

# 수동연삭공정 자동화를 위한 유연성 디스크가공 모델링

유송민 · 김영진

경희대학교 기계 · 산업시스템공학부

## Modeling of flexible disk grinding process for automation of hand-grinding

Song-Min Yoo · Young-Jin Kim

A flexible disk grinding process model has been implemented with varying disk orientation with respect to workpiece surface along with variable feed rate. Before implementing arbitrary disk orientation and translation, disk angle and feed rate variation have been implemented. The disk angle was changed with constant angular velocity only in the entrance stage. The effect of the variable feed rate was added to the geometric schematic. The feed rate was changed either from the entrance stage or from the between edges stage and process performance was evaluated. Effect of changing both angle and feed rate has been also analyzed. Disk trend showing actual disk deflection has also been visualized.

### 1. 서론

연삭작업이 일반적으로 공작물의 정밀도를 최종적으로 완성시키는 것임에 반하여 디스크형 연삭공구를 이용한 연삭가공작업은 선박 및 자동차산업 분야에서 활발히 사용되는 가공작업으로 용접잔류물(bead)의 제거 또는 가공 후에 남는 버어(burr)의 제거를 위한 디버링작업용 및 대형공작물가공용으로 사용되어 왔다. 특히, 로봇의 종단부에 장착하여 연삭공구의 자유도를 증가시켜 여하한 형태의 공작물도 손쉽게 가공할 수 있도록 하는 연구가 MIT를 중심으로 시작되었으며, 특히 CSDL(Charles Stark Draper Laboratory)을 중심으로 가공 정보를 활용하는 로봇에 장착된 연삭기가 개발된 이후 이의 활용도가 더욱 넓어지게 되었다(Whitney and Tung, 1989; Kang *et al.*, 1993). 이러한 가공기기는 연삭입자가 입혀진 강성을 지닌 디스크형의 공구를 유연성을 갖는 지지대에 장착하여 공작물과 공구가 가공작업이 진행됨에 따라 지지대와 센서 사이에 마찰 스프링을 장착한 것과 같은 효과를 지니도록 하였다. 이 모델은 유연성(flexibility)에 의한 공구의 변형이 실제로 회전축선상에서 일어나는 경우에 국한되었다(Kurfess, 1988). 즉 이러한 모델에서는 주축부의 부착된 스프링에 의한 컴플라이언스(compliance) 효과가 고려되었으며 공구자체에 의한 효과는 고려되지 않았다. 이러한 모델은 공정변수의 실시간적인 예측 및 제어에 활용되었다(Jenkins and Kurfess, 1997; 1999). 개발된 모델은 종종

가공 중에 여러 가지 불확실하거나 고려되지 않은 인자들의 영향으로 인하여 정확히 공정을 예측하기 어렵게 하므로 가공 중에 공구의 위치를 정확하게 제어하기 위하여 일반적으로 절삭력이 측정되어 사용되었다(Jenkins and Kurfess, 1999; Elbestawi *et al.*, 1992; Bone *et al.*, 1991). 이외에도 Dornfeld and Erickson (1989)이 음향방출(AE; Acoustic Emission)신호를 소형 버어 제거 공정에 활용하거나 비전시스템에 의하여 측정된 버어의 재원을 위치제어에 활용하기도 하였다(Elbestawi *et al.*, 1992; Lee *et al.*, 1993).

일반적인 공정에 대한 해석연구로서 Chen and Tung(2000)은 로봇에 연삭공구를 장착한 후 알려지지 않은 공작물의 궤적을 일정한 절삭속도를 갖도록 추적하여 디버링작업을 수행하였다. 디버링작업 성과를 개선하기 위하여 인간의 작업모델이 도입되었으며 인간의 디버링작업 형태가 응용되어 활용되기도 하였다(Aertbelien and Brussel, 1999).

가공물의 형상을 개선시키기 위하여 가공 중에 공작물을 상하로 이동시키는 방법이 고려되었다(Yoo and Dornfeld, 1990a). 이 방식은 공작물을 상하로 이동시킬 수 있는 구간이 제한되기 때문에 허용 작업구간에서만 공작물의 이동이 가능하다. 가공면의 이해를 돕기 위한 3차원 모델도 개발되었다(Yoo and Dornfeld, 1990b). 가공작업에 의한 가공물은 말안장(saddle)의 형상을 지니며 실험에 의한 가공물이 레이저 측정장치를 이용하여 측정되어 재현되었다. 여러 가지의 형태로 공정인자의 정의, 분석 및 제어를 위한 연구가 수행되었으나 작업자가 수

행하는 작업의 조건을 구현시키기에는 부족하였다.

본 연구에서는 현장에서 수작업의 형태로까지 적용되는 다양한 디스크형 연삭가공작업의 운용법을 모사하기 위한 기초로서 디스크경사각 및 이송속도를 변화시켜 자동화에 응용될 수 있는 모델을 구성하고자 한다. 또한 그 모델의 성능을 평가하기 위하여 가공물의 형상추이를 분석하고자 한다.

