

압축공기를 이용한 건식 선삭가공의 절삭특성

송춘삼*, 김주현⁺

(논문접수일 2004. 8. 30, 심사완료일 2004. 11. 22)

Cutting Characteristics of Dry Turning Using Compressed Air

Song, Chun-Sam*, Kim, Joo-Hyun⁺

Abstract

The purposes of using cutting fluid during cutting have been cooling, lubricating, chip washing, and anti-corroding. However, the present manufacturing industry restricts the use of cutting fluid because cutting fluid contains poisonous substances which are harmful to the human body. Therefore dry cutting becomes an unavoidable assignment, and a lot of researches have studied cutting methods without using cutting fluid. Because dry turning is a continuous work, tools life is reduced by continuous heat generation and surface gets rough due to reduced lubrication, so it is important to consider these situations. In this paper, the way of selecting the optimal machining condition by the minimum number of experiments and the effectiveness of using compressed air in high hardness materials through Taguchi method have been found. Dry cutting using compressed air showed better cutting characteristics than normal dry cutting with respect to by cutting force, tool wear, and surface roughness. Also, the optimal machining condition for dry cutting using compressed air could be selected through Taguchi method.

Key Words : dry cutting(건식 가공), cutting fluid(절삭유), turning(선삭), Taguchi method(다구찌 실험계획법), compressed air (압축공기)

1. 서론

최근 생산성 향상을 위한 공작기계의 고속화, 고정밀도화, 자동화와 더불어 환경문제에 대한 노력이 다방면에서 활발히 이루어지고 있는 시점에서 제조업에서의 환경친화

적 설계와 생산기술의 개발은 매우 중요한 문제 중의 하나로 대두된다.

생산 가공시 발생하는 환경오염물질에는 폐공구, 절삭유, 칩 등이 있다⁽¹⁾. 이중 특히 절삭유는 절삭과정 동안에 냉각작용, 윤활작용, 칩처리작용, 그리고 부식방지작용의

* 국민대학교 자동차공학전문대학원
+ 교신저자, 국민대학교 기계자동차공학부 (kim@kookmin.ac.kr)
주소 : 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1

이점으로 대부분의 절삭작업에서 사용되고 있지만 비산 또는 누설에 의해서 부패 및 세균번식을 유발하여 작업환경을 악화시키며, 피부나 소화기계 등 인체의 여러 조직에서 암을 유발시키는 것은 물론 호흡기계 질환과 피부질환을 초래한다고 알려져 있다⁽²⁾.

또한 절삭유는 작업환경에 대한 규제(ISO14000)가 강화됨에 따라 절삭유 처리비용 및 설비 유지관리 비용이 증가하고 있다. 독일의 경우 이러한 절삭유 관련비용은 Fig. 1과 같이 총 생산 비용의 7~17%가 되며, 공구 비용에 비해 4배 이상이 든다는 통계도 발표되었다⁽³⁾. 게다가 절삭가공에 소요된 수용성 에멀전 및 광유가 650톤(1994년 기준)에 달하였고, 연간 75만 톤의 절삭유를 폐처리 하였으며, 톤당 2000DM 이상의 비용을 소모하여 연간 폐처리 비용이 10억DM에 달하였다고 조사되었다⁽⁴⁾.

이러한 절삭유 사용은 환경문제로 인하여 환경에 유해하지 않은 절삭유의 개발⁽⁵⁾, 절삭유를 사용하지 않는 건식 절삭법^(3,6), 절삭유의 사용을 최소화하는 최소절삭유량 절삭법⁽⁷⁾ 등 환경 친화적인 가공방법에 관련된 많은 연구가 필요하게 되었다. 특히 환경 친화적인 가공방법 중에서 절삭유를 사용하지 않고 가공하는 건식 절삭법이 더욱 더 중요시되고 있지만 많은 연구 결과가 나와있지는 않다.

건식 가공에서 가장 중요하게 생각되는 것은 절삭유 사용시에 유리한 냉각 기능, 윤활 기능, 칩 처리 기능 등이 있다. 특히 선삭가공에서는 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이를 증가시키에 따라 절삭날의 온도도 상승하는 결과를 보여주고 있다^(8,9). 절삭날의 온도 상승은 공구수명에 지배적인 영향을 미쳐 공구수명을 단축시킬 뿐만 아니라 피삭재의 표면에 가

공변질층이나 잔류응력과 같은 여러 가지 열적 문제도 발생시킨다⁽¹⁰⁾.

