

다기공흡형 단속연삭지석의 개발에 관한 연구 (Development of Discontinuous Grinding Wheel with Multi-Porous Grooves)

김 정 두, 김 동 섭*, 강 윤 희(KAIST 기계공학과), 이 영 서(제일연마공업주 기술연구소)
Jeong-Du Kim, Dong-Xie Jin*, Youn-Hee Kang and Young-Seo Lee

KeyWord : Discontinuous Grinding Wheel(단속 연삭지석), Multi-porous Grooves(다기공흡),
Wheel Production Process(지석제작공정), Grinding characteristics(연삭특성)

ABSTRACT : Conventionally, grinding of stainless steel, aluminium alloy, copper alloy, and titanium alloy is difficult due to the mechanical properties such as low hardness, high toughness which result in the loading of wheel and the poor surface finish. In order to grind this sort of materials easily, discontinuous grinding wheel with multi-porous grooves was newly developed. The multi-porous grooves were formed during wheel production. This discontinuous grinding wheel drastically increases the grinding performance. It is desirable to use the discontinuous grinding wheel when grinding materials with high efficiency and accuracy which is impossible by conventional wheels.

In this paper, the construction and manufacturing method of grinding wheel with multi-porous grooves are explained. The grinding characteristics of discontinuous grinding wheel was also illustrated.

1. 서 론

최근 항공우주, 자동차 산업 등에 널리 사용되는 스테인레스강, 알루미늄합금, 동합금, 티타늄 등의 고인성 재료는 현존하는 범용지석으로 연삭하면 지석의 눈메움(loading) 현상과 공작물 표면상의 연삭누름(grinding burn) 현상이 발생하여 가공성이 대단히 나쁜 것으로 알려져 있다. 고인성재료에 대한 연삭지석개발에 관한 연구가 일부 발표된 바 있으나 근본적인 해결에는 부족한 실정이다.

절연성이 낮은 강이나 열처리강의 고능률 연삭시 공작물의 연삭누름 현상과 균열 현상을 없애기 위한 방법으로 다이아몬드 크러싱 롤(diamond crushing roll)을 이용하여 범용지석가공면에 나선형 홈을 형성시켜 단속연삭을 실현한 연구가 보고되고 있다.^[1,2] 이 연삭방법은 연삭액과 공기가 연삭구역까지 충분히 공급되어 냉각효과 및 눈메움

현상을 개선시켜, 연삭저항 및 연삭열이 매우 저하되는 효과와 가공정도 및 표면거칠기가 향상되는 효과를 얻을 수 있으나 실용화의 측면에서 볼 때 나선형 홈을 형성시키기 위한 전용 다이아몬드 롤이 필요하고, 홈파기 공정이 어려울 뿐만 아니라 홈 깊이도 극히 제한을 받게된다. 그 외에 CBN스탁을 이용한 조립식 단속지석을 크립피드(creep feed)연삭에 도입하여 세라믹과 난삭재의 고능률, 고가공품질 연삭을 실현한 연구^[3,4]와 기계고정형 단속지석을 이용하여 스테인레스강 연삭시 연삭저항을 1/2로 감소시키며 연삭누름 현상이 없고 가공 표면거칠기도 크게 개선시킨 연구가 보고된 바 있다.

그러나, 조립식 지석은 연삭에 이용할 수 있는 지석스탁의 유효두께가 제한되어 지석의 수명이 짧고, 조립 및 장착등 준비시간이 길어 가공비가 높아진다. 기계고정형 단속지석은 구조의 원인으로 최적단속비를 보장할 수 없기 때문에 지석의 마멸이 크며 지석의 이용률도 매우 낮아 실용화에는 문제점이 많다.

따라서, 본 연구에서는 지석 제작단계에서 홈을 형성하고 홈에 기공을 형성시키는 결합재를 채워 성형시킨 정채형 다기공 단속지석을 개발하여 기존의 범용지석으로는 연삭할 수 없었던 난연삭재료의 고능률, 고정밀 연삭지석을 설계, 제작하였으며, 다기공홈형 단속지석의 연삭기와 연삭특성을 규명하였다.

