

미세홈 가공시 전해 인프로세스 드레싱의 영향에 관한 연구

유정봉*, 이석우*, 정해도**, 최현종***

A Study on the Effect of Electrolytic In-process Dressing in Slot Grinding

J. B. Yoo*, S. W. Lee*, H. D. Jeong**, H. Z. Choi***

ABSTRACT

Chipping is an unavoidable phenomenon in the slot grinding process of hard and brittle materials. However, it should be reduced for the improvement of surface integrity in the manufacture of optical and semiconductor components. Electrolytic In-process Dressing (ELID) technique for metal bonded superabrasive grinding wheel has been developed for mirror surface grinding of hard and brittle materials. Electrically dressed wheel surface has sharply exposed abrasives and results in lower grinding force, higher grinding efficiency in grinding. The paper deals with a newly developed method for slot grinding using ELID and was implemented to improve grooved surface quality and decreases chipping size on the edge of the groove. As a result, we accomplished chipping-free grooves and obtained the clear ground surfaces on glass and WC.

Key Word : slot grinding(홈 가공), chipping-free(뜯김 억제), glass(유리), WC(초경)

ELID(전해 인프로세스 드레싱), metal bonded diamond wheel(메탈 본드 다이아몬드 스톤)

1. 서론

최근 반도체, 정밀전자부품, 기계부품 등에 사용되는 부품들이 고기능화되고 3차원적으로 복잡화되면서 미세한 정밀형상 부품을 필요로 하게 되었다. 내마멸성이 강한 정밀형상부품에 대한 요구는 난삭재이면서 취성재료인 초경이나 세라믹스 등과 같은 재료에 대한 미세형상 가공기술을 필요로 하게 되었다. 특히 연삭에 의한 미세홈가공(slot

grinding)은 가공정밀도와 표면거칠기가 양호하고 3차원 형상의 가공이 용이하기 때문에 방전가공이 어려운 세라믹스나 고분자 재료등의 비전도성 재료 뿐만 아니라 경도가 높은 취성재료인 초경의 가공에 적용이 가능하다.

취성재료의 미세홈가공에 있어 가장 큰 문제점은 가공물의 홈측면 에지(edge)부에 발생하는 칩핑(chipping)인데 가공중에 발생하는 칩핑은 스톤과 가공물의 접촉시 발생하는 충격력에 의해 생성되어

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학과

*** 한국생산기술연구원

진다. 이러한 치핑은 가공물의 형상정밀도와 기계적 성질 및 표면품질(surface integrity) 등을 저하시키기 때문에 이를 억제하기 위한 정밀가공기술이 요구되어지고 있다. 이러한 취성재료의 고정밀 가공의 필요성으로 홈가공과 절단시 가장 큰 문제가 되는 치핑의 발생기구와 치핑을 억제하기 위한 연구가 진행되고 있다.^[1-2]

본 연구에서는 코발트본드 다이아몬드 슷들을 이용하여 취성재료인 유리와 초경의 미세홈 연삭가공시 미세홈 측면의 에지부에 발생하는 치핑을 줄이기 위하여 전해 인프로세스 드레싱을 적용하였다. 그리고 실험조건에 따른 일반적인 미세홈가공과 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 미세홈가공에 발생하는 치핑현상을 공구현미경과 전자주사현미경을 이용하여 관찰하고 치핑의 크기를 비교 함으로서 치핑이 발생하지 않는 최적의 가공조건을 찾고자 하였다. 특히 전해 인프로세스 드레싱은 가공 중에 전기화학적 작용으로 슷들표면에 부도체 피막이 형성시키며 가공중 슷들입자를 원활하게 돌출시키는 장점이 있다.^[3]

2. 전해 인프로세스 드레싱의 기구

전해 인프로세스 드레싱은 메탈 본드 슷들의 비선형 전해현상을 적극적으로 이용하기 위해서 펄스 파형을 발생하는 전해 전원과 약 도전성인 수용성 연삭액을 조합함으로써 Fig.1에 나타내는 기구에 의해 드레싱을 실시하였다.^[4-5]

