

新素材와 精密加工 技術

Development of Precision Machining as a High-Technology Material

金 政 斗*
Kim, Joung Doo

1. 신소재의 개념

신소재란 우리 인류에게 요구되는 시기에 따라서 그의 개념이 변화될 수 있으며, 현 세대에서의 신소재는 金屬系, 無機系, 有機系의 원료 및 이들을 조합한 원료를 기초로한 고도로 제조, 가공기술 또는 상품화 기술을 구사하는 것으로, 종래에

없는 새로운 획기적인 특성 및 새로운 사회적 가치를 창출하는 부가가치가 높은 소재를 뜻한다. 표 1은 신소재 분류와 그의 용도예를 나타내었다. 표 1에서는 대의적인 분류를 한 것이지만 세부적인 재료의 종류는 대단히 많다. 특히 용도에 따라서 소재들은 각각 단독으로 사용되는 경우가 있는가 하면 또는 소개간의 혼합하여 사용되는 경우가 많다. 수요특성은 일반적으로 단위당 수요의 규모가 작고, 상품의 life cycle은 짧으며, 고 부가가치성을 요할 경우 사용하는 경우가 많다.

표 1. 주요한 신소재 예

신소재	신소재 예	용도 예
금속계 신소재	초 내열합금 고 비강도합금 수소합금 형상기억합금 회토류 합금	제트엔진 항공기용 기체 수소자동차 센서겸 액츄에이터 회토류 자석
무기계 신소재	고경도 세라믹스 고절연성 세라믹스 도광성 세라믹스 화합물 반도체 초내열 세라믹스	절삭공구, 치공구 IC 기판 광 화이버 레이저 다이오드 우주항공, 통신팀엔진
유기계 신소재	고강도 고분자 고흡수성 고분자 투과성 고분자 수퍼엔지니어링 플라스틱 생체적합 재료	자동차 외판 사막의 保水材 광디스크 항공우주, 스포츠용구 인공신장, 콘택트렌즈
복합 재료	섬유강화 플라스틱(FRP) 섬유강화 금속(FRM) 섬유강화 콘크리트(FRC) 섬유강화세라믹스(FRC)	스포츠용구, 항공기 엔진 부품 건축재 우주 往還機

신소재의 수요분야는 종래의 소재에 비하여 보다 높은 관심의 대상이 되고 있으나 신소재 활용의 중요점은 가공기술에 달려있다고 보며, 생산특성 또한 다품종 소량생산성을 갖는 특징을 갖고있다. 표 2는 신구소재를 비교한 것이다.

표 2. 신구소재 비교

특 성	신 소재	재래소재
(상품특성) 종 류 부가가치 사용방법	많다 높다 복합	적다 낮다 단일
(수요특성) 시장규모 라이프 사이클 용 도	소규모 짧다 고도	대규모 길다 범용
(생산특성) 생산방법 기술집약도 생산규모	다품종 소량 높다 소규모	단일종 대량 낮다 대규모

* 機械技術士(機械工作 및 工作機械), KAIST 生産工學科 教授

2. 재료의 피가공성

구조용 신소재는 고강도를 특색으로 하므로 필연적으로 난삭가공을 수반한다. 재료의 피삭성에 대하여서는, 예전부터 많은 논의가 있었고, 현재에도 새로운 사실들이 제안되고 있다. 난삭 재료의 피삭성으로는

첫째, 칩 배출의 곤란

둘째, 공구수명의 단축

셋째, 다듬질면 품질의 불량성

등을 문제점으로 이에대한 대책을 강구하고저 하는 노력이 최대의 관심사항이라고 보겠다. 표 3은 신소재의 난삭성에 관한 재료 물성을 설명한 것이다.

