

광학소자 가공방법(연삭①)

경취 재료의 조면 연삭 기초

유리나 파인 세라믹 등의 경취 재료를 연삭한 뒤의 특징은 지립의 최대 절입 깊이가 충분히 작은 경우, 바뀌말하면 파괴 단위가 극히 작은 경우에는 연성 모드적 연삭이 되고, 또 반대로 큰 경우에는 취성 모드적 연삭이 된다는 것이다. 보통 연성 모드적 연삭은 다듬질 연삭에, 그리고 취성 모드적 연삭은 조연삭에 적용되는 경우가 많다. 따라서 여기서는 치수·형상 정밀도를 유지하고 동시에 여분의 가공 공차를 매우 능률적으로 제거하는 것을 목적으로 한 경취 재료의 조면 연삭 기초에 대해 소개한다.

편집자 주

1. 조면 연삭용 다이아몬드 휠

연삭 작업에서 가장 중요한 것은 작업 목적에 적합한 다이아몬드 휠을 선택하는 것이다. 작업 목적에 맞는 휠을 선택한 경우에는 연삭 초기에 작업이 잘 되지 않아도 작동 조건을 순차 변경함으로써 작업을 순조롭게 할 수 있다. 한편 작업에 적합한 휠을 선택하지 않은 경우에는 아무리 작동 조건을 변경한다 해도 작업을 잘 할 수 없다.

유리나 세라믹 등의 경취 재료 연삭에 이용되는 다이아몬드 휠을 본드 종류에 따라 구분하면 레진 본드 휠, 비트리파이드 본드 휠 및 메탈 본드 휠이 있다. 이 경우 전착 다이아몬드 휠은 일종의 메탈 본드 휠로 간주할 수 있다.

레진 본드 휠은 표1에 나타난 것처럼 탄성 계수가 작기 때문에¹⁾ 연삭 시에 휠과 가공물의 접촉부에 탄성 변형이 생긴다.

이 때문에 지립이 본드 안을 메우고 지립 절삭날 선단이 가지런해지지 쉬우며, 동시 연삭 절삭날수도 많아지기 때문에 표면 거

칠기가 작아진다. 또 연삭면에 생성된 균열의 크기도 작아진다. 반면 휠의 탄성 변형 영향으로 가공물에 모서리 늘어짐이나 절삭 잔여물이 생기기 쉽다. 그리고 본드의 파괴 강도가 작기 때문에 이 휠은 일반적으로 정밀, 경연삭에 이용된다.

다음으로 비트리파이드 본드 휠은 지립층의 탄성 계수가 크고, 연삭 시에 휠의 탄성 변형이 작으며 절삭 잔여물이 적은 것은 물론 파괴 강도가 작기 때문에 치수·형상 정밀도를 필요로 하는 정밀, 경연삭에 이용된다. 그리고 메탈 본드 휠은 탄성 계수 및 파괴 강도 모두 크기 때문에 고능률, 중연삭에 이용된다. 이상 휠의 특성을 정리하면 그림 1과 같다²⁾.

따라서 유리나 세라믹의 조면 연삭에는 일반적으로 메탈 본드 다이아몬드 휠을 이용하게 된다.

다음으로 중요한 것은 입도 선택이다. 일반적인 WA나 GC 비트리파이드 지석의 경우에는 단석 다이아몬드 드레싱 이송을 변경하여 연삭 시의 표면 거칠기를 조절할 수 있다. 그러나 다이아몬드 휠 경우에는 드레싱으로 조절 가능한 표면 거칠기의 범위가

표 1. 각종 결합제의 대표적 물성기(岡田)

물성 결합재	비중	경도Hv (kgf/mm ²)	인장 강도 (kgf/mm ²)	영률 (kgf/mm ²)	열팽창률 (10 ⁻⁶ /°C)	열전도율 (W/m ² K)
레진	1.15	12	5.0	430	45	1.7
메탈	8.80	82	38.0	10.800	18.2	101
비트리 파이드	2.50	780	6.0	7.200	8.0	1.8

