

고경도재료 선삭시 최적 에어제트 냉각시스템 설계 (Optimal Air Jet System Design for the Turning of Hardened Material)

정 보구*, 고태조**, 김 회술***

* : 영남대 대학원

** : 영남대 기계공학부

Abstract

In case of hard turning, tool wear is accelerated by heat. So we intend to decrease tool wear by using an air-jet cooling system. Before constructing the air-jet cooling system, no chipping conditions were selected through a statistical method, so called 'Taguchi method', and then the air-jet cooling system was developed by synthesizing and analyzing the results of experimental data through Taguchi method. The air-jet cooling system actually reduced flank wear of TiN coated tool by 25%.

1. 서론

최근에 고경도 재료를 연삭대신에 선삭으로 대체하려는 연구가 일어나고 있다. hard turning은 황삭가공 후 열처리된 한 부품에 대하여 연삭공정대신 선삭으로 정삭가공을 하는 것이다. 이러한 hard turning이 가능하기 위해서는 우선적으로 고경도재료를 가공할 수 있는 공구와 공작기계가 구비되어야 한다. 따라서 고정도의 회전정밀도와 강성을 위하여 공작기계는 hydrostatic bearing주축이나 needle bearing을 갖는 안내면으로 일반적으로 구성되어 있다.⁽¹⁾⁽²⁾ 또한 공구의 경우는 polycrystalline CBN(PCBN)이나 ceramic cutting tool을 사용하는 것으로 알려져 있다. 단결정mono-crystalline diamond(MCD), MCBN, sapphire의 경우는 hard turning시 공구마모가 극심하다. MCD의 경우는 비철금속가공시에는 edge를 줄여 뾰족하게 만들므로서 표면조도가 좋을지라도 철과 반응하여 마모가 가속된다⁽³⁾. 따라서 hard turning을 하기위해서 PCBN이나 세라믹 공구가 일반적으로 된다. 본 연구에서는 PCBN이나 세라믹공구대신에 가격이 저렴한 초

경이나 코팅공구를 이용하여 hard turning을 할 때 발생하는 극심한 공구마모를 줄일 수 있는 cooling system을 개발하고자 한다. 공구마모에 앞서 고경도재료 가공시 칩핑이 자주 발생하므로 칩핑이 일어나지 않는 절삭조건을 구한 후에 공구에 발생하는 열을 효율적으로 제거하여 공구수명을 연장하고자 한다. 먼저 칩핑이 없는 최적절삭 조건은 Taguchi Method로 구하였다. 그리고 열의 제거는 고경도재료 가공시 열로 인해 공구의 마모가 가속되므로 Cooling System을 사용하여야 하는데 본 연구에서는 Air Jet를 이용한 공구냉각시스템을 개발하여 효율적으로 공구의 열을 제거하였다. 마찬가지로 Taguchi Method로 냉각시스템 구성시에 공구의 마모에 영향을 줄 수 있는 인자를 고려하여 최소의 공구마모를 일으키는 최적의 냉각시스템을 구성하였으며, 절삭실험결과 공구마모의 양을 전삭절삭에 비교하여 25%이상의 공구수명향상을 이루었다.

2. Chipping이 발생하지 않을 조건선정

2.1 실험조건

이 논문에서는 고경도 재료는 열처리된 베어링강으로 Hrc62정도이다. 고경도재료 절삭시 공구는 마모에 앞서 선삭시에 칩핑이 자주 발생한다. 따라서 우선 칩핑이 발생하지 않는 절삭조건을 구한 후에 이 절삭조건에서 공구마모를 억제하고자 한다. 초경, Coated Cemented Carbides와 Cermet가 실험대상의 공구이며, 절삭속도, 피드, 절삭깊이, 칩브레이크, 절삭유 사용유무 등을 고려인자로 하여 Taguchi방법으로 No Chipping조건을 구한다.

2.2 Taguchi Method

Taguchi방법은 다음의 과정으로 이루어 진다.

- ①어떤 실험목적에 영향을 미칠 수 있는 인자(Factor)를 선택한다.
- ②각 인자 레벨(Level)선정한다.
- ③직교배열법으로 실험을 실행한다.
- ④실험데이터값을 S/N비로 전환한다.
- ⑤각 인자의 영향을 응답테이블(Response Table)로 구성하여 실험목적에 비교적 영향이 큰 인자(Strong Factor)를 선택한다.
- ⑥Strong Factor를 토대로 원하는 목적에 부합하는 조건을 구성하여 예측방정식으로 그 조건일 때 결과치를 예측한다.
- ⑦확인실험을 하여 예측치와 실제치를 비교하여 그 차가 크면 다시 실험을 고려한다.

