論文 한국공작기계학회지 제9권 제1호 2000. 2.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

코팅공구의 절삭성능에 관한 연구

유 봉 환*

A Study on the Coated Characteristics of Ceramic Tools

Bong Hwan Ryu*

Abstract

Ceramic, PCD and CBN tools are available for the difficult-to-cut-materials such as hardened carbon tool steel, stainless steel, Inconel 718 and etc.. Ceramic tools are likely to be chipped and abruptly broken before the appearance of normal wear in turning. Therefore ceramic tools are suitable for continuous cut in turning, not for intermittent in milling.

In this study, TiN/TiCN multi-layer coated ceramic tools were found to restrain the chipping, breaking and early fracture and to increase the critical cutting speed owing to TiN/TiCN multi-layer coating in Arc Ion Plating of PVD method.

Key Words : Ceramic Tool(세라믹공구), PVD(물리증착법), CVD(화학증착법), Critical Cutting Speed(임계절삭속도), Breaking(절삭날 결손), Catastrophic Fracture(돌발적인 파손), Early Fracture(초기파손)

1. 서 론

산업기술의 진보에 따른 절삭공구의 발전은 소재 분야에서 탄소공구강을 시작으로 고속도강, 초경합금의 개발로 전성시대를 거쳐, 세라믹과 서멧 등의 공구소재가 개발되었다.

한편, 금속산업의 발달로 난삭재가 출현함에 따라 기계가공업체 또는 금형가공업체에서는 가공시간의 단축, 가공 정밀도의 향상, 제조원가의 절감 등을 위한 난삭재 가공기술에 어려움을 갖고 있는 실정이다.

또한 금속가공의 효율성을 결정짓는 주요한 인자들로는 공작물의 재질, 절삭조건, 공구의 재질, 공작기계의 강성, 작업자의 기능 숙련도 등을 들 수 있다.

신소재 절삭공구 개발은 일반 절삭가공의 효율성과 난삭재 가공의 효율성을 높이기 위한 필수 과제이다.

각종 첨단산업과 함께 응력을 많이 받는 기계부품은 강성과 마멸저항을 증가시키기 위하여 재료를 경화처리하여 사용하는 경우가 증가하는 추세이다. 이러한 경화강은 물리적, 기계적 특성이 우수한 반면에 일반적인 절삭공구로 능률적인 가공을 하기에 매우 어려운 난삭재이지만, 세

* 숭실대학교 기계공학과

라믹공구, CBN공구, PCD공구, 다이아몬드공구 등이 양호한 절삭 성능을 발휘한다.

경화된 탄소공구강(STC3)을 절삭할 때 세라믹공구는 돌발적인 파손(catastrophic fracture), 치핑(chipping), 절삭날의 결손등이 생기기 쉽다.[1]

따라서 재료의 표면에 각종 신기술을 이용하여 피복을 형성시켜 기존의 재료보다 성능이 우수한 표면기능을 갖도록 재료 표면을 개선할 필요가 있다.

근래에 들어서 초경합금, 고속도강 등의 절삭공구에 고경도 화합물을 피복한 공구의 사용이 확대되고 있으며[2], 공작물과 공구와의 마찰감소, 절삭시 온도상승의 억제, 긁힘마모저항 등의 장점이 우수한 코팅공구의 절삭특성을 파악하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 기존의 세라믹공구에 초기파손과 절삭날의 결손, 치핑을 억제시키기 위한 목적으로 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구를 제작 개발하였다. 그러므로 세라믹공구에 물리적 증착방법의 아크 이온 플레이팅(arc ion plating)을 사용하여 피복 함으로써 공구파손을 기준으로 설정되는 임계절삭속도(critical cutting speed)를 증가시키고 초기파손을 억제할 수 있다는 것을 제안한다.

2. TiN/TiCN 다층피복세라믹공구의 공정

TiN/TiCN 다층 피복을 하기 위해 아크이온플레이팅 장비를 사용하였으며, Fig. 1은 증착로의 개략도이다. 피복작업은 노내에 세척된 공구를 장입한 후, 주어진 온도와 진공도까지 예비 가열원을 이용하여 가열함과 동시에 분자펌프를 사용하여 배기한 다음 Ti이온세척 및 본 피복의 순으로 실시하였다.

