

본 연구는 유연제어 단계별 속도 제어를 적용한 유연성 디스크 연삭 가공에 관한 연구

본 연구는 유연제어 단계별 속도 제어를 적용한 유연성 디스크 연삭 가공에 관한 연구

# 절삭속도제어 단계에 따른 유연성 디스크 연삭가공에 관한 연구

별모 봉동, S

유승민\*, 신관수\*\*

조선대학교 기계공학과

## A Study on the Flexible Disk Grinding Process with Variable Control Stages

유승민, 신관수

Song Min Yoo\*, Gwan Soo Shin\*\*

조선대학교 기계공학과

조선대학교 기계공학과

$$\frac{1}{R} + \frac{\alpha \pi r^2}{R} = \alpha$$

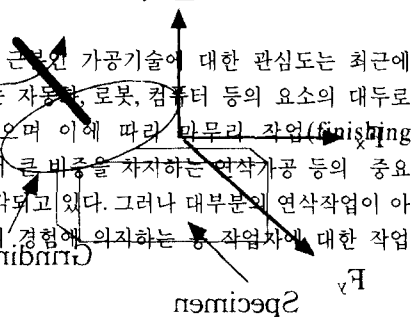
Abstract

A variable cutting speed control model was developed to be implemented for the flexible disk grinding process. Control algorithm was based on the error referred by the discrepancy between current disk angle and intended one that are proposed to produce desired resulting depth of cut. Controller was implemented in two different aspect. One was to initiate the control law from the beginning while the other was to activate as soon as the disk start to produce ground surface, i.e. the beginning of the between edges stage. Several performance analysis were conducted comparing various process parameters such as cutting force, disk angle, depth of cut and disk speed with respect to process transition time. Tentative results revealed that controller implemented from the earlier stages of the process showed better performance than the other.

Key Words: Flexible disk grinding (유연성 디스크 연삭), Cutting speed (절삭속도), Stage 단계, Disk angle (디스크 각도)

### 1. 서론

생산기술의 급격한 가공기술에 대한 관심도는 최근에 고조되고 있는 자동화, 로봇, 컴퓨터 등의 요소의 대두로 증가되고 있으며 이에 따라 마무리 작업(finishing process)으로서 큰 비중을 차지하는 연삭가공 등의 중요성도 더욱 부각되고 있다. 그러나 대부분의 연삭작업이 아직은 숙련자의 경험에 의존하는 등 작업자에 대한 작업



\* 경희대학교 기계산업시스템 공학부  
\*\* 경희대학교 기계공학부

소에 대한 출력 결과인 가공물의 품질간에 상관관계를 파악하여 동일한 작업을 수행할 때는 항상 동일한 작업 조건이 자동적으로 선정될 수 있도록 하는 것이 가장 시급한 과업이다.

연삭가공의 자동화에 대한 연구는 일반적으로 숙련자에 의존하던 작업을 자동화하여 비숙련자가 작업할 수 있도록 하는 방향으로 진행하여도 동일한 결과를 얻도록 하는 것을 포함하고 있다. 초기의 연삭작업에 영향을 미치는 인자에 관한 연구는 연삭공구의 회전속도, 연삭액의 유속, 연삭액의 온도, 연삭액의 농도, 연삭액의 pH, 연삭액의 전기전도도 등의 요소들이 가공물의 형성에 영향을 미치는 현상을 규명하는 방향으로 진행되었다. 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 남는 가공잔류물(burr)의 제거용으로 사용되어 왔다. 특히 로봇의 종단부에 장착하여 연삭공구의 자유도를 증가시켜 여하한 형태의 가공작업을 수행할 수 있도록 하는 연삭기 MIY의 개발이 주목되어 왔으며, 특히 CSDL(charles stark draper laboratory)을 중심으로 절삭차량 및 항공기 제작에 대한 연삭기를 개발하는 방향으로 공학적인 연구가 활발히 이루어져 왔다. 이러한 가공기구는 연삭접착제 부착된 디스크형(coated abrasive disk)의 형태를 띠고 있어 가공 대상물에 대한 연삭공작물과 공구가 가공작업이 진행됨에 따라 지지대와 센서 사이에서 마찰을 경험할 수 있는 특성을 나타내며, 이를 지나도록 하였다. Kurfess가 개발한 모델은 유연성 효과(compliance)에 의한 공구의 변형이 실제로 회전축선상에서 일어난 연삭기계의 경우에 국한되었기 때문에 추후 개발된 다른 유형의 유연성 효과를 이용한 연삭기에는 적용되지 않는다. 또한, 이 연구를 이용한 연삭기계의 제작비가 높고, 수명이 짧고, 절삭속도가 낮고, 절삭면의 높이를 해결하기 위한 한 달을 단축을 전념하고 있다. 또한, 절삭면의 유열을 흡수할 수 있는 연삭가공 방식은 연삭기 자체의 한계(절삭속도, 절삭량, 절삭면의 수축)를 극복하기 위한 가공공구와 연삭액의 사용이 필요하다. 이러한 디스크 변형형 유연성 연삭작업에 대하여 가공중의 변형 지점을 고려한 동력학적 모델이 개발되었으며, 이의 타당성 또한 가공물의 표면 형상을 실험결과와 비교하여 입증되었다.