## 2. 모델링

유연성디스크 연삭가공은 공구와 공작물이 이루는 경사각의 변화에 따라 가공이 진행되어 최종적인 가공물의 형상이 결정된다(그림 1>). 가공공정은 일반적으로 용접비드 및 가공잔류물과 같이 피절삭부의 두께가 얇은 경우 2차원모델로 해석이 가능하다.

현장에서 수작업으로 진행되는 작업의 형태는 <그림 2(a)>에서와 같이 디스크경사각을 일정하게 유지시킨 채 동일한 방향으로 진행시키는 작업에서부터 <그림 2(c)>와 같이 디스크경사각을 변화시키면서 디스크 중심의 궤적이 임의의 방향으로 진행되는 복잡한 작업으로 다양하다. 후자의 경우에는 디스크경사각, 이송속도 및 공작물과 공구간에 상대적인 거리의 변화를 모두 고려하여야 한다. 디스크경사각  $\alpha_0$ 의 변화추이는 작업 중에 인자들을 고려하여 다음과 같이 정의된다(그림 3>).

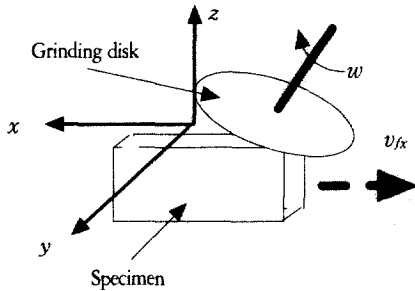


그림 1. 유연성디스크 연삭공정.

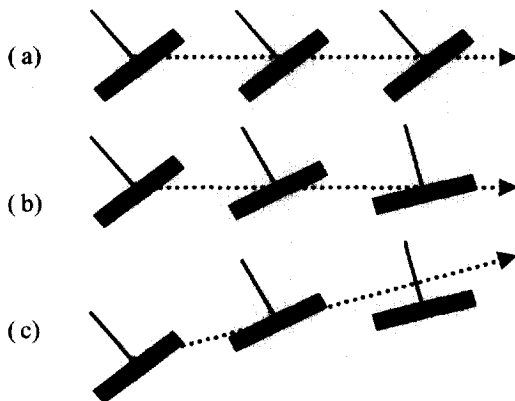


그림 2. 디스크 경로 및 배열의 변화도.

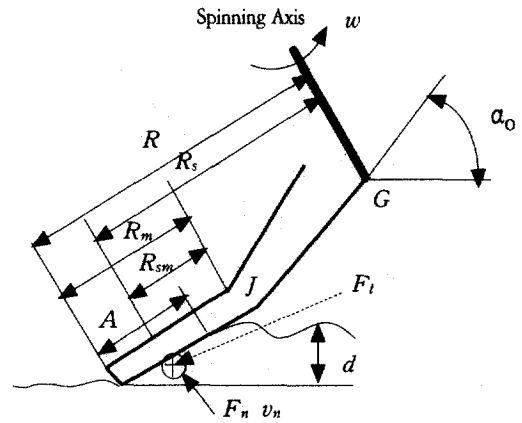


그림 3. 공정모델의 개략도.

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_{fx} \sin \alpha}{R_{sm}} + \frac{1}{area R_{sm}} [k_1 \omega \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) \frac{R_s}{R_{sm}} - k_2] \quad (1)$$

식 (1)에서 *area*는 (접촉길이 × 공작물폭)  $A \times b$ 이며,  $R_{sm}$ 과 같이 기하학적인 가공 단계에 따라 다르게 정의된다.

이러한 가공단계는 초기(그림 4>에서 디스크위치 1 → 디스크위치 2), 중기(디스크위치 2 → 디스크위치 3) 및 말기(디스크위치 3 → 디스크위치 4)의 3 단계로 구분된다.

가공공정 중에서 경사각을 변화시키고자 하는 것은 가공작업의 효율화를 기하기 위하여 더욱 효과적으로 가공작업을 제어할 수 있는 가능성을 부여하는 것을 의미하며 이러한 효과는 디스크의 회전중심에 대하여 디스크경사각을 변화시켜 공작물에 대한 경사각을 임의로 변경시킴으로써 얻어질 수 있다.

가공공정 중 디스크면에 작용하는 속도성분은 공작물의 이송, 디스크각도의 변화 및 가공작업에 의한 디스크의 변형에 따른 3가지 요소들에 의하여 결정된다. 이러한 속도의 평형관계식에 의하여 다음 기본식을 유도할 수 있다(그림 5>).

$$v_n = \dot{\alpha} R_{sm} + \dot{\alpha}_0 (R_s - R_{sm}) \cos(\alpha_0 - \alpha) + v_{fx} \sin \alpha \quad (2)$$

상기의 관계를 고려한 새로운 공정의 모델은 다음과 같다.

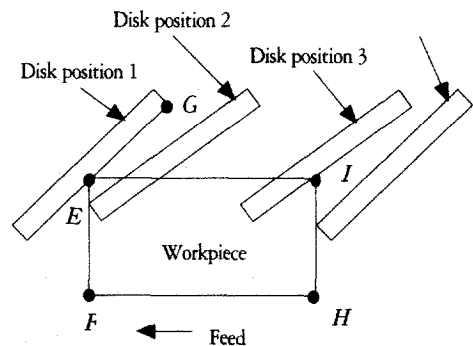


그림 4. 공정단계.

