

# 곡면 다듬질에서 접촉해석에 근거한 유연공구 경로 설정

조성산\*, 이승영\*\*, 유용균\*\*

## Determination of Flexible Tool Path in Curved Surface Finishing Based on Contact Analysis

Sung-San Cho\* , Seung Young Lee\*\*, and Yong Kyoon Ryu\*\*

### ABSTRACT

Roughness of curved surfaces finished with flexible tools depends on the tool/work contact pressure and area. In this study, non-Hertzian closely conforming elastic contact theory is employed to analyze the tool/work contact and to generate a tool path producing a constant pressure at initial contact points. Finishing experiments on curved surfaces are conducted using the tool path. For comparison, curved surface finishing is also performed along the tool path producing a constant tool/work interference depth. It is demonstrated that the tool path of constant contact pressure improves the finished surface roughness.

**Key Words** : Curved surface finishing (곡면 다듬질), Flexible tool (유연공구), Tool path (공구경로), Contact pressure (접촉압력)

### 1. 서론

볼엔드밀로 가공된 곡면의 cusp를 포함한 미세요철을 제거하는 다듬질 공정을 로봇 또는 5축 머시닝센터에서 연삭숫돌을 사용하여 자동화하려는 연구가 진행되고 있다. 본 연구팀은 3축 머시닝센터에서 곡면 다듬질을 가능하게 하는 일종의 유연공구를 개발하였다<sup>(1)</sup>. 유연한 폴리우레탄 일레스토머 표면에 경질입자를 부착한 유연공구는 가공면과 접촉할 때 가공면 형상에 맞추어 변형된다. 따라서, 유연공구는 주로 전가공면의 돌출부와 실접촉을 형성하고, 그 결과 전가공면의 형상을 유지하면서 표면요철만을 제거한다. 또한 가공면과 공구의 특정 면을 접촉시키기 위한 공구 방향의

조정이 불필요하므로, 3축 머시닝센터에서 공구와 접촉이 가능한 모든 곡면의 다듬질이 가능하다. 유연공구를 5축 머시닝센터에서 사용하면 기존의 방법보다 단순한 제어방법으로 거의 모든 곡면의 다듬질이 가능하다.

유연공구 표면의 경질입자가 가공면을 절삭하는 깊이는 공구/가공물 접촉압력에 비례하고, 가공면 상의 한 지점이 공구와 접촉하는 시간은 접촉영역의 크기 및 형상에 비례하므로, 접촉압력과 접촉영역은 다듬질 면의 거칠기에 영향을 미친다. 유연공구를 이용한 곡면 다듬질에서 가공면과 일정한 간섭깊이(공구/가공면 초기 접촉점에서 가공면에 수직인 방향의 공구 이동거리)를 유지하면서 공구가 이동하면 곡면 형상에 따라 접촉압력과 접

\* 홍익대학교 기계공학과

\*\* 홍익대학교 대학원 기계공학과

축영역이 변화하고, 그 결과 곡면의 거칠기는 차이를 나타낸다. 따라서, 본 연구에서는 접촉압력을 일정하게 유지시키는 공구의 이동경로를 사용하여 유연공구로 다듬질된 곡면의 거칠기 향상을 도모하였다. 초기 접촉점에서 일정한 압력을 발생시키는 공구의 이동경로는 공구/가공면 접촉해석을 근간으로 산출하였다. 접촉압력을 일정하게 유지시키는 공구경로로 곡면 다듬질 실험을 수행하여 다듬질 면의 거칠기 향상을 검증하였다.

## 2. 공구경로

### 2.1 접촉해석 알고리즘

접촉은 접촉하는 두 물체의 형상이 유사한 공형(conformal) 접촉과 그렇지 않은 비공형(non-conformal)접촉으로 구분할 수 있다. 접촉하는 두 형태의 공형 정도, 즉 곡률의 차이가 감소할수록 접촉면적은 증가하고 접촉압력은 감소하며, 접촉면 형상과 접촉하는 형태의 유사성은 증가한다. 형상이 일정한 유연공구가 자유곡면과 접촉할 때, 곡면의 형상에 따라 공형 또는 비공형 접촉이 발생할 수 있다. 유연공구는 가공물에 비해 강성이 매우 낮으므로 접촉면 형상은 가공물 표면 형상과 거의 동일하고, 접촉면적도 상대적으로 큰 편이다. 또한 공형 접촉의 해석방법을 비공형 접촉의 경우에 적용하여도 근사적으로 타당한 결과를 얻을 수 있다<sup>(2)</sup>. 따라서, 유연공구와 곡면의 접촉을 공형 접촉의 가정 하에서 해석한다.