본 연구에서는 기존에 시도된 연삭가공제어기법을 토대로 유연성디스크 연삭가공의 품질향상을 위한 절삭속도 제어를 구현하였으며, 이 때의 결과를 분석하여 유연성디스크 연삭가공의 품질향상에 응용하고자 한다.

## 2. 공정 모델

### 2.1 특성 방정식

연삭가공의 특성은 연삭공구의 회전속도, 연삭액의 유속, 연삭액의 온도, 연삭액의 농도, 연삭액의 pH, 연삭액의 전기전도도 등의 요소들이 가공물의 형성에 영향을 미치는 현상을 규명하는 방향으로 진행되었다. 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 남는 가공잔류물(burr)의 제거용으로 사용되어 왔다. 특히 로봇의 종단부에 장착하여 연삭공구의 자유도를 증가시켜 여하한 형태의 가공작업을 수행할 수 있도록 하는 연삭기 MIY의 개발이 주목되어 왔으며, 특히 CSDL(charles stark draper laboratory)을 중심으로 절삭차량 및 항공기 제작에 대한 연삭기를 개발하는 방향으로 공학적인 연구가 활발히 이루어져 왔다. 이러한 가공기구는 연삭접착제 부착된 디스크형(coated abrasive disk)의 형태를 띠고 있어 가공 대상물에 대한 연삭공작물과 공구가 가공작업이 진행됨에 따라 지지대와 센서 사이에서 마찰을 경험할 수 있는 특성을 나타내며, 이를 지나도록 하였다. Kurfess가 개발한 모델은 유연성 효과(compliance)에 의한 공구의 변형이 실제로 회전축선상에서 일어난 연삭기계의 경우에 국한되었기 때문에 추후 개발된 다른 유형의 유연성 효과를 이용한 연삭기에는 적용되지 않는다. 또한, 이 연구를 이용한 연삭기계의 제작비가 높고, 수명이 짧고, 절삭속도가 낮고, 절삭면의 높이를 해결하기 위한 한 달을 단축을 전념하고 있다. 또한, 절삭면의 유열을 흡수할 수 있는 연삭가공 방식은 연삭기 자체의 한계(절삭속도, 절삭량, 절삭면의 수축)를 극복하기 위한 가공공구와 연삭액의 사용이 필요하다. 이러한 디스크 변형형 유연성 연삭작업에 대하여 가공중의 변형 지점을 고려한 동력학적 모델이 개발되었으며, 이의 타당성 또한 가공물의 표면 형상을 실험결과와 비교하여 입증되었다.

$$\alpha = -\frac{v_{fs} \sin \alpha}{R_{sm}} + \frac{1}{area R_{sm}}$$
$$[k1 \alpha \mu Ks(\alpha_0 - \alpha) \frac{R_s}{R_{sm}} - k2]$$

