

초정밀 경사축 연삭가공에서의 공구 궤적 해석

Tool Locus Analysis of Ultra-precision Inclined Grinding

황연^{1,✉}, 박순섭^{2,3}, 이기용², 원종호³, 김현호⁴
Yeon Hwang^{1,✉}, Soon Sub Park^{2,3}, Ki Yong Lee², Jong Ho Won³ and Hyun Ho Kim⁴

1 한국광기술원 초정밀광학팀 (Ultraprecision Machining Team, Korea Photonics Technology Institute)

2 한국생산기술연구원 호남권기술지원본부 (Honam Technology Division, Korea Institute of Industrial Technology)

3 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

4 광주과학기술원 기전공학과 (Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology)

✉ Corresponding author: yeonhwang@kopti.re.kr, Tel: 062-605-9261

Manuscript received: 2008.9.2 / Revised: 2009.5.19,7.5 / Accepted: 2009.8.10

This paper presents the geometrical analysis of an inclined ultra-precision grinding technology using simulations about grinding point locus for micro lens manufacturing. Simulation results show the relationship between radius ratios(R_1/R_2) and wheel center locus. Furthermore, the critical grinding wheel radius(R_1) can be calculated from work-piece radius(R_2) and inclined angle($\theta=-45^\circ$). These achievements could be applied to calculate CNC data in ultra-precision grinding and give insight for wheel wear and compensation grinding.

Key Words: Inclined Grinding (경사축 연삭), Tool Locus (공구 궤적), Ultra-Precision Machining (초정밀 가공), Tool Wear (공구 마모)

기호설명

- $F(x, y, z)$ = Tool center of NC machine(NC data)
- $S(x, y, z)$ = Position vector of machining surface (work piece)
- $R(x, y, z)$ = Normal vector of machining surface
- θ = Inclined angle of wheel
- R_1 = Wheel radius
- R_2 = Work piece radius
- R_c = Critical Wheel radius
- (X, Y, Z) = Contact point between wheel and work-piece (Machining point)
- $(a, 0, c)$ = Wheel locus, Horizontal movement of an inclined wheel on XZ plane

1. 서론

초정밀 가공은 기존의 가공분야를 서브마이크로미터의 수준으로 끌어올려 광학 금형이나 특수가공에 적용되어 기계적 가공의 적용 영역을 넓히고, 동시에 다양한 분야의 기반기술로 자리잡아가고 있다. IT 기술의 발달과 더불어 다양한 목적의 초소형, 초고정도 광학계의 가공에 필수적인 생산기술이 되었다. 특히 광통신, 정보저장장치 등 산업 파급효과가 큰 분야에서 적극적으로 활용되고 있다.

경사축 가공을 지원하는 초정밀 가공기에는 기본적으로 공구경로를 생성하는 프로그램이 내장되어 있고, 이 프로그램을 이용하여 실제 CNC 가공 데이터를 생성하여 가공을 수행하게 된다. Toshiba사에서 개발한 ULG 시리즈 초정밀가공기의 경우 경사축 및 수직축 가공용 CNC 생성프로그램인 ULG Aspheric Software 를 제공한다. CAD(Computer

Aided Design) 분야에서는 다양한 회전 대칭곡면 및 자유곡면 CNC 데이터 생성에 관한 연구가 진행되고 있다.^{1,2} 그러나 상용 소프트웨어의 경우 실제 내부 프로그램이 공개 되어 있지 않고, 연구 목적의 프로그램의 경우 가공면의 데이터의 보간이나 면의 생성 이론에 관한 연구가 주를 이루고 있다. 이는 실제 가공을 수행하는 관점에서는 스톨 반경의 결정과 금형코어와 스톨의 간섭에 대한 판단 등이 중시되기 때문에 다소간의 거리가 존재한다. 특히 본 연구에서는 초소형 마이크로 렌즈 및 금형의 가공에 널리 적용되는 경사축 연삭에 대해 초정밀 연삭 가공의 관점으로 공구와 공작물의 기하학적 관계를 해석하였다. 이는 현재 이슈화 되고 있는 차세대 광 저장장치인 Blu-ray 렌즈용 금형의 가공에 적용이 가능하므로 폭넓은 산업적 파급효과가 기대된다.¹⁻³

경사축 연삭 가공은 Fig. 1 에서와 같이 일반적으로 공구와 공작물이 일정각도(θ)를 이루고 있는 경우의 초정밀 연삭을 의미한다. 기존의 수직축과 평행축 연삭가공의 조합된 가공형태로 볼 수 있는데, 가공면의 접촉방식과 이송방향은 수직축 연삭과 유사하고, 공구와 공작물의 설정은 평행축 연삭과 유사하다.