유연공구와 가공면의 접촉영역에는 수직 표면력과 접선 표면력이 작용한다. 공구와 가공면의 간섭 및 상대운동에 의해 발생하는 마찰 및 경질입자 절삭작용의 해석은 매우 난해한 문제이다. 한편, 접선 표면력은 근사적으로 수직 표면력에 비례하므로<sup>(1)</sup>, 접선 표면력을 무시하고 접촉해석을 수행해도 본 해석의 목적에 부합되는 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 해석의 용이성을 감안하여 마찰 및 경질입자 절삭작용에 의해 생성되는 접선 표면력은 무시한다.

입의 형상을 갖는 두 탄성체 1과 2가 접촉압력만 작용하는 조건 하에서 공형 접촉하는 경우를 고려한다. 초기 접촉점을 원점으로 하고  $x-y$  평면이 공통 접평면과 일치하는 직교 좌표계를 설정한다. 초기 접촉점을 기준으로 두 물체를  $z$  축 방향으로  $\delta$  만큼 접근시켜 형성되는 접촉영역을  $n$

개의 부분영역으로 분할할 때 적용되는 이산화 접촉조건은 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} p_j = d_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{n_z^j} \int_{\Omega_j} (G_1 + G_2) d\Omega \quad (2)$$

$$d_i = [\delta - f(x_i, y_i)] n_z(x_i, y_i) \quad (3)$$

여기서,  $n_z$ 는 접촉면에 수직인 단위벡터의  $z$  축 성분,  $f$ 는 두 물체 사이의 초기간격,  $\Omega$ 는  $x-y$  평면에 투영된 접촉영역, 그리고  $p$ 는 접촉압력을 표시한다.

$G_k$ 는 접촉하는 물체  $k$  표면상의 점  $(x_p, y_p, z_p)$ 에 단위 수직 압축력이 작용할 때 점  $(x_i, y_i, z_i)$ 의 수직변위를 나타내는 영향 함수(influence function)이며, 본 해석에서는 아래의 함수를 사용한다.

$$G_i = \frac{(1-\nu^2)/\pi E}{\sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2 + (z_i-z_j)^2}} \quad (4)$$

식 (4)는 하중 작용점, 즉  $(x_j, y_j, z_j) = (x_p, y_p, z_p)$ 에서 특이성이 발생한다<sup>(3)</sup>. 따라서, 하중 작용점의 변위는 부분영역에 균일 압력이 작용하는 경우의 영향 함수<sup>(4)</sup>,

$$G_i = \frac{8(1-\nu^2)a \ln(1+\sqrt{2})}{\pi E} \quad (5)$$

를 사용하여 산출한다. 여기서  $a$ 는 정사각형 부분영역의 한 변의 길이를 나타낸다.

식 (1)을 이용한 접촉해석은 예상되는 접촉영역을 가정하고 수행한다. 두 물체가 간섭을 일으키지 않고 초기 접촉점을 기준으로  $\delta$  만큼 접근할 때 두 물체의 중첩 영역, 즉

$$f(x, y) = \delta \quad (6)$$

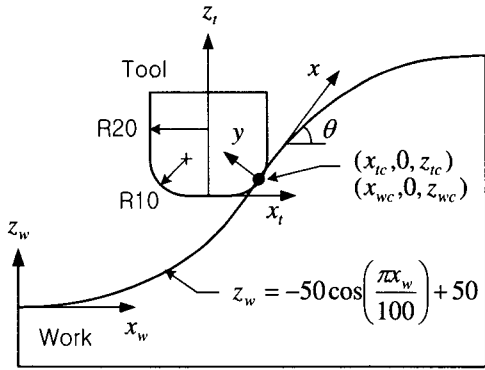


Fig. 1 Configuration of tool and work with pertinent nomenclature

를 만족하는 영역을 초기 접촉영역으로 가정하고 식 (1)에서 압력을 계산한다. 물리적으로 타당성이 없는 음의 압력이 발생하는 부분영역을 가정된 접촉영역에서 제외하고 압력 계산을 다시 수행한다. 접촉영역내의 모든 압력이 0 이상이 될 때 까지 반복하여 최종의 접촉영역과 압력을 산출한다.