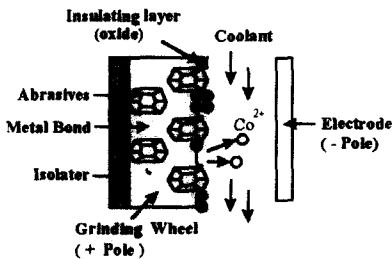


Fig.1 Principle of ELID

미세한 다이아몬드 입자를 가진 메탈 본드 슷들은 전해현상으로 본드재가 용출되어 다이아몬드 입자를 돌출시킨다. 이 전해현상에서는 본드재가 수 μm 용출한 후 용출된 본드재에 의해 절연층이 빠르게 슷들표면에 형성되어 본드재의 과도한 용출은

방지된다. 그리고 연삭을 시작하면 공작물이 이 부도체 피막에 접촉하고 연마재가 마멸된 양만큼 피막이 벗겨진다. 이 때문에 피막에 의한 절연이 저하되고 본드재가 필요량만큼 용출하여 슷들입자의 돌출이 일어난다. 이러한 반복된 과정에 의해 새로운 슷들입자가 형성되어 안정된 가공이 진행된다.

3. 실험방법

3.1 실험장치의 구성

전해 인프로세스 드레싱을 이용한 미세홈 연삭가공실험을 위하여 제작된 장치의 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 이 장치에는 슷들 끝단의 각도가 20° 인 V형상의 코발트(cobalt)계 메탈 본드 다이아몬드 슷들을 연속적으로 전해드레싱을 하여 가공중 슷들 끝단의 각도를 항상 일정하게 유지하여 주기 위하여 각도가 20° 인 V형상의 전극이 부착되어 있다. 이 전극은 황동을 이용하여 제작하였으며 슷들표면과 전극의 양면이 항상 일정한 거리를 유지하면서 이송할 수 있도록 설계되어 있다.

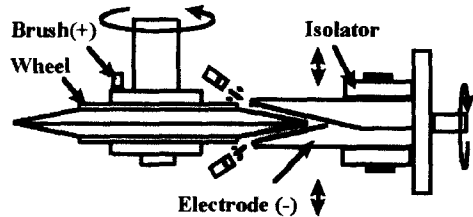


Fig.2 Experimental apparatus of slot grinding

3.2 가공조건 및 드레싱 조건

본 실험의 가공조건은 Table 1에 나타냈다. 가공물로는 가공 중에 치핑(chipping)이 쉽게 발생하는 난삭재이면서 취성재료인 초경과 유리를 사용하였다. 각 가공물의 가공조건에 따른 치핑현상을 관찰하기 위하여 가공조건(절입깊이, 주속도, 이송속도)들을 변화하면서 실험을 하였다. 또한 가공조건들을 변화하면서 일반적인 연삭(conventional grinding)과 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭(ELID grinding) 가공을 비교·실험하여 치핑을 관찰함으로써 전해 인프로세스 드레싱이 치핑의 발생에 미

치는 영향을 분석하였다.

본 실험에서는 미세홀 연삭시 칩핑발생의 억제를 위하여 하향연삭을 하였다. 또한 슷돌입자로는 #400(grain size:37~44 μm)과 #1000(grain size:14.5~18 μm)의 인조 다이아몬드를 사용하였으며, 형상 가공을 위해 외경이 $\phi 180\text{mm}$ 이고 슷돌날 끝단의 각도가 20° 인 V형상의 코발트계 메탈 본드 슷돌을 제작하여 사용하였다.

코발트계 메탈 본드 슷돌의 전해 드레싱 특성을 알기 위하여 슷돌과 전극 사이의 간격을 0.3mm로 하고 무부하 전압을 변화하면서 시간의 경과에 따른 전류의 변화와 슷돌의 전해 드레싱 상태 등을 관찰 하였다. 초기 무부하 전압을 85V로 하였을 때 일정시간이 지난 후 2.3~2.4A의 안정된 전류치를 얻을 수 있었지만 슷돌날 끝단에서 본드제의 용출이 활발히 일어나 가공시 슷돌 끝단의 마멸이 심하여 미세홀 가공을 위한 슷돌 형상의 유지가 어려웠다. 이와 같은 실험을 통하여 슷돌날 끝단의 형상을 유지하면서 전해 드레싱의 효과를 얻기 위해서는 무부하 전압을 30V로 하는 것이 가장 좋음을 알았다. 이 조건에서는 전해 드레싱을 시작한지 약 20분 후부터 전류치가 0.39A~0.4A로 일정한 값을 가졌으며, 전압은 초기에는 6V 정도였지만 약 20분 후에는 15~16V 정도로 상승하였다. 따라서 본 실험에서는 가공시 본드제의 적절한 용출을 위하여 무부하 전압을 30V로 하였으며 가공전압은 14V, 가공전류는 0.4A가 되도록 하였다. 그리고 전극면적은 슷돌의 가공면적을 고려하여 가공면적의 1/8로 설계하였다. 가공시 드레싱조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Slot grinding conditions