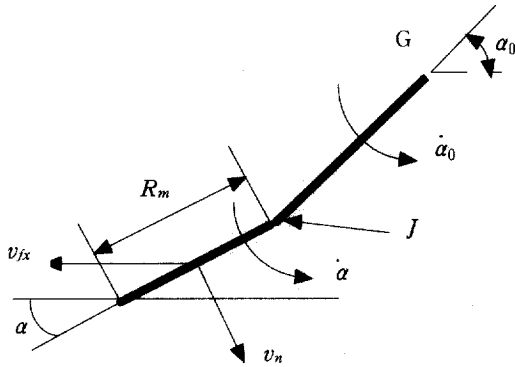


그림 5. 속도 평형도.

$$\alpha = -\frac{v_{fx} \sin \alpha}{R_{sm}} - \frac{\dot{\alpha}_0 (R_s - R_{sm}) \cos(\alpha_0 - \alpha)}{R_{sm}} + \frac{1}{area R_{sm}} \times [k_1 \omega \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) \frac{R_s}{R_{sm}} - k_2] \quad (3)$$

식(2)와 (3)에서 *area*, *R<sub>sm</sub>* 및 *R<sub>s</sub>*의 값은 3단계별로 정의되는 기하학적인 관계를 이용하여 구할 수 있으나 디스크경사각의 변화 및 이동작업으로 인하여 공작물표면과 수평방향으로 평행하게 이동하던 디스크의 변형중심(<그림 3>에서 *J*점)이 임의의 방향으로도 변화하게 되어 이를 보상하는 새로운 기하학적인 관계를 정립시켜야 할 필요성이 제기되었다.

### 3. 공정단계별 기하학적관계

#### 3.1 초기단계

전술한 바와 같이 공정이 시작하여 디스크의 끝지점이 공작물에 완전히 잠입될 시점까지를 초기단계로 정의하였으며, 디스크경사각의 변화가 있을 경우에 *area* 및 *R<sub>sm</sub>* 은 디스크변형점의 시간에 따른 이동을 고려하여야 한다(<그림 6>). 초기단계에서 *area* 및 *R<sub>sm</sub>* 값은 직사각형의 공작물의 경우를 고려하여 결정할 수 있으며 <그림 6>의 *CD* 값을 기준으로 구할 수 있다. 즉,

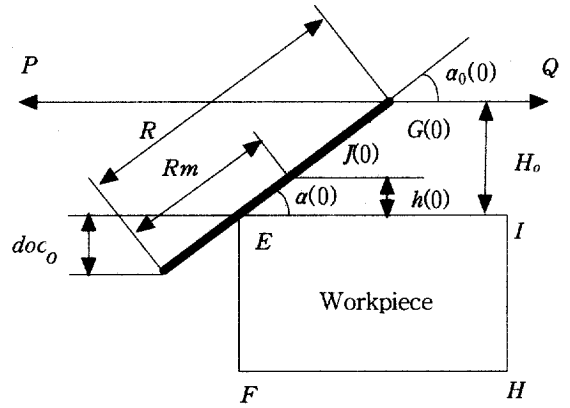
$$CD = \frac{H_0}{\tan \alpha_0(0)} + v_{fx} t \quad (4)$$

이때 *H<sub>0</sub>* 및 *h(t)*는 다음과 같다.

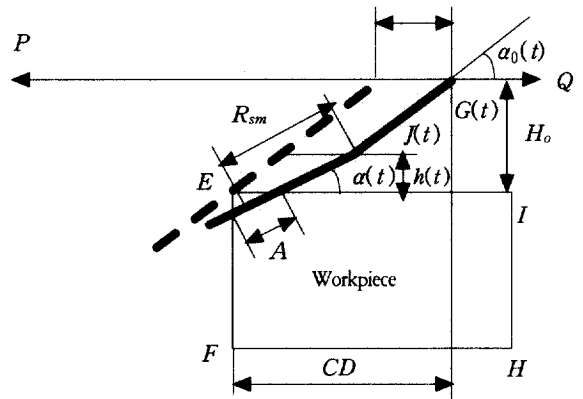
$$H_0 = R \sin \alpha_0(0) - doc_0 \quad (5)$$

$$h(t) = H_0 - (R - R_m) \sin \alpha_0(t) \quad (6)$$

상기식 및 <그림 6>의 기하학적인 관계를 고려할 경우 *A* 및 *R<sub>sm</sub>*은 각각 다음과 같다.