2. 다기공홈형 단속지석의 설계

Fig.1은 지석표면에 센터의 방향과 평행 되게 직선홈을 형성시킨 구조의 단속지석을 나타낸 것으로 본 논문에서는 직선형 단속지석(STG : Straight Type Discontinuous Grinding Wheel)이라고 호칭하였다. 단속지석에 의한 연삭가공은 홈부분이 가공에 거의 영향을 주지 않기 때문에 연삭가공이 단속적으로 이루어지며 각각의 홈 모서리와 인접한 지석앞날(Leading edge)의 마멸은 연삭이 끝나는 지석뒷날(Trailing edge)의 마멸보다 크게 발생하게 된다. 이러한 부분적 마멸상태를 개선하기 위하여 홈을 지석의 측면에서 지석센터와 일정한 각도(γ)로 형성시켜 연삭시 작부분의 모서리 각도를 둔각으로 설정하였다. 또한 다기공홈층을 지석이 이용할 수 있는 깊이까지 형성시켜 지석의 이용률을 범용지석과 동일하게 하였다.

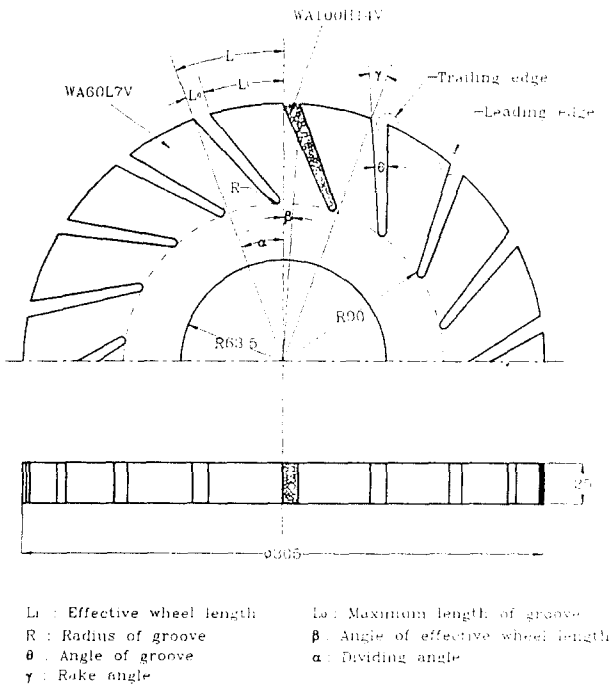


Fig.1 Schematic diagram of the straight type discontinuous grinding wheel(STG) with multi-porous grooves

단속연삭에서 연삭작업에 참여하는 지석부분과 홈부분에 대한 길이 비례는 연삭공정에 매우 큰 영향을 미치는 파라미터이다. 지석이 연삭에 참여하는 비율을 단속비(η)라고 할때 단속비 값은 식(1)과 같다.

$$\eta = \frac{L_1}{L_0 + L_1} \quad (1)$$

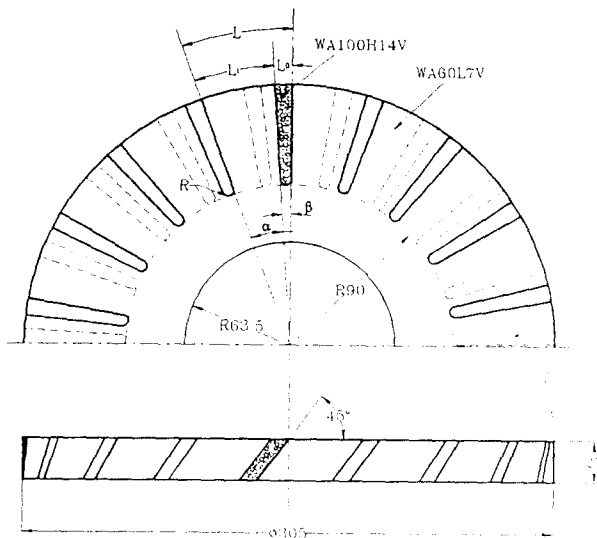
여기서 L_0 은 지석 작업면에서의 홈 길이 [mm], L_1 은 지석 작업면에서 연삭에 참여하는 지석의 길이[mm]를 각각 나타내며 단속비를 연삭지석의 마멸에 관계없이 일정하게 보장하기 위해 홈을 θ 각으로 형성시켜 두께를 깊이에 따라 변화하게 하였다.