Grinding method	Slot grinding, Down cut
Power Supply	Fuji ELIDER 910
Workpiece	Glass, WC(M50)
Grinding wheel	SD400N50M($\phi 180$) SD1000N50M($\phi 180$)
Wheel speed	V=1,200 m/min
Work speed	v= 100~3,200mm/min
Depth of cut	t= 10~800 μm
Grinding fluid	Soluble type ($\times 30$ dilution)

Table 2 Dressing conditions

Wheel	V type $\phi 180$ #400, #1000 Cobal Bonded
Wheel speed	200m/min
Voltage(Eo)	30V
Current(Iw)	0.4A
Pulse width	$\tau_{on} = \tau_{off} = 2\mu\text{s}$
Electrode	1/8 copper
Gap	0.3 mm

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전해 인프로세스 드레싱의 슷돌상태

Fig.3에 실험에 사용한 슷돌(SD400N50M)표면의 SEM사진을 나타냈다.



(a) Before dressing



(b) After electrolytic dressing

Fig.3 SEM micrographs of wheel surface

(a)는 전해 드레싱을 하지 않은 슷돌의 표면사진으로서 결합제인 코발트 본드가 강하게 결합되어 있으며 다이아몬드 입자도 슷돌 표면에 충분히 돌

출되어 있지 않음을 알 수 있다. (b)는 약 20분 정도 전해 인프로세스 드레싱을 한 슛돌표면의 사진으로서 코발트 본드가 전해작용에 의해 용출되어 있으며, 다이아몬드 입자도 충분히 들출되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 전해 인프로세스 드레싱의 효과에 의해서 슛돌 표면의 본드재가 용출되어 미소홈 연삭 가공 중 가공저항이 감소되며 치핑 발생도 억제되어 가공물의 표면품위가 향상됨을 알 수 있다.

4.2 유리의 최대 치핑크기 변화

일반적으로 취성재료를 홈가공하면 홈에지부에서 치핑이 발생하고, 치핑의 크기의 평균치와 면적보다는 최대치핑이 큰 영향을 주기 때문에 홈가공에 의해 발생하는 치핑의 평가는 최대치핑의 크기를 선택하였다. 측정기로 공구현미경(OLYMPUS, MMDC201)과 SEM사진의 관찰을 통하여 측정하고 평가하였다. 치핑의 측정방향은 홈측면의 에지부에서 홈단면의 수평방향으로 측정하였다. 치핑의 형상은 Fig.4와 같이 크기의 차이가 있으며, 산과 골짜기의 형상을 가지면서 분포되어 있다. 치핑크기의 평가를 위해서 기준선은 치핑이 전혀 발생하지 않을 때에 생기는 홈에지부를 기준으로 삼았다[6]. 측정범위는 유리와 초경의 홈가공한 길이방향으로 30mm의 측정범위에서 가장 크게 발생한 치핑을 선택하여 측정하고 평가하였다. 치핑량은 시편을 1회 연삭가공한 후 측정하였고, 연삭거리는 유리는 5cm, 초경은 3cm이다.

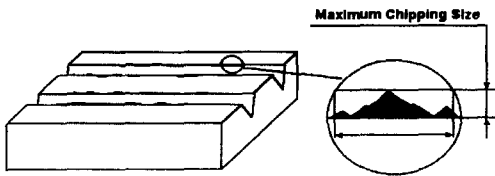


Fig. 4 Measurement of chipping^[6]

Fig.5는 유리 가공시 일반적인 홈가공과 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 홈가공에 있어서 절입깊이와 이송속도의 증가에 따른 최대 치핑크기의 변화를 나타내었다.

