

초연마재(CBN)의 특성 및 효과적 사용



김 홍 권
(전주대학교 교수)



이 종 찬
(금오공과대학교 교수)

1. 서론

미국의 제너럴 일렉트릭(GE, General Electric)사에서 1955년에 다이아몬드 제조에 성공했다. GE사에서는 이 제품에 최초로 Man-made Diamond라는 상표를 사용하였는데 그 이후로 초연마재(Superabrasives)로 명명되는 일련의 많은 제품군을 개발하였다. 특히 다이아몬드 합성 제조법 연구에 부가하여 독특한 물질인 CBN(입방정 질화붕소, Cubic Boron Nitride)의 합성이 이루어졌다. 이 CBN은 다이아몬드를 제외하면 그 어떤 물질보다 경도가 우수하다. 이러한 고경도, 고강도 특성을 가진 CBN은 새로운 연마재로서 상당한 가능성을 제시하고 있다. 연삭은 문명세계에 알려진 가장 오래된 제조공정이지만 현재에도 확실하고 현대적인 공정으로 계속 그 능력의 한계를 넓히고 있다¹⁾.

한편 CBN 지립과 다결정 다이아몬드(PCD : Polycrystalline Diamond) 및 다결정 CBN(PCBN : Polycrystalline Cubic Boron Nitride) 절삭 공구소재는 경 합금강, 금속 복합재(MMC)의 가공, 그리고 자동차, 우

주항공 산업 및 관련 산업에 이용되는 인성과 내마모성이 큰 재료의 연삭과 절삭가공 분야에 소리없는 혁명을 가져왔다. 그러나 이는 시작에 불과했다. 매우 단단하고 강하며, 인성과 내마모성이 대단히 우수한 피삭재들의 성능이 현 금속가공 공작기계(Machine Tool)의 동력과 속도의 제한을 받기 때문이다. 초연마재 공구로 달성가능한 생산성의 장점을 최대한 살리도록 특수설계된 많은 공작기계들이 이미 공급되어 있다²⁾. 이러한 고생산성 기계들은 25,000 SFPM(7620m/min) 이상의 속도로 CBN 연삭휠을 구동시키고, 10,000ft/min(3048m/min) 이상의 속도로 슬로팅(Slotting) 및 밀링(Milling)공구를 구동시킨다. 전례가 없는 고속으로 재료를 제거할 수 있을 뿐 아니라, 속의 구동 속도를 유지하면서 재래식 기계로는 불가능 수준의 고정밀 표면조도 및 고위의 부품을 생산할 수 있는 것이다.

2. 고성능 초연마재의 정성적 분석

우선 연마재로 쓰이는 각종 결합제의 물성치를 분석해 봄으로써 정성적 분석을 해보면 다음과 같다³⁾. Fig. 1은 초

연마재 휠의 연삭성능의 정성적 분석결과를 나타낸다. 그림에서 세로축은 결합도와 관련된 것으로 연마재 입자의 결합강도와 연마재 입자의 지지강도를 나타내며 결합제의 파괴강도에 의존하는 것으로 분석된다. 여기서 연마재 입자간의 결합강도 또는 연마재입자의 지지강도를 f_c 라 하고, 연마재 입자에 작용하는 단일 연마재 입자당의 외력을 f 라 하면, 지지강도와 외력의 비 f/f_c 는 연삭시 연마재 입자가 탈락하는 확률, 즉 눈바꾸기의 정도를 표시하게 된다.

그리고 f/f_c 의 값은 0에서 1의 범위에 있기 때문에 $0 \leq f/f_c \leq 1$ 이 된다.