표 3. 신소재의 난삭성에 관한 재료물성

성 질	재 료 물 성
역학적 성질	① 고경도 { Matrix 자체...세라믹스 Matrix 중의 고경도입자...고 V 고C강 ② 고연성 { 순금속...특히 면심입방계 Austenite계 합금강
열적 성질	① 열전도율: 낮다세라믹스 가공점 국부의 온도상승: 크다 → 공구마멸문제 ② 열팽창계수: 크다. ③ 고용점: 고경도와 관련 ④ 저융점, 저연화점: 다듬질면이 열화...프라스티크제열
화학적 성질	① 화학반응성: 크다티타늄 합금 ② 내 산화성: 크다스테인레스강

3. 신소재의 정밀가공 특성

3-1. Fine Ceramics

알루미나, 지르코니아, 질화규소, 탄화규소 등으로 대표되는 fine ceramics 재료는 강도, 내열성, 내마멸성, 화학안정성 등의 우수성으로 인하여

기계구조용 부품, 전자기적 특성을 이용한 전자부품 등에 그 활용도는 점차 증가추세에 있다. 현재까지의 실험결과에 의하면 공구형상에 대하여 공구의 노오즈 반경이 큰 것이 마멸량이 적고, 고강도 세라믹스 절삭의 경우 배분력이 높고 주분력이 적은 특징을 갖고 있다. 배분력이 높아지는 이유로서는 세라믹스의 경도가 높기 때문에 공구날끝의 절삭이 어렵기 때문이며, 이와 반면에 주분력이 낮아지는 것은 금속절삭인 경우와는 달리 세라믹스의 절삭이 칩성파괴에 의하여 실시되기 때문이다. 또 주분력은 절삭속도 변화에도 거의 변화하지 않지만 이것은 균열의 전파속도가 재료중의 음속에 가까운 값이며, 절삭속도에 의해서 매우 빠른 점에서 정성적으로 설명된다. 그림 1은 SEM의 연속관찰에 의한 세라믹스의 절삭기구 형태이다. 여기에서 ①은 primary crack formation으로서 포텐셜 에너지 해방율(G)의 한계가 세라믹스의 파괴인성(G_c)의 한계를 넘은 상태로서 $G \geq G_c$ 의 조건이 되며 인선근방으로부터 전방으로 균열이 생성된다. ②는 primary crack arrest로 균열의 증가에 대하여 G도 증가하는 경우로서 $dG/da \geq 0$ 가 되어 균열은 성장을 계속하게 된다. 여기에서 불안정 전반에 의한 재료는 제거되고, 이것에 대하여 dG/da

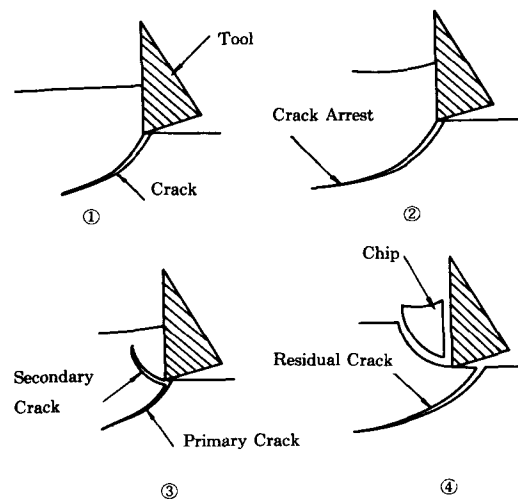


그림 1. 세라믹스의 절삭기구 형태

<0의 경우, $G \geq G_a$ 로 되는 범위에서는 균열은 ③과 같은 $G < G_a$ 형태로 되어 성장을 정지하고, 계속하여 ④와 같이 다듬질면에 균열이 잔류하는 형태로 된다. 이상의 균열진행은 공구이송 속도보다 빠르며, 세라믹스의 절삭에 있어서 균열 진전이 ①에서 시작되고 ④에서 끝날 때까지 반드시 ②③을 경유한다고는 할 수 없고 ①②에서 ④로, 또는 ①에서 갑자기 ④로 이행되는 경우도 있다. 이처럼 균열면 상부의 재료가 신속히 제거되면 ①의 진전후에 마크로 균열은 과도하게 억제되어 양호한 절삭면을 얻을 수 있다. 또한 마크로 균열이 처음부터 발생되지 않든가 또는 발생되었다 하여도 미소량에 머문다면 한층 양호한 절삭면을 얻을 수 있다. 세라믹스의 절삭 공구로는 소결다이아몬드 공구가 적절하며, 소결다이아몬드 공구에 의한 추천절삭조건을 표 4에 나타내었다.