연삭가공의 특성은 연삭공구의 회전속도, 연삭액의 유속, 연삭액의 온도, 연삭액의 농도, 연삭액의 pH, 연삭액의 전기전도도 등의 요소들이 가공물의 형성에 영향을 미치는 현상을 규명하는 방향으로 진행되었다. 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 남는 가공잔류물(burr)의 제거용으로 사용되어 왔다. 특히 로봇의 종단부에 장착하여 연삭공구의 자유도를 증가시켜 여하한 형태의 가공작업을 수행할 수 있도록 하는 연삭기 MIY의 개발이 주목되어 왔으며, 특히 CSDL(charles stark draper laboratory)을 중심으로 절삭차량 및 항공기 제작에 대한 연삭기를 개발하는 방향으로 공학적인 연구가 활발히 이루어져 왔다. 이러한 가공기구는 연삭접착제 부착된 디스크형(coated abrasive disk)의 형태를 띠고 있어 가공 대상물에 대한 연삭공작물과 공구가 가공작업이 진행됨에 따라 지지대와 센서 사이에서 마찰을 경험할 수 있는 특성을 나타내며, 이를 지나도록 하였다. Kurfess가 개발한 모델은 유연성 효과(compliance)에 의한 공구의 변형이 실제로 회전축선상에서 일어난 연삭기계의 경우에 국한되었기 때문에 추후 개발된 다른 유형의 유연성 효과를 이용한 연삭기에는 적용되지 않는다. 또한, 이 연구를 이용한 연삭기계의 제작비가 높고, 수명이 짧고, 절삭속도가 낮고, 절삭면의 높이를 해결하기 위한 한 달을 단축을 전념하고 있다. 또한, 절삭면의 유열을 흡수할 수 있는 연삭가공 방식은 연삭기 자체의 한계(절삭속도, 절삭량, 절삭면의 수축)를 극복하기 위한 가공공구와 연삭액의 사용이 필요하다. 이러한 디스크 변형형 유연성 연삭작업에 대하여 가공중의 변형 지점을 고려한 동력학적 모델이 개발되었으며, 이의 타당성 또한 가공물의 표면 형상을 실험결과와 비교하여 입증되었다.

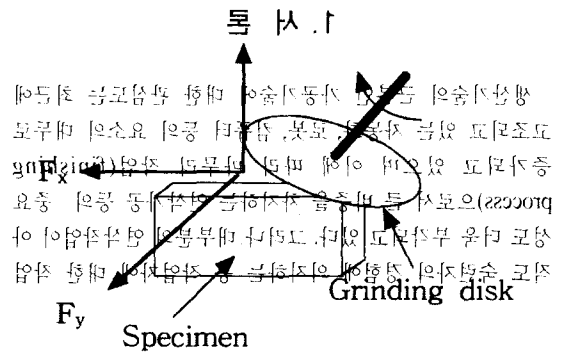


Fig. 1 Grinding process

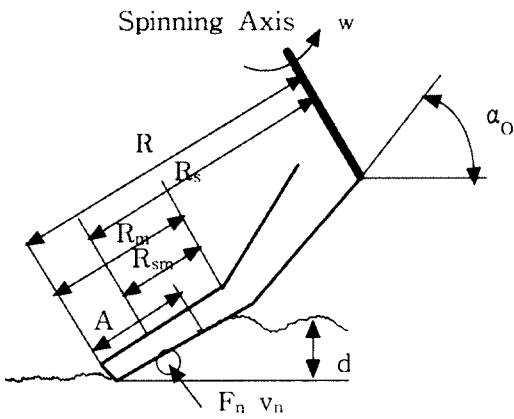


Fig. 2 Process schematics

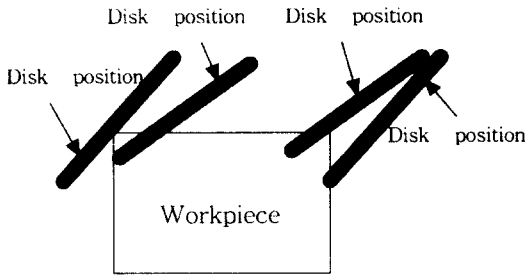


Fig. 3 Process stages

## 2.2 공정단계

앞에서 언급한 바와 같이 공정의 단계는 초기(entrance), 중기(between edges) 및 말기(exit)의 3단계로 구분되며 상기의 특성방정식에서 요구되는 변수 area 및 Rsm의 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 공정 변수간의 관계를 설정하여야 한다.