(a) 디스크 배열(t=0)



(b) 디스크 배열

그림 6. 초기단계의 구도.

$$A = \frac{CD}{\cos \alpha(t)} - \frac{h(t)}{\sin \alpha(t)} - (R - R_m) \frac{\cos \alpha_0(t)}{\cos \alpha(t)} \quad (7)$$

$$R_{sm} = \frac{h(t)}{\sin \alpha(t)} + \frac{A}{2} \quad (8)$$

#### 3.2 중기단계

중기단계에서는 디스크의 끝부분이 항상 공작물을 가공하고 있기 때문에 <그림 6>에서와 같이 좀더 간단한 기하학적인 관계로 표시될 수 있다.

$$A = R_m - \frac{h(t)}{\sin \alpha(t)} \quad (9)$$

$$R_{sm} = \frac{A}{2} + \frac{h(t)}{\sin \alpha(t)} = \frac{R_m}{2} + \frac{h(t)}{2 \sin \alpha(t)} \quad (10)$$

#### 3.3 말기단계

말기단계에서는 디스크가 공작물을 이탈하기 시작하며 공

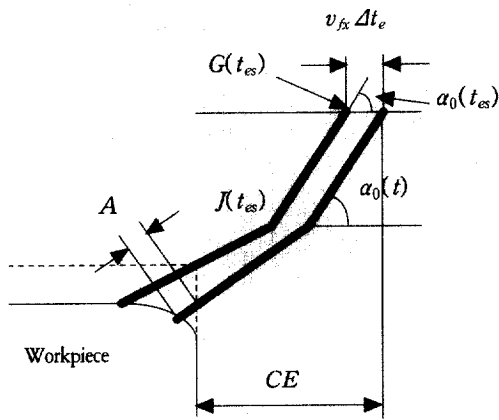


그림 7. 말기단계의 구도.

정을 종료시키는 작업단계이다(그림 7). 이 단계에서는 공작물의 종단면에서 디스크중심까지의 수평거리(그림 7)에서 CE부분)를 기준으로 A 및 R<sub>sm</sub>을 산출할 수 있다.

$$CE = \frac{h(t_{es})}{\tan \alpha(t_{es})} + (R - R_m) \cos \alpha_0(t_{es}) + v_{fx} \Delta t_e \quad (11)$$

이때 t<sub>es</sub> 및 Δt<sub>e</sub>는 각각 말기단계의 시작 시각 및 말기단계 경과시간을 나타낸다. <그림 7>에서 산출된 A 및 R<sub>sm</sub>은 다음과 같다.

$$A = R_m - \frac{CE}{\cos \alpha(t)} + (R - R_m) \frac{\cos \alpha_0(t)}{\cos \alpha(t)}$$

$$R_{sm} = R_m - \frac{A}{2} = \frac{R_m}{2} + \frac{CE}{2 \cos \alpha(t)} - (R - R_m) \frac{\cos \alpha_0(t)}{2 \cos \alpha(t)} \quad (12)$$

## 4. 가공조건의 변화

### 4.1 디스크경사각의 변화

<그림 2>와 같이 일반적인 디스크형 연삭가공에서 경사각은 작업자의 운용에 따라 가공물의 형상이 형성되기 이전 단계에서 임의로 변화시킨다는 가정으로 본 연구에서는 가공물의 형상에 가장 큰 영향을 미치는 초기단계에서 경사각을 변화시킨다. 중기 및 말기단계에서는 디스크와 공작물이 평형상태로 일정한 조건으로 작업이 진행되어 경사각을 일정하게 유지하는 것으로 가정한다. 디스크경사각은 디스크의 변형각속도( $\dot{\alpha}_0(t)$ )가 일정한 조건으로 변화되며 경사각의 초기조건으로 초기단계에서  $\alpha_0(0)$ 이다(그림 6(a)). 즉,

$$\alpha_0(t) = \alpha_0(0) + \dot{\alpha}(t) \times t \quad (13)$$

각속도의 수치로 0.6, 0.3, 0, -0.3 및 -0.6 (deg/sec)을 사용하였다.

### 4.2 이송속도의 변화

가공 중에 이송속도만을 변화시키는 것은 작업자가 수작업 중에 연삭기를 수평방향으로 운용하는 것(<그림 2(a)>)으로써 이를 여러 가지의 경우에 대하여 구현하기 위하여 이송속도의 변화가 초기단계에서 시작되는 것과 중기단계에서 시작되는 것의 2단계에 대하여 고찰한다. 후자의 경우에는 초기단계에서 이송속도를 일정하게 유지하다가 중기단계에 이르면 일정한 가속도로 이송속도를 변화시킨다. 두 가지의 경우 모두 변화하는 이송속도는 다음과 같이 표시된다.

$$v_{fx}(t) = v_{fx0} + a_c(t) \Delta t \quad (14)$$

단, a<sub>c</sub>는 가속도이며 2, 1, 0 및 -0.2(mm/sec<sup>2</sup>)이다.

## 5. 결과 및 고찰

제안된 모델 및 기하학적인 관계를 이용하여 가공결과를 실시 시험을 통하여 예측하였다. 시편은 가공효과를 극대화시킬 수 있는 목재(oak)로서 길이는 50.0 mm, 폭은 10 mm이며 기타 인자는 별도의 실험을 통하여 계속된 자료를 활용하였다. 연삭 공구는 3M사의 직경 90 mm 고무판 부착 디스크형을 채택하였다. 가공단계별 구분을 위하여 초기절삭깊이는 12 mm로 하였다.

