

음극 아크 이온플레이팅법으로 코팅된 TiN 박막의 수명결정요인에 관한 연구

최석우*, 백영남**

* 경희대학교 대학원, ** 경희대학교 기계공학부

A study on life decision factors of TiN films coated by Cathode Arc Ion Plating Method

S. W. Choi*, Y. N. Paik**

Department of Materials Science and Engineering, The University of Seoul
90 Cheonnong-dong, Tongdaemoon, 130-743, Seoul, Korea

Abstract

The life time of cutting tool was studied in the relation with the properties of TiN coating tools. The purpose of this study is to compare the cutting conditions of the TiN coated tools with those of the non-coated tools and to find out the optimal cutting condition of the TiN coated tool.

The coated tools were prepared by the sputtering process at 4×10^{-3} Torr. When the cutting speed is increased 22.2% from 90m/min, the limited life of coating bite was decreased by 60.61%, but non-coating bite was decreased by 64.05%.

In the tool lifetime equation of the coated tools "a" (exponent of feed rate) was not much changed in comparison with that of the non-coated tools but "n" (exponent of tool's life) was increased by 9.3% and "b" (exponent of cutting depth) was increased by 2.4%.

It was thought to be that TiN coated tools was used for higher cutting speed than non-coated tools to improve the lifetime of the coated tools

1. 서 론

최근 공구수명 향상을 위하여 많은 연구개발이 진행되고 있다. 크게 두 가지 연구 방향이 진행되는데, 첫째로는 공구에 코팅을 하여 기계적 성질을 높여 공구수명을 연장하는 방법과 또 하나는

절삭가공시 조건변화에 따라 최적 절삭조건을 찾아 공구수명을 향상시키는 방법이다.

코팅 공구의 개발은 고경도와 우수한 인성을 동시에 갖춘 금속재료를 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행됨에 따라, 이에 인성을 먼저 부여한 후, 재료표면을 코팅하여 사용목적에 부합시키고 있다.

이들 코팅박막의 재료로는 티타늄질화물, 티타늄탄화물 그리고 세라믹 등이 보편적으로 사용되고 있고, 지르코늄, 하프늄질화물 등이 개발되어 있다.

특히 최근 금속의 절삭이나 소성가공과 관련된 산업에서는 절삭속도, 이송량, 절삭깊이를 증가시키는 이른바 고속절삭 가공 등을 통하여 생산성을 향상시키려는 노력이 활발히 진행되고 있으며 각종 절삭공구들은 우수한 내마모성을 필요로 하게 된다. 이러한 내마모성의 향상을 위해 코팅 공구에 대한 의존도가 상당히 높다. 따라서 공구수명 또한 박막의 특성에 따라 많이 좌우된다.

또한, 공구의 내구수명에 관한 연구와 실험은 오래전부터 여러학자들에 의해 연구되어 왔다. 어떤 조건에서 절삭할 때 공구수명이 얼마인가를 알고, 가장 경제적인 공구수명을 찾을 수 있다는 것은 대단히 중요하다. 그러므로 각각의 조건에서 비용을 적게 들이고, 또 짧은시간을 투자하여 공구수명을 구할 수 있는 신속시험법을 J.G. Wager, M.M Barash 등이 규명하였다¹⁾. 이러한 결과들은 대부분이 아직까지는 공구의 코팅으로 공구의 수명을 향상시켰다는 결과들이며 코팅된 공구로 절삭가공을 행함에 있어 비코팅 공구와 동일한 조건 경향으로 사용하고 있는데 이는 비코팅 공구의 경우이고 공구의 수명식이 코팅 공구에 적용되어지는 데는 차이가 있어 코팅 공구의 특성을 100%활용하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 박막의 마모특성을 실질적인 절삭조건에서 실험하여 코팅 공구의 수명에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 찾고 코팅된 공구의 특성을 최대한 이용할 수 있는 절삭조건을 찾고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험의 흐름도

본 실험은 Fig. 1의 흐름도로 행하여 졌으며 절삭가공전 코팅층 분석을 통하여 절삭가공과 공구수명의 타당성을 보증하였다.