Table 1은 제작한 단속지석의 사양으로써 단속비를 0.66과 0.81, 홈수는 32와 18로 선정하였으며, 기호 STG32-6, STG18-8로 직선형 홈수와 단속비 10배의 정수로 각각 표시하였다. 지석의 규격은 치수가 305×127×25 인 평형지석으로 지석본체는 WA60L7V로 제작하고, 홈부분은 지립입도가 본체의 지립입도보다 높은 지립으로 결합도가 연하며 조적이 가장 거친 WA100H4V의 지석으로 65%이상의 기공율을 갖춘 구조로 제작하였다. 본 지석에서 홈부분은 연삭시 연삭력을 받게 되면 지석본체 부분보다 매우 쉽게 마멸되어 거의 연삭작업에 영향을 미치지 않는 단속연삭을 실현하게 된다.

Fig.2는 지석의 표면에 지석의 센터방향과 45° 각도로 홈을 형성시킨 단속연삭지석을 나타내며 본 논문에서는 나선형 단속지석(SPG : Spiral Type Discontinuous Grinding Wheel)이라고 호칭하며, 기호 SPG18-8로 나선형의 홈수와 단속비의 10배 정수로하여 표시한다. 나선형 홈을 형성시킨 단속지석의 홈 모서리 지석은 점진적인 연삭운동으로 연삭충격을 작게 받는다. 또한 지석제작시 홈의 형성은 센터방향으로 일치시켰으며 홈 두께는 β 각으로 점차 작게 하여 지석마멸에 관계없이 단속비를 일정하게

Table 1 The specification of straight type discontinuous grinding wheels

Symbol of wheel	Number of grooves	Dividing angle of groove (°)	Maximum length of groove (mm)	Effective wheel length (mm)	L-L ₀ L ₁ Ratio	Information ratio, η L ₁ L ₀ L ₁
STG18-6	18	10	48	27.2	0.57	0.66
STG18-8	18	10	40	43.2	1.08	0.81
STG32-6	32	10	40	100	2.5	0.66
STG32-8	32	10	40	120	3.0	0.81



L : Effective wheel length L_0 : Maximum length of groove
 R : Radius of wheel β : Angle of effective wheel length
 α : Dividing angle

Fig.2 Schematic diagram of the spiral type discontinuous grinding wheel (SPG) with multi-porous grooves

Table 2 The specification of spiral type discontinuous grinding wheels

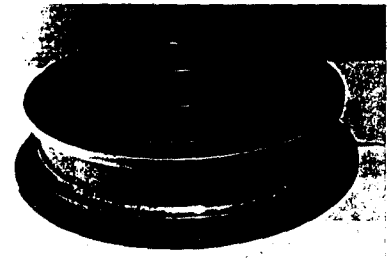
Symbol of wheel	Number of groove	Dividing angle α (°)	Maximum length of groove	Effective wheel length	L_0/L (%)	International ratio μ (mm)
			L_0 (mm)	L (mm)		
SPG18-S	18	20	30	43.2	33.2	1.21

하였다. Table 2는 시험제작한 나선형 단속지석(SPG)의 사양을 나타내었으며 본체와 홈부분의 지석규격은 직선형 단속지석(STG)과 같다.