이온세척 공정에서는 Ti 타깃을 점화하여 Ti이온을 발생시킨다. 그리고 약 5×10^{-5}Torr의 고진공하에서 공구에 약 500V이상의 음전압을 가한다. 그러면 Ti이온들이 가속되어, 공구표면에 충돌하게 되면서 공구에 존재할 수 있는 불순물인 이물질과 산화층이 제거된다.

그 다음으로 TiN/TiCN의 다층 피복에서는 전압을 -200V의 음전압을 걸어주고 Ti타깃을 점화 시키면 아크방전을 일으켜 증발원 표면상에 아크스폿을 형성하여 증발원 표면을 랜덤하게 이동하게 된다. 아크스폿에 집중되는 아크전류(70A~200A)의 에너지 증발원 재료인 Ti타깃에서 순간적으로 증발함과 동시에 금속이온이 되어 진공 중에 비산하게 된다. 그러므로 바이어스(bias) 전압을 모재에 인가하면, 증착로에 투입되어 가속할 수 있는 반응

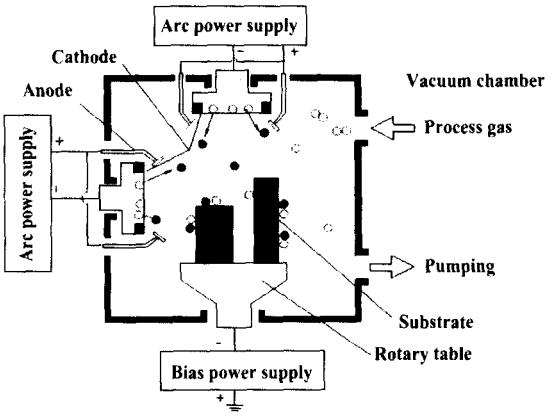

Fig. 1 Arc coating in PVD method

가스입자인 N_2와 반응하여 TiN 피복층이 세라믹 표면에 0.5~1.0㎛정도 생성되도록 한후 메탄가스(CH_4)를 투입하여 TiCN 피복막이 1㎛정도 생성되도록 한다.

피복시 작업온도는 모재의 변형 및 연화가 일어나지 않는 한도 내에서 가장 높은 온도로 작업하는 것이 유리하다. 이는 온도가 높을수록 증착시 모재표면에서 반응에 참여하는 화학원소들의 이동이 쉬우며 이에 따라 조직이 보다 치밀해지기 때문이다.[3]

본 연구에서는 고속도강 피복조건으로 노내온도를 450℃로 유지하였다. 그리고 증착로 내에서 공구의 위치에 따라 피복두께의 차이가 생기므로 공전과 자전을 하는 지그를 제작하여 피복의 두께를 일정하게 하였다.

3. 실 험

3.1 실험장치

절삭실험에 사용된 공작기계는 범용선반(NL 400×750)을 사용했으며 압전형 공구동력계(Kistler, 9257B)는 선반의 왕복대에 설치하였고, 압전형 공구동력계에서 얻어지는 절삭저항 신호는 다채널 증폭기(Kistler, 5019A)로 증폭하였고 이 증폭된 신호는 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터로 전송된다. 선삭시 요구되는 정확한 회전수를 조절하기 위하여 인버터(Starvert-Is3, 0~400Hz, 7.5HP)를 사용하였다. 공작물은 매회 절삭공정마다 경도를 확인하기 위하여 휴대용경도기(TIME HLN-11 A LEE'S hardness tester)를 사용하였다. 그리고 초기파손을 조사하기 위하여 공구현미경 및 금속현미경을 사용하여 측정하였다.

3.2 공구 및 공작물

본 실험에서 사용한 절삭공구의 재료는 기계적 충격과 열 충격에 강하여 고경도 강재의 절삭에 적합한 Al_2O_3/TiC인 세라믹공구를 선정하였다. 또한 초기파손의 억제를 위하여 개발한 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구를 사용했였다. 세라믹공구의 물리적 성질인 항절력(modulus rupture)은 80kgf/ mm^2, 경도(hardness)는 94.5HRA, 밀도(density)는 4.4g/cm^3, 파괴인성(fracture toughness)은 4.9MN /$m^{0.5}$, 온도팽창계수(thermal expansion efficiency)는 7.8×10^{-6}℃이다.

인성에 약한 세라믹공구와 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구의 모서리에 적용된 챔퍼크기의 사양은 -25°×0.2㎜이다. 그리고 인서트형인 SNGN1207의 사양을 사용하였고 공구홀더의 사양은 클램프 체결용으로서 어프로치각이 15°인 CSHNR2520 홀더를 사용하였다.