초기단계에서는 디스크가 작업시작 후부터 공작물과 접촉을 시작하여 디스크의 끝부분이 완전히 잠입되기까지의 시점이다.

중기 단계는 디스크의 끝부분이 완전히 공작물에 잠입되어 공정이 진행되며 이후 디스크가 공작물을 벗어나기 시작하는 지점까지로 정의되는 정상 상태에 이르기 시작하는 단계로 정의된다.

최종 단계인 말기 단계에서는 디스크가 벗어나기 시작

하는 중기 단계 이후부터 작업 종료 시점까지를 나타낸다.

## 3. 절삭 속도의 변화

본 연구에서는 개발된 모델을 토대로 절삭 속도를 변화시켜 평면에 가까운 형상을 얻기 위하여 단계별로 적절한 형태로 변화를 시도하였다. 절삭속도는 일반적인 함수의 형태로 다음과 같이 변화하는 것으로 가정하였다. 즉

$$w = k_p * (\alpha_{ref} - \alpha)$$

이때  $k_p$ ,  $\alpha_{ref}$  및  $\alpha$ 는 각각 제어상수, 절삭깊이와 관련되는 목표 디스크각도 및 현재 디스크각도를 표시한다. 이러한 제어상수의 변화는 가공단계와 상관없이 일정하게 적용시키며 단지 역회전 또는 정지를 방지하기 위하여 최소수치의 회전속도를 설정한다.

### 3.1 속도제어의 구간별 적용

본 연구에서는 가공 중에 구현되는 속도제어를 효과적으로 적용시킬 수 있는 방안을 강구하고자 다음과 같이 적용단계에 따라 2가지로 구분하였다. 즉 절삭속도제어를 가공이 시작되는 초기단계에서부터 적용시키는 방안과 가공이 본격적으로 진행되어 가공물의 표면형상이 형성되기 시작하는 중기단계에서부터 속도제어를 시작하는 방안에 대한 성능 평가를 수행하고자 한다. 전자의 경우에는 가공초기부터 제어를 시작하여 본격적으로 가공물의 표면이 형성되면서 계속하여 작업이 진행될 수 있도록 하는 방안이며 후자의 경우에는 가공물이 생성되기 시작하는 시점에서 적용시키는 방법이므로 초기부터 제어장치를 가동시키지 않아도 되는 이점이 있다.

## 4. 결과 및 고찰

유연성디스크 연삭가공공정은 디스크 끝단에 가해지는 절삭력이 가공 중에 디스크 회전축에 대한 굽힘모멘트를 유발하여 디스크의 일부가 변형하므로 결과적으로 가공품의 부분 곡면형상을 초래하게 된다. 본 연구에서는 가공 중에 디스크 회전속도를 변화시켜 유연성디스크 연삭가공에 의한 각종 가공인자의 영향을 분석함으로써 공정계획수립에 필수적인 기본자료를 구축한다.