### 2.2 유연공구와 곡면의 형상

전술한 접촉해석 알고리즘을 유연공구의 곡면 다듬질에 적용하기 위해서는 공구와 가공물의 형상을 초기 접촉점을 원점으로 하는 좌표계에서 함수로 표현해야 한다.

Fig. 1은 유연공구로 곡면을 다듬질하는 상황과 본 해석에서 사용된 직교 좌표계를 보여준다. 공구와 가공물에 고정된 좌표계를 각각  $x_i, y_i, z_i$ 와  $x_w, y_w, z_w$ , 그리고 원점을 초기 접촉점으로 하고  $x-y$  평면이 공통 접평면과 일치하는 좌표계를  $xyz$ 로 표시한다. 초기 접촉점의 좌표는 좌표계  $x_i, y_i, z_i$ 와  $x_w, y_w, z_w$ 에서 각각  $(x_{ic}, y_{ic}, z_{ic})$ 와  $(x_{wc}, y_{wc}, z_{wc})$ 이고,  $\theta$ 는  $x$  축과  $x_w$  축이 이루는 각도를 나타낸다. 공구와 가공면 형상은 좌표계  $x_i, y_i, z_i$ 와  $x_w, y_w, z_w$ 에서 아래와 같이 표현된다.

$$x_i^2 + y_i^2 \leq 10^2 \quad : \quad z_i = 0 \quad (7a)$$

$$x_i^2 + y_i^2 \leq \left( \sqrt{10^2 - (z_i - 10)^2} + 10 \right)^2 \quad : \quad 0 \leq z_i \leq 10 \quad (7b)$$

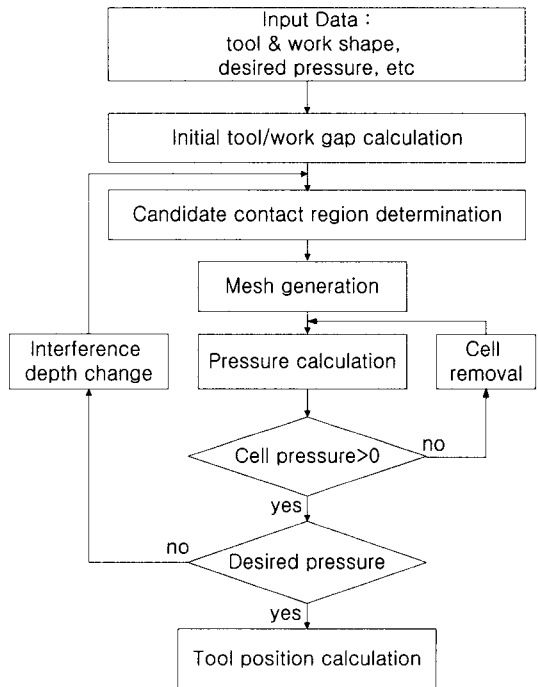


Fig. 2 Flowchart of contact analysis and tool path determination

$$x_i^2 + y_i^2 \leq 20^2 \quad : \quad z_i \geq 10 \quad (7c)$$

$$z_w = -50 \cos(\pi x_w / 100) + 50 \quad : \quad y_w = 0 \quad (8)$$

전술한 접촉해석 방법을 적용하기 위해 공구와 가공면 좌표계를 각각  $(x_{ic}, y_{ic}, z_{ic})$  및  $(x_{wc}, y_{wc}, z_{wc})$ 만큼 평행 이동한 후 각도  $\theta$ 만큼 회전시켜 공구와 가공면의 형상을  $xyz$  좌표계로 표현한다.

### 2.3 공구경로 생성 프로그램

유연공구는 경질입자 층의 마멸과 우레탄의 점소성 변형에 의해 절삭성능, 공구 형상 및 변형 능력이 변화할 수 있다. 유연공구의 내구성을 확인하기 위한 실험 결과<sup>(1)</sup>에 의하면, 새 유연공구는 공구 표면에 불안정하게 부착된 경질입자가 탈락하는 초기(약 5분 이내)를 제외하면 거의 일정한 다듬질 성능을 유지하고 다듬질 과정에서 발생하는 힘, 특히 수직 접촉력도 일정하게 유지된다. 즉, 일정 범위의 다듬질 조건에서는 심각한 공구 마멸

