

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(ME95-E-13)에 의하여 연구되었음

에어-오일 냉각방식에 의한 고경도재료의 선삭

정 보 구*, 고 태 조**, 김 희 술**

Turning of Hardened Materials Using the Air-Oil Cooling System

Bo Gu Chung*, Tae Jo Ko**, Hee Sool Kim**

ABSTRACT

The hard turning process defined as a single point turning of materials harder than $H_{RC} 58$ differs from conventional turning because of hardness of the work materials and cutting tools needed in the process. In hard turning, tool life is very short, of the order of a few minutes, during which the cutting tool is subjected to the extremes of stress and temperature. In this regard, it is well known that CBN tool is proper for this process in spite of expensive cost. In this research, we studied the feasibility of the use of the low cost cutting tool such as a TiN coated tool. To this end, a new cooling system was designed with an air-oil method for reducing tool temperature, which is based on the principle of air vortex flow. That is, the outlet temperature of the air becomes over $20C^{\circ}$ lower than atmosphere temperature by entering pressurized air of $5kgf/cm^2$ into the inlet. This cooled air ejected to the top of the cutting tool lowered tool temperature, which reduced the wear of a TiN coated tool by the 30% of CBN tool life with respect to the same cutting length.

Key Words: Hard Turning(하드터닝), Hardened Material(경화재료), Air-Oil Cooling(공기-오일냉각), Tool Wear(공구마모), CBN Tool(CBN공구), TiN Coated Tool(TiN피복공구)

1. 서 론

Lean production과 Agile manufacturing을 지향하는 최근의 제조공장에서는 Hard turning으로 불리우는 새로운 생산개념에 많은 관심이 집중되고 있다.⁽¹⁾ 하드터닝은 베어링강(SUJ2)과 같은 재료를 고경도인 $H_{RC} 58$ 이상의 상태로 열처리한 상태에서 선삭공정에 의해 정삭가공을 완성하는 가공이다.⁽²⁾ 일반적으로 기계재료의 강

도나 내마모 향상을 위해서 재료는 열처리가 반드시 필요한 경우가 많다. 이 경우 통상의 고속도강이나 초경공구 등으로는 이런 부품의 절삭가공은 매우 어려우며 또한 표면조도, 치수정밀도, 형상정밀도 때문에 종래에는 연삭공정에 의하여 정삭가공이 이루어졌었다. 이러한 공정을 Fig. 1에서 보는 바와 같이 한 개의 열처리 공정을 없앴과 동시에 연삭공정을 절삭공정으로 대체함에 의하여 가공시간과 생산단가를 낮추는 것이 하드터닝이다.

* 삼익공업(주) 기술연구소
** 영남대학교 기계공학부

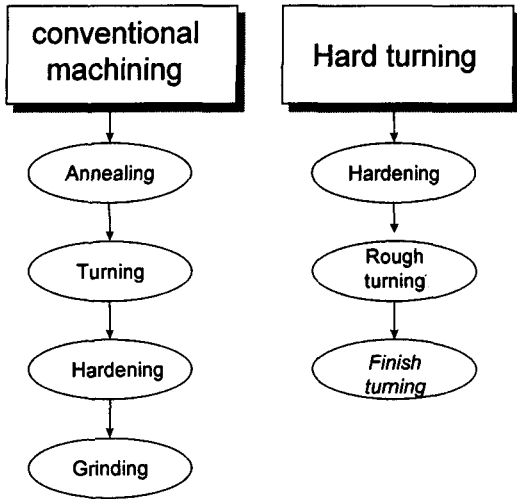


Fig. 1 Process comparison between conventional machining and hard turning

하드터닝의 장점은 첫째 대량생산의 경우에는 연삭가공이 생산성이 높지만 대량생산이 아닌 경우는 상기에서 기술하였듯이 공정의 단축이나 또는 총형 연삭수돌이 필요 없이 선삭용 바이트로 어떠한 형상의 가공도 가능하다는 점에서 생산성이 매우 높다. 둘째는 표면품질이 매우 좋다. 즉, 총형 연삭가공에 의한 방법이 아닌 선삭가공으로 이루어지기 때문에 가공부품의 기하학적 형상정밀도가 매우 높고 가공면의 표면조도를 1.0 μ m Ra이하로 확보가 가능하며, 가공점에서 절삭부하가 낮기 때문에 가공변질층의 깊이가 낮다. 또한 잔류응력이 인장인 상태보다는 압축응력을 받는 상태로 존재하기 때문에 피로하중을 많이 받는 자동차 부품 등에 있어서 내구성이 향상되었다는 연구 결과가 보고되고 있다.^(2,3)