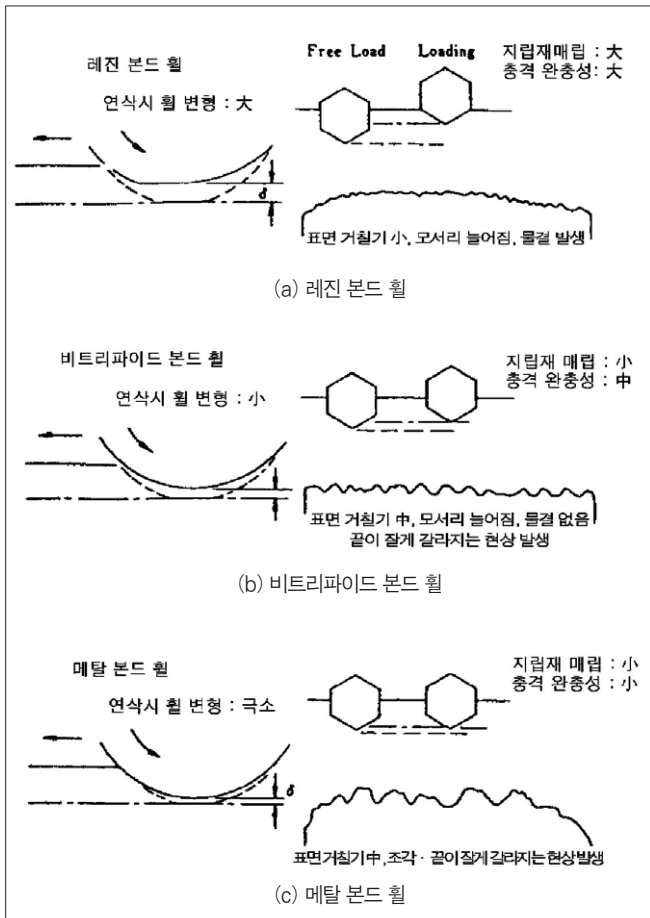


그림 1. 초지립 휠 결합제의 탄성 계수 차이가 연삭 성능에 미치는 영향의 모델도(河端)

매우 작고, 입도에 따라 우선적으로 표면 거칠기의 범위가 결정되어 버린다. 그림 2는 휠의 입도와 표면 거칠기의 관계를 나타낸 것이다³⁾. 그림에서 스트레이트 휠을 이용한 경우보다 컵 휠을 이용한 경우가 표면 거칠기가 작지만 어떤 경우나 입도에 의해 표면 거칠기의 범위가 결정된다는 것을 알 수 있다. 이 때문에 연삭 작업에서는 필요한 표면 거칠기의 정도에 따라 사용하는 휠의 입도를 결정하면 된다. 이 경우 입도를 낮게 하면 가공 능률은 향상되지만 표면 거칠기가 커지고 또 잔류 균열의 크기도 커지기 때문에 치수 · 형상 정밀도와 표면 거칠기를 조정하는 다듬질 공정에 걸리는 시간이 길어진다. 또 입도를 높이면 표면 거칠기가 작아지고 또 잔류 균열의 크기도 작아지기 때문에 다듬질 공정에 걸리는 시간을 줄여줄지만 조연삭 공정에서의

가공 능률은 저하된다. 이 때문에 일반적으로는 이 요소들의 균형을 맞춰 입도가 결정된다. 예를 들면 유리 평면 연삭이나 원통 연삭 등의 경우에는 #80~#170 정도의 입도가 알루미늄의 경우에는 #140~#170 정도가 사용된다. 또 입도와 함께 중요한 것이 집중도(concentration)이다. 집중도는 지립층 단위 체적당 포함된 지립 비율을 나타내고 그 값이 100일 때 지립 함유 비율은 25%이다. 이 집중도는 휠 작업면 상의 절삭날 밀도와 칩포켓 크기에 영향을 주고 집중도가 큰 휠일수록 절삭날 밀도가 높아지지만 칩 포켓의 크기는 작아진다. 이 때문에 연삭 시에 집중도가 너무 낮은 휠을 이용하면 절삭분은 잘 빠지지만 절삭날수가 적기 때문에 절삭날에 마모가 생기기 쉽고, 휠의 연삭 성능이 저하된다. 한편 집중도가 너무 높은 휠을 이용하면 절삭날수가 많기 때문에 절삭날에 마모가 생기기 어렵지만 칩 포켓이 작아지기 때문에 막히기 쉽고 이 경우에도 휠의 연삭 성능이 저하된다. 따라서 휠의 입도와 가공물 재질과의 관련에 있어 집중도는 최적값이 존재하게 된다. 그림 3에 초

