

차세대 초정밀광학부품 나노가공기술 지상중계

제 1장. 연삭가공의 기초

한국광학기기협회에서는 '한·일 광산업 기술협력'을 보다 효율적으로 추진하기 위하여 해마다 일본 연수기관 및 기업에 대한 현장연수를 실시하고 있는 가운데, 올해는 처음으로 지난 8월에 일본정밀공학회(JSPE)에서 주최하는 '차세대 초정밀광학부품 나노가공기술연수'를 실시했다. 연수기관은 일본 센다이 소재의 동북대학(Tohoku University)으로 구리아가와 츠네모토 교수가 교육을 담당했다. 주요 연수 내용으로는 마이크로 광학부품가공/초정밀 비구면 렌즈 가공/전기점성유체를 이용한 비구면 렌즈 코아 연마/특수광학렌즈 SPDT 가공/초고속 가공/마이크로 AJM 가공/마이크로 초음파가공이며 본 고에서는 직접 연수에 참가 못한 독자들을 위해 연수내용을 번역 게재하고자 한다. 이달에는 제1장 연삭가공의 기초 게재를 시작으로 11월호에 이어서 나머지 2,3,4장 교육과정내용을 게재할 예정이다.

편집자 주

1. 연삭가공이란

기하학적으로 일정한 형상을 가지지 않는 칼날, 즉 저립(미세입자)칼날을 이용하여 재료를 제거하는 가공법을 총칭하여 저립가공이라고 한다. 그리고 이것은 램핑이나 폴리싱과 같이 유리(遊離)저립을 이용하는 유리저립가공, 벨트연삭과 같이 패드 위에 미세입자를 고정한 연마패드가공, 미세입자를 서로 고정한 스톨을 회전시켜 제거하는 연삭가공으로 분류된다. 이와 같이 연삭가공은 회전하는 스톨을 공구로 이용하는 제거가공이라고 말할 수 있다.

2. 연삭가공의 특징

연삭가공은 기본적으로 프라이즈(fraize:회전식커터) 깎기와 같은 절삭가공이 있지만, 일반적인 절삭가공과 비교하여 다음과 같은 특징을 가진다.

- (1) 공구가 여러 개의 미세한 칼날로 되어있다. 따라서 잘라낸 부스러기가 매우 작고, 우수한 가공정밀도의 마무리 면을 얻을 수 있다.
- (2) 칼날은 매우 딱딱한 광물질 입자이다. 따라서 고경도의 재료를 가공할 수 있다. 또, 칼날의 구조각(스쿠이 각도)은 일반적으로 마이너스이다.
- (3) 절삭속도가 매우 크다. 일반적인 연삭속도는 약 1800m/min이다. 따라서 고무와 같은 부드러운 재료도 연삭할 수 있다.
- (4) 연삭점 온도가 높다. 고속으로 절삭하기 위한 필연적인 현상이

일본 광산업 동향

며, 연삭액으로 냉각할 필요가 있다.

(5) 조각칼날의 자생 작용이 있다. 칼 끝 단이 마모되어 큰 힘이 작용하면 끝단이 파쇄되어 예리한 칼날이 재생된다.

3. 연삭 스톨(저석)

저석은 저립을 결합제로 하여 서로를 접착해 제작한 공구이다. 따라서 저석의 구조는 연마용입자, 결합제, 가공으로 되어있다. 이 세 가지를 저석의 3요소라고 한

다. 일반적인 저석은 이러한 3요소를 반드시 가지고 있다. 그러나 초저립저석에 많이 사용되고 있는 매트리스형의 저석 구조에는 가공에 상당하는 부분이 없다. 이 경우는 드레싱에 의해 칩 포켓을 생성하여 가공의 역할을 추가한다. 초저립저석의 드레싱에 관해서는 제 2장에서 소개한다. 한편, 저석의 연삭능력은 3요소의 조합, 즉 저립의 종류, 저립의 입도, 저립의 체적 함유율, 결합제의 종류, 결합 강도로 결정된다. 이러한 인자를 각각 저립, 입도, 조직, 결합제, 결합도라고 부르고 저석의 5인자라고 한다. 저석 사양은 그림 1과 같이 5인자를 각각의 기호, 번호로 지정한다. 여기에서 위가 일반저석의 경우이고 아래가 초저립