예를 들어 간략하게 설명하면 No Chipping조건예측에서 치핑에 미칠 수 있는 인자를 고려한다. 이들 인자는 절삭 속도, 피드, 절삭깊이 등이 될 수 있다. 그리고 나서 레벨을 선정하는데 절삭속도 경우 3레벨로 할 때 레벨1을 30m/min, 레벨2를 50m/min, 레벨3를 80m/min로 선정할 수 있다. 나머지 인자도 마찬가지로이다. 레벨을 선정한 후 직교배열을 사용하게 되는데⁶⁾, 직교배열은 실험수를 줄이는 데 일반적으로 인자가 4가지이고 각 인자의 레벨이 3레벨이면 실험수는 3⁴이 된다. 그런데 직교배열로 실험하면 9번으로 예측될 수 있다. 따라서 시간과 비용이 절약될 뿐더러 많은 고려인자를 선택해야 할 경우 몇 번의 실험으로 추측하는 경우에 비해 신뢰성도 높다. 또 한가지는 외부잡음인자에 대해서도 Robust하게 실험결과를 반응한다는 것이다. 직교배열로 실험한 후 실험결과를 식(1)과 같이 S/N비로 바꾼다.

$$S/N \text{ Ratio} = -10\log(1/n(y_1^2+y_2^2+y_3^2+\dots+y_n^2)) \quad (1)$$

여기서 n은 실험반복횟수를, y_n은 반복 데이터이다.

그리고 나서 실험결과를 토대로 응답테이블을 만드는데 이는 각 인자의 레벨을 변화시킬 때 치핑에 미치는 정도를 표로 나타낸것으로 생각하면 된다. 그 후 각 인자중에서 치핑에 영향이 큰 인자(Strong Factor)를 반정도 취한다. 그다음 각 Strong Factor의 레벨중에 치핑발생이 적은 레벨을 선택하여 이를 예측방정식에 넣어서 선택된 인자레벨하에 절삭될 때 치핑발생률을 예측한다. 그리고 나서 실제로 그렇게 되는지 그 조건하에서 확인실험을

한다. 만일 예상치와 많이 벗어나면 다시 고려하여야 한다. 반복실험횟수가 많고 잡음인자를 고려하여 실험방법을 랜덤화하면 정확한 결과가 나온다.

2.3 No Chipping실험

이 실험에 사용된 장비는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. 실험장비

Cutting machine	NC Machine
Tool Holder	PCLNR/L 2020K12
Cutting Tool Type	CNMA 120408 CNMG 120408
Work Piece	열처리된 SUJ(HrC62정도)

세가지 공구에 대하여 Taguchi방법으로 실험하여 No Chipping조건을 실험하였다. 치핑에 영향을 미치는 인자는 Table 2과 같다고 생각하여 레벨을 선정하였다.

Table 2 Factor level

	A	B	C	D	E
레벨 1	Off	30	0.005	0.05	No
레벨 2	On	80	0.02	0.15	Yes
레벨 3		150	0.1	0.4	

고려인자 : 절삭유[A] 절삭속도[B](m/min)
 피드[C](mm/rev) 절삭깊이[D](mm)
 칩브레이크 [E]

각 공구에 대한 직교배열과 실험결과는 Table 3.1-3.3과 같다.

Table 3.1 Tungsten Carbides Tool 직교배열

	A	B	C	D	E	S/N비
1	1	1	1	1	1	-27.96dB
2	1	2	2	2	2	-40
3	1	3	3	3	1	-40
4	1	1	1	2	2	-13.98
5	1	2	2	3	1	-13.98
6	1	3	3	1	1	-37.5
7	1	1	2	1	1	-13.98
8	1	2	3	2	1	-40
9	1	3	1	3	2	-27.96
10	2	1	3	3	2	-40
11	2	2	1	1	1	-13.98
12	2	3	2	2	1	-40
13	2	1	2	3	1	-13.98
14	2	2	3	1	2	-40
15	2	3	1	2	1	-40
16	2	1	3	2	1	-13.98
17	2	2	1	3	1	-13.98
18	2	3	2	1	2	-40

