

본 연구논문은 '94년도 교육부 기계공학분야 연구지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

유연성 디스크 정밀연삭 가공중 평면가공에 관한 연구

유 송 민*

A Study on the Flat Surface Generation Using Flexible Disk Grinding

Song Min Yoo*

ABSTRACT

In this study, a flexible disk grinding process is applied in order to produce high precision product. A new model was developed considering feed motion along horizontal and vertical direction. Different types of feed speed variation was tested with respect to distinct process stages in order to achieve flat surface. It was observed that highest order polynomial form for both horizontal and vertical feed speed variation among the proposed categories produced surface close to flat one. Disk deflection trend during the process was visualized confirming the proposed scheme. Cutting force and VRR(volume removal rate) was observed as an aid to process planning.

Key Words : Flexible disk (유연성 디스크), Horizontal feed (수평이송), Vertical feed (수직이송), Process stages (가공 단계), Deflection (변형), Flat surface (평면)

1. 서 론

최근에 고조된 생산기술에 대한 관심은 자동화 기술을 선두로 이와 관련이 있는 로봇, 컴퓨터 및 제어 요소에 관한 기술개발로 집약되고 있다. 생산기술의 근본인 가공기술에 대한 관심도도 따라서 증가되고 있으며 이로 인한 결과로 FMS(flexible manufacturing system), CAM(computer aided manufacturing), CAPP(computer aided process planning) 및 CIM(computer integrated manufacturing)등 생산성, 가공정밀도 및

가공능률을 향상시키고자 하는 노력이 점차로 증대되고 있다. 따라서 이러한 가공기술중 마무리 작업(finishing process)으로서 큰 비중을 차지하는 연삭가공 등의 중요성도 부각되고 있다. 그러나 대부분의 연삭작업이 아직 근대적인 방식으로 숙련자의 경험에 의지하는 등 작업 의존도가 크며 자동화가 이루어지지 않고 있는 비능률적인 작업이라는 오명을 벗어나고 있지 못하는 실정이다⁽¹⁾. 또한 연삭가공은 숙련자에 의존하더라도 동일한 제품에 대한 균질의 가공 효과(정밀도, 정확도 등)를 기대하기가 어렵기 때문에 어떠한 형태라도 가공물의 균질성(con-

* 경희대학교 공과대학 기계공학과

sistency)을 보장하기 위한 공정의 자동화가 더욱 시급하게 이루어져야 하는 실정이다. 극단적인 경우에는 동일한 규격의 타사 제품의 공구를 사용할 때 동일한 작업 결과를 기대하기 어려운 경우도 있다. 이러한 문제의 근본적인 해결책은 연삭공정에 영향을 미치는 가공 작업 요소를 정의하고 이러한 입력 요소에 대한 출력 결과인 가공물의 품질간에 상관관계를 파악하여 동일한 작업을 수행할 때는 항상 동일한 작업 조건이 자동적으로 선정될 수 있도록 하는 것이 가장 시급한 일로 지적되고 있다.

연삭가공에 대한 연구는 일반적으로 숙련자에 의존하던 작업을 컴퓨터의 발전과 더불어 자료화하여 비숙련자가 작업을 진행시켜도 동일한 결과를 얻고자 하는 취지에서 진행되어 왔다. 초기의 연삭작업에 영향을 미치는 인자에 관한 연구로는 슷들의 회전속도, 절삭저항, 연삭량 및 이송속도 등의 요소들이 가공물의 형성에 영향을 미치는 현상을 규명하는 방향으로 진행되었다^(2,3,4). 이때에 진행된 연구는 대체적으로 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 이송속도 및 절삭깊이와 절삭저항 및 절삭량과의 관계⁽⁵⁾,
- 2) 디스크의 회전속도, 이송속도 및 절삭깊이 와 절삭저항 및 표면거칠기와의 관계^(2,6,7)
- 3) 디스크의 마모와 절삭력^(8,9), 절삭량⁽¹⁰⁾ 및 표면거칠기^(11,12)와의 관계
- 4) 절삭동력⁽¹³⁾
- 5) 절삭온도⁽¹⁴⁾

일반적으로 연삭가공이 공작물의 최종 가공 작업으로 가공면의 정밀도를 향상시키는 목적으로 사용되는 것에 반하여 유연성 디스크를 이용한 연삭가공작업은 선박 및 자동차산업 분야에서 활발히 사용되는 가공작업으로 용접잔류물(bead)의 제거 또는 가공 후에 남은 가공잔류물(burr)의 제거용 및 대형의 공작물 가공용으로 사용되어 왔다. 특히 robot의 end-effector에 장착하여 연삭공구의 자유도(degree of freedom)를 증가시켜 여하한 형태의 공작물도 손쉽게 가공할 수 있도록 하는 연구가 MIT를 중심으로 시작되었으며 특히 CSDL(charles stark draper laboratory)를 중심으로 절삭저항 및 영상 인식 신호에 의한 정보를 활용하는 로봇에 장착된 연삭기가 개발된 이후 이의 활용도가 더욱 넓어지게 되었다⁽¹⁵⁾. 이러한 가공기기는 연삭입자가 입혀진 디스크형(coated abrasive disk)의 공구를 유연성을 갖는 지지대에 장착하여 공작물과 공구가 가공작업이 진행됨에 따라 지지대와 센서 사이에 마치 스프링을 장착한 것과 같은 효과를 지니도록 하였다. White는 추가적으로 이러한 기기에 적