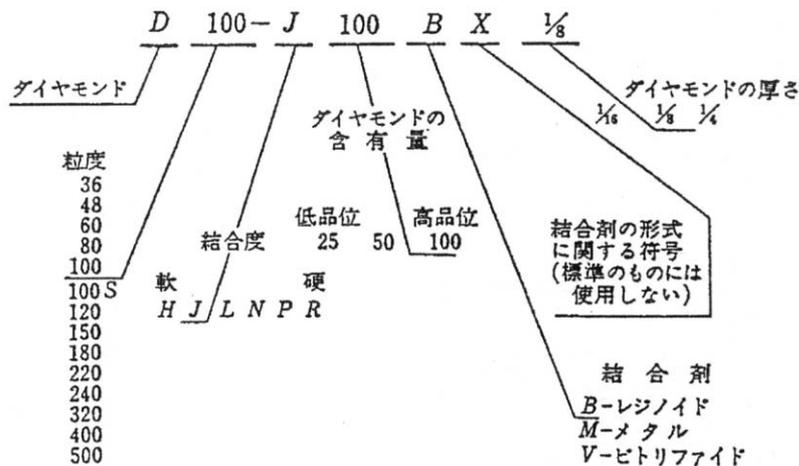
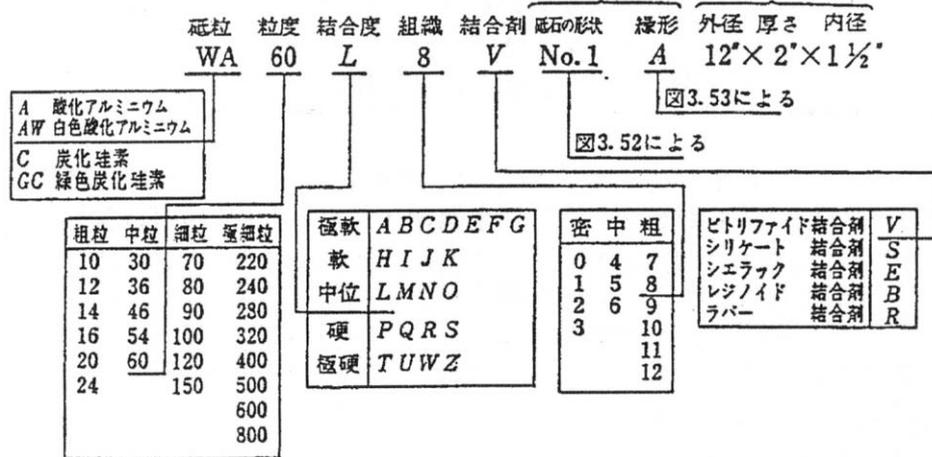


그림 1. Notation system of grinding wheel

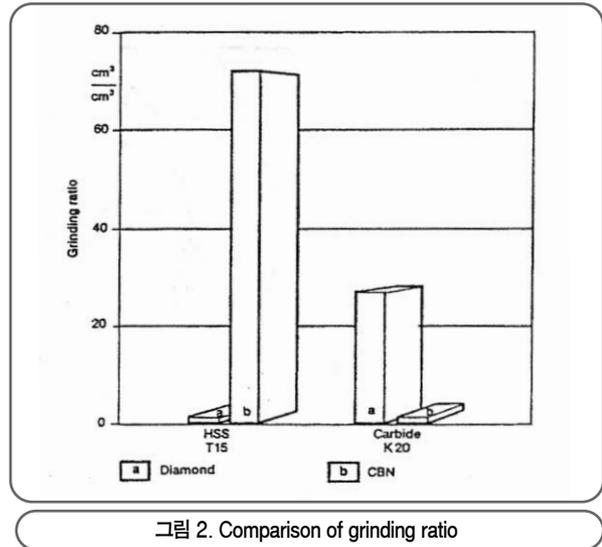
휠의 경우이다. 다만 조직 표시에 관해서는 다이아몬드, CBN 등의 초저립저석과 WA, GC 등의 일반 저석과는 다르다. 일반저석의 경우, 저립률(저립의 체적 백분율)을 V_g 로 하면 조직번호= $31-V_g/2$ 로 표시된다. 또 초저립저석의 경우는 concentration이라고 부르고, 저립층의 단위 체적 중에 포함되는 저립의 질량이 $880\text{mg/cm}^3(4.4\text{ct/cm}^3)$ 를 100으로 표시한다. 컨센트 100은 V_g 약 25%에 상당한다.

4. 다이아몬드와 CBN 휠

다이아몬드는 매우 큰 경도와 내마모성을 가지는 물질이다. 따라서 이러한 특징을 살리고 초경, 유리, 세라믹, 수정, 페라이트, 반도체재료, 각종 사출재료, 유리수지강화 플라스틱 등의 고경도, 취성재료, 또는 그 외의 난연삭재료의 연삭에 이용된다.

