

유연성 디스크 연삭가공 평면가공구간에 대한 연구

유송민*

(논문접수일 2007. 10. 11, 심사완료일 2007. 11. 22)

A Study on the Flat Surface Zone of the Flexible Disk Grinding System

Song Min Yoo*

Abstract

Inherent dynamic interaction between flexible disk and workpiece creates partially non-flat surface profile. A flat zone was defined using minimum depth of engagement. Several key parameters were defined to explain the characteristics of the zone. Process conditions including disk rotation speed, initial depth of cut and feed speed were varied to produce product profile database. Correlation between key factors was examined to find the characteristic dependencies. Trends of key parameters were displayed and explained. Higher flat zone ratio was observed for lower depth of cut and higher disk rotation speed. Ratio of minimum depth of cut against target depth of cut increased for higher feed speed and disk rotation speed but was insensitive to the depth of cut variation. The process transition was visualized by continuously displaying instantaneous orientation of the deflected disk and the location of key parameters were clearly marked for comparison.

Key Words : Flexible disk grinding(유연성디스크연삭가공), Flat zone(평면구간), Key parameter(특징인자)

1. 서론

유연성 디스크 연삭가공은 한국표준규격 KS L 6498에 표시된 연마디스크를 사용한 연삭가공작업으로서 선박 및 자동차산업 분야에서 활발히 사용되는 가공작업으로 용접잔류물(Bead)의 제거 또는 가공 후에 남은 버어(Burr)의 제거를 위한 디버링작업용 및 대형공작물가공용으로 사용되어 왔다. 최근에는 자동화의 일환으로 로봇의 종단부에 장착하

여 연삭공구의 자유도를 증가시켜 복잡한 형태의 공작물도 손쉽게 가공할 수 있도록 하는 연구가 MIT를 중심으로 시작되었으며 특히 CSDL(Charles Stark Draper Laboratory)를 중심으로 가공 정보를 활용하는 로봇에 장착된 연삭기가 개발된 이후 이의 활용도가 더욱 넓어지게 되었다⁽¹⁾. 일반적인 모델링에 사용된 기타 연삭가공⁽²⁻⁴⁾과 달리 연삭입자가 부착된 디스크형의 공구를 유연성을 갖는 지지대에 장착하여 공작물과 공구가 가공작업이 진행됨에 따라 지지대와 센서사이

* 경희대학교 테크노공학대학 기계공학과 (smyoo@khu.ac.kr)
주소: 449-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1

에 마치 스프링을 장착한 것과 같은 효과를 지니도록 하였다. 주축부의 부착된 스프링에 의한 컴플라이언스(Compliance) 효과를 고려하여 동역학적인 공정관계모델이 개발되어 공정 변수의 실시간적인 예측 및 제어에 활용되었다. 개발된 모델은 종종 가공 중에 여러 가지 불확실하거나 고려되지 않은 인자들의 영향으로 인하여 공정을 정확히 예측하기 어렵게 하므로 가공 중에 공구의 위치를 정확하게 제어하기 위하여 일반적으로 절삭력이 측정되어 사용되었다. 초기모델에서 고려되지 않은 공구의 부분변형 특성이 도입되어 개선된 모델이 개발되었으며 이를 토대로 가공작업에 대한 좀 더 정확한 예측이 가능하였다⁽⁵⁾. 가공물의 형상을 개선시키기 위하여 가공 중에 단계별로 제어를 수행하는 방법을 도입하여 부분적인 가공면 형상개선을 도모하였다⁽⁶⁾. 이 방식은 재래식 제어방식을 활용하여 비선형적인 가공특성을 부분적으로 개선하는 효과를 거두었다. 가공물의 수평 및 수직이송을 통하여 가공물의 형상을 개선하는 것과 리니어모터와 접목시켜 2축 동시 신경망제어를 통한 형상개선방안이 제안되었으나 작업현장에 접목시키기는 어려웠다^(7,8).

본 연구에서는 디스크연삭작업 공정을 더욱 정확하게 이해하기 위하여 가공으로 형성되는 최종 가공표면형상내 평면구간에 대한 생성특성을 가공인자별로 확인하고 그 영향을 분석하고자 한다. 즉 평면구간의 특징을 정량화시키기 위한 특성인자를 정의하고 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이가 미치는 영향을 파악한다. 이 결과는 특정제원의 가공물형성을 위한 가공조건 설정에 활용될 수 있다.