본 실험에 사용한 공작물의 재료는 탄소공구강으로서 열처리하여 담금질된 탄소공구강의 경도는 HRC60±2이고 절삭실험시 편심을 없애기 위하여 축방향으로 전 길이에 대하여 가공을 먼저 실시하였다. 공작물의 크기는 직경 68mm, 길이 200mm로 제작하여 실험하였다.

3.3 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구의 물성

피복공구의 내마모성을 결정하는 요인으로는 피복층의 두께, 피복층과 모재상의 밀착력, 피복층의 조직이 중요하다고 알려져 있고 모재의 연화를 일으키지 않으면서 최대의 온도를 상승시켜야 하는 피복온도, 공구의 모재에 피복을 형성하는 밀착력과 관계되는 바이어스 전압, 피복의 두께를 결정짓는 타깃전류, 반응가스의 압력 등은 피복공정의 변수에 영향을 받는 것으로 되어 있다. 피복층의 두께는 TiN 0.5㎛, TiCN는 1.0㎛이다. 따라서 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구의 피복두께는 1.5㎛이고, 밀착력은 40N, 경도(Hv)는 2800, 피복시간은 70분이다.

3.4 절삭조건

절삭시험에 사용된 절삭조건은 세라믹공구 추천치[5]를 사용하여 시험하였고 본 논문에서는 세라믹공구와 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구를 사용하여 경화된 탄소공구강의 절삭초기에 발생하는 공구손상의 억제를 비교하기 위하여 절삭속도는 10m/min~200m/min, 이송은 0.10mm/rev~0.20mm/ rev, 절삭깊이는 0.23mm~0.579mm, 최대절삭두께는 0.079mm~0.142mm, 절삭폭(b)은 0.717mm~0.800mm, 노즈반지름은 0.8mm를 사용하여 시험하였고 데이터는 같은 조건을 4회 실시하여 평균값을 취하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 절삭속도의 영향

Fig. 2는 0.8mm의 노즈반지름을 갖는 세라믹 공구의 초기파손에 대한 절삭속도의 영향을 알아본 것이다. Fig. 3는 0.8mm의 노즈반지름을 갖는 TiN/ TiCN 다층 피복 세라믹공구의 초기파손에 대한 절삭속도의 영향을 관찰한 것이다.

Fig. 2의 절삭조건은 이송 0.17mm/rev, 절삭깊이를 0.3mm로 일정하게 하였을 때 정상마멸과 파손이 발생하는 절삭속도의 경계를 임계절삭속도(critical cutting speed)라 한다. 세라믹공구의 임계절삭속도는 70m/min이며 Fig. 3는 같은 절삭조건으로 하였을 때 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구의 임계절삭속도는 100m/min이다. 각기 70m/min, 100m/ min의 이하에서는 정상적인 마모가 진행되는 영역이며 70m/min, 100 m/min이상의 영역에서는 대부분 절삭시간 2분 이내에 돌발적인 파손이 발생되는 영역이다. 이와 같이 세라믹공구에 TiN/TiCN 다층 피복을 함으로써 세라믹공구를 기준으로 볼 때 임계절삭속도가 30m/min 증가한 것을 알 수 있다.

여기서 피복효과로 인하여 절삭속도 변화에 따른 임계절삭속도가 42.9% 증가되어 초기파손이 억제되었음을 알 수 있다.

4.2 이송의 영향

Fig. 4는 절삭깊이 0.4mm로 일정하게 한 다음, 이송을 0.10mm/rev, 0.13mm/rev, 0.17 mm/rev, 0.20 mm/rev로 변화시킨 후 노즈 반지름이 0.8mm인 세라믹공구와 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구를 사용하여 초기파손에 따른 임계절삭속도 변화의 관계를 실험한 것이다.

고속영역에서는 초기에 치핑이 생긴 후 순간적으로 돌발적인 파손이 나타나는 영역이고, 또한 세라믹공구와 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구의 초기파손이 생기는 영역이다.

아래에서는 정상적인 가공이 가능하며 초기파손이 생기지 않은 영역으로서 정상적인 마모가 진행되는 곳이다.