용될 수 있는 기본적인 모델을 개발하였으며 이를 토대로 실제 가공된 가공물의 표면거칠기를 가공물 후반부에 장착된 LVDT(linear variational displacement trans-former)를 이용하여 측정후 검증하였다. 이 모델은 유연성효과(compliance)에 의한 공구의 변형이 실제로 회전축선상에서 일어난 연삭기계의 경우에 국한되었기 때문에 추후 개발된 다른 유형의 compliance효과를 이용한 연삭기에는 적용되지 않는다. 또한 로봇을 이용한 연삭기는 제작비가 많이 소요되기 때문에 실제로 가공작업비를 높게 책정하여야 한다는 단점을 지니고 있다. 또 다른 형태의 유연성 디스크 연삭가공 방식은 연삭입자가 입혀진 직포 또는 종이를 고무디스크에 부착시켜 디스크상에서의 변형 작용에 의한 가공 작업이 진행되도록 한 것이다. 실제로 후자의 경우는 간단한 수작업연삭에 많이 활용되고 있다. 이러한 디스크 변형형 유연성 연삭작업에 대하여 가공중의 변형 지점을 고려한 동력학적인 모델이 개발되었으며 이의 타당성 또한 가공물의 표면형상을 실험결과와 비교하여 입증되었다⁽¹⁶⁾.

본 연구는 유연성을 지닌 디스크를 이용한 연삭공정을 이해하기 위한 자료를 축적하며 이를 자동화 공정을 포함한 평면에 가까운 면을 형성하기 위한 가공에 활용할 수 있는 방안을 모색하는 것을 목표로 하고 있다. 수작업에 의존하는 전형적인 연삭작업을 개선하고 자동화시키기 위한 방안에 우선적으로 소요되는 것은 제반 작업 요소간의 상관관계를 자료화시키는 것인데 일단 이러한 작업이 완료되면 축적된 자료가 차기 작업 시에 이정표로서 사용될 수 있기 때문에 그만큼 이의 활용도는 지대하다고 할 것이다. 또한 작업조건 및 경사각과 가공물의 형상 및 정밀도간의 상관관계에 관한 자료들은 연삭가공 전에 설정되는 기계장치의 setup을 최적화된 영역내에서 선정할 수 있도록 조정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 또한 수평 및 수직 방향으로의 동시 이송을 통한 경사각을 변화시키는 평면 가공 기법은 가공 경로를 설정하는 컴퓨터 수치 제어(CNC: computer numerical control)용도 등의 기본적인 제어방식으로 사용될 수 있으며 또한 공구를 이송시키는 이송테이블이나 공구를 조정하는 로봇의 경로 설정에 활용될 수 있다.

2. 공정 모델

2.1 특성 방정식

유연성 디스크 연삭가공은 공구와 공작물이 이루는 경

사각의 변화에 따라 가공이 진행되어 최종적인 완성품의 형상이 결정된다. 이러한 형상을 결정하는 경사각의 변화 추이는 기존의 특성 방정식에 의하여 다음과 같이 정의된다 (Fig. 1)⁽¹⁶⁾.