여기서 f/f_c 의 값이 무한으로 0에 가까워질 때는 글레이징(Glazing)형 연삭이 되고, 1에 가까워질때는 셰딩(Shedding)형 연삭이 된다. 한편 그림의 가로축은 결합제의 탄성계수를 나타내는데, 그 값이 클 경우 연마재와 공작물간의 접촉면적이 작아진다. 이것은 연삭시 동시 절삭날 수가 적다는 것을 의미하고, 결과적으로 단일 연마재 입자에 작용하는 외력이 커지고, 연마재 입자 절삭날이 공작물에 크게 밀어넣어지므로 표면거칠기가 거칠어지고 잔류균열도 커진다. 그러나 연삭연마재의 탄성변화가 적으므로 연삭시 미연삭 부분은 적어진다. 또 반대로 탄성계수가 적을 경우에는 그 역이 된다. 보통 메탈 본드는 탄성계수 및 파괴강도가 모두 크고, 레진본드는 모두 작다. 비트리파이드(Vitrified) 본드는 탄성계수가 크고, 파괴강도는 작다. 그 때문에 메탈본드 휠을 정밀연삭에 사용할 때에는 f 가 작고 f_c 가 크므로 f/f_c 의 값은 0에 가까워지게 되어 글레이징형

연삭이 된다. 이 때문에 일반적으로 이 휠은 f 가 커지는 중연삭 또는 고능률 연삭에 사용된다.

또 레진본드 및 비트리파이드 본드 휠의 경우에는 f_c 가 작아지므로 f 가 작은 경연삭 또는 정밀연삭에 사용되고, f 가 커지는 중연삭 또는 고능률 연삭에 사용하면 셰딩형 연삭이 되며 휠의 마모량이 증대한다. 이상의 고찰에서 알 수 있듯이 일반 메탈본드 휠은 고능률 연삭에, 레진 본드 및 비트리파이드 본드 휠은 정밀연삭에 사용된다.

그러나 레진 본드 휠을 정밀연삭에 사용할 경우에는 그 탄성계수가 작으므로 연삭시 휠의 탄성변형이 크고, 동시에 연삭 절삭날 수가 많아진다. 그 때문에 표면거칠기는 좋아지지만 미연삭 부분이 생긴다. 즉 형상 치수 정밀도가 나빠진다.

한편, 비트리파이드 본드 휠의 경우는 탄성계수가 크므로 그 반대가 된다. 다소 표면거칠기가 나빠지기도 하지만, 미연삭 부분이 적고 치수·형상 정밀도가 양호해진다. 이와 같은 초연마재 입자 휠의 본드 종류와의 관련에서 연삭성능의 정성적 경향을 파악해두면 그 탄성계수 E 를 변화시키든가, 또는 연마재입자의 지지강도 f_c 를 변화시키든가 하여 새로운 성능의 초연마재 입자 휠을 개발할 수가 있고, 그들 휠의 선택기준을 얻을 수가 있다.

예를 들면 레진 본드에 Cu, SiC, C 및 파이프 등의 필러를 넣을 수 있게 되어 매트릭스(Matrix) 마모의 발생방법이 다를 뿐만 아니라 휠의 E 혹은 f_c 의 값이 변화하고, 연삭성능에 차이가 생긴다. 또, 같은 레진 본드휠이라도 Fig. 2