그러므로 본 논문에서는 건식 선삭가공시 압축공기를 사용하여 건식 가공에서 필요로 하는 절삭유의 기능들을 얼마나 만족할 수 있는지를 연구하였다. 실험은 일반적으로 많이 쓰이는 시편과 공구로 CNC 선반에서 진행되었다. 실험 횟수를 최소화 할 수 있는 장점을 가지는 직교배열법을 이용해 실험을 수행한 후 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기에 영향을 미치는 요인을 비교하였고, 다구찌 실험계획법을 통하여 각각의 인자에 대한 SN비(Signal to Noise Ratio)를 분석해 최적 가공조건을 선정하여 기계의 특성에 대하여 잘 모르는 사용자도 적절한 가공조건을 선택할 수 있는 방법을 연구하고자 한다. 더불어 경도가 높은 재료에서도 압축공기를 사용하는 건식가공이 효과가 있는지를 실험을 통해 알아보려고 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험은 일반적인 건식 선삭가공과 압축공기를 사용한 건식 선삭가공을 비교하고, 절삭조건에 따라 다양한 인자들이 어떤 영향을 얼마나 미치는지 확인하기 위해 Table 1과 같은 실험 장치를 사용하였다. Fig. 2는 전체 실험장치를 나

Table 1 Instrument and Model

Instrument	Company	Models
Turning Machine	Daewoo	PUMA150G
Dynamometer	KISTLER	9257 Type
Charge Amplifier	KISTLER	5019 Type
Optical Microscopy	Nikon	ME600 Type
Surface Roughness Tester	Mahr	PGK 120
Rockwell Hardness Tester	Time	THR-700E
Air compressor	UNITED	UD2025

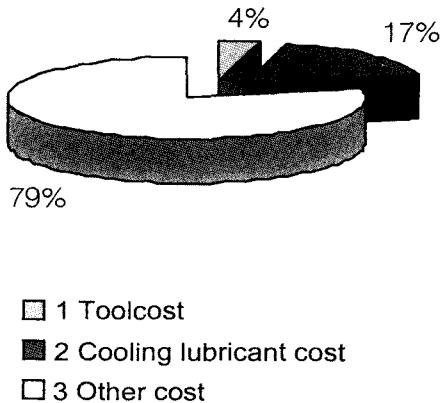


Fig. 1 General lubrication cost⁽³⁾

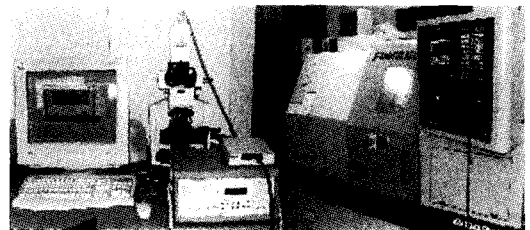


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

타낸 사진이다.

2.2 절삭공구 및 피삭재

본 실험에 사용된 공구로는 일반적으로 생산현장에서 많이 쓰이는 CNMG120408로 TiN 코팅된 초경공구를 사용하였다. 노즈 반경은 0.8mm이다. 공구홀더는 외경 선삭용 L형 PCLNR2525-M12로 옆날각(approach angle)과 앞날각(end cutting edge angle)이 각각 5°이고 절입각(entering angle)은 95°인 홀더를 사용하였다.

실험용 피삭재로는 Ø70mm에 길이가 120mm인 SM45C를 사용하였다. 또한 각각의 경도가 30, 40HRC로 열처리를 하여 사용하였다.

2.3 실험방법

본 실험은 압축공기를 사용한 건식 선삭가공이 일반적인 건식 선삭가공 보다 표면 거칠기, 공구마모, 절삭력 면에서 얼마나 향상되는지를 비교해보고 최적 가공조건을 결정하기 위해 MINITAB을 이용한 다구찌 실험계획법을 사용하였다.

우선 MINITAB을 이용해 절삭조건을 나열하여 실험에 필요한 $L_9(3^3)$ 의 직교배열표를 완성하였다. Table 2는 본 실험의 절삭조건을 나타낸 직교배열표이고, 모든 실험은 이 절삭조건에 따라 실험하였다.