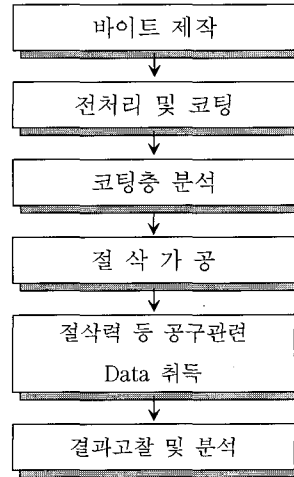


Fig. 1. Flow chart of experiment

2.2. 바이트의 형상

실험에 사용된 공구는 Fig. 2와 같다.

2.3. 박막코팅

본 연구에서는 Table 1과 같은 조건으로 고속도강을 코팅하였으며, Table 1의 조건은 선임 연구자들의 연구에 근거하여 최적의 박막을 얻을 수 있는 조건을 적용시킨 것이다.

또한 본 연구에서는 독일 Leica사의 Scanning electronic microscope (SEM)을 이용하여 박막 두께를 15,000배 확대하여 촬영하였으며, 경도값은

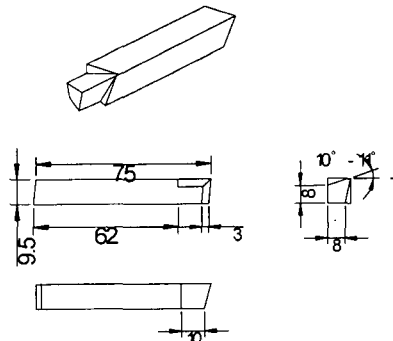


Fig. 2. The Schematic diagram of high speed steel bite

Table 1. TiN deposition conditions by CAIP

Base pressure	5×10^{-6} Torr
Deposition Pressure	4×10^{-3} Torr
Arc Current	120 A
Bias Voltage	-100 V
Substrate Temperature	400°C
Deposition Time	50 min

마이크로 비커스 경도계를 이용하여 임의의 6점을 측정하여 평균값으로 측정하였다.

2. 4. 절삭실험

2. 4. 1 실험장치

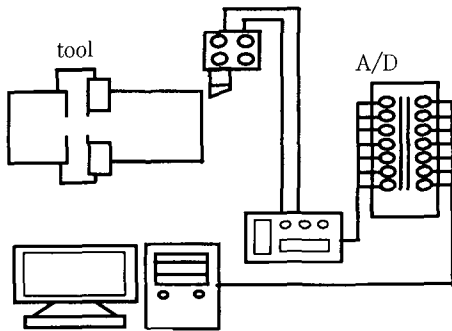


Fig. 3. The schematic diagram of cutting experiment

2. 4. 2 절삭시험방법

제작된 피삭재를 선반의 chuck에 고정할 때 센터를 맞추기 위하여 피삭재의 단면을 수차례 절삭하여 직각도를 맞추고 절삭시험에 들어갔다.

본 실험에서 피삭재는 SM45C를 사용하였다.

절삭시험은 Table 2에 나타낸 것과 같은 조건으로 coating bite와 non-coating bite 두가지 bite로 표면 절삭시험을 행하였다.

2. 4. 3 공구수명 Data 측정

절삭조건의 변화에 따른 공구의 파단을 고려하여 Table 2과 같은 조건으로 절삭작업을 행하였으며, 각 공정단계마다 4~5회씩 작업하여 공구동력

Table 2. Cutting conditions of CNC lathe

절삭속도 (m/min)	이송속도 (mm/rev)	절삭깊이 (mm)	절삭속도 (m/min)	이송속도 (mm/rev)	절삭깊이 (mm)
90	0.02	0.3	130	0.02	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9
	0.04	0.3		0.04	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9
	0.06	0.3		0.06	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9
	0.08	0.3		0.08	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9
110	0.02	0.3	170	0.02	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9
	0.04	0.3		0.04	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9
	0.06	0.3		0.06	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9
	0.08	0.3		0.08	0.3
		0.6			0.6
		0.9			0.9

계를 통해 주절삭력을 받아들여 A/D변환기를 거쳐 전압차를 필요한 만큼 증폭하여 신호처리장치로 받아들였다. 절삭시 공구동력계를 통해 0.1초간격으로 절삭저항을 취하였으며, 절삭시험은 코팅 공구의 경우 주분력이 초기 측정치에서 급격한 변화를 보일 때를 수명의 한계로 정하여 행하였다.

코팅 공구가 가공한 피삭재는 공구의 한계수명(급격한 마모로 인한 반지름의 변화 및 절삭저항의 변화)까지 조도와 광택에서 비코팅 공구에 비해 상태가 일정하였다.