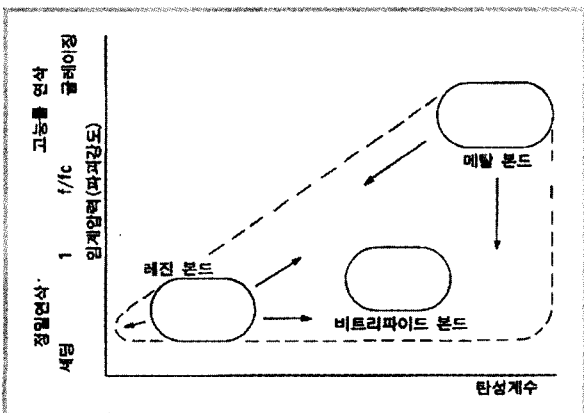


Fig. 1 각종 결합제의 탄성계수와 임계압력

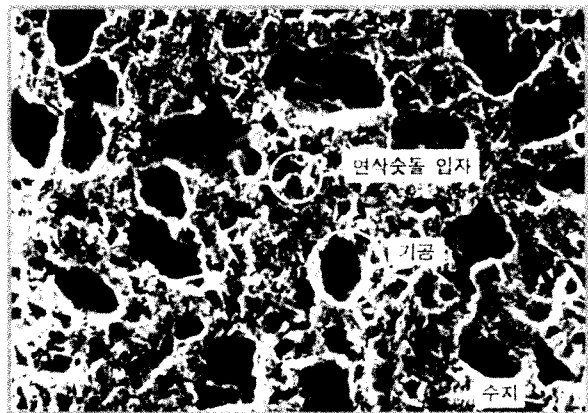


Fig. 2 미립 발포형 레진 본드 휠⁽³⁾

에 표시한대로 발표시키면 본드와 공작물 사이의 마찰이 경감되고, 칩 제거가 양호해짐과 동시에 탄정계수가 작아져 연삭시 휠의 탄성변형이 커지므로 발표하지 않은 것과 비교해볼 때 표면거칠기가 대단히 적어진다. 단지 이 휠의 경우에는 소정의 크기의 기공을 균일 분산시킬 수 있는가가 기술적인 문제이다.

또한 일반적인 메탈 본드 휠의 경우에는 동과 주석의 배합 비율을 변화시킴으로써 f_c 나 E 의 값을 변화시킬 수 있다. 레진 본드 휠의 경우와 같이 필러를 넣음으로써 f_c 나 E 의 값을 바꿀 수도 있다.

최근에는 주석의 함유량이 대단히 높은 플라이어블한 메탈 본드 휠도 많이 사용되고 있다. 그 때문에 메탈 본드 휠이라고 하더라도 f_c 나 E 의 값을 변화시킨 것이 광범위하게 사용되고 있다. 일반적으로 메탈 본드 휠은 중연삭 또는 고능률 연삭에 사용되지만, 레진 본드의 경우와 같이 기공을 만듦으로써 f_c 와 E 의 값을 변화시키고, 정밀연삭에 사용할 수 있도록 연구되어 왔다. Fig. 3은 유기공 비트리파이트 본드 휠로서 E 가 크고 f_c 의 값이 작으므로 정밀연삭에 사용할 수 있다.

한편 주철 파이버 본드 휠은 보통의 메탈 본드인 브론즈 본드와 달리 f_c 의 값이 전자와 비교해 크므로 보다 고능률의 가공에 적합하다. 당초 이 휠은 머시닝 센터에 설치되어 세라믹스의 고능률 가공에 사용되었다. 이 경우에는 기계가 절삭 사양이므로 휠의 주속도가 낮고, 그 때문에 연마재 입자에 작용하는 외력이 커져 보통의 브론즈 본드 휠의 경

우에는 세당형 연삭이 된다.

따라서 주철 파이버 본드 휠의 경우에는 f_c 의 값이 크므로 f 와 f_c 의 균형이 이루어져 양호한 가공이 된다. 반면, 휠 주속도를 올리면 f 의 값이 작아지므로 그들의 균형이 깨져 그레이징형 연삭이 된다. f_c 와 f 의 균형을 이루려면 보다 고능률의 가공을 하여 f 를 크게 해야 한다. 그 때문에 주철 파이버 본드 휠은 세라믹스의 고능률 연삭에 적합한 연삭 연마재라고 할 수 있다. 이와 같이 미립의 주철 파이버 본드 휠을 정밀연삭에 사용하려면 f 가 대단히 작아지고, 그레이징 및 세당형 연삭이 되어버린다.

최근에는 연삭가공의 고능률화를 목적으로 하여 휠 주속도가 고속화되고 200m/sec의 고속연삭기가 시판되고 있다. 휠 주속도를 고속화하면 드레싱간 수명이 길어지는 이점이 있기 때문이다. 보통의 연삭연마재의 경우에는 연삭연마재의 주속도를 높게 하면 원심파괴가 되기 때문에 그 고속화에는 한계가 있다.