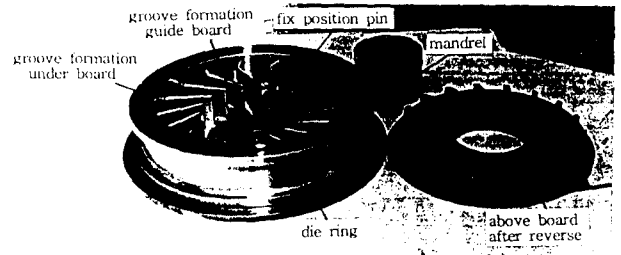
3. 다기공홈형 단속지석의 제작

Fig.3은 다기공홈형 단속지석의 제작용 금형으로 지석의 성형단계에서 기공율이 65%이상의 기공을 포함하고 일정한 크기와 간격으로 분포된 홈을 형성시킬 수 있는 단속지석용으로 개발되었다. 제작용 금형의 구조는 단속지석 홈의 형상, 치수 및 분포를 갖춘 홈 성형용 하판, 금형링, 위치 결정용 핀, 심봉, 홈 성형용 하판 이동 가이드판, 상판 및 반전후의 상판 등으로 구성되었다.

지석제작 금형을 이용한 다기공홈형 단속지석의 제작 공정은 ① 홈 형성 프레스 → ② 다기공홈형 프레스 → ③ 건조 → ④ 소결 → ⑤ 정형 및 품질검사 → ⑥ 고체윤활제 분사이다. 공정 ①은 금형을 이용하여 지석에 홈을 형성시키는 프레스가공, 공정 ②는 같은 금형을 반

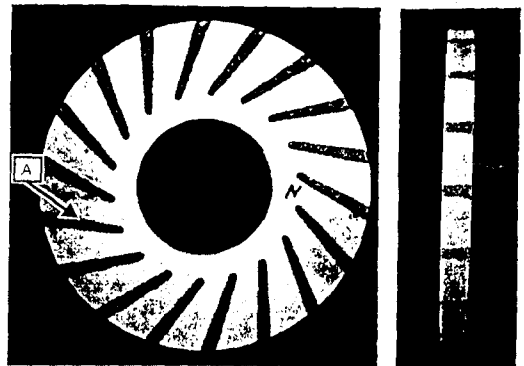


a) assembly of dies



b) parts of dies

Fig.3 Photograph of the discontinuous grinding wheel dies



a) external view



b) detail view of (A) (multi-porous groove)

Fig.4 Developed discontinuous grinding wheel with multi-porous grooves

전시켜 이미 형성된 홈부분에 다기공층 형성 원료를 충전시키고 제2차 프레스를 진행한 후 제품을 금형에서 뽑아낸다. 공정 ③은 성형된 제품을 자연 건조한 후 열처리로 내에서 건조시키고 성형품을 공정 ④에서 소결시킨다. 소결된 제품은 정형가공여유 치수에 맞추어 지석의 내경, 외경, 측면을 가공하고 지석의 평행도, 결합도, 밀도, 안전

도 등의 품질검사와 용도에 따라 다기공흡충에 고체윤활제를 분사시켜 제품을 제작한다. 고체윤활제가 포함된 지석은 STG18-8(LY)로, 포함되지 않은 지석은 STG18-8(LN)으로 각각 표기한다.

Fig.4는 금형공정에 의하여 제작된 다기공흡충형 단속지석으로써 a)는 단속비 0.81, 직선형 홈 수가 18개인 고체윤활제를 침투시키지 않은 다기공 단속지석의 외형사진이다. 그림에서 다기공 홈의 정열이 분포되고 홈 윤곽이 분명하게 나타나는 매우 깨끗한 단속지석이 제작된 것을 알 수 있다. b)는 다기공 한개의 확대사진이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 다기공의 표면에는 커다란 기공들이 균일하게 형성되어 있다. Fig.5는 다기공흡충형 단속지석의 홈부분의 결합상태로 홈부분을 50배 확대하여 관찰한 결과이다. a)는 다기공흡충과 지석층의 교차부분이 엄밀히 하나의 정체로 결합되어있는 것을 나타내며, b)는 기공사이의 결합상태를 나타낸 것이다. 홈과 홈의 결합상태는 결합력이 미약하여 연삭력을 받으면 쉽게 마멸되어 단속연삭을 실현할 수 있다. 개발된 다기공흡충형 단속지석의 품질검사 결과 지석의 결합도는 J 또는 K이며 평행도와 안전회전수(60m/s)는 모두 KS 표준요구를 만족하였다.