### 5.1 경사각변화

가공중의 디스크경사각을 변화시키는 것은 공작물에 대한 연삭디스크의 작업조건을 변화시키는 것이다. <그림 8>은 여러 가지 각속도 변화에 따른 절삭깊이의 경향, 즉 가공물의 형상을 비교한 것으로 각속도는 시계방향으로 음의 값을 지닌다. 동일한 초기절삭깊이(<그림 6(a)>의 doc<sub>0</sub>)에 대한 결과를 나타낸 것으로 디스크경사각이 시계방향으로 변화하여 감소하는 경우( $\dot{\alpha}_0(t) < 0$ ) 중간단계에서 얻어지는 절삭깊이가 작아지며 경사각이 증가하는 경우( $\dot{\alpha}_0(t) > 0$ )에는 경사각의 변화

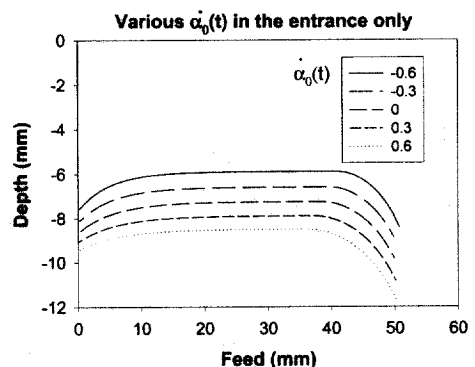


그림 8. 각속도 변화에 따른 절삭깊이.

가 없는 경우에 비하여 깊은 절삭깊이를 유지한다. 가공물의 형상을 결정하는 가공작업단계별 절삭깊이를 비교하면 초기 단계에서 경사각을 감소시키는 경우가 경사각을 증가시키는 경우에 비하여 초기단계와 중기단계에서의 절삭깊이의 차이가 크게 나타났다. 말기단계에서는 디스크경사각을 변화시키지 않으므로 후자의 경우에 중기와 말기단계의 절삭깊이의 차이가 큰 것을 알 수 있다.

<그림 9-11>은 경사각의 각속도변화에 따라 가공 중에 디스크가 변형되어 연속적으로 이동하는 형상을 나타내고 있다. 이때 디스크 중심(<그림 3>에서  $G$ )에서 디스크의 변형중심(<그림 3>의  $J$ )까지의 지점이 경사각의 변화특성에 따라 초기단계에서 변화하는 것을 알 수 있다.

<그림 9>에서와 같이  $GJ$ 가 시계방향으로 변화하는 경우 초기단계에서  $J$ 의 위치가 점점 상승하는 것을 알 수 있다. 반대의 경우에는 <그림 11>과 같이  $J$ 가 낮아졌으며 경사각이 일정한 경우에는 <그림 10>에서와 같이  $J$ 가 일정하게 유지되었다.

5.2 이송속도의 변화

<그림 12>는 디스크경사각의 변화없이 초기단계부터 시작

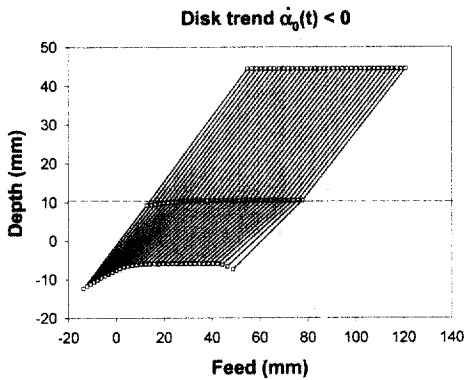


그림 9. 디스크변화도 ( $\dot{\alpha}_0(t) < 0$ ).

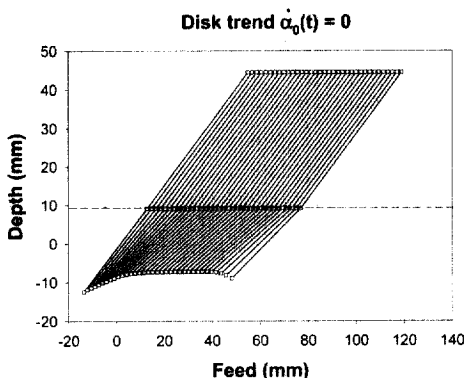


그림 10. 디스크변화도 ( $\dot{\alpha}_0(t) = 0$ ).

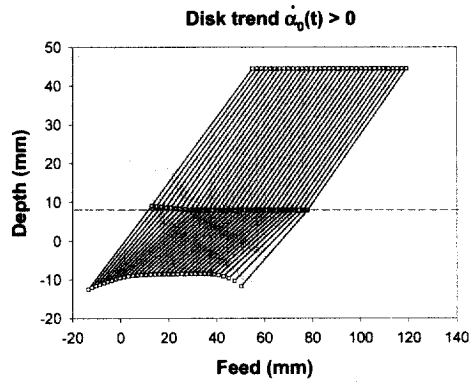


그림 11. 디스크변화도 ( $\dot{\alpha}_0(t) > 0$ ).