(a)는 절입깊이에 따른 최대 치핑크기의 변화를 나타낸 것이다. #400 슛돌의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 치핑의 크기는 32~94 μ m이었으며,

전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의 최대 치핑의 크기는 17~77 μ m이었다. #1000 슛돌의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 치핑의 크기는 20~44 μ m이었으며, 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의 최대 치핑의 크기는 14~38 μ m이었다. 실험 결과를 살펴보면 일반적인 홈가공보다 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 홈가공이 치핑을 억제하는 효과가 큰 것을 알 수 있다. 절입깊이 800 μ m에서는 전해 인프로세스 드레싱을 한 경우에 오히려 최대 치핑크기가 있는 것을 볼 수 있는데 이는 과도한 절입량 때문에 전해 인프로세스 드레싱 효과가 잘 나타나지 않아 연삭칩에 의한 슛돌의 눈막힘 현상이 발생하였기 때문이라 생각되어진다.

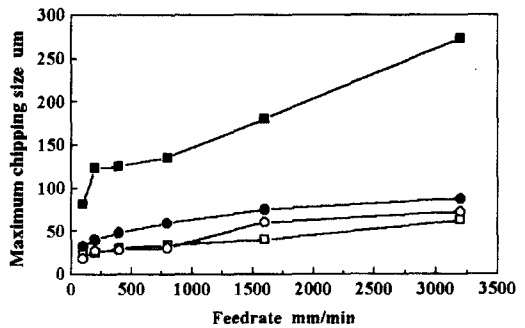
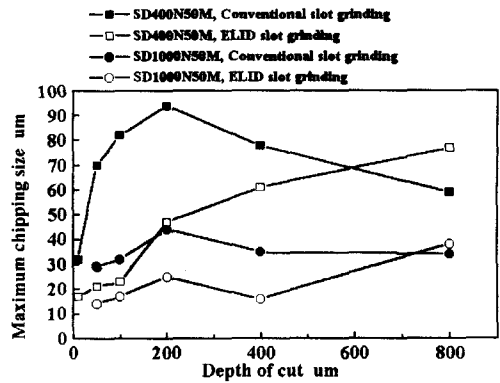


Fig.5 Effect of ELID on glass

(b)는 이송속도에 따른 최대 치핑크기의 변화를 나타낸 것이다. #400 슛돌의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 치핑의 크기는 81~273 μ m이었으며, 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의

최대 치핑의 크기는 23~62 μm 이었다. #1000 슷들의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 치핑의 크기는 32~87 μm 이었으며, 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의 최대 치핑의 크기는 18~72 μm 이었다. 실험 결과를 살펴보면 이송속도가 빨라지면 최대 치핑의 크기가 증가하며, 전해 인프로세스 드레싱을 적용하는 경우가 치핑을 억제하는 효과가 있는 것을 알 수 있다. 유리는 충격력에 약한 취성재료이기 때문에 홈가공시 이송속도가 증가함에 따라 가공저항이 커져서 선단부에서 취성적 파괴가 발생하여 치핑의 크기가 커지는 것이다.

Fig.6은 #1000스틀, 슷돌주속도 1,200m/min, 절입깊이 800 μm , 이송속도 100mm/min일 때, 공작물 출구부분의 단면형상을 나타냈다. (a)는 일반적인 홈가공을 할 경우이며 (b)는 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 것이다. 이 결과를 살펴보면 전해 인프로세스 드레싱을 적용하는 것이 단면방향의 최대 치핑크기가 작으며 전해작용에 의해 부드러운 형상의 가공단면을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

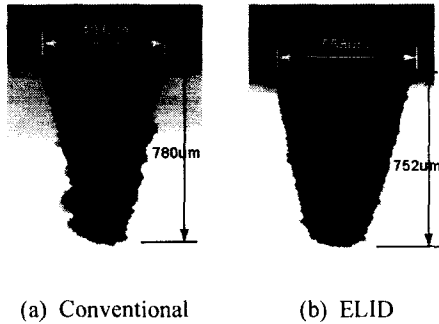


Fig.6 Difference between conventional and ELID slot grinding on glass

4.3 유리의 치핑현상

Fig.7은 슷돌주속도 1,200m/min, 절입깊이 100 μm , #400스틀을 사용하여 유리를 미소홈 가공할 경우에 공작물의 이송속도에 따른 일반적인 연삭가공과 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공면의 치핑현상을 비교하기 위한 그림이다. 이 사진은 공구현미경(OLYMPUS, STM-MJS2)으로 촬영한 것이다.

