

복합입도숫돌을 사용한 연삭가공의 표면 거칠기 향상기구

Mechanism of Surface Roughness Improvement by using Double mesh Wheel Grinding

진병순(와이지-원 공구기술연구소), 김한섭(울산대 대학원), 박규열(울산대)

Byoungsoon Jin(YJ-1), Hanseob Kim(Univ. of Ulsan), Kyuyeol Park(Univ. of Ulsan)

1. 서론

세라믹 재료는 높은 강도 및 경도를 갖는 기계적 성질로 인하여 연삭가공에는 다이아몬드를 지립으로 하는 초지립 숫돌이 사용된다. 다이아몬드는 일반 지립에 비하여 내마모성이 월등하게 높다는 사실로부터 숫돌의 트루잉 및 드레싱 작업이 극히 곤란한 것은 주지의 사실이다. 따라서 다이아몬드 숫돌을 사용하는 연삭공정의 작업효율을 높이기 위해서는 숫돌의 빈번한 교환에 따른 트루잉 및 초기 드레싱작업을 가능한 회피하는 것이 바람직하다. 빈번한 트루잉 및 드레싱 작업은 작업효율의 저하 외에도 고가의 숫돌을 과도하게 마모 시킴으로써 공구비용의 상승을 초래하는 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 본 논문에서는 세라믹 재료의 연삭가공을 대상으로 가공정밀도(특히 표면 거칠기)와 가공능률을 동시에 향상시킬 수 있는 방안으로 서로 다른 입도를 갖는 레진본드 다이아몬드 숫돌(Resinoid bond diamond wheel)을 한 쌍으로 겹쳐서 성형시킨, 일명 [복합입도숫돌(Double mesh wheel)]을 사용하여 세라믹 재료의 가공특성을 조사하였다. 여기서 복합입도숫돌의 적용의미는 숫돌의 전체 작업면에서 평균입도가 높아지는 효과를 기대하였다.

2. 실험방법 및 사용재료

Fig. 1은 본 실험에 사용한 실험장치의 사진이다. 본 연구에서 연삭 실험은 Fig. 1에 나타낸 실험

장치의 사진과 같이 국내 화천 중공업 [HWACHEON HEAVY INDUSTRY Co., Ltd.]사의 Machining Center(M/C):SIRIUS-2 type를 사용하여 헬리컬 각도를 조정할 수 있도록 하였으며 연삭가공 중에 발생하는 연삭력은 AMT [ADVANCED MECHANICAL TECHNOLOGY, Inc]사의 공구 동력계를 사용하여 가공 중에 실시간으로 측정하였다. 또한 본 실험에 사용한 복합입도 숫돌의 도면과 치수는 Fig. 2에 나타내었다. Table.1은 본 실험에 사용한 각종 시편과 측정장치 그리고 세부사항을 나타

