

전해드레싱연삭에서 슷돌주속과 표면거칠기의 관계

Relationships between Wheel Velocity and Surface Roughness in the Electrolytic In-Process Dressing(ELID) Grinding

차 명섭(울산대 대학원), 김 한섭(울산대 대학원), 박 규열(울산대)

Myungsub Cha(Univ. of Ulsan), Hansub Kim(Univ. of Ulsan), Kyuyeol Park(Univ. of Ulsan)

Key Words : Electrolytic In-process dressing (전해드레싱: ELID), Wheel velocity(스틀주속), Surface Roughness: 표면거칠기), Ductile mode grinding(연성형 연삭), Specific grinding energy(비연삭 에너지)

Abstract

In this paper, it verifies the relationships between wheel velocity and surface roughness with the mirror surface grinding using electrolytic in-process dressing (ELID). In the general, as wheel velocity is high, surface roughness is better on the base of grinding theory. However, the relationships between wheel velocity and surface roughness is undefined due to the effect of electro-chemical dressing and the characteristics of materials. According to above relationships, ELID grinding experiment is carried out by following the change of wheel velocity. As the result of this study, it is found that surface roughness is not better as linearly as the increase of wheel velocity, but the limit of wheel velocity exists according to the characteristics of materials. Also, in contradiction to the present trend of high wheel velocity of manufacturing system for high surface integrity, it is able to expected to be the base on the development of new ultra precision grinding method with the practicality of mirror surface grinding using ELID grinding method.

1. 서론

최근에 절삭 혹은 연삭공구를 사용하는 기계가공 분야에서도 고정도화 및 고품위화의 요구가 높아지고 있다. 이 중에서도 연삭가공은 절삭가공과 비교하여 표면의 정밀도를 향상시키기 위한 제거가공법으로 적용되고 있으며, 세라믹 재료를 포함하는 난삭재의 가공에 있어서는 절삭가공보다 뛰어난 가공능력이 얻어지는 장점을 갖는 것으로 알려져 있다.^(1,2) 또한 정밀연삭가공 분야에서는 가공정도를 한단계 높이기 위한 방법으로서 종래의 연마가공에서 얻어지는 가공면을 연삭가공으

로 얻기 위한 일명 경면연삭(Mirror-like Surface grinding)에 관하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 일례로 연삭가공 중에 전기화학적 에너지를 슷돌의 드레싱에 이용하는 전해드레싱(Electrolytic In-process Dressing: ELID) 경면연삭법으로 실용화되어 있다.^(3,4)

ELID 연삭법은 금속결합재 슷돌을 이용하는 연삭가공에서 전기화학적 에너지에 의한 연속적 드레싱작용으로 인하여 가공 중에 슷돌의 눈매움>Loading)이나 날무덤(Glazing)등과 같은 현상을 방지하는 것이 가능하다. 따라서 적절한 전해드레싱 조건을 설정하면 미세한 입자로 구성된 슷돌의 사용이 가능하여 연마가공에 필적하는 가공면의 거칠기를 얻을 수

있다.⁽⁵⁻¹⁰⁾ 그러나 ELID 연삭에서는 스톨입자의 연삭작용과 전기화학적 에너지에 의한 스톨표면의 드레싱작용이 연삭가공 중인 스톨의 표면에서 동시에 작용하는 연유에 일반연삭과는 다른 연삭기구가 존재하는 것으로 알려져 있다. 실제로 ELID 연삭에 있어서 경면이 얻어지는 것으로 알려진 입도 #2000 이상의 스톨을 사용하는 연삭가공에서는 스톨주속이 높아질수록 표면거칠기가 악화되는 것으로 보고되어 있다. 이와 같은 결과는, 가공에 사용된 재료특성을 고려하여 연삭발열의 영향이 무시가능하다고 전제할 경우, 스톨주속의 고속화가 스톨입자의 밀도를 증대시킴으로서 가공면의 거칠기가 향상되는 연삭이론과 상반되는 결과이다.