2. 모델링

유연성디스크 연삭가공은 공구와 공작물 사이에 경사각에 의한 정렬 변화에 따라 가공이 진행되며 최종적인 가공물의 형상이 결정된다(Fig. 1). 가공공정은 일반적으로 가공간류물인 버어와 용점비드와 같이 피절삭부의 폭이 비교적 작은 경우 적용되므로 2차원모델을 이용하여 근사적으로 해석이 가능하다.

공정주요변수인 디스크경사각 α 의 변화추이는 작업 중에 인자들을 고려하여 다음과 같이 정의된다(Fig. 2).

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

식 (1)에서 $area$ 는 (접촉길이×공작물두께) $A \times b$ 이며 R_{sm}

과 같이 기하학적인 가공 단계에 따라 다르게 정의된다.

이러한 가공단계는 디스크와 공작물의 상대적인 위치에 따라 가공작업은 가공면 생성 전에 가공작업이 진행되는 초기(Fig. 3에서 디스크위치 1 → 디스크위치 2), 가공작업이 안정적으로 진행되기 시작하는 중기(디스크위치 2 → 디스크위치 3) 및 작업종료단계인 말기(디스크위치 3 → 디스크

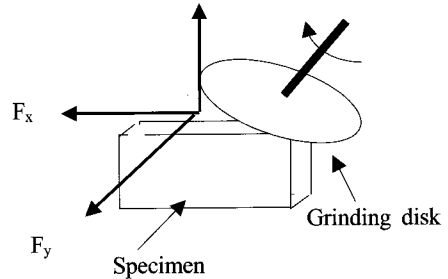


Fig. 1 Grinding Process

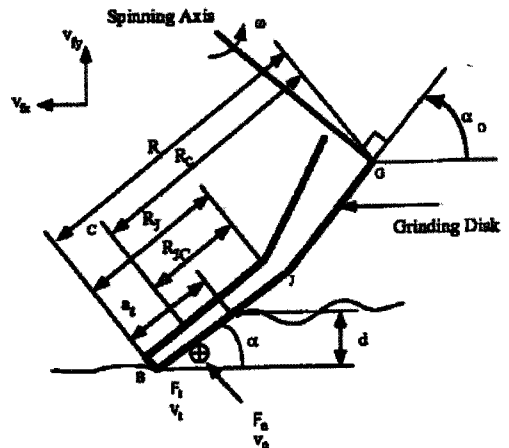


Fig. 2 Process modeling schematic diagram

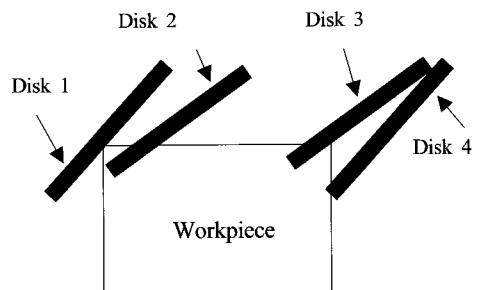


Fig. 3 Disk orientation at each process stages

위치 4)의 3단계로 구분된다.

가공과정 중 디스크면에 작용하는 속도성분으로 가공조건 중에 하나인 공작물의 이송속도(v_{fx}), 디스크와 공작물의 상호작용에 의한 디스크 변화 각속도($\dot{\alpha}$) 및 가공작업에 의한 디스크의 변형속도(v_n)가 있으며 이에 따라 목표절삭깊이(doc_0)에 대응하는 절입깊이(doe)로 공작물에 대한 가공작업이 수행된다.

Fig. 4는 디스크 연삭가공의 가장 대표적인 가공면 형상이다. 공정이 진행됨에 따라 생성되는 중기단계에서는 디스크와 공작물의 상호작용이 안정화상태에 이르러 디스크의 변화가 최소화되고 절입깊이의 변화가 최소화되어 생성되는 가공면 형상이 일정한, 평면에 근접한구간이 생성된다.

평면가공구간에 대하여 특징인자를 다음과 같이 정의할 수 있다(Fig. 4). P_i 는 특징 작업단계점을 나타내고, P_{ix} 와 P_{iy} 는 대응되는 작업단계점의 좌표위치를 나타낸다.