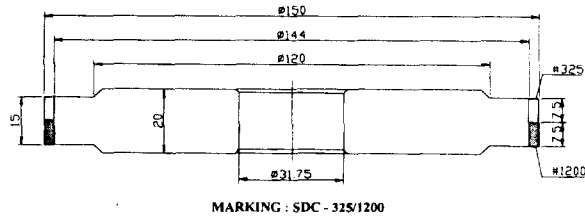


Fig. 1 Dimension of double mesh-wheel

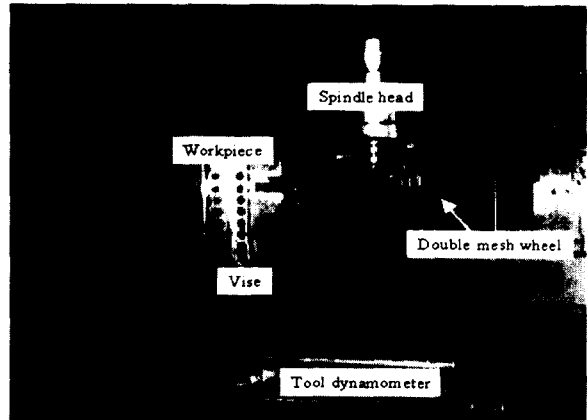


Fig. 2 Experimental set-up of grinding

Table 1. Specifications of experimental set-up

Machining tool	Machining Center(M/C):SIRIUS-2 type [HWACHEON HEAVY INDUSTRY Co., Ltd.]		
Grinding wheels	SD325P75B SD1200N70B SD325/1200		
Workpiece		Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
	Flexural strength	6.9MPa·m ^{1/2}	4.4 MPa·m ^{1/2}
	Hardness	1400HV(10)	1650 HV(10)
Turing & Dressing	WA120J7V(WA stick) WA180J7V(WA stick)		
Grinding Fluid	CEM, 2% dilution of water [NORITAKE CO., Ltd]		
Measuring Instrument	Optical Dimensional Metrology Center [INTEK ENGINEERING Co., Ltd.] Particle Size Analyzer(Model : Elzone 280PC) MC818 Series Multi-Dynamometer [ADVANCED MECHANICAL TECHNOLOGY. Inc]		

내고 있다. 한편 가공결과는 연삭저항 이외에도 광학식 치수·형상·표면조도 측정기(Optical Dimensional Metrology Center)를 사용하여 표면 거칠기를 측정하였다

3. 실험결과 및 고찰

3.1 #325 슷돌의 연삭가공 특성

Fig.3은 실험에서 사용한 레진본드 다이아몬드 슷돌의 연삭성능 유지능력을 조사하기 위하여 제거체적과 표면 거칠기의 관계를 조사한 결과이다. #325 슷돌의 경우, 절입량 5 μ m의 조건 하에서 표면 거칠기가 질화규소는 약 Rmax: 3 μ m, 알루미늄은 Rmax: 3.5 μ m으로 나타났다. 피삭재에 따라서 표면 거칠기의 차이를 나타내는 것은 재료 자체의 특성에 따른 표면의 미소 크랙과 기공에 기인하는 것으로 사료된다. Fig.4는 #325스�돌을 이용하여 절입량에 따라서 연삭저항의 차이를 조사한 결과이다. 절입량의 증가에 따라서 연삭력이 점진적으로 증가하며, 연삭 분력비는 일반적으로 세라믹 재료의 연삭가공에서 얻어지는 3~4정도의 값을 갖는 것으로 확인되었다. Fig.5는 헬리컬 스캔 연삭으로 #325스�돌의 절입량에 따른 표면 거칠기의 변화를 조사한 결과이다. 절입 깊이가 작

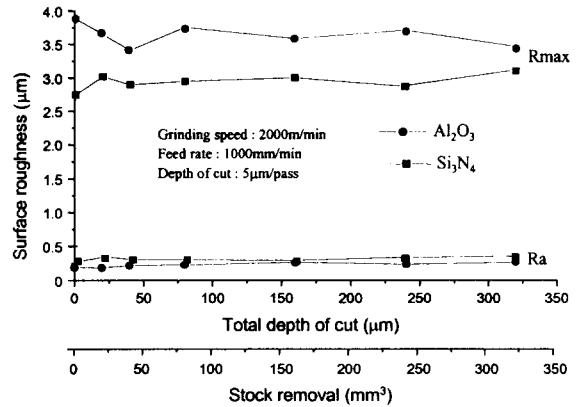


Fig. 3 Relationship between surface roughness and stock removal(#325)

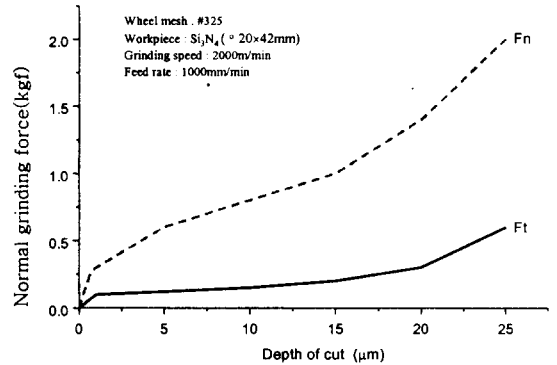


Fig. 4 Relationship between grinding force and depth of cut (#325)