다이아몬드는 기계적인 내마모성이 매우 크지만, 열화학적인 마모에 대해서는 의외로 약하다. 특히 연삭에 있어서 오연삭점은 고온이기 때문에 열화학적 마모를 무시할 수 없다. 이것은 다이아몬드의 그라이파이트화, 산화, 탄소의 확산을 들 수 있다. 예를 들면 대기중에서는 약 1000 k, 대기중에서 산화에 의하여 $0.2\sim 1\mu\text{m}/\text{min}$ 의 비율로 감소하는 것이 보고되고 있다. 또 다이아몬드의 단위입자 연삭 실험에 의하면 순철은 강철보다 기계적 강도가 작음에도 불구하고, 다이아몬드의 마모량은 큰 것으로 밝혀지고 있다. 이것은 강철에는 탄소가 함유되어 있기 때문에 순철과 비교하여 탄소의 확산이 억제되었기 때문이라고 생각되고 있다.

한편, CBN은 고온 영역에 있어서도 철과의 화학적 친화성이 작고, 화학적 마모가 작다. 이러한 이유로부터 다이아몬드는 비철 금속의 가공에, CBN은 철 계열 재료의 연삭에 이용된다. 그림 2는 다이아몬드와 CBN 휠을 이용하고, 고속도강과 초경을 연삭했을 때의 연삭비를 나타낸 것이다. 고속도강을 다이아몬드 휠로 연삭하면 연삭비가 현저히 작아지지만, 초경에서는 반대의 결과를 나타낸다. CBN 휠은 다이아몬드 휠의 반대이다. 이와같이 CBN 휠은 철 계열 재료 전반의 연삭에 위력을 발휘하지만, 특히 일반 휠의 골치거리인 고소도강이나 크롬 강철과 같이 경도가 크고 연삭하기 어려운 강성 재료의 연삭에 그 진가를



발휘한다. 이러한 경우에도, 마모가 매우 작고, 가공 정밀도의 관리가 용이하다.

5. 휠의 선정

연삭을 성공시키기 위해서는, (1) 휠의 선정, (2) 트루잉·드레싱, (3) 연삭 조건 선정의 세 가지를 정확하게 실시하지 않으면 안된다. 여기에서 (3)에 대해서는 이후에 말하겠다. 또 (2)에 대해서는 제2장에서 말한다. 여기에서는 (1)에 대해서 그 가이드라인을 나타낸다.

5.1. 저립 외경

저립외경 325/400까지는 JIS.B4130을 비롯하여 ISO 등에 규정되어 있지만, 그 이하의 미립에 대해서는 규정이 없고, 표시는 휠 메이커의 독자 규격에 의한다. 표 1에 각국의 규격과 메이커의 미립, 저립에 대한 표시 예를 나타낸다. 일반적으로 거친 입자의 휠은 고능률 연삭, 황삭에 이용되는 것이 많고, 휠의 마모는 비교적 작지만, 마무리면의 거칠기는 나쁘다. 또, 미립 휠은 마무리면의 거칠기는 작아지지만 휠의 마모가 크고, 연삭량은 많이 취할 수 없다. 저립외경을 선택하는 경우의 일반적인 원칙은, [가능한 한 미세한 저립을 선택한다]는 것은 아니고, [허용범위 내에서 거친 저립을 선택한다]라고 하는 것이다. 그러나 CBN

International Standardization of Grit Sizes for Diamond and Cubic Boron Nitride									
Sieve Grit Designations						Nominal mesh size to ISO 6106 DIN 848 Part 1, 1980 μm	Micron Grit Sizes*)		
Diamond FEPA-Standard WINTER designation narrow wide		CBN FEPA-Standard WINTER designation narrow wide		Diamond + CBN US-Standard ASTM-E-11-70 narrow wide			Diamond WINTER designation	CBN WINTER designation	For comparison grit size μm
D 1181	D 1182	B 1181	B 1182	16/ 18	18/20	1180/1000	D 25	B 30	32-52
D 1001		B 1001		18/ 20		1000/ 850	D 20 B		30-40
D 851	D 852	B 851	B 852	20/ 25	20/30	850/ 710	D 20 A		25-30
D 711		B 711		25/ 30		710/ 600	D 15		10-25
D 601	D 602	B 601	B 602	30/ 35	30/40	600/ 500	D 15 C		20-25
D 501		B 501		35/ 40		500/ 425	D 15 B		B 15
D 426	D 427	B 426	B 427	40/ 45	40/50	425/ 355	D 15 A	B 9	10-15
D 356		B 356		45/ 50		355/ 300	D 7	B 6	5-10
D 301		B 301		50/ 60		300/ 250	D 3	B 3	2- 5
D 251	D 252	B 251	B 252	60/ 70		250/ 212	D 1	B 1	1- 2
D 213		B 213		70/ 80	212/ 180	D 0,7		0,5- 1	
D 181		B 181		80/100		180/ 150	D 0,25		< 0,5
D 151		B 151		100/120		150/ 125	* - Grits recommended by WINTER *) Similar FEPA Standard exists with designations M 63... M 1.0 FEPA = Fédération Européenne des Fabricants de Produits Abrasifs.		
D 126		B 126		120/140		125/ 106			
D 107		B 107		140/170		106/ 90			
D 91		B 91		170/200		90/ 75			
D 78		B 78		200/230		75/ 63			
D 64		B 64		230/270		63/ 53			
D 54		B 54		270/325		53/ 45			
D 46		B 46		325/400		45/ 38			

