論文 한국공작기계학회지 제9권 제2호 2000.4.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음.

환경친화적 건식 드릴링을 위한 드릴형상 및 절삭조건

김희술*, 고태조*, 오명석**

Drill Shape and Cutting Conditions for Environmentally Conscious Drilling

Hee Sool Kim*, Tae Jo Ko*, Myung Seok Oh**

Abstract

In this paper, drill shape and cutting conditions for environmentally conscious dry drilling of A319 Al-alloy are studied by experimental method. The experiment is planned with Taguchi's method that is based on the orthogonal array of design factors. The result is summarized as follows; (1) Drill geometry optimization can increase the number of holes in dry drilling , and also large helix angle and large point angle are desirable in dry drilling. (2) It is found that cutting conditions, that is, cutting speed and feed rate are closely related to the drill geometry. (3) For dry drilling of Al-alloys, drill shape and cutting conditions are selected and tested by experimental method. But it is found that the perfect dry drilling is difficult because of the machining characteristics of Al-alloys, and so new machining method such as minimal lubricant application is required.

Key Words : Environmentally Conscious Drilling(환경친화적 드릴링), Al-alloy(알루미늄 합금) Taguchi's Method(다꾸지방법), Orthogonal array(직교배열), Interaction Effect(교호작용)

1. 서 론

최근 지구를 맑고 깨끗하게 보존하기 위한 노력이 다방면에서 활발히 일어나고 있다. 그 예로서 자동차나 운송장비를 가동하기 위해서는 지금까지 주로 가솔린이나 경유 등을 사용하였으며, 이로 인하여 공기를 오염시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 깨끗한 환경을 보존하기 위해서는 운송장비의 사용횟수를 줄이거나 운송장비의 동작 수단을 전기 등을 이용한 전철 운송수단 등의 환경친화적인 방법으로 변화시키는 노력이 필요하게 된다. 기계를 제작함에 있어도 예외는 아니다. 환경을 고려한 기계제작방법을 Green Manufacturing이라고 하며 이를 위해서 이미 선진국에서는 많은 노력을 기울이고 있고, 절삭가공에서는 환경친화적인 절삭(Environmentally Conscious Machining)을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.[1-4]

절삭공정에서의 환경영향 최소화 기법으로는 현재의 공법을 변경하는 방법, 다른 공법으로 대체하는 방법 및 신제조기술을 개발하는 방법이 있다. 특히 절삭공정에서는 대부분 절삭유를 사용하고 있으며, 독일의 경우 대량생산 산업에서 절삭공구의 비용이 4%인데 비하여 절삭유에 관

* 영남대학교 기계공학부
** 영남이공대학 기계과

런된 비용이 16%(이중에서 22%가 폐처리 비용으로 소요됨)에 달하고 있다.[1] 또한, 절삭가공에 소요된 수용성 에멀젼 및 광유의 량이 650톤(1994년 기준)인 것으로 발표되었고, 년간 75만 톤의 절삭유를 폐처리하였으며, 톤당 2000DM이상의 비용을 소모하여 년간 폐처리 비용이 10억DM에 달하였다.[1]

절삭유는 냉각, 윤활, 칩 분출을 촉진하는 등의 유용한 기능을 갖지만, 절삭유에는 인체에 유해한 발암성, 독성, 피부염 등과 관련된 유해물질을 함유하고 있어 인체에 유해할 뿐 아니라 대기오염과 수질오염을 유발시키는 요인 중의 하나이다. 따라서 절삭유를 사용치 않는 환경친화적 건식 절삭공법의 개발은 대단히 중요하다.

이러한 환경친화적인 가공방법에 관련된 연구로서는 생분해성의 환경에 유해하지 않은 절삭유의 개발[2], hard turning가공법의 개발[8], 통상의 제조공정에서 발생되는 폐류의 수준을 감소시킬 수 있는 방법의 개발[3], near dry machining 및 dry machining[1, 9-11]에 대해 활발한 연구를 수행하고 있다. 이러한 환경친화적인 가공방법 중에서 절삭유를 사용하지 않고 가공하는 건식절삭법에 대해서 특히 많은 연구를 시도하고 있다. 즉 환경오염의 주범인 절삭유를 사용하지 않는 방법을 모색하는 것이다.

본 연구에서는 절삭 칩의 용융온도가 낮고 가공중 열발생 및 칩배출이 타 가공에 비해서 어려운 알루미늄의 건식절삭 방법을 시도 하고자 한다. 경량화를 목적으로 자동차 및 항공기 부품 등에서 사용 비중이 큰 A319 알루미늄 합금에 대해 절삭유를 사용하지 않고 절삭할 수 있도록 드릴의 최적형상 결정과 최적의 절삭조건의 선정을 실험적으로 연구하였다.