실험은 압축공기를 사용한 건식 선삭가공과 일반적인 건식 선삭가공을 각각 9 조건의 실험을 실시하였고 정밀한 측정결과를 위해 3회 반복하여 실험하였다. 또한 검증실험을 5회씩 반복하여 총 74회의 실험을 실시하였다. 절삭길이는 모두 12km로 동일한 길이를 절삭하였다. 압축공기를 사용하기 위하여 에어컴프레서를 사용하였으며, Ø4mm인 고무호스를 연결하여 압축공기가 공구와 공작물이 접촉하는 곳에 투입 될 수 있도록 하였다. 이때 압축공기는 0.2MPa의 압력으로 일정하게 불어주었다. 또한 열처리를 하여 경도가 30, 40HRC인 시편에도 같은 방법으로 실험을 하였다.

모든 실험은 CNC선반에 프로그램을 입력하여 실시되며, 입력한 프로그램에 의해 절삭이 시작되면 절삭력은 KISTLER

Table 2 Cutting Conditions

cutting speed (m/min)	150, 200, 250
Depth of cut (mm)	1, 2, 3
Feed rate(mm/rev)	0.1, 0.2, 0.3
Compressed air (MPa)	0.2
Cutting length (Km)	12

사의 공구동력계(9257 Type)를 이용해 측정된다. 측정이 된 데이터는 Charge Amplifier(5019 Type) 통하여 신호가 증폭이 되어 A/D 변환기를 통해 데이터가 수치화 된다. 수치화 된 데이터를 통해 주분력(principal -force)을 IBM PC를 통해 확인하였다.

표면 거칠기를 측정하기 위하여 Mahr사의 Surface Roughness Tester를 사용하였으며 중심선 평균 거칠기(Ra)를 측정하였다. 또한 공구마모를 측정하기 위하여 Nikon사의 Optical Microscopy(ME600 Type)를 이용하였으며 여유면의 평균 플랭크 마모(flank wear)를 측정하였다.

최적 가공조건을 선정하기 위하여 다구찌 실험계획법을 이용하였다. 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기에 영향을 미치는 요인을 비교하였고, 각각의 인자에 대한 SN비를 분석하여 최적 가공조건을 선정하였다. 이때 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기는 낮을수록 좋으므로 망소특성에 대한 공식을 적용하여 각 실험번호별 신호 대 잡음비로 전환시켰다. 아래의 식 (1)은 망소특성에 대한 공식이다. 여기서 n 은 실험반복 횟수이고, y_i 는 측정 데이터의 값이다.

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

3. 실험 결과 및 고찰

Table 3은 실험 순서에 따른 실험 조건을 나타낸 직교 배열표이다. 모든 실험은 이 직교 배열표에 따라 실험하였다.

3.1 비교분석

Fig. 3에서와 같이 전체적으로 압축공기를 사용한 건식이

Table 3 Tables of orthogonal arrays

Experiment No.	Depth of cut (mm)	Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)
1	1	150	0.1
2	1	200	0.2
3	1	250	0.3
4	2	150	0.2
5	2	200	0.3
6	2	250	0.1
7	3	150	0.3
8	3	200	0.1
9	3	250	0.2

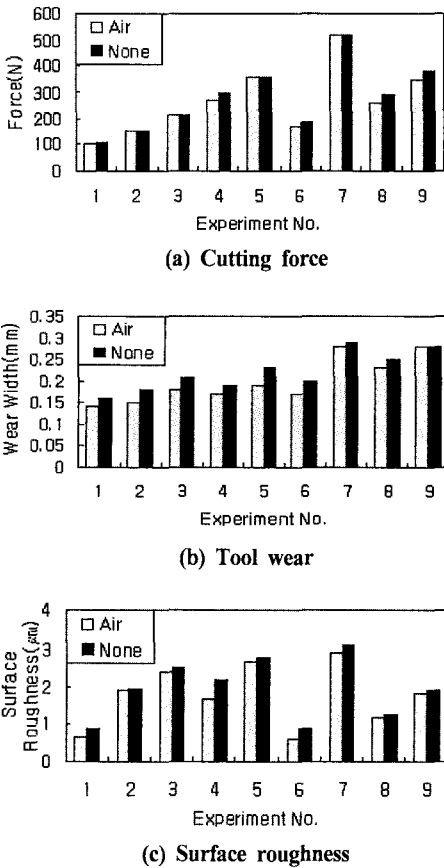


Fig. 3 Comparison of each experiment

공이 일반적인 건식가공보다 절삭력, 공구마모, 표면거칠기 면에서 더 좋은 절삭특성을 보여주는 것을 알 수 있었다. 특히 공구마모를 약 10.1% 감소시켰고, 표면거칠기도 약 5.4% 향상시키는 것을 볼 수 있었다. 이는 압축공기를 사용하는 것이 칩을 빠르게 배출시켜 열과 연삭마모를 감소시키는 역할을 했기 때문인 것으로 사료된다. 반면에 절삭력은 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 절삭가공시 압축공기를 사용하는 것이 윤활작용에 크게 기여하지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

