

# 경화강에 대한 세라믹공구의 손상특성에 관한 연구

김 광 래\*, 유 봉 환\*\*

## A Study on the Failure Characteristics of Ceramic Tool for Hardened Steels

Kwang-Lae Kim\*, Bong-Hwan Ryu\*\*

### ABSTRACT

This thesis is concerned with the study on the characteristics of the tool failure occurring at the beginning of cutting in finish machining of hardened steels such as carbon tool steel and alloy tool steel by a ceramic tool( $Al_2O_3+TiC$ ) with nose radius.

In the machining of hardened carbon steel STC3, the wear mechanism on the flank face of the ceramic tool is abrasion wear. The mode of tool failure is developed into catastrophic fracture with flaking. It is thought that the fracture caused by FeO and  $TiO_2$  results from the oxidation of Fe in the workpiece and TiC in the ceramic tool and the deposit of Fe formed on the surface of the ceramic tool. In the machining of hardened alloy steel STD11, the wear mechanism on the flank face of the ceramic tool is that abrasion and adhesion wear exist simultaneously. The mode of tool failure at the beginning of cutting features is DOC notch wear. It is thought that the DOC notch wear caused by FeO and  $TiO_2$  results from the oxidation of Fe and TiC in the workpiece and ceramic tool, respectively.

**Key Words** : Fracture(파손), DOC Notch Wear(경계마멸), Ceramic Tool(세라믹공구), Hardened Steel(경화강)

### 1. 서론

경화강의 가공분야에서 중요한 관심사의 하나는 가공능률이 낮은 기존의 연삭공정을 고능률적인 가공을 할 수 있는 절삭공정으로 전환하는 것이다. 절삭가공의 개념에서 경화강이 난삭재라 하는 것은 경도가 높기 때문에 절삭저항이 큰 점과, 마찰에 의한 절삭날의 온도상승으로 발생하는 공구손상(tool failure)이 일반적인 절삭가공 공정에서 나타나는 것 보다 발생시기가 매우 빠르고 그

정도가 크다는 것을 의미한다. 즉 경화 열처리되어 경도가 높아진 가공재에 대하여 상대적으로 취약해지는 절삭공구의 손상은 절삭공정의 신뢰성에 대한 아주 큰 문제로 나타난다.

현재 세라믹공구, CBN공구, 다이아몬드공구 등과 같은 내마멸성이 우수한 새로운 공구의 개발이 이루어져, 고경도 재료의 기계가공에서는 연삭과 절삭의 경계영역이 좁혀지고 있다. CBN공구는 고온경도나 화학적 안정성에서 매우 우수한 성능을 갖고 경화강이나 칠드주철 등

\* 인덕전문대학 기계과  
\*\* 숭실대학교 기계공학과

의 고경도 철계 재료의 절삭에 적합하다. 그리고 다이아몬드공구는 소결 절삭공구로서 경도가 가장 크기 때문에 알루미늄합금, 티타늄합금, 초경합금의 절삭에서는 양호한 결과를 얻을 수 있지만, 철, 니켈 및 탄소를 고용하는 강에 대하여 확산반응이 쉽게 생기므로 경화강의 절삭에는 부적합하다. 이러한 특성을 갖는 CBN공구와 다이아몬드공구는 실용적인 관점에서 가격이 매우 비싸기 때문에 생산현장에서 사용하기가 어려운 실정에 있다. 그러나 세라믹공구는 가격이 저렴하고 종류도 다양하며, 그 조성에서 고온경도가 높은 재료이므로 경화강의 실용적인 절삭에서 최적의 재료로 활용될 수 있다고 생각된다.

세라믹공구에 의한 경화강의 절삭에 관한 연구에서 Matsumoto<sup>(1)</sup>는 가공면의 품질에 관한 연구를 하였으며, Ohtani 등<sup>(2)</sup>은 이송분력과 배분력의 감시에 의한 공구손상의 예지가 가능함을 주장하였고, Oishi 등<sup>(3)</sup>은 절삭초기에 나타나는 공구의 초기파손이 절삭속도와 이에따라 발생하는 열적인 영향을 받는다고 발표하였다.

