

절삭가공용 바이트 수명연장을 위한 TiN 코팅에 관한 연구

백 영남*, 유송민*, 오환섭*, 전인철**, 김강범**

*경희대학교 기계공학과, 재료과학기술연구소 **신도리코(주)

The TiN coating for life-extension on the cutting bites.

Y. N. Paik*, S. M. Yu* H. S. Oh*
 I. C. Jeon**, K. B. Kim**

*Dept. of Mechanical Engineering and
 Institute of Materials Science and Technology, KyungHee University,
 **SindoRico. Co.

Abstract

Tool life characteristics were investigated for the TiN coated (PVD) tungsten carbide cutting tools to improve the tool life

Experimental variables for TiN coating were coating time and cathode bias voltage and cutting variables were cutting speed and feed rate.

As a experiment result, TiN coated tool life was extended about from 2.14 to 2.7 times than that of not coated tungsten carbide tools. Also, coating thickness is much affected to tool life.

1. 서 론

금속의 절삭이나 소성가공과 관련된 산업에서는 절삭속도, 이송량 절삭깊이를 증가시키는 이른바 고속절삭 가공등을 통하여 생산성을 향상시키려는 노력이 활발히 진행되고 있으며 각종 절삭공구들은 무엇보다도 우수한 내마모성을 필요로 하게된다.¹⁾

이러한 내마모성 박막인 TiN, TiC, TiCN, Al₂O₃ 등의 박막을 코팅시켜 마모특성과 마찰특성을 향상시킴으로써 고속절삭을 가능케 한 coating tool의 공구수명과 마모형상에 관한 연구는 절삭가공에서의 절삭성 향상을 위한 중요한 과제라고 할

수 있다.

절삭공구의 절삭날 부분의 표면처리와 코팅은 독일비데어사가 1969년에 화학적증착법 (Chemical Vapor Deposition : CVD)에 의해 시도되어 처음으로 코팅공구를 시판하였으며, 물리적증착법 (Physical Vapor Deposition : PVD)에 의한 고속도강, 초경합금 등도 코팅되어 실용화 되어가고 있다.

본 연구에서는 초경합금상에 TiN을 이온플레이팅법으로 증착시간과 바이어스전압, 코팅 두께를 변수로 하여 코팅하고, 절삭조건을 변화시키면서 박막이 공구수명연장에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 박막의 증착

본 실험에서 사용한 이온플레이팅 장치에는 기본적으로 진공장치, 진공챔버, 증발원 및 이온화율 증대장치, 전원 공급장치, 가스 공급장치 등으로 구성되어 있다.

진공장치는 10^{-2} torr 까지 배기할 수 있는 유회전펌프(rotary pump)와 10^{-6} torr의 진공도까지 배기할 수 있는 유탄산펌프(diffusion pump)로 구성되어 있으며, 진공도는 Pirani gauge와 Penning gauge로 측정하였다. 본 실험장치의 진공챔버는 지름 500mm, 높이가 600mm인 원통형으로서 스테인레스 강판(SUS 304L)을 사용하였다. 증발원으로는 저전압(15~30V D.C), 고전류(15~150A) 방전으로 높은 이온화율(10~100%)과 높은 운동에너지(15~150eV)를 형성할 수 있으며, 고용점 재료(Ti, Zr, Hf)를 증착할 수 있는 아크 증발을 선택하였다. 냉각효과를 높이기 위해 타겟의 저면을 냉각수로서 냉각하였다. 전원장치로는 기관에 bias power supply를 갖추고 있다. 가스는 99.9% 순도의 질소가스(N₂)와 아르곤가스(Ar)를 mass flow controller로 공급하였다. 그 외에 기관 holder, 기관을 회전시킬 수 있는 motor, chamber 내의 온도를 일정하게 조절하는 heater, 온도를 측정하는 thermocouple, 타겟에 전기를 가해줄 수 있는 trigger 등이 장착되어 있다. 타겟의 재료로는 $\phi 30$ mm의 순 티타늄을 사용하였다.

본 연구에 사용된 소재는 대한중석(주)의 선반용 초경 bite이다. 모재표면의 청정도는 증착피막의 미세조직, 밀착력 등에 큰 영향을 미치므로 세심하게 전처리를 하였으며, 그공정은 다음과 같다.