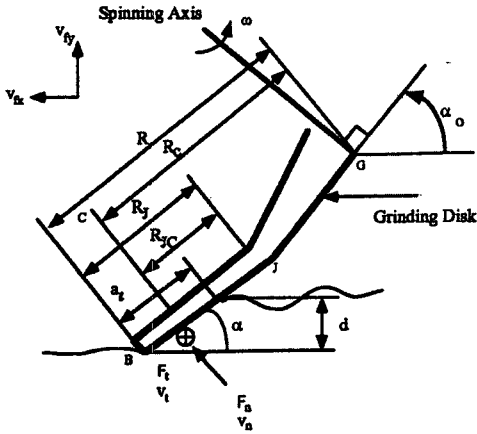


Fig. 1 Process Schematic Diagram

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

이때

- α_0 : 초기 경사각
- α : 디스크의 변형각 (현재의 경사각)
- $\dot{\alpha}$: 변형각의 시간당 변화율
- μ : 마찰계수
- K_s : 회전 스프링 상수
- R_C : 디스크의 중심으로부터 접촉면 중심까지의 거리
- R_{JC} : 디스크의 변형 중심으로부터 접촉면 중심까지의 거리
- v_{fx} : 수평방향 이송속도
- ω : 디스크의 회전속도
- R : 디스크 반경
- a : 디스크와 공작물간의 접촉부 면적
- a_t : 디스크와 공작물간의 접촉부 길이
- F_t : 디스크의 공작물 접촉면에 접선방향 저항성분
- F_n : 디스크의 공작물 접촉면에 수직방향 저항성분
- v_t : 디스크의 공작물 접촉면에 접선방향으로의 연삭 속도성분
- v_n : 디스크의 공작물 접촉면에 수직방향으로의 연삭 속도성분

상기의 관계식중 가장 중요한 인자인 a 및 R_{JC} 의 값은 경사각의 존재로 인하여 정의되는 기하학적인 가공 단계에 따라 다르게 정의된다. 이러한 가공 단계는 초기 (Fig.2 에서 디스크 위치 1 → 디스크위치 2), 중기(디스

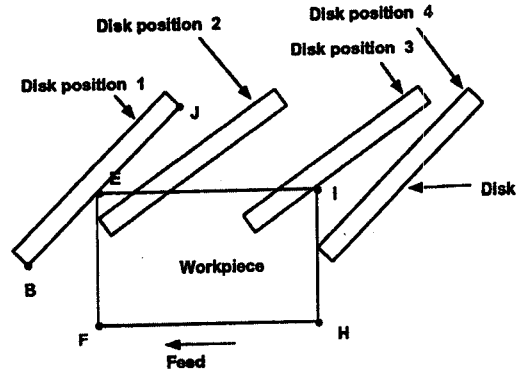


Fig. 2 Process Stages

크위치 2 → 디스크위치 3) 및 말기(디스크위치 3 → 디스크위치 4)의 3 단계로 구분된다.

유연성디스크를 공구로 사용하는 연삭가공의 특성방정식은 상기에 표기된 바와 같이 제기되어 있으나 공작물을 장착한 테이블 운전시 수평 및 수직방향의 이송속도를 조절할 경우 기존의 특성방정식 및 기하학적인 관계는 적용되지 않기 때문에 새로운 관계식을 필요로 하게 된다. 이러한 경우에 디스크에 적용되는 각각의 속도간의 평형관계는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$v_n = v_{fx} \sin \alpha + v_{fy} \cos \alpha + \dot{\alpha} R_{JC} \quad (2)$$

이러한 새로운 관계식을 고려할 때 전체적인 시스템의 특성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_{fx} \sin \alpha + v_{fy} \cos \alpha}{R_{JC}} + \frac{1}{a R_{JC}} [k_1 \omega \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) - k_2] \quad (3)$$

2.2 공정단계

앞에서 언급한 바와 같이 가공의 단계는 초기, 중기 및 말기의 3단계로 구분되며 상기의 특성방정식에서 요구되는 변수 a 및 R_{JC} 의 값의 변화는 이러한 단계에 따라 달라지게 된다. 이는 디스크 및 공작물간에 접촉면적이 변화하며 따라서 디스크의 변형중심에서 접촉면중심까지의

거리가 달라지기 때문이다. 그러므로 이를 단계별로 구분하여 정의하고 이들과 공정변수간의 관계를 설정하여야 한다.

2.2.1 초기단계

초기단계에서는 디스크가 작업시작 후부터 공작물과 접촉을 시작하여 디스크의 끝부분이 완전히 잠입되기까지의 시점으로 Fig. 3에서와 같은 관계를 도식할 수 있다. 기하학적인 관계를 나타내는 a 및 R_{JC} 의 관계식은 다음과 같다.

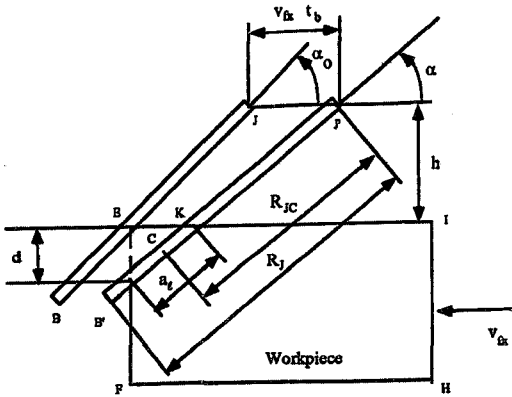


Fig. 3 Entrance Stage Geometry

$$a = a_1 b = \frac{\overline{EK}}{\cos \alpha} b = \frac{b}{\cos \alpha} (\overline{EM} - \overline{KM})$$

$$= \frac{b}{\cos \alpha} \left(\frac{h}{\tan \alpha_0} + v_{fx} t_b - \frac{h}{\tan \alpha} \right) \quad (4)$$

$$R_{JC} = \frac{a_1}{2} + \overline{KJ} = \frac{a}{2b} + \frac{h}{\sin \alpha}$$

이때 b 및 t_b 는 각각 절삭폭 및 작업시작 후 초기 단계의 경과 시간을 나타낸다.