따라서 초연마재입자 휠의 경우에는 내주부가 바탕금속이기 때문에 보통의 연삭연마재에 비해 그다지 원심파괴의 문제를 고려하지 않아도 되므로 휠의 고속화가 가능하다. 단, 원심파괴의 문제를 그다지 고려하지 않아도 좋다고 해도 그 문제가 전혀 없는 것은 아니므로 고속연삭용 초연마재 입자 휠이 사용되고 있다.

이 CBN 휠의 경우에는 코어 재료로서 탄화섬유로 강화된 FRP가 사용되므로 원심력이나 열에 의한 코어 변형이 억제되고, 연삭정밀도나 안정성이 높다고 하는 특징이 있다. 앞으로는 휠의 고속화가 진척됨에 따라 보다 고성능의 초연마재 입자 휠이 개발될 것이다.

3. 고성능 초연마재의 특성 및 종류

이미 기술했듯이 종래에 연삭입자로 사용해 온 Al_2O_3 나 SiC 입자보다 매우 경도가 높고 연삭능력이 우수한 입방정 질화붕소(CBN)와 다이아몬드의 연삭입자들을 초연마재(Superabrasives)라고 한다. 과거에 천연성 다이아몬드가 절삭이나 연삭에 사용되어오기는 했으나 고가이기 때문에 특수한 가공외에는 사용이 제한되었다. 그리고 1972년경에 합성된 CBN과 다이아몬드가 실용화되어 산업현장에

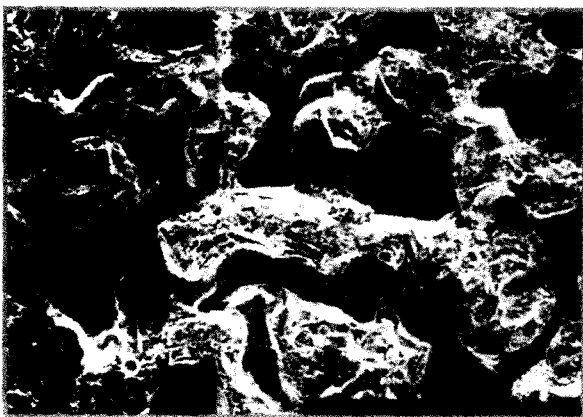


Fig. 3 비트리파이트 CBN 휠면 SEM 사진⁽³⁾

사용되었지만 보편화되지 않고 있는 실정이다. 초연마재의 연삭입자로서의 뛰어난 성질에도 불구하고 보편화되지 않은 이유에는 가격이 높고 최대연삭조건에 대한 기준이 확립되지 못하고 있기 때문이며, 따라서 앞으로의 더 많은 연구가 기대되고 있다.

3.1 초연마재의 주요 특성

연삭에서는 연마재 입자의 경도가 피삭재의 경도보다 높아야 함은 필수조건이다. CBN은 다이아몬드 경도의 2/3, Al_2O_3 나 SiC 의 2배이다. 다이아몬드의 경도가 높은 것은 CBN에서는 화학결합인 공유결합(Covalent Bond) 75%, 이온결합 25%인데 비하여 거의가 공유결합이고 결정의 방향이 대칭성이며 조밀하기 때문이다. 열전달률은 다이아몬드가 고체중에서는 가장 높으며 은의 5배이고 CBN은 은의 3배 이상이다. 연마재 입자의 열전달률이 높으면 연삭점의 온도가 낮아지고, 취성파괴에 의한 연마재 입자의 마모도 적을 것으로 생각된다. 따라서 다이아몬드나 CBN은 열전달률이 높으므로 우수한 연마재 입자임에는 틀림없다. 또한 열팽창계수가 적을수록 취성파괴에 의한 연마재입자의 마찰이 적고 내열성이 크기 때문에 CBN 및 다이아몬드는 이 점에서도 우수하다. 다이아몬드나 CBN과 같은 초연마재는 알루미늄나(Aluminum Oxide)나 탄화규소(Silicon Carbide)와 같은 일반 연마재와는 매우 다른 특성을 갖는다. 초연마재는 경도, 내마모성, 압축강도, 열전도성 등이 우수해 각종 난삭재의 연삭, 절단, 래핑, 질삭, 드릴링, 연마휠 드레싱, 인발공정의 공구소재로도 적합하다. 또 초연마재는 인간에게 알려진 가장 단단한 물질까지 가공할 수

있어 난삭작업도 평범한 작업이 되도록 한다.