본 연구에서는 ELID 연삭법을 이용한 경면연삭가공에서 스톨의 주속(Wheel Velocity)과 연삭면의 표면거칠기(Surface Roughness)의 상관관계를 조사함으로써 ELID 연삭법의 경면창성기구를 규명하고자 하였다.

2. 전해드레싱에 의한 경면연삭법

ELID 연삭은 Fig.1 에 나타낸 바와 같이, 금속결합재의 스톨축을 양극으로 하고 스톨에 근접 설치된 전극을 음극으로 접속한다. 전극과 스톨간은 전해액의 통액이 가능한 최소간격을 유지하며 양극간에 공급되는 연삭액(일종의 전해액)을 통하여 외부로부터 전압을 인가하면 양극반응에 의하여 스톨표면의 금속결합재만이 선택적으로 용출 제거되어 지립의 돌출(드레싱 효과)이 얻어진다. 단, 이 경우에 기존의 전해 드레싱에서 나타나는 강전해성 가공액의 사용에 의한 스톨이 과잉마모되는 현상이 발생되지 않으며, 연삭가공에 의한 스톨의 기계적 마모에 순응하여 전해작용이 진행되는 것을 특징으로 한다. ELID 연삭법을 적용하면 1)연삭저항의 감소, 2)연삭면 표면거칠기의 향상(특히 경면연삭시), 3)연삭성능의 균일화등의 가공특성이 얻어지게 된다.

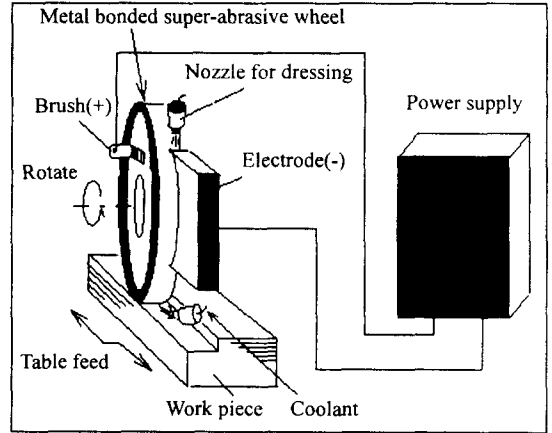


Fig. 1 Schematic illustration of ELID grinding method

3. 실험 및 고찰

3.1 실험장치 및 피삭재

연삭실험에는 통일중공업사의 왕복형 평면연삭기를 사용하였다. 본 평면연삭기의 경우, 주축의 최고회전수가 1800rpm 으로, 본 연구에서는 회전수를 조절하기 위하여 부가적으로 인버터를 설치하였다. 연삭가공중에 발생하는 모터의 소비동력은 전력변환기(Watt Transducer)를 사용하여 가공 중에 실시간으로 측정하였다. 구체적으로는 모터에서 발생하는 소비동력을 전력변환기를 통해서 아날로그 데이터로 처리한 다음에 아날로그 신호 입력

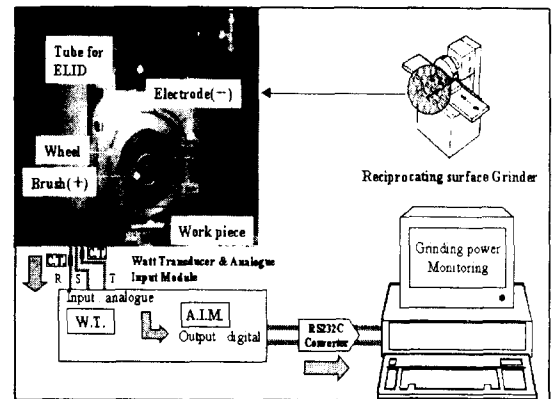


Fig. 2 Experimental set-up of ELID grinding

기(Analogue Input Module)를 통해서 디지털로 변환해서 PC 에서 출력되어진다. 본 연구를 위하여 구성된 실험장치를 Fig. 2 에 도시한다.