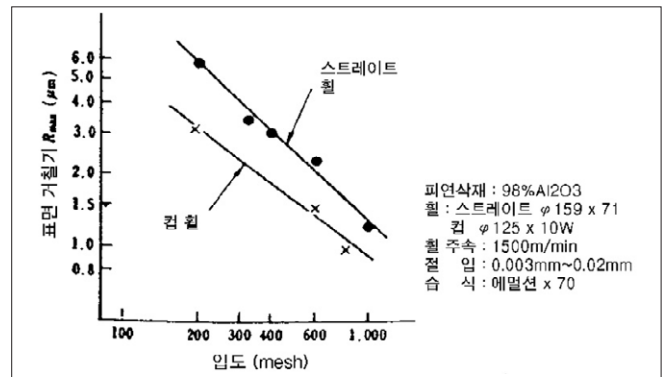


그림 2. 입도와 표면 거칠기(辻郷)

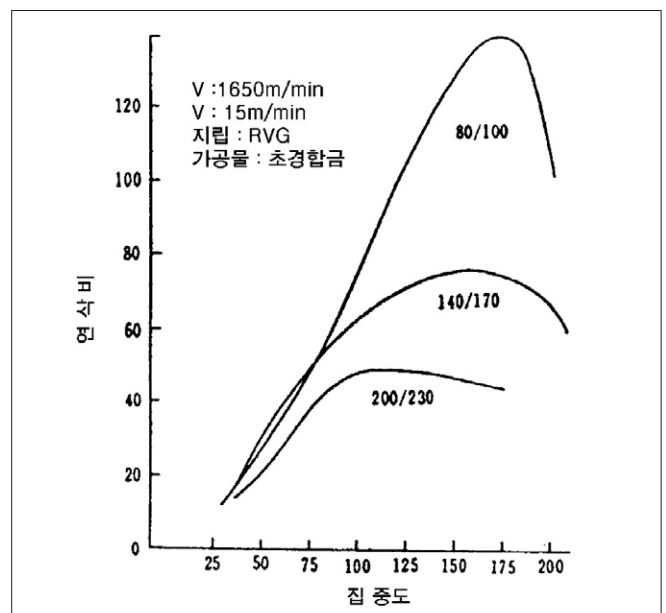


그림 3. 다이아몬드 휠의 집중도와 연삭비의 관계 (GE사)

경합금을 레진 본드 다이아몬드 휠로 연삭한 경우의 집중도와 연삭비의 관계를 나타냈다⁴⁾. 그림은 레진 본드 휠의 경우이기 때문에 메탈 본드 휠의 경우와 정량적인 관계에 있어 다소 차이가 있지만 정성적 경향으로서 집중도가 너무 낮거나 높아도 연삭비가 작아짐을 알 수 있다. 또 연삭비가 최대가 되는 집중도는 휠의 입도에 의존한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 가공물의 재질이 막히기 쉬운지 아닌지에 따라 또는 사용하는 휠의 입도에 따라 집중도를 결정하면 된다. 보통 유리 평면 연삭이나 원통 연삭 등에는 집중도가 25~75 정도인 다이아몬드 휠이, 알루미늄 등은 75~100 정도인 것이 사용된다.

이상과 같이 정밀, 경연삭인지 혹은 고능률, 중연삭인지와 같은 작업 목적에 따라, 또는 단단하고 취성이 높은 가공물인지 혹은 부드럽고 연성이 높은 가공물인지 등 그 재질에 따라 사용되는 다이아몬드 휠이 다르다. 일반적으로는 휠 제조업체가 그에 대응하는 휠 선택표를 기준으로 작성하므로 그것을 참고해 사용하는 휠을 결정하게 된다.