이외의 많은 연구결과에도 불구하고 실용적인 절삭조건을 갖는 경화강의 절삭가공에서 발생하는 공구손상의 기구 및 형태에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 근래 우리나라의 절삭가공 분야에서는 생산현장에서 필요로 하는 실용적인 측면을 고려하지 못하는 등 시대에 맞는 요구를 충분히 만족시키지 못하였다.

본 논문에서는 기계적성질 및 화학적성질이 각기 다르기 때문에 공구손상의 결과도 다르리라고 생각되는 경화열처리된 탄소공구강재와 합금공구강재를 가공재로 선정하고, 절삭가공시 세라믹공구에 발생하는 공구손상 특성을 검토하여 파급효과를 얻는 것을 목적으로 삼았다.

## 2. 실험방법

**절삭공구:** 절삭공구의 재종은 파괴인성과 내마멸성이 향상되어 기계적충격과 열충격에 강하고 절삭유제의 사용이 가능하기 때문에, 경화된 고경도 재료의 절삭에서 우수한 적응성을 갖는 흑 세라믹공구<sup>(4)</sup>( $Al_2O_3 + TiC$ )인

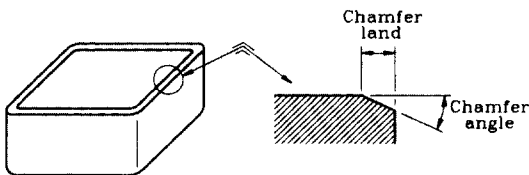


Fig. 1 Feature of ceramic tool with edge chamfer

Kyocera사의 A-65이다. 세라믹공구가 갖는 형상의 규격은 인서트 형인 SNGN1204이며, Fig. 1과 같이 인성에 약한 세라믹공구의 모서리에 적용된 참퍼(chamfer)의 크기는  $-25 \times 0.2mm$ 이다. 그리고 공구홀더는 클램프 체결용으로 CSBNR2020 (-5,-6,5,6,15,15,0.8)을 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of workmaterial

Work KS	Chemical Composition, %							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
STC3	1.04	0.28	0.02	0.02	0.23			
STD11	1.50	0.62	0.03	0.03	0.41	12.0	1.0	0.25

Table 2 Heat treatment and hardness

Work KS	Heat treatment	Hardness HRC
STC3	(600°C,1.5h) + (840°C,2.5h/WC) + (180°C,1.5h/AC)	60~62
STD11	(560°C,1.5h) + (1020°C,2.5h/WC) + (180°C,1.5h/AC)	60~62

**가공재 :** 세라믹공구의 손상에 대한 실험결과를 비교하기 위하여 공구강 중에서도 가장 많이 사용되며 공구나 금형용 강재로 훌륭한 특성을 갖는 탄소공구강(STC3)과 합금공구강(STD11)을 가공재로 선정했다. 선정된 가공재의 화학적 성분과 열처리 조건은 Table 1, 2와 같으며, 직경 68mm, 길이 150mm인 형상을 갖는다.

**실험장치:** 공구손상을 조사하기 위하여 절삭시험에 사용된 공작기계는 고정밀도를 갖는 CNC 정밀선반(한국종합기계 : TC-1)과 고속선반(대구중공업 : DLF)이다. 절삭날의 손상형태와 기구에 대한 결과는 미소영역의 관찰 및 화학조성의 분석을 할 수 있는 장비인 주사 전자 현미경(SEM), 에너지 분산 분광기(EDS), 전자빔 미세영역 분석기(EPMA) 그리고 비파괴 분석을 할 수 있는 X선 회절 분석기(XRD)를 이용하였다.

**절삭시험 조건:** 경화강은 경도가 높기때문에 절삭온도가 이상으로 상승하므로 실용적인 절삭조건이 매우 좁게 된다. 따라서, 절삭조건은 가공능률과 절삭성능을 고려한 세라믹공구에 대한 추천치<sup>(4)</sup>와, 연삭공정의 대체에 따른 생산성을 고려하여 절삭속도는 150m/min, 이송은 0.2mm/rev 그리고 절삭깊이는 0.4mm 이하로 선정하였다. 원통형상의 가공재는 선반의 척과 심압대에 장착하여 건식으로 축방향 절삭을 하였다.

