

# 절삭공구개발의 역사 및 최근 동향

양 민 양

한국과학기술원 생산공학과 교수



● 1954년생  
● 생산공학을 전공하였으며, 절삭가공 및 특수가공, 기계가공공정의 CAD/CAM 등에 관심이 있다.

## 1. 머리말

절삭가공시 공구는 피삭재의 압축강도에 상당하는 높은 壓力과 마찰로 인한 심각한 溫度上昇 등으로 인하여 최악의 상태에 이르게 되며 斷續切削時에는 더불어 주기적인 衝擊力도 받게 된다. 따라서 좋은 공구재란 이러한 악조건에서도 잘 견디어 주며 가공을 훌륭히 해 낼 수 있는 재료라 할 수 있다.

이런 관점에서 절삭공구에 요구되는 材料學的特性들이 여러가지 있겠으나 몇가지로 대별하면 다음과 같은 세 가지 특성을 들 수 있다. 첫째는 칩 또는 피삭재와의 심한 마찰시 발생하는 磨滅에 대한 저항성으로서 재료의 硬度 및 고온에서의 化學的安定性이 주된 영향을 미치며, 둘째는 높은 응력 또는 충격력이 작용될 때 일어날 수 있는 龜裂발생 및 성장에 대한 저항성으로서 재료의 破壞靱性이 관련되고, 셋째는 높은 온도상승시 공구에 작용하는 응력으로 소성변형이 일어나지 않아야 하므로 공구는 高溫塑性變形抵抗性이 요구되는데 이 때는 고온에서 재료의 硬度가 문제된다. 그런데 공구재의 선정시 한가지 어려운 점은 첫번째와 서번째 특성에서 요구되는 것으로 공구는 높은 硬度를 유지하여야 하는데, 자연적 특성상 이것은 두번째에서 요구되는 인성과 한가지 재료에서 동시에 만족시키기가 어렵다는 것이다.

인류는 유사이래 절삭가공을 실생활에 응용

하여 왔으나 본격적인 절삭가공기술의 발달을 보게 된 것은 영국의 産業革命 이후라 할 수 있다. 18세기 중반 영국의 산업은 James Watt의 증기기관에 쓰이는 금속실린더의 생산에 절삭가공기술이 필요하게 되었다. 당시 쓰이던 주요 산업소재로는 灰鑄鐵, 可鍛鐵, 黃銅 및 靑銅 등이 사용되었는데 이런 소재들을 가공하는데 열처리된 炭素工具鋼이 주로 쓰여졌다. 그러나 炭素工具鋼의 낮은 高溫塑性變形抵抗性 때문에 가공속도가 매우 느려 생산성은 형편 없었다. 실례로 선박용 증기기관 실린더를 가공하는데 무려 한달 가량 소요되었다고 한다. 아무튼 이를 계기로 각종 공작기계 개발되어 다양한 가공을 담당하게 되었으며 어떤 형태의 공작물도 가공이 가능케 되었다.

그러나 1860년경에 Bessemer and Open Hearth식 鋼製造工程이 개발되어 鋼의 대량생산이 가능해짐에 따라 鋼이 주요 산업재료로 쓰이게 되었다. 그리하여 지금까지 사용해 오던 炭素工具鋼으로는 가공이 더욱 어렵게 되었으며 그로 인하여 생산성은 더욱 낮은 수준으로 떨어지고 말았다. 따라서 19세기 말까지 기계가공산업은 인력과 자본이 아주 많이 드는 생산공정이었으며 이를 개선하기 위한 많은 노력이 행하여 졌으나 큰 진전을 보지는 못하였다. 그 후 상황은 1910년대에 들어와 Taylor와 White에 의한 새로운 熱處理合金法이 개발되면서 달라졌다. 즉 새로운 열처리법에 의하여 高溫硬度가 크게 향상된 鋼이 개발되면서

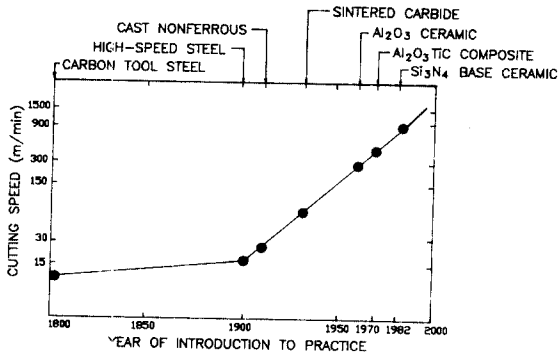


그림 1 각종 공구재의 개발년도와 가공속도

가공속도를 크게 증가시킬 수 있었다. 그리하여 이 때 개발된 鋼의 이름을 高速度工具鋼이라 부르게 되었으며 현재까지도 절삭가공에 널리 사용되고 있다.