2. 툴링과 드레싱

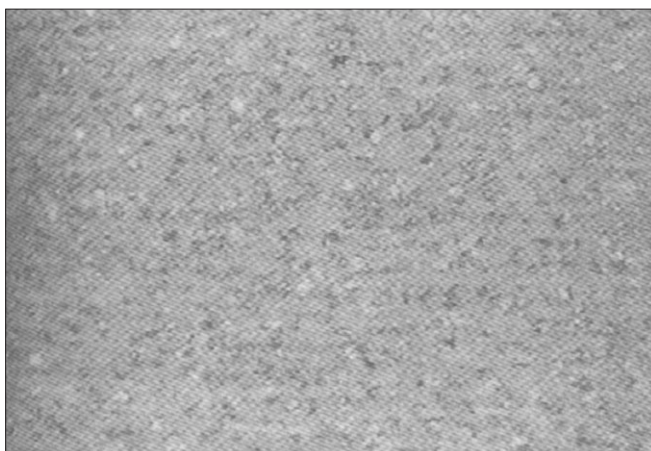
기계 가공 작업에 있어 가공물을 깎는 것은 절삭날이기 때문에 그 절삭날이 충분히 예리하고 또한 적절한 절삭분의 배출 공간 즉 칩 포켓이 없으면 예를 들어 작업 목적에 적합한 공구를 선택했다 해도 작업을 순조롭게 순조롭게 할 수 없다. 연삭 작업의 경우에 이 공구의 컨디셔닝에 해당하는 것이 툴링과 드레싱이다. 툴링은 떨림과 형상을 수정하는 것이고, 드레싱은 재정형하는 것이다. 다이아몬드 휠을 새로 연삭반에 설치하는 경우는 우선 휠을 플랜지에 설치하고 이 플랜지를 연삭반의 주축에 설치한다. 이 경우 휠 중심과 플랜지 중심은 반드시 일치하지는 않기 때문에 이것을 일치시키는 작업 즉 떨림 수정 작업이 필요하다. 또 새로 휠을 연삭반에 설치하는 경우가 아니라도 휠을 교환하

는 경우나 연삭시에 휠의 작업면에 편마모를 만들고 그 진원성이 사라지는 경우에도 휠의 형상 수정이 필요하다. 이러한 휠의 떨림 수정이나 형상 수정을 목적으로 한 툴링 작업이 적절히 이루어지지 않은 경우에는 연삭시 강제 진동이 생기고 연삭면이 깨지거나 갈라지는 원인이 된다. 이 때문에 연삭 작업을 할 때에는 툴링을 적절히 할 필요가 있다.

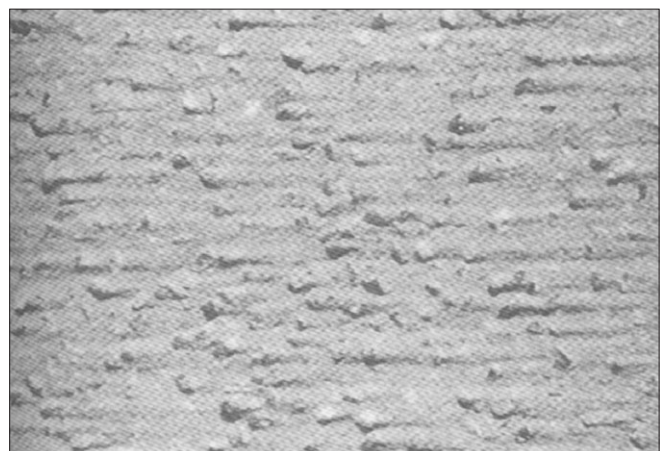
툴링과 마찬가지로 중요한 것이 드레싱이다. 그림 4와 같이 툴링 후의 휠 작업면에는 지립 절삭날 돌출이 거의 보이지 않는다. 이 때문에 절삭분을 배출하기 위한 칩 포켓이 형성되지 않기 때문에 휠의 깎이는 맛이 매우 나쁘다. 이것은 정압 연삭의 경우에는 제거 속도가 매우 낮고 또 정 절입 연삭의 경우에는 연삭 저항의 법선 분력이 매우 커진다는 것을 의미한다. 따라서 예를 들어 작업 목적에 적합한 휠을 선택해도 드레싱을 적절히 하지 않으면 연삭 작업을 순조롭게 할 수 없다.