Table 1 은 연삭실험 시스템의 제원이며, 황삭용으로 #325, 경면연삭용으로 #4000 다이아몬드 슷돌을 각각 #120C 슷돌과 브레이크 트루어를 사용하여 트루잉한 후에 전해드레싱 방식으로 초기드레싱을 수행하였다. #4000 슷돌을 사용한 경면연삭 실험결과는 가공면의 표면거칠기와 비연삭에너지의 관계를 통하여 평가하였다. Table 2 는 실험에 사용된 부분안정화 지르코니아(PSZ) 및 초경합금(WC-Co)의 기계적 특성을 나타낸다.

3.2 연삭실험 및 고찰

Table 1 Specifications of experimental set-up

Grinding Machine	Surface Grinder: TGS-40(TONG-IL HEAVY INDUSTRIES Co., Ltd.)
Grinding Wheels	SD325N100M,SD4000N100M(FUJI DIE Co., Ltd., Japan)
Electrod -e	Copper with arc length equal to 1/5 of wheel periphery
Power Supply	TRUOLID: TED-620 (DAEGEON PRECISION Co., Ltd.)
Grinding Fluid	CEM (NORITAKE Co., Ltd, Japan)

Table 2 Material properties of workpieces

	Hardness (Hv)	Fracture Toughness (MN/m ^{3/2})	Remark
ZrO ₂	1,350	6.8	Partially stabilized
WC-Co	1,200	12.0	12% Co

a) 주속과 표면거칠기의 관계

Fig. 3 은 #4000 슷돌과 ELID 연삭법을 이용한 PSZ 와 WC-Co 의 경면연삭 실험결과이다. 표면거칠기는 소재에 관계없이 슷돌 회전수 1200rpm(942m/min)의 조건에서 가장 양호하며 1800rpm(1,414m/min)으로 회전수가 증가한 경우에는 다소 악화되는 것을 알 수 있다. 단, PSZ 의 경우에는 가장 낮은 회전수 600rpm (47

1m/min)의 조건에서 표면거칠기 값이 Ra: 25nm 전후로 가장 큰 값으로 갖는 반면 WC-Co 는 가장 높은 회전수 1800rpm 에서 Ra: 22 nm 로 가장 큰 표면거칠기 값을 갖는 상반되는 결과가 얻어졌다. 이와 같이 연삭면의 표면거칠기가 슷돌의 주속과는 무관하게 어느 특정한 속도역에서 가장 양호한 값을 갖는다는 사실은 ELID 연삭가공이 극히 미세한 지립을 사용함으로써 지립의 밀도를 극대화