2.2.2 중기 단계

중기 단계는 디스크의 끝부분이 완전히 공작물에 잠입되어 공정이 진행되며 이후 디스크가 공작물을 벗어나기 시작하는 지점 (Fig. 2에서 I점을 디스크의 일부가 지나가는 시점)까지로 정의된다. 이 단계에서는 디스크의 변형상태가 일정하게 유지되는 정상상태 작업에 도달한다 (Fig. 4). 이때 a 및 R_{JC} 는 다음과 같다.

$$a = b \left(R_J - \frac{h}{\sin \alpha} \right) \quad (5)$$

$$R_{JC} = \overline{JK} + \frac{1}{2} a_1 = \overline{JK} + \frac{\overline{BK}}{2}$$

$$= \frac{1}{2} \left(R_J - \frac{h}{\sin \alpha} \right) + \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{1}{2} \left(R_J + \frac{h}{\sin \alpha} \right)$$

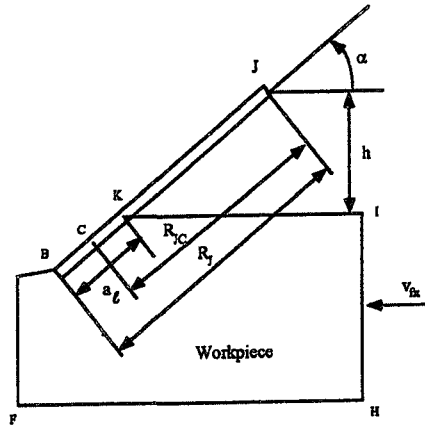


Fig. 4 Middle Stage Geometry

이때 연삭깊이 d 와 h 는 다음과 같은 관계를 나타낸다.

$$d = R_J \sin \alpha - h \quad (6)$$

2.2.3 말기 단계

최종 단계인 말기 단계에서는 디스크가 벗어나기 시작하는 중기 단계 이후부터 작업 종료 시점까지를 나타낸다 (Fig. 2). 이때 a 및 R_{JC} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Fig. 5).

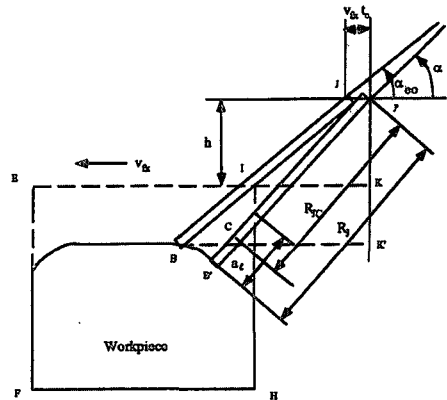


Fig. 5 Exit Stage Geometry

$$a = a_1 b = \frac{(\overline{B'K'} - \overline{IK})b}{\cos \alpha} = [R_J - \frac{b}{\cos \alpha} (\frac{h}{\tan \alpha_{e0}} + v_{fx} t_e)] b$$

$$R_{JC} = R_J - \frac{a_1}{2} \tag{7}$$

$$= \frac{1}{2} [R_J + \frac{1}{\cos \alpha} (\frac{h}{\tan \alpha_{e0}} + v_{fx} t_e)]$$

이때 α_{e0} 및 t_e 는 각각 말기 단계 시작점에서의 경사각 및 말기 단계 이후 경과 시간을 나타낸다. 상기 3단계에서 시간에 따른 수직 방향으로의 변위 $h(t)$ 는 공통적으로 수직 방향으로의 이송 속도 v_{fy} 에 의하여 변화되는데 이들의 관계는 다음의 식으로 표현된다.

$$h(t) = h_0 - \int_0^t v_{fy}(\tau) d\tau \tag{8}$$

상기의 식을 이용하여 수평 및 수직 이송 속도를 변화시켜 적절한 가공 면의 형상을 얻을 수 있다.

3. 이송 속도의 변화

본 연구에서는 개발된 모델을 토대로 수평 및 수직 방향으로의 이송 속도를 변화시켜 평면에 가까운 형상을 얻기 위하여 단계별로 적절한 형태로 변화를 시도하였다. 수평 및 수직 방향으로의 이송 속도는 일반적인 함수의 형태로 다음과 같이 변화하는 것으로 가정하였다. 즉

$$v_{fx}(t) = v_{fx}(t_0) + c_1 t^m \tag{9}$$

$$v_{fy}(t) = v_{fy}(t_0) + c_2 t^n$$

이때 m 및 n 은 각각의 차수를 나타내며 c_1 및 c_2 는 상수를 표시한다. 즉 m 과 n 으로 나타나는 차수에 따라 이송 속도는 상수 ($m, n = 0$)에서 2차함수 ($m, n = 2$)까지 변화된다. 단계별 수평 및 수직 방향으로의 이송 속도 변화 및 설정 기준은 다음과 같다.