### 4.1 초기단계 제어(Entire control)

절삭속도제어를 초기단계부터 적용시키면 디스크끝부

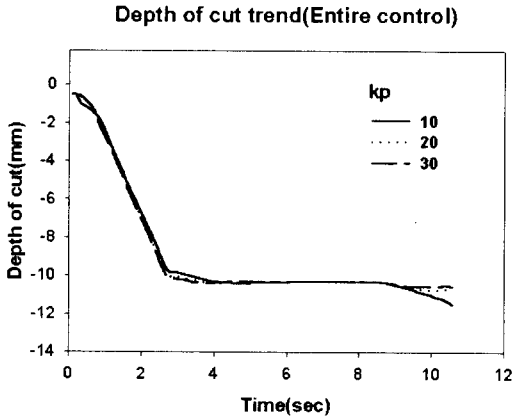


Fig. 4 Depth of cut trend

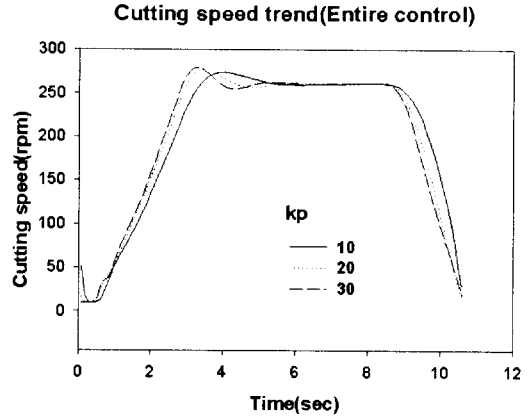


Fig. 6 Cutting speed trend

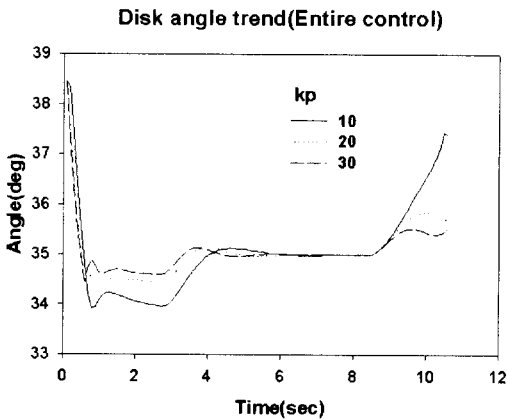


Fig. 5 Disk angle trend

#### 4.2 중기단계 제어(Partial control)

중기단계부터의 제어는 가공물의 표면형상이 이루어지는 시점에서 절삭속도를 변화시키므로 조기제어에 따른 손실을 방지할 수 있지만 성능평가 후에 효율성여부를 판단하여야 한다. Figs. 7~9는 제어상수의 크기에 따른 절삭 깊이, 디스크각도 및 절삭속도의 추이를 나타낸다.

제어상수가 커짐에 따라 모든 인자가 급격하게 변화하여 중간단계의 정상상태수치를 과다하게 초과하게 되므로 반응속도를 고려하여 적절한 값을 선정하여야 한다. 초기단계(~3.0초)에서는 제어작용이 이루어지지 않으므로 절삭속도의 변화가 없고 디스크각도 및 절삭깊이는 점진적으로 변화한다.

분이 공작물에 잠입되어 가공표면을 생성하기 시작하는 중기단계에 이르기까지 제어작용이 유지되어 원활한 작업이 예상된다. Figs. 4~6은 제어상수( $k_p$ )의 크기에 따른 절삭깊이, 디스크각도 및 절삭속도의 추이를 나타낸다. 제어상수가 커짐( $k_p=30$ )에 따라 가공면이 평면형상에 근접하나 제어속도의 변화의 기복이 크게 된다. 절삭깊이는 큰 제어상수를 적용시킨 경우에 중기단계와 유사한 값을 말기단계까지 유지하여 평면에 가까운 형상을 유지할 수 있었다. 일반적으로 제어상수가 큰 경우에 성능이 개선되었으며 실제로 제어를 설계할 때는 이러한 경향을 참조하여 필요한 성능평가기준을 만족시키는 범위에서 선정된 제한된 크기의 적절한 제어상수를 활용하여야 한다.