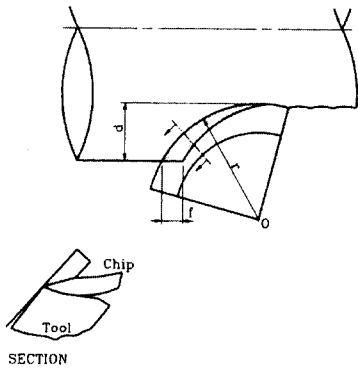


Fig. 2 Condition of engagement in turning

절삭시험에 앞서 가공재의 장착시 발생할 수 있는 편심을 제거하기 위하여 전가공을 실시하였으며, 절삭공구는 매 시험마다 새로운 절삭날을 사용하였다. Fig. 2는 절삭시험에 사용된 세라믹공구와 가공재의 물림조건을 나타낸 것이다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 공구손상형태

가공재로 선정된 탄소공구강 STC3와 합금공구강 STD11은 합금 원소성분 및 기계적성질이 다르다. 그리고 세라믹공구는 고온경도가 높으며 동시에 철계 가공재와 친화성이 낮은 성질을 갖으므로 경화강의 연속절삭시 CBN공구와 동등이상의 내마멸성을 갖는 경우도 있지만<sup>(5)</sup>, 인성이 약한 것이 결점으로 나타난다. 따라서, STC3 및 STD11의 절삭가공 과정에서 나타나는 공구의 손상형태는 각기 다르게 나타날 것이라고 예상된다.

Fig. 3은 경화처리된 STC3의 절삭시 세라믹공구의 손상에 대한 절삭속도의 영향을 살펴 본 것으로 이송을 0.15mm/rev로 선정하고, 절삭깊이를 0.2mm, 0.4mm인 두 종류로 분류하였을 때, 각기 절삭속도 40m/min, 130m/min 이하에서는 파손은 발생되지 않고 정상마멸이 진행된다. 그러나 절삭속도가 그 이상이 되면 절삭시간 2분 이내에 돌발적인 파손이 발생한다. 이러한 정상마멸과 파손발생이 나타나는 절삭속도의 경계를 임계절삭속도(critical cutting speed:  $V_c$ )라 한다. Fig. 4는 절삭깊이와 이송의 변화에 대한 임계절삭속도의 관계를 살펴 본 것이다. 각 절삭조건에 임계절삭속도를 연결하는 선의 상측인 고속영역에서는 대부분 파손이 발생하며, 하

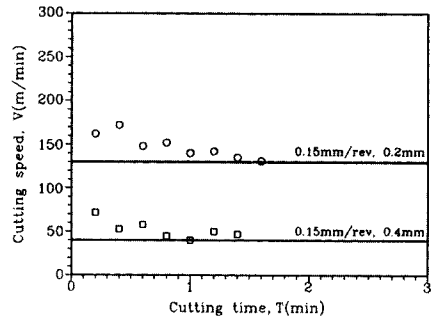


Fig. 3 Relation between cutting time and cutting speed for catastrophic fracture

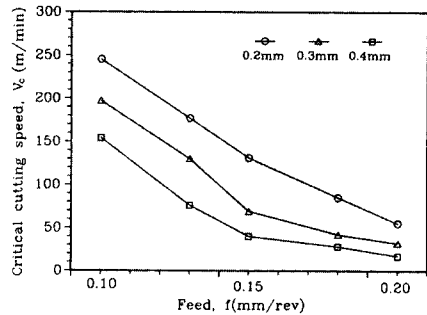
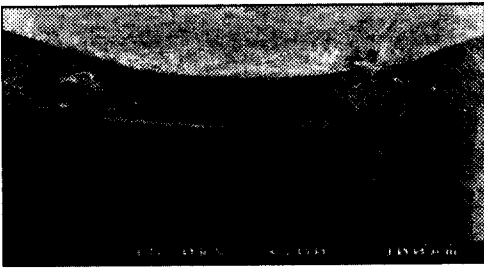


Fig. 4 Relation between feed and critical cutting speed ( $T=2\text{min}$ )

측인 저속영역에서는 정상절삭의 범위로 된다.