이러한 맥락에서 본 연구는 실제 산업현장에서 적용되는 경사축 연삭 가공의 공구궤적의 해석을 통해 경사축 연삭의 해석 및 적용을 위한 기초적인 기하학적 시뮬레이션을 수행하고, 이를 통해 공구 경로의 생성을 위한 관계를 제시하였다.

2. 기하학적 해석

2.1 공구좌표의 생성

경사축 연삭을 적용한 실제의 가공공정에서는 가공면의 좌표, 해당 좌표에서의 법선 방향 벡터, 공구 반경의 세가지 데이터를 조합하여 아래와 같이 NC 데이터를 생성하게 된다. 공구의 위치는 일반적으로 공구궤적의 NC 데이터 $F(x, y, z)$ 를 의미하는데, 가공면의 위치벡터 $S(x, y, z)$, 공구 반경방향 법선 벡터 $R(x, y, z)$ 의 위치가 고려되어 작성되어 아래와 같이 계산된다.

$$F(x,y,z)=S(x,y,z)+R(x,y,z) \quad (1)$$

즉 공구 중심의 좌표 $F(x, y, z)$ 는 가공곡면의 한 점 $S(x, y, z)$ 에 대하여 가공면의 법선 방향으로 공

구 반경만큼 거리 $R(x, y, z)$ 가 떨어진 위치를 공구의 중심으로 보고 NC 데이터를 생성하게 된다. 본 연구에서 다루고 있는 경사축 연삭의 경우 공구의 반경은 일정하나, 가공과정 중 마모에 의해 공구 반경이 변하게 된다. 또한 공구와 공작물의 접촉점 $S(x, y, z)$ 역시 점 접촉에서 면 접촉으로 전환되는데, 실제적인 보정가공 과정에서 공구 마모량이 포함되거나 축 원점의 조정을 통해 상쇄되어 CNC 데이터가 생성되므로 본 연구에서는 3 차원 좌표상에서의 접촉 초기 점을 상정한 점 접촉 해석을 통해 시뮬레이션을 수행하여 공작물 접촉 점을 우선 구하고 그를 통해 공구의 중심을 계산을 수행하였다.^{4,5}

일반적인 블록 형상의 가공보다 오목 형상의 가공이 공구 반경 및 가공 방식에 의한 제한을 받는데 전술한 바와 같이 오목 형상은 공구의 반경과 가공 마모량의 반비례 관계의 두 파라미터 사이의 적절한 공구반경을 선정하여야 효율적인 가공이 가능하다. 허용 공구 반경을 초과할 경우 공작물과 공구 사이에 간섭이 발생하고 역회전 접촉이 발생할 가능성이 생기고, 공구 반경이 지나치게 작을 경우 가공시간의 증가와 공구 마모 발생량이 커져 가공 형상의 품질을 저하시키기 때문이다.

2.2 공구와 공작물의 설정

경사축을 이용한 초정밀 연삭은 환봉형(Cylinder type) 연삭 스톨을 일정 경사각(θ)으로 기울여 회전시키고 봉의 하단 면이 이루는 궤적을 통해 공작물에 가공을 수행하게 된다.

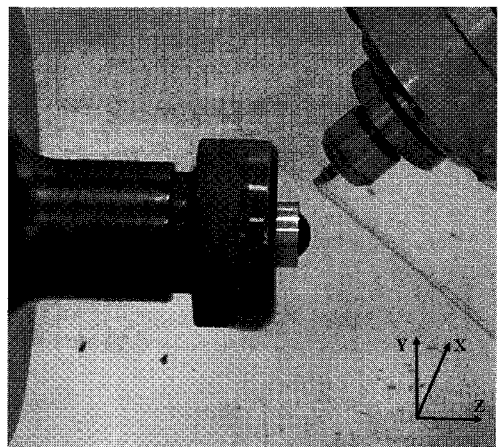


Fig. 1 Tool setting of inclined grinding

일반적인 산업현장의 가공은 Fig. 2 및 Fig. 3 에서와 같이 볼록(convex)/오목(concave) 형상의 공작물 회전중심에 대하여 수평방향(X 축과 Z 축 방향)으로 이송이 이루어진다. 이러한 이유로 본 연구에서는 수직방향(Y 축)에 대한 이송없이 수평면상의 2 차원 이송(XZ 평면 이송)을 통해 회전 공작물을 가공하는 방식에 대하여 해석을 수행하였다.