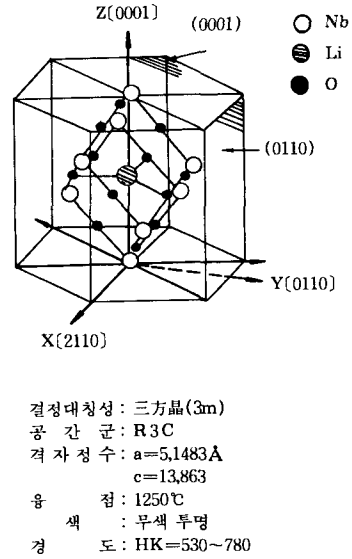


그림 2. LiNbO₃의 결정구조

표 4. 소결다이아몬드공구에 의한 세라믹스의 절삭조건

피삭재	비커스(Hv) 경도	추천조건			비고
		절삭속도(m/min)	절삭깊이(mm)	이송(mm/rev)	
알루미나	~2300	30~80	~2.0	~0.12	습식
질화규소	1000~1600	10~50	~0.5	~0.05	습식 또는 건식
	800~1000	50~80	~2.0	~0.20	습식
지르코니아	1000~1200	50~100	~1.0	0.20	습식
초경합금		10~30	0.5		습식

3-2. 경취재료(LiNbO₃)

LiNbO₃ 단결정은 그의 우수한 전기음향효과 특성을 응용하고, 탄성표면파소자(Surface Acoustic Wave)로서 각종 센서에 이용되고 있다. 이 재료는 자연계에 없고 원소의 조합으로 얻어지는 인공결정으로 경도는 누우프 경도(HK) 530~780kg/mm²의 경취재료이다. 경도의 정도는 산경질 유리와 광학용 유리의 중간정도로, 가공특성은 비정질 유리와 다르고 단결정 특유의 이방성이 있다. 그림 2는 LiNbO₃의 결정구조로 산화물 이성분계의 재료로서 절삭방향에 따라 표면조도에 미치는 영향이 지대하다.

그림 3에서 보는바와 같이 절삭상태에 따라서 표면조도가 크게 변화하고, 특히 $\theta=180^\circ$ 부근의 영역에서 $\theta=40^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 320^\circ$ 근방의 영역에 비하여 10배 정도의 R_z 값을 나타내고 있다. 또 θ 에 대한 R_z 값의 변화는 급격해지고, 불연속성을 나타내는 것도 커다란 특징이다. LiNbO₃ 단결정은 육방정에 속하고 결정대칭성이 三方晶(3m)의 현저한 백개면을 갖고 있다. 따라서 절삭특성의 이방성요인으로서 백개면에 대한 절삭방향 차이를 생각할 수 있다. 여기에서 2차원적 절삭모형을 생각하고 절삭방향과 백개면 절삭측면에서의 교차각 α 에 대하여 Y 절삭면에서 절삭방향

