

적층 연삭 슷돌의 평면 연삭 공정 적용에 관한 연구

곽철훈*, 이은종**, 김강***

A Study on the Application of Laminated Grinding Wheel to Surface Grinding Operation

Chol-hoon Guak*, Eun-jong Lee**, Kang Kim***

ABSTRACT

To reduce two preprocess operations to one in the surface grinding operation, the laminated grinding wheel was introduced, and its availability has already been investigated in the cylindrical grinding process. Thus, in this study the experiment was carried out to attempt to prove that the laminated grinding wheel can be used in the surface grinding process with respect to the roughness and grinding force.

Key Words : Surface grinding(평면연삭), Laminated grinding wheel(적층연삭스�돌), Surface roughness(표면거칠기), Grinding force(연삭력)

1. 서론

연삭 작업을 수행하기 위하여는 전처리 과정, 즉 연삭 슷돌의 밸런싱(balancing), 트루잉(truing), 드레싱(dressing) 작업이 필수적으로 요구된다. 일반적으로 높은 표면 정밀도가 요구되는 경우에는 연삭 슷돌의 교체 및 이 새 가지 비부가가치 작업이 요구되므로 이러한 작업의 번거로움과 비부가가치 작업 시간을 감소시키기 위하여 적층 연삭 슷돌(laminated grinding wheel)이 개발되었다.

원통 연삭 작업에서는 적층 연삭 슷돌이 일반 연삭 슷돌에 비하여 장점이 있는 것으로 실험을 통하여 확인되었다.⁽¹⁾ 그러나 단속적인 가로 이송(cross-feed)이 적용되며 하향 및 상향 연삭이 교대로 발생하는 평면 연삭에서는 적층 연삭 슷돌의 적용 가능성에 대한 검증이 된 바가 없다. 또한 기존 연구들에서는 표면 거칠기(surface roughness), 연

삭력(grinding force) 등에 관한 특성들과 그에 미치는 영향들에 대하여만 다루었다. 이외에 표면 거칠기와 연삭력과의 관계는 실험을 통하여 규명된 바 있으며, ^{(2)~(5)} 연삭력을 해석하고 모델화하는 방법이 제시되기도 하였다.^{(6)~(7)}

본 연구에서는 적층 연삭 슷돌이 평면 연삭 공정에 적용되어 황삭 연삭 작업과 정삭 연삭 작업을 하여야 하는 번거로움을 제거함으로써, 2공정을 1공정으로 줄여서 작업할 수 있는 가능성을 표면 거칠기 및 연삭력과 같은 연삭 특성에 대한 실험적 연구를 통하여 알아보려고 한다.

2. 실험

2.1. 실험 장치

본 실험에서 사용된 평면 연삭기는 우진 기공사의 WSG-7050A 기종이다. 공작물은 전자철을 이용

* 평일산업 주식회사 연구소
** 전안공업대학 금형과
*** 국민대학교 기계자동차공학부

하여 테이블 위에 고정된다. 본 연삭기에는 미세 이송을 위하여 Mitutoyo사의 디지털 스케일(0.0005 mm)을 설치하였다. Table 1은 실험에 사용된 연삭기의 주요사양을 나타내고 있다.

Table 1 Specification of surface grinding machine

Type	Hydraulic		
Size	Table (length×width)	740×500mm	
Table	Average traverse speed	0.5~20m/min	
Head	Automatic down-feed	0.002~0.03mm	
	Manual down-feed	Small down-feed	0.002~0.03mm
		Feed/rev.(handle)	1.0mm
		Feed/notch mark	0.005mm
Wheel	Max. outer dia.×width×inner dia.	∅305×38×∅127mm	
	Revolution(50/60Hz)	1500/1800rpm	

사용된 슷들의 지립은 산화 알루미늄(Al₂O₃)으로 결합도는 중간이며 조직은 7이다. 각 지립의 결합 방법은 비트리파이드(vitrified) 결합으로 만들어졌다. 여기서, 적층 연삭 슷들은, 한 종류의 지립만으로 제작된 일반 연삭 슷들과는 다르게, 슷들 폭의 양쪽에 황삭 지립, 가운데에 정삭 지립들을 압착하여 세 개의 층으로 이루어진 슷들을 의미한다.