① 세제를 사용하여 먼지 등을 제거해 준다.

② 증류수 속에서 10분간 초음파 세척(ultra-sonic cleaning)을 행하여 잔류세제를 제거한다.

③ trichloroethylene 용액에 담구어 10분간 초

음파 세척하여 유기물을 제거한다.

④ 증류수 속에서 다시 초음파 세척을 10분간 행한다.

⑤ 아세톤에 담구어서 10초간 초음파 세척을 행하여 잔류하는 합성수지를 제거한다.

이때 각 과정으로 넘어갈 때 시편에 남아 있는 액체를 air-knife와 열풍건조기로 완전히 건조시킨 후 다음 단계를 실시하였으며, 피삭체로는 전처리 과정을 마친 시편은 진공챔버 안에 장착하여 플라즈마 상태에 바이어스된 시편을 노출시켜 높은 에너지의 Ar 이온을 충돌시켜 금속표면에 존재 하고 있던 오염물질을 제거하였다.²⁾

TiN 박막은 도금조건에 따라 다양하게 형성되며, 본 연구에서는 아크전류 70A, 바이어스전압 -300V, Base 압력 5×10^{-6} torr 및 증착압력 $0.4 \sim 4 \times 10^{-3}$ torr 로 하고 코팅두께를 가변하기 위하여 증착시간을 변수로 하여 증착하였다.

2.2 절삭실험

공구수명 평가실험은 선반절삭으로 하였으며, 선반에 대한 제원은 Table 1에 나타내었으며, bite tip은 대한중석(주)의 turning용을 사용하였다. 이에 대한 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 The Geometry of lathe

베드의 스윙	1000 mm
양 센터간의 거리	750 mm
스피들 속도 변환	78~2000 rpm (8단)
이송속도 변환	0.1~0.7 mm/rev (18단)

Table 2 Specipation of insert tip

비 중	8~10 [g/cm ³]
경 도	92.0 이상 [HRA]
항 절 력	150 이상 [kg/mm ²]
항 압 력	460 [kg/mm ²]
탄 성 률	53×10^3 [kg/mm ²]
열팽창계수	6.5×10^{-6} [1/°C]
열전도율	0.07 [cal/cm.sec. °C]

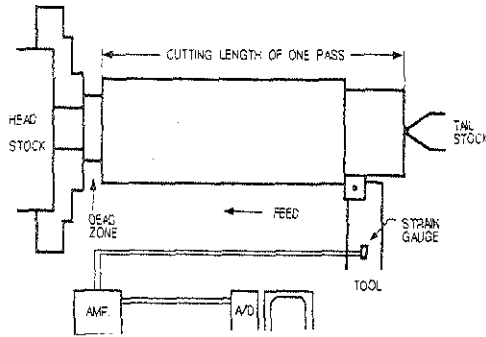


Fig. 1 The schematic diagram of cutting experimental

일반적으로 구조용 강으로 많이 사용되고 있는 지름 60mm의 환봉, SM45C를 선택하여 원통형상으로 가공하여 실험하였다.

공구가 마모될 때 절삭저항은 급격히 증가하고 가공물의 표면 조도가 갑자기 나빠진다. 공구가 마모될 때 절삭저항을 구함으로서 공구마모에 대한 역학적 원리를 규명할 수 있다. 본 실험에서는 실제 3차원 절삭이 행해졌으나 strain gauge에 의한 절삭저항 측정의 난점으로 인해 절삭분력과 이송분력이 작용하는 2차원 절삭으로 가정하여 절삭저항에 대한 실험을 행하였다

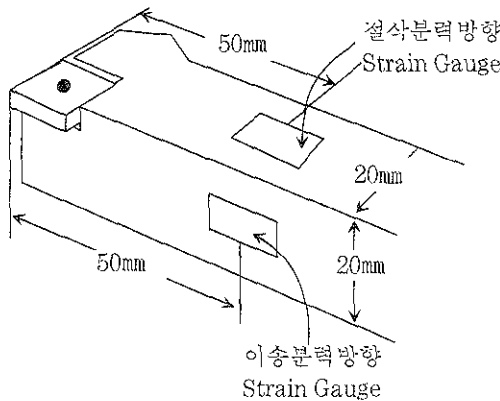


Fig. 2 The schematic diagram of tool holder

chip의 영향을 최대한 줄일 수 있다고 판단되는 인선으로부터 50mm되는 tool holder상의 위치에 절삭분력, 이송분력 방향으로 strain gauge를 부착하여 브리지회로를 구성하여 변형에 따른 전압차를 AMP로 100배 증폭한 후, A/D변환기를 거쳐 신호획득장치 (computer)로 받아들였다. 절삭저항은 바이트가 완전히 파괴되지 않은 경우 12회까지 측정하였다. 이때의 변형률은 다음 식과 같다.