Fig. 5는 이송 0.15mm/rev, 절삭깊이 0.2mm인 조건을 선정하고, 절삭속도에 대한 세라믹공구의 손상형태를 촬영한 주사 전자현미경 사진의 일예이다. Fig. 5(a)는 절삭속도 100m/min로 60분간 절삭한 후에 정상적으로 마멸된 세라믹공구의 손상형태이다. 다듬질 절삭과 같은 경절삭에서 실질적인 경사면으로 작용하는 참표면에 Fig. 2에서 음영으로 표시된 절삭단면형상과 같은 크레이터마멸이 생성되었고, 여유면에는 플랭크마멸이 진행되었지만, 칩핑이나 파손은 발생되지 않았다. Fig. 5(b)는 절삭속도를 135m/min로 선정하고 2분간 절삭한 후에 발생한 세라믹공구의 손상형태로 경사면과 참표면 그리고 여유면에 걸쳐서 조개껍질 모양의 박리(flaking)를 동반한 돌발적인 파손이 발생된 것이 관찰된다. 그리고 Fig. 5(c)는 절삭속도를 130m/min로 선정하고 45분간 절삭하였을 때 발생한 세라믹공구의 손상형태로 정상적으로 진행된 크레이터마멸과 돌발적인 파손이 동시에 관찰된다.



(a) V=100m/min, T=60min



(b) V=135m/min, T=2min



(c) V=130m/min, T=45min

Fig. 5 SEM photographs of tool failure  
(f=0.15mm/rev, d=0.2mm)

이와같이 STC3에 대한 세라믹공구의 손상은 절삭속도가 저속인 경우에는 공구면에 점진적으로 진행되는 안정된 정상마멸의 형태로 나타나지만, 고속인 경우에는 절삭초기나 정상적인 마멸이 진행되는 절삭과정 중에서도 돌발적인 파손이 발생한다.

한편, 경화처리된 STD11의 절삭시 세라믹공구에는 절삭초기에 특징적인 경계마멸(DOC notch wear)<sup>(6)</sup>이 발생된다. Fig. 6은 경계마멸에 대한 절삭속도의 영향을 살펴 본 것이다. 절삭조건은 이송 0.2mm/rev, 절삭깊이 0.2mm 그리고 이송 0.1mm/rev, 절삭깊이 0.4mm로

절삭면적이 동일한 두 종류를 선정하였다. 같은 절삭시간 내에 실험된 결과는 절삭속도가 증가하면 절삭길이는 길어지지만 생성되는 경계마멸의 크기는 오히려 감소한다. 이는 Wayne 등<sup>(7)</sup>의 연구결과와도 일치함을 보인다. 이와 같이 세라믹공구에 의한 경화 열처리된 합금공구강재 STD11의 절삭과정에서 특징적으로 생성되는 경계마멸은 절삭초기에도 생성되며, 절삭속도가 증가하면 감소한다.

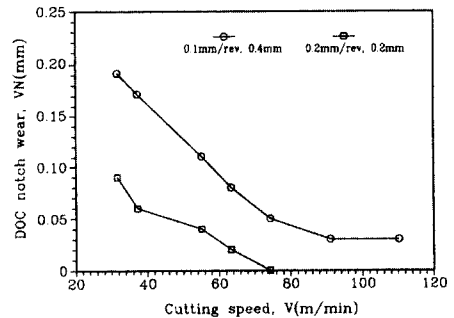


Fig. 6 Relation between cutting speed and DOC notch wear (T=2min)

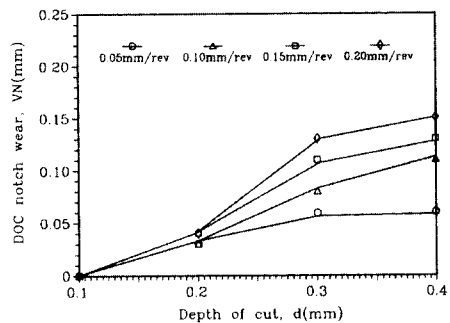
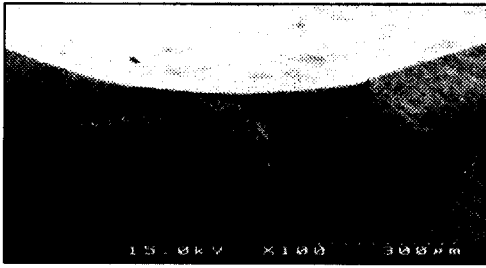