Fig.7에서 일반적인 홈가공에서는 치핑크기가 홈 측면에 산과 골짜기의 형상을 가지면서 분포되어 있으며 이송속도가 증가함에 따라 치핑크기가 급격

하게 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 경우는 치핑의 크기가 아주 작으며, 이송속도에 따른 치핑크기의 변화는 일반적인 홈가공에 비해 작은 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 서술한 것과 같이 전해작용에 의해 다이아몬드 입자가 원활하게 돌출되어 가공저항을 감소시키고, 슷돌표면에 발생한 코발트 본드 산화막이 가공시 충격력을 감소시키는 완충작용을 하여 취성과파괴를 억제시키기 때문이라고 생각된다.

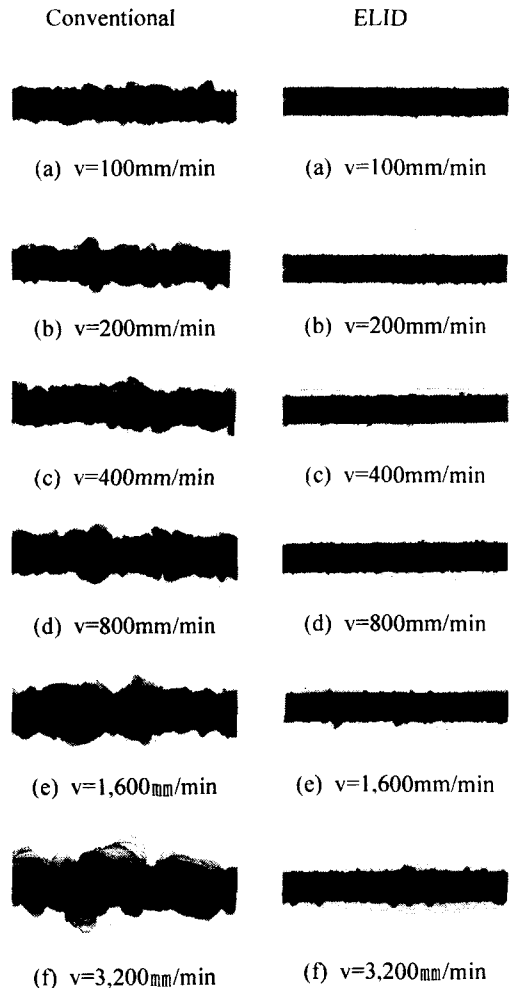


Fig.7 Chipping profile on glass

4.4 초경의 최대 치핑크기의 변화

Fig.8에 초경 가공시 일반적인 홈가공과 전해 인

프로세스 드레싱을 적용한 홈가공에 있어서 절삭깊이와 이송속도의 증가에 따른 최대 칩크기의 변화를 나타내었다. 칩크기의 측정은 Fig.4의 경우와 동일한 방법을 이용하였다.

(a)는 절삭깊이에 따른 최대 칩크기의 변화를 나타낸 것이다. #400 슷돌의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 5~16 μm 이었으며, 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 3~13 μm 이었다. #1000 슷돌의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 3~6 μm 이었으며, 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 2~4 μm 이었다. 이 실험 결과를 살펴보면 절입깊이가 클수록 칩핑의 크기가 커지며, 일반적인 홈가공보다 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 홈가공이 칩핑을 억제하는 효과가 큰 것을 알 수 있다.