이송의 모든 영역에서 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구가 세라믹공구보다 전반적으로 10m/min~30m/min 이상의 증가를 가져왔다. 특히 이송이 큰 영역에서 TiN/TiCN

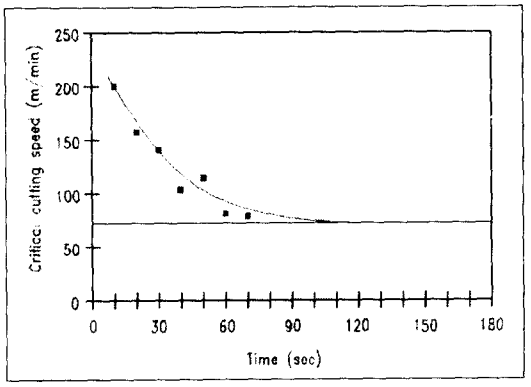

Fig. 2 Relation of cutting time and critical cutting speed for catastrophic fracture in ceramic tools

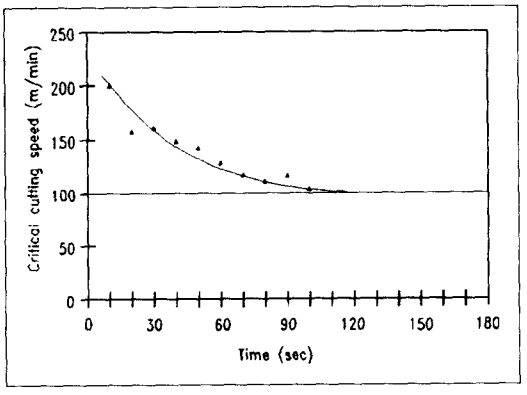

Fig. 3 Relation of cutting time and critical cutting speed for catastrophic fracture in TiN/TiCN multi-coated ceramic tools

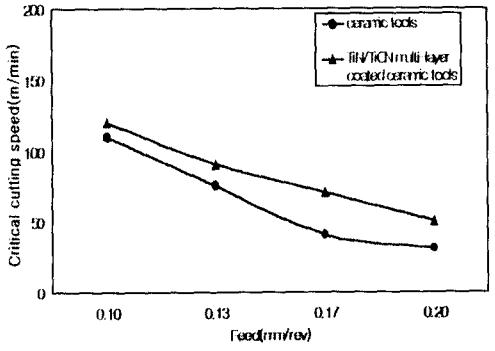

Fig. 4 Relation of feed and critical cutting speed

다층 피복 세라믹공구가 우수하다는 것을 알 수 있는데, 이는 피복의 효과에 의해서 임계절삭속도가 올라갔음을 실험적으로 알 수 있다. 이송이 적은 영역에서는 세라믹공구와 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구의 임계절삭속도 차가 작은 것은 속도가 높아지면 절삭온도의 상승으로 인하여 피복의 효과가 감소한다는 것을 알 수 있으며, 이는 모재의 피복이 높은 가공온도로 인하여 산화되기 때문이라고 판단된다.

4.3 절삭깊이의 영향

Fig. 5은 노즈 반지름이 0.8mm인 세라믹공구와 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구를 사용하여 이송을 0.2mm로 일정하게 한 다음, 절삭깊이를 0.23mm, 0.25mm, 0.29mm, 0.40mm로 변화시킨 후 초기파손에 따른 임계절삭속도 변화의 관계를 실험한 것이다.

각 절삭조건의 임계절삭속도를 나타낸 그래프의 아래에서는 정상적인 가공이 가능하며, 그래프의 위쪽부분의 고속영역에서는 대부분 순간적으로 초기파손이 생기는 영역이다.

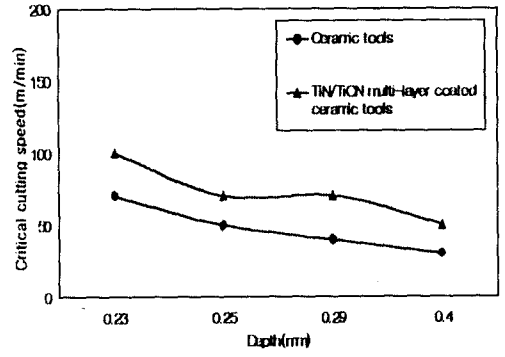

Fig. 5 Relation of depth and critical cutting speed

4.4 노즈반지름의 영향

Fig. 6과 같이 노즈반지름을 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm, 2.0mm로 구분하여 0.17mm/rev의 이송과 0.4mm의 절삭깊이를 일정하게 하고 임계절삭속도의 관계를 시험한 것이다.