Fig.6은 전용금형을 사용하지 않고 기존의 범용지석 제작법과 동일한 방법으로 성형프레스를 행한 후 건조시킨 정체형 지석에 규정된 홈수와 단속비로 홈을 가공하여 소결한후 홈내에 다기공층을 형성시킨 단속지석을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 방법으로 제작한 지석의 표기 방법을 금형을 이용하여 제작한 지석의 표기 뒤에 's'를 첨가하였다.

지석의 제작공정은 ① 지석 성형 프레스 → ② 건조 → ③ 홈 가공 → ④ 소결 → ⑤ 홈내에 다기공층 형성 → ⑥ 정형 및 품질검사이다. Table 3은 이와 같은 공정으로 제작된 단속지석의 사양이다. 개발된 단속지석의 품질검사 결과 검사항목은 전부가 KS 표준요구에 만족하였다.

홈을 가공한 건조상태의 지석은 공장 내에서 소결한 후 공정 ⑤에서 홈에 다기공층을 형성시키기 위해 고체윤활제를 코팅한 스티로폼(styrofoam)을 접착제로 홈에 채워 지석과 접촉시켰다. Fig.7은 다기공흡충형 단속지석으로 a)는 단속지석의 홈을 확대한 사진이고 b), c)는 다기공층과 지석부분의 결합부위 및 홈부분을 50배 확대하여 나타낸 것이다. 결합부위에 고체윤활제를 코팅한 구형의 스티로폼이 접착제에 의해 엄밀히 지석부분과 결합되어 있으며 홈부분의 스티로폼은 상호 결합되고 그 사이에 기공이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 구형 스티로폼층

연삭공정에서 연삭열에 의해 용해 또는 가공물과의 마찰에 의해 마멸되어 커다란 기공으로 변하게 된다.

Table 4는 개발된 다기공흡충형 단속지석을 이용하여 각종 난삭재의 평면연삭실험을 행하기 위한 연삭조건으로써 범용지석과 비교 분석하였다.

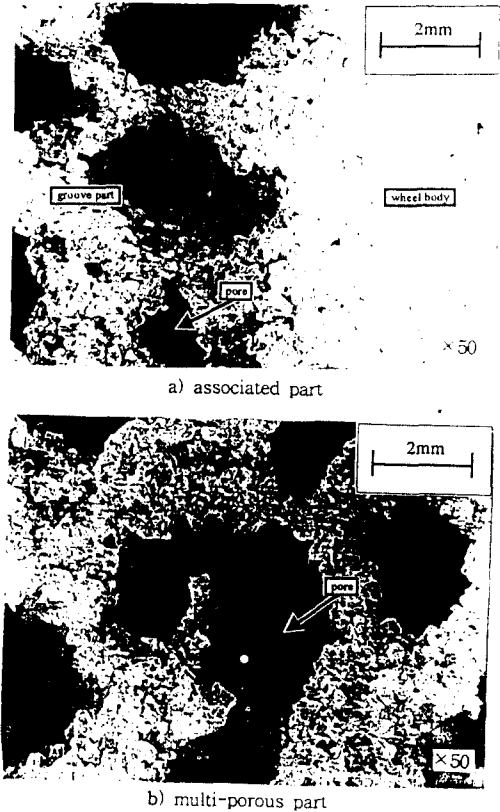


Fig.5 Associated part of the multi-porous grooves with grinding wheel body and porous part