- $P_1(P_{1x}, P_{1y})$: 가공면 시작점 (중기단계 시작점)
- $P_2(P_{2x}, P_{2y})$: 평면구간 진입지점
- $P_3(P_{3x}, P_{3y})$: 평면구간 종료지점 (중기단계 종료점)
- $P_4(P_{4x}, P_{4y})$: 작업종료점
- doe_{min} : 최소 절입깊이로 P_3 특징점 부근에 위치함

P_1 은 공작물의 좌측면선상에 있으며 편이상 직사각형 공작물의 경우 좌측상부 모서리점을 xy 좌표축에서 원점으로 한다. Fig. 4에서와 같이 평면구간의 길이 L_{fz} 는 P_2 와 P_3 사이의 거리로 나타내며 평면구간에서는 y축 성분의 변화가 없으므로 x축 성분값의 차이로 대체할 수 있다. P_2 는 가공

과정 중 절입깊이가 점진적으로 증가함에 따라 최소절입깊이를 기준으로 주어진 공차 ϵ 내에 절입깊이가 들어오기 시작하는 지점으로 정의한다. 즉

$$|P_{2y}| - doe_{min} \leq \epsilon \quad (2)$$

주요 특징인자에 대하여 각 인자의 제원을 좀 더 효과적으로 표현하기 위하여 다음과 같은 무차원 변수를 추가로 정의한다.

$$\begin{aligned} R_{fz} &= L_{fz} / W \approx (P_{3x} - P_{2x}) / W \\ R_{ix} &= P_{ix} / P_{4x} = P_{ix} / W \text{ for } i = 2, 3 \\ R_{jy} &= |P_{jy}| / doc_0 \text{ for } j = 1, 2, 3, 4 \\ R_{dm} &= doe_{min} / doc_0 \text{ for } j = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (3)$$

단 W 는 공작물의 폭이다. R_{fz} 은 평면구간길이와 공작물 폭의 비이며, R_{ix} 는 각 특징점 P_i 의 x축성분의 공작물폭에 대한 비, R_{jy} 는 y축성분의 절삭깊이에 대한 비를 나타낸다. R_{jy} 의 비교기준으로 공작물의 높이대신 절삭깊이를 적용시킨다. 즉 평면구간의 길이와 x축방향의 인자는 공작물의 폭에 대한 비율을 표시하고 최소 절입깊이와 y축방향 인자는 목표 절삭깊이에 대한 비를 사용한다. R_{dm} 은 가공결과 중 평면구간에서 관찰되는 최저절입값과 절삭깊이와의 비로서 가공성과 관련된 인자이다.

3. 결과 및 고찰

공정 중에 디스크와 공작물사이에 상호작용으로 특징적인 가공단계면이 생성되며 이를 분석하여 최적가공조건 설정에 활용할 수 있다. 이를 위하여 가공 중에 절삭조건인 절삭속도, 이송속도 및 절삭깊이를 변화시켜 유연성디스크 연삭가공에 의한 결과 형상의 제원 및 특징을 분석함으로써 공정계획수립에 필수적인 기본자료를 구축한다.

개발된 모델과 정의된 특징인자를 비교확인하기 위한 시험 조건은 가공시 설정할 수 있는 여러 조건 중에서 가장 일반적인 이송속도, 절삭깊이 및 절삭속도(디스크회전속도)를 선정하여 적용하였다(Table 1)⁽⁶⁾.

Table 1 Process condition range

Parameter		w (rpm)	v_{fx} (mm/sec)	doc_0 (mm)
Range	Min	1000	2	5
	Max	3000	6	10

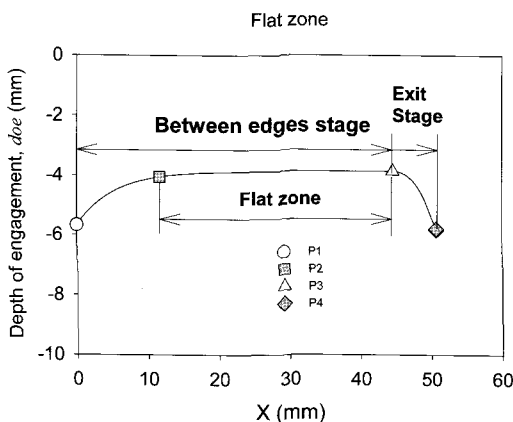


Fig. 4 Flat zone definition in the output profile

3.1 평면구간 특징인자비교

Table 2는 절삭조건 조합에 따른 특징인자의 실시시험의 결과 중 절삭속도와 절삭깊이를 각각 1000rpm과 5.0mm로 일정하게 설정한 경우에 대한 결과이다. 이송속도 v_{fx} 가 증가함에 따라 R_{2x} , R_{3x} 는 증가하고 doe_{min} , R_{1y} , R_{2y} , R_{3y} , R_{4y} 및 R_{dm} 은 감소하며 R_{f1} 는 약간 감소 후 증가하는 경향을 나타내고 있다.