연삭에 있어서는 연삭점의 순간온도가 1000℃ 이상의 온도에 달하므로 열적 안정성이 대단히 중요하다. Al_2O_3 는 열적으로 안정하나 고온에서는 인성이 커지며 2050℃에서 용융되므로 일반적으로 강 등의 연삭에 쓰이나, SiC 는 900℃ 이상에서는 산화하여 CO_2 를 발생할 뿐 아니라 강중으로 탄소가 확산되어 마찰이 심하게 되는 결점이 있다. 이러한 현상은 Fe 뿐만 아니라 Ni, Co, W, Ti, Mn, Ta, Cr 등의 금속원소와도 반응하여 마찰을 일으키므로 탄소강, 합금강과 같은 강의 연삭에는 부적합하고 연금속이나 세라믹스 등의 고능률 연삭에 적합하다.

Table 1에서 초연마재의 세 가지 중요한 특성을 알루미나나 탄화규소와 같은 일반 연마재와 비교하였다.

3.2 CBN의 개발

다이아몬드 주변의 원소들을 보여주는 주기표(Table 2) 상에서 붕소는 다이아몬드의 왼편에, 질소는 다이아몬드 오른편에 위치한다. 붕소나 질소가 다이아몬드처럼 조밀한 구조로 결합된다면, 다이아몬드만큼 또는 다이아몬드보다 더 경도가 높아질 수 있으리라는 생각을 하게 되었고, 새로운 고경도 물질을 찾고자 노력한 결과, 자연에는 존재하지 않는 새로운 초연마재, 입방정질화붕소(CBN)가 보라존(Borazon) CBN이라는 제품명으로 개발되었다.

1957년 GE 연구팀에서 CBN 합성을 성공시키기 전에는 흑연과 유사한 형태의 질화붕소(6방정 질화붕소)가 사용되

Table 1. 고경도 재료의 물리적 특성

재료	누프경도	압축강도 (psi)	열전도성 (cal / °C · cm · s)
다이아몬드	8000	1,260,000	5.0
CBN	4500	945,000	3.3
알루미나 (Al_2O_3)	2500	500,000	0.08
탄화규소 (SiC)	2700	210,000	0.10
초경합금	2100	500,000	0.08

Table 2. 탄소 근처의 원소주기표

금속	비금속	
←		→
B^5 붕 소	C^6 탄 소	N^7 질 소
Al^{13} 알루미늄	Si^{14} 규 소	P^{15} 인

고 있었다. 6방향 질화붕소는 원자배열이 흑연구조와 유사하나 탄소 대신 붕소와 질소가 교대로 결합되어 있다. 이로써 붕소와 질소를 교차시키면서 다이아몬드와 같은 결정구조로 변환시킬 수 있으리라는 예측이 가능하였던 것이다. 다이아몬드를 제조할 때와 마찬가지로 올바른 용제축매를 찾는 것이 관건이었는데, GE 발명가들은 알칼리금속과 리튬, 칼슘, 마그네슘의 질화물들이 최적으로 작용함을 발견하였다. 그 외 많은 질화물과 금속 역시 작용하기는 하나 효율성은 매우 떨어진다는 것을 알게 되었다. 이러한 연구결과 다이아몬드와 유사한 구조의 CBN이 생산되었던 것이다.