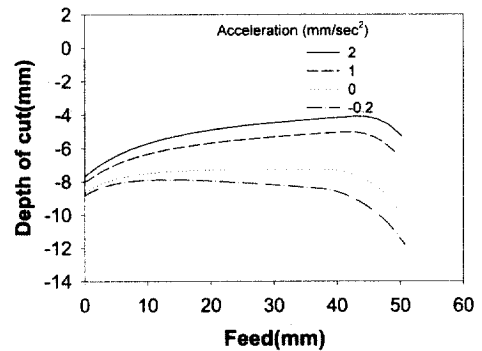


그림 12.  $v_{fx}$  초기변화시 절삭깊이.

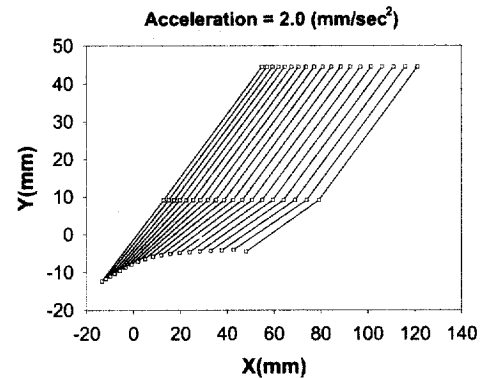


그림 13.  $v_{fx}$  초기변화시 디스크변화도.

하여 이송속도를 여러 가지 가속도에 따라 변화시킨 경우에 나타나는 절삭깊이의 경향을 표시하고 있다. 이송속도가 증가할수록 디스크가 더욱 변형되어 절삭깊이가 작아지며 이러한 이송속도의 변화가 작업이 시작하는 시점에서부터 적용되므로 시점에서부터 절삭깊이는 차이를 보이고 있다. 이송속도를 변화시키지 않는 경우, 즉 가속도가 '0'인 경우에는 중간지점에 일정한 절삭깊이를 유지하여 평면의 형상을 나타내고 있다. <그림 13>은 증가하는 이송속도에 따라 디스크 간에 간격이 점점 커지는 것을 잘 나타내고 있다.

수평방향 이송속도를 중기단계부터 변화시킨 결과를 보면,

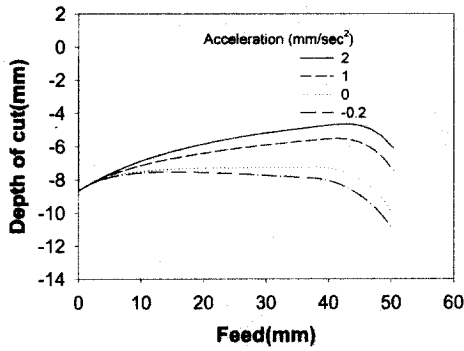


그림 14.  $v_{fx}$  증기변화시 절삭깊이.

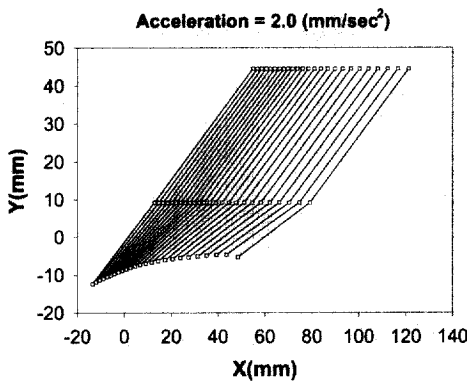


그림 15.  $v_{fx}$  증기변화시 디스크변화도.

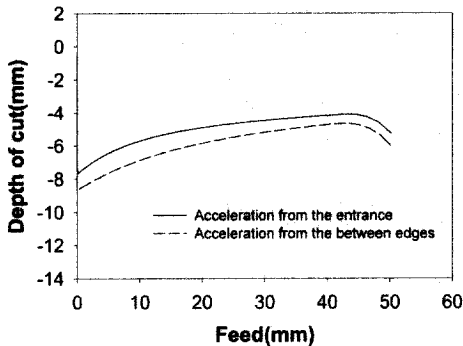


그림 16.  $v_{fx}$  변화시기별 절삭깊이.

<그림 14>에서 나타나는 바와 같이 절삭깊이가 증기단계라고 예상되는 지점까지 동일하게 유지되는 것을 알 수 있다. <그림 15>는 디스크 간에 간격이 <그림 13>과 다르게 증기단계에서부터 벌어지는 것을 알 수 있다.

이송속도의 변화시점에 따른 영향을 직접 비교하기 위하여 동일한 초기조건에 대하여 실시시험을 수행한 결과 <그림 16>과 같이 초기단계에서부터 이송속도를 증가시킨 경우에 절삭깊이가 작게 나타났다. 이는 빠른 이송속도로 인하여 절삭량이 작아서 절삭깊이가 작아진 결과이다.