절삭가공의 역사 중 가장 주목할 만한 사건은 1920년대 개발된 超硬工具의 탄생이라 할 수 있다. 超硬工具는 종래의 금속계열공구의 차원을 뛰어넘는 세라믹과 금속의 결합에 의한 일종의 複合材工具란 점에서 새로운 개념이며 이로 인한 기계가공부문의 생산성 향상은 가히 혁신적이었다고 할 수 있다. 超硬工具의 등장으로 가공기술상의 향상은 급속도로 진전되었으며, 1970년대 超硬工具 표면에 세라믹을 蒸着시킨 被覆超硬工具가 개발되어 그 적용범위를 더욱 확대시키고 있으며, 1960년대 부터 본격적인 연구가 시작된 세라믹공구 또한 미래의 공구로서 착실히 그 기반을 구축해 가고 있다 하겠다(그림 1 참조).

앞으로 절삭가공분야에서 점차 그 역할이 크게 증대될 것으로 예상되는 超硬工具和 세라믹공구의 개발 및 최근동향에 대하여 좀 더 자세히 살펴보기로 하자.

## 2. 超硬工具

인공초경재의 시초는 1900년초 프랑스의 Moissan에 의한 텅스텐 탄화물(WC)의 합성

이라 할 수 있다. 당시 텅스텐 필라멘트의 제조에 사용되어 온 다이아몬드 引拔金型의 대체재에 대한 필요성에서 시작된 이 기술은 탄화물 脆性의 근본원인인 氣孔性(porosity)을 금속을 용융침투시켜 제거함으로써 재료의 強性 및 引性を 개선하는 infiltration 기술과 접목되어 초경재의 개발을 가능케하였으며, 드디어 1923년경에 독일의 Schröter는 일종의 세라믹인 텅스텐 카바이드와 금속인 코발트를 분말형태로 혼합하여 코발트 共融溫度에서 液體燒結시킴으로서 燒結超硬材를 만들 수 있게 되었다. 그 후 이 초경재는 Widia 즉 Wie Diamond(As Diamond)라는 이름으로 상품화되어 시장에서 큰 성공을 거두게 된다. 이것이 계기가 되어 1930년경에는 TaC-Ni 또는 TiC-Mo<sub>2</sub>C-Ni 등의 燒結超硬合金이 개발되었으며 신소재에 대한 특허출원이 줄을 잇게 된다. 이러한 초경합금의 특징은 그 미세구조상 액체소결에 따른 接合構造(cemented structure)라는 독특한 형태를 취하고 있어 구성물인 세라믹의 특성과 금속의 특성을 동시에 취할 수 있는 장점이 있다<sup>(1)</sup>. 1950년대 들어와 超硬工具는 성분 및 함량의 변화에 따라 현재와 비슷한 P.M.K 계열의 등급이 윤곽을 드러내기 시작하였다. 또한 여러 기계공학자들이 공구의 형상과 磨滅機構에 대한 활발한 연구를 하여 절삭공구의 성능향상에 기여를 하였다. 그 후 1960년초에는 인서트의 드로우어웨이화가 개발되어 절삭공구의 일대 혁신을 가져 왔으며 기계가공분야의 생산성 향상에 크게 기여하였다. 그런데 종래 브레이징식 공구의 경우 刃線 한개만을 사용할 수 있었던 것에 반하여 드로우어웨이식 공구는 최고 여덟개까지 사용할 수 있으므로 이로 인한 공구판매의 부진이 예상되었으나 당시 산업 및 소비재 부문의 활황으로 오히려 더 많은 수요가 창출되어 공구업체는 위기를 모면하게 되었다고 한다. 그 후 당분간 절삭공구분야는 공구인선의 최적화, 칩브레이커의 형상 등과 관련된 부분에 대한 집중적인 연구가 이루어졌으며, 분말야금분야에서는 품질

관리 및 제조공정의 자동화부분에서 많은 진전이 있었다.