수평 이송 속도: 수평 이송 속도는 초기 단계에서는 공작물을 일정한 속도로 이송시키며 속도를 점점 감소시킨다. 이때의 감속 비율은 Eq. (9)에서 설정된 차수에 따라 지정된다. 초기 단계에서 감속을 위한 차수는 $m=0$ 의 경우에서 출발하여 n 과 조합하여 변화시키며 평면형상이 얻어지는 충분히 큰 차수에 이를 때까지 m 을 증가시킨다. 중기 단계에서는 수평 방향으로의 이송 속도의 변화

가 없도록 설정한다. 즉 $v_{fx} = constant$. 말기 단계에서는 다시 이송 속도를 증가시킨다.

수직 이송 속도: 수직 이송 속도는 처음에 공작물이 고정된 테이블이 일정한 속도로 상승하면서 초기 단계부터는 Eq. (9)에서 지정된 일정 비율에 따라 감소되어 중기 단계부터는 수직 방향으로의 이송이 없도록 ($v_{fx} = 0$)한다. 동일한 방식으로 n 을 증가시킨다. 말기 단계에서는 서서히 수직 이송 속도를 증가시킨다.

중기 단계에서 가공작업에 의한 표면 형상이 정상 상태에 이르므로 말기 단계에서의 수직 및 수평 방향으로의 이송 속도를 변화시키는 비율은 초기 단계에서 설정된 m 및 n 의 값과는 관계없이 별도로 선정할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 가공 공정 분석

유연성 디스크를 활용한 공정 분석을 위한 여러 가지의 가공 조건을 선정하여 공정 중에 나타나는 인자를 관찰, 분석 및 자료화하며 이를 평면가공에 활용시키는 방안을 모색하였다. 작업 조건으로 고려되는 가공변수 중 디스크 경사각, 연삭깊이 및 디스크의 종류 (grit size)를 선정하여 연삭저항 및 연삭광과의 관계를 기록하였다. Fig. 6은 디스크의 초기 경사각의 변화에 따른 연삭저항값의 변화 경향을 나타낸다. Table 1은 연삭공구의 grit size에 따른 연삭율을 나타내며 Table 2는 연삭깊이에 따른 최대 연삭저항 (F_t)의 경향을 표시한다.

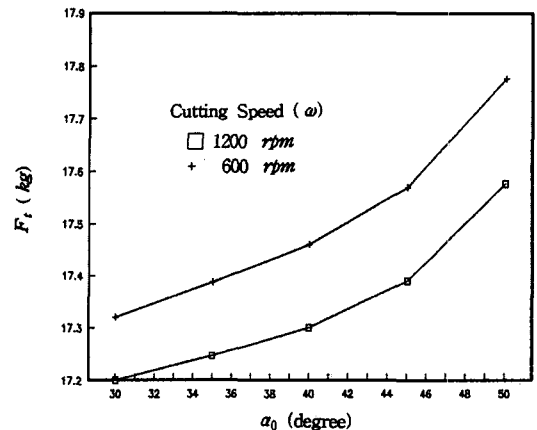


Fig. 6 F_t vs α_0

Table 1 연삭공구의 grit size 대 연삭율

Grit size #	64	100	120
연삭율(mm ³ /sec)	140	110	80

Table 2 연삭깊이 대 접선방향 연삭저항(F_t)

연삭깊이 (mm)	2	4	6
F_t (Kg)	3.2	6.1	10.1

상기 실험 결과는 전장에서 개발된 모델의 특성 방정식 내의 각각의 인자를 결정하는 데 활용된다.

4.2 평면 가공

유연성 디스크를 이용한 연삭가공의 과제는 디스크 및 자체의 배열로 인한 가공물의 비평면성을 극복하는 것이다. 이를 위하여 수평 또는 수직 방향으로 이송량이 각각 별도로 변화되었으나 수평이송속도를 변화시킬 경우 말기단계에서 이송속도를 급격히 변화시켜야 하는 것으로 나타나므로 현실적으로 실현시키기가 불가능하였다⁽¹⁷⁾. 따라서 이것을 개선한 수평 및 수직 방향으로의 동시 이송 방법이 제시되었다. 상기의 수평 및 수직 방향으로의 이송은 초기 및 중기 단계에서는 정해진 변화 차수에 따라 일정한 비율로 변화된다. 초기 단계에서 선정된 수평 및 수직 이송 속도의 변화율을 나타내는 m 및 n 의 조합은 Table 3 과 같다.