비코팅 공구의 경우는 마모량이 코팅공구처럼 급격한 변화를 보이는 때가 없으므로 절삭력으로는 구분이 어려워 광택에 의한 판정을 첨가하였다.

비코팅 공구가 가공한 피삭재에서는 절삭저항에서나 피삭재의 반지름에서 변화가 거의 없었으나 표면에서 어느 순간부터 광택의 띠가 불규칙적으로

로 나타났다. 이는 공구가 마모되어 인선이 둔화되거나 손상되면 나타나는 현상이다.

4. 결과 및 고찰

4. 1. 코팅 바이트 분석

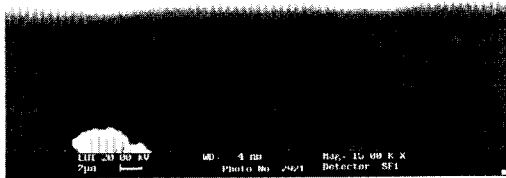


Photo 1. The deposition thickness of TiN film.

본 연구에서는 독일 Leica사의 Scanning electronic microscope (SEM) 을 이용하여 박막 두께를 15,000배 확대하여 촬영하였으며, Table 2의 조건에 의해 약 3 μ m의 높이의 주상조직을 나타내는 박막을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 경도값은 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 임의의 6점을 측정하여 평균값으로 측정하였다 Fig. 4에서 보는 바와같이 고속도강의 경도는 비커스 경도계값으로 약 800Hv의 값을 나타내었고, TiN 박막은 약 2300Hv의 값을 나타내었다. 이는 고속도강의 표면에서의 코팅된 바이트

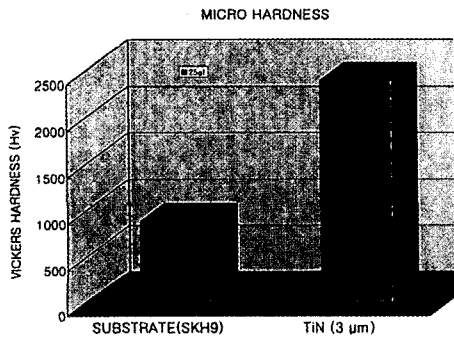


Fig. 4. Hardness of byte tips.

팁의 경도는 약 3배 향상됨을 알 수 있다.

4. 2. 절삭조건에 따른 절삭시간 변화

본 연구에서는 고속도강상에 TiN 코팅을 입힌 코팅 공구와 입히지 않은 비코팅공구의 한계수명을 Fig. 5, 6, 7에 나타내었다. 그래프에 나타난 것과같이 이는 log 함수의 형태를 띠며, 공구의 수명과 절삭속도와의 관계를 표현한 Taylor 공구 수명식에 근접함을 알 수 있다.

코팅 공구의 한계수명은 평균적으로 약 1.6배 정도 높은 것으로 나타났으며, 코팅공구의 수명은 평균적으로 이송속도가 약 70%, 절삭깊이가 약

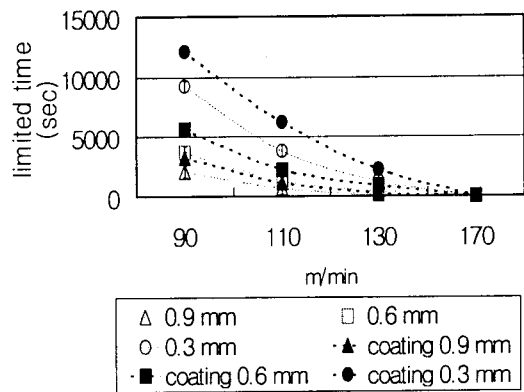


Fig. 5. The limitation of tool life varying with cutting speed (feed rate=0.04mm/rev)

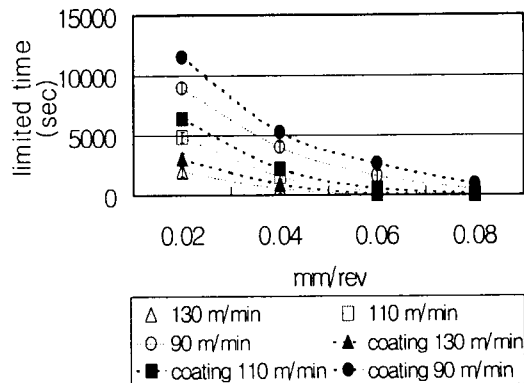


Fig. 6. The limitation of tool life varying with feed rate (cutting depth=0.6mm)