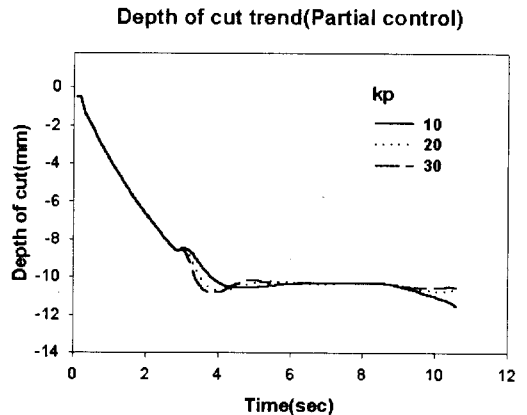


Fig. 7 Depth of cut trend

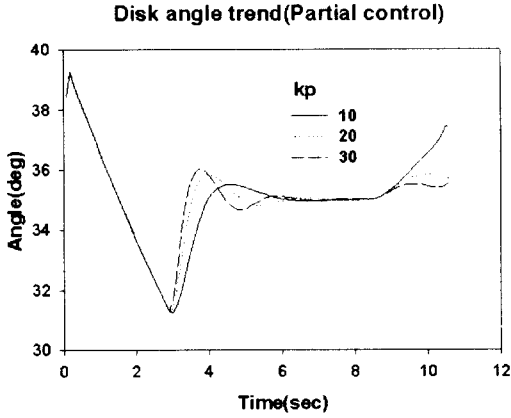


Fig. 8 Disk angle trend

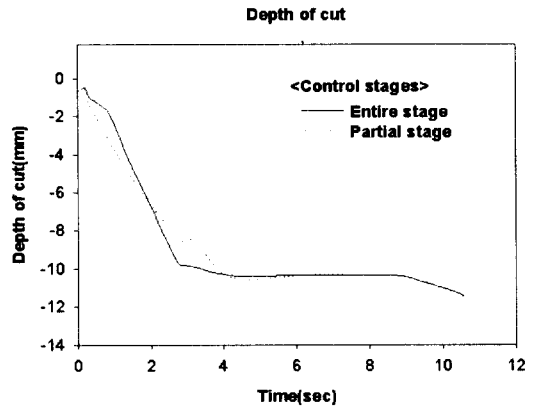


Fig. 10 Depth of cut comparison

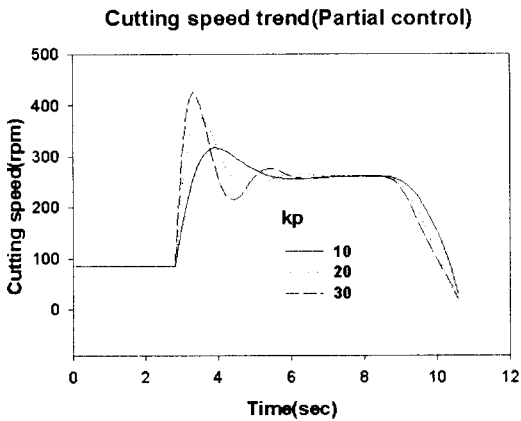


Fig. 9 Cutting speed trend

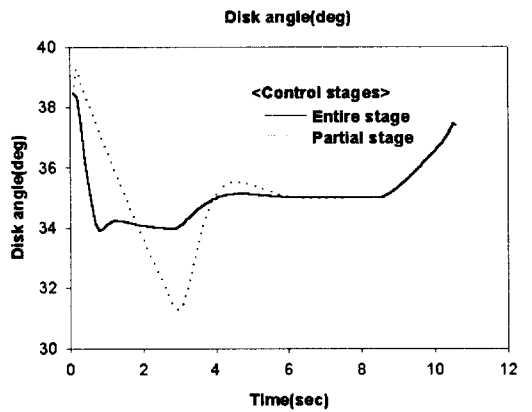


Fig. 11 Disk angle comparison

### 4.3 제어시점에 대한 평가

제어시점에 따른 성능평가는 Figs. 10~13에서 비교 분석되어 나타난다. 제품의 표면이 생성되는 중기단계부터의 제어는 초기단계에서 진행된 가공작업으로 인하여 디스크의 변형량이 과다함으로 제어량이 크게 된다. 따라서 대부분의 경우 초기단계에서부터 제어하는 경우와 비교하여 제어인자의 수치변화가 심하게 된다. 특히 Fig. 10에서 나타나는 바와 같이 절삭깊이는 초기단계에서부터 제어하는 경우에 비하여 정상상태에 이르는 시간이 약 4.0초 지연된다. 디스크각도 및 절삭속도 또한 심한 기복으로 과다한 오버슈트를 기록하고 있다(Fig. 11). 절삭저항의 경우에는 두 경우 모두 유사한 최대치를 보이고 있으나 중기단계에서 제어하는 경우에는 최대치가 중기단계