그러나 하드터닝은 고경도의 재료를 선삭하기 때문에 가공점에서 고열이 발생하고 이로 인하여 공구의 수명이 매우 짧아진다. 따라서 종래의 고속도강이나 초경공구로 써는 절삭이 불가능하거나 또는 경제성이 낮아진다. 이를 위해서 고온경도가 높고 열저항이 높으며 화학적으로 안정하여 산화나 확산이 적은 공구가 필요하다. 이러한 공구로서 CBN공구가 가장 대표적이며, 일반적으로 황삭에서는 CBN의 밀도가 낮은 BZN8100(GE상표명: 70% CBN), 정삭에서는 밀도가 높은 BZN6000(92% CBN) 계열의 공구가 내마모성이나 또는 표면품질의 측면에서 우수하다는 연구가 보고되었다.⁽⁴⁾ 한편, 공작기계의 정밀도 측면에서 범용의 공작기계로는 하드터닝을 실시하여

연삭면의 정밀도를 달성할 수가 없다는 연구결과가 있으며,⁽⁵⁻⁶⁾ Koenig는 다이아몬드 선반과 범용선반에 대하여 절삭시험을 한 결과 가공품의 표면품질에 많은 차이는 없는 것으로 보고하였다.⁽³⁾ 이러한 점에서 CBN공구의 사용은 하드터닝에 있어서 절대적인 요소이지만 공구의 가격이 높기 때문에 비경제적인 요소이다.

본 연구에서는 사용하는 공구의 측면에서 하드터닝을 경제적으로 하기 위하여 기존의 CBN이나 PCBN공구 대신에 저가의 공구를 이용하여 고경도 재료를 가공할 수 있는 시스템에 대하여 연구하였다. 즉, 고경도 재료를 가공할 때에 공구의 마모는 절삭점에서의 고열(600-1000 $^{\circ}$ C)에 의하여 경도저하가 발생함으로서 일어나기 때문에 절삭열을 냉각하기 위한 냉각시스템을 설계하였다. 통상 고경도 재료는 일반적인 절삭에서 사용하는 Flood coolant(액절삭유제)를 공급하게 되면 고경도의 절삭입자가 공구와 공작물사이에 개재하고, 이로 인하여 미소 칩핑 등이 발생한다. 이러한 결점을 방지하면서 냉각을 할 목적으로 공기의 Vortex 흐름을 이용하여 급냉시킨 공기를 분사하는 Air-Jet 시스템과 Air-Jet와 액절삭유제 시스템을 혼용한 공기-오일 시스템을 도입하여 TiN 코팅공구의 마모를 억제시켜 고경도 절삭이 가능하도록 하였다. 이를 위하여 먼저 Taguchi의 실험적 방법⁽⁷⁾을 이용하여 공구의 칩핑이 적게 발생하는 절삭조건을 찾고, 그후 다시 Taguchi 방법을 이용하여 최적의 냉각 시스템을 설계하였다. 이 시스템의 검증 실험을 통하여 TiN 코팅공구를 사용하는 경우 CBN공구의 수명에 약 30% 이상 달하는 공구수명 향상을 이루었으며, 하드터닝을 저가의 공구로 절삭할 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. 절삭열 해석

고경도 재료를 절삭하기 위한 냉각 시스템을 설계하기 위하여 먼저 절삭점 근처에서의 온도분포를 해석하고 이 결과를 이용하여 절삭유제의 분사방향을 결정하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 먼저 고경도 재료의 절삭시 절삭점에서의 온도분포를 예측하기 위하여 유한차분법을 이용하여 열해석을 하였다. 열해석은 2차원 Orthogonal 절삭과정에 대하여 Fig. 2와 같이 제 1 전단역, 공작물과 공구의 여유면이 접촉하는 영역, 칩과 공구의 마찰이 일어나는 공구의 경사면(제 2 전단역)을 열원으로 가정하였다.

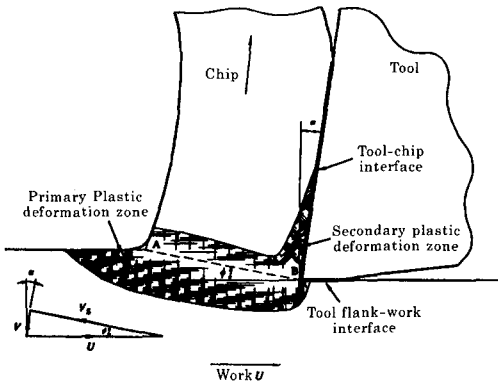


Fig. 2 Active regions in orthogonal cutting

이 경우 사용한 열의 평형방정식은 식 (1)과 같다.⁽⁸⁾

$$\rho c(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) - k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) - q = 0 \quad (1)$$