특징인자간의 상관관계를 파악하기 위하여 절삭조건 조합의 결과로 나타나는 주요 가공변 특징 인자간의 상관계수를 분석하였다. Table 3에서와 같이 y축 연계인자간의 상관관계가 높은 것으로 나타났다. x축 연계인자간 또는 x와 y축 연계인자 사이에는 크기는 작지만 역의 상관관계가 나타났다. 즉 단계별 절입깊이와 관련된 y축 관련인자 간의 변화성향이 유사하였다.

Table 2 Output parameter trend sample for various v_{fx}

Input \ Output	v_{fx} (mm/sec)				
	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
doe_{min}	2.216	1.716	1.398	1.179	1.019
R_{2x}	0.103	0.119	0.122	0.121	0.117
R_{3x}	0.946	0.956	0.963	0.968	0.972
R_{f1}	0.843	0.837	0.841	0.847	0.855
R_{1y}	0.616	0.545	0.492	0.455	0.421
R_{2y}	0.465	0.360	0.294	0.247	0.214
R_{3y}	0.443	0.343	0.280	0.236	0.204
R_{4y}	0.567	0.426	0.331	0.263	0.214
R_{dm}	0.443	0.343	0.280	0.236	0.204

* 단 $w=1000$ (rpm), $doc_0=5$ (mm)

Table 3 Cross correlation between parameters

	R_{x2}	R_{x3}	R_{y1}	R_{y2}	R_{y3}	R_{y4}	R_{dm}
R_{x2}		-0.008	-0.770	-0.765	-0.765	-0.629	-0.765
R_{x3}			-0.554	-0.576	-0.576	-0.703	-0.576
R_{y1}				0.998	0.997	0.978	0.997
R_{y2}					1.000	0.980	1.000
R_{y3}						0.980	1.000
R_{y4}							0.980
R_{dm}							

3.2 가공특성

Table 2에 일부 예시된 것과 같이 동일한 절삭조건 조합을 통하여 생성된 결과 중 제품의 가공특성과 직접적으로 관련된 인자인 평면구간 길이비 R_{f1} 와 평면구간내의 절삭깊이 특성값인 최저절입깊이와 절삭깊이의 비 R_{dm} 의 변화경향을 비교하였다(Figs. 5~10). R_{f1} 는 v_{fx} 가 3mm/sec 이하에서는 절삭속도가 증가함에 따라 증가하고 있으나 그 외의 경우에는 감소 후 증가하였다(Figs. 5, 7). 절삭깊이별 이송속도 v_{fx} 의 변화에 따른 R_{f1} 의 경향은 Table 2의 결과와 동일하다(Fig. 6).

절삭깊이의 비 R_{dm} 은 절삭속도 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 이송속도가 증가하면 감소하였다. 절삭깊이 변화에 따른 영향은 작은 것으로 나타났다(Figs. 8, 9).