$$\epsilon = \frac{4\Delta V}{VF_0 \times 100} \quad (1)$$

여기서 ΔV : strain gauge로부터 얻은 변형에 따른 전압차

V : 브리지 회로에 인가하는 외 부전압 (5V)

F_0 : strain gauge factor

100 : 증폭배수

(1) 식으로부터 변형률을 구하고,

$$\sigma = \epsilon E \quad (2)$$

$$F = \sigma A \quad (3)$$

여기서 E : tool holder의 탄성계수 (2.1×10^6 kgf/cm²)

A : tool holder의 단면적 (2cm×2cm)

$$P = (\{F^2\}_{\text{절삭분력}} + \{F^2\}_{\text{이송분력}})^{1/2} \quad (4)$$

(2), (3), (4) 식으로부터 각각의 신호에 따라 절삭저항(P)을 구할 수 있다.

F. W. Taylor는 다양한 종류의 강의 절삭에 관한 포괄적인 연구를 통해 다음과 같은 관계식을 설정하였다. (1907년에 발표)

$$VT^n = C \quad (5)$$

여기서 V 은 절삭속도, T 는 프랭크마일폭이 어떤 정해진 값에 도달할 때까지 절린 시간, n 과 C 는 공작물과 공구재료의 조합 및 절삭조건에 따라 결정되는 상수들이다.

식 (5)의 공구수명식으로부터 지수 n은 절삭속도에 대한 공구수명의 민감도를 나타내는 척도임을 알 수 있다.

본 실험에서의 절삭저항은 공구동력계를 쓰지 않고 strain gauge를 사용하였기 때문에 정량적인 결과라기 보다는 정성적인 결과라 할 수 있다. Fig. 1에 선반작업의 개략도와 Fig. 2에 strain gauge를 부착한 tool holder를 나타내었다.

절삭가공 조건으로서는 대한중석의 SM45C에 대한 초경바이트(P20)의 추천절삭조건^{3, 4)} ($f: 0.2 \sim 0.6 \text{ mm/rev}$, $V: 100 \sim 200 \text{ m/min}$)을 택하였으며, Table 3에 나타내었다.

선반실험시 공작물의 센터를 유지하기 위해 작업전 절삭깊이 1mm로 가공후 실험하였고 진동을 방지하기 위해 심압대로 지지하였으며, 매회의 절삭작업중의 spindle speed와 이송시간의 평균을 취하여 절삭조건을 구하였다. 회수는 피삭재의 cutting length를 완전히 가공함을 1회로 정의하였다.

마모의 측정은 공구현미경을 이용하여 flank 마멸대 폭을 5회 측정하여 그 평균값을 취하였고, 입체현미경 (stereoscope)으로 flank 마멸대와 crater 마멸대를 촬영하였다.

Table 3 Cutting condition

bite condition	Not coated bite	(2.32 μm) coated bite	(1.21 μm) coated bite
feed rate [mm/rev]	0.3016	0.3045	0.3065
cutting speed [m/min]	112.24	110.71	112.95
average spindle speed [rpm]	649.6	640.8	653.7
average feed time [sec]	61.25	61.5	59.9
cutting depth [mm]	1.5	1.5	1.5

3. 결과 및 고찰

내마모성 공구의 수명을 향상시키기 위해 사용되는 경질피막의 코팅에서 박막의 미소경도는 매우 중요하다. 증착시 가해지는 바이어스 전압을 달리하였을 경우 미소경도값을 Fig. 3에 나타내었다. 바이어스전압이 증가할수록 경도값이 상승하는 경향을 나타내었다. 바이어스 전압을 인가하였을 경우 모재에 대해 약 Hv 700~1000 kgf/mm² 정도 증가하였으며 바이어스 전압을 인가하지 않았을 경우에 비해서는 약 Hv 250~500 kgf/mm² 정도 증가하였다. 이는 이온증착에 있어서 바이어스 전압을 높임에 따라 이온의 침투효과에 의해 TiN 피막에 존재하는 pores의 생성을 감소시켜 보다 조밀한 피막을 만들었기 때문이라고 생각된다. 또한 모재에 적용되는 하중을 달리하였을 경우 경도값의 변화는 압입하중을 감소시키기에 따라 경도값에 미치는 피막의 영향이 우세해짐을 의미한다.