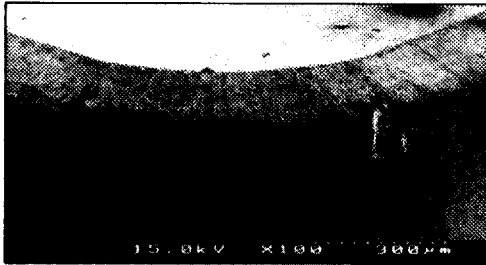
Fig. 7 Relation between depth of cut and DOC notch wear (V=55m/min, T=2min)

Fig. 7은 일정한 절삭속도에서 이송의 크기를 0.05~0.2mm/rev에서 네 단계로 구분하고 절삭깊이의 변화에 대한 경계마멸의 관계를 살펴 본 것으로 이송과 절삭깊이가 증가하면서 경계마멸은 증가함을 나타낸다.

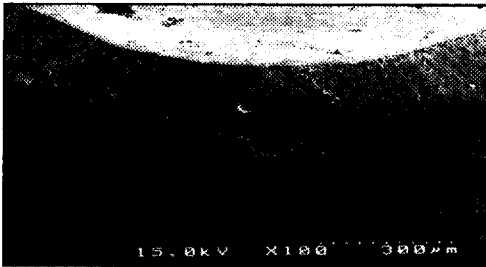
Fig. 8은 절삭속도, 이송 및 절삭깊이가 각기 다른 절삭조건으로 2분간 절삭한 후에 세라믹공구의 마멸형태를 촬영한 주사 전자 현미경사진의 일예이다. 가공재의 외주와 접촉하는 세라믹공구의 노즈부에서 찰과면과 여유면에 노치형태의 경계마멸이 특징적으로 생성되며, 그 크기



(a)  $V=37\text{m/min}$ ,  $f=0.15\text{mm/rev}$ ,  $d=0.27\text{mm}$ ,  $T=2\text{min}$



(b)  $V=55\text{m/min}$ ,  $f=0.1\text{mm/rev}$ ,  $d=0.4\text{mm}$ ,  $T=2\text{min}$



(c)  $V=31\text{m/min}$ ,  $f=0.2\text{mm/rev}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $T=\text{min}$

Fig. 8 SEM photographs of DOC notch wear

와 형상이 절삭조건에 따라 각기 다르게 나타나는 것이 관찰된다. 일반적으로 경계마멸은 여유면에 발생하는 플랭크마멸 보다 크고 깊은 형태로 나타나지만, 경화 열처리된 STD11강의 절삭에서는 플랭크마멸이 발생되기 이전인 절삭초기에 독립적으로 나타난다.

### 3.2 공구손상기구

Fig. 9는 절삭온도가 공구마멸기구에 미치는 영향을 나타낸 것<sup>(6)</sup>으로 기계적마멸(abrasion wear)과 절삭온도의 영향을 강하게 받는 확산마멸(diffusion wear), 응착마멸(adhesion wear) 및 산화마멸(oxidation wear)

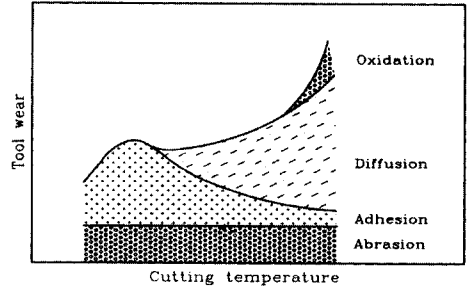
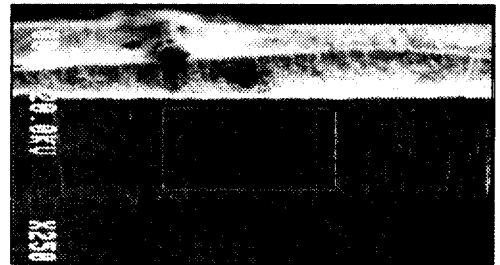
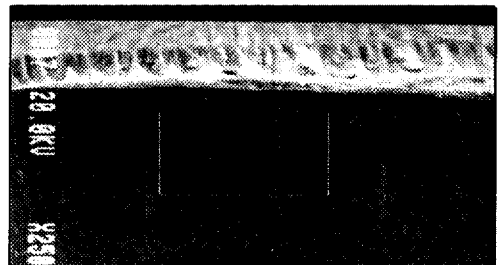


Fig. 9 Schematic representation of tool wear mechanisms as function of cutting temperature - proposed by Focke<sup>(6)</sup>



(a) Wear of ceramic tool on STC3



(b) Wear of ceramic tool on STD11

Fig. 10 SEM photographs of wear of ceramic tool ( $V=70\text{m/min}$ ,  $f=0.1\text{mm/rev}$ ,  $d=0.2\text{mm}$ ,  $T=60\text{min}$ )

등을 살펴 볼 수 있다.