Table 3 m 과 n 의 조합

m	0	0	1	1
n	1	2	1	2

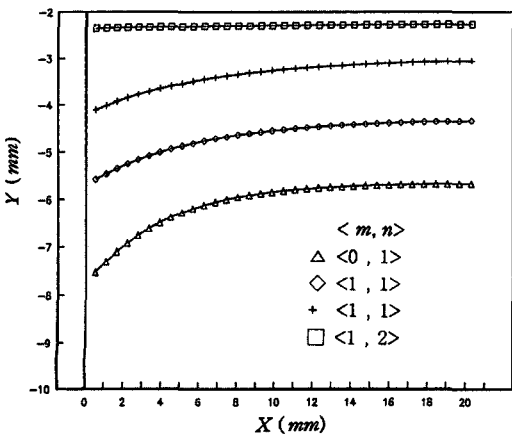
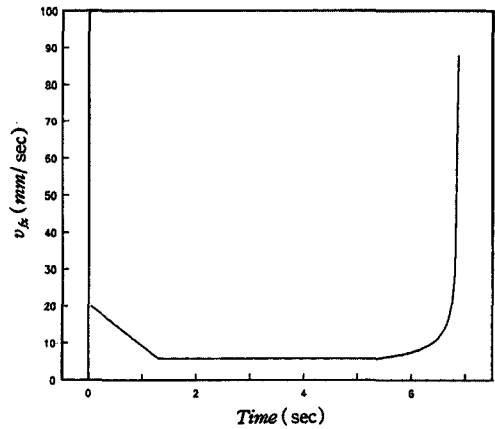


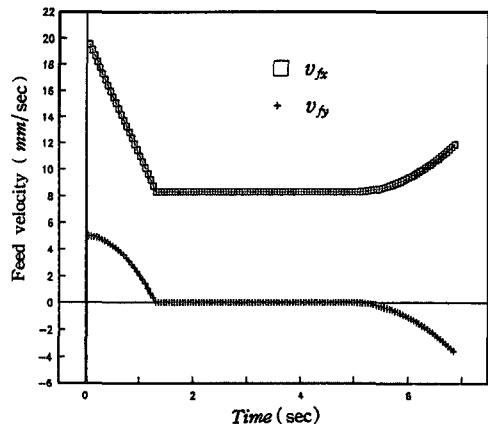
Fig. 7 Surface Generated for Various m and n

Fig. 7은 각각의 경우 초기 및 중기 단계에서의 가공 형상은 나타낸다. 가장 고차의 경우 ($m=1, n=2$)에 평면에 가까운 형상이 얻어졌다.

Fig. 8(a)는 수평이송속도만을 변화시켜 평면을 얻는 경우 속도변화를 표시한 것으로 말기단계에서의 과도한 변화를 나타내고 있다. 이에 비하여 Fig. 8(b)는 평면에 근접한 형상이 가능한 경우의 수평 및 수직 방향으로의 이송 속도의 변화 추이를 나타내고 있다. 이러한 2방향의 이송을 통한 가공의 경우는 한 방향으로만의 이송으로 인한 문제점을 해소할 수 있다. 즉 한 방향으로의 과도한 이송량의 변화보다는 양방향으로의 완만한 변화로 평면을 얻을 수 있어 가공 조건 설정에 유리하다. 말기 단계에서의 속도 변화는 낮은 차수의 경우에는 평면의 형상을