### 5.3 디스크경사각 및 이송속도의 변화

독립적으로 변화시킨 디스크경사각과 이송속도의 복합적인 효과를 관찰하기 위하여 두 가지의 인자를 동시에 변화시키는 실시시험을 수행하였다. 이전 조건과 동일하게 디스크경사각은 초기단계에서만 변화시켰으며 이송속도는 초기단계 또는 증기단계에서 시작하여 변화시켰다. <그림 17>은 디스크경사각의 변화와 함께 이송속도를 초기단계부터 변화시킨 것으로서 디스크를 시계방향으로 회전시키기 때문에 ( $\dot{\alpha}_0(t) > 0$ ) <그림 12>와 비교하여 절삭깊이가 상대적으로 깊게 나타나는 것을 알 수 있다. <그림 18>은 동일한 경우에 디스크경사각의 변화율에 따른 절삭깊이의 경향을 비교하고 있다. 형상은 유사하나 절삭깊이는 시계방향으로 변화를 주는 경우가 깊게 나타나고 있어 예측되는 바와 같이 가공 중에 디스크의 시계방향으로 회전시키는 것은 절삭깊이를 증가시키는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 <그림 19>에서 디스크의 변형 및 이동경향을 통하여 확인할 수 있다. 즉 초기에 디스크 상부는 시계방향으로 회전하며 디스크 간에 간격은 커지는 것을 알 수 있다. <그림 20-22>는 이송속도를 증기단계부터 변화시키는 경우에 대한 결과로써 <그림 20>은 <그림 14>에 비하여 큰 절삭깊이를 나타내고 있다. <그림 22>에서

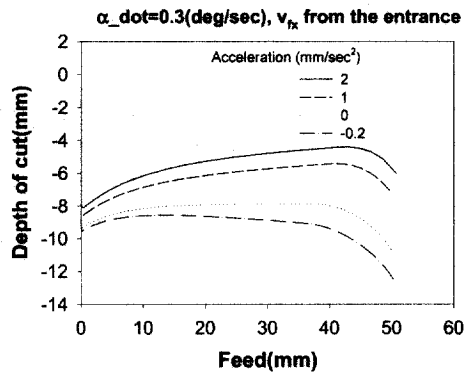


그림 17.  $v_{fx}$  별 절삭깊이 ( $\dot{\alpha}_0(t) > 0$ ).

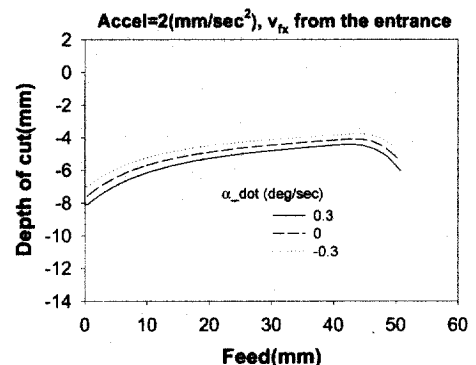


그림 18.  $\dot{\alpha}_0(t)$ 와  $v_{fx}$  별 절삭깊이.

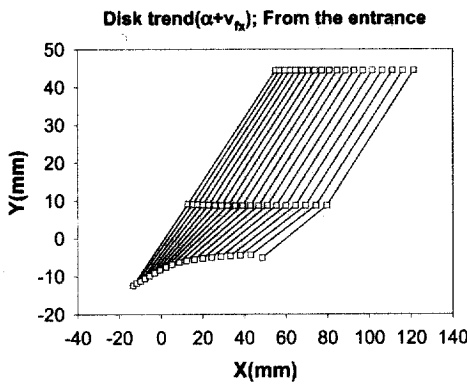


그림 19.  $\dot{\alpha}_0(t)$ 와  $v_{fx}$  별 디스크변화도.

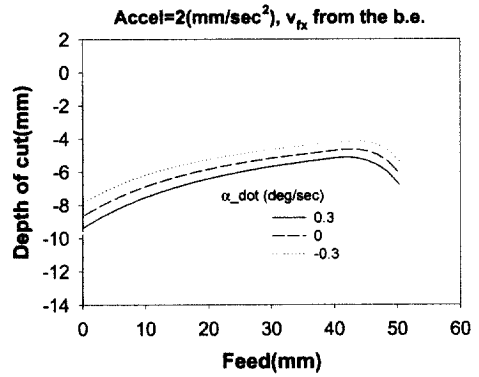


그림 21.  $\dot{\alpha}_0(t)$ 와  $v_{fx}$  별 절삭깊이.

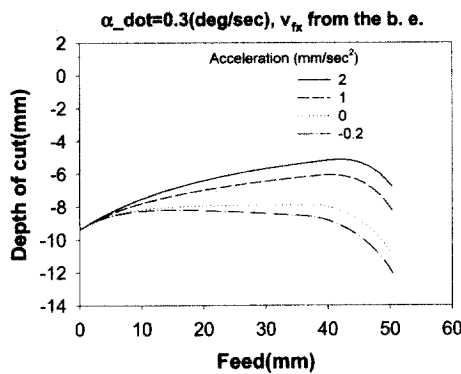


그림 20.  $v_{fx}$  별 절삭깊이 ( $\dot{\alpha}_0(t) > 0$ ).