표 1. International standardization of grid sizes for diamond and CBN

의 경우는 마무리 면의 거칠기에 저립 외경의 영향이 비교적 작기 때문에 대부분의 경우 황삭과 마무리 연삭에서는 별도의 입자 외경을 선택할 필요가 없다. 대부분의 경우는 75~150 μm 의 저립 외경으로 충분하고 트루잉, 드레싱 조건의 변경으로 황삭에서 마무리연삭까지 대응이 가능하다.

5.2. 결합제

결합제의 선정은 가장 중요하다. 결합제는 휠 메이커의 노하우적인 결정체로 되어 있어서, 자세한 것은 명확히 알 수 없다. 다음에서는

가장 많이 사용되고 있는 주된 결합제의 성질에 대하여 개략적으로 나타낸다.

- ①레진: 재질은 페놀 혹은 폴리이미드계가 가장 많다. 또한 성능을 향상시키기 위해서 필러를 혼입하는 것이 많고, 이것이 휠 메이커의 노하우 부분이다. 경도는 결합제에 있어서는 부드러운 쪽에 속하여 탄성이 풍부하다. 그 때문에 연삭저항, 연삭열의 저항이 작다. 또 미립 휠의 본드제로 써도 많이 이용된다.
- ②메탈: 금속가루를 소결(燒結)한 것이기 때문에 주로 브론즈계의 것들이 많다. 또 스틸, 초경도계의 것도 있다. 브론즈 본드의 경우 경도는 레진보다 일반적으로는 단단하지만 물건에 따라 오버랩되는 것도 있다. 스틸계는 더욱 단단하다. 내마모성이 풍부해 저립을 강하게 유지하기 때문에 수명도 길다. 그러나 날이 무디어지기 쉽고, 연삭저

항, 연삭열의 발생도 크다. 고능률연삭, 또는 프로파일 연삭에 적용하고 있다.

③전착: 이것은 스틸의 코아 위에 연마용 입자를 놓고, 그 위에 전해 프로세스로 금속을 석출(화합물을 분석하여 물질을 분리해 냄)시키고 저립을 고정한 것이다. 저립의 유지는 강고하고 저립의 튀어나오는 양은 저립 직경의 30~50%를 확보할 수 있다. 저립층은 한층인 것과 다층으로 된 것이 있지만 한층으로 된 것이 대부분이다. 프로파일 연삭, 고능률 연삭절단 등에 이용된다. 마무리 면의 거칠기가 커지지만, 찌꺼기의 배출이 양호하여 고능률 가공이 가능하다. 날이 무더져 마모가 발생하는 것이 휠의 수명이 된다.

④비트리파이드: 용융유리 가루, 필터, 일반 저립을 혼합시켜 소성한 본드이다. 이 본드는 가공의 양을 조절하는 것이 가능하고 본드의 경도를 변화시킬 수 있다. 이 점이 매트릭스 형 본드인 레진, 메탈과 다른 점이다. 유기공이 있기 때문에 로타리드레서에 의한 드레싱이 좋고, 자생작용이 있어서 냉각성이 좋다. 따라서 고능률 연삭가공에 있어서 연삭비율이 높다.

5.3. 휠 코아

휠은 저립층에 코아를 접착 또는 동시에 소결하여 완성한다. 여기에서 코아재료는 휠의 진동특성, 연삭열의 방출에 영향을 미친다. 알루미늄, 듀랄미늄, 스틸, 각종 휠러를 함유한 수지 등(예를 들면 CFRP)이 이용된다. 코아 재료의 특징을 표 2에 표시했다.

칼날에 의한 찌꺼기는 사선 부분이 된다. 이때 저립 절삭 깊이는 O으로부터 최대치 gm(=BE)를 취한 후, 재차 O가 되어 빠져나간다. 이때의 gm은 아래 식으로 주어진다.

$$g_m = 2a \frac{v}{V} \sqrt{\frac{\Delta}{D}}$$

여기서 D는 저석 직경, a는 연속 칼날 간격이다. 일반적으로 gm의 값이 작은 경우 저립 칼날 끝단은 마멸마모가 진행된다. 반대로 gm의 값이 큰 경우는 크게 파쇄 또는 저립 입자의 탈락이 발생하여 저석 마모가 커진다.