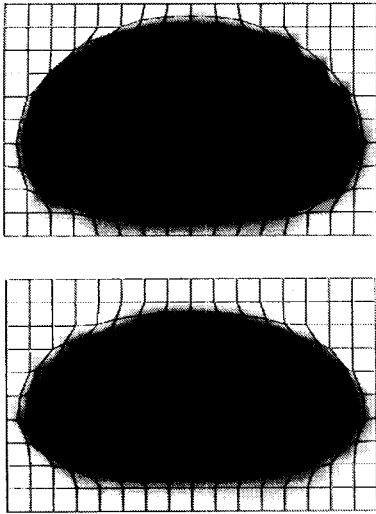


Fig. 3 Contact regions at  $x_w = 20\text{mm}$  (upper) and  $80\text{mm}$  (lower)

과 점소성 변형이 발생하지 않음을 의미하므로, 공구의 형상 및 특성이 일정하다는 가정 하에서 공구가 곡면을 따라 이동할 때 초기 접촉점에서 일정한 접촉압력을 발생시키는 공구경로를 산출하였다. Fig. 2는 공구경로 산출 프로그램의 순서도를 보여주며, 개략적 해석 과정은 아래와 같다.

- 다듬질을 수행할 지점, 즉 초기 접촉점에서 요구되는 압력을 포함한 정보를 입력한다.
- 공구/가공물의 초기 간격과 초기 간섭깊이를 근간으로 예상 접촉영역을 찾아내고, 그 영역을 다수의 부분영역으로 분할한다.
- 식 (1)-(3)을 이용하여 예상 접촉영역 내에서 발생하는 접촉압력을 계산한다.
- 음의 접촉압력이 발생하는 부분영역을 제거하여 접촉영역을 수정한 후, 접촉압력을 다시 계산한다. 모든 부분영역에서 양의 접촉압력이 발생할 때까지 반복한다.
- 초기 접촉점 압력과 요구되는 압력이 일치하는지 확인한다. 일치하지 않는 경우에는 간섭깊이를 조절하여 상기 과정을 반복하며, 일치하는 경우에는 간섭깊이와 초기 접촉점의 위치를 근간으로 공구의 위치를 산출한다.
- 가공면을 따라 초기 접촉점을 이동시키면서 상

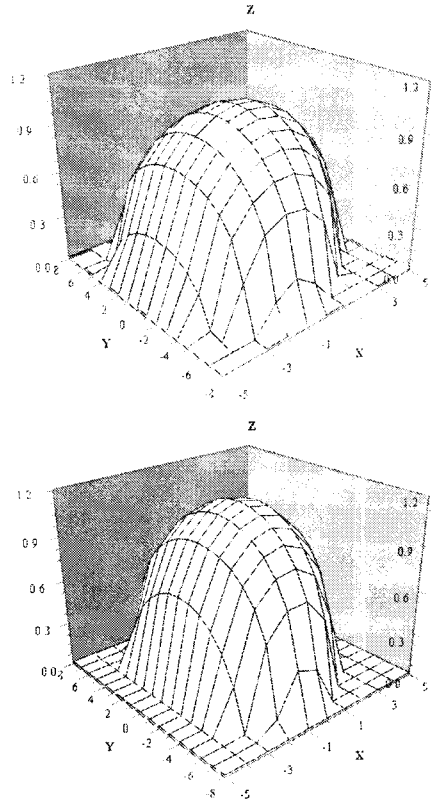


Fig. 4 Contact pressure profiles at  $x_w = 20\text{mm}$  (upper) and  $80\text{mm}$  (lower)

기 과정을 수행하여 공구경로를 산출한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 접촉해석

Fig. 3은 유연공구와 sine 곡면(수평길이와 높이 각각 100mm, Fig. 1)이 간섭깊이 2mm 조건으로  $x_w = 20$ 과 80mm에서 접촉할 때 발생하는 접촉영역을 보여준다. 정사각형 격자 한 변의 길이는 1mm이다. 접촉영역은 근사적으로 한쪽 단반경(공구 바닥과 인접한 방향)이 짧은 타원형상이며, 실험에서 측정된 접촉영역의 형상 및 크기와 유사하다. 비공형 접촉( $x_w=80\text{mm}$ )에 비해 공형 접촉( $x_w=20\text{mm}$ )에서 상대적으로 넓은 접촉영역이 발생한다. 이는 공형 접촉의 경우 가공면상의 한 지점이 공구와 상대적으로 오랜 시간 접촉함을 의미한다.