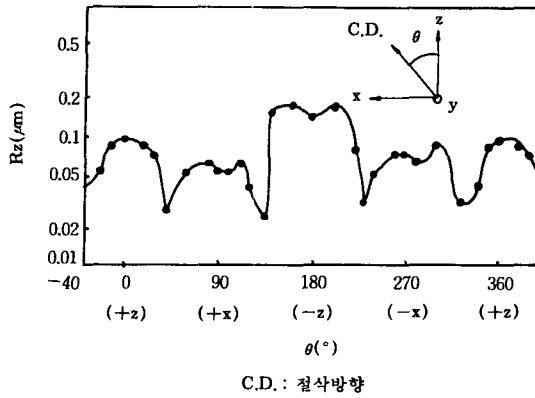


그림 3. 절삭방향과 표면조도의 관계

벡터 A는 $A = (\sin \theta, 0, \cos \theta)$ 로 되고 절삭축면과 벽개면의 교선 벡터 B는 $B = (\frac{\sin \theta}{m}, -\frac{\cos \theta}{n} - \frac{\sin \theta}{l}, \frac{\cos \theta}{m})$ 이 된다. 절삭방향 벡터 A와 교선벡터 B의 교차각 α 는 $\alpha = \cos^{-1}(\frac{A \cdot B}{|A| |B|})$ 로 되어 절삭방향 θ 와 절삭방향과 벽개면과 이루는 각 α 와의 관계는 그림 4와 같다.

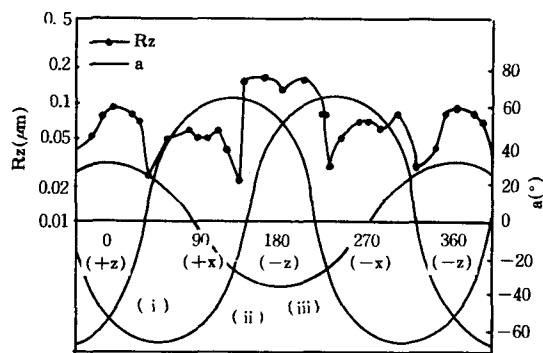


그림 4. 절삭방향 θ 와 α , Rz의 관계

그림 4에서 (i), (ii), (iii)의 각면 (l, m, n)은 다음과 같다.

(i)면 $(i, \sqrt{3}i, -\frac{1}{2}j)$

(ii)면 $(-i, \sqrt{3}i, -\frac{1}{2}j)$

(iii)면 $(\infty, -\frac{\sqrt{3}}{2}i, -\frac{1}{2}j)$

여기에서 α 가 클수록 가공면이 나빠진다.

이상에서 살펴본 바와 같이 경취재료에 대하여 절삭특성이 절삭방향과 벽개면과의 교차각에 크게 영향을 받으므로, 공구형상이나 공구수명을 고려한 가공방법이 필요하다.

3-3. Titanium 합금

Ti 합금은 경량으로 강도가 높고, 또 내열성이나 내식성에도 우수하기 때문에, 근년 항공기나 우주기기, 각종 화학공업의 분야로 널리 사용되고, 향후에도 그 수요는 더욱 증대할 것으로 예상된다. 그러나 Ti 합금은 열전도율이 낮은데다 화학적 친화성이 높으므로, 절삭가공시에는 절삭온도가 높아지고 공구모재와의 용착이 생기므로, 고속절삭하면 공구수명은 극히 짧아진다. Ti 합금의 절삭가공에 관하여서는 종래 몇몇의 연구보고가 있지만 WC계의 초경공구를 이용하여 1m/s 이하의 저속영역에서 절삭하는 것이 추천되어 왔다. Ti 합금을 고속도로 절삭하기 위하여서는 절삭시에 생기는 열을 극히 적게 하고, 또 발생한 열을 가능한한 조속히 분산시키는 것이 중요하다.

Ti 합금은 절삭공구로 K10종을 선택하여 사용되어 왔으며 근래에와서 소결 및 천연다이아몬드 공구에 의한 가공법등이 연구되고 있다. 그 결과로 Ti 합금의 절삭에 대하여 천연다이아몬드 공구는 우수한 절삭성능을 나타내며, 습식절삭시 절삭속도 3.3m/s까지 향상시킬 수 있으며, 다듬질면 거칠기 역시 여타공구에 비하여 양호하다.