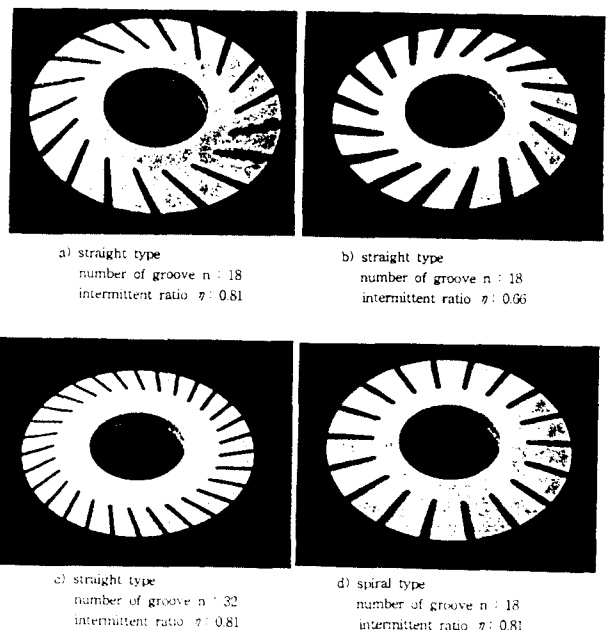
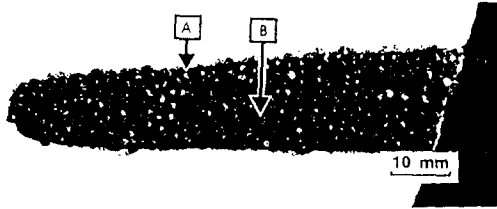


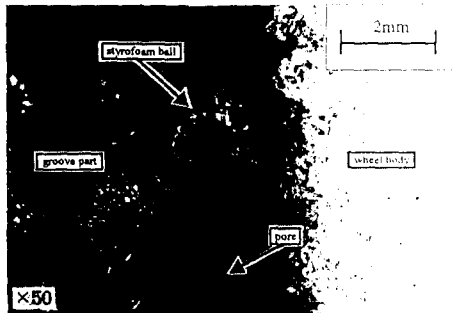
Fig.6 Developed discontinuous grinding wheel with different structure of groove

Table 3 The specification of discontinuous grinding wheels not using the die

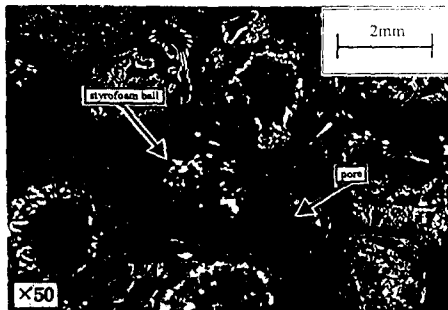
Symbol of wheel	Number of groove	Maximum length of groove L_0 (mm)	Effective wheel length L_1 (mm)	$L_1 - L_0$ L_2 (mm)	Dividing angle α	Intermittant ratio $\beta = L_1 / (L_0 + L_2)$
STGs18-8	18	10	43.2	53.2	20	0.81
SPGs18-8	18	10	43.2	53.2	20	0.81
STGs18-6	18	18	37.2	53.2	20	0.66
STGs32-8	32	6	23.9	29.9	12	0.80



a) external view of groove part



b) detail view of A (associated part)



c) detail view of B (multi-porous part)

Fig.7 Photograph of the multi-porous groove part using coated solid lubricants styrofoam ball

Table 4 Grinding conditions

Grinding wheel	conventional wheel WA60L7V($\phi 305 \times 25 \times 127$) ST18-8(LY)(Solid lubricant) ST18-8(LN) STs18-8(styrofoam)
Workpiece	SUS304, Cu, Brass, Al6061, SM45C(HRC 55) 100×50×10
Dressing condition	dressing depth 20 μ m, 10 μ m, 5 μ m dressing speed 60mm/min
Grinding speed	24m/s(1800rpm)
Table speed	9.0m/min
Cross feed	1.25mm/2pass