1960년대 또 하나의 주목할 만한 일은 당시 가스터빈용 고온복합재에 대한 신소재개발연구가 한창이었는데 특히 분말야금분야에서 많은 연구가 이루어졌다. 이중 Parikh와 Humenik는 液體燒結工程에 대한 기초연구를 통하여 세라믹과 액체금속 사이의 wetting 현상을 표면에너지의 관점에서 설명하였으며<sup>(2)</sup>, 이 결과를 응용하여 TiC-Ni-Mo 계열의 초경합금 성능을 더욱 향상시켜 절삭공구로서 선 보였다. 이 공구는 당시 고온용 세라믹과 금속간 복합재에 대한 일반적인 이름인 서어멧(cermet)으로 불리워지기 시작하였다. 서어멧은 또한 WC-Co 계열 초경재 원료인 텅스텐과 코발트가 세계적으로 매장량이 충분치 않으며, 지역적으로 편재되어 있는 전략적 물질인 관계로 代替超硬材로서 주목을 받고 있으며 현재 이에 대한 활발한 연구가 진행중이다<sup>(3)</sup>.

1970년대 들어와 절삭공구 및 마멸재 분야에서 또 하나의 획기적인 개발은 被覆超硬工具라 할 수 있다. 이것은 세라믹계열의 耐磨超硬材를 超硬工具의 표면에 5~10 $\mu$ m 정도 두께로 얇게 증착시켜 공구의 수명을 대폭 향상시키는 방법으로서 초경합금기술과 피복기술의 접목이라 할 수 있다.

이러한 피복공구 제조기술은 피복시 모재와 피복의 경계층에서 발생하는 Eta 탄화물에 의한 脆性化를 방지하기 위한 이중, 삼중피복기술의 개발로 더욱 발전되었다. 향후 10년내에 기계가공분야에서 被復工具가 담당하는 부분이 크게 증가할 것이라는 업계의 공통된 전망을 고려할 때, 工具被復技術에 대한 기술개발이 매우 중요한 역할을 할 것으로 여겨지며 이 분야에서의 특허경쟁이 심화될 것으로 예상된다. 이러한 기술개발에 관련된 몇 가지 예를 들면 종래의 化學蒸着技術(chemical vapor deposition technique)과는 다른 플라즈마<sup>(4)</sup> 또는 레이저 등을 이용한 새로운 증착기술의 개발, TiC, TiN 또는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 이외의 새로운 탄화물,

질화물, 산화물 피복층의 응용<sup>(5)</sup>, 피복층의 수 및 두께 또는 형상변화에 관련된 피복층설계기술 등이 그 대상으로 될 것으로 여겨진다. 이와 더불어 피복층과 모재 사이의 접착성, 공구의 파괴인성 및 강도 등을 향상시키기 위하여 피복공구 모재에 대한 연구도 중요할 것으로 생각되며, 좀 더 근본적인 관점에서 피복층이 공구마멸에 미치는 영향에 대한 기초연구 등도 필요할 것으로 여겨진다<sup>(6)</sup>.

### 3. 세라믹공구

#### 3.1 알루미늄계열 공구(Alumina-Based Cutting Tools)

금속의 절삭가공에 대한 세라믹의 응용은 초경공구가 개발되기 훨씬 전인 1905년경 시작되었다. 초기에는 주로 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 세라믹이 절삭공구로서의 가능성이 시도되었으며 이에 대한 특허는 영국에서 1912년에, 독일에선 1913년경에 출원되었다. 하지만 당시 세라믹은 재료자체의 脆性 뿐만 아니라 열전도성이 매우 낮으므로 熱衝擊에 대하여 취약한 것이 결점으로 지적되어 널리 사용되지 못하였다. 그 후 제 2 차 대전중 고온에서의 세라믹 응용에 관한 연구가 활발히 진행되었는데 그 중 알루미늄에 다양한 燒結添加物을 첨가하여 소결시킨 알루미늄공구의 개발이 상당히 진전되었다. 1960년경에는 소결된 다결정  $\alpha$ 알루미늄으로 만든 절삭공구가 선을 보여 鑄鐵의 황삭가공 또는 鋼의 사상가공에 성공적으로 사용될 수 있음이 입증되었다. 1968년경에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 약 25~40 Vol.%의 TiC를 혼합한 復合材工具가 개발되었는데, 이것은 TiC에 의하여 熱傳導性이 크게 향상되고, 破壞靱性和 硬度가 증대되어 단일계 알루미늄공구보다 더 좋은 성능을 발휘하는 것으로 밝혀졌다<sup>(7)</sup>. 이로 인하여 알루미늄계열 공구의 사용범위가 확대되었는데 1980년초 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 공구가 등장하기 전까지 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 공구는 鑄鐵 또는 合金鋼의 高速加工에 큰 몫을 차지하게 되었으며, 현재도 백색세라믹(white ceramic)