노즈반지름의 변화에 따른 세라믹공구와 TiN/ TiCN 다층 피복 세라믹공구의 임계절삭속도의 변화는 노즈반지름 0.8mm인 경우에는 30m/min, 노즈반지름 1.2mm인

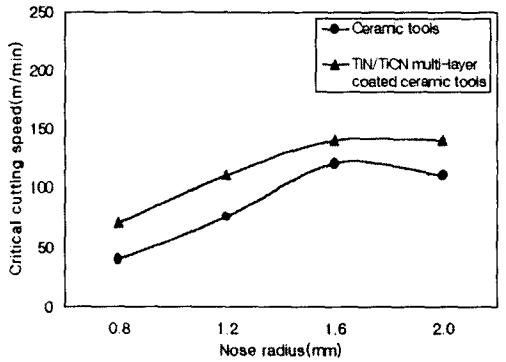

Fig. 6 Relation of nose radius and critical cutting speed

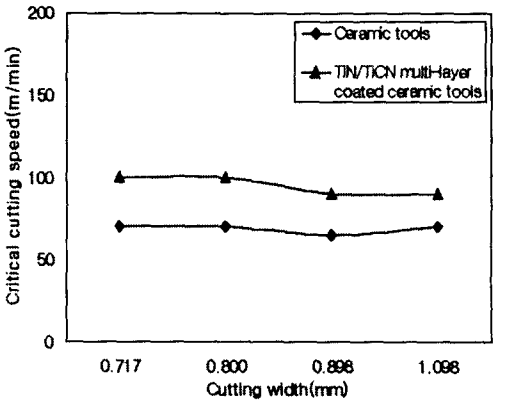

Fig. 7 Relation of cutting width and critical cutting speed

경우에는 35m/min, 1.6mm인 경우에는 20m/min, 2.0mm인 경우에는 30m/min의 임계절삭속도 증가를 가져왔다. 노즈 반지름의 변화에서도 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구가 모든 노즈 반지름에서 우수하다는 것을 알 수 있다. 그리고 0.8mm의 노즈 반지름을 갖는 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구가 1.2mm의 세라믹공구와 비슷한 성능을 내고 있다. 이는 TiN/TiCN 다층 피복 효과가 기하학적 모양을 대치시켜 사용할 수 있다고 판단된다. 절삭단면의 형상에서 노즈 반지름이 증가하게 되면 일정한 절삭조건에서 절삭면적은 같으나 유효 어프로치각은 증가하고 최대절삭 두께가 감소하게 되어 절삭날 부위가 상대적으로 증대되어 공작물과 점진적으로 접촉하여 충격하중이 감소하는데, 이는 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구에서도 거의 같은 경향을 나타내고 있다. TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구에서 전반적으로 20m/min~35m/min의 임계절삭속도가 상승하였으며 세라믹공구를 기준으로 임계절삭속도가 높은 영역에서는 16.5%의 증가를 가져왔고 임계절삭속도가 낮은 영역에서는 75%의 증가를 가져왔다. 그러므로 피복으로 인하여 초기파손을 억제시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

4.5 절삭폭의 영향

Fig. 7은 이송을 0.13mm/rev, 0.15mm/rev, 0.17mm /rev, 0.2mm/rev과 절삭깊이 0.579 mm, 0.387mm, 0.299mm, 0.226mm를 조합하여 최대절삭두께를 0.124mm로 일정하게 하고, 0.717mm, 0.800mm, 0.898mm, 1.098mm로 절삭폭을 증가시켜 임계절삭속도를 조사한 결과 절삭면적이 0.045mm^2, 0.0508mm^2, 0.0581mm^2, 0.075mm^2 증가에도 불구하고 거의 일정한 임계절삭속도의 값을 가지면서 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구의 임계절삭속도가 20m/min~30m/min 증가하여 초기파손이 억제됨을 알 수 있다. 이와 같이 절삭폭의 변화에도 임계절삭속도가 일정한 것은 최대절삭두께의 영향을 받는다고 판단된다. 피복으로 인하여 세라믹 공구를 기준으로 28.6%~42.9%의 임계절삭속도 증가를 가져왔다.

4.6 최대절삭두께의 영향

Fig. 8는 이송을 0.1mm/rev, 0.13mm/rev, 0.17mm /rev, 0.20mm/rev과 절삭깊이 0.330mm, 0.310 mm, 0.300mm, 0.287mm를 조합하여 절삭폭을 0.800mm로 일정하게 하고, 0.079mm, 0.098mm, 0.124mm, 0.142 mm로 최대절삭두께의 변화에 따른 임계절삭속도의 관계를 실험하였다.