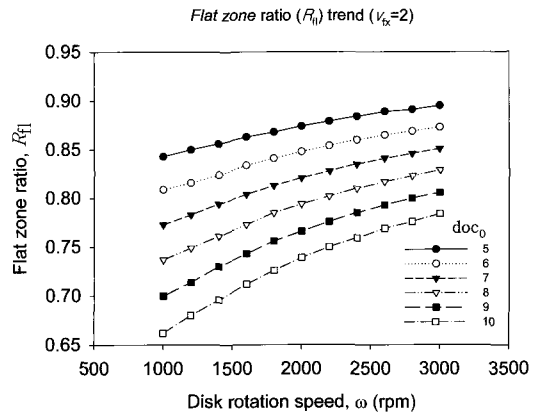


Fig. 5 R_{f1} trend for w and doc_0

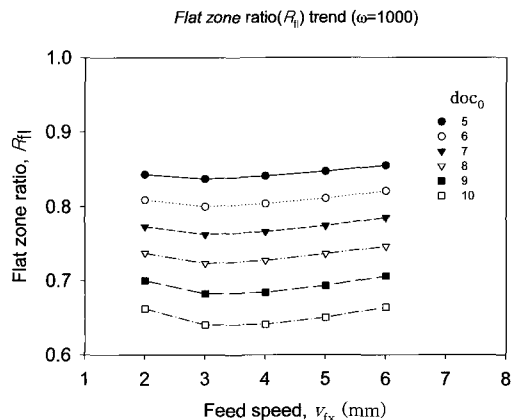


Fig. 6 R_{f1} trend for v_{fx} and doc_0

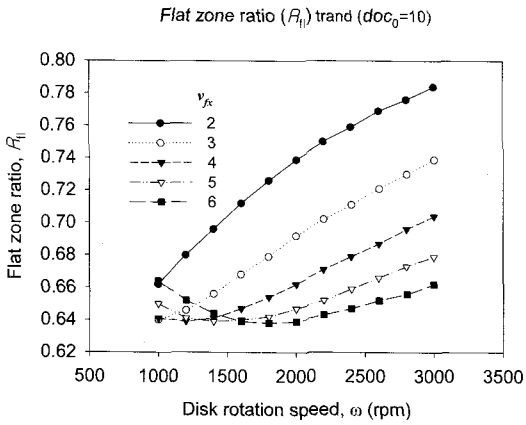


Fig. 7 R_{fi} trend for w and v_{fx}

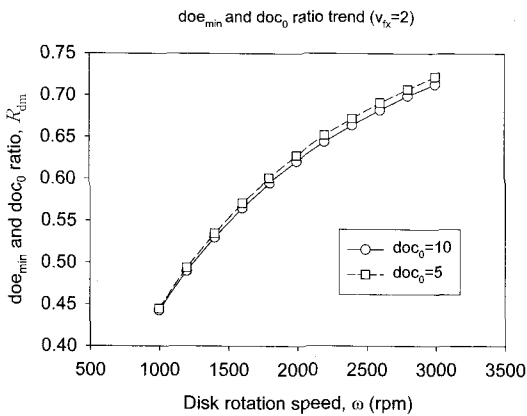


Fig. 8 R_{dmi} trend for w and doc_0

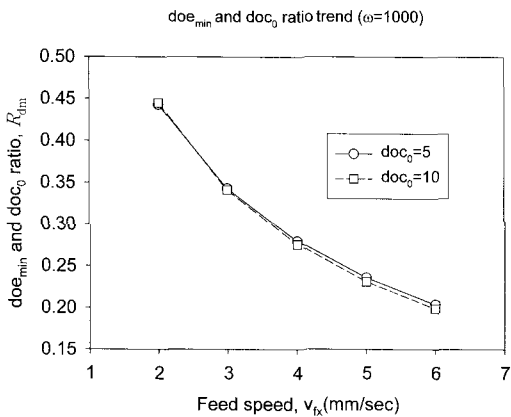


Fig. 9 R_{dmi} trend for v_{fx} and doc_0

3.3 특징점 변화

가공성과 관련인자인 R_{fi} 및 R_{dmi} 과 연계되어 있는 평면구간 특징점의 생성경향을 여러 가지 가공조건에 대하여 분석하였다(Figs 11-13).

Fig. 11과 같이 절삭속도만을 변화시켰을 때 ($v_{fx}=5.0$, $doc_0=10.0$ 로 일정), w 가 작을수록 최종 절입깊이가 작으며 P2와 P3가 늦게 나타난다. 이 때 P2와 P3의 차이인 L_{fi} 은 절삭속도가 2000인 경우가 다른 경우보다 작게 나타나고 있고 이는 Fig. 7에 나타나는 R_{fi} 의 경향과 일치한다. 이송속도만 변화하는 경우 ($doc_0=10.0$, $w=2000.0$ 로 일정) 이송속도가 클수록 최종 절입깊이가 작으며 P2와 P3가 늦게 나타난다(Fig. 12). 이때 평면구간 길이 L_{fi} 은 v_{fx} 가 6mm/sec일 때 최소이며, 이는 Fig. 7의 결과와 같다. 가공조건 중 절삭