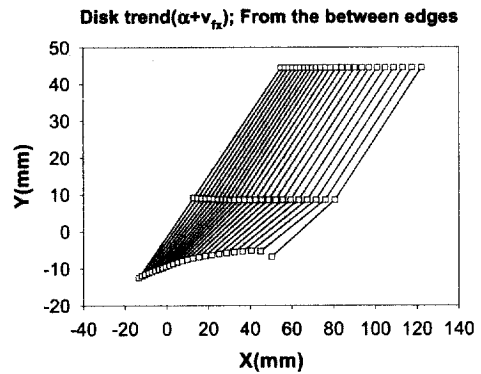


그림 22.  $\dot{\alpha}_0(t)$ 와  $v_{fx}$  별 디스크변화도.

처음 몇 구간에서는 디스크 간에 간격변화가 없어 이송속도가 증가단계에서부터 변화하고 있음을 나타내고 있으며, 초기단계에서 디스크경사각이 시계방향으로 회전함에 따라 디스크 중간부가 약간 아래로 이동하는 것을 알 수 있다.

### 6. 결론

유연성디스크를 이용한 연삭가공 중 디스크경사각의 변화를 이용한 가공물의 형상개선을 도모하기 위하여 특성방정식을 통한 기본 모델을 유도하였으며, 이를 토대로 가공단계별 새로운 기하학적인 관계를 정립하였다. 가공작업의 진행상태는 가공 중에 디스크의 변화 추이를 관찰함으로써 확인할 수 있었으며, 이를 토대로 가공물의 표면형상을 재현할 수 있다.

디스크경사각의 변화정도에 따른 가공 결과를 예측하였으며, 이를 토대로 적절한 경사각의 변화정도 및 방향을 예시하였다.

이송속도의 변화에 따른 절삭깊이의 변화추이를 비교하였으며, 가공속의 영향에 따라 결과를 정확히 예측할 수 있었다. 디스크경사각 및 이송속도의 변화를 통한 디스크의 운용에 따르는 종합적인 가공물의 형상을 예측할 수 있었다.

일반적으로 디스크의 시계방향으로의 회전은 절삭깊이를

증가시켰으며 반시계방향으로의 회전은 이를 감소시키는 것으로 확인되었다. 경사각 및 이송속도를 동시에 변화시키는 경우, 서로의 효과를 상쇄시키도록 조합하면 평면에 가까운 형상이 예상되며 각각의 효과를 극대화시킬 경우에는 곡면의 형상으로 나타나므로 작업목적에 따라 이들의 효과를 적절히 배합하여 가공조건을 선정하여야 할 것이다.

### 참고문헌

Aertbelien, E. and Brussel, H. V. (1999), An Observation Model and Segmentation Algorithm for Skill Acquisition of a Deburring Task, *Proc. of the 1999 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intell. Mechatronics*, 635-640.

Bone, G. M., Elbestawi, M. A., Lingarkar, R. and Liu, L. (1991), Force Control for Robotic Deburring, *Trans. of ASME, J. of Dynamic, System, Measurement and Control*, 113, 395-400.

Chen, S. and Tung, P. (2000), Trajectory Planning for Automated Robotic Deburring on an Unknown Contour, *Int. J. of Machine Tool & Manufact.*, 40, 957-978.

Dornfeld, D. A. and Erickson, E. (1989), Robotic Deburring with Real Time Acoustic Emission Feedback Control, *PEd-Vol. 38, ASME*.

Elbestawi, M. A., Bone, G. M. and Tam, P. W. (1992), An Automated Planning, Control, and Inspection System for Robotic Deburring, *Annals of the CIRP*, 397-401.

- Jenkins, H. E. and Kurfess, T. R. (1999), Adaptive Pole-zero Cancellation in Grinding Force Control, *IEEE Trans. on Control System Tech.*, 7(3), 363-370.
- Jenkins, H. E., Kurfess, T. R. and Ludwick, S. J. (1997), Determination of Dynamic Grinding Model, *Trans. of ASME, J. of Dynamic, System, Measurement and Control*, 119, 289-293.
- Kang, H. S., Lee, W. H. and Park, J. O. (1993), Grinding Robot system for Car Brazing Bead, *Proceedings of '93 KACC Conference*, 160-163.
- Kurfess, T. (1988), Verification of Dynamic Grinding Model, *Trans. of ASME, J. of Dynamic, System, Measurement and Control*, 110(4), 403-409.
- Lee, K., Huang, H. and Lu, S. (1993), Burr Detection by using Vision Image, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 8, 275-284.
- Whitney, D. E. and Tung, E. D. (1989), Robot Grinding and Finishing of Cast Iron Stamping Dies, *Proceedings of the 1989 ASME WAM, S.F.*, 131-151.
- Yoo, S. M. and Dornfeld, D. A. (1990), Computer Simulation of Flexible Disk Grinding Process: Flat Surface Control using Variable Vertical Feed Speed, *Symposium on Monitoring and Control for Manufacturing Processes, 1990 ASME Winter Annual Meeting, Dallas, TX, November 25-30.*
- Yoo, S. M. and Dornfeld, D. A. (1990), Three-Dimensional Modeling of the Flexible Disk Grinding Process, *1990 ASME Winter Annual Meeting, Dallas, TX, November 25-30.*