4. 난삭재 별 연삭특성

Fig.8은 SM45C(HRC55)을 평면연삭할 경우 연삭깊이와 가공표면거칠기와의 관계를 나타낸 것이다. 다기공 단속지석 STGs18-8과 STG18-8(LN)에 의한 표면거칠기는 범용지석에 의한 연삭표면에 비해 크게 개선되며 범용지석은 연삭깊이가 0.02mm보다 증가하면 연삭누름이 발생하나 단속지석에 의한 연삭에서는 실험조건 범위에서 전혀 발생하지 않았다. 다기공층에 고체윤활제를 분사시킨 STG18-8(LY)지석으로 연삭한 경우는 고체윤활제의 역할로 다기공층내의 지립이 쉽게 탈락되지 않아 연삭깊이가 큰 연삭에서는 범용지석과 큰 차이가 없었다.

Fig.9는 동을 연삭한 경우의 연삭깊이와 가공 표면거칠기의 관계를 나타낸 것으로서 단속지석에 의한 가공 표면거칠기가 범용지석에 의한 가공 표면거칠기보다 4~5배 정도 개선되어 단속지석의 효과가 크게 나타났다.

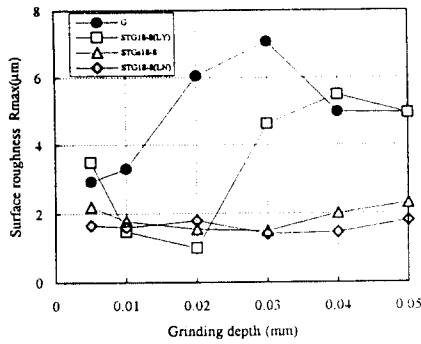
Fig.10은 황동을 연삭한 경우의 연삭깊이와 가공 표면거칠기의 관계를 나타낸 것이다. 단속지석으로 가공 표면거칠기를 1.5배 정도 개선시켜 전체적으로 단속지석의 효과를 볼 수 있었다.

Fig.11은 알루미늄합금 Al6061의 연삭깊이와 가공표면거칠기의 관계를 나타낸 것으로서 단속지석에 의한 표면거칠기 개선효과가 3배 정도 나타났다.

이와 같이 동, 황동, 알루미늄합금등과 같은 고인성 재료에 다기공형 단속지석을 이용하면 눈매유형상 억제와 고품질의 연삭표면을 얻을 수 있음을 확인하였다. 특히 스티로폼으로 다기공층을 형성시킨 단속지석의 경우 보다 큰 효과가 나타났다. 그 이유는 스티로폼에 코팅한 고체윤활제의 윤활작용과 단속연삭에 의한 충분한 연삭칩 배출공간이 형성되기 때문이라고 사료된다.

Fig.12는 SUS304의 연삭깊이에 따른 연삭 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. SUS304의 연삭에서는 표면거칠기의 개선에 단속지석의 효과가 거의 없었지만 가공물 표면에 발생하는 연삭누름 현상은 거의 발생하지 않았다.

다기공 단속지석의 이와 같은 연삭효과는 연삭공정에서 다기공층이 연삭력을 받아 홈층의 일부 재료가 탈락하여 커다란 공간을 형성함으로써 단속연삭이 이루어지며 연삭액이 충분히 가공구역까지 공급되고 연삭칩 배출공간이 커지기 때문이라고 사료된다.



grinding wheel : WA60L7V, workpiece : SM45C
grinding speed : 24m/s (1800rpm)
table speed : 9.0m/min, feed : 1.25mm/2pass