또한 그래프를 통해 절삭력은 실험 8, 9번과 같이 절삭깊이가 깊은 조건의 실험에서 가장 많은 차이를 보였고, 공구마모는 실험 3, 5번과 같이 이송속도가 큰 실험에서 가장 많은 차이를 보였다. 그리고 표면거칠기는 실험 1, 4번과 같이 절삭속도가 낮은 조건의 실험에서 차이가 가장 많이 나는 것을 볼 수 있었다. 여기서 절삭력은 절삭깊이가 깊은

조건에서, 공구마모는 이송속도가 큰 조건에서, 그리고 표면거칠기는 절삭속도가 낮은 조건에서 압축공기를 사용하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

3.2 SN비 분석 및 최적가공조건 선정

위 실험을 통해 압축공기를 사용한 건식가공이 일반적인 건식가공보다 더 좋은 절삭특성을 보여주는 것을 볼 수 있었다. 따라서 다구지 실험계획법을 통해 압축공기를 사용한 건식가공의 SN비 분석 및 최적 가공조건을 선정해 보았다. 모든 인자를 3수준으로 하여 실험하였고, 외측배열에 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기를 두었다. 실험결과를 망소특성으로 하여 분석한 결과 Table 5와 같은 결과를 볼 수 있었고, Fig. 4에 그래프로 나타내었다. 그래프에서와 같이 절삭력은 절삭깊이와 이송속도, 공구마모는 절삭깊이, 그리고 표면거칠기는 이송속도에 각각 많은 영향을 받았고, 전체적으로 절삭깊이와 이송속도에 많은 영향을 받은 것을 볼 수 있었다. 이 분석을 통해 최적가공조건을 Table 4에 나타내었고, 검증실험을 통하여 SN분석으로 얻어진 조건들이 최

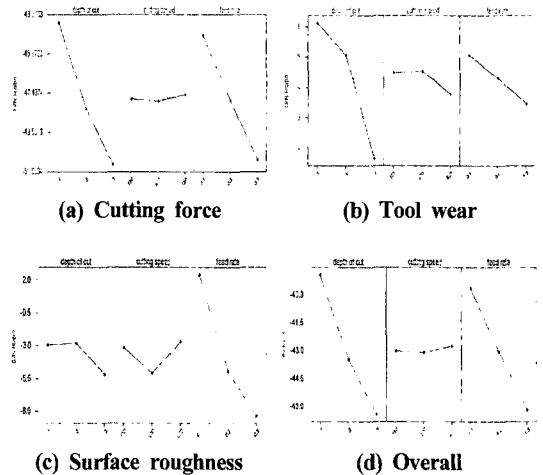


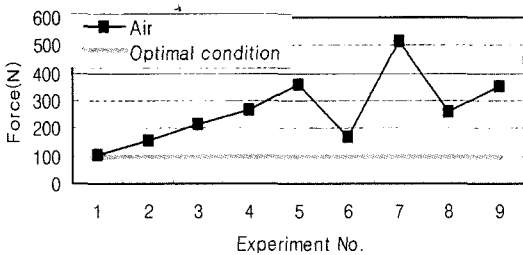
Fig. 4 Comparison of SN ratios

Table 4 Optimum machining conditions

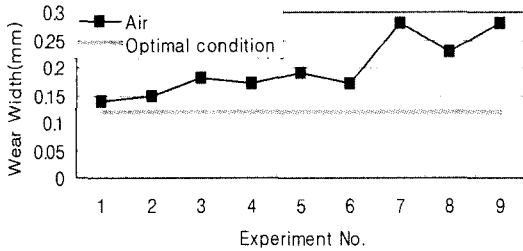
	Depth of cut (mm)	Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)
Cutting force	1	250	0.1
Tool wear	1	200	0.1
Surface roughness	2	250	0.1
overall	1	250	0.1