2.3 공작물에 따른 공구 궤적

경사축 연삭가공에서 공작물의 이송은 기본적으로 환봉 연삭 숫돌이 XZ 평면상에서 곡선 경로로 이송이 되며 공구와 공작물의 위치 관계에 의해 가공이 수행된다. Fig. 2 와 같이 공작물이 볼록인 경우와 Fig. 3 과 같이 공작물이 오목인 경우로

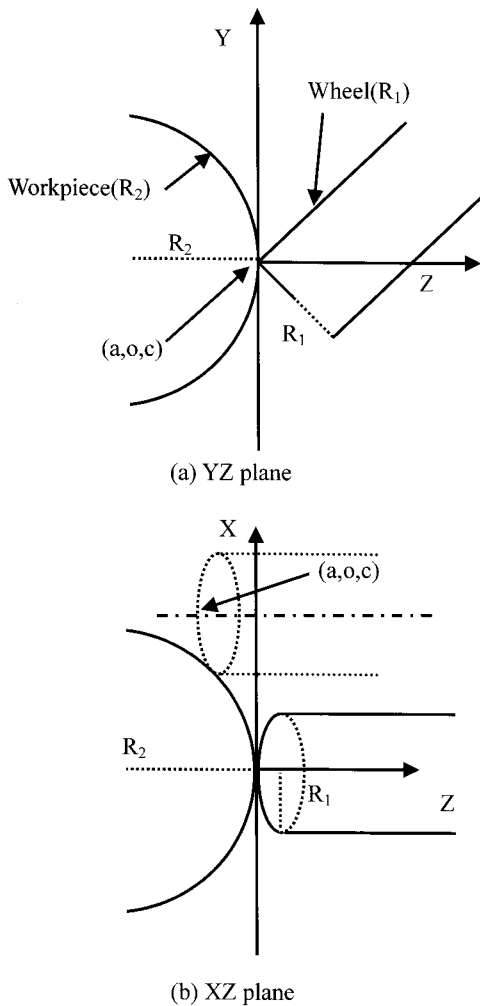


Fig. 2 Schematic diagram of concave machining

나누어지는데, 두 경우 숫돌 경로는 가공물의 곡률에 따라 공작물의 외부에 법선 방향의 공구 중심을 따라 이송되게 된다. 이 경우 공구 중심의 위치는 실제 NC 가공의 공구 이송경로를 의미하고 이를 통해 추후 보정가공이 이루어진다.

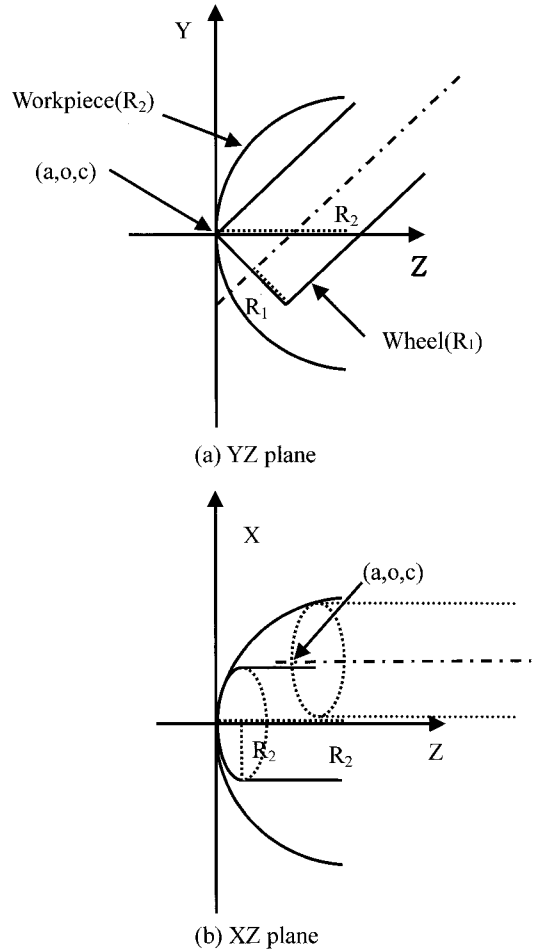


Fig. 3 Schematic diagram of convex machining

공구 궤적은 실제 가공에 이용되는 원의 방정식의 회전이동 면과 XZ 면에 대한 수평이동에 의해 기술된다. 아래 Eq. (2)는 일반적인 수직축 연삭가공에서의 공구 궤적을 나타낸다.