3-4. FRP

FRP는 종래의 금속에 비하여 비강성, 비강도, 내피로성, 내마멸성, 내약품성, 진동감쇄성 등이 높다는 장점을 갖고 있다. 이 제품은 스포츠, 레저용품에서 항공우주기기에 이르기까지 날로 소재로서의 필요성이 높아지고 있다. 그 용도도 2차구조부재→1차구조부재로, 소형단순형

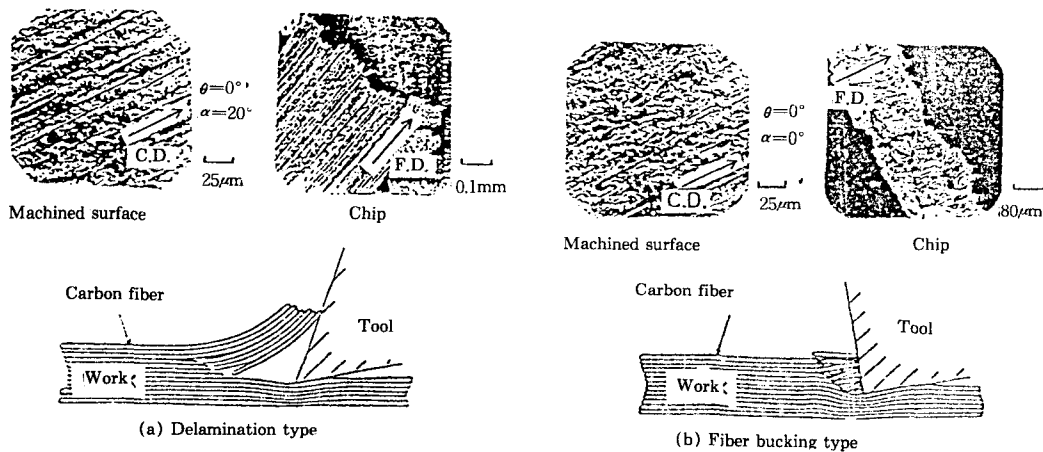
상부재→대형단순형상부재→소형복잡형상부재→대형복잡형상부재로 확대되고 있다. 그에 따라 능률 및 정도가 높은 절삭가공법의 중요성이 증가하고 있다. FRP의 절삭에는 일반적으로 절삭날의 칩핑이나 결손등의 이상손상이 발생하고, 강등의 금속절삭에 비하여 절삭열이나 절삭저항은 적으나 고속절삭을 행할경우 절삭날의 소성변형이 생긴다. FRP의 절삭가공에 있어서 공구수명원인은 주로 플랭크면의 마멸 진행이며, 프랭크마멸은 금속절삭 경우에 비하여 인선부의 둥근형상이 나타나는 것이 특징이다. 그림 5는 FRP의 절삭상태를 SEM내의 절삭실험에 의하여 동적관찰에 의하여 얻어진 절삭형식이다. 여기에서 2가지 형태의 절삭형식은 볼수 있는데 각각 가공면, 칩 및 절삭모형을 나타내고 있다. (a)는 층간유리형(Delamination type)의 경우로서, 섬유각과 공구인선각의 관계에서 인선이 섬유층에 잠식하기 쉬운 $\theta=0^\circ$, $\alpha=10, 20, 30^\circ$ 일때에 발생된다. 즉 그림에 나타난 것처럼 공구인선이 섬유층에 잠식하고, 그에 따라 절삭저항은 상승→하강하는 과정을 반복하기 때문에 변동이 많다. 여기에서 보는바와 같이 가공면은 여기저기에 섬유가 표면상에 노출하고, 그것을

소멸이나 하듯이 매트릭스인 에폭시 수지가 존재하고 있다. (b)는 $\theta=0^\circ$, $\alpha=-10^\circ$, 0° 일때 생기는 섬유좌굴형(Fiber buckling type)이다. 그림에 나타난 것처럼 섬유각과 공구의 기하학적 관계에서 인선이 잠식되어 가는 것이 나쁜 경우에 생긴다. 공구로 압축된 섬유가 인선전방에서 좌굴하고 그 결과 칩이 생성되고, 불연속으로 배출된다.

FRP의 가공에 일반적으로 사용되는 공구는 K종이며, 근래에 와서 소결다이아몬드공구와 천연다이아몬드 공구를 이용한 가공법이 개발되고 있다.