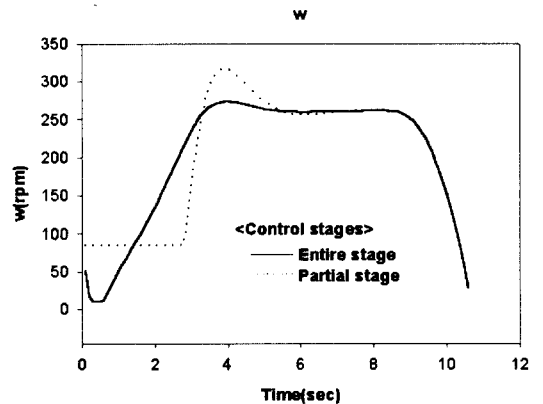


Fig. 12 Cutting speed comparison

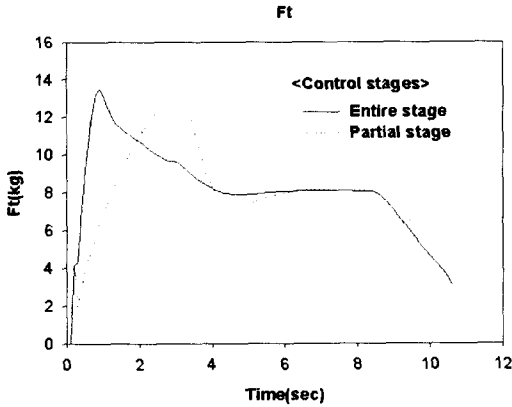


Fig. 13 Ft comparison

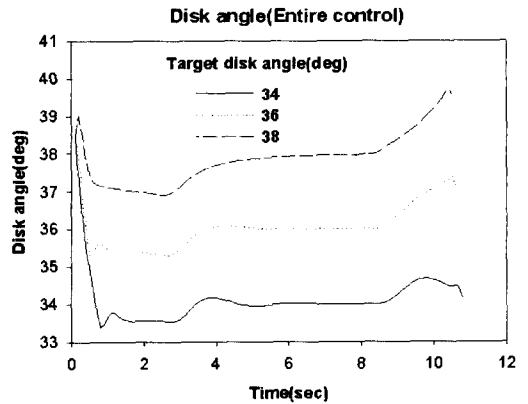


Fig. 15 Disk angle comparison for various reference angle

시작 후에 나타나고 있어 이때 이후 생성되는 가공면에 과도한 절삭저항으로 인한 표면손상을 초래할 수 있다 (Fig. 13). 반면에 초기단계에서 제어하는 경우에는 최대치가 가공물표면생성에 직접적으로 영향을 미치지 않는 중간단계 이전에 발생하므로 가공면의 품질손상을 초래하지 않는다.

중간단계이후에는 적용되는 제어기의 적용시점에 관계없이 동일한 반응을 나타낸다. 따라서 중기단계 후반, 특히 말기단계에서 성능을 개선하기 위해서는 제어적용시점을 조절하는 것과는 별도로 다른 제어방식을 적용시켜야 한다.