여기서 c 는 비열, ρ 는 밀도, u 와 v 는 각각 x 와 y 방향의 속도, k 는 열전도율, q 는 단위체적당의 열생성율이다. 좌표계는 공구를 중심으로 계산하여 공구는 정지하여 있고, 칩은 공작물로부터 변형되어 생성되고 공구의 경사면을 따라 유동하도록 하였다. 즉, 공작물은 공구에 대하여 U 의 속도로 움직인다. Fig. 3은 열해석에 사용된 격자모델로서 절삭점 근처에서는 격자의 간격을 좁게 하였고, 절삭점에서 떨어진 부분에서는 넓게 하여 해석의 효율성을 높였다. 해석을 위하여 사용한 절삭조건 및 공구와 절삭소재의 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 4는 열해석 결과로서 일반적으로 알려진 바와 같이 공구의 경사면과 여유면의 온도가 주변보다 높게 나타났으며, 특히 공구의 끝점보다는 끝점에서 약간 떨어진

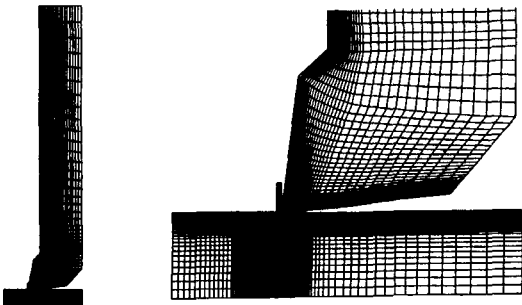


Fig. 3 Calculation grid for FDM

Table 1 Cutting conditions and material properties

Cutting Tool (Tungsten carbide)	rake angle	5°
	density	13800.0 kg/m ³
	specific heat	209 J/kg°C
	heat transfer coefficient	74.05681 J/sm°C
Work-piece (Carbon steel : SM45C)	density	7750 kg/m ³
	specific heat	502 J/kg°C
	heat transfer coefficient	41.84 J/sm°C
Cutting Conditions	undeformed chip thickness	0.2 mm
	shear angle	22.5°
	chip thickness	0.435 mm
	cutting speed	170 m/min
	Chip-Tool contact length	0.258mm

위치에서의 온도가 가장 높음을 알 수가 있다. 해석결과 초경공구로 절삭시 절삭속도 170m/min의 경우 최고점의 온도는 600℃를 상회하는 결과가 나왔다. 이러한 해석결과로부터 공구에서의 온도상승을 억제하여 열에 의한 마모를 줄이기 위해서는 경사면과 여유면쪽으로 절삭유제가 공급되도록 절삭유제 시스템을 설계하여야 함을 알 수가 있다. 따라서 마모억제 실험에서는 이들 분사방향을 고려하여 실험조건을 선정하였다.

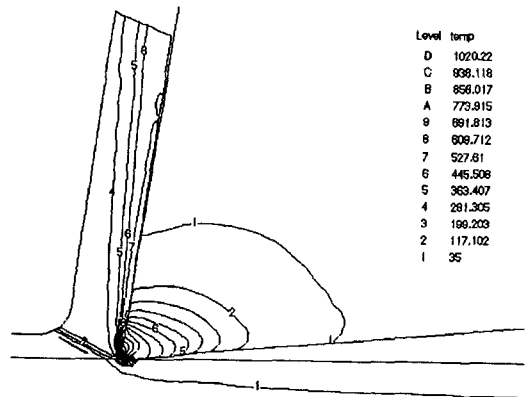


Fig. 4 Temperature distribution in orthogonal cutting

3. Taguchi법에 의한 공구 및 절삭조건 선정

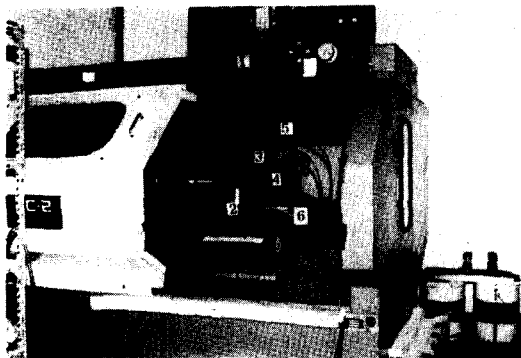
3.1 절삭실험

먼저 저가의 공구인 초경공구(P25), 코팅공구(TiN), 그리고 서어멧 공구를 대상으로 Hard turning에 적합한

공구를 선정하였다. 공구의 선정기준은 발생한 칩핑의 크기가 작은 것으로 하였는데, 이것은 Fig. 5와 같이 고경도 재료의 선삭시에는 공구의 강도저하로 인하여 칩핑이 발생하여 마모를 가속시키고 공작물의 정밀도를 떨어지게 하기 때문이다. 실험은 Fig. 6과 같이 CNC선반(대구중공업(주) DC2)에서 미리 베어링강(SUJ2)을 담금질 열처리하여 경도를 $H_R C$ 62-64로 열처리한 소재를 절입각도, 절삭유제 사용유무, 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이, 그리고 선단반경 등을 실험조건에 따라 바꾼 상태에서 절삭하여 칩핑의 발생유무를 육안 및 공구현미경(Mitutoyo TM301)을 통하여 확인하였다. 이 실험을 통하여 Hard turning시에 칩핑의 발생이 가장 작은 최적의 공구와 절삭조건이 선정되어지며, 이를 기초로 하여 공구의 마모가 가장 적어질 수 있는 냉각시스템을 설계하고자 한다.