(a) Variation of v_x



(b) Variation of v_x and v_y

Fig. 8 Variation of v_x and v_y

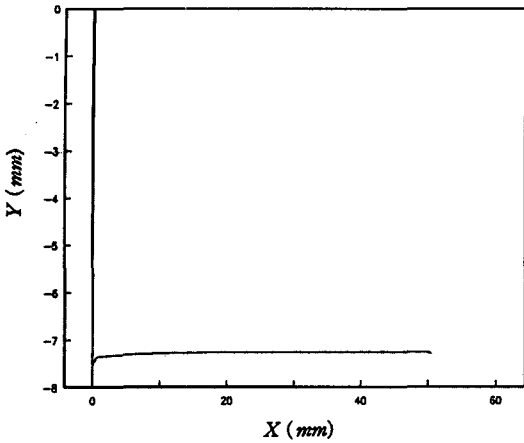


Fig. 9 Approximated Flat Surface

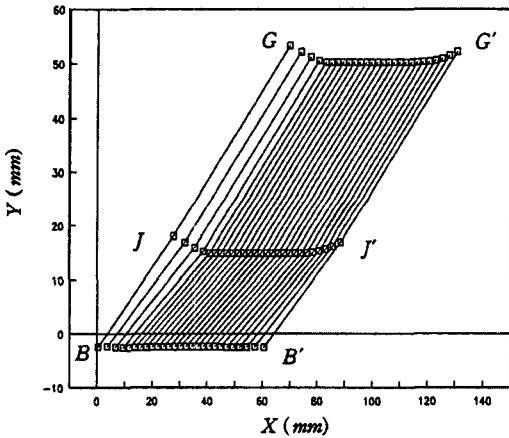


Fig. 10 Disk Deflection Trend

유지시킬 수 없었으며 고차 (2차 이상)의 차수로 변화시켰을 경우에 평면에 가까운 형상을 얻을 수 있었다. 특히 수직 방향으로의 이송은 초기 단계와는 반대 방향으로 설정하여야 하는 것으로 나타났다. 이때 얻어지는 평면가공 형상은 Fig. 9와 같다.

Fig. 10은 평면가공형상을 얻을 때 각각의 sampling 시각의 디스크 주요 지점의 위치를 나타낸 것이다. 즉 디스크의 중심 G, 디스크의 변형 중심 J 및 디스크의 끝지점 B를 나타내고 있다. 이때 디스크의 끝부분 B는 B'로 이동하면서 수평을 유지하여 평면형상의 가공면을 얻는 것을 알 수 있다. 디스크 중심 G와 변형점 J는 Fig. 10에서 공작물과의 상대적인 위치로서 표시되므로 중기단

계로 진입하면서 공작물이 수직상방향으로 이동할 경우 이 부분은 아래로 이동하는 것으로 표시되어 있다. 또한 말기단계에서는 다시 공작물이 반대방향으로 이동함에 따라 G 및 J는 G' 및 J'의 위치로 이동하게 된다. 이때 Fig. 10에서는 각각의 디스크부는 매 sampling 시각마다 도식된 것이므로 초기단계에서는 수평방향 이송속도가 감소되어 디스크간의 간격이 점점 좁아지고 말기단계에서는 반대로 속도가 증가하여 간격이 점점 넓어지는 것으로 나타나고 있다.

4.3 가공 영역 설정

수평 및 수직 이송 방법을 독립하여 실시한 몇몇 연구 결과에 의하면 말기구간에서 연삭저항의 과다 증가로 인하여 제품의 질 저하를 초래할 수 있으며 수평방향 이송 속도만을 단독으로 변화시키는 경우 역시 말기단계에서 이송속도를 급격히 증가시켜야 평면의 형상이 가능한 것으로 나타나고 있다⁽¹⁷⁾. 이를 개선하기 위한 방법의 한가지로 가공 중의 주요한 변수의 값을 예측하고자 개발된 평면 형상 가공 모델을 기반으로 여러 가지 이송 속도 변화의 경우에 대한 결과를 실시 시험을 통하여 기록하였다. Fig. 11과 12는 수직 및 수평 이송 속도를 변화시킬 경우에 대하여 얻어지는 연삭저항성분 및 연삭율을 표시하고 있다. 이들의 관계에서 의하여 도식된 영역을 기준으로 여러 가지 제약 조건을 고려한 바람직한 가공 조건의 설정이 가능한 부분을 선정할 수 있다.