$$y=0 \tag{2}$$

$$X^2+(Z-R_1)^2=R_1^2$$

경사축 연삭 가공의 경우 수직 Y 축에 대하여

θ 만큼 Eq. (3)과 같이 회전이동 시켜 Eq. (4)를 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x &= X \\ y &= Y\cos\theta + Z\sin\theta \\ z &= -Y\sin\theta + Z\cos\theta \end{aligned} \quad (4)$$

이상의 회전이동에 의해 생성되는 공구 가공면의 식은 (X, Y, Z)로 표현되며 이를 원래의 식에 대입하면 Eq. (5)의 공구 회전이동에 관한 좌표 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Y\cos\theta + Z\sin\theta &= 0 \\ X^2 + (-Y\sin\theta + Z\cos\theta - R_1)^2 &= R_1^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Eq. (5)의 식을 X축 방향으로 a, Z축 방향으로 c 만큼 평행이동 시킨 식은 실제 숫돌이 XZ 평면상에서 가공물의 설계 값에 따라 평행이동하며 가공을 수행하는 것을 의미한다. 즉 (a, 0, c) 만큼 XZ 평면상에서 수평이동을 하면 아래와 같이 (X, Y, Z) 좌표에 관한 최종식 Eq. (7)을 얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} X &= X - a \\ Z &= Z - c \end{aligned} \quad (6)$$

이를 Eq.(5)에 대입하면 Eq.(7)을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} Y\cos\theta + (Z - c)\sin\theta &= 0 \\ (X - a)^2 + (-Y\sin\theta + (Z - c)\cos\theta - R_1)^2 &= R_1^2 \end{aligned} \quad (7)$$

이상의 공구 관련 식 Eq. (7)과 아래의 공작물 관련 식 Eq. (8)을 통하여 공구와 공작물의 가공점(Machining point)의 궤적을 구할 수 있다.

$$X^2 + Y^2 + (Z + R_2)^2 = R_2^2 \quad (8)$$

이상의 과정으로 얻어진 식은 실제 숫돌의 궤적이 되고, 가공 과정 중 숫돌과 가공물은 미세면 접촉에 의한 연삭 가공이 이루어진다. 이를 일반

화하기 위하여 접촉면에서 점 접촉한다고 가정하면, 공구와 숫돌의 접촉 점의 식 Eq. (9)를 구할 수 있다. 실제 가공에 있어서도 공구 마모에 의한 공구반경의 변화와 점 접촉에서 면 접촉으로의 전환은 일반적인 보정가공에서 일정부분 상쇄된다고 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} Y &= Z - c \\ (X - a)^2 + (\sqrt{2}Y - R_1)^2 &= R_1^2 \\ X^2 + Y^2 + (Y + c + R_2)^2 &= R_2^2 \end{aligned} \quad (9)$$

실제 일반적으로 적용되는 공구 축 경사각은 $\theta = 45^\circ$ 임을 고려하면, 이상의 식이 점 접촉에 대한 식이므로 Eq. (10)을 얻고, 증근은 갖는다는 조건에 의해 Y에 대한 판별식을 통해 다음과 같이 a, c에 관한 Eq. (11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (A^2 + 2)Y^2 + 2(c + R_2 - AB)Y + BR_2 + (c + R_2)^2 - R_2^2 &= 0 \\ A &= \frac{c + R_2 + \sqrt{2}R_1}{a} \\ B &= \frac{R_2^2 + a^2 - (c + R_2)^2}{a} \end{aligned} \quad (10)$$

$$(c + R_2 - AB)^2 - (A^2 + 2)(B^2 + (c + R_2)^2 - R_2^2) = 0 \quad (11)$$

Eq. (11)을 통해 R_1, R_2 등의 가공상수는 실제 가공 과정 중에 주어지고 특히 상수로 가정된 R_2 는 일반적인 경사축 연삭 가공 시에 주어지는 가공면의 식으로 대체될 수 있어 특정 곡면 방정식이 주어졌을 때, (a, 0, c)의 좌표 데이터는 XZ 평면상의 가공에서 특정 곡률 및 법선 방향에 대한 공구 중심의 좌표, 즉 NC 가공 데이터를 생성할 수 있게 된다.