본 논문에서는 편의상 적층 연삭 슷들의 양 외곽 층의 지립을 황삭 지립, 가운데 층의 지립을 정삭 지립이라고 호칭하고 적층 연삭 슷들은 LW, 일반 연삭 슷들은 GW로 표기한다. 슷들 기호 뒤에는 입도를 수치로 명기하는데, LW의 경우 황삭 지립의 입도/정삭 지립의 입도로 표기한다. Fig. 1 과 Fig. 2에서는 일반 연삭 슷들과 적층 연삭 슷들의 치수와 적층 연삭 슷들의 구성을 보여주고 있다.

실험에서는 연삭액으로 수용성 W2종 1호 연삭액인 한국 쉘 석유(주)의 셀루브리콜 그린을 물과 혼합하여 사용하였으며, 드레서는 나고야 다이아몬드 공업주식회사의 다이아몬드 드레서로 크기는 1/2 캐럿, 직경은 12mm를 사용하였다.

2.2 시편

본 실험의 시편은 기계 부품으로 널리 사용되는 기계 구조용 탄소강 SM45C를 길이 120mm, 폭 90 mm, 높이 30mm인 직육면체로 가공하여 고주파 열처리하였다.

시편의 열변형에 의한 비틀림 현상이 발생하는 것을 보정하기 위하여 GW 46으로 모든 시편의 상·하 면을 가공하였다. 또한 실험의 신뢰도를 높이기 위하여, 재가공된 시편 중 다섯 개를 임의로 선택하여 표면 경도를 측정하였다. Fig. 3은 시편의 치수 및 경도 측정 위치를 나타내고 있으며, 실험에서 사용된 시편의 평균 경도는 61.3 로크웰(Rockwell) 경도평균 경도 값을 기준으로 ±6% 이내에 속하였다.

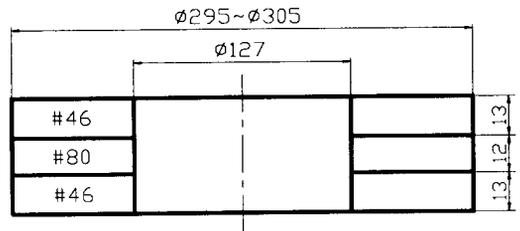


Fig. 1 Dimension of general grinding wheel

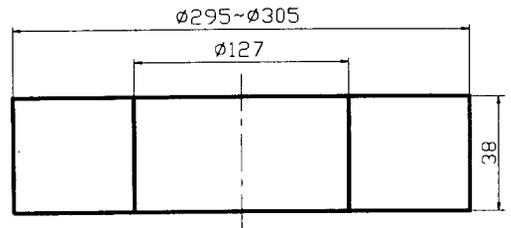


Fig. 2 Dimension of laminated grinding wheel

실험 중 외란에 의한 실험 오차를 최소화하기 위하여, 실험 직전 한 시간동안 연삭액을 공급하면서 슷들의 회전 속도, 이송 속도 및 가로 이송을 실험 조건과 동일한 조건하에서 예비 운전함으로써 연삭기의 상태가 정상 상태를 유지하도록 하였다.

2.3 측정 및 실험

공작물의 표면 거칠기는 드레싱과 깊은 관련이 있으므로, 실험 전에 항상 슷들을 10μm씩 4회 절입하여 드레싱을 수행하였다.

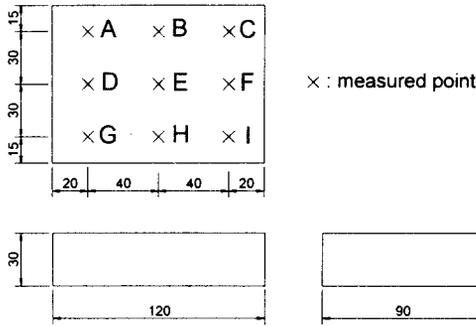


Fig. 3 Workpiece shape and hardness measurement points

아울러 임계 연삭 깊이(threshold grinding depth)의 영향으로 인하여 정확한 절입 깊이를 주는 것도 어려운 문제이다. 그러므로 실험을 수행하기에 앞서, 시편에 전입 깊이를 0.005mm 정도 주어서 가공하고 스파크 아웃을 1회 실시한 후에 바로 이어서 실험을 수행하였다.