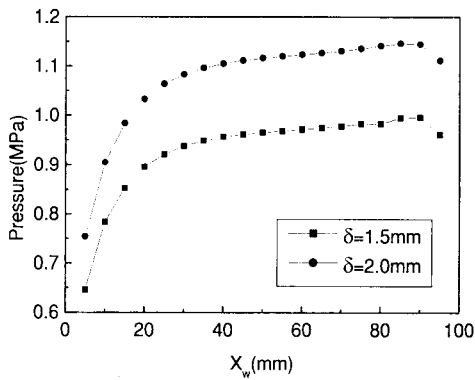


Fig. 5 Pressure at initial contact point

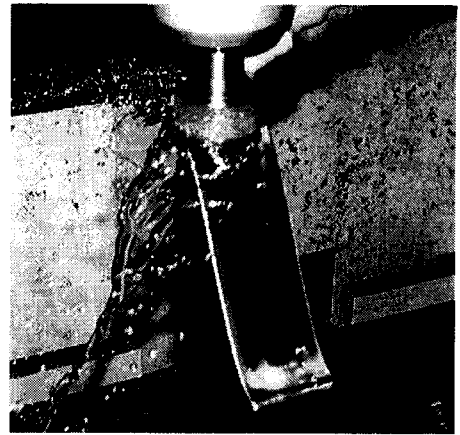


Fig. 7 Photograph of curved-surface finishing with flexible tool

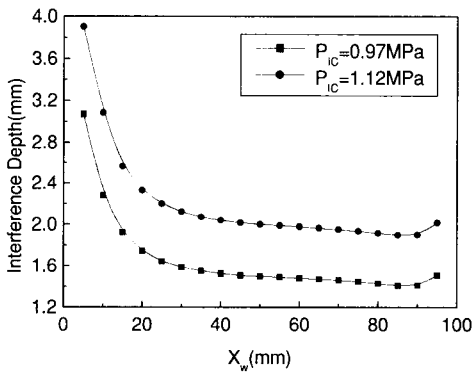


Fig. 6 Interference depth producing a constant contact pressure

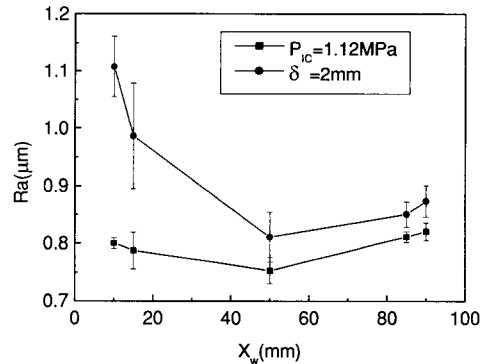


Fig. 8 Roughness of surfaces finished at constant contact pressure and constant interference depth

Fig. 4 는 Fig. 3 에 제시된 접촉영역 내의 압력 분포를 보여준다. 두 경우 모두 초기 접촉점에서 최대 압력이 발생하지만, 비공형 접촉에서 더 큰 최대 압력이 발생한다. 즉, 간섭깊이가 동일할 때 접촉영역의 크기와 최대 압력은 반비례함을 알 수 있다.

Fig. 5 는 일정 간섭깊이로 공구와 가공면이 접촉할 때 초기 접촉 위치에 따른 초기 접촉점 압력의 변화를 보여준다. 극히 낮은 압력이  $x_w < 20\text{mm}$  에서 발생하고,  $20\text{mm} < x_w < 90\text{mm}$  구간에서는 비교적 일정한 압력이 유지되며,  $x_w > 90\text{mm}$  에서는 압력이 다소 감소하는 경향을 나타낸다. 이 경향은 간섭깊이에 무관하게 나타난다. 접촉하는 두 물체의

곡률반경의 차이가 적을수록 낮은 압력이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 일정 간섭깊이로 다듬질한 면의 거칠기 차이는 주로 초기 접촉점 압력의 변화에서 기인함을 알 수 있다.

Fig. 6 은 공구가 가공면을 따라 이동하면서 일정한 초기 접촉점 압력을 발생시키는 간섭깊이를 보여준다. Fig. 6 은 Fig. 5 에서  $x_w = 50\text{mm}$  일 때 발생하는 압력을 기준으로 산출된 결과이다. Fig. 6 은 Fig. 5 와 반대 경향을 나타낸다. 특히, 일정 압력을 발생시키기 위해서는  $x_w < 20\text{mm}$  에서 상대적으로 큰 간섭깊이를 적용해야 함을 알 수 있다.