Fig. 5 Chipping occurred in hard turning



① CNC lathe ② Tool dynamometer ③ Vortex tube ④ Air ⑤ Coolant ⑥ Magnetic stand

Fig. 6 Overview of experimental setup

또한 공구의 마모와 절삭력 그리고 표면조도의 상관관계를 조사하기 위하여 선반의 공구홀더 아래에 선삭용 공구동력계(Kistler 9272)를 설치하여 절삭력을 측정하였으며, 매 순간 절삭이 완료된 후에는 공작물의 표면조도를 표면조도계(Mitutoyo Surftest 301)를 이용하여 측정하였다.

3.2 Taguchi실험법의 적용

절삭실험에서는 위에서 미리 선정한 세가지 공구재료와 여러가지 절삭조건을 조합하여 적용하면 실험의 가지수가 상당히 많게 된다. 이러한 이유 때문에 실험을 효과적으로 수행하기 위하여 통계적인 실험법인 Taguchi 실험방법을 적용하여 실험의 수와 실험시간을 줄였으며, 칩핑이 잘 일어나지 않는 최적의 공구와 절삭조건을 효율적으로 선정할 수가 있었다.

먼저 실험에 사용된 절삭조건은 Table 2와 같다. 이를 Taguchi법에서는 요소수준(Factor level)이라고 한다. 즉 6개의 요소(설계변수)에 대한 수준은 설계변수들의 값에 해당한다.

Table 2 Factor levels for the selection of cutting conditions

factor level	A lead angle	B coolant	C cutting speed (m/min)	D feed rate (mm/min)	E depth of cut (mm)	F nose radius (mm)
level 1	-5°	Off	30	10	0.05	0.4
level 2	15°	On	80	25	0.15	0.8
level 3	-	-	150	40	0.3	1.2

요소수준을 바탕으로 다음은 직교배열을 Table 3과 같이 각각의 공구에 대하여 구성한다. 직교배열은 각 절삭조건에서의 직교성을 이용하여 실험의 가지수를 줄이는 가장 중요한 부분이다. 즉, 각 요소는 서로 독립적이라는 가정하에서 각 요소가 실험의 평균치에 미치는 영향이나 혹은 평균치로부터의 벗어남의 정도를 측정할 수 있게 해준다. 따라서 이는 조사대상 요소들 사이의 관계를 정립하여 주는 것으로서 어떤 한 요소의 레벨에 대하여 다른 요소의 레벨들이 똑같은 수만큼 발생하도록 하여 실험을 균형되게 하고, 다른 요소로부터 한 요소의 영향을 분리하여 평가할 수 있도록 한다. 여기서 가로줄은 실험의 요소이고 세로줄은 실험의 순서에 해당된다. 각 요소가 갖는 값은 요소의 레벨로서 만약 열 번째 실험에서 절입각(leading angle : A)의 값이 2이면 절입각은 15°임을 의미한다. 한편 e1 및 e2는 dummy열로서 Table의 직

교배열은 8개의 인자를 고려할 수 있는데 실제 고려되는 인자는 6개로서 나머지 Table의 열은 dummy열이 된다. 만약 dummy열의 레벨값 변화가 크다면 이것은 실험에서 오차가 큼을 의미한다.

Table 3 Orthogonal array of TiN coated tool

factor order	A	B	e1 (dummy)	e2 (dummy)	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	2	1	2	1	3	2	3
8	1	2	2	3	2	1	3	1
9	1	2	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	2	1	3	2	3	1	2
17	2	2	2	1	3	1	2	3
18	2	2	3	2	1	2	3	1

절삭공구로 가공시에는 치핑이 적게 일어날 확률을 선정하여야 하기 때문에 Table 3의 직교배열에서 각각의 실험조건으로 실험을 한 후, 식 (2)와 같은 망소특성 (Smaller-The-Better)의 문제로 S/N비를 구하였다. Table 4는 이때의 TiN 코팅공구에 대한 응답표(S/N비 : Signal-To-Noise Ratio)이다.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) \quad (2)$$

여기서 n은 실험반복회수, y_n 은 반복 데이터를 나타낸다. 마찬가지로 서어멧 공구와 초경공구에 대하여도

Table 4와 같이 응답비를 구한 후, 세가지 공구에 대하여 레벨의 변화에 대한 응답을 도식적으로 나타낸 것이 Fig. 7이다.