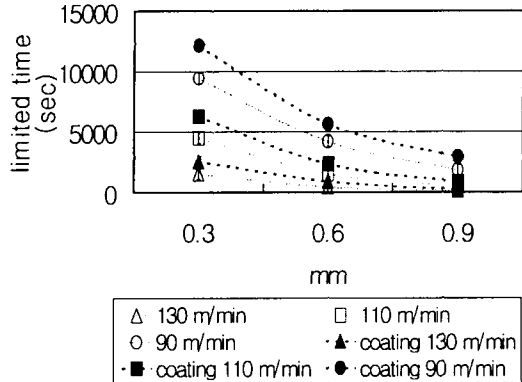


Fig. 7. The limitation of tool life varying with cutting depth (feed rate=0.04mm/rev)

83%, 비코팅 공구의 수명은 이송속도가 약 70%, 절삭깊이가 약 79% 증가함에 따라 한계수명의 감소율은 50% 감소하였다. 절삭속도는 코팅 공구가 약 10.4%, 비코팅 공구가 약 9.4% 증가할 때 수명이 50% 감소하였고, 코팅 공구가 약 21.9%, 비코팅 공구가 약 19.8% 증가할 때 수명이 75% 까지 감소하였다. 따라서 한계수명에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 절삭속도임을 확인할 수 있었다.

4. 3. 코팅 공구와 비코팅 공구의 상대적 비교

본 연구에서 coating/non-coating 값, 즉 TiN 박막의 상대적인 효율은 절삭조건이 커짐에 따라 좋아짐을 나타낸다. 물론 어느 시점부터는 다시 감소하여 coating/non-coating 값이 1의 값으로

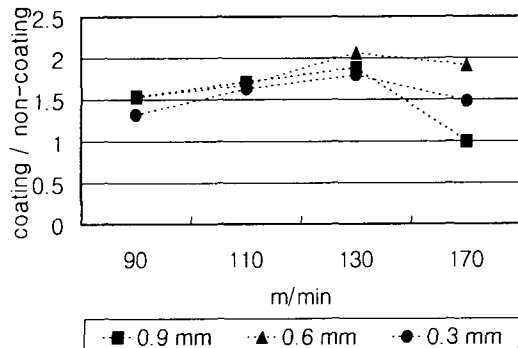


Fig. 8. coating/non-coating value varying with cutting speed (feed rate=0.04mm/rev)

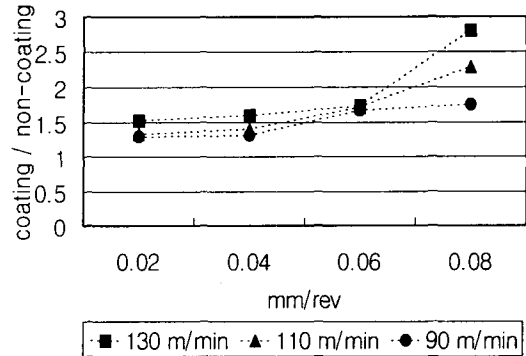


Fig. 9. coating/non-coating value varying with feed rate (cutting depth=0.6mm)

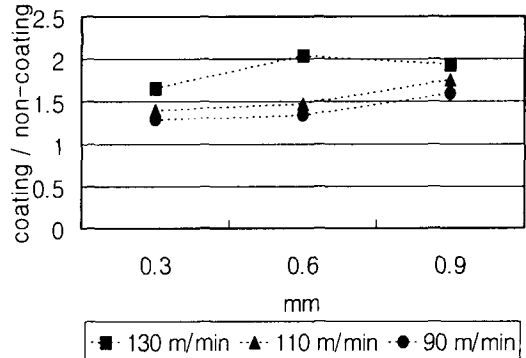


Fig. 10. coating/non-coating value varying with cutting depth (feed rate=0.04mm/rev)

수렴함을 예상 할 수 있었다.

이 coating/non-coating 값이 증가하다가 일정 시점에서 감소함을 보이는 이유는 절삭조건이 급격히 심해짐에 따라 TiN 박막이 박막의 특성을 발휘하지 못하기 때문이라고 생각된다.