또, 저립 절삭 길이는 lg(=CD)가 된다. lg는 다음과 같이 된다.

$$l_g = \sqrt{D\Delta}$$

연삭 중의 lg를 누적시킨 누적 저립 절삭 길이 L은 저석 마모량과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 L이 큰 만큼 저석 마모량은 커진다. 게다가 연삭점 열의 원인이라고 고

Core material	Vibration damping	Heat dissipation	Mechanical strength
Aluminum	×	⊙	⊙
Steel	×	○	⊙
Resinoid with metallic fillers	△	△	○
Resinoid with non-metallic fillers	○	×	△

표 2. Characterization of core material

6. 연삭이론

6.1. 저립 절삭 깊이, 저립 절삭 길이

2에서 말한 것처럼 연삭은 저립 절삭의 집적이다. 따라서 연삭 현상을 파악하고 이해하기 위해서는 저립 칼날 1개의 절삭 상태에 주목할 필요가 있다. 즉 저립 절삭 깊이와 저립 절삭 길이이다.

지금 그림 3에 표시했듯이 저석 절삭 깊이량 Δ, 저석 주속도 V, 공작물 속도 v로 평면연삭하는 경우를 고려한다. 이 때 저립 칼날이 프라이즈와 같이 간격 a로 나란히 있고, 저석 반경 방향의 칼날 끝단의 위치도 같다고 고려할 수 있다. 이때 그림 중에 표시한 칼날 I가 호 AB에 따라서 절삭한 직후, 칼날 II가 호 CD에 따라서 절삭한 경우

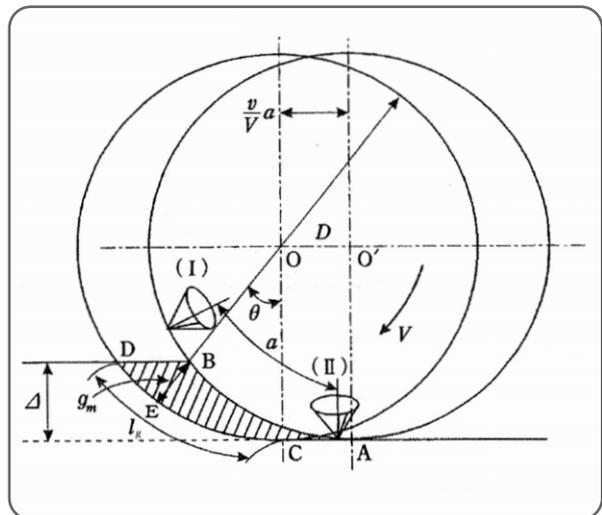


그림 3. Grinding model

일본 광산업 동향

려할 경우 lg는 열원의 지속 시간으로 생각할 수 있기 때문에 특히 미립자 다이아몬드 휠의 마모에 영향을 준다. 휠 마모의 관점에서는 누적 저립 절삭 거리는 작은 것이 바람직하지만, 다른 연삭 조건과의 비율도 있어서 일방적으로 결정할 수 없다.

그런데 여기에서의 gm, lg의 계산식은 저석을 프라이즈와 같은 공구로 간주하더라도 실제의 저석과는 엄밀하게 다르다. 실제의 저석에 가까운 모델로서 저립 입자의 배치를 랜덤한 것으로 여기고 gm, lg를 구하는 통계적 연삭 이론도 있지만 여기에서는 생략하기로 한다.

6.2. 저립 칼날에 작용하는 연삭력

그림 4에 표시한 것처럼 저립 칼날을 반정각 α 의 원추형이라고 가정하고 저립 가공 깊이를 g로 한다. 저석의 단위 면적 당 존재하는 칼날 수 j라고 하면, 절삭 단위 면적은 $g^2 \cdot \tan\alpha$ 로 주어진다. 단위절삭 단면적당의 절삭력을 β 로 놓으면, 저립 칼날에 작용하는 연삭력의 수직분력 f_n 은 다음과 같이 된다.

$$f_n = \beta \cdot g^2 \tan\alpha$$

또한, f_n 은 g가 gm이 되는 곳에서 최대치를 얻는 것은 말할 필요도 없다. 또 연속저항의 수직 분력 F_n 을 구하기 위해서는, f_n 을 저석·도공작물 접촉호 내에 존재하는 동시 연삭 저립의 수만큼 누적(적분)하면 좋다.