툴링·드레싱 방법으로는 WA나 GC 비트리파이드 지석을 연삭하는 방법, 다이아몬드 공구에 의한 방법, 연강 연삭법, 방전 가공을 이용하는 방법, 전해 가공을 이용하는 방법 등 많은 방법이 있지만 유리나 세라믹 등 조면 연삭에 이용되는 메탈 본드 다이아몬드 휠은 툴링이나 드레싱을 하기 어렵기 때문에 이 방법들에는 일장일단이 있으며 이것이라고 할 만한 결정적인 것이 없는 게 현실이다.

이 방법들 중에 메탈 본드 다이아몬드 휠의 툴링·드레싱을 목적으로 하는 경우에는 그림 5와 같은 중형 로터리 드레셔와 그림 6과 같은 방전 가공을 이용한 방법이 효과적이다. 중형 로터리 드레셔를 이용하는 경우에는 다이아몬드 휠의 주속도와 WA 혹은 GC 연삭 지석의 주속도를 거의 동일하게 하는 것, 즉 등속 조건을 만족하는 것이 포인트다⁵⁾. 이러한 조건 하에서는 탈락한 지립 혹은 그 파편 등이 휠의 본드를 매우 효율적으로 제거하기 때문에 툴링 혹은 드레싱이 신속하게 이루어진다. 단 이 경우에는 작업 목적에 맞게 연삭 지석의 사양을 결정하는 것이 중요하



a) 툴링 후의 휠 작업면



b) 드레싱 후의 휠 작업면

그림 4. 툴링·드레싱 후의 휠 작업면

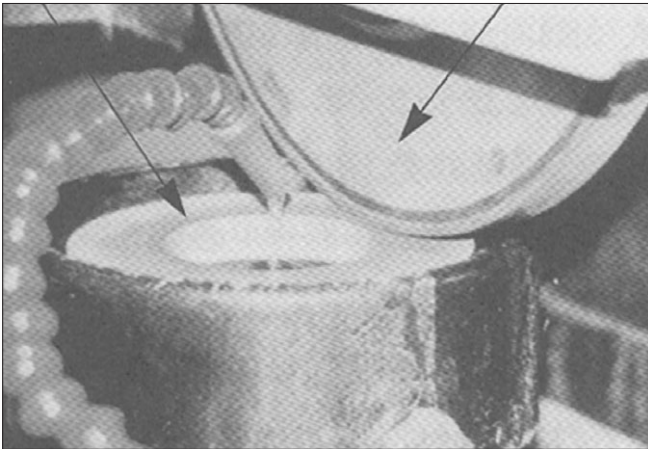


그림 5. 중형 로터리 드레서를 이용한 툴링·드레싱(OHTA (주))

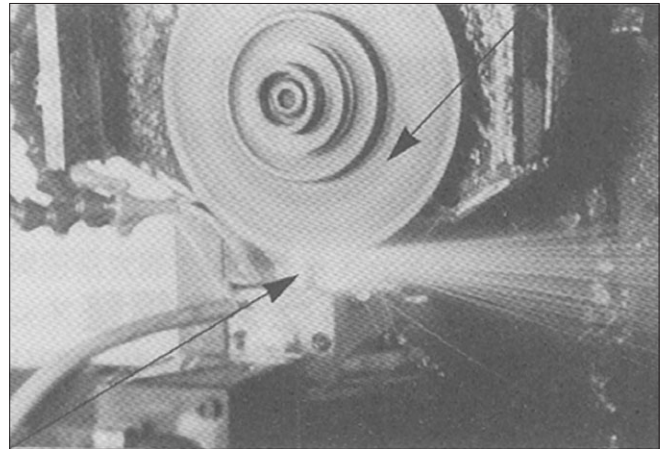


그림 6. 접촉 방전 드레싱(도요타 반옵스 (주))

며 일반적으로 툴링에는 다이아몬드 휠의 입도보다 훨씬 낮은 입도의 연삭 지석을 이용하고, 드레싱에는 거의 동일한 입도 또는 다소 입도가 높은 연삭 지석을 사용한다. 그리고 연삭 지석의 결합도는 툴링의 경우에는 높고, 드레싱의 경우에는 낮아진다. 다음으로 방전 가공을 이용하는 경우에는 전압, 전류 등의 조건을 적절히 설정하면 방전에 의해 본드가 쉽게 용해되고 제거되기 때문에 툴링, 드레싱 효율이 높다⁶⁾.