이란 이름으로 불리우는 알루미늄단일계 공구와 함께 흑색세라믹(black ceramic)이란 이름으로 그 적용범위를 넓히고 있다.

알루미늄계열 공구중 최근 두 가지 주목할 만한 점이 있는데 그 하나는 1980년초에 보고된 變換靱性알루미나(transformation toughened alumina)다. 이것은 알루미늄 基地(matrix)에 部分安定지르코니아(partially stabilized zirconia) 粒子를 균일하게 분산시킨 複合材로서 균열선단 주위에 인장력이 작용하면 지르코니아가 안정된 系로 변환되면서 수반되는 체적팽창에 의하여 破壞靱性이 증가하게 된다<sup>(8,9)</sup>. 이 복합재는 상대적으로 硬度가 낮은 지르코니아( $ZrO_2$ )의 첨가로 그 경도가 조금 감소되지만 반면 引性이 증가되므로 그것이 보상된다. 그러나  $Al_2O_3-ZrO_2$ 에 의한 인성향상은 일반적으로 온도가 상승하면 감소되므로 절삭가공시 공구의 높은 온도상승은 그 효과를 반감시키므로 이 공구의 절삭속도에 제한을 주게 된다<sup>(10)</sup>.

또 다른 하나는 1986년경 등장한 SiC 短針補強알루미나공구(SiC whisker-reinforced alumina tool)이다<sup>(11)</sup>. 이 複合材는 미세구조상 마이크로 크기의 SiC 短針(whisker)이 알루미늄 기지에 산포되어 있어 응력을 분산시키며

또한 SiC의 좋은 熱傳導性 때문에 열충격을 줄이는 보강재의 역할을 한다. 따라서 단일계 알루미늄에 비하여 破壞靱性의 향상 뿐만 아니라 SiC에 의한 硬度증가도 기할 수 있어 첨단공구재로서 각광을 받고 있다. 특별히 耐熱合金의 가공시 매우 좋은 성능을 나타내는 것으로 알려져 있으며 고온에서는 SiC가 鐵과 반응하므로 鐵계통 재료의 가공에서는 절삭속도에 제한을 받게 된다<sup>(12)</sup>.

### 3.2 실리콘 질화물계열 공구(Silicon Nitride-Based Cutting Tools)

단일 실리콘 질화물( $Si_3N_4$ )은 높은 強度, 熱的安定性, 耐酸化性과 낮은 熱膨脹係數 및 높은 彈性係數 등의 장점을 지니고 있다. 그런데 문제는  $Si_3N_4$ 를 종래의 세라믹 제조방법으로는 固體燒結하기가 어렵다는 것이다. 이에 대한 해결방법으로는 燒結添加濟인  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ ,  $MgO$  등을 소량 첨가하여 소결온도에서 液粗燒結효과를 유도함으로써  $Si_3N_4$  결정체와 유리계(glass phase)로 결합시키는 것이다. 그러므로 결합제를 조절함으로써  $Si_3N_4$ 계 세라믹의 특성을 조정할 수 있게 된다.  $Si_3N_4$  계열의 공구는 灰鑄鐵가공에 특히 효과적인 것으로 밝혀졌는데 알루미늄공구에 비해 破壞靱性

표 1 공구재 세라믹의 주요 성질 비교

성 질	$Al_2O_3$	TiC	$Si_3N_4$	SiC	$ZrO_2$	Diamond
탄성계수 [GPa]	400~440	380~400	300~427	450	150	1,000
압축강도 [MPa]	5,000	4,000	8,000	10,000	4,000	50,000
밀 도 [mg/m <sup>3</sup> ]	3.97	4.93	3.44	3.21	5.89	3.5
열팽창계수 [10 <sup>-6</sup> /°C]	8.2~8.9	7.4	2.9~3.2	4.7	10	—
열전도율 [W/m·°C]	20	25	30~60	50	2.5	—
용융온도 [°C]	2,050	3,140	1,900	~2,700 (승화)	~2,700	3,700