Fig.8 Relationship between surface roughness and grinding depth on SM45C

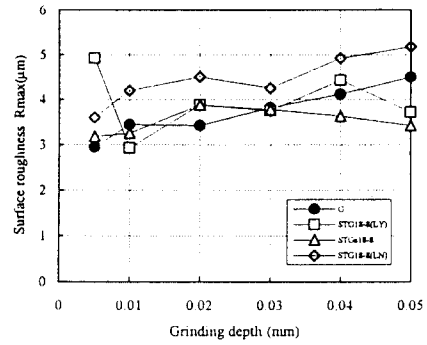


Fig.12 Relationship between surface roughness and grinding depth on SUS304

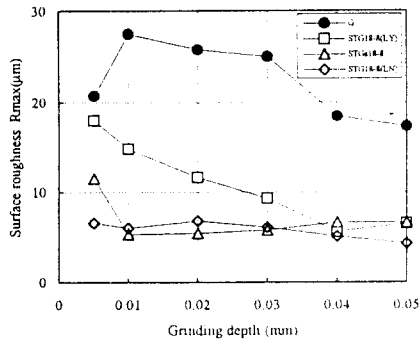


Fig.9 Relationship between surface roughness and grinding depth on Cu

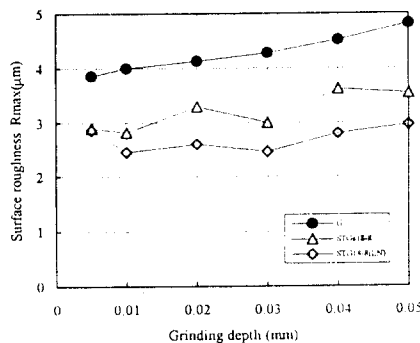


Fig.10 Relationship between surface roughness and grinding depth on Brass

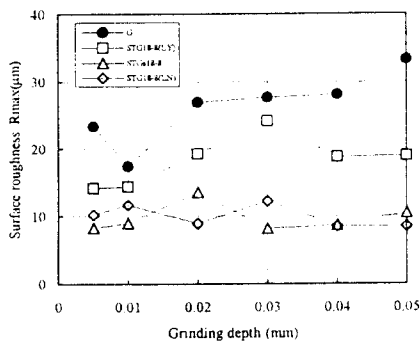


Fig.11 Relationship between surface roughness and grinding depth on Al6061

5. 결 론

지석의 제작단계에서 다기공홈을 형성시킨 정채형 단속 지석을 개발하고 연삭특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일정한 크기 및 모양 과 단속비로 구성된 다기공홈을 지석 제작 단계에서 형성시키므로써 기존의 단속 지석이 갖는 가장 큰 단점인 실용화문제를 해결할 수 있었다.
- 2) 다기공홈층은 지석을 이용할 수 있는 깊이까지 형성되어 있으므로 지석의 이용률은 범용지석과 같다.
- 3) 다기공홈층은 65%이상의 기공으로 구성되어 있으며 연삭공정에서 쉽게 탈락되어 단속연삭을 실현할 수 있었다.
- 4) 다기공홈형 단속지석은 범용지석에 비해 연삭성능이 뛰어나며 연삭 표면거칠기를 크게 개선시키고 연삭누름 현상을 거의 발생시키지 않았다. 특히 알루미늄합금과 같은 고인성 재료의 연삭과 연삭깊이가 큰 연삭에서 그 효과가 더욱 크게 나타났다.

참고문헌

- [1] K. Nakayama, J. Takaji and T. Abe, "Grinding Wheel with Helical Grooves-An Attempt to Improve the Grinding Performance", CIRP Annals, Vol.25, No.1, pp.133-138, 1977
- [2] H.W.Zheng, H. Gao, "A General Thermal Model for Grinding with Slotted or Segmented Wheel", CIRP Annals, Vol.43, No.1, pp.287-290, 1994
- [3] Tetsuya Suto, Tohru Waida, Hoseni Noguchi and Hideo Inoue, "High Performance Creep Feed Grinding of Difficult-to-Machine Material with New-type Wheels", Japan Soc. of Prec. Eng., Vol.24, No.1, pp.39-45, 1990
- [4] T.Suto, T.Waida, H.Noguchi and M.Rezaei, "Creep Feed Grinding of Ceramic-Matrix Composites with a Segmented & Perforated Wheel", Bull. Japan Soc. of Prec. Eng. Vol.24, No.3, pp.227-228, 1990