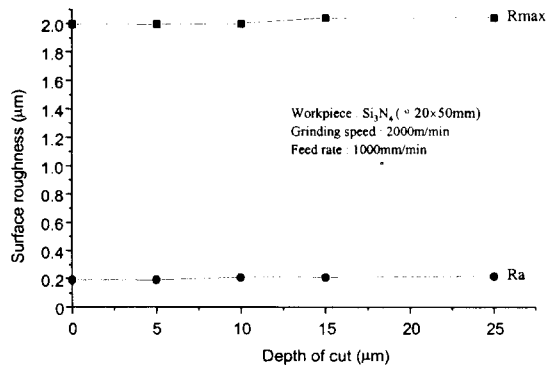


Fig. 5 Relationship between surface roughness and depth of cut (#325)

은 조건에서 표면 거칠기가 향상되는 경향은 있으나 그 정도가 극히 미비하며, 최대 절입 깊이가 25 μ m의 조건에서 Rmax 2.0 μ m, Ra 0.2 μ m 정도

가 얻어졌다. 이는 세라믹 재료의 연삭가공이 크랙의 진전에 의한 취성파괴에 의존하게 되는 소재 특성에 기인한 결과로 생각할 수 있다.

3.2 #1200 슷돌의 연삭가공 특성

Fig.6은 #1200스틀을 사용하여 Fig.3과 동일한 실험을 수행한 결과이다. 단 이 경우 사용된 슷돌의 입도를 고려하여 절입량을 1 μm 으로 설정하였다. 연삭개시와 더불어 즉, 슷돌의 초기마모가 진행됨에 따라서 표면 거칠기가 점진적으로 향상되고 일정한 양의 체적을 제거한 후에는 일정한 표면 거칠기 값을 나타내었다. 도달 가능한 최대 표면 거칠기는 질화규소 Rmax: 0.8 μm , 알루미늄 Rmax: 1.8 μm 전후로 나타났다. Fig. 7은 #1200 슷돌을 사용하여 일회 절입량을 3 μm 으로 연삭가공 시에 발생하는 연삭저항을 측정된 결과이다. 연삭저항이 절입 횟수와 더불어 증가하며, 절입량을 5 μm 으로 설정하면 연삭저항이 급격하게 증가하여 정상적인 연삭가공이 불가능한 것으로 확인되었다. 이는 #1200스틀의 연삭능력이 부족하여 지립의 마모속도와 자생작용의 발생속도의 불균형에 기인하는 슷돌의 눈매움 현상에 기인하는 결과로 사료된다. Fig.8에서는 #1200스틀의 절입량에 따른 표면 거칠기의 변화를 조사하였다. 단, 이 실험에서는 전기 Fig.7의 결과를 토대로 #1200 슷돌의 연삭지속능력을 고려하여 총절입 횟수를 3회로 한정하였으며, 절입량에 따라서 전기 Fig.4의 #325스틀의 경우와는 다르게 표면 거칠기가 급격하게 악화되는 것으로 나타났다. 이는 #1200스틀의 연삭능력을 고려하면, 연삭개시와 더불어 눈매움(Loading) 현상이 발생되어 슷돌의 연삭성능이 급격하게 저하된 결과로 생각할 수 있다. Fig.7과 Fig.8의 결과에 의하면 세라믹 재료의 정밀 연삭가공에 #1200의 레진본드 다이아몬드 슷돌을 안정적으로 사용하는 것은 극히 곤란하다는 사실을 단정할 수 있다.

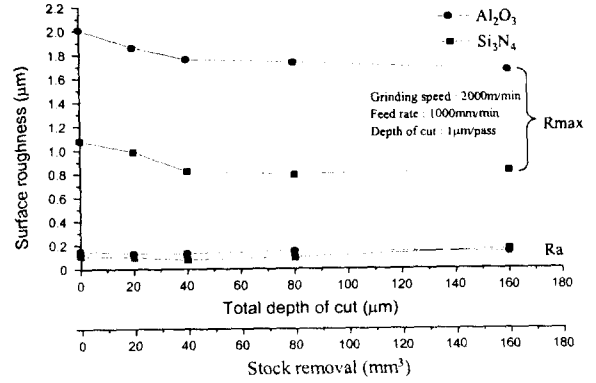


Fig. 6 Relationship between surface roughness and stock removal(#1200)