3. 시뮬레이션

3.1 내접 외접 조건의 결정

시뮬레이션의 결과는 아래와 같이 공작물로 상정한 반경 R_2 에 내접 및 외접하는 반경 R_1 의 경사축 공구 단면에 대한 조건을 표현한다. 이는 하나의 식으로 공작물의 오목/볼록의 경우에 대해 동시에 가공조건을 판별할 수 있음을 의미한다. 즉 내접의 경우는 오목형상의 가공에 있어서의 공

구 좌표 궤적을, 외접의 경우 블록 형상에 대한 공구 좌표 궤적을 나타내게 된다.

Fig. 4 에서 보는 바와 같이, 공작물과 공구의 기하학적 조건으로부터 공작물의 일정 반경 R_2 에 대하여 R_1 를 변화 시키며 공구의 내접 및 외접 조건에 대하여 판단하였으며, a, c 는 공구 좌표에 대한 상대적인 값이므로 단위는 생략하였다. Fig. 5 에는 $R_1/R_2=1/\sqrt{2}, 0.7, 0.6, 0.5$ 에 대한 $(a, 0, c)$ 의 궤적이 계산되었다.

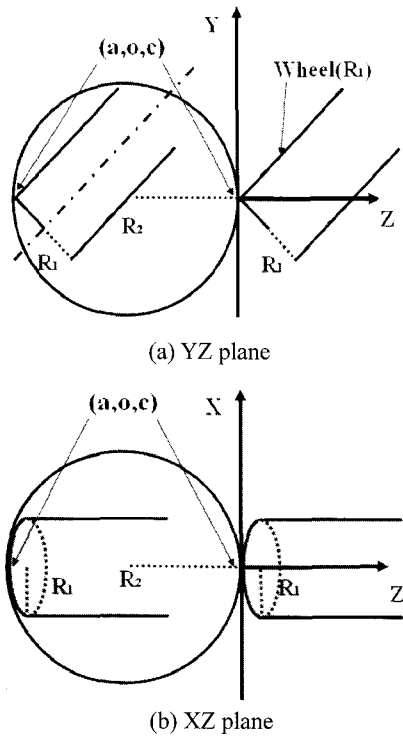


Fig. 4 Geometry of wheel and work-piece

Fig. 5 의 시뮬레이션의 결과는 공작물 반경과 공구 반경의 비는 일정 변곡점 ($R_1/R_2=1/\sqrt{2}$) 부근에서 내부에 폐곡선을 생성하기 시작함을 보여 준다. 외부 폐곡선은 공구와 공작물의 외접조건으로 블록 형상의 가공에 대한 공구 중심의 위치를 의미하고, 초기 수식의 가정에 의하여 외부 폐곡선의 상부 반 곡선은 블록 면에 대한 공구의 궤적을 나타내고, 동일하게 내부 폐곡선은 공구의 공작물에 대한 내접조건을 의미하며 내부 폐곡선의 하단부는 공구 중심의 XZ 평면상의 위치, 즉 가공을 위한 NC 데이터가 된다. 반면, 내접원이 생기

지 않는 $R_1/R_2 \geq 1/\sqrt{2}$ 의 경우 내접(오복) NC 데이터 생성이 불가능함을 의미한다.