Fig. 10은 절삭속도 70m/min, 이송 0.1mm/rev, 절삭깊이 0.2mm인 절삭조건에서 60분간 절삭한 후에 정상적으로 마멸된 세라믹공구의 여유면을 주사 전자현미경으로 촬영한 사진이다. STC3를 절삭한 Fig. 10(a)에서는 마치 입자가 끌린 것 같은 미세한 흔적이 마멸부의 전면에 생기는 것이 관찰된다. STD11을 절삭한 Fig. 10(b)에서는 Fig. 10(a)와 같은 미세적 흔적과, 특이하게 생겼을 것 같은 요철형상으로 패인 마멸흔적이 관

찰된다.

이같이 마멸된 여유면의 흰색 테두리 면적부분에 대한 금속성분의 용착물을 조사하였다. Fig. 11은 세라믹공구의 마멸된 여유면에 용착된 가공재 STC3 및 STD11의 원소성분을 에너지 분산 분광기를 이용한 정성분석의 결과를 나타낸 것이다. 분석결과에서 세라믹공구의 주성분인 알루미늄과 티타늄 성분이 대부분이며, 가공재성분인 철, 크롬 그리고 불순물로 개재된 니켈이 미량으로 관찰된다. 특히 STD11을 절삭한 결과인 Fig. 11(b)에서 나타나는 특징적인 현상은 가공재의 원소성분인 상당량의 철이 상대적으로 관찰된다. 이러한 결과는 전자빔 미세영역 분석기에 의한 점분석(point analysis) 결과에서와 같은 양상으로 나타남을 알 수 있었다.

### 3.3 세라믹공구와 가공재의 반응실험

절삭시험에 이용된 세라믹공구와 가공재인 STC3 및 STD11 시편(φ22mm×12mm)을 알코올로 깨끗이 세척하여 중첩시킨 후, 전기로 내에서 500°C와 1000°C인 두 종류의 온도로 가열하여 24시간 반응시킨 다음 로냉하였다.

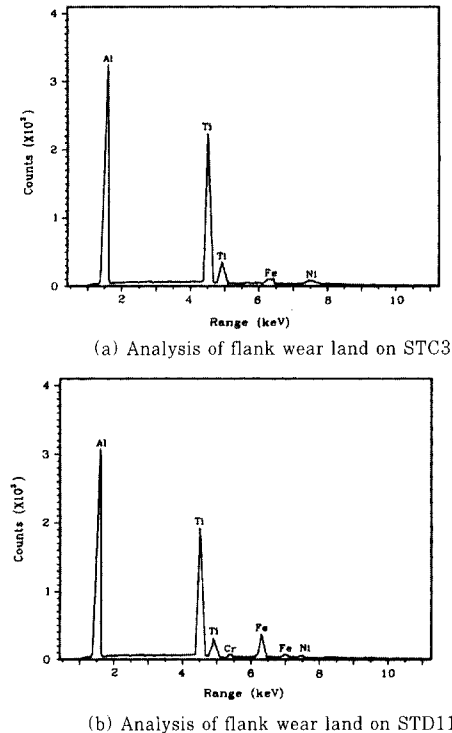


Fig. 11 Analysis of flank wear land of ceramic tool with EDS

반응된 세라믹공구의 표면을 X선 회절분석기로 반응성 물질과 상전이를 관찰한 결과가 Fig. 12, 13이다. 두 경우 모두 반응온도 500°C에서는 세라믹공구의 주성분인 산화알루미늄과 탄화티타늄만이 관찰될 뿐 어떠한 반응도 일어나지 않았다. 그러나 세라믹공구와 STC3가 반응한 Fig. 12(b)의 1000°C에서는 철이 산화철(FeO)로, 탄화티타늄이 산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)으로 변화되었으며, 상당량의 철이 관찰되는데 이는 세라믹공구의 표면에 용착된 것으로 생각된다.