4. 최적공구

이상에서 살펴본 몇몇의 대표적인 신소재에서 밝힌바와 같이 신소재는 즉 난삭재라고 보는 것이 이의가 없을 것이다. 일반적인 가공법을 신소재가공에 그대로 적용한다고 하는 것은 능률과 정밀가공의 측면으로 볼때 비경제적이라고 사료되며, 절삭조건의 개선과 더불어 최적공구를 선택하는 것이 중요하다. 종래에 사용되고 있는 초경 P, K 재종, 피복초경 및 세라믹 등으로부터



$V=0.02\text{m/min}$, $t_1=0.1\text{mm}$, tool=WC K 10

그림 5. FRP의 절삭형태

표 5. 최적 공구의 선정

Diamond Tool ※
 CBN Tool ○

Materials		Diamond/CBN Tool Machining Processes							
		Turning	Grinding	Honing	Lapping & Polishing	Drawing	Dressing	Others	
METALLIC	Ferrous	Carbon Steel	○	○			※	※	
		Cast Irons	○	※ ○	※			※	
		Alloy Steels	○	○	○		※	※	
		Tool Steels	○	○	○			※	○
		Stainless Steels	○	○			※	※	
		Super Alloys	○	○				※	
		Copper, Copper Alloys	※				※		
	Special Materials	Aluminum, Aluminum Alloys	※				※		
		Precious Metals	※				※		
		Spray-coating Metals	※ ○	※					
		Zinc Alloys	※				※		
		Babbitt Alloys	※						
		Tungsten	※				※		
		Molybdenum					※		
		Tungsten Carbides	※	※	※	※			※
		Titanium Carbides		※		※			※
		Ferrite Manetic Alloy		※		※			
	NON-METALLIC	Artificial Materials	Magnetic Alloys	※	※		※		
			Silicon		※		※		
Germanium				※		※			
Gallium Phophide				※		※			
Gallium Arsenide				※		※			
Plasties			※	※			※		
Natura Materials		Ceramics	※	※	※	※			※
		Carbon, Graphite	※	※			※		
		Glass		※	※	※			
		Abrasive Wheels, Bricks	※	※				※	
		Precious Stones		※		※			
		Stone		※		※			
	Concrete		※						
	Rubber	※	※						
	Stone		※		※				
	Coral		※						
Natura Materials	Shell		※						
	Precious Stones		※		※			※	
	Teeth, Bone		※						
	Jewelry		※		※			※	
	Wood Products	※							

Diamond와 CBN 공구로의 개선이 가능한지 검토하여 볼것을 적극 권장하는 바이다. 물론 공구의 개선에는 공작기계의 성능개선이 선결조건이 되어야 하는 것은 필수조건이며, 표 5에 각종 피삭재에 대한 최적공구 리스트를 제시하였다.

참고문헌

1. O. Imanaka, Approach of New Material, Machine and Tool, Vol 6, 1991, pp.18~22.
2. M. Iwase, K.T. Jacob and E. Ichise, Physical Chemistry of Mixed Conducting Zirconia Ceramics, Sprechsaal, Vol 119, No.4, 1986, pp.280~283.
3. N. Narutaki, Machinability of Pre-sintered Ceramics, JSPE, Vol 52, No.11, 1989, pp.1876~1882.
4. 原成一, 다이아몬드 工具を用いた 硬ぜい 材料의 精密加工, JSPE Vol 52, No.12, 1986, pp.2020~2023.
5. W. Kreis, Zerspanbarkeit der Titanwerkstoffe, Ind.-Anz., Vol 96, No.55, 1974, pp.1241.
6. 堂山昌男, 新素材의 開發と 應用(I), 東京大學 出版會, 1984.
7. 堂山昌男, 新素材의 開發と 應用(II), 東京大學 出版會, 1984.
8. 狩野勝吉, 難削材의 切削加工技術, 工業調査會, 1989.
9. 鳴瀧則彦, 難削材의 切削加工, 日刊工業新聞社, 1989.
10. N. Ijima, 耐熱合金의 切削加工, 機械と工具, 1991, pp.30-36.
11. S. Kalpakjian, Manufacturing Engineering and Technology, Addison-Wesley, 1989.