2.3.1 표면 거칠기

표면 거칠기 측정기를 위하여 영국 Rank-Taylor Hobson사의 Form Talysurf Series 2를 사용하였다. 이 장비는 Traverse unit, Column, Traverse table, Interface unit, 그리고 데이터 처리 장치인 IBM PC와 출력용 프린터로 전체 시스템이 구성되어 있다.

Table 2에서는 이 표면 거칠기 측정 장치의 제원을 나타내고 있다. 실험은 중심선 평균 거칠기(R_a)와 최대 높이 거칠기(R_{max})를 측정하였으며, 분석을 위한 측정기의 기본 설정 값은 Table 3과 같다. 공작물 상에서 임의의 9부분을 선택하여 측정하였는데, 실험 조건 중 최대 가로 이송인 6mm 보다 큰 10mm 구간에 대하여 트래버스가 진행되는 방향과 직각을 이루는 가로 이송 방향으로 측정하였다.

본 실험은 가공 변수의 변화에 따른 공작물의 표면 거칠기를 알아보기 위하여 수행되었고, 이를 위하여 슷들의 종류, 절입 깊이 및 가로 이송을 변화시키며 적층 연삭 슷들과 일반 연삭 슷들로 가공된 시편 표면의 중심선 평균 거칠기와 최대 높이 거칠기를 측정, 분석하였다. 공작물 이송속도는 0.110m/s로 고정하여 실험하였다.

Table 2 Specification of roughness measurement equipment

Traverse unit	
Traverse length	120 mm
Measuring speed	1 mm/sec, $\pm 5\%$
Dimension	365 × 120 × 160 mm
Column	
Range	450 mm
Height	630 mm
Traverse table	
Range	50 mm
Stylus	
Tip radius	1.5 ~ 2.5 μm
Stylus force over full range	70 ~ 100 mgs _t

Table 3 Roughness measurement condition

Measurement mode	Value
Assessment mode	roughness
Cutoff length	0.08 mm
Data length	10 mm
Number of cutoffs	150
Filter type	Gaussian
Low pass cutoff and bandwidth	1.25 μm

또한, 실험 조건에 따라서 일정한 깊이를 절입한 후, 1회 가공하였다. 스파크 아웃(spark-out)은 표면 거칠기에 영향을 미쳐서 그 표면 거칠기 값을 작게 하므로 본 실험에서는 실시하지 않았다. Table 4는 이 실험의 가공 조건을 보여준다.

Table 4 Grinding condition for measuring surface roughness

Fixed condition	Value
Grinding wheel speed	1800 rpm
Traverse speed	0.110 m/s
Variable condition	Value
Grinding wheel	WA46K7V, WA60K7V, WA80K7V, LW 46/80
Depth of cut	5, 10, 15, 20 μm
Cross feed per pass	2, 4, 6 mm

2.3.2 연삭력

연삭력은 일본 사토(佐藤)공업주식회사의 AST식 절삭 공구 동력계(AST-GLS)와 일본 KYOWA사의 strain amplifier를 사용하여 측정하였다. Table 2-5은 실험에서의 공구 동력계의 제원을 보여주고 있다.