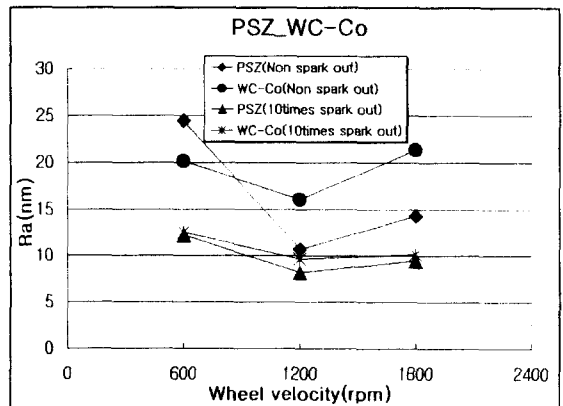


Fig. 3 Relationship between wheel velocity and surface roughness #4000wheel

한다는 사실로부터 다음과 같이 추정하는 것이 가능하다. 즉, 재료의 항복응력과 취성과 파괴응력이 거의 유사한 값을 갖는 것으로 알려진 취성재료의 응력-변형률관계로 부터 취성과파괴가 발생되기 직전의 응력상태에서는 소성변형을 동반하게 된다⁽¹⁴⁾. 이와 같은 취성재료의 파괴거동은 연삭가공에 있어서는 단위 지립과 피삭재의 접촉상태에 따라서 취성과파괴 혹은 연성과파괴 의존형의 가공기구를 좌우하게 된다. 따라서 효과적인 경면연삭을 구현하기 위해서는 지립에 의한 작용압력이 재료의 탄·소성 변형응력의 상한과 취성과파괴가 발생하는 응력의 하한과의 사이에 존재하는 극히 좁은 응력상태 즉, 취성과파괴에서 연성과파괴로 천이되는 응력상태에서 재료의 제거작용이 수행되어야 한다. 이와 같은 응력상태를 연·취성 천이점이라고 정의하며, 취성재료의 파괴특성 및 가공기구를 고려하면, Fig. 3 의 연삭조건에서는 슷돌 회전수가 1200rpm 의 경

우에 가장 연성형 제거작용에 적합한 응력상태가 작용한 것으로 판단할 수 있다. 반면, 1200rpm 보다 낮은 회전수의 조건에서는 단위 입자에 의한 압력이 증가하여 취성과파괴를 동반하게 되는 반면, 보다 높은 회전수 1800rpm의 조건에서는 이와 반대현상으로 소성유동에 의한 용기현상(Ploughing)이 과다하게 발생하여 표면거칠기가 악화된 것으로 추정할 수 있다.

b) 주속과 비연삭에너지의 관계

Fig. 4는 #325 슷돌을 사용한 고능률 연삭가공, Fig. 5는 #4000 슷돌을 사용한 경면 연삭가공에 소요되는 소비동력을 비연삭에너지로 환산하여 나타낸 결과이다. 연성, 취성 및 연성 취성 파괴의 중첩으로 진행되는 경면연삭가

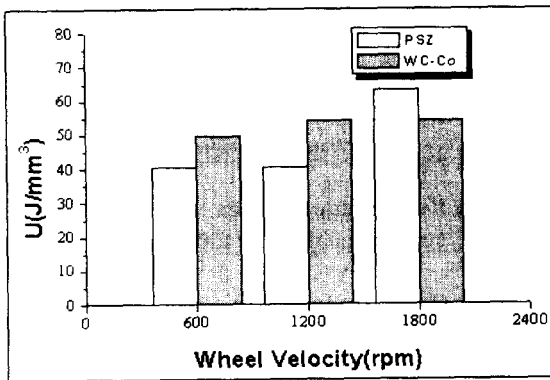


Fig. 4 Relationship between wheel velocity and specific grinding energy with #325 wheel

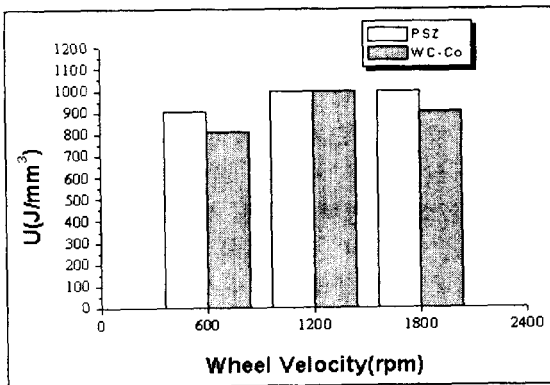


Fig. 5 Relationship between wheel velocity and specific grinding energy with #4000 wheel

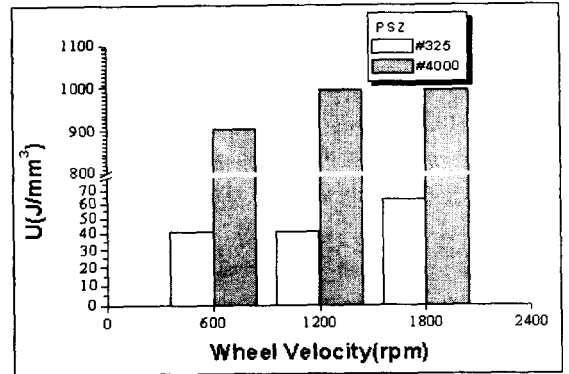


Fig. 6 Relationship between specific grinding energy with #325 & #4000 wheel in PSZ