### 3.2 곡면 다듬질 실험

곡면 다듬질에서 초기 접촉점 압력을 일정하게 유지할 때와 간섭깊이를 일정하게 유지할 때의 차이를 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 실험은 볼엔드밀로 가공된 고풍금 공구장 STD-11의 sine 곡면(Fig. 1)을 유연공구로 다듬질한 후, 면의 거칠기를 측정하는 방법으로 수행하였다. 통일중공업 TNV-40A 3축 수직형 머시닝센터에서 볼엔드밀 가공 및 다듬질을 수행하였으며, Kosaka Lab. SE-3400 표면조도기로 거칠기를 측정하였다. 볼엔드밀 가공은 직경 100mm의 공구로 주축 분당 회전수 700rpm, 이송속도 350mm/min, 축방향 절삭깊이 1mm, pick-feed 1mm, 상향이송 조건에서 수행하였다. 볼엔드밀 가공면의 중심선 평균거칠기  $R_a$ 는  $8.21 \pm 2.24\mu\text{m}$ 이었다. 다듬질 실험은 입도 #120의 경질입자로 도포된 유연공구를 사용하였다. 일정 간섭깊이 다듬질은 간섭깊이 2mm를 사용하였으며, 일정 압력 다듬질은 Fig. 6에서 초기 접촉점 압력  $P_{ic} = 1.12\text{MPa}$ 을 발생시키는 공구경로로 수행하였다. 다듬질 속도, 이송속도, 공구 경로간 간격은 두 다듬질 실험에서 동일하게 33m/min, 60mm/min, 1mm를 사용하였다. Fig. 7은 볼엔드밀로 가공된 면을 유연공구로 다듬질하는 모습을 보여준다.

Fig. 8은 일정 압력과 일정 간섭깊이로 다듬질한 곡면의 특징적 지점에서 측정한 중심선 평균거칠기를 보여준다. 일정 간섭깊이의 경우에는 중심선 평균 거칠기가 큰 차이( $0.81\mu\text{m} < R_a < 1.11\mu\text{m}$ )를 나타내며, 일정 압력의 경우에는 상대적으로 미미한 차이( $0.75\mu\text{m} < R_a < 0.82\mu\text{m}$ )를 나타낸다. 또한 일정 압력의 경로를 사용하면 거칠기가 전반적으로 향상됨을 알 수 있다. 다듬질면의 동일 지점에서 측정된 거칠기의 표준편차도 일정 압력의 경로를 사용하면 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 일정 압력으로 다듬질하면 거칠기가 균일하면서 동시에 더 매끄러운 면을 생성할 수 있다.

### 4. 결론

유연공구를 이용한 곡면 다듬질에서 공구와 가공면의 접촉 해석을 수행하고, 초기 접촉점에서 일정한 압력을 발생시키는 공구경로를 산출하였다. 일정압력의 공구경로로 다듬질한 면의 거칠기를 측정하고, 일정 간섭깊이의 공구경로로 다듬질한

면의 거칠기와 비교하여 아래의 결론을 얻었다.

공구/가공물 간섭깊이가 일정할 때 공형 접촉에 비해 비공형 접촉에서 상대적으로 좁은 접촉영역과 큰 접촉압력이 발생하고, 비공형 접촉이 발생하는 면은 다듬질 후 상대적으로 거칠기가 우수한 면이 된다. 즉, 일정 간섭깊이를 유지하는 공구경로로 곡면을 다듬질하면 면의 거칠기는 위치에 따라 큰 차이를 나타낸다.

초기 접촉점 압력을 일정하게 유지하는 공구경로를 사용하면, 가공면 상의 모든 지점은 거의 유사한 접촉조건 하에서 다듬질 된다. 그 결과, 가공면 상의 모든 지점에서 거칠기가 유사한 면이 생성되고, 동시에 전반적인 거칠기도 향상된다. 따라서, 일정 접촉압력의 공구경로를 이용하면 효과적인 곡면 다듬질이 가능하다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구(981-1007-047-2) 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. 조성산, 유용균, 이승영, "곡면 다듬질용 유연공구 개발," 한국정밀공학회지, 17 권 7 호, pp. 141-146, 2000.
2. Paul, B., and Hashemi, J., "Contact Pressures on Closely Conforming Elastic Bodies," J. Applied Mechanics, Vol. 48, pp. 543-548, 1981.
3. Singh, K. P., and Paul, B., "Numerical Solution of Non-Hertzian Elastic Contact Problems," J. Applied Mechanics, Vol. 41, pp. 484-490, 1974.
4. Johnson, K. L., "Contact Mechanics," Cambridge University Press., pp. 53-55, 1989.