음극아크 이온플레이팅법으로 증착한 후 pin-on-disk 형태의 마모시험기에 의해 내마모시험을 한 후의 특성을 분석하였다. Fig. 4는 마모시험후 시편의 surface profile을 나타낸 것으로 바이어스 전압의 증가시 경도, 밀착력 표면조도의 상승으로 마모트랙의 폭과 깊이가 줄어들어 마모특성이 우

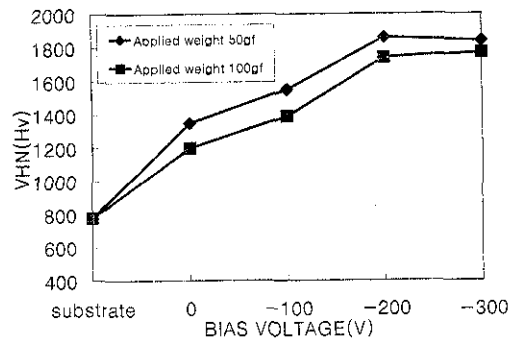


Fig. 3 The microhardness of TiN Films deposited at different bias voltage

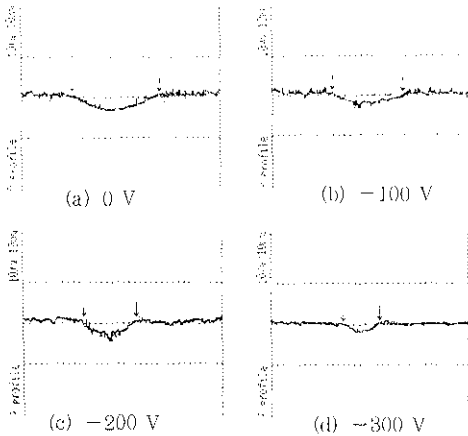


Fig. 4 The comparison roughness profiles after wear test as a function of bias voltage (profile: 10 μ m/10mm)
 (a) 0 V (b) -100V
 (c) -200 V (d) -300 V

수해지는 경향을 나타내었다. Fig. 3 과 Fig. 4의 실험결과를 고려하여 절삭실험에 사용될 TiN 코팅조건으로 하였다

Fig. 5에 비코팅, 1.21 μ m TiN코팅 및 2.32 μ m TiN코팅 바이트로 지름이 55mm인 공작물을 절삭하였을 때 매회 절삭작업중의 절삭저항을 나타내었다. 절삭저항은 비코팅의 경우 코팅바이트 보다 불규칙한 형상으로 높게 나타났는데 이는 마찰계

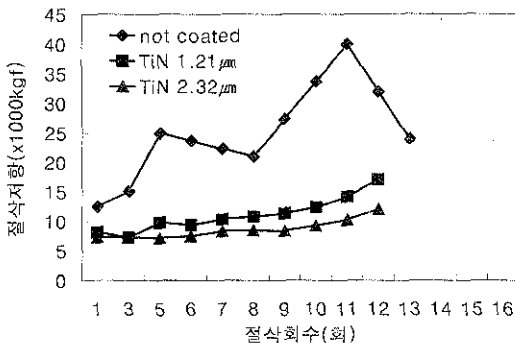


Fig. 5 The cutting resistance of tool

수가 적은 TiN박막의 특성으로 인한 것으로 생각된다.

그리고 초경바이트는 절삭속도가 증가할 따라 절삭저항이 감소하며, 비코팅 바이트는 절삭회수 7에 파괴되었다.

초경합금공구의 공구수명의 판정기준으로서 마멸대폭의 측정을 이용하였으며, ISO에서 정한 flank마멸대 폭 0.3mm를 수명판정기준으로 정하였다. 공구현미경을 이용하여 매 절삭후 flank 마멸대 폭을 측정하였으며 입체현미경 (stereoscope)으로 crater 마멸과 flank 마멸을 촬영하였다.