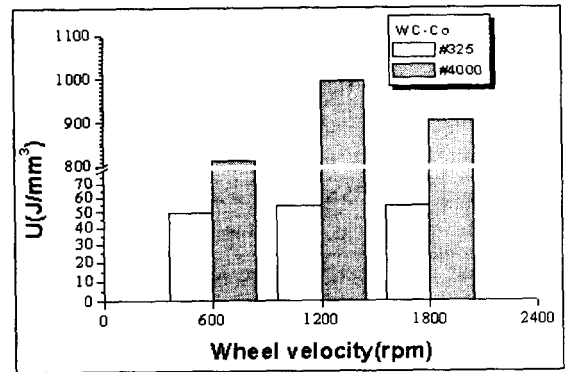


Fig. 7 Relationship between specific grinding energy with #325 & #4000 wheel in WC-Co

공의 경우 취성과파괴에 의하여 가공이 진행되는 고능률 연삭가공에 비하여 높은 비연삭에너지가 사용된다는 사실을 Fig. 6 과 Fig. 7로부터 확인할 수 있다. 구체적으로, #325 슷돌을 사용한 고능률연삭의 경우에는 PSZ 와 WC-Co 모두 약 65[J/mm³] 이하의 값을 갖는 반면, #4000 슷돌을 사용한 경면연삭에서는 800~ 1000 [J/mm³]의 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 PSZ 가 WC-Co 에 비하여 전반적으로 다소 큰 값을 가지며, 변화의 폭은 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 다음과 같이 설명되어 질 수 있다. 즉, 재료제거기구가 취성과파괴에 기인한 경우에 비연삭에너지는 파괴인성에 비례하는 반면, 연성형 가공의 경우에는 소성유동의 동반에 따

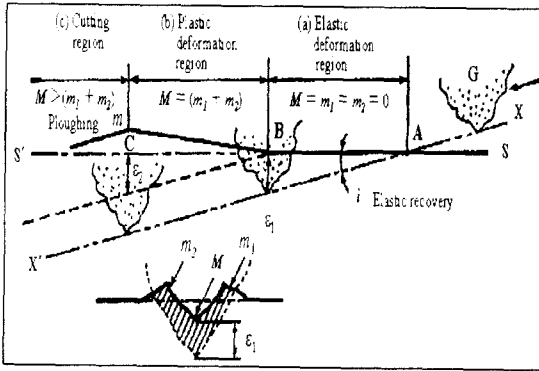


Fig. 8 Relationship between grinding mode and wheel velocity

른 소성변형량에 의해서 비연삭에너지가 결정되어진다⁽¹³⁾. 따라서 #325 슷돌을 사용한 고능률연삭에 비하여 연성형 가공을 위주로 하는 #4,000 슷돌을 사용하는 경면연삭가공에서 비연삭에너지가 크게 나타난다. 또한 #4,000 슷돌의 연삭가공에서 슷돌의 회전수가 600rpm 에서 1200rpm 으로 증가하면 표면거칠기가 향상된다는 사실로부터 1200rpm 전후에서 연삭기구가 취성형 혹은 연취성형에서 연성형으로 천이되며, 따라서 1200rpm 의 조건에서 600rpm 에 비하여 소성유동에 기인하는 변형량이 증가한 것으로 판단할 수 있다. 반면, 1800rpm 으로 주속이 증가하게 되면 Fig. 8 에서와 같이 전체적인 탄·소성 및 절삭영역에서 탄·소성영역이 증가하여 효과적인 절삭작용이 발생되지 않음으로써 비연삭에너지가 감소 또는 소재특성에 따라서 동일하게 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 탄·소성영역의 증가는 절삭깊이가 작아지는 것과 동일한 효과로서 정상적인 절삭현상이 발생되지 않음으로 인해 용기되는 양이 증가되어 표면거칠기를 악화시키는 것으로서 전절에서 기술한 내용과 일치한다. 즉, 연성형 가공시 절삭작용이 이루어지기 위해서는 적절한 가공에너지를 필요로 하며, 공급되는 에너지가 적을 경우에는 유효한 절삭작용이 발생되지 못하며, 상대적으로 많은 탄·소성변형을 유발하게 된다. 동 결과에 의하면, 슷돌주속은 이와 같이 가공에너지를 결정하는 요인이 되며, 특히 ELID 연삭법이 이용하는 미립자 슷돌을