Table 5 Specification of the dynamometer

Model		AST-GL
Max. measurement value	Normal force	50 kgf
	Tangential force	25 kgf
Maximum workpiece size (length × width × height)		50 × 20 × 20 mm
Dynamometer (diameter × height)		∅ 160 × 65 mm

적층 연삭 슷돌과 일반 연삭 슷돌 작업 중 어느 쪽이 연삭력이 크게 발생하는 지를 알아보기 위하여 본 실험을 하였다. LW 46/80 및 적층 연삭 슷돌을 구성하는 황삭 지립과 정삭 지립의 중간 입도를 갖는 #60 지립으로 제작된 GW 60으로 절입 깊이를 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m로 하여 실험하였다. 이때, 각각의 절입 깊이 별로 가로 이송을 2mm/pass, 4mm/pass, 6mm/pass로 설정하여, 연삭 작업을 수행하며 연삭력을 측정하였다. 공작물 이송속도는 0.110m/s로 고정하였다. 연삭력은 슷돌이 시편에 접근할 때부터 시편을 벗어날 때까지 측정하였고, 연삭액을 연삭 작업이 수행되는 부분에 동일한 위치에서 같은 양으로 분사하였다. 이 때 연삭 중 스파크 아웃은 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면 거칠기

적층 연삭 슷돌과 일반 연삭 슷돌을 절입 깊이와 가로 이송에 변화를 주어 실험하였다. Table 6과 Fig. 4 및 Fig. 5는 실험으로 얻은 중심선 평균 거칠기와 최대 높이 거칠기의 평균 측정값과 이 값을 그래프로 나타낸 것이다.

이 표와 그림에서는 모든 실험에 대하여, 절입 깊이가 증가할수록 중심선 평균 거칠기와 최대 높이 거칠기가 증가하는 것을 보여준다.

Table 6 Surface roughness (μ m)

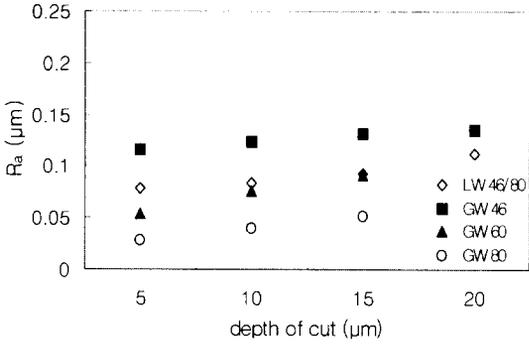
Cross feed	Wheel type	2mm/pass		4mm/pass		6mm/pass	
		R _a	R _{max}	R _a	R _{max}	R _a	R _{max}
5 μ m	GW46	0.116	1.788	0.121	1.949	0.149	2.422
	LW	0.079	1.241	0.082	1.456	0.096	1.683
	GW60	0.054	1.176	0.079	1.384	0.085	1.599
	GW80	0.029	1.009	0.042	1.214	0.054	1.130
10 μ m	GW46	0.123	1.800	0.146	2.134	0.169	2.195
	LW	0.084	1.465	0.100	1.625	0.123	1.793
	GW60	0.075	1.392	0.091	1.554	0.111	1.764
	GW80	0.040	1.225	0.055	1.432	0.070	1.523
15 μ m	GW46	0.131	2.016	0.181	2.412	0.196	2.643
	LW	0.093	1.734	0.102	1.863	0.131	2.103
	GW60	0.091	1.676	0.109	1.827	0.131	2.214
	GW80	0.052	1.572	0.084	1.624	0.114	1.823
20 μ m	GW46	0.136	2.154	0.194	2.542	0.201	2.814
	LW	0.112	1.878	0.121	2.031	0.175	2.211

또한, 가로 이송이 증가하면 절입 깊이 증가 시와 마찬가지로 중심선 평균 거칠기와 최대 높이 거칠기가 증가하였다. 일반 연삭 슷돌의 경우, 슷돌의 입도가 클수록, 즉 지립의 크기가 작을수록 중심선 평균 거칠기와 최대 높이 거칠기가 감소하였다.