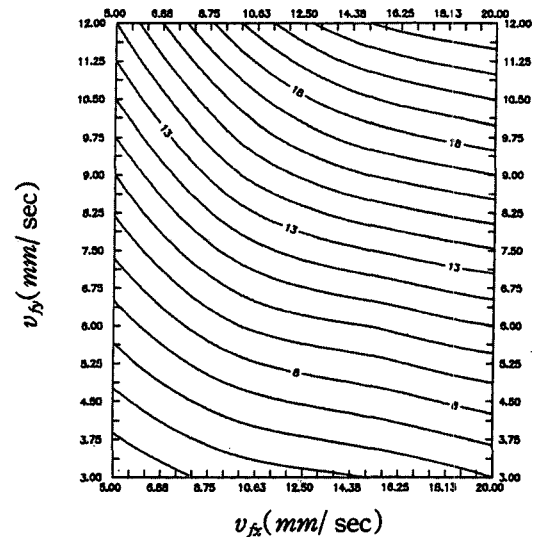


Fig. 11 F , Contour Diagram

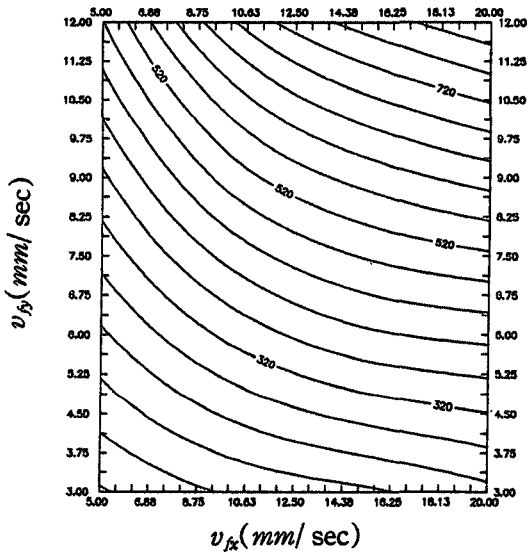


Fig. 12 VRR Contour Diagram

5. 결 론

유연성 디스크 연삭가공을 중심으로 이를 가공작업에 활용하고 가공물의 품질을 개선할 수 있도록 하는 작업조건 등이 설정되었고 여러 가지 제약조건에 따른 최적가공조건을 설정할 수 있는 영역을 도식하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가공공정의 분석: 몇몇 실험을 통하여 특성방정식의 인자설정 및 활용을 위한 자료를 획득하였다.
- 2) 가공모델의 개발 및 응용: 개발된 모델을 토대로 수평 및 수직이송을 통하여 평면에 가까운 형상을 얻을 수 있었으며 이에 소요되는 이송속도의 추이를 계산하였다. 이를 토대로 실제 가공의 응용할 수 있는 기반을 구축하였다.
- 3) 가공조건 영역설정: 모델 및 실시시험을 통하여 얻어진 적합한 속도의 변화를 기반으로 여러 가지 경우에 대하여 가공인자들 (연삭률, 연삭저항)의 추이를 기록하였으며 최적 가공조건영역 설정을 위한 가공결과를 도식하였다.

참 고 문 헌

1. R. L. Kegg, "Industrial problems in grinding", Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, pp

- 559-561, 1983.
2. R. I. King and R. S. Hahn, "Handbook of Modern grinding technology", Chapman and Hall, New York, 1986.
3. R. S. Hahn, "Computer-Aided Grinding Process Modeling", Proceedings of the 1985 ASME WAM, Miami Beach, FL, pp 1-10.
4. R. P. Lindsay, "On the Surface Finish-Metal Removal Relationship in Precision Grinding", Trans. of ASME, J. Eng. Ind., Vol. 95, No. 1, pp815-820, 1973.
5. G. Pahlizsch, "Internationaler atand der forschung auf dem gebiet des schleifen von holtz", Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 28, No. 9, pp329-343, 1970.
6. R. Snoeys and A. Decneut, "Review of Results of the Cooperative Research Program of the CIRP Grinding Group", Annals of the CIRP, Vol. 21, No. 2, pp507-512, 1971.
7. R. Snoeys, "The Mean Understanding Chip Thickness as a Basic Parameter in Grinding", Annals of the CIRP, Vol. 21, No. 1, pp183-190, 1972.
8. S. Malkin and N. H. Cook, "The Wear of the Grinding Wheel, Part I. Attritious Wear", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 93, Series B, pp1120-1128, 1971.
9. S. Malkin and N. H. Cook, "The Wear of the Grinding Wheel, Part II. Fracture Wear", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 93, Series B, pp1129-1138, 1971.
10. J. Shibata, "The Relationship Between the Wear of Grain Cutting Edges and their Metal Removal Ability in Coated Abrasive Belt Grinding", Wear, Vol. 55, pp331-244, 1974.
11. T. Yuhta, S. Igarashi and R. Okuno, "On the Surface Nature of Diamond Wheel in the Process of Grinding Carbon Steel", Annals of the CIRP, Vol. 27, No. 1, pp255-259, 1978.

12. P. A. Leitch, "An Experimental Investigation of the Transient Behavior of the Grinding Process", Proc. 12th NAMRC, pp322-329, 1984.
13. J. N. Brecker and M. C. Shaw, "Specific Energy in Single Point Grinding", Annals of the CIRP, Vol. 23, No. 1, pp93-94, 1974.
14. H. K. Tonshoff, E. B. Brinksmeier and H. Choi, "Abrasive and their influence on forces, temperatures and surface", Proc. 15th NAMRC, SME, Lehigh Univ., Bethlehem Pennsylvania, pp70-89, 1987.
15. D. E. Whitney and E. D. Tung, "Robot Grinding and Finishing of Cast Iron Stamp-
ing Dies", Proceedings of the 1989 ASME WAM, S.F. , pp 131-151, 1989.
16. S. M. Yoo and D. A. Dornfeld, "Modeling of the Flexible Disk Grinding Process: Part I - Model Development", Symposium on Monitoring and Control for Manufacturing Processes, 1990 ASME Winter Annual Meeting, Dallas, TX, November 25-30.
17. S. M. Yoo and D. A. Dornfeld, "Modeling of the Flexible Disk Grinding Process: Part II - Control and Optimization", Symposium on Monitoring and Control for Manufacturing Processes, 1990 ASME Winter Annual Meeting, Dallas, TX, November 25-30.