Fig. 10에서 최대절삭두께가 커지면 임계절삭속도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 전반적으로 임계절삭속도의 변화는 최대절삭두께가 0.079mm에서 15m/min, 0.098mm에서 40m/min, 0.124mm에서 30m/min, 0.142mm에서 30m/min으로 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구가 더 증가되었다. 즉 피복으로 인하여 초기파손이 억제되었음을 알 수 있다.

절삭날의 단위길이당 절삭면적이 최대로 되는 영역인 최대절삭두께의 위치에서 최대절삭면적이 나타나므로 이곳에서 절삭날의 부담이 가장 크게 된다. 따라서 최대절삭두께가 증가하면 초기파손을 일으키는 임계절삭속도는 낮아지게 된다.

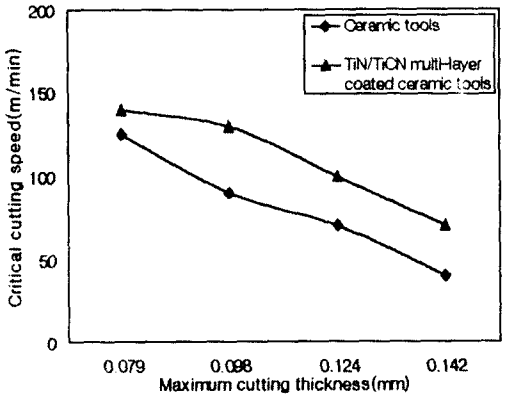

Fig. 8 Relation of maximum cutting thickness and critical cutting speed

Fig. 8에서 보는 바와 같이 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹 공구가 세라믹공구보다 15m/min~40m/min로 임계속도가 상승하여 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구가 초기파손이 억제되었음을 알 수 있다. 세라믹공구를 기준으로 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구는 최대절삭두께가 낮은 영역에서는 약 12%, 최대절삭두께가 큰 영역에서는 약 75%의 증가를 가져왔다.

이와 같이 절삭속도의 변화, 이송의 변화, 절삭깊이의 변화, 노즈반지름의 변화, 절삭폭의 변화, 최대절삭두께의 변화에서 초기파손이 억제되어 임계속도가 증가된 것은 피복의 내마모성과 밀착력의 증대에 의한 것으로 판단된다.[6]

5. 결 론

물리적 증착방법에 의하여 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹 공구를 제작하여 개발하였다. 피복효과로 인하여 절삭속도의 변화, 절삭깊이의 변화, 이송의 변화에 따른 임계절삭속도가 증가되었고, 세라믹공구와 비교할 때 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구는 물림조건에 따른 최대절삭두께, 절삭폭, 노즈반지름 변화에 따른 임계절삭속도가 증가되어 초기파손이 억제되었다. 또한 TiN/TiCN 다층 피복 세라믹공구는 세라믹공구의 노즈반지름보다 작게 하여 사용할 수 있어 기하학적 형상을 대치하여 사용할 수 있다는 결론을 얻었다.

참 고 문 헌

(1) 大谷敏昭, 瀬健領 川 洪, 三井武良男, 1983, "CBN およびセラミックス工具による焼入鋼の旋削," 精密機械, 第49卷, 第6號, pp. 804~808.

(2) Suh, N. P., 1980, "Coated Carbides-Past Present and Future," Proc. 4th. Int. Conf. Prod. Eng., pp.118~143.

(3) Thornton, J. A., 1984, "Influence of Apparatus Geometry and Deposition Condition on Structure and Topography of Thick Sputtered TiN Films," Thin Solid Films, 122, pp. 115~129.

(4) Young, H.Y., Mathew, P. and Oxely, P.L.B., 1987, "Allowing for Nose Radius Effects in Predicting the Chip Flow Direction and Cutting Forces in Bar Turning," Proc. Int. Mech. Eng. Part C., Vol. 201, No. 3, pp. 213~226.

(5) Dow, W. E., 1994, Ceramic Cutting Tool, Noyes Publications, New Jersey.

(6) 이영문외 4인, 1996, "코팅공정 개선에 의한 TiN 코팅 고속도강 공구의 내마모성 특성향상," 한국정밀공학회, 제13권, 제11호, pp. 32~137.