이상 서술한 것처럼 휠 작업면 성상(절삭날 밀도, 지립의 돌출 높이, 칩 포켓 등)의 차이는 휠의 깎이는 맛 차이와 직접 결부돼 가공물의 표면 품질(표면 거칠기, 연삭 그을음, 균열, 잔류 응력 등)의 편차를 초래하기 때문에 연삭 작업에 있어서는 어떻게 휠의 작업면 성상을 일정하게 유지하는지가 포인트가 된다. 이 때문에 휠의 작업면 성상을 일정하게 유지하는 것이 가능한 툴링·드레싱 법의 확립 혹은 드레싱 간격 간격 관리(칼날간 수명의 관리)가 유리나 세라믹 등의 경취 재료 연삭에서는 매우 중요하다.

3. 휠의 균형 조정

유리나 세라믹 등 경취 재료의 연삭에서는 휠의 균형 조정이 매우 중요하다. 앞에서 말한 툴링이 적절하게 이루어지지 않고 휠에 흔들림이 있는 경우와 같이 휠의 균형 조정이 좋지 않은 경우에는 연삭 시에 강제 진동이 발생하고 연삭면에 균열이나 치핑 등의 연삭 손상이 발생하기 쉽다. 이 때문에 조면 연삭이라고 해도 휠의 균형 조정을 충분히 하는 것이 중요하다.

균형 조정을 하는 방법에는 정적인 방법과 동적인 방법이 있다. 정적인 균형 조정법은 다이아몬드 휠을 플랜지에 설치하고 툴링을 한 후에 연삭반에서 휠과 플랜지를 분리한 상태에서 균형구를 이용해 휠의 균형을 조정하는 방법이다. 이 방법에는 천칭식 균형대를 이용하는 방법, 평행봉식 균형대를 이용하는 방법 및 롤러식 균형대를 이용하는 방법 등이 있다.



그림 7. 휠 균형 조정 장치(주 노리타케 컴퍼니 리미티드)

또 동적 균형 조정법은 다이아몬드 휠을 연삭반의 주축에 설치한 상태에서 균형을 조정하는 방법이다. 정적인 방법의 경우에는 다이아몬드 휠을 연삭반에서 분리한 상태에서 균형을 조정하기 때문에 균형을 조정한 휠을 다시 연삭반에 설치한 경우 주축과 플랜지의 테이퍼가 닿는 등의 영향도 있어 다소 균형이 깨지는 불량 발생한다. 이 때문에 다이아몬드 휠을 이용하는 경우에는 특히 휠을 포함한 주축계 전체의 균형을 조정하는 것이 바람직하다. 이 동적인 균형을 조정하는 방법으로는 휠 회전을 정지하고 조정하는 방법과 휠을 회전시킨 채로 조정하는 방법이 있다. 현재 예를 들면 그림 7과 같은 균형 조정용 장치가 많이 시판되고 있다.

4. 조면 연삭 방식

유리나 세라믹 등 경취 재료의 조면 연삭에 있어 문제가 되는 것은 가공 능률이다. 조면연삭의 가공 능률은 일반적으로 제거 속도로 나타낸다. 여기에서 평면 연삭 시의 절입을 t , 가공물 속도를 v , 그리고 연삭폭을 B 라고 하면 제거 속도 Z 는

$$Z = B \cdot v \cdot t$$

가 된다. 여기에서 휠 단위폭 당 제거 속도를 고려하면,

$$Z / B = v \cdot t$$

가 되고, 절입과 가공물 속도의 곱에 따른다. 이 때문에 가공 능력을 높이고자 하는 경우에 절입을 증가시키는 쪽이 유리한지 혹은 가공물 속도를 올리는 쪽이 유리한지 하는 문제가 발생한다. 이 경우 그림 8에 나타낸 지립의 평균 절삭(절삭분) 단면적 a 는

$$a = \mu^2 \cdot (v / V) \cdot (t / D)^{1/2}$$

가 되고, 이 조합에 따라 그 면적이 달라진다(단 μ : 지립 간격, D: 휠 지름).