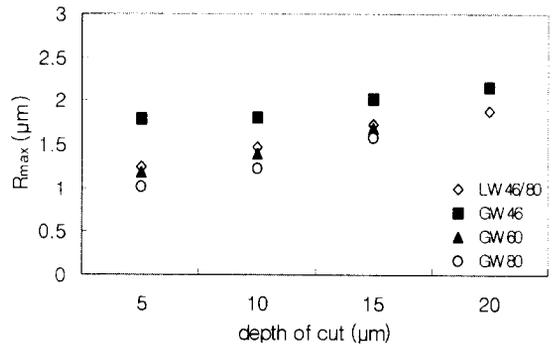
실험에 사용된 적층 연삭 슷돌 LW 46/80으로 가공된 시편의 표면 거칠기는, 이 적층 연삭 슷돌을 구성하는 정삭 지립으로 제작된 일반 연삭 슷돌, GW 80으로 가공된 면보다 거친 것이 확인되었다.

그러나, 이 적층 연삭 슷돌로 가공된 면은, 적층 연삭 슷돌의 황삭 지립으로 구성된 일반 연삭 슷돌, GW 46으로 가공된 면보다 곱다. 따라서, 적층 연삭 슷돌로 가공된 시편의 표면 거칠기는, 동일한 조건 하에서, 적층 연삭 슷돌의 황삭 지립으로 제작된 일반 연삭 슷돌로 가공된 시편보다는 그 값이 작았고, 정삭 지립의 일반 연삭 슷돌로 가공된 것보다는 그 값이 큰 것을 알 수 있다. 또한, 적층 연삭 슷돌의 황삭 지립과 정삭 지립의 중간 정도의 입도를 갖는 GW 60으로 가공된 시편과 비교하

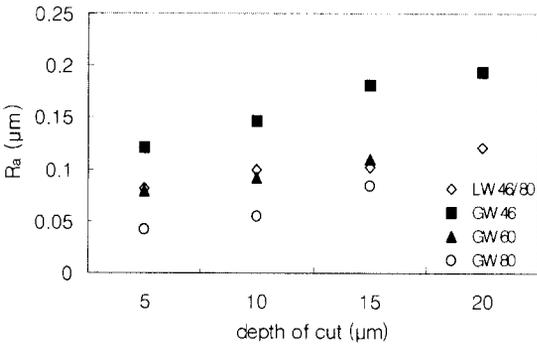
a) cross-feed : 2mm/pass



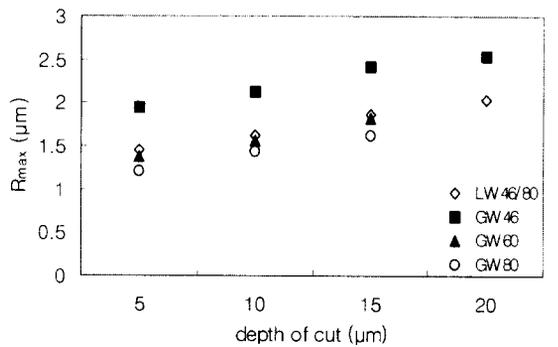
a) cross-feed : 2mm/pass



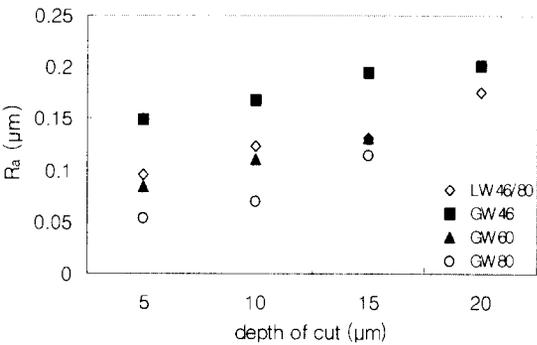
b) cross-feed : 4mm/pass



b) cross-feed : 4mm/pass



c) cross-feed : 6mm/pass



c) cross-feed : 6mm/pass

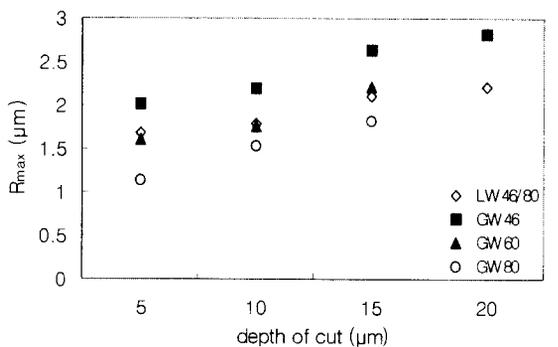


Fig. 4 Relationship between R_a and depth of cut

Fig. 5 Relationship between R_{max} and depth of cut

여 보면, LW 46/80으로 가공된 시편의 표면 거칠기는 절입 깊이가 작은 구간에서는 GW 60으로 가공된 시편의 표면 거칠기보다 상대적으로 컸으며,