6.3. 발생 연삭 열량과 연삭 온도

저석·공작물 접촉호 내의 임의의 저립 절삭점에 있어서의 단위 시간당 발생 열량 q는 λ 를 2분력화($\lambda = f_n / f_t$; 여기에서 f_t 는 저립 칼날에 작용하는 연삭력의 접선분력), J를 단위 시간당 일의 양이라고 하면 다음 식으로 주어진다.

$$q = \frac{f_t \cdot V}{J} = \frac{f_n \cdot V}{\lambda \cdot J}$$

전체의 발생 열량 Q는, q를 저석·공작물, 찌꺼기에 분배된다. 이러한 분배율은 각각의 물질의 열전달률, 열전도율, 계면 상태 등에 의하여 결정되지만, 엄밀히 값을 해석 또는 실험에 의하여 요구하는 것은 곤란하다. 지금까지 J.C. Jeager의 이동열원리 이론을 이용하여 공작물 표면 온도의 값을 해석적으로 구하고, 이 값과 실험치를 비교함으로써 대략적인 공작물에서의 분배율이 구하여진다. 분배된 연삭 열량은 연삭온도라는 형태로 측정할 수 있다. 연삭온도는 어느 부분의 온도인가에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다. 일반적으로는 측정의 용이함 때문에 (2)의 접촉면 온도가 논의의 대상이 되는 것이 많다.

- (1) 공작물 온도: 연삭열이 공작물 전체에 전달되어 상승하는 공작물 온도
- (2) 접촉면 온도: 저석과 공작물의 접촉면 온도로 일반적으로는 공작물에 미세한 구멍을 뚫고 거기에 열전대를 삽입하여 측정한다. 열전대를 연삭하는 순간의 온도가 접촉면 온도이다. 또 공작물에 삽입한 열전대 소선과 공작물 자체로 열전대를 만들어 공작물 표면에 형성된 열접점에 의한 접촉면 온도를 측정하는 방법도 있다. 이 방법으로

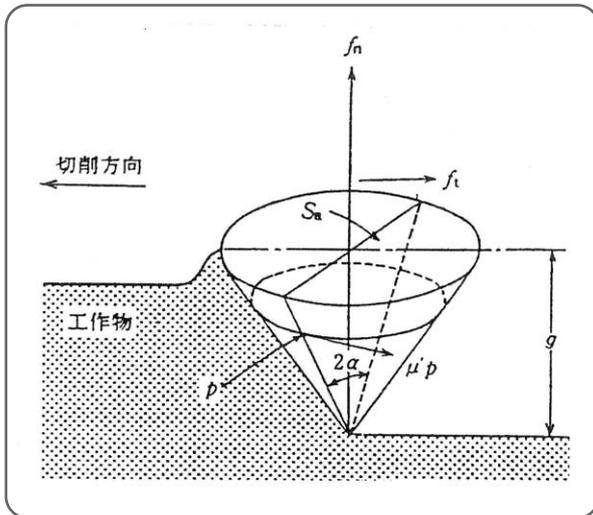


그림 4. Grinding model

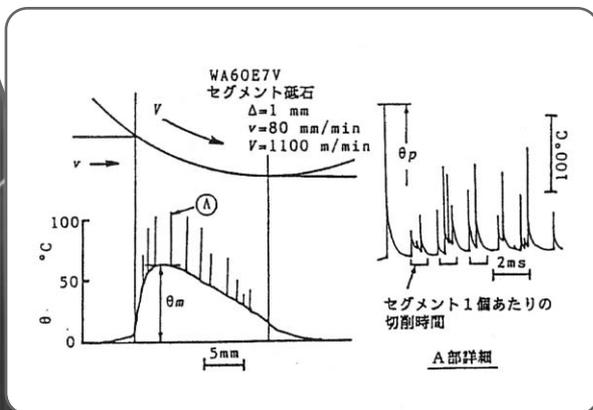


그림 5. Measured grinding temperature

측정한 예를 그림 5에 표시한다.

(3) 저립 칼날 온도: 저립과 찌꺼기와의 계면의 온도. 찌꺼기 자체의 열용량이 작기 때문에 매우 고온이 된다. 측정하는 것은 매우 어렵다. 광섬유 온도계를 공작물에 삽입하여 측정을 시도한 경우도 있다.

(4) 찌꺼기 평균온도: 배출된 순간에 있어서의 찌꺼기의 평균온도. 이것도 측정이 어렵다.

6.4. 연삭액의 공급 상태와 반 아웃

발생한 연삭열은 연삭액에 의하여 냉각된다. 냉각 성능은 어느 정도 연삭점, 즉 저석·공작물 접촉호 내에 연삭액이 공급되었는가로 결정된다. 그림 6는 저석·공작물 접촉호 내의 연삭액 막두께의 분포를 측정한 결과이다. 연삭액 막두께는 노즐쪽에서 두껍고, 반대쪽으로 감으로써 얇아지는 것을 알 수 있다. 이 그림은 크리프 피드 연삭의 경우로 접촉호 길이 l_g 가 길기 때문에 일반적으로 연삭의 경우보다 공급 상태가 나쁘다. 특히 노즐의 반대 쪽에서 현저하다.