4. 4. 절삭조건에서의 TiN 박막 수명 결정

본 연구에서는 TiN 박막의 마모율을 실제 절삭 조건에 적용시켜 Fig. 11, 12, 13의 TiN 박막의 수명 그래프를 얻었다. 이 그래프는 코팅 공구의 한계수명값에서 비코팅 공구의 한계수명값의 차를 TiN 박막의 한계수명으로 정의하여 나타내었다.

본 연구에서 TiN 박막의 수명은 절대수명의 변화가 급격하여 수명 결정에 주로 사용되지만

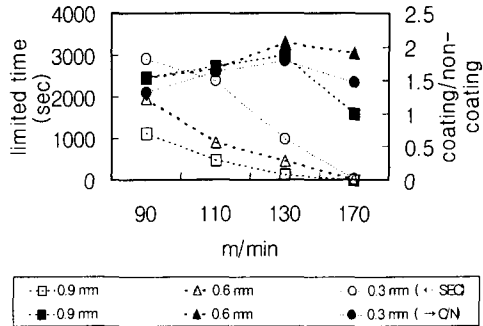


Fig. 11. The life of TiN films & coating/non-coating value varying with cutting speed

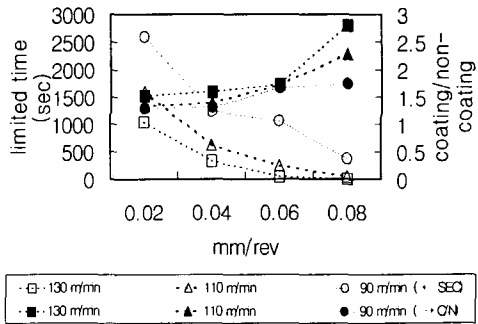


Fig. 12. The life of TiN films & coating/non-coating value varying with feed rate

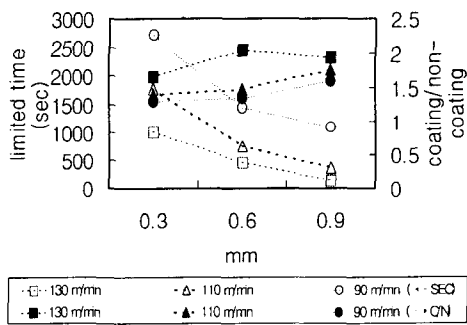


Fig. 13. The life of TiN films & coating/non-coating value varying with cutting depth

coating/non-coating 값, 즉 상대적인 효율은 Fig. 8, 9, 10에서처럼 절대수명이 감소 할 때 증가함을 나타낸다. 물론 일정시점부터는 다시 감소하는 현상을 나타낸다.

따라서 박막의 종류나 피삭재의 강도 등에 따라

절대수명에 비해 상대수명의 그래프가 급격한 변화를 보이면 이를 더욱 고려하여 경제적 절삭을 위해 절삭조건 변화에 따라 절삭률을 계산하여 정하여야 할 것이다.

4. 5. 코팅 바이트의 공구수명식 고찰

공구수명지수 n 의 값은 코팅의 경우 0.1057 ~ 0.2304, 비코팅의 경우 0.0999 ~ 0.1849의 범위에 있었고, 절입량지수 a 의 값은 코팅의 경우 0.3357 ~ 1.0012, 비코팅의 경우 0.3378 ~ 1.0220의 범위에 있었으며, 절삭깊이지수인 b 의 값은 코팅의 경우 0.3009 ~ 0.5528, 비코팅의 경우 0.2831 ~ 0.5087의 범위에 있었다.

절삭실험에서 얻어진 데이터를 이용하여 이송속도의 향과 절삭깊이의 향이 추가되었을 때의 공구수명 상수 C 를 구하였다.

또한 본 연구에서는 C 의 값을 절삭속도는 rpm으로 환산하여 275 rpm으로, 절삭깊이는 0.6 mm, 이송속도는 0.04 mm/rev, 피삭재의 최대반경인 RL은 120 mm로 하여 계산하였다.