Table 3.2 Coated Cemented Carbides Tool 직교배열

	E	B	C	D	S/N비
1	1	1	1	1	-37.5dB
2	1	2	2	2	-27.96
3	1	3	3	3	-40
4	2	1	2	3	-13.98
5	2	2	3	1	-27.96
6	2	3	1	2	-40
7	1	1	3	2	-13.98
8	1	2	1	3	-33.98
9	1	3	2	1	-40

Table 3.3 Cermet Tool 직교배열

	E	B	C	D	S/N비
1	1	1	1	1	-27.96dB
2	1	2	2	2	-40
3	1	3	3	3	-40
4	2	1	2	3	-33.98
5	2	2	3	1	-40
6	2	3	1	2	-40
7	1	1	3	2	-37.5
8	1	2	1	3	-40
9	1	3	2	1	-40

위의 직교배열에서 각 실험조건에서 4번실험을 반복하여 치핑발생횟수를 세아려 퍼센트로 환산 후 이를 다시 S/N비로 나타내었다. S/N비 즉 데시벨로 만들지 않으면 예측량이 옳이 될 수 있기때문에 S/N비로 환산한다. 주의할 점은 0%경우 S/N비로 나타낼 수 없기때문에 0%를 5%로 대체한다. 예측방정식을 이용해 예측할 때는 5%를 0%가 되게 다시 환산한다. Table 4.1-4.3은 각 공구에서 응답테이블을 나타낸다.

Table 4.1 Tungsten Carbides Tool Response Table

	A	B	C	D	E
Level 1	-28.37	-20.65	-22.98	-28.9	-25.78
Level 2	-28.44	-26.99	-26.99	-31.33	-33.66
Level 3		-37.58	-35.25	-24.98	
Delta	0.07	16.93	12.27	6.35	7.88

Table 4.2 Coated Cemented Carbides Tool Response table

	E	B	C	D
Level 1	-32.24	-21.82	-37.16	-35.15
Level 2	-27.31	-29.97	-27.31	-27.31
Level 3		-40.	-27.31	-29.32
Delta	4.93	18.18	9.85	7.84

Table 4.3 Cermet Tool Response Table

	B	C	D
Level 1	-33.15	-35.99	-35.99
Level 2	-40.	-37.99	-39.17
Level 3	-40	-39.17	-37.99
Delta	6.85	3.18	3.18

위의 응답테이블에서 치핑에 영향이 큰 인자(Strong Factor)는 세종류 공구에서 절삭속도가 가장 두드러지고 그 다음으로 피드이다. 예측방정식 η 는 Strong Factor의 치핑발생이 적은 레벨을 선택하여 구한다. 초경의 경우 Strong Factor는 절삭속도(B)와 피드(C)인데 예측 방정식

은 다음 식(2)와 같다.

$$\eta = T + (B1 - T) + (C1 - T) = -15.23dB \quad (2)$$

T는 S/N비 평균치

식(2)값을 원래 크기 즉 %로 나타내면 식(3)과 같다.

$$10^{(15.23/20)} = 5.77\% \quad (3)$$

그런데 우리는 앞서 S/N비로 나타내기위해 0%를 5%로 대체하였으므로 이를 다시 원래 크기대로 바꾸어야 하는데 식(4)와 같이 바꾼다.

$$\text{실제 치핑 예상발생률} = 100 \times (x-5)/95 = 0.81\% \quad (4)$$

따라서 초경경우에 B1(30m/min)과 C1(0.005mm/rev)조건일 때 치핑발생률은 0.81%로 예측된다. 나머지 공구도 식 (2)-(4)를 거치면 예측 치핑발생률을 구할 수 있다. Cermet경우 직교배열의 9가지의 절삭조건에서 0%치핑발생률이 없어서 식(4)를 거치지 않아도 된다. 위의 식을 따라 예측되는 치핑발생률은 다음 Table 5와 같다.

Table 5

공구	예측되는 치핑발생률
Tungsten Carbides	0.81%
Coated Cemented Carbides	3.62%
Cermet	45.45%

Table 5의 결과에서 Cermet는 고경도재료 선삭에는 부적절한 것으로 나타났다. 초경과 코팅공구중에 예측되는 것은 초경이 치핑이 적은것으로 나타나지만 Table 4.1과 4.2를 비교하면 초경은 피드가 증가할 때 치핑도 증가하는 반면 코팅공구는 반대로 감소하므로 경제적 측면에서 코팅공구를 hard turning에 적절한 공구로 선정한다. 코팅공구에서 chipping발생이 적은 절삭조건은 Table 4.2에서 치핑영향이 큰 인자 B와 C의 치핑발생이 적은 레벨 B1, C3조건이다. 나머지 인자는 영향이 적으므로 필요에 따라 선택하면 된다. 따라서 치핑발생이 적은 절삭조건은 다음과 같다.