절입 깊이가 커지는 구간으로 갈수록 이러한 특성은 감소되어, 15 μ m 절입 시에는 거의 동일한 표면 거칠기를 나타내었다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 적층 연삭 슷돌에 의하여 가공된 공작 물의 표면은 중간 입도의 일반 연삭 슷돌로 가공된 공작물의 표면보다 다소 거친 것을 알 수 있다. 이는 평면 연삭 공정의 고유한 작업 특성, 즉, 상향 및 하향 연삭 작업의 교대 수행 및 단속적인 가로 이송에서 기인된 것으로 추측된다.

그리고 각각의 연삭 슷돌에 대하여 20 μ m 절입 시에는 절입 깊이가 15 μ m 이하 구간(10 μ m 이하)에서 전되는 현상을 볼 수 있었다.(Fig. 4) 이것은 지립의 크기에 비하여 상대적으로 큰 절입 깊이를 주었을 때, 시편 표면이 검게 그을리는 버닝(burning) 현상의 발생에서 기인된 것으로, 표면 거칠기의 측면에서 볼 때, GW 60을 사용한 연삭의 경우에는 최대 절입 깊이가 15 μ m 정도인 것으로 사료된다.

LW 46/80으로 가공된 시편의 최대 거칠기는, 절입 깊이가 상대적으로 작은 구간(10 μ m 이하)에서는 작았다. 그러므로, 평면 연삭 공정에서, 절입 깊이가 큰 구간에서 적층 연삭 슷돌의 적용 효과가 있음을 알 수 있었다.

3.2 연삭력

일반적으로 원통 연삭 공정 중에 연삭력은 처음 절입되는 부분에서 가장 큰 값을 보이고 점차 감소되는데 비하여, 평면 연삭 공정에서의 연삭력은 단속적인 가로 이송과 상향과 하향 연삭의 교대 수행에 의하여 원통 연삭과는 다른 경향을 나타낸다. 평면 연삭 중 연삭력 변화는 원통 연삭에 비하여 상대적으로 거칠고 불규칙한 표면을 생성시킬 것으로 추측된다. 절입 깊이와 가로 이송을 변화를 주어 연삭력을 실험한 결과는 Table 7에 제시되었으며, Fig. 6과 Fig. 7는 그래프로 나타낸 것이다.

Table 7에서 보는 바와 같이, 연삭 슷돌과 연삭 조건에 따른 연삭력의 변화는, LW 46/80으로 가공할 경우에 GW 60으로 가공할 때보다 집선 연삭력이 평균적으로 약 30%정도 작게 나타났다. 그러나 Fig. 7의 그래프에서의 경향을 살펴보면, LW 46/80과 GW 60의 법선 연삭력은 거의 비슷한 값을 나타낸다.

참고 문헌을 바탕으로 생각해보면 LW 46/80은 GW 60과 거의 비슷한 실제 연삭량(actual material

Table 7 Average grinding force (kgf)

Cross-feed	Depth of cut	Wheel type	F _t	F _n	F _n /F _t
2mm/pass	5 μ m	LW 46/80	0.40	2.00	5.00
		GW 60	0.60	2.30	3.83
	10 μ m	LW 46/80	1.00	3.20	3.20
		GW 60	1.40	3.60	2.57
	15 μ m	LW 46/80	1.70	4.60	2.70
		GW 60	2.00	4.50	2.25
4mm/pass	5 μ m	LW 46/80	1.60	4.50	2.81
		GW 60	1.80	5.00	2.78
	10 μ m	LW 46/80	1.70	5.00	2.94
		GW 60	2.40	5.80	2.42
	15 μ m	LW 46/80	2.30	6.00	2.61
		GW 60	2.90	6.10	2.10
6mm/pass	5 μ m	LW 46/80	1.60	4.80	3.00
		GW 60	2.00	5.40	2.70
	10 μ m	LW 46/80	2.00	7.00	3.50
		GW 60	3.00	7.80	2.60
	15 μ m	LW 46/80	3.00	7.80	2.60
		GW 60	4.00	9.00	2.25