더욱이 발생 열량이 많을 경우 연삭액막이 막 비등(액체가 끓어 오름)을 발생시키고 연삭액이 전혀 없는 상태가 되는 경우가 있다. 그림 7에 그 모델을 표시한다. 이 그림은 접촉호의 길이를 가지는 열원 위를 연삭액 막이 이동해 나가는 것으로 도중에 막 비등에 의하여 액막이 소실되고 있는 상태다. 이것을 반아웃이라고 한다. 반아웃이 발생하면 외부로부터 다량의 연삭액을 끼얹고 있는 상태라도 중요한 저석·공작물 접촉호 내에서는 전혀 연삭액이 없는 상태가 되는 것이다. 즉, 한편으로 보면 습식 연삭이지만 실제로는 건식 연삭과 같은 상태가 되어있다. 이러한 반아웃은 접촉호 길이가 큰 크리프피드 연삭에서 발생하기 쉽고, 또 공작물의 열전도율이 작은 경우에도 발생하기 쉽다.

반아웃을 방지하기 위해서는 냉각 능률의 향상, 발생 연삭 열량의 감소라는 2개의 면으로부터 대책을 세울 필요가 있다. 전자에 대해서는 세그먼트(segment) 휠의 사용, 통액연삭의 적용을 들 수 있다. 또 후자에 대해서는 휠의 주속도 등의 연삭조건 최적화, 특수 휠의 개발 등을 들 수 있다. 특히 휠 주속도의 저하가 효과적이다.

6.5. 저석 마모

바이트 등의 절삭 공구의 칼 끝은 단순히 마멸되어 수명에 도달하는 것이 보통이다. 그러나 저석의 경우는 칼날이 광물질의 저립이기 때문에 그 내부에 불순물, 크랙 등을 포함하고 있다. 따라서 저석의 마모 형태는 단순하지 않다.

일반적으로 저립의 마모 형태는 마멸, 파쇄, 탈락으로 크게 구별된다. 예를 들면 연마용 칼날 1개에 작용하는 연삭력 f_n 이 작은 경우는 마멸마모가 현저히 나타나고, 저석은 날이 무디어진 상태가 된다. 이 경우 마무리면 거칠기는 양호하지만, 연삭저항의 증가가 커지고 연삭을 속행할 수 없게 된다.

반대로 f_n 이 너무 큰 경우 저립은 크게 파쇄 혹은 탈락하여 저석은 망가진 상태가 된다. 이 경우 그 칼날의 뒤쪽의 다른 칼날이 새로운 칼날이 되어 연삭에 관여하게 된다. 그 때문에 저석의 예리함은 양호하고 연삭저항의 증가도 작아지지만, 저석의 마모량은 커지고, 마무리면 거칠기도 나빠진다.

이러한 날의 무디어짐과 망가짐을 일으키는 중간의 f_n 이 되는 연삭조건을 선정한 경우 저립 칼날 끝단이 적당히 파쇄를 일으켜 예리함이 복원하는 것과 동시에 그 상태가 지속된다. 또 마무리면 거칠기도 양호하다. 이와 같이 저석

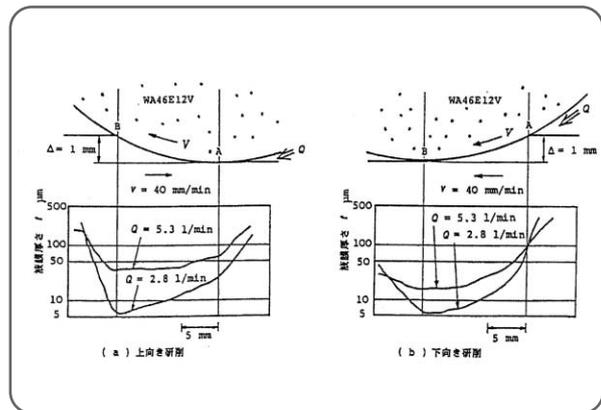


그림 6. Distribution of grinding fluid thickness

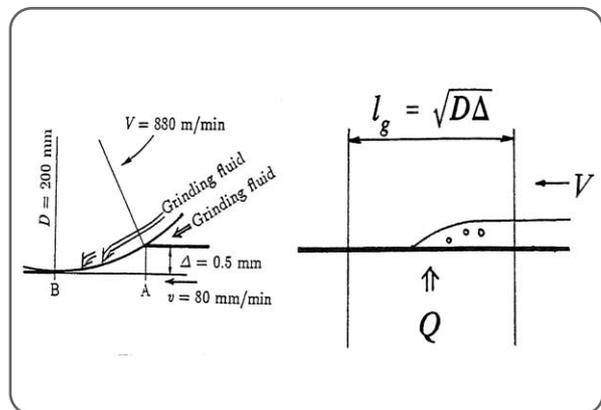


그림 7. Burnout model of grinding fluid

일본 광산업 동향

의 예리함이 회복되는 것을 저석의 자생작용이라고 한다. 이와 같이 양호한 자생작용을 일으키게 하기 위해서는 f_n 의 값을 날 무디어짐과 망가짐의 중간이 되도록 연삭조건을 설정하는 것이 중요하다. 그러나 그 값은 저립 자체의 파쇄성은 물론이고 그 결합도와도 밀접하게 관계하는 것이 외에도 공작물, 연삭액, 연삭반 등등 고려해야 할 인자가 매우 많다. 따라서 연삭조건 설정에 있어서는 어느 정도의 시행착오가 필요하다. 그러나 앞에서 서술한 f_n , 즉 g_m 의 식의 의미를 이해하고, 실제의 연삭저항, 저석손모 등의 데이터와 대조하면 시행횟수가 격감한다.