이 프로젝트에 참여했던 연구원들은 다이아몬드보다 더 단단한 물질을 만드는 것이 목표였기 때문에 처음에는 매우 실망하였다. 즉 CBN은 다이아몬드보다 경도가 낮고, 초경합금을 잘 연삭하지 못했기 때문이다. 그러나 열처리강 연삭용 비탄소계열의 초연마재가 필요해지자 CBN의 상품성이 인정받게 되었다. GE는 1969년 보라존 CBN 타입 I (비코팅)과 타입 II (60% 니켈 코팅)를 소개하였다.

초경합금 연삭에서 다이아몬드가 탄화규소를 대체했던 것처럼, CBN도 강 연삭에서 중요한 역할을 한다. 경화공구강 연삭에서 CBN의 성능은 알루미늄과 같은 일반 연마재보다 훨씬 우수하기 때문이다.

3.3 CBN의 종류 및 특성

다이아몬드와 마찬가지로 CBN도 적용분야별로 다양하게 제조된다. 그러나 다이아몬드와는 달리 CBN 제품은 금속 가공산업에서 사용된다. 현재 공급되는 CBN의 종류는 7가지로, 각각은 다음 범위를 하나 또는 둘 다 만족시키도록 제조된다.

(1) 본드 시스템, (2) 연삭형태와 재료제거율

Table 3에서 보이는 바와 같이 보라존 CBN 타입 I, II, 500, 510 제품은 단결정 CBN이며 이러한 단결정 CBN은 파쇄가 일어나면서 수많은 벽개면을 발생시키며 이 조대파쇄(Macrofracture)는 입자가 무더졌을 때 날카로운 절삭날을 발생시키기 위하여 꼭 필요한 것이다. CBN의 수명이 다하기까지 이러한 조대파쇄는 여러 번 계속되므로 CBN 입자는 재료제거과정에 필요한 날카로운 절삭날을 계속 유지한다.

한편 보라존 CBN 타입 550, 560, 570은 미세결정 CBN 입자로서 조대파쇄가 아닌 미세파쇄(Microfracture)에 의하여 절삭날을 생성시킨다. 각 입자는 마이크론 크기의 수천개 CBN 결정들이 서로 단단하게 결합되어 100% 밀도를 가지도록 구성되어 있다. 각 d_q자의 날카로운 절삭날이 마모되기 시작하면 연삭력에 의해 CBN 결정에 매우 작은 크기의 벽개가 발생한다. 이 미세파쇄로 인해 각 연마입자는 마모될 때마다 연속적으로 날카로운 절삭날을 발생시킴으로써 마찰열을 최소화하여 연삭작업을 일정하고 효과적으로 할 수 있도록 하게 된다. 적정 본드시스템이 Table 3에 요약되어 있다.

Table 3. 보라존 CBN 종류 및 특징

연마재 종류	특징	추천되는 휠 종류
타입 I	기본 CBN 결정, 검은색, 누프경도 4700, 중간 파쇄성	비트리어스본드와 전착휠 : 때때로 금속본드 휠 사용
타입 II	타입 I에서 무게의 60% 니켈 코팅을 제외한 것 : 대부분 널리 사용	레진본드 휠
타입 500	타입 I보다 인성이 있는 CBN결정 : 금색, 피상 형태	양산휠 전착휠
타입 510	금속본드와 비트리어스본드에서 결합력을 좋게 하기 위해 코팅된 CBN 결정	금속본드와 비트 리어스 본드 휠
타입 550	벽개면이 없는 다결정 CBN 결정 : 뛰어난 인성, 열크랙에 대한 고저항성(1200℃)	금속본드와 비트 리어스 본드 휠
타입 560	CBN 550에서 60% 니켈 코팅을 제외한 것 : 높은 스톱크 제거량과 좋은 표면조도가 요구되는 레진본드에 사용	레진본드 휠
타입 570	CBN 550 중 전착휠에서 열처리된 것을 제외한 것	전착 휠

4. 맺음말

CBN 연삭이 실용연삭에 도입된지 30년간이 지난 현재에도 그 연삭입자로서의 우수한 성질에도 불구하고 많은 경우 종래의 연삭입자를 이용하고 있다. 이것에 대한 가장 큰 단점은 안정된 일률적인 연삭결과를 얻기가 어려우며 경도가 너무 높기 때문에 최적의 드레싱이나 트루잉이 되지 않고 연마재가 고가이기 때문인 것이다. CBN 연마재 연삭의 장점 및 단점을 요약하면 다음과 같다.