Fig. 6에 절삭조건에 따른 flank 마멸대 폭의 변화를 나타내었고, Photo. 1, 2에 각 바이트 공작물의 절삭지름에 관한 flank와 crater 마멸과정을 사진으로 나타내었다.

실험결과 flank 마멸이 0.3mm 이상 진행되기 전에 비코팅 바이트는 완전히 파괴되는데 반해 코팅바이트는 0.3mm이상 flank 마모가 진행되어도 완전히 파괴되지 않고 계속 마모가 진행됨을 알 수 있었는데, 이는 높은 바이어스 전압을 인가하여 증착한 내마모성 박막인 TiN 입자가 확산에 의해 바이트 내부에 interlayer를 형성하고 있기 때문으로 생각된다. Photo 1 a)는 비코팅바이트의 flank 마모진행과정을 나타낸다.

Photo 2 a)은 Photo 1 a)와 동일한 바이트로

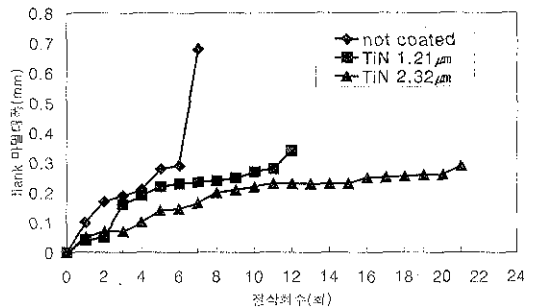


Fig. 6 The width of flank wear as a function of tool condition

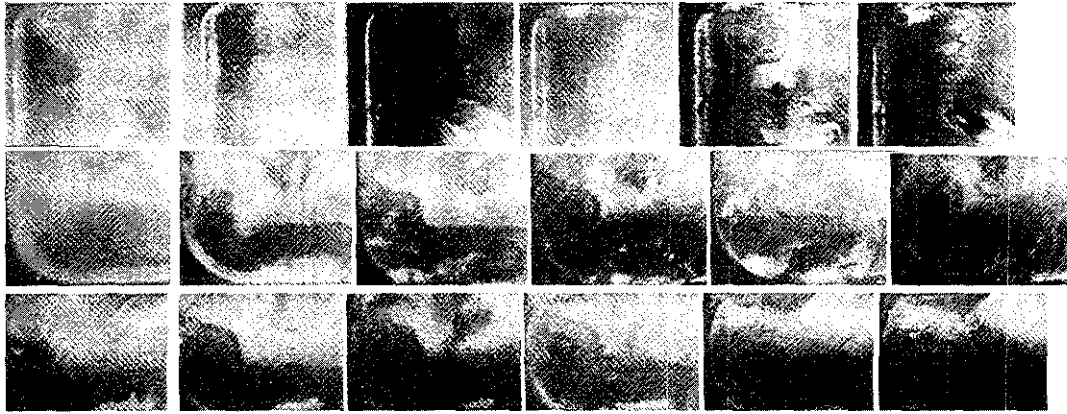


Photo 1 The flank wears of the bites after work process

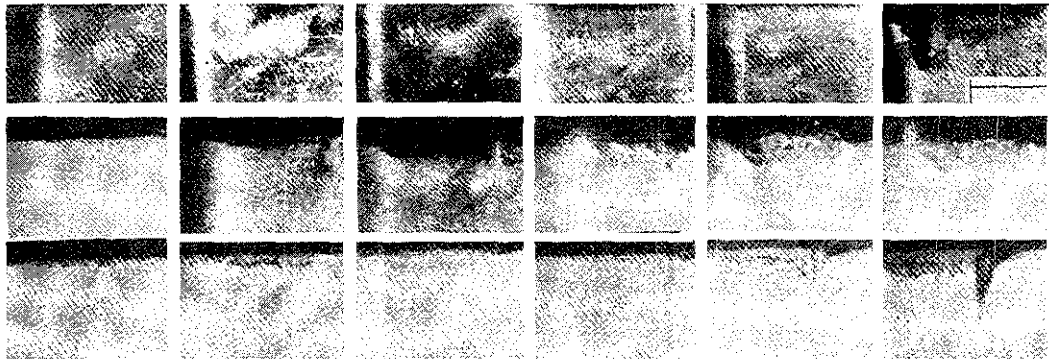


Photo 2 The crater wears of the bites after work process

서 crater 마모를 촬영한 것이다. crater 마멸도 flank 마모와 같이 발전됨을 알 수 있다.