Table 5 Result of Experiment

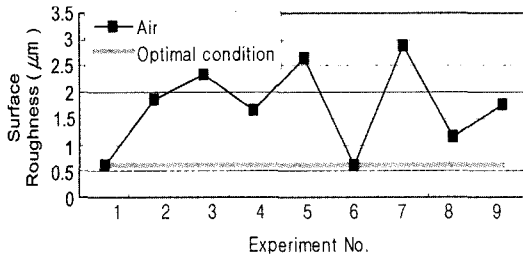
Experiment No.	Depth of cut (mm)	Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Cutting Force (N)	SN1	Tool Wear (mm)	SN2	Surface roughness (μm)	SN3	SN
1	1	150	0.1	102.3	-40.198	0.14	17.077	0.62	4.152	-35.427
2	1	200	0.2	156.8	-43.907	0.15	16.478	1.87	-5.437	-39.136
3	1	250	0.3	222.5	-46.947	0.18	14.895	2.36	-7.458	-42.176
4	2	150	0.2	270.1	-48.631	0.17	15.391	1.65	-4.350	-43.859
5	2	200	0.3	372.3	-51.418	0.19	14.425	2.65	-8.465	-46.647
6	2	250	0.1	171.6	-44.690	0.17	15.391	0.60	4.437	-39.919
7	3	150	0.3	527.9	-54.451	0.28	11.057	2.88	-9.188	-49.680
8	3	200	0.1	258.1	-48.236	0.23	12.765	1.16	-1.289	-43.465
9	3	250	0.2	350.2	-50.886	0.28	11.057	1.78	-5.008	-46.115



(a) Cutting force



(b) Tool wear



(c) Surface Roughness

Fig. 5 Comparison of optimal conditions

적 가공조건임을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 검증실험 결과를 나타낸 그래프이다. 또한 각각의 SN비 분석을 통해 알 수 있었던 기여도를 Fig. 6에 하나의 그래프로 나타내었다. 이 그래프를 통하여 원하는 결과에 가까운 조건을 선정할 수 있다.

3.3 경도별 실험

지금까지 실험을 통해서 일반적인 건식가공보다 압축공기를 사용한 건식가공이 더 좋은 절삭특성을 보여주는 것을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 7에서 보여지는 것과 같이 열처리를 하여 경도를 높은 재료(30HRC)에서는 표면거칠기를 제외하고는 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있었다. 표면거칠기는 절삭깊이가 작을 때 압축공기를 사용하는 건식가공이

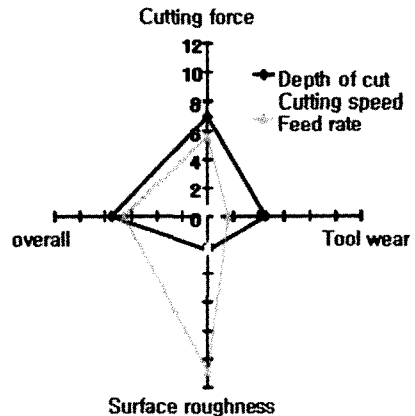


Fig. 6 Contribution of machining conditions

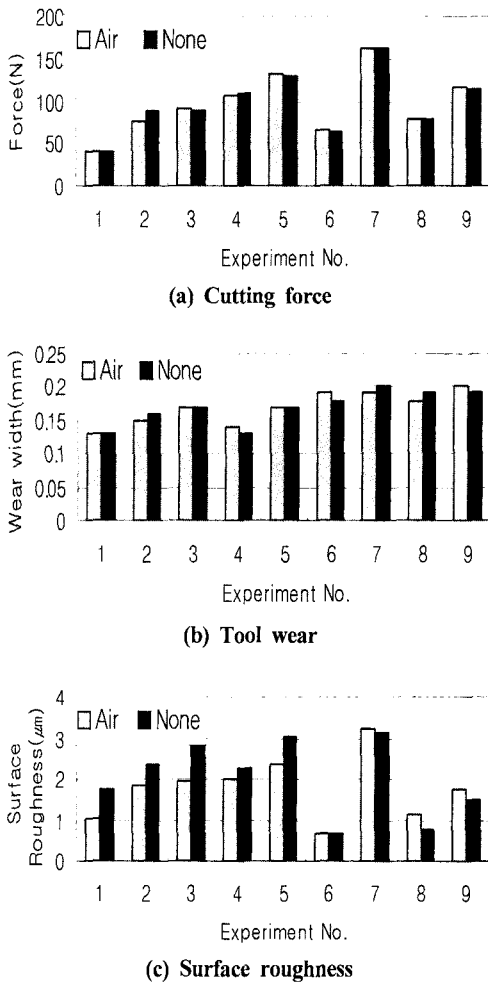


Fig. 7 Comparison of each experiments (30HRC)