Table 4 S/N Response table of TiN coated tool

factor level	A	B	C	D	E	F
level 1	-51.1	-48.5	-40.1	-53.9	-51.5	-45.8
level 2	-46.1	-48.8	-49.4	-46.9	-47.8	-52.8
level 3	-	-	-56.3	-45.0	-46.6	-47.3

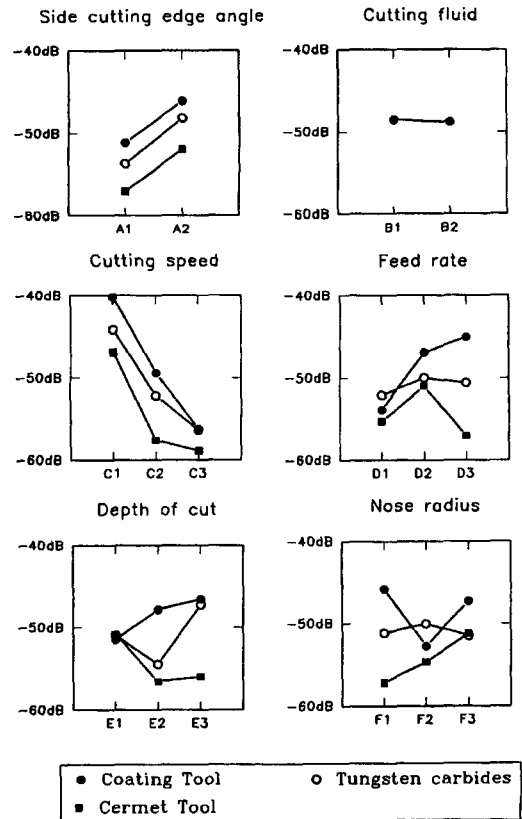


Fig. 7 Response graph with respect to each factor

3.3 공구 및 절삭조건 선정

Fig. 7에 의하면 TiN 코팅공구가 각각의 요소(설계변수)에 있어서 치핑량이 다른 공구에 비교하여 응답이 낮음(치핑의 크기가 작음)을 알 수가 있다. 이 결과로부터


코팅공구를 Hard turning을 위한 공구로 선정을 하였다. 또한 그림의 결과에 의하면 세가지 공구 모두 절삭속도나 절입각의 레벨변화가 치핑에 큰 영향을 주고 있음을 알 수가 있다. 즉 절삭속도나 절입각도의 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

다음은 분산분석을 이용하여 치핑에 상대적 영향을 미치는 절삭조건을 추출하게 되는데, 분산분석은 응답비의 값을 이용하여 하게 된다.⁽⁷⁾ 따라서 분산비가 큰 인자일수록 치핑에 큰 영향을 미치게 되는데 Table 5에 의하면 절삭속도, 이송속도, 절입각, 노즈반경 순으로 영향이 큼을 알 수가 있다. 따라서 치핑에 많은 영향을 미치는 강한 인자(Strong factor)는 절입각도, 절삭속도, 이송속도, 노즈반경으로 선택되어지며 그 결과는 다음과 같다.

A2(절입각 15°), C1(절삭속도 30m/min), D3(이송속도 40m/min), F1(노즈반경 0.4mm)

Table 5 Variance analysis of TiN coated tool

item factor	degree of freedom	sum of squares (dB)	average of sum of squares (dB)	variance ratio
B	1	0.27	0.27	-
E	2	77.88	38.94	-
error	7	16.12	2.3	-
sum	17	1386.62	-	-
(error) falling	(10)	(94.27)	(9.427)	-

Remark :  : strong factor
variance ratio= average of sum of squares/average of sum of squares of errors

즉 이들 조건하에서 공구의 치핑이 가장 작게 일어난다. 한편 위의 조건을 이용하여 예측할 수 있는 치핑크기는 식 (3)에 의하여 구할 수가 있다.

$$\eta_{opt} = m + (A2 - m) + (C1 - m) + (D3 - m) + (F1 - m) \quad (3)$$

여기서 m 은 응답비의 평균값이며, A2, C1, D3, F1은 각각 이 레벨에서의 응답비를 나타낸다. 이 식을 이용하여 실제 일어날 치핑 발생값을 예측하여 보면 치핑량은 -31.25dB이고, 이를 환산하면 36.52 μ m의 크기로 치핑

이 발생한다. 예측값의 타당성 평가를 위하여 3번의 확인 실험결과 거의 치핑이 발생하지 않았다.