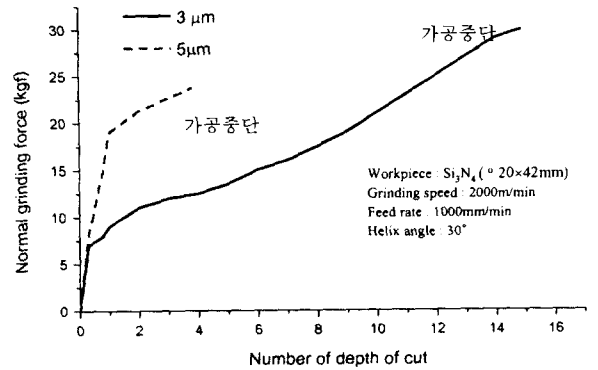


Fig. 7 Relation between normal grinding force and number of depth of cut (#1200)

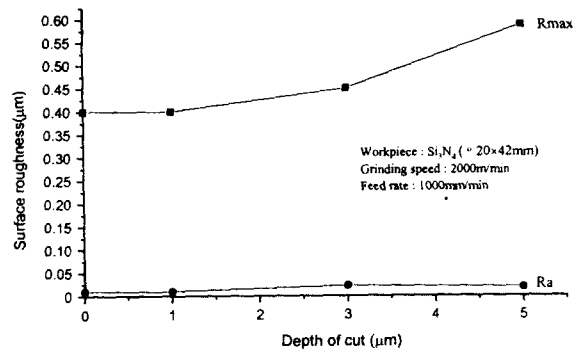


Fig. 8 Relationship between surface roughness and depth of cut (#1200)

3.3 복합입도 슷돌의 연삭가공 특성

Fig.1에서 제시한 #325/#1200 복합입도 슷돌을 사용한 연삭가공에서 절입량과 표면 거칠기의

관계를 조사하였다. Fig.9는 연삭 실험 결과로서, 복합입도숫돌의 연삭가공에서 절입량과 표면 거칠기의 관계를 나타낸다. 절입량 25 μm /pass까지의 조건에서는 표면 거칠기의 변화가 미비한 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 Fig. 5에서 나타난 #325 숫돌의 연삭특성과 유사한 경향을 갖으며, #1200숫돌에서는 불가능한 절입조건에서도 연삭가공이 가능한 것으로 확인되었으며, 25 μm /pass의 조건에서도 안정된 연삭성능을 유지하는 것으로 확인되었다. Fig.10은 동 실험중에 얻어진 연삭저항을 나타내며, 절입량을 증대시키면 연삭저항이 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 20 μm 절입 시에 연삭저항이 #325숫돌보다 3~5배 정도 높은 것으로 나타났으며, 이는 복합입도숫돌의 폭이 #325 단면입도숫돌 보다 2배이며, 복합입도숫돌의 #1200가 #325숫돌 보다 연삭능력이 낮다는 사실에 기인하는 결과로 생각할 수 있다. Fig.11은 #325/1200 복합입도숫돌을 사용하여 절입량 및 절입 횟수에 따른 연삭저항의 추이를 나타낸다. 전기의 #1200숫돌에서는 3 μm /pass의 비교적 적은 절입량의 조건에서도 연삭 횟수의 증가와 더불어 연삭력의 계속적으로 증가함으로써 정상적인 연삭이 불가능한 단정되었으나, 복합입도숫돌의 경우에는 절입량 18 μm 의 조건 하에서도 연삭력이 지속적으로 일정한 크기를 갖는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 복합입도숫돌을 사용한 연삭가공에서는 황삭용 숫돌에 해당하는 숫돌의 전단부 #325숫돌에서 대부분의 체적제거 작용과 후단부의 정삭용 #1200부위에서는 단순하게 스파크 아웃 작용이 수행된다는 사실을 입증하는 것으로 추정할 수 있다. 이와 같은 사실에 근거하면, 복합입도숫돌을 효과적으로 사용할 경우에 높은 가공능률을 유지하면서 동시에 표면 거칠기를 향상시킬 수 있는 것으로 판단 할 수 있다. Fig.12는 #325/1200의 복합입도 숫돌을 사용하여 체적 제거량에 따른 표면 거칠기의 관계를 조사한 내용이다. 동 결과로부터