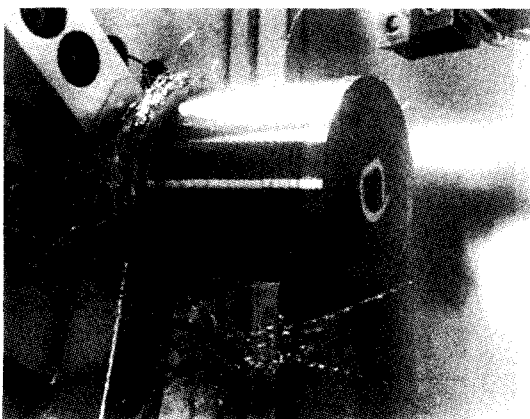


Fig. 8 Result of experiments (40HRC)

표면을 더 좋게 하는 것을 볼 수 있었다. 또한 경도가 40HRC 인 재료에서는 공구와 공작물이 고열에 의해 검게 타고 칩이 녹아 공작물에 붙어 가공조차 안 되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 Fig. 8에서 보여주는 절삭면에 생긴 찌꺼기나 왼쪽에 보이는 칩들의 모습으로 확인할 수 있었다. 이 결과는 압축공기를 이용해 칩을 붙어주는 것만으로는 경도가 높은 재료를 가공할 때 발생하는 고온을 감소시킬 수 없었기 때문이라고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 건식 선삭가공시 압축공기를 사용한 건식 가공과 일반적인 건식 가공의 절삭특성이 어떤 차이를 보이는지 알아보고 압축공기를 사용한 건식 선삭가공의 최적 가공조건을 선정하기 위하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

압축공기를 사용한 건식 가공이 아무것도 사용하지 않은 일반적인 건식 가공보다 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기 면에서 더 좋은 절삭특성을 보여주는 것을 알 수 있었으며, 특히 공구마모가 다른 결과에 비해 많이 향상되는 것을 볼 수 있었다. 그러나 열처리를 하여 경도를 높인 재료를 가공하는 실험에서는 고열로 인해 건식가공이 불가능한 것을 볼 수 있었다. 따라서 압축공기를 사용하는 것은 칩을 빠르게 배출시켜 열과 연삭마모를 감소시키는 역할을 하지만 칩을 붙어주는 것만으로는 경도가 높은 재료를 가공할 때 발생하는 고온을 감소시킬 수는 없다고 사료된다.

다구찌 실험계획법을 이용하여 각각의 결과에 대한 최적 가공조건과 각각의 결과들을 동시에 만족하는 최적 가공조건을 선정할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Aronson, R. B., 1994, "Why Dry Machining," *Manufacturing Engineering*, Vol. 114, pp. 33~36.
- (2) National Institute for Occupational Safety and Health, February 1998, *Criteria for a Recommended Standard Occupational Exposures to Metalworking Fluids*, US. Dept. of Health and Human Services, CDC. NIOSH.
- (3) Klocke, F., and Eisenblatter, G., 1997, "Dry cutting," *Keynote papers, Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519~526.
- (4) Cselle, T., 1995, "New Directions in Drilling," *Manu-*

- facturing Engineering*, Vol. 115, No. 2, pp. 77~80.
- (5) Koelsch, J. R., 1997, "Lubricity VS. the Environment: Cascades of Cleaniness," *Manufacturing Engineering*, Vol. 118, No. 5, pp. 50~58.
- (6) Jin, M., Noguchi, H., and Murakawa, M., 2001, "Environmentally friendly dry cutting using heat absorption tool," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 29, pp. 235~242.
- (7) Hafenbraedl, D., and Malkin, S., 2000, "Environmentally-conscious minimum quantity lubrication(MQL) for internal cylindrical grinding," *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. 28, pp. 149~154.
- (8) El-Wardany, T. I., Mohammed, E., and Elbestawi, M. A., 1996, "Cutting Temperature of Ceramic Tools in High Speed Machining of Difficult-to-cut Materials," *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 36, No. 5, pp. 611~634.
- (9) Kim, S. W., Ahn, C. S., and Lee, D. W., 2000, "Evaluation of Machinability by Cutting Environments in High-Speed Machining of Difficult-to-cut Materials," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 6, pp. 158~163.
- (10) Kitagawa, T., Kubo, A., and Meakawa, K., 1997, "Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel718 and Ti-6Al-6V-2Sn," *Wear*, Vol. 202, pp. 142~148.