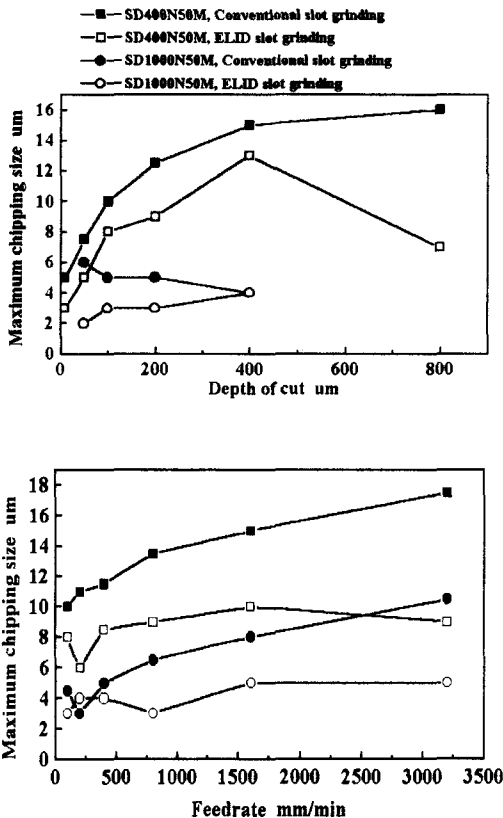


Fig.8 Effect of ELID on WC

(b)는 이송속도에 따른 최대 칩크기의 변화를 나타낸 것이다. #400 슷돌의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 10~18 μm 이었으며, 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 8~10 μm 이었다. #1000 슷돌의 경우, 일반적인 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 4~11 μm 이었으며, 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공에서의 최대 칩핑의 크기는 3~5 μm 이었다. 실험 결과를 살펴보면 이송속도가 빨라지면 최대 칩핑의 크기가 증가하며, 전해 인프로세스 드레싱을 적용하는 경우가 칩핑을 억제하는 효과가 있는 것을 알 수 있다. 초경을 가공할 때 발생하는 칩핑의 크기는 유리의 경우보다 적음을 알 수 있는데 이는 초경이 소결재이기 때문에 충격력에 의한 취성파괴가 적기 때문이다.

4.5 초경의 칩핑현상

Fig.9와 Fig.10은 슷돌주속도 1,200m/min, 절입깊이 100 μm , #400스틀을 사용하여 공작물의 이송속도를 100mm/min와 3,200mm/min로 하여 홈가공을 한 후, 홈측면 에지부를 SEM으로 촬영한 사진이다. SEM촬영시 홈측면 에지부를 30° 경사시켰으며 최대 칩크기는 홈측면 에지부의 수평방향으로 측정하였다.

Fig.9 (a)와 Fig.10 (a)는 이송속도 100mm/min로 하여 일반적인 홈가공과 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 홈가공의 칩핑 크기를 나타낸 것으로서 일반적인 홈가공에서의 최대 칩핑의 크기는 약 10 μm 이었으며 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 홈가공에서의 최대 칩핑크기는 8 μm 이었다.

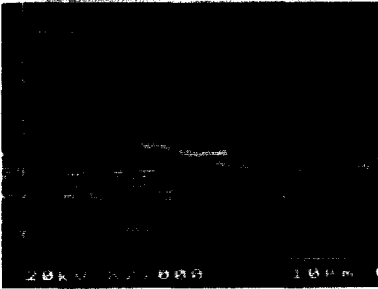
또한 일반적인 홈가공을 한 경우에는 홈에지부의 수평방향과 수직방향의 칩핑발생이 동시에 발생하였지만 전해 인프로세스 드레싱을 한 경우에는 홈에지부의 수직방향의 칩핑은 거의 관찰할 수 없었으며, 수평방향의 최대 칩핑크기도 작은 것을 알 수 있다.

Fig.9 (b)는 이송속도 3,200mm/min에서 일반적인 홈가공을 한 경우인데 최대 칩핑크기는 18 μm 이었으며, 초경입자의 돌출된 모습을 관찰할 수 있었다. 또한 홈에지부의 수평방향의 칩핑발생과 수직방향의 칩핑발생을 분명하게 알 수 있었다.

Fig.10 (b)는 이송속도 3,200mm/min에서 전해 인프로세스 드레싱을 한 경우로서 최대 칩핑크기는 9 μm 이었다. Fig.9 (b)의 일반적인 홈가공과 비교했을

때 칩핑크기가 매우 작은 것을 알 수 있는데 이는 전해 인프로세스 드레싱이 칩핑발생의 억제효과가 있는 것을 의미한다.

공작물의 이송속도가 빠를수록 칩핑이 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 이송속도가 3,200mm/min 일 때 급속이송에 의한 홈측면부의 이송마크가 선명하게 나타난 것을 관찰할 수 있었다.

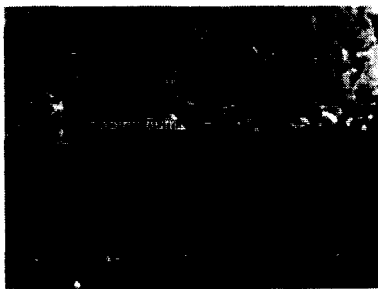


(a) $v=100\text{mm/min}$

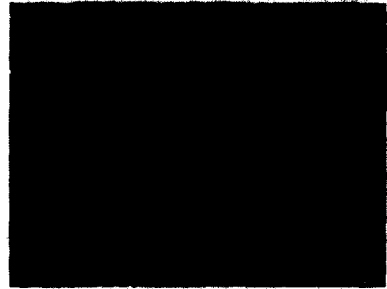


(b) $v=3200\text{mm/min}$

Fig.9 Chipping on WC by conventional slot grinding



(a) $v=100\text{mm/min}$



(b) $v=3200\text{mm/min}$

Fig.10 Chipping on WC by ELID slot grinding

Fig.11은 #400숫돌, 숫돌주속도 1,200m/min, 절입깊이 800 μm , 이송속도 100mm/min이면서 전해 인프로세스 드레싱을 하여 가공한 초경의 SEM사진이다.