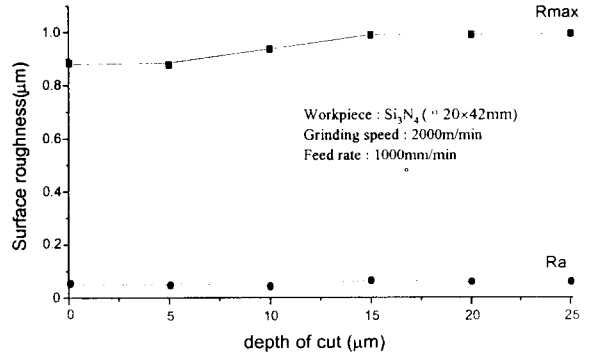


Fig. 9 Relationship between surface roughness and depth of cut (#325/1200)

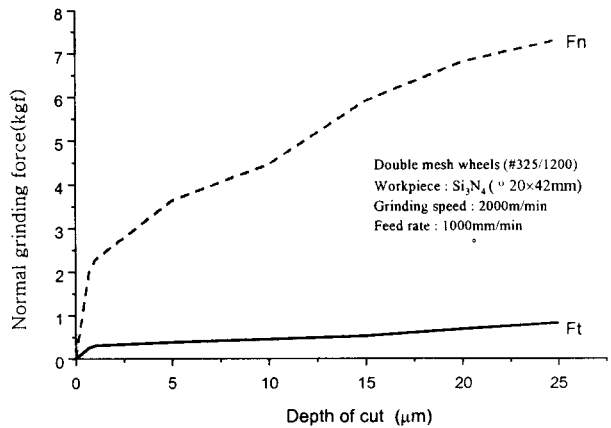


Fig. 10 Relationship between grinding force and depth of cut (#325/1200)

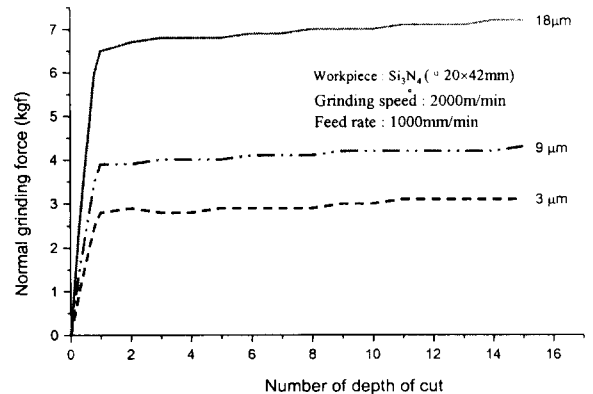


Fig. 11 Relation between normal grinding force and number of depth of cut (#325/1200)