사용하는 경면연삭가공이라는 점을 고려하면 슷돌주속에 따라서 입자의 효과적인 절삭작용이 좌우되는 것으로 단정할 수 있다

4. 결론

본 연구에서는 ELID 연삭법을 적용한 경면연삭가공에서 슷돌주속이 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) ELID 연삭법을 이용한 경면연삭가공의 경우, 소재특성에 따라서 경면가공에 적합한 유효주속에 차이가 존재한다.
- (2) #4000 슷돌을 사용한 경면연삭의 경우, 최적의 표면거칠기를 얻기 위해서는 유효한 주속의 한계가 존재하며, 주속이 과다한 경우 소성유동에 의한 용기현상이 발생하여 표면거칠기가 악화된다.
- (3) ELID 연삭법을 이용한 경면연삭가공의 경우, 비연삭에너지가 클수록 표면거칠기가 개선되며, 비연삭에너지가 가장 큰 경우의 주속을 경면가공의 한계주속으로 판단할 수 있다.
- (4) 한계주속 이하에서는 크랙의 발생으로 인하여 표면거칠기가 악화되며, 한계주속 이상에서는 용기현상(Ploughing)에 의해 표면거칠기가 악화된다.

- (1) T. Nakagawa, K. Suzuki and T. Uematsu, 1985, “Three dimensional creep feed grinding of ceramics by machining center,” *Proc. ASME WAM, PED* 17, pp. 1~7.
- (2) T. Nakagawa and K. Suzuki, 1986, “Highly efficient grinding of ceramics and hard metals on grinding center,” *Ann. CIRP* 35(1), pp. 205~210.
- (3) 大森 整, 外, 1987, “鑄鐵ボンドダイヤモンド砥石によるシリコンの研削加工,” 日本國精密工學會 秋季學術大會, pp. 667~668.
- (4) 大森 整, 外, 1988, “鑄鐵ボンドダイヤモンド砥石によるシリコンの研削加工,” 日本國精密工學會 春季學術大會, pp. 521~522.
- (5) 大森 整, 外, 1988, “鑄鐵ボンドダイヤモンド砥石による硬脆材料の鏡面研削加工,” 日本國精密工學會 秋季學術大會, pp. 355~356.
- (6) 大森 整, 外, 1988, “鑄鐵ボンドダイヤモンド砥石によるガラス系材料の鏡面研削,” 日本國精密工學會 秋季學術大會, pp. 357~358.
- (7) 大森 整, 外, 1989, “メタルボンド砥石による金型材料の鏡面研削加工,” 日本國精密工學會 春季學術大會, pp. 597~598.
- (8) 米今義伸, 外, 1991, “プラスチックレンズ成形用金型の鏡面研削,” 日本國砥粒加工學會 學術大會, pp. 325-328.
- (9) 朴 圭烈, 外, 1992, “プラスチック非球面レンズの鏡面研削加工,” 日本國砥粒加工學會 學術大會, pp. 131~134.
- (10) 大森 整, 外, 1992, “非球面レンズの電解ドレッシング鏡面研削,” 日本國精密工學會 春季學術大會, pp. 457-458
- (11) 河村末久, 外, 1984, “研削加工と砥粒加工,” 日本國 共立出版株式會社, pp. 82~83, 138.
- (12) 金相哲, 1985, “破壞力學,” 民音社, pp. 83~104.
- (13) 杉田忠彰, 外, 1985, “セラミッスの機械加工,” 日本國 養賢堂, pp. 107~127.
- (14) 日本機械學會 編, 1998, “生産加工の原