한편, 세라믹공구와 STD11이 반응한 Fig. 13(b)의 1000°C에서는 철이 산화철로, 탄화티타늄이 산화티타늄으로 변화하였으며, 특히 산화티타늄은 상당량이 관찰된다. 이러한 산화물과 용착물은 일반적으로 공구손상을 촉진시킨다.<sup>(9)</sup>

### 4. 고찰

경화 열처리된 탄소공구강재 STC3의 절삭시 세라믹공구의 여유면에 발생하는 마멸기구는 Fig. 10(a) 및 Fig. 11(a)의 내용을 고찰한 결과, 가공재내의 미세한 경조직 또는 경입자가 연삭입자의 역할을 하는 연삭작용에 의해 공구면을 마멸시키는 기계적마멸이 지배적으로 작용한다

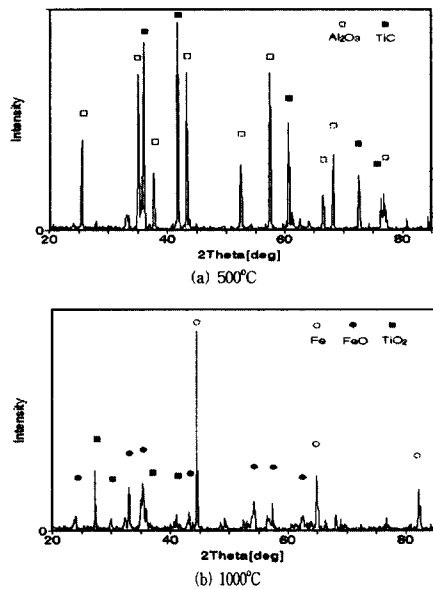


Fig.12 XRD of ceramic tool in reaction between ceramic and STC3 (reaction time: 24hr)

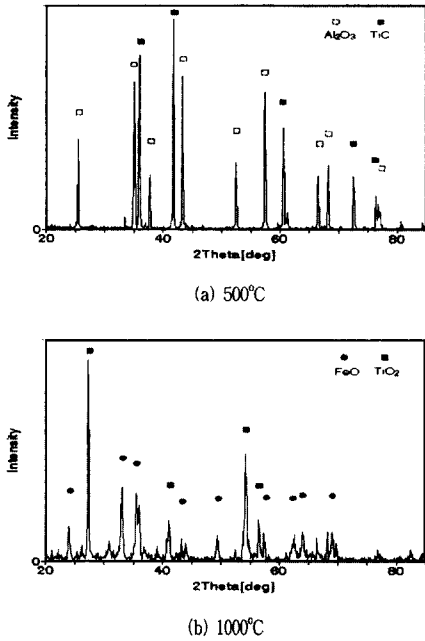


Fig.13 XRD of ceramic tool in reaction between ceramic and STD11 (reaction time: 24hr)

고 판단된다. 돌발적인 파손이 나타나는 현상은 앞에서 조사된 세라믹공구의 기계적 마멸기구 및 세라믹공구와 가공재의 반응에 의한 산화물 및 철의 용착 그리고 이것이 탈락할 때 공구내에 생기는 인장응력이나 전단응력에 의한 공구표면의 박리가 원인으로 작용한다고 생각된다. 특히 절삭속도의 증가에 따라 돌발적인 파손이 쉽게 나타나는 것은 절삭속도의 증가에 의한 절삭열의 영향을 크게 받는 것 때문이라고 생각된다. 즉 공구표면은 내부 보다 상당히 높은 절삭온도로 가열되고, 그 접촉영역의 끝 부분에서는 매우 빠르게 냉각되기 때문에 강한 열충격(thermal shock)이 발생한다.

이러한 열적 변화에 의해 우선적으로 약화된 절삭날 주변의 공구표면 부분에서는 미세한 칩핑과 균열이 발생된다. 그리고 이것이 진전되어 인성이 약한 것이 가장 큰 결점인 세라믹공구의 표면에 박리를 동반한 돌발적인 파손을 발생시킨 것으로 판단된다.