이 더 좋을 뿐만 아니라 열충격에 대한 저항성 및 고온에서의 경도 또한 높아 공구수명과 신뢰도에서 앞서는 것으로 알려지고 있다<sup>(13)</sup>. 그러나 鋼의 절삭가공시는 화학적 반응에 의한 마멸때문에 부적합한 것으로 보고되고 있다. 실리콘질화물계열의 공구 중에는 일명 SiALON이라 불리는  $Si_{6-z}Al_2O_2N_{8-z}$  성분의 공구가 있다. 이것은  $Si_3N_4$ 와  $Al_2O_3$ 를 냉간성형하여 1700~1800°C에서 소결하는 것으로 때때로 TiC를 섞어 고온소결하기도 한다. 이 SiALON 공구는 鑄鐵 및 니켈합금의 절삭가공에 효과적인 것으로 알려져 있다<sup>(14)</sup>. 최근에는  $Si_3N_4$ 공구 표면에  $Al_2O_3$ 를 피복증착시킨 被覆セラ믹 공구도 출현하였으며  $Si_3N_4$ 를 근간으로 한 複合材工具에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>(15)</sup>.

### 3.3 非金屬 超硬材(Non-Metallic Super-hard Materials)

비금속 초경재에 속하는 대표적인 공구재료로는 다이아몬드와 CBN(cubic boron nitride)를 들 수 있다. 다이아몬드는 상온에서 극히 불활성이나, 온도가 상승하여 500°C 이상이 되면 酸素와 반응하여 일종의 黑鉛化(graphitization) 현상이 일어난다. 이런 현상은 다이아몬드가 1500°C 이상의 불활성분위기하에서 일어나는 진짜 흑연화현상과는 다르지만 아무튼 다이아몬드의 응용에 장애가 되는 것만은 틀림이 없다. 또한 다이아몬드는 1000°C 부근의 온도에서 鐵族 금속과 심각한 반응을 일으키므로 절삭가공시 공구마멸이 심해진다<sup>(13)</sup>. 초기에 개발된 다이아몬드 공구는 단결정 다이아몬드 自然石을 사용하였다. 그런데 다이아몬드는 단결정시 결정면에 따르는 硬度的 異方性 때문에 경도가 가장 높은 면을 工具刃線으로 사용하여야 한다. 따라서 이런 다이아몬드공구의 인선에는 粒子境界(grain boundary)가 존재하지 않으므로 매우 높은 표면조도가 요구되는 超精密加工에 적합하다. 그러므로 다이아몬드는 非鐵金屬의 精密加工 工具로서 추진된다고 하겠

다. 그런데 다이아몬드는 脆性이 강하므로 공구사용시 특별한 주의가 요구되며 가격이 고가인 결점이 있다. 다이아몬드가 좀 더 일반적인 공구로서의 가능성을 보인 것은 1972년 다결정 소결다이아몬드의 제조기술이 개발되어졌기 때문이다. 매우 높은 압력과 온도에서 인공적으로 제조된 다이아몬드는 얇은 두께의 인서트로 만들어져 초경공구 또는 고속도공구강 등에 브레이징되어 사용되고 있다. 인공다이아몬드는 硬度가 높으므로 심한 연마제가 들어있는 비철금속의 가공에 적합한다. 특히 많은량의 실리콘이 함유된 알루미늄합금의 가공에 효과적인 것으로 알려져 있다<sup>(15)</sup>.

CBN도 1957년경 인공제조법에 의하여 개발되었는데 다이아몬드와 같은 결정구조로서 硬度는 다이아몬드의 약 반 정도에 해당된다. 그러나 CBN은 다이아몬드보다 酸化에 강한데 이것은  $B_2O_3$  산화피막의 영향에 의한 것으로 보고되고 있다. CBN이 절삭공구로 선보인 것은 1975년경에 이루어졌는데 절삭가공시 공구온도가 1550°C 정도 이르면 CBN이 BN의 稠密六方格子構造(close-packed hexagonal structure)로 변하지만 鐵族 금속과는 반응이 없는 것으로 밝혀져 高硬度鐵族金屬과 高硬度合金의 가공에 유용한 것으로 알려져 있다<sup>(13)</sup>. 현재 CBN의 이용도는 극히 제한되어 있으나 앞으로 유리섬유 또는 세라믹섬유 복합재의 기계가공에 응용된다면 그 적용범위가 한층 넓어질 것으로 기대된다.