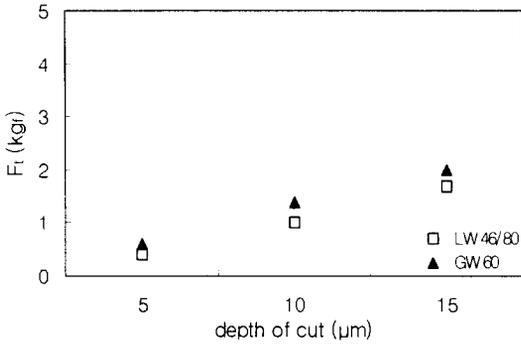
removal rate)을 가지지만, 실제적으로는 작은 집선 연삭력을 유발한다고 볼 수 있다.⁽⁸⁾ 그러므로, 적층 연삭 슷돌은 연삭력에서 일반 연삭 슷돌에 비하여 작은 집선 연삭력을 유발하지만, 공작물 제거율은 비슷할 것으로 추정된다.

4. 결론

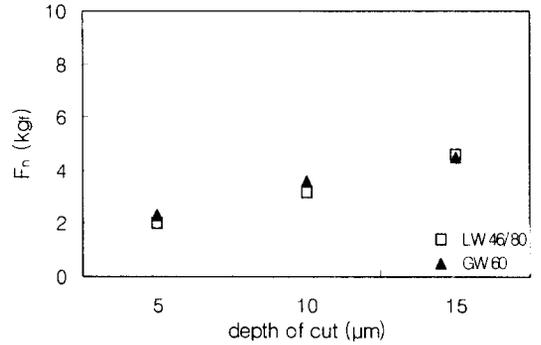
적층 연삭 슷돌의 평면 연삭에 대한 적용 가능성을 파악하고자 본 연구를 수행하였다. 평면 연삭 공정에서 적층 연삭 슷돌(#46/#80/#46)과 세 가지의 일반 연삭 슷돌(#46, #60, #80)을 절입 깊이, 가로 이송에 변화를 주어 실험하였으며, 표면 거칠기 및 연삭력을 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 평면 연삭 공정에서도, 적층 연삭 슷돌로 가공된 시편의 표면 거칠기는 적층 연삭 슷돌의 향삭 지립과 동일한 일반 연삭 슷돌로 가공된 시