No Chipping조건= 절삭속도 30m/min, 피드 0.1mm/rev
Coated Cemented Carbides Tool

확인실험에서 위의 조건에서 4번의 반복실험결과 0회의 치핑이 발생하여 예상치와 유사함을 알 수 있었다. 따라서 예측결과가 유효함을 있다. 뒤에 나올 실험에서 치핑발생이 적은 절삭조건에서 실험하였는데 치핑발생이 거의 없었다.

3. Air-Jet 냉각시스템

본 실험에서는 Air-Jet를 이용한 coolant system을 이용하여 공구의 마모를 줄이는 실험을 수행하였다.

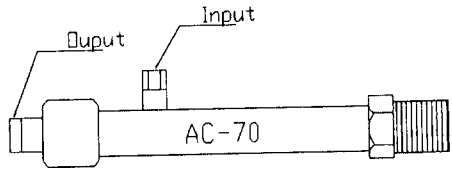


Fig 1 Air Cooler

Fig 1에서 보는 바와 같이, Air-Jet coolant system은 입구 port에 고압의 공기를 투입하여 공기의 단열팽창에 의하여 출구 port의 온도저하를 얻는 system이다. 본 연구에서는 5kgf/cm²의 압력공기가 들어가기 때문에 입구와 출구의 온도차는 이론상 60이나 실제는 20정도이다. 우측부분에 유량을 조절하는 나사가 있는데 유량이 많으면 온도낙차가 작고 유량이 적으면 온도낙차는 크다. 입구를 Compressor에 연결하여 출구에 Nozzle를 부착하여 공구에 쏘게 된다. 마찬가지로 Taguchi방법을 이용하여 No Chipping조건하에서 공구마모를 줄이는 시스템을 구성하고자 한다.

3.2 Air-Jet를 이용한 공구마모 억제실험

공구마모억제를 위한 Air-Jet시스템을 구성하기위해 Taguchi방법이 사용되는데 여기서 고려인자는 Table 6과 같다.

Table 6 Factor Level

	A	B	C	D
Level 1	1.5mm	40°	0번	10mm
Level 2	4mm	55°	7번	30mm
Level 3		70°	14번	50mm

고려인자 : 노즐지름 (A) 분사방향 (B)
분사유량 (C) 분사거리 (D)

여기서 분사방향은 Rake면으로 쏘는것으로 각도는 Rake면 기준으로 켄 각도이다. 절삭조건은 앞서 구한 No Chipping조건으로 Table 7과 같다

Table 7 Cutting Condition

Cutting Speed	35m/min
Feed	0.1mm/rev
Depth of Cut	0.15mm
Tool	Coated Cemented Carbides
Chip Breaker	없음

실험결과를 Table 8과 같다

Table 8 마모실험 식교배열

	A	B	C	D	S/N비
1	1	1	1	1	-50.88dB
2	1	2	2	2	-50.32dB
3	1	3	3	3	-52.08dB
4	2	1	2	3	-51.57dB
5	2	2	3	1	-50.68dB
6	2	3	1	2	-52.53dB
7	1	1	3	2	-50.58dB
8	1	2	1	3	-50.58dB
9	1	3	2	1	-50.24dB

위의 결과를 토대로 마찬가지로 응답테이블을 만들면 Table 9와 같다.

Table 9 Response Table

	A	B	C	D
레벨 1	-51.11	-51.66	-50.71	-50.99
레벨 2	-51.36	-50.91	-50.71	-51.18
레벨 3		-51.	-52.15	-51.41
Delta	0.25	0.75	1.44	0.42