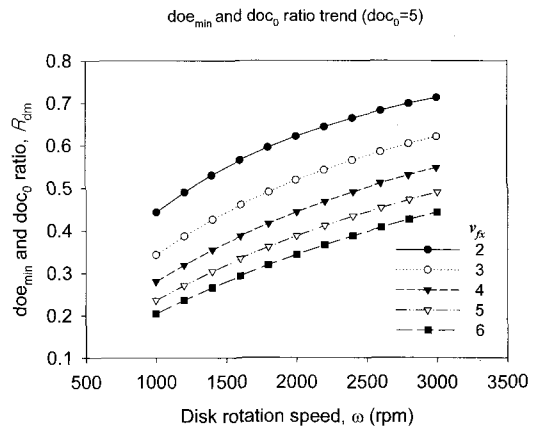


Fig. 10 R_{dmi} trend for trend for w and v_{fx}

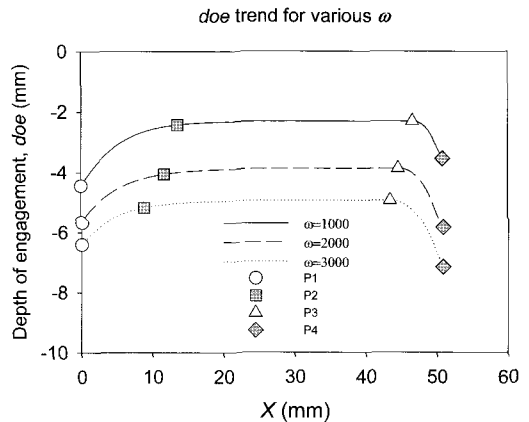


Fig. 11 Flat zone point trend for w

깊이만 변화시킨 경우($v_{fx}=5.0, w=2000.0$), 절삭깊이가 증가할수록 P2가 늦어지고 P3는 빨라지는 것으로 나타났다 (Fig. 13). 따라서 L_{f1} 도 감소하게 되며 유사한 R_{f1} 의 경향을 확인할 수 있다(Figs. 5, 6).

평면구간 특징점의 변화는 절삭깊이를 변화시킨 경우가 절삭속도나 이송속도를 변화시킨 경우와 다르게 나타났다. 이러한 경향을 좀 더 확인하기 위하여 여러가공조건 조합으로 동일한 평면구간 최소절입깊이, doe_{min} 을 생성하는 경우에 대하여 비교한다. 절삭깊이, 절삭속도 및 이송속도가 각각 10mm, 3mm/sec 및 1200rpm인 경우를 기준으로 이와 동일한 doe_{min} 을 나타내는 절삭깊이 8과 6mm에 대한 가공조건을 실시시험을 통하여 확인하였다. Fig. 14(a)는 이에 대한 결과이며 특징점을 좀 더 효과적으로 표시하기 위하여

가공면형상에 offset을 추가하여 Fig. 14(b)에 비교하였다. 동일한 doe_{min} 의 평면구간을 생성하지만 절삭깊이가 클수록 평면구간길이가 작은 것을 확인할 수 있다.

3.4 디스크 변형

평면구간의 특징점 변화를 이해하기 위하여 디스크 변형 추이를 비교하였다(Figs. 15, 16). 이송속도가 증가하면 절입깊이가 작아지고 디스크가 더 많이 변형하여 P2와 P3의 생성이 늦어진다(Fig. 15). 이는 이송속도의 변화에 따른 절입깊이의 변화를 나타낸 Fig. 12의 결과와 동일하다. P1과 P4는 공작물상에서 가공시작점과 가공종료점을 나타낸다. Fig. 2에 설명된 디스크의 회전중심 G와 변형중심 J의 이동 추이는 평행하게 나타나고 있다. 절삭깊이가 증가할수록 디