경화 열처리된 합금공구강재 STD11의 절삭시 세라믹공구의 여유면에 발생하는 마멸기구는 Fig. 10(b) 및 Fig. 11(b)의 내용을 고찰한 결과, 가공재가 크롬, 몰리브덴 등 합금원소 성분을 포함하고 가공재료의 특성상 인

성이 크기 때문에, 기계적 마멸기구와 접촉면 반응에 의한 용착 마멸기구가 동시에 존재한다고 판단된다. 경계마멸형태가 특징적으로 나타나는 현상은 가공재에 함유된 단단한 탄화물 입자의 미시적 요인으로 인한 연삭작용인 기계적 마멸기구, 용착된 용착물이 성장과 탈락을 반복하는 용착 마멸기구 및 가공재와의 반응에 의해 생성된 산화물인 산화철과 상당량의 산화티타늄이 원인으로 작용한다고 생각된다. 그리고 배출되는 칩의 두께가 절삭깊이 부근에서 가장 두껍고, 그 측면은 구속이 없기 때문에 삼차원적 변형을 하여 변형경도가 증가함으로 나타나는 칩의 영향이 경계마멸을 촉진시키는 복합적인 요인으로 작용한다고 생각된다.

한편, 절삭속도가 저속인 경우에 경계마멸이 크게 나타나는 현상은 Fig. 9에서 살펴 본 바와 같이 절삭속도가 낮은 저온영역에서 그 범위가 크게 나타나는 용착마멸이 강하게 작용하는 것이 원인이라고 생각된다.

## 5. 결론

### 경화된 탄소공구강에 대한 공구손상 실험결과

1. 세라믹공구의 손상 형태는 박리를 동반한 돌발적인 파손이며, 여유면에 생성되는 마멸기구는 기계적 마멸기구이다.
2. 돌발적인 파손은 산화물과 절삭열에 의해 공구면에 나타나는 철의 용착이 원인으로 작용한다고 생각된다.
3. 돌발적인 파손은 고속에서 일어나기 쉬우며, 저속에서는 정상절삭이 가능하다.

### 경화된 합금공구강에 대한 공구손상 실험결과

1. 절삭초기에 경계마멸이 특징적으로 생성되며, 세라믹공구의 여유면에 생성되는 마멸기구는 기계적 마멸기구와 용착 마멸기구가 동시에 존재한다.
2. 경계마멸은 산화물과 저속에서 크게 나타나는 용착 마멸기구가 원인으로 작용한다고 생각된다.
3. 경계마멸은 절삭속도가 증가하면 감소한다.

## 후 기

본 연구는 인덕전문대학 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. Y.Matsumoto, M.M.Barash and C.R.Liu, "Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI4340 Steel," Trans. ASME, Vol. 108, pp.169~175, 1986.
2. T.Ohtani, K.Fujise and H.Yokogawa, "Cutting Force Characteristics in Finish Machining of Hardened Steel," JSPE, Vol.54, No.10, pp.1969~1974, 1988.
3. K.Oishi and T.Nishida, "Early Fracture of Ceramic Tools in Turning of Hardened Steel," JSPE, Vol.55, No.9, pp.1657~1662, 1989.
4. 田中 博, "セラミック工具の特性と應用," 機械の研究, 第37卷, 第9號, pp.1039~1044, 1986.
5. 大谷敏昭, 藤瀬健領, 横川 洪, 三井武良男, "CBNおよびセラミック工具による焼入鋼の旋削," 精密機械, 第49卷, 第6號, pp.804~808, 1983.
6. T.Ono and H.Takeyama, "Basic Investigation on Grooving Wear," JSPE, Vol.41, No.3, pp.287~293, 1975.
7. S.F.Wayne and S.T.Buljan, "Wear of Ceramic Cutting Tools in Ni-Based Superalloy Machining," Tribology Trans., Vol.33, No.4, pp.618~626, 1990.
8. 杉田忠彰, 上田完次, 沼村豊四郎, 基礎切削加工學, 共立出版株式會社, p.126, 1988.
9. M.Masuda and T.Kori, "Wear Mechanism of Alumina Ceramic Tools when Machining Austempered Ductile Iron," JSPE, Vol.60, No.12, pp.1781~1785, 1994.