표면 거칠기는 초지립 숫돌의 연삭가공에서 특히 현저하게 나타나는 초기상태, 과도상태 및 정상상

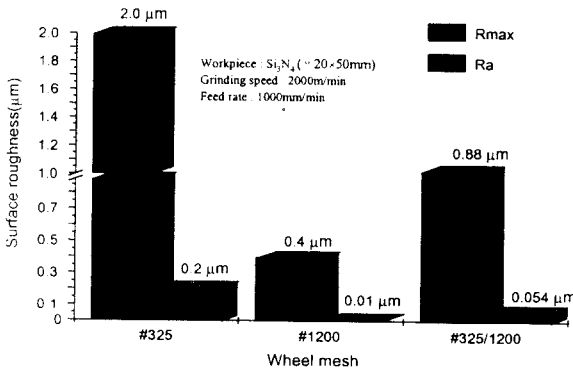


Fig. 13 Relationship between surface roughness and wheel mesh

대로 구분되며, 체적 제거량의 증가와 더불어서 표면 거칠기가 향상되는 것으로 확인되었다. 즉, 연삭가공이 진행되면서 지립의 정련(Sheening)현상과 슛돌의 미세한 편심이 수정되는 효과에 의해서 표면 거칠기가 향상되는 결과가 얻어지며, 이 경우에 연삭면의 거칠기는 정상상태의 연삭가공에서 $R_{max}:0.8\mu\text{m}$ 전후가 얻어졌다. 이는 전기의 Fig. 6의 결과와 비교하면 #1200스�돌을 사용한 트레이버스 연삭가공과 동일한 정도의 표면 거칠기 값이 얻어지는 것으로 확인되었다. Fig. 13은 연삭스�돌의 입도와 표면 거칠기의 관계를 비교한 결과이다. 동일 그림에서 #1200의 단일입도 슛돌의 경우에는 슛돌의 연삭성능을 고려하여 절입량을 $1\mu\text{m}$ 으로 실험하였으며 #325, #325/1200 슛돌은 절입량을 $5\mu\text{m}$ 으로 실험을 진행한 결과이다. 단일 입도의 #325스�돌의 경우 $5\mu\text{m}$ 의 조건에서 표면거칠기 R_{max} 가 $2\mu\text{m}$ 로 측정된 것에 비해 복합입도 슛돌의 경우에는 그림 8에서와 같이 $0.88\mu\text{m}$ 전후의 값이 나타났다. 또한 연삭력의 경우, 단일입도의 #1200 슛돌은 그림6에 나타난 것과 같이 $3\mu\text{m}$ 의 절입 조건에서는 상당히 높은 연삭저항을 보이고 있으며 $5\mu\text{m}$ 절입깊이에 대해서는 급격한 증가를 보이고 있어 슛돌이나 공작물 그리고 공작기에 상당한 무리를 수반하게 되며, $5\mu\text{m}$ 절입깊이에 대해서는 정상적인 연삭가공이

불가능 것으로 판단된다. 그러나 #325/1200의 복합입도 슛돌에서는 $18\mu\text{m}$ 의 절입 조건에서도 지속적으로 안정된 연삭력을 보이고 있다.

3.4 표면 거칠기의 창성기구

연삭가공에서 공작물의 표면과 직접적인 접촉이 이루어지면서 표면 창성에 직접적인 관계를 가지고 있는 슛돌의 요소는 지립의 밀도, 평균지립간격, 연속절인간격 등을 들 수 있다. 슛돌의 표면에는 다수의 지립이 산포되어 있으며 최외주면에서 수 μm 이내에 위치한 지립만이 직접 연삭 작업에 관여하게 된다. 슛돌은 가공중에 마모와 탈락 등의 과정을 거치면서 연삭작업을 수행하는 절인의 상태가 계속 바뀌게 된다. 이 때 단위 면적당 절인수를 C 라 할 때 $a = \sqrt{1/C}$ 의 값을 평균절인간격 혹은 평균지립간격이라 한다. 한편 회전공구의 하나인 연삭스�돌 내부에 지립의 분포가 일정하다고 가정할 경우 공구가 회전 하면서 공작물의 동일부위를 여러 입자가 연속해서 가공을 수행하게 되며 이때 동일 부위를 지나는 연속된 절인의 간격을 연속절인간격이라 한다. 따라서 공작물의 표면을 창성하는 과정에서 슛돌의 밀도가 높아지게 되면 단위 입자당 제거량은 감소하게 되며, 단위입자당 작용하는 부하 역시 감소하게 된다. 또한 지립 밀도의 증가는 평균지립간격 및 연속절인간격의 감소를 가져오며 따라서 공작물에 형성되는 표면 상태 역시 향상되는 효과를 가져온다. 한편, 일반적인 연삭가공에서 표면거칠기를 향상시키기 위해서는 다음과 같은 방안이 적용될 수 있다.