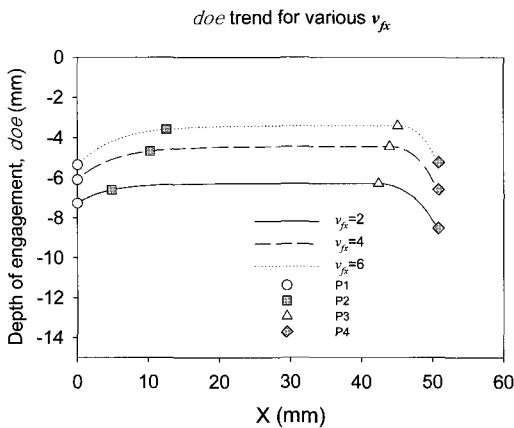


Fig. 12 Flat zone point trend for v_{fx}

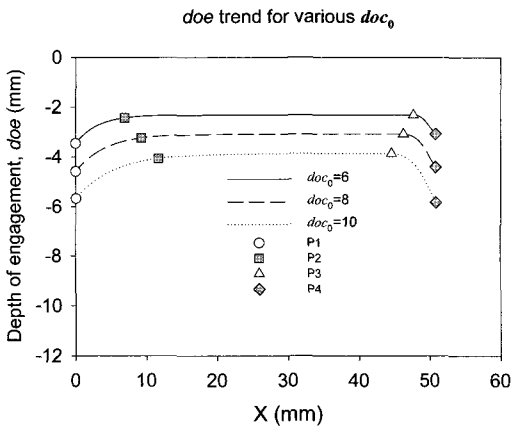
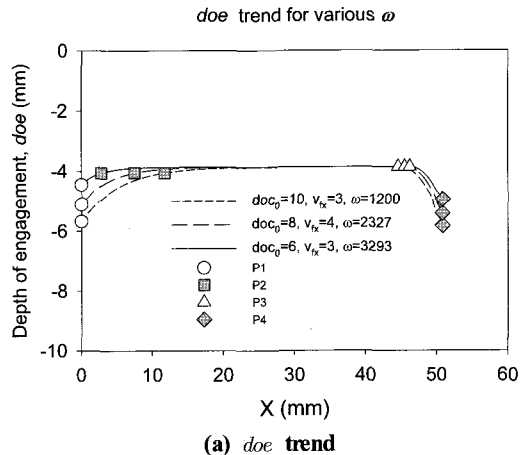
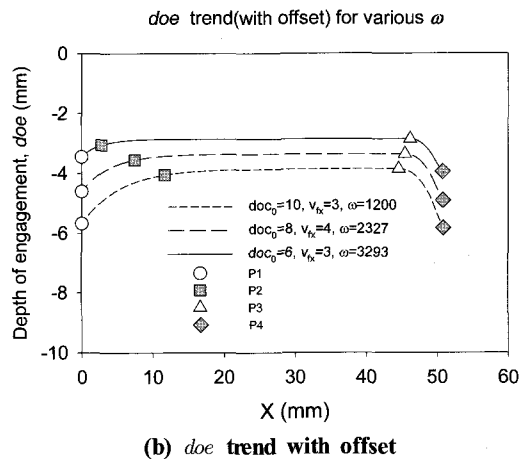


Fig. 13 Flat zone point trend for doc_0

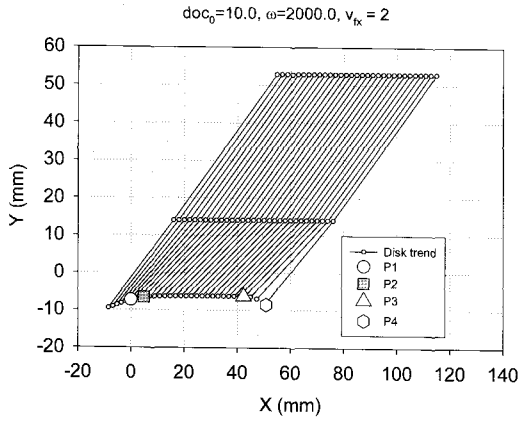


(a) doe trend

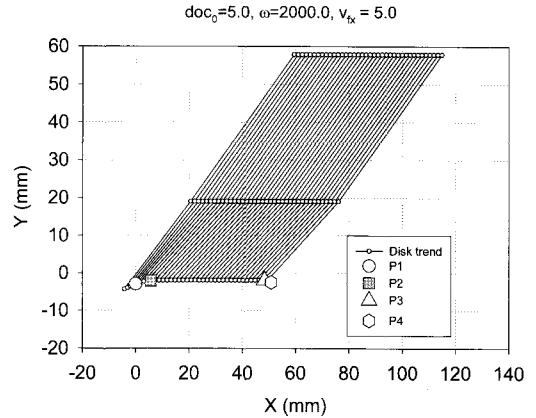


(b) doe trend with offset

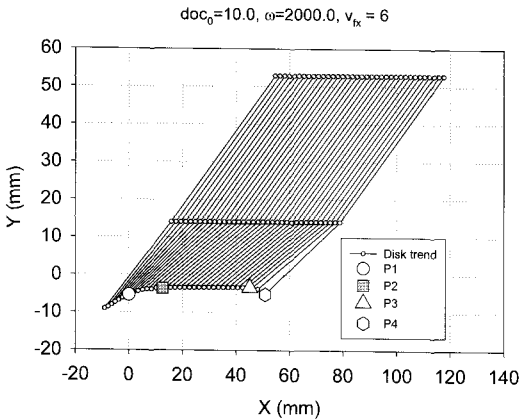
Fig. 14 Flat zone point trend for w



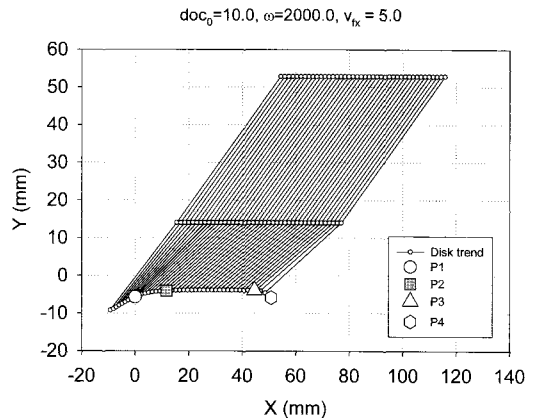
(a) $v_{fx}=2$ (mm/sec)