4. Air-Oil을 이용한 냉각시스템 설계

4.1 Vortex Tube를 이용한 공기 냉각법의 적용⁽⁹⁾

공기의 Vortex 흐름을 이용한 공기 냉각시스템을 설계하여 치핑의 발생이 적게 일어나는 절삭공구와 절삭조건에 대해 공구마모를 줄이는 실험을 수행하였다. 이 시스템은 고경도 재료를 절삭할 때 절삭열에 의한 TiN 코팅공구의 공구마모를 줄이는 것이 목적이다. 냉각시스템은 Fig. 8과 같이 공기의 Vortex 흐름을 이용하는 것으로서, 온도가 T_a 이고 압력이 P_a 인 압축된 공기를 입구에 공급하면 Vortex흐름이 발생한다. 일부의 공기는 유량조절이 가능한 큰 출구를 통하여 온도 T_c 가 되어 나가고, 나머지 공기는 동심 오리피스를 통하여 반대편으로 온도 T_b 가 되면서 나간다. 이 경우 온도의 차이는 압력의 비인 P_a/P_b 와 사용되는 기체의 종류, 그리고 유출 기체의 량에 의해 결정된다. 압력의 구배로 인하여 온도의 차가 발생하여 고온부와 저온부가 생기는데 P_b 부위가 P_a 보다 온도가 낮은 저온부이고 T_c 부위가 T_b 보다 온도가 높은 고온부가 된다. 이 경우 이론적으로 입구의 공기가 5kgf/cm²이고 출구가 대기압이면 이론적으로 입구와 출구의 온도차는 30℃정도 발생한다. 실제 실험에서는 5kgf/cm²의 압축공기를 공급함에 의하여 약 20℃정도의 온도저하 효과를 얻었으며, 이때 실내 온도가 약 20℃인 경우 0℃의 공기가 출구에서 공구를 향하여 분사되게 된다. 이 시스템을 본 연구에서는 Air-Jet 시스템이라고 한다. Fig. 6은 Air cooler를 공작기계의 공구대에 설치하고, 냉기를 공구에 분사하면서 절삭공구의 마모를 줄이는 실험의 장치이다.

상기의 경우 최적의 냉각조건을 구하여야 하는데 이 경

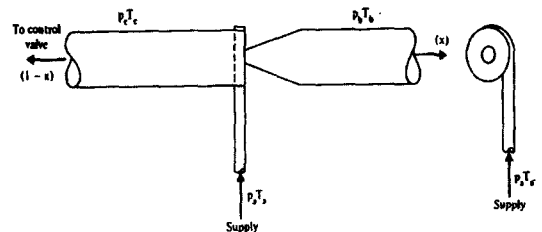


Fig. 8 The principle of air vortex tube

우도 앞에서 적용한 Taguchi방법을 이용하여 실험적으로 최적의 조건을 설계하였다. 설계인자는 Vortex 튜브의 공기 분사방향, 유량, 분사거리이다. 그러나 고경도 재료를 절삭하는 동안 냉기를 절삭점 근처에 직접분사하는 경우 갑작스런 냉각으로 인하여 Thermal crack이 발생하고 이를 방지하기 위하여 추가로 공구의 선단반경, 그리고 칩 브레이커를 설계인자에 포함시켰다. Table 6은 이 경우의 설계인자와 실험조건을 나타내는 인자레벨이다. 분사방향은 열 해석에서 나온 고온부위에 냉기가 접하도록 하였으며 그 방향은 Fig. 9와 같다. 이 경우의 직교배열표는 Table 7과 같이 만들 수가 있다. 이 배열을 이용하여 절삭실험을 한 결과 Fig. 10과 같이 각 인자에 대한 영향을 분석할 수가 있었다. 이 경우 선단반경이 크고, 칩브레이커가 없을 때 마모가 적은 것으로 나타났는데, 이는 열에 의한 응력집중이 완화되어 마모가 줄어든 것으로 볼 수가 있다. Table 8은 이 경우의 응답표로서

분산분석을 한 결과 다음의 인자로 설계를 할 경우 공구의 마모가 줄어드는 것으로 나타났다.

A1(Over head 방향), C2(선단반경 0.8mm, D1(칩 브레이커 없음)

Table 8 S/N Response table of air-jet cooling

factor \ level	A	B	C	D
level 1	-46.83dB	-47.68	-50.03	-47.32
level 2	-48.63	-47.89	-47.57	-50.53
level 3	-49.7	-49.6	-	-

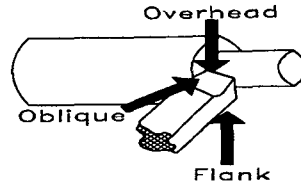


Fig. 9 Ejection direction of coolant

Table 6 Factor Levels for the selection of cooling conditions

factor \ level	A ejection direction	B (L×D)	C nose radius	D chip breaker
level 1	overhead	31.5mm ²	0.4mm	without
level 2	oblique	55mm ²	0.8mm	with
level 3	flank	70mm ²	-	-

Remark : D=nozzle radius (1.4mm) L=ejection distance

Table 7 Orthogonal array of air-jet experiment

factor \ order	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	2	1
4	2	1	2	1
5	2	2	2	1
6	2	3	1	2
7	3	1	2	2
8	3	2	1	1
9	3	3	2	1