• CBN 연마재 연삭의 장점

(a) 연삭시간의 단축

CBN 입자는 경도가 높고 화학적으로 불활성이므로 쉽게 마찰하지 않으며 연삭저항이 낮고 효율이 높다. 따라서 드레싱이나 트루잉을 자주할 필요가 없으며 고속연삭이 가능하다.

(b) 연삭연소의 감소

연삭연소는 경화된 입자의 마찰열에 기인한다. CBN의 초경도는 드레싱에 의한 절삭날의 탈이화를 방지할 수 있으므로 마찰열의 발생이 적다.

(c) 품질의 균일화

고경도로 인한 내마모성이 크므로 치수와 표면거칠기가 균일하게 된다.

(d) 난삭재료의 연삭용이

난삭재의 종류와 경도에 제한없이 연삭가공이 가능하다.

(e) 유희시간 및 노동력 절감

CBN 연마재는 내마모성이 크기 때문에 연마재 바퀴를 자주 교환할 필요가 없으므로 연속가공으로 유희시간이 없으며, 한 사람이 여러 대의 기계를 동시에 자동조작할 수 있다.

(f) 드레싱비용의 절감

드레싱이나 트루잉을 자주할 필요가 없기 때문에 드레싱 공구의 비용을 절감할 수 있다.

• CBN 연마재 연삭의 장점

(a) 드레싱 및 트루잉의 어려움

CBN 입자는 초경도이기 때문에 다이아몬드 등의 드레싱 공구로 드레싱이나 트루잉을 해도 CBN 입자가 벽개파괴를 하지 않고 마모되어 절삭성을 상실하는 현상을 일으키는 수가 많다. 따라서 연삭에 적합한 입자의 절삭조건으로 드레싱하기가 난해하다. 후술하는 바와 같이 각종 드레싱법을 적용하고 있으나 현재 만족할 만한 방법이 발견되지 않고 있다.

(b) 표면거칠기의 불량

CBN 입자는 단결정체이기 때문에 예리한 모서리를 가지고 있지 않다. 드레싱에 의한 절삭날의 퇴화로 절삭성을 상실함으로써 피삭재에 대한 소성유동도 한 원인일 뿐 아니라 입자의 집중도가 100이라 해도 입자의 밀도에서는 보통 연마재에 비하여 적으므로 절삭날 당의 절삭량이 많은 것에도 기인한다.

(c) 연삭조건 선정기준의 미확립

실험자료의 부족으로 연삭조건 선정기준이 확립되어 있지 않다. 따라서 부정확한 연삭기준으로 연삭함으로써 종래의 연삭연마재에 의한 연삭결과만큼 균일한 결과를 얻지 못하고 있다. 실패를 경험하면 사용자는 이 연삭 연마재의 사용을 기피하게 되기 때문이다.

(d) 고가공단표

CBN 연마재 1개당의 가공개수는 많으나 CBN 연마재 자체의 가격이 높기 때문에 제품 1개당의 가공단표는 2배 이상 높은 것이 현실이다. 따라서 저가의 가공이 요구되는 목적에는 어려움이 있다.

참 고 문 헌

- (1) 초연마재를 이용한 연삭 및 절삭가공, 이종찬, 유인석 공역, 문운당, 1998.
- (2) 절삭가공론, 손명환, 문운당, 1994.
- (3) 고능률, 고정밀도 가공을 위한 연삭숫돌의 효과적 사용법, 海野 邦昭, 機械技術, 日刊工業新聞社, 1997.