m/min, $f = 193$ mm/min)

Fig.6(a)-(b)는 로브의 수가 2개인 것의 진원도 형상이고 Fig.2(b) 및 Fig.3(b)와 비슷한 형상을 보여주고 있다. 이 경우 물론 계산된 모델링 결과는 공작물의 마모나 가공시의 동적특성에 의한 고주파의 특성은 고려하지 않았으나 이것을 고려

하면 실제 실험한 경우와 비슷하다고 할 수 있고 역으로 실험 결과를 필터링하면 Fig.6(b)는 Fig.3(b)의 형상과 유사하게 된다고 볼 수 있다. Fig.6(c)(d)는 로브의 수가 3개인 경우의 진원도 형상을 나타내는 실험 결과이고 Fig.6(e)는 드물게 측정된 것으로 4개 짜리 로브형상의 결과로 Fig.3(b)의 형상과 잘 일치하고 있다. Fig.6(f)는 3개 짜리와 마찬가지로 자주 측정되었고 5개의 로브 형상결과이다. Fig.2 와 Fig.3 의 (e)의 경우를 나타내고 있다. Fig.6(g)는 드물게 형상이 측정되었고 대부분이 2개나 3개의 로브 형상에 포함되도록 한 개씩 걸러 진폭의 크기가 작아지게 되어 2개에 포함되는 것을 알 수 있었다. 또한 실험결과를 분석하여 보면 대부분의 주축의 회전이 3개나 5개의 로브가 형성되는 조화진동으로 진동함을 보여 주고 있으나 그 운동은 진폭의 크기가 조금 불규칙하게 진동함을 알 수 있었다.

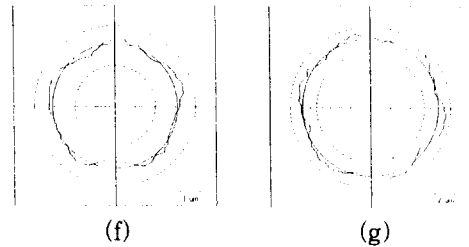


Fig.6(f),(g) Experimental Lobe profiles for lobe 2-6 ($V = 71$ m/min, $f = 193$ mm/min)

4.2 가공절삭력

베어링의 구멍을 보어링할 때, 베어링의 축방향 즉, Z 방향으로 1회전에 해당하는 길이만큼 이동하여 로브의 형상을 측정하여 갈 때 로브의 형상에 따라 절삭력이 변화한다고 볼 수 있으므로 Fig.2 와 Fig.3과 같은 로브의 형상에 따른 절삭력을 알 수 있고 Z 방향으로 순차적으로 측정된 로브의 형상의 순서가 2-2-3-3-4-5-5-5-2인 경우의 절삭력신호는 Fig.4 와 Fig.5

에서 대응되는 (b)-(b)-(c)-(c)-(c)-(d)-(e)-(e)-(e)-(b)의 신호의 조합으로 절삭력의 신호가 생성되고 이렇게 생성된 신호를 조합한 결과 Fig.7 과 같다. 따라서 실제의 절삭력의 신호를 잘 가공 분석하면 가공형상이 어떻게 되는지 예측할 수 있다. 다른 로브의 조합으로도 여러 가지 신호가 생성되고 실제의 신호도 이러한 신호의 조합에 공구와 공작물의 마모에 의한 고주파 성분 및 기타 잡음이 포함된 것이 실제의 신호라 할

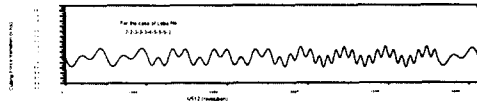


Fig.7 Generated cutting force signal for lobe sequence 2-2-3-3-3-4-5-5-5-2 sequence into z direction

수 있다. Fig.8 의 신호는 공구동력계로 측정된 실제의 절삭력신호로서 미세 절삭력의 파형이 Fig.7 의 파형과 유사함을 알 수 있고 이 신호를 측정할 시편에서는 2, 3 및 5개의 로브형상이 관측되었다.

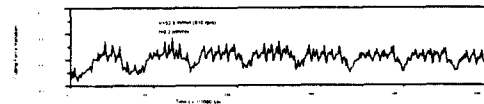


Fig.8 Experimental cutting force signal

4. 결 론

본 연구에서 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 베어링 가공시 등근 형상가공시의 로브형상 및 절삭력 모델을 간략히 제시하고 분석하여 실험적인 형상과 비교한 결과 비교적 잘 일치하였고 따라서 이 모델은 타당하였다. 또한 가공물의 주축은 조화함수의 형태로 회전함을 알 수 있었다. 또

공작물 및 공구의 진폭과 회전수가 베어링의 로브형상의 특성을 결정하는 가장 중요 인자이다.

2. 조화진동형태의 고유진동수는 로브의 수를 결정하고 형상의 모양새는 $D_a/D_t=1$ 의 상태로 가공되는 경우는 대칭의 형태이고 $D_a/D_t = 1$ 아닌 배수 형태이면 형상이 찌그러져 나타나게 된다. 그러나 D_a/D_t 의 비가 상대적으로 매우 크거나 매우 작은 형태로 가공되면 이 때도 대칭의 형태로 된다.

3. 공구가 고정되어 진동이 없다고 가정하거나 공작물이 고정되어 진동이 없다고 가정되는 가공에서는 공작물의 형상은 대칭의 형태로 로브의 형상이 생성된다.

참 고 문 헌

1. M. Y. Yang, J. G. Choi and J. H. Park, "Analysis of Setting Errors in Precision Ballscrew Machining and Development of the Automatic Adjustable Center", Trans. of the NAMRI/SME, Vol.26, pp.143-148, 1998.
2. D. M. Longanbach and T. R. Kurfess, "Real-Time Measurement for an Internal Grinding System" Trans. of NAMRI/SME, Vol.26, 1998.
3. 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.
4. 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.