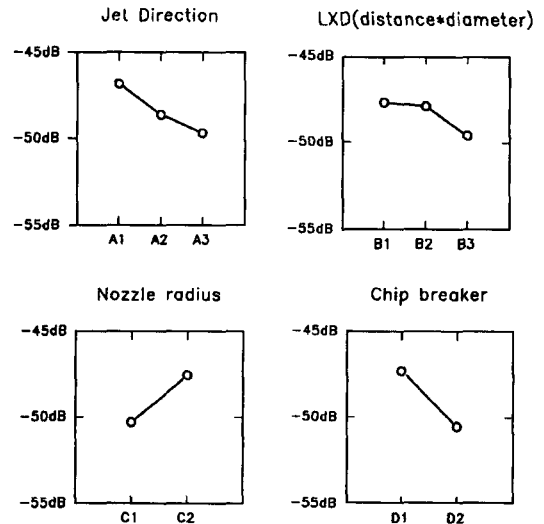


Fig. 10 Response graph with respect to each factor

4.2 Air-Oil 냉각법의 적용

상기의 조건에서 hard turning을 실시한 결과 건삭절삭에 비교하여 공구의 마모는 상당히 줄었으나 액절삭유제를 사용하는 경우보다 공구의 마모의 측면에서는 성능

이 크게 향상되지 못하였다. 이는 Air-Jet 냉각 자체로서는 냉각의 효과는 우수하나 윤활효과가 없기 때문에 마찰에 의한 열이 상당히 발생하여 마모가 가속되는 것으로 판명이 되었다. 따라서 이를 극복하고자 베르누이의 원리를 이용하여 수용성 절삭유제를 노즐입구에 근접시켜 압력차에 의하여 절삭유제가 동시에 분무되는 Air-Oil 냉각법을 사용하였다. 이 경우 Oil은 매우 작은 입자로 절삭점 근처에 분사되어 윤활효과를 줌과 동시에 냉각된 공기에 의한 냉각효과가 동시에 나오는 구조이다. 이 시스템은 일반적으로 Mist-Coolant 시스템과 비슷하나 냉각된 공기를 이용한다는 측면에서 Air-Oil 냉각법이라고 칭하고자 한다. 본 연구에서 수용성 절삭유제를 사용한 이유는 비수용성 절삭유제인 경우 절삭점 근처에서의 높은 온도로 인하여 발화의 가능성이 매우 높기 때문이다. (실제 화재가 발생하였음)

5. 결과 및 고찰

Air-Oil 냉각시스템으로 하드터닝을 하면서 저가의 공구인 TiN 코팅공구의 성능을 비교 평가하기 위하여 CBN공구와 세라믹 공구에 대하여는 건식절삭, TiN 코팅공구에 대해서는 건식 및 습식절삭, Air-Jet 냉각, 및 Air-Oil 냉각방식을 이용하여 절삭실험을 수행하였다. Fig. 11은 이때의 배분력력, 공구마모, 가공된 시편의 평

균 및 최대거칠기의 결과이다. 여기서 배분력을 측정하는 이유는 공구의 마모에 대해 배분력이 민감하게 변화하기 때문이다.

건식절삭을 하는 코팅공구의 경우 공구의 마모가 급속하게 일어났으며, 이때 절삭력의 크기도 가장 크게 나타났다. 이때 TiN 코팅공구에서는 절삭시간의 증가에 따라서 절삭력이 증가하다가 다시 감소하는 현상을 보이는데, 이는 공구의 마모로 인하여 실제 절삭깊이가 이론적인 절삭깊이보다 작기 때문으로 추측된다. 그러나 건식절삭의 경우에도 세라믹이나 CBN공구의 경우 공구의 마모는 매우 적게 일어남을 알 수가 있고, 이미 알려진 것처럼 세라믹 공구의 경우에도 건식절삭에는 효과적이지 못함을 알 수가 있다. 또한 액절삭유제를 사용하는 경우 TiN코팅공구의 마모는 Air-Jet의 경우보다 작게 일어나지만 앞에서 지적하였듯이 치핑이 많이 발생하였다. 한편 Air-Oil 냉각의 경우는 Air-Jet의 경우보다 마모량이 13% 이상 줄어들고 액절삭유제보다도 공구의 마모에서는 유리함과 동시에 치핑의 발생이 거의 없었다. 이것은 절삭유제를 분무함에 의해 칩과 공구접촉면에서의 마찰을 줄여서 마찰열이 적게 발생하기 때문이다. 이 경우는 세라믹공구로 건식절삭을 하는 경우와 성능이 비슷함을 알 수가 있다. 고가의 CBN공구와 세라믹 공구, 그리고 Air-Oil을 사용하는 TiN 코팅공구의 수명을 비교하여보면 코팅공구의 마모를 100으로 보았을 때 동일 절삭깊이에 대하여 세라믹 공구는 78%, 그리고 CBN공구는 30%에 해당하며, CBN 공구가 마모에는 우수함을 보이고 있다. 한편 세라믹의 경우는 CBN보다는 열악하지만 TiN공구보다는 성능이 22%가량 좋음을 알 수가 있다. 그러나 공구의 가격이나 공구교환시간 등을 동시에 고려하여보면 TiN 코팅공구의 경우 충분히 경제성이 있는 것으로 판단된다. 한편 공구의 마모가 작을수록 마모가 큰 공구보다 표면조도의 값이 나쁘는데 이것은 마모로 인하여 선단반경값의 증가로 표면조도가 개선되기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서는 하드터닝에 있어서 고가의 CBN 공구 대신에 저가의 TiN 코팅공구를 사용하여 경제적으로 절삭을 할 수 있는지에 대한 타당성을 연구하였다. 이를 위하여 하드터닝시에 발생하는 발열을 냉각하기 위하여 냉각시스템을 설계하였다. 냉각시스템은 공기의 Vortex 흐름에 의하여 온도가 저하되는 원리와 베르누이 원리에 의