Photo 1 c)는 TiN 2.32 μ m로 코팅한 바이트로 공작물을 절삭하였을 때의 flank 마모의 진행과정을 나타낸 사진이다. 여기서 flank 마모의 성장과 함께 경계마멸의 발전과정도 명확히볼 수 있다.

Photo 1 b)는 TiN 1.21 μ m로 코팅한 바이트로 공작물을 절삭하였을 때의 flank 마모의 진행과정을 나타낸 사진이다 이 사진에서는 구성인선(built up edge)의 발생, 성장, 분열, 탈락의 과정을 볼 수 있으며, 그로 인해 바이트의 chipping 현상이 나타남을 5번째 그림에서 볼 수 있다.

Photo 2 b)는 Photo 1 b)와 동일한 바이트로

서 crater 마멸을 나타낸 것이다. 여기서 구성인선의 발생, 성장, 분열, 탈락의 과정을 볼 수 있으며

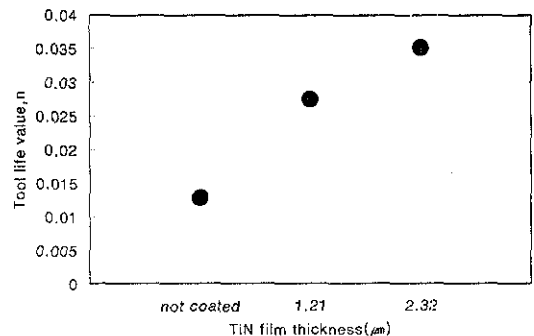


Fig. 7 "n" variation as a function of films thickness

그로 인해 바이트의 chipping을 다른 각도에서 관찰할 수 있다.

공구인선이 완전히 파괴 혹은 flank 마멸대폭이 0.3mm에 도달할 때까지의 절삭속도에 대한 절삭시간을 공구수명 판정기준으로 정하였다.

Fig. 7은 실험으로 얻은 절삭속도와 절삭시간을 Taylor공구수명식에 대입하여 얻은 지수 n 값이다.

Fig. 7로부터 박막의 두께 2.32 μm 로 코팅한 바이트는 비코팅 바이트 보다 약 2.7배, 1.21 μm 로 코팅한 바이트는 비코팅 바이트에 비해 약 2.14배 공구수명이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 거의 2배의 두께로 코팅한 2.32 μm 두께로 코팅한 바이트는 1.21 μm 로 코팅한 바이트 보다 공구수명이 약 1.28배 향상됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

절삭가공용 bite의 수명연장에 미치는 TiN코팅에 관한 연구결과는 다음과 같다.

1) 바이어스 전압이 증가할수록 경도값이 상승하는 경향을 나타내었다.

2) 바이어스 전압의 증가시 경도, 밀착력 표면 조도의 상승으로 마모트랙의 폭과 깊이가 줄어들어 마모특성이 우수해지는 경향을 나타내었다.

3) TiN 박막의 낮은 마찰계수의 영향으로 인하여 비코팅 바이트에 비하여 코팅바이트의 절삭저항이 감소하였다.

4) 음의 상면 경사각을 갖는 초경 바이트의 절삭저항은 절삭속도가 증가함에 따라 감소하였다.

5) 2.32 μm 로 코팅한 바이트의 공구수명은 비코팅 바이트에 비하여 약 2.7배, 1.21 μm 로 코팅한 바이트의 공구수명은 비코팅 바이트에 비하여 약 2.14배 향상되었다.

본 연구는 경희대학교의 연구비 지원으로 수행되었음

5. 참고문헌

1. Kalish H. S. : Status Report Cutting Tool Materials, Metal progress., (1983) 21~25
2. Ion Plating Device : 日本公開 1984-226176 (Sumimoto Elect. ind, KK)
3. 한국야금(주) : KORROY 절삭공구 Catalogue, (1995)
4. 대한중석(주) : 대한중석 절삭공구 Catalogue, (1995)
5. 김동원 : 기계공작법., (1995)