## 4. 맺음말

지금까지 절삭공구의 발달사 및 최근 개발동향에 대하여 살펴보았다. 현재 기계공업에 관련된 생산공정중 많은 부분을 切削加工이 담당하고 있으며, 절삭가공시 중요한 역할을 하는 切削工具는 소량의 마멸 또는 파손에 의하여 사용이 불가하여 교체된다는 것을 생각할 때, 切削工具의 世界市場規模가 매우 클 것이라는 것에 쉽사리 짐작될 수 있다. 그 뿐만 아니라

採鑛工具, 금형다이와 공구, 耐磨滅材 등에도 切削工具材가 응용된다는 것을 고려하면 그 수요는 엄청난 것이다. 그런데 이 분야에서 우리나라의 수준은 선진국과 비교할 때 크게 뒤떨어져 있으며 그 격차 또한 점점 더 벌어지고 있는 실정이다. 그러므로 앞에서 살펴본 바와 같이 오랜기간 축적되어온 그들의 기술수준을 따라잡기 위해서는 관련 기술에 대한 연구 및 기술축적에 대하여 업계 및 학계의 부단한 노력이 요구된다고 하겠다.

### 참 고 문 헌

- (1) Gurland, J. and Norton, J.T., 1952, "Role of the Binder Phase in Cemented Tungsten Carbide-Cobalt Alloys", J. Metals, pp. 1051~1056.
- (2) Humenik, M. and Parikh, N.M., 1956, "Cermets; I, Fundamental Concepts Related to Microstructures and Physical Properties of Cermet Systems", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 39, pp. 60~63.
- (3) Fischmeister, H.F., 1981. "Development and Present Status of the Science and Technology of Hard Materials", Science of Hard Materials, pp. 1~45.
- (4) Archer, N.J., 1981, "Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition of TiC, TiN and TiC<sub>y</sub>N<sub>1-x</sub>", Thin Solid Films, Vol. 80, pp. 221~225.
- (5) 양민양, 1988, "고속가공을 위한 절삭공구의 최적화", 대한기계학회논문집, 제12권, 제6호, pp. 1290~1295.
- (6) 손태영, 1989, "절삭공구의 피복층이 공구 마멸에 미치는 영향에 대한 연구", 한국과학기술원 생산공학과 석사학위논문.
- (7) Wahi, R.P. and Ilschner, B., 1980, "Fraiture Behavior of Composites Based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC", J. Mater. Sci., Vol. 15, pp. 875~885.
- (8) Claussen, N., 1976, "Fracture Toughness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with an Unstabilized ZrO<sub>2</sub> Dispersed Phase", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 59, pp. 49~51.
- (9) Lange, F.F., 1982, "Transformation Toughening", J. Mater. Sci., Vol. 17, pp. 225~262.
- (10) Becher, P.F., Swain, M.V. and Ferber M.K., 1987, "Relation of Transformation Temperature to Fraiture Toughness of Transformation-Toughened Ceramics", J. Mater. Sci., Vol. 22, pp. 76~83.
- (11) Wei, G.C. and Becher, P.F., 1985, "Development of SiC-Whisker Reinforced Ceramics", Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 64, pp. 296~304.
- (12) Vigneau, J., Bordel, P. and Leonard, A., 1987, "Influence of the Microstructure of the Composite Ceramic Tools on their Performance when Machining Nickel Alloys", Annals of CIRP, Vol. 36, pp. 13~16.
- (13) Baldoni, J.G. and Buljan, S., 1988, "Ceramics for Machining", Am. Ceram. Bull. Vol. 67, pp. 381~387.
- (14) Drozda, T.J., 1985, "Ceramic Tools Find New Applications", Manufacturing Engineering, Vol. 95, No. 5, pp. 34~39.
- (15) Kalish, H.S., 1983, "Status Report ; Cutting Tool Materials", Metal Progress, pp. 21~25.