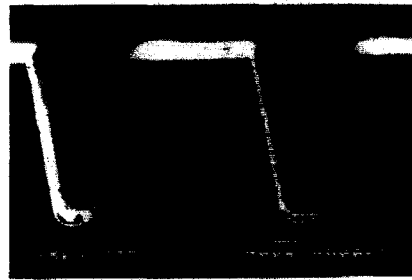


Fig.11 SEM photograph of WC ground grooves using ELID

5. 결론

본 연구에서는 취성재료인 유리와 초경의 미세함 연삭가공을 일반적인 연삭가공법과 전해 인프로세스 드레싱을 이용한 연삭가공법을 적용하여 가공특성을 비교하였는데 실험결과에서 전해 인프로세스 드레싱을 적용하는 것이 취성재료의 칩핑발생을 억제하는 데 매우 효과적임을 알 수 있었다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 코발트 결합체의 적절한 용출을 위한 조건은 무부하 전압 30V에서 가공전압은 14V, 가공전류

는 0.4A가 가장 적절하다.

- 2) 연삭깊이를 변화하면서 유리와 초경의 미세홈 가공을 한 결과 #400의 슷들을 이용할 경우에는 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 경우가 일반적인 연삭가공법을 적용한 경우보다 최대 치평의 크기의 평균값이 약 25% 정도 줄어듦을 알 수 있었으며 #1000의 슷들을 이용한 경우에도 동일한 결과를 얻었다.
- 3) 공작물의 이송속도를 변화하면서 유리와 초경의 미세홈 가공을 한 결과 #400의 슷들을 이용할 경우에는 전해 인프로세스 드레싱을 적용한 경우가 일반적인 연삭가공법을 적용한 경우보다 최대 치평의 크기의 평균값이 약 75% 정도 줄어듦을 알 수 있었으며 #1000의 슷들을 이용한 경우에도 약 75%정도 줄어 들었다.
- 4) 일반적인 홈가공을 한 경우에는 홈에지부의 수평방향과 수직방향의 치평발생이 동시에 발생하였지만 전해 인프로세스 드레싱을 한 경우에는 홈에지부의 수직방향의 치평은 거의 관찰할 수 없었으며, 수평방향의 최대 치평크기도 작은 것을 알 수 있었다.
- 5) 치평발생의 억제를 위한 효과적인 가공방법은 이송속도를 느리게 하고, 전해 인프로세스 드레싱을 적용하는 것이다.

후기

본 연구는 97년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-E-11)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ikeno, J., Tani, Y. and Fukutani, A., "Development of Chipping-Free Dicing Technology Applying Electrophoretic Deposition of Ultrafine Abrasives," Annals of CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 351-354, 1991.
2. Matsuo, T. and Ohbuchi, Y., "Slot Grinding of Steels and Ceramics with Superabrasive Wheels," Annals of CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 315-318, 1988.
3. Ohmori, H. and Nakagawa, T. "Mirror Surface

Grinding by Metal Bonded Superabrasive Wheel with ELID," Progress in Precision Engineering, pp. 152-165, 1991.

4. Ohmori, H., Takahashi, I., Nakagawa, T., "Highly Efficient Form Grinding with Electrolytic In-process Dressing for Die and Mould Manufacturing," 2nd International Conference on Die and Mould Technology, pp. 23-25, 1992.
5. Ohmori, H and Nakagawa, T., "Efficient and Precision Grinding Technique for Ceramics with Electrolytic In-Process Dressing(ELID), Int. J. of JSPE, Vol. 26, No. 4, pp. 273-277, 1992.
6. Ohbuchi, Y., Nishi, K. and Matsuo, T., "Chipping Mechanism in Slot Grinding of Mn-Zn Ferrite(1st Report) - Quantitative Measurement of Chipping," J. of JSPE, Vol. 61, No. 8, pp. 1156-1160, 1995.