절삭깊이를 두배 늘리면 새 절삭속도 V_2 는

$$V_2 = V_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^b = V_1 \left(\frac{d_1}{2d_1} \right)^{0.3965} = 0.7586 V_1$$

$$Q_3 = 16387 V_3 \cdot f_1 \cdot d_2 \\ = 24863.9 V_1 \cdot f_1 \cdot d_1 (\text{mm}^3/\text{min})$$

여기서

Q : 절삭량

V_1, V_2, V_3 : 절삭속도

f_1 : 절입량

d_1, d_2 : 피삭재 지름

즉 절삭속도는 공구수명을 일정하게 유지하기 위하여 감소했으나 이송속도를 두배 늘림으로써 절삭량은 29.2% 증가되며, 절삭깊이를 두배 늘림으로써 절삭량은 51.7% 증가한다.

비코팅 공구도 마찬가지로 절삭량 Q 를 구할 수 있다.

$$Q_2 = 16387 V_2 \cdot f_2 \cdot d_1 \\ = 21161.6 V_1 \cdot f_1 \cdot d_1 (\text{mm}^3/\text{min})$$

$$Q_3 = 16387 V_3 \cdot f_1 \cdot d_2 \\ = 25026.4 V_1 \cdot f_1 \cdot d_1 (\text{mm}^3/\text{min})$$

이송속도를 두배 늘림으로써 절삭량은 29.1% 증가되며, 절삭깊이를 두배 늘림으로써 절삭량은 52.7% 증가한다.

본 연구에서 절삭속도는 코팅 공구가 약 10.4%, 비코팅 공구가 약 9.4% 증가할 때 수명이 50%, 코팅 공구가 약 21.9%, 비코팅 공구가 약 19.8% 증가할 때 수명이 75% 감소하였다. 따라서 이송속도와 절삭깊이의 변화는 절삭속도 변화를 고려하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 음극아크 이온 플레이팅법으로 TiN 최적도금 조건에 관한 연구결과를 토대로 하여 TiN 박막의 절삭조건변화에 대한 특성변화를 다음과 같이 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서 TiN 박막을 $3\mu\text{m}$ 입힌 고속도공구강은 박막을 입히지 않은 고속도공구강 보다 수명이 약 1.6배 연장되었다.

2) 90m/min을 기준으로 절삭속도를 22.2% 증가 할 경우 코팅공구는 평균적으로 60%의 수명 감소가 있는 반면, 비코팅공구는 65%의 수명 감소를 나타내었다.

3) TiN 박막은 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이가 각각 감소함에 따라 절대 수명은 증가하였으나, coating/non-coating의 값은 각각의 절삭조건이 증가함에 따라 점점 증가하였다.

4) 공구 수명식에서 코팅 공구의 지수 a 값은 거의 변화가 없었고, n 값은 9.3%, b 값은 2.4% 비코팅 공구보다 증가하였으나, 일반적인 비코팅 공구 수명식에서의 지수값 범위와 차이가 뚜렷하지 않았다.

이상의 결과에서 코팅공구를 효율적으로 사용하기 위하여는 다른 절삭 조건보다 절삭속도를 변화시키는 것이 유리함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J.G. Wager, M. M Barash : Study of the Distribution of the life of HSS Tools
2. N. A. G. Ahmed Ion Plating Technology Developments and Application, (1987) 103
3. R. Buhl, H. K. Pullker and E. Moll : Thin Solid Films, 30 (1981) 265
4. K. H. Kools, E. Brosezeit, H. M. Gabriel & H. J. Schroder : Thin Solid Films, 96 (1982) 67
5. W. D. Munz, D. Hofmann & K. Hartig : Thin Solid Films, 96 (1982) 79
6. J. A. Sue & H. H. Troue : Surface and Coatings Technology, 33 (1987) 169
7. R. F Bunshah & C. V. Deshpandey : Surface and Coatings Technology, 27 (1986) 1
8. A. K. Suri, R. Nimmagadda, & R. F Bunshah : Thin Solid Films 72 (1980) 529
9. G. Lemperiere & J. M. Potevin : Thin solid Films, 111 (1984) 339
10. Y Tanaka, M. G r, M. Kelly, S. B. Hagstrom, T. Ikeda, K. Wakihira & H. Satoh : Journal Vacuum Science Technology, A10 (4) (1992) pp. 1749
11. Serope Kalpakjian : Manufacturing Processes for Engineering Materials, 45 (1994) 64
12. 김동원 : 기계공학법, (1995) 378
13. 김종석 : 단면절삭시 가속성 응용에 대한 연구, (1980)
14. 서남섭 : 금속절삭이론, (1990) 139