응답테이블을 다시 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

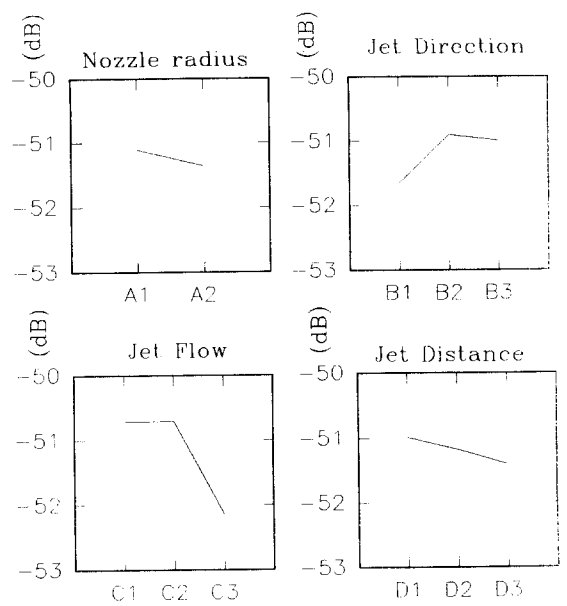


Fig 2. Response Graphics

Fig. 2를 보면 분사방향(B), 분사유량(C)이 마모억제 방향시스템에 영향이 큼을 알 수 있다. 따라서 Strong Factor는 분사유량(C)과 분사방향(B)이 된다. 따라서 마모가 적게 발생하길 cooling system은 B2와 C2가 된다. Strong factor로 예측방향

식으로 예상마모량을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= T + (B2 - T) + (C2 - T) \\ &= -51.19 + (-50.91 - (-51.19)) + (-50.71 - (-51.19)) \\ &= -50.43 \text{dB} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 결과를 실제마모량으로 바꾸면 식 (6)과 같다.

$$\text{예측 마모량} = 10^{(50.43/20)} = 332.28 \mu\text{m} \quad (6)$$

확인실험을 해보면 마모가 적을 것으로 예측되는 A1, B2, C2, D1 조건에서 선삭하면 마모결과는 290~310 μm 로 Dry Cutting 시 390~420 μm 경우보다 약 25% 줄어들음을 알 수 있다. 예측량과 실제량의 차이는 소재의 불균일성과 외부잡음인자등으로 발생한다.

4. 결론

고경도재료 선삭시 공구의 마모를 줄여서 절삭효율을 높이기 위하여 Taguchi 방법과 Air-Jet coolant system을 활용하여 최적의 절삭환경을 만드는 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공구의 재료에 따른 chipping이 발생하지 않는 절삭조건을 Taguchi 방법에 의하여 결정될 수 있었으며, 확인 실험결과 그 효용성이 입증되었다.
- 2) 고경도 재료 선삭시 공구마모를 줄이는 수단으로 Air-Jet cooling system을 이용하였는데 효율적인 시스템을 Taguchi 방법으로 구성한 결과 공구마모를 25% 향상시킬 수 있었으며 이는 Hard turning 시의 절삭시스템으로 효율적임을 알 수 있다.

후기

본 연구는 교육부 '95 기계공학분야 연구비(ME 95-E-13)에 의하여 수행되었습니다.

5. 참고 문헌

1. M. Weck, A. Wieners, "High Precision Guideways for Hard Turning Machines", *Ultraprecision in Manufacturing Engineering. Proceedings of the 3rd International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering* May 1994, Aachen, Germany PP275~280
2. Kari Harper, Matthew Davies, Alkan Donmez, "The Effects of Spindle Characteristics on Hard turning" *International Progress in Precision Engineering. proceedings of the 8th International Precision Engineering Seminar* PP343~346
3. Hitoshi Suwabe, Ken-ichi Ishikawa, Tetsuhiro Nishide, "A Study on High Efficient Vibration Drilling for Hard and Brittle Materials" *Ultraprecision in Manufacturing Engineering. Proceedings of the 3rd International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering* May 1994, Aachen, Germany PP415~418
4. A R Machado, PhD and J Wallbank, BSc, MSc, PdD, MIM, "The effect of a High-pressure coolant jet on machining" *IMEchE*. 1994, vol 208 pp29-38
5. M.Mazurkiewicz, Z.Kubala and J.Chow, "Metal Machining With High-Pressure Water-jet Cooling Assistance" *ASME Journal of Engineering for Industry* Vol. 111 pp7-12 1989.
6. Taguchi Methods. A Hands-On Approach. Glen Stuart Peace-1993
7. 강건설계를 이용한 품질공학. 김호성의 역. 민영사
8. 다투찌 방법과 통계적 공정관리를 중심으로 한 품질공학. 박성현 저. 민영사
9. 통계학. 강석복 외 편저. 형설출판사