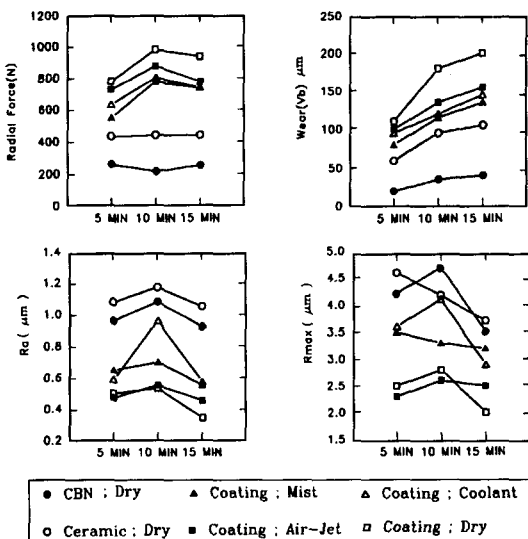


Fig. 11 Cutting tool performances in hard turning

하여 절삭유제의 분무가 가능하도록 구성한 시스템이다. 턴저 공구에 발생하는 칩핑을 줄이기 위한 조건을 구하기 위하여 Taguchi 실험방법을 사용하였는데, 그 결과 절삭 속도, 이송속도, 선단반경 및 절입각이 공구의 칩핑에 많은 영향을 미치며 이들 값에 대한 최적값을 결정할 수가 있었다. 한편 Air-Oil 냉각법을 적용하여 공구 마모를 억제하기 위한 시스템을 구성하기 위하여 다시 Taguchi 실험방법을 적용하여 최적의 시스템을 설계하였다. 실제 절삭실험을 한 결과 TiN 코팅공구로써 CBN공구의 수명에 30% 정도까지 실현할 수 있는 시스템의 구축이 가능하였다. 이로서 Air-Oil 냉각법을 사용하고서도 TiN 코팅 공구를 사용하면 현재 고가인 CBN공구로 하드터닝하는 것을 저가인 공구를 사용함에 의해 경제성을 충분히 확보 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Yongsheng, G., "Discussions on application of lean production philosophy in automobile engine technology and plant design," Int. workshop on automotive manufacturing science and technology, Shanghai China, pp. 1-14, 1996.
2. Chou, Y., "Wear mechanisms of cubic boron nitride tools in precision turning of hardened steels," Ph. D thesis, Purdue university, 1994.
3. Koenig, W., Klinger, M., Link, R., "Machining hard materials with geometric defined cutting edges - Fields of applications and limitations," Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 61-64, 1990.
4. Davies, M. A., Chou, Y., Evans, C. J., "On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning," Annals of the CIRP, Vol. 45, No. 1, pp. 77- 82, 1996.
5. Klocke, F., Koch, K., "High precision turning of hardened steel parts," Proceedings of the 8th International Precision Engineering Seminar, Compiegne, France, pp. 314-318, 1995.
6. Harper, K., Davies, M., Donmez, A., "The effects of spindle dynamic characteristics on hard turning," Proceedings of the 8th International Precision Engineering Seminar, Compiegne, France, pp. 343-346, 1995.
7. Peace, G. S., Taguchi methods, Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
8. Li, X., Kopalinsky, E. M., Oxley, P. L. B., "A numerical method for determining temperature distributions in machining with coolant, Part 1 : Modelling the process," Proc Instn Mech Engrs, Vol. 209, pp. 33-43.
9. Hilsch, R., "The use of the expansion of gases in a centrifugal fields as a cooling process," Review of Scientific Instruments, Vol. 18, Feb, pp. 108, 1947.