1) 슛돌의 지립밀도를 높이는 방법

2) 슛돌의 입도를 높이는 방법

(미립자 슛돌의 사용)

3) 슛돌의 이송량 및 이송속도를 낮게 하는방법

그러나 1)의 경우, 슛돌의 집중도를 높이거나 대구경 슛돌을 사용하는 방법 혹은 동일 슛돌의 경우에는 연삭속도를 증대시킴으로써 슛돌의 지립밀

도를 높이는 것이 가능하다. 단, 슷들의 집중도를 높이거나 대구경 슷들을 사용하게 되면 연삭가공 중에 배분력이 증가하여 기계적인 무리 및 형상정밀도를 제어하는 것이 곤란하게 된다. 또한 연삭속도를 높이면 가공 중에 연삭발열이 커지며, 피가공물에 열적 손상 혹은 변형을 초래하기 쉽다. 또한, 슷들의 입도를 높이는 2)의 방법은 실제로 연삭가공의 정상가공에서 미립자슷들을 사용하는 방법으로 적용되고 있다. 그러나 미립자 슷들의 경우, 연삭가공의 능률이 제한되는 동시에 미립자 슷들의 낮은 연삭능력으로 인하여 빈번한 드레싱작업이 필요하게 된다. 따라서 동 방안은 상대적으로 가공능률 및 공정효율의 감소를 감안하여야 하며, 3)의 방안 역시 가공능률이 저하된다는 문제점을 갖는다.

$$R_{max} = 1.36(W_0)^{1.2} \left(\frac{s}{b}\right)^{0.4} \left(\frac{v}{V}\right)^{0.4} \left(\frac{1}{D}\right)^{0.2} (\cot\alpha)^{0.4}$$

-----(1)

- v, V:공작물 이송속도와 슷들의 원주속도
- α:지립을 원추상으로 가정할 경우에 지립 선단의 반각
- W₀:평균지립간격 D:슷들의 직경
- s:공작물 1회전당 슷들의 축방향 이송량
- b:연삭폭

식(1)은 연삭후 공작물 표면 거칠기의 값을 예측하기 위한 실험식으로, 동 식에서 여러 가지 변수의 관계를 살펴보면 공작물의 표면거칠기는 동일한 가공 조건에서 슷들의 평균지립간격과 직접적인 관계를 가지고 있는데, 평균지립간격이 작아지면 이것에 따라서 가공물의 표면거칠기 값은 좋아지게 됨을 알 수 있다. 따라서 동 실험식에 실험에 사용한 조건과 결과로서 평균지립간격과 연속절인간격의 값을 구하여 보면 복합입도슷들 #325/#1200은 단일입도#325 슷들에 비해 평균지립간격과 연속절인간격은 44.6%, 69.3% 좁은 간격을 가지는 것으로 확인되었다. 또한, 복합

입도슷들은 연삭가공에서는 거친 입도의 #325 슷들에서 우선적으로 대부분의 체적제거 가공이 수행되고 2차적으로 #1200슷들로 마무리 가공면이 형성되어, 연삭능력은 #325슷들과 유사하며, 연삭저항은 단일입도 #1200에서는 가공이 불가능한 조건에서도 안정적인 연삭력을 보이고 있음을 확인하였다는 점에서 복합입도 슷들을 사용한 연삭 작업의 우월성을 입증할 수 있었다.

4.결 론

복합입도 슷들을 사용한 연삭가공의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) #325/#1200복합입도 슷들은 #325와 #1200의 중간정도의 평균지립간격으로 #325슷들에 비해 44.6% 좁은 간격을 가지고 있으며 가공면은 #325슷들에 비해 80%정도 향상된 가공면을 가진다.
- 2) #325/#1200 복합입도슷들의 연삭가공 조건은 #1200슷들에서는 불가능한 조건인 #325 단일입도슷들의 가공조건으로 연삭작업이 가능하며, 이 때의 연삭저항은 #1200단일입도슷들과는 달리 안정된 상태를 유지한다.
- 3) #325/#1200 복합입도 슷들의 사용으로 #325의 연삭성능을 가지면서도 #1200슷들의 결과와 유사한 가공면 생성할 수 있다.
- 4) 하나의 슷들로 황삭가공과 정삭가공을 동시에 수행하는 효과를 가진다.

참 고 문 헌

[1] 久留順誠, 安井平司, 中園汎, 細川晃 : レジンボンドCBN砥石による園筒ドラバース研削の研究(第1報), 日本國精密工學會誌, Vol.57/3,1991,pp. 517~522.

[2].中川威雄 : ファインセラミックスの 高能率研削加工の研究, 東京大學生産技術研究所, 1988,3,