(a) $doc_0=5$ (mm)



(b) $v_{fx}=6$ (mm/sec)



(b) $doc_0=10$ (mm)

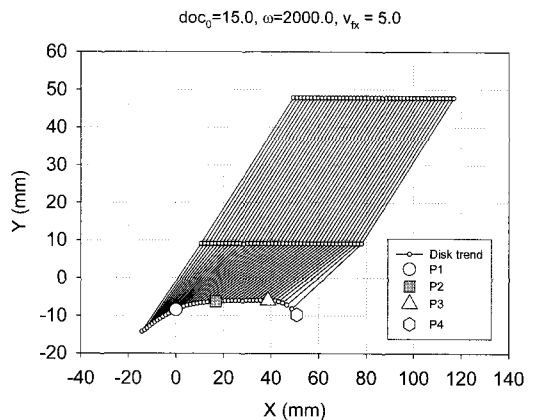
Fig. 15 Disk deflection trend comparison for v_{fx}

스크와 공작물간에 거리가 가까워지며 디스크의 회전중심과 변형중심의 위치가 Fig. 16의 좌표면에서 낮아진다. Fig. 16에서 디스크의 최저점이 최초설정된 절삭깊이와 동일한 위치에서 시작하는 것을 나타내고 있다. 또한 디스크가 공작물과 더욱 근접한 위치에서 디스크의 변형이 증가하므로 Fig. 15와 달리 P2의 생성은 늦어지고 P3는 빨라지게 되는데 이는 Fig. 14의 결과와 일치한다.

4. 결론

본 연구에서 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존 디스크 연삭가공모델을 이용한 평면가공공간의 특



(c) $doc_0=15$ (mm)

Fig. 16 Disk deflection trend comparison for doc_0

징을 나타내는 작업단계점을 정의하고 평면구간의 특성을 정량화시킬 수 있는 평면구간비, 절삭깊이비와 같은 특징인자들을 정의하였다.

- (2) 작업단계점의 각 축성분간의 관계비교에서 절삭깊이에 대한 y축성분의 비들과 절삭깊이비 간에 상관관계가 높은 것으로 나타났다 .
- (3) 평면구간비는 절삭깊이가 작거나 절삭속도가 클수록 증가하였으며 절삭깊이비는 절삭깊이의 영향을 크게 받지 않았으나 이송속도나 절삭속도가 클수록 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 디스크변형추이 가시화를 통하여 가공이 진행되는 과정을 확인하고 작업단계점이 변화하는 성향을 확인하였다.

본 연구에서 정의된 평면가공 특징인자의 변화경향은 공정 중에 나타나는 디스크각의 변화와 연계될 수 있다.

후 기

이 논문은 2005년도 경희대학교 연구년 지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Kurfess, T. R., 1988, "Verification of Dynamic Grinding Model", *Trans. ASME, J. of Dynmic Sys and Control*, Vol. 110, No. 4, pp. 403~409.

(2) Lim, H. S., Ryu, B. H., Gong, J. H. and Kim, H. W., 2004, "Determination of Diamond Wheel Life in Ceramic Grinding", *Transaction of KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 16~21.

(3) Chi, L. Z., Kwak, J. S. and Ha, M. K., 2004, "Geometric Error Prediction of Ground Surface by Using Grinding Force", *Transaction of KSMTE*, Vol. 13, No. 2, pp. 9~16.

(4) Kwak, J. S. and Ha, M. K., 2004, "Effects of Traverse Speed on Dimensional Error in Abrasive Water-Jet", *Transaction of KSMTE*, Vol. 13, No. 3, pp. 1~7.

(5) Yoo, S. M., Choi, M. J. and Kim Y. J., 2000, "Model Development of Flexible Disk Grinding Process", *KSME international J.*, Vol. 14, No. 10, pp. 1114~1121.

(6) Yoo, S. M. and Shin, G. S., 2000, "A Study of the Flexible Disk Grinding Process with Variable Control Stages", *Transaction of KSMTE*, Vol. 9, No. 1, pp. 81~87.

(7) Yoo, S. M., 1996, "A Study on the Flat Surface Generation Using Flexible Disk Grinding", *J. of the KSPE*, Vol. 13, No. 7, pp. 158~166.

(8) Yoo, S. M., 2003, "Disk Grinding Process with Linear Motor system", *Proc. of KSMTE Fall Conf.*, pp. 374~378.