#### 4.4 설정 디스크각도의 영향

다음 단계에서는 가공 중 설정되는 목표 디스크 변형각

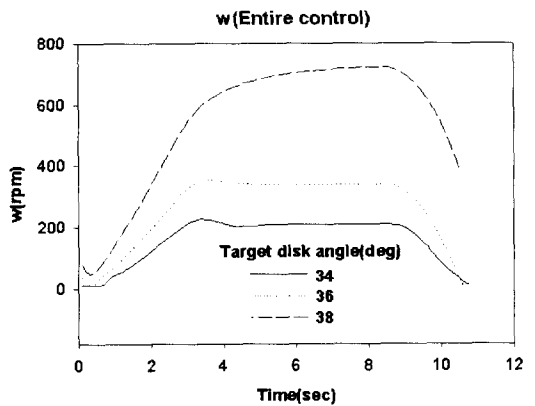


Fig. 15 Disk angle comparison for various reference angle

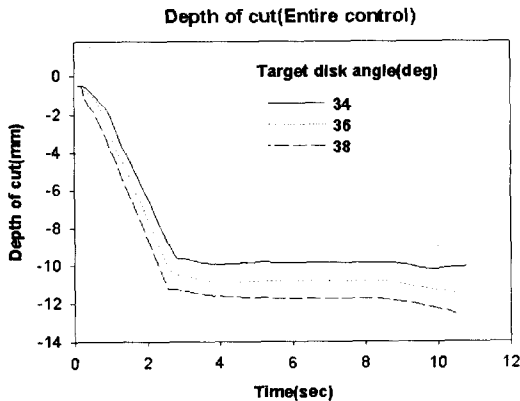


Fig. 14 Depth of cut comparison for various reference angle

도 ( $\alpha_{ref}$ )에 대한 공정의 성능을 평가한다. 절삭속도는 초기단계에서부터 적용시킨다(Figs. 14~16). 설정되는 디스크각도가 클수록 절삭깊이도 크지만 가공면의 평면성을 고려할 때 가공면의 품질은 저하되는 것으로 나타나고 있다(Fig. 14). 디스크각도와 절삭속도는 설정각도가 클수록 높은 값을 유지하고 있다.

### 5. 결론

다듬질가공용 유연성디스크를 사용한 연삭가공에 대하여 가공물의 품질을 개선시키고자 절삭속도를 제어하였다. 적절한 작업조건을 설정할 수 있도록 하기 위한 각종

인자를 중심으로 성능평가를 실시하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 가공제어모델의 응용: 제안된 모델을 토대로 가공품의 형상을 개선할 수 있었으며 이에 소요되는 절삭속도의 추이를 계산하여 실제 가공에 응용할 수 있는 기반을 구축하였다.
- (2) 제어상수의 상대적인 크기에 따른 성능평가를 실시하여 일정한 경향을 도출하였다. 이에 따라 실제로 제작되는 제어기는 요구되는 품질이나 공정의 진행 조건 등의 성능평가기준을 만족시키는 범위에서 선정된 제어상수 등을 활용하여야 한다.
- (3) 제어시점에 대한 성능평가를 수행하였으며 중간단계에서 제어를 적용시키는 것보다는 초기단계, 즉 가공물표면이 형성되기 이전부터 적용시키는 것이 우수한 성능을 나타내는 것으로 나타났다.
- (4) 설정된 디스크각도에 따른 가공변수의 추이를 산출하였다.
- (5) 제어기 적용시점과 관계없이 말기단계에서는 동일한 반응을 나타내었으며 이러한 성능개선을 위해서는 다른 제어방식을 개발하여 적용시켜야 한다.
- (6) 본 연구에서 사용된 단순한 제어법칙보다 초기 및 말기단계의 기하학적인 복잡성 및 비선형성을 고려하여 추가적인 미분 또는 적분제어를 활용하거나 비선형 제어기법을 적용시켜야 할 것이다.

## 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, pp. 815~820, 1973.
- (5) G. Pahlitzsch, "Internationaler atand der forschung auf dem gebiet des schleifen von holtz", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 28, No. 9, pp. 329~343, 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, pp. 507~512, 1971.
- (7) R. Snoeys, "The Mean Understanding Chip Thickness as a Basic Parameter in Grinding", *Annals of the CIRP*, Vol. 21, No. 1, pp.183~190, 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, pp. 1120~1128, 1971.
- (9) T. R. Kurfess, "Verification of Dynamic Grinding Model", *Trans. ASME, J of Dynamic System and Control*, Vol. 110, No. 4, pp. 403~409, 1988.
- (10) 유송민, "유연성 디스크 정밀연삭 가공중 평면가공에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, pp. 158~166, 1996.