여기에서 제거 속도를 일정하게 한 연삭 방식을 일례로 생각하면 고 절입 · 저속 이송 연삭(크립 필드 연삭)과 저 절입 · 고속 이송 연삭(하이 레시프로, 스피드 스트로크 연삭, 단 사용되는 의미가 다르다)이 있고, 기하학적으로 보면 전자가 얇고 절삭분 형태가 긴 것에 비해 후자는 두껍고 절삭분 형태가 짧다. 일반적으로 유리나 세라믹 연삭에 의해서는 치핑 발생이 문제가 되는 경우가 많고, 지립의 평균 절삭 단면적이 커지면 연삭력이 커지고 치핑이 발생하기 쉽기 때문에 이 점을 고려하면 고 절입 · 저속 이송 연삭 방법이 유리하게 보인다. 단 이 경우는 접촉호의 길이 ($l = (tD)^{1/2}$)가 길기 때문에 지립이 가열되는 시간이 길고, 열 손상을 받기 쉬운 문제가 있다. 또 연삭액도 들어가기 어렵기 때문에 열에 약한 다이아몬드의 경우에는 특히 연삭액 공급법을 포함한 냉각 방법에 충분히 주의할 필요가 있다.

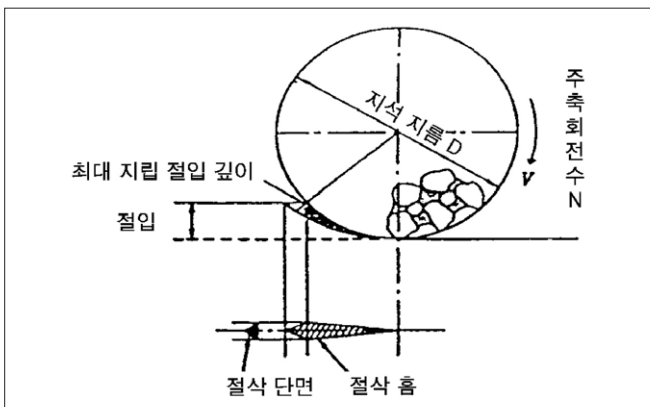


그림 8. 단일 지립의 절삭 모델과 절삭 단면적

참고문헌

1. 岡田昭次 : 가공 기술 데이터 파일, 다이아몬드 · CBN 휠, 기계 진흥 협회 기술 연구소 (1989) 18/27
2. 河端則次 : 다이아몬드 휠 (지삭)의 특성, 기계와 공구, 12 (1985) p50.
3. 辻康生 : 다이아몬드 지석을 이용한 경취 재료의 연삭, 현장에 도움이 되는 경취 재료의 정밀 가공, 텍스트, 정밀 공학회 (1983) p64.
4. GE사 기술 자료
5. 太田惠三, 二ノ宮進一 : 초지립 휠의 툴링 · 드레싱, 기계 기술, 45, 12 (1997) p66.
6. 高橋邦夫, 鈴木憲二 : 접촉 방전 드레싱 법의 실용화 연구, 지립 가공학회 강연 논문집 (1991-9) p195.

본고는 2003년 일본에서 출간된 『광디바이스 정밀가공 핸드북』 책자의 내용으로서 국내 광학산업 현장에서 이용될 수 있을 것으로 예상하고 한국광학기기협회에서 기술참고자료로 발간한 내용 중의 일부이다. 주요 내용은 현재 일본에서 이루어지고 있는 광학 소자에 대한 절삭, 연삭, 연마 등 기본적인 제거가공방법을 비롯하여 증착, 코팅 및 몰딩 등 변형가공방법에 이르기까지 폭넓게 광학소자 가공방법을 체계적이고 알기쉽게 기술하여 놓았다. 비록 일부 내용들은 이나라 산업현실과 다소 차이가 있는 부분도 있을 것이나 광학 기술의 역사와 기반이 앞서있다고 생각되는 일본의 최신 기술 관련 자료이기 때문에 국내 업체 관련 분야 종사자들에게 도움이 되리라 기대하며 2005년 1월호부터 연재중이다. 본 책자에 대한 문의는 한국광학기기협회(T. 02-3481-8931)로 연락주시기 바란다.