그런데 다이아몬드, CBN 등의 초연마용 입자 저립의 자생작용은 보통의 저립의 경우와는 약간 다르다. 보통의 저립으로 양호한 자생작용이라고 부른다. 저립 칼날 끝단의 미소한 파쇄는 초저립의 경우에는 별로 관찰되지 않는다. 저립이 크게 파쇄 혹은 탈락하여 예리함이 유지되는 상태도 있을 수 있지만 일반적으로 이러한 상태로 초저립 입자 휠을 사용하는 것은 연삭비가 작아지게 하기 위해서라고 해도 지나치지 않다. 따라서 초저립 휠의 경우의 저립 칼날 마모는 날이 부서진 형상이 주체가 된다. 이 경우 저석 반경 감소량 W_r 은 누적 저립 절삭거리 L , 저립 칼날에 작용하는 최대 연삭력 f_{nm} 과 다음의 관계가 있다.

$$W_r = a \cdot l \cdot f_{nm}$$

이 밖의 다른 영향 인자로서는 온도가 있고 온도가 높을 수록 W_r 은 커진다.

6.6. 마무리면 거칠기

연삭 조건이 마무리면 거칠기에 미치는 영향에 대한 논의는 옛날부터 논의되어 왔다. 저립 칼날 형상을 기하학적으로 정의하고, 저석 마모, 자생작용 등 시간적 변화 요인은 없는 것으로 해석되어 왔다. 그 중에서도 저립 칼날의 형상, 위치를 랜덤인 것으로 파악하여 통

계적 수법에 의하여 해석한 예는 실제의 경우와도 잘 일치한다. 이 통계적 연삭 이론에 의하여 도출된 최대 높이 H_m 의 식은 다음과 같다.

$$H_m = 1.57 \cdot W_0^{0.4} \left(\frac{v}{V} \right)^{0.4} \left(\frac{1}{D} \right)^{0.2} (\cot \alpha)^{0.4}$$

여기에서 W_0 는 저립 칼날 1개가 차지하는 저석의 체적이다. 이상으로 지금까지 설명해 온 연삭제량에 미치는 연삭조건 영향의 영향을 나타내는 그래프를 그림 8에 표시한다. 덧붙여 이러한 그래프는 어디까지나 일반적인 경향을 나타낸 것으로 이와같이 되지 않는 경우도 있다.

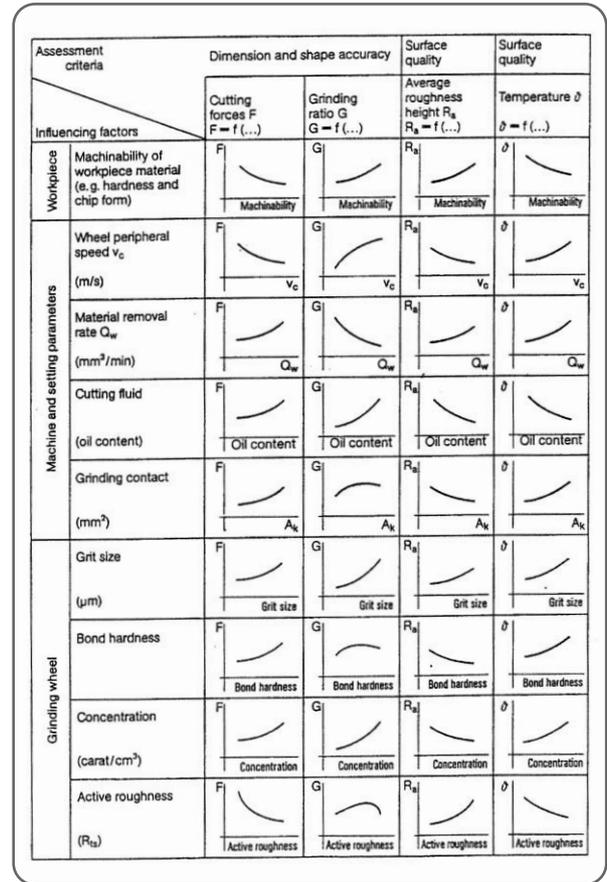


그림 8. Effect of grinding conditions