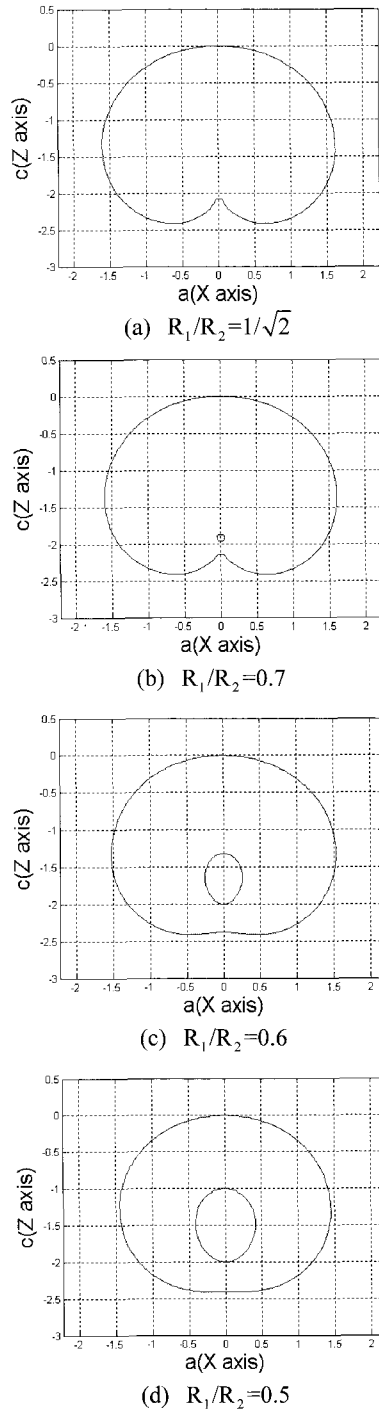


Fig. 5 Simulation results (R_1/R_2 ratios)

3.2 공구반경의 결정 및 공구 경로 생성

이상의 시뮬레이션으로부터 허용 최소 공구 반경 R_C 를 구할 수 있다. 이는 오목/볼록 형상의 가공에 동일하게 적용될 수 있으나 현실적으로는 공구의 이송경로를 고려하면 일정 정도의 공구반경의 여유가 필요하다. 공구반경이 확정되면 이를 통해 공구의 경로를 생성할 수 있다. Fig. 6은 공구와 공작물의 반경에 대한 각각의 공구의 경로의 시뮬레이션으로 R_1 대한 변수가 된다. 공구반경이 클수록 공구의 이송거리가 감소하여 가공시간이 감소하고, 단위시간당 가공량이 증가할 것이다. 반면 공구의 마모량은 증가하고, 공구 마모에 의한 오차의 가능성은 증가한다.

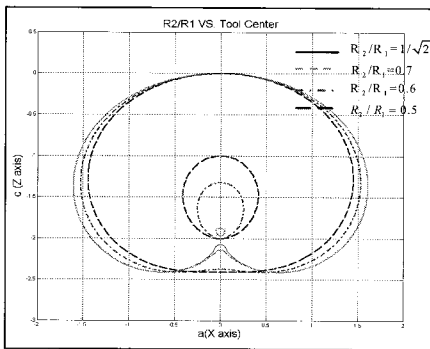


Fig. 6 Wheel center loci

이상의 시뮬레이션은 가공면의 형상이 일정한 곡률반경을 갖는 경우에 대하여 수행되었으나, Eq. (1)의 관계로부터 일반적인 가공의 경우 비구면식 등의 다양한 곡면 방정식을 적용하여 공구 중심궤적을 계산으로 확장할 수 있다. 또한, 시뮬레이션의 결과를 실제 가공용 NC 데이터 생성에 적용할 경우 곡면식의 곡률반경의 최소값에 대한 고려를 통해서 허용 가능한 공구의 최대 반경을 결정할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 경사축 연삭 가공에서의 공구 중심 궤적에 대한 계산을 통해 공구 이송 데이터와 최적의 공구반경에 대한 검토를 수행하였다. 이상의 결과는 다음의 두 가지의 주요한 해석을 가능하게 한다.

첫째, 공구 중심 좌표를 통해 경사축 연삭 가공을 위한 CNC 데이터 생성을 가능하게 한다. 가

공 곡면의 방정식과 그에 대응하는 공구 중심의 궤적을 계산하여 각 가공접촉면에 대한 공구 이송을 위한 좌표를 생성할 수 있다.

둘째, 시뮬레이션을 통하여 공구의 마모량을 최소화하기 위해 허용 가능한 최대 공구반경을 구할 수 있게 한다.

참고문헌

1. Park, S. S. and Lee, H. J., "Research on Ultra-Precision Grinding Method," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 6, pp. 14-21, 2006.
2. Malkin, S., "Grinding Technology," Ellis Horwood Ltd., pp. 45-78, 1989.
3. Ono, T. and Matsumura, T., "Influence of tool inclination on brittle fracture in glass cutting with ball end mills," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 202, No. 1-3, pp. 61-69, 2008.
4. Mansour, S., "Automatic generation of part programs for milling sculptured surfaces," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 127, No. 1, pp. 31-39, 2002.
5. Farouki, R. T., Tsai, Y.-F. and Yuan, G.-F., "Contour machining of free-form surfaces with real-time PH curve CNC interpolators," Computer Aided Geometric Design, Vol. 16, No. 1, pp. 61-76, 1999.