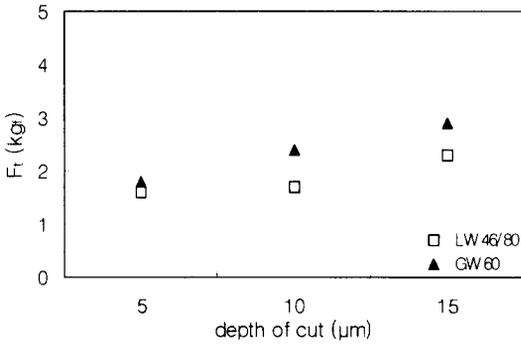
a) cross-feed : 2mm/pass



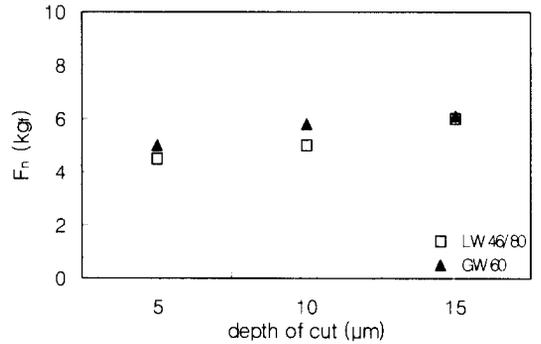
a) cross-feed : 2mm/pass



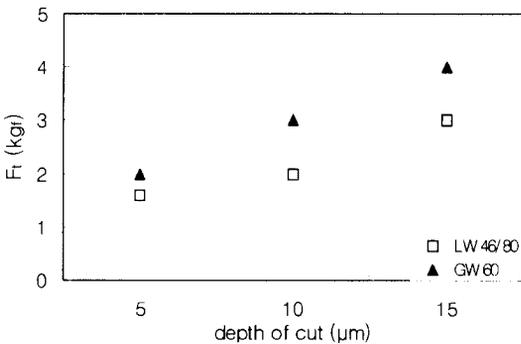
b) cross-feed : 4mm/pass



b) cross-feed : 4mm/pass



c) cross-feed : 6mm/pass



c) cross-feed : 6mm/pass

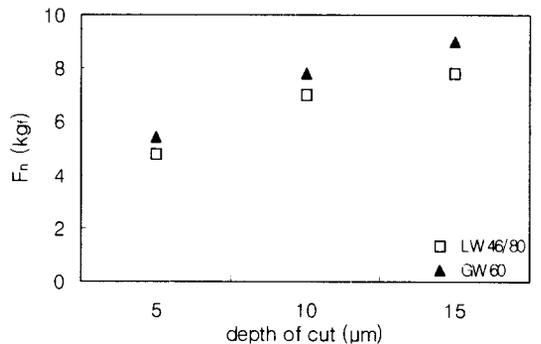


Fig. 6 Relationship between F_t and depth of cut

Fig. 7 Relationship between F_n and depth of cut

편의 표면 거칠기보다 작았고, 정삭 지립의 일반 연삭 스톨로 가공된 시편의 표면 거칠기보다는 큰 특성을 나타내었다.

2) 적층 연삭 스톨(#46/#80/#46)로 가공된 시편의 표면 거칠기는 절입 깊이가 작은 구간(10 μ m 이하)에서는 중간 지립을 갖는 일반 연삭 스톨

(#60)로 가공된 시편보다 크지만, 절입 깊이가 큰 구간($15\mu\text{m}$ 이상)에서는 중간 입도의 일반 연삭 스톨의 시편보다 작다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 적층 연삭 스톨을 사용할 때에는, 일반 연삭 스톨을 사용할 때보다는 상대적으로 큰 절입 깊이를 주는 것이 바람직하다.

- 3) 적층 연삭 스톨(#46/#80/#46)로 가공시 같은 연삭 조건 하에서 중간 지립의 일반 연삭 스톨(#60)과 비교하여 접선 연삭력이 30%정도 작고, 법선 연삭력에서는 거의 비슷하게 나타났다. 이를 통하여 적층 연삭 스톨은 연삭력에 있어서 일반 연삭 스톨보다 상대적으로 작은 접선 연삭력을 유발시키는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김광희, "적층연삭스톨의 가공특성에 관한 연구," 석사학위 청구논문, 국민대학교, pp. 28, 1997.
2. 小野浩二, "研削任上," pp. 60, 1976.
3. 최종만, "연삭가공에 있어서 연삭력과 가공정도에 관한 연구," 석사학위논문, 단국대학교, pp. 41, 1984.
4. Schlesinger, G., "Die Werkzeugmaschinen," 1936.
5. Salje, E., "Grundlagen des Schleifvorganges," Werkstatt und Vertrieb, February, 1953.
6. Backer, W. H. and Merchant, M. E., "On the basic mechanics of the grinding process," Trans. of the ASME, No.64, Prod. 25, pp. 141~148, 1964.
7. 須藤ほか, "研削加工のシミュレーションプログラムの開発," 機械技術研究所報告, 第111号, 1981.
8. Drozda, T. J., Wick, C., "Tool and Manufacturing Engineers Handbook," Forth Edition, Volume 1-Machining, SME, pp. 11.109~11.118, 1983.