2. Aluminum 건식드릴가공의 문제점

다른 어떤 절삭공정에 비해서 드릴링은 복잡한 공구형상과 공작물과 공구의 상대운동이 복잡하게 이루어지며 공구와 공작물사이의 마찰이 매우 크다. 드릴링 가공은 이러한 마찰운동에 의해 발생된 열을 외부로 배출하기 힘들어서 절삭공구의 온도를 고온으로 상승시키게 되며, 동시에 공구형상의 특성상 칩 배출이 문제시되는 작업공정 중의 하나이다.[12] 드릴링 가공시의 이러한 열전달의 난해성과 칩 배출 문제는 건식드릴링시에는 그 현상이 배가되어 나타나게 된다.

이러한 문제는 결국 Al 및 Al합금의 건식 드릴링 가공시에 절삭공구와 피삭재 사이의 접촉영역에서 피삭재의 재결정온도 이상의 고온에 의해서 재료표면 및 재료 하부영역에서 손상이 발생되어 제품의 전체적 품질문제를 야기시킬 수 있다. 또한, Si 원소가 첨가된 Al합금의 경우에는 절삭공구를 과대하게 마멸시킬 수 있으며, 절삭공구의 경사면에 칩이 쉽게 응착되어 구성인선을 형성, 절삭성능의 손실을 유발시키는 현상이 있으나, 가장 큰 문제는 칩이 드릴의 홈에 융착되어 갑자기 드릴이 파괴되는 현상이다.

건식드릴링시의 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로는 30,000~70,000rpm의 고속주축, 칩 분출 형상의 개량, 우수한 다이아몬드 공구의 설계, 구멍당 0.1㎖의 절삭유공급시스템의 개발이 필요한 것으로 보고되고 있다.[4] Csellc는 드릴링시 식물성유(plant-derived oil)의 사용으로 공구수명을 연장시키고 재생비용을 줄였으며, 적은 유량의 분무 절삭유를 사용함으로써 적절한 윤활을 달성시켰으나 냉각문제는 해결하지 못하였다.[1] 또한, 미국의 어느 브레이크 제조업자는 칩을 중력에 의해 배출시키는 혁신적인 방법을 실용화 하였으며, 척에 절삭유 공급시스템을 부착시켜 8시간 동안 100㎖를 공급하여 고속 드릴링을 수행하여 구멍당 25%의 가공비용 절감을 실현하였다.[1] Kubota는 알루미늄합금(A5652)材의 습식 및 건식 드릴링 각각에 대한 칩 유동각도 및 칩 유동속도의 특성에 대해 연구하여 긴 피치형 칩 형성(chip formation of long pitch type)이 습식보다는 건식에서 더 잘 나타나는 것으로 보고하였다.[9] Smith는 TiAlN 코팅드릴로서 GC25 주철을 대상으로 건식 드릴링을 행하여 코팅부의 표면조도 및 첨가화학성분이 공구수명에 미치는 영향을 연구하였다.[10]

이러한 관점에서 절삭유를 전혀 사용치 않는 건식 드릴링시의 최적공구형상 결정과 최적의 절삭조건의 선정은 매우 중요하다.

3. 실험적 방법에 의한 최적 건식 드릴링 조건의 선정

A319 알루미늄 합금의 건식 드릴링 가공공법을 연구하기 위해서 드릴의 형상과 절삭조건이 드릴수명 및 드릴성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고, 드릴의 주요형상변수와 절삭변수들 사이의 상호작용 효과를 분석하여 최적의 드릴형상 및 절삭조건을 선정하고자 한다.

이를 위해서 드릴형상변수로는 비틀림 각도와 선단각을, 절삭변수로는 절삭속도와 이송속도를 실험변수로 선택하였다. 선택된 실험변수를 다꾸지방법[5]을 이용하여 실험계획을 수립, 실험을 수행하여 드릴형상과 절삭조건이

건식 절삭에 미치는 변수간의 교호작용을 분석한다. 또한, 드릴형상 및 절삭변수 각각의 수준변화가 건식 드릴링 수명에 미치는 영향을 실험적으로 분석한다. 이러한 실험을 통하여 A319 알루미늄 합금에 대한 건식 드릴링을 위한 최적의 드릴형상과 절삭조건을 선정 한다.

3.1 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 드릴은 고속도강(HSS) 재질이며, 여유면이 6개인 전형적인 다면드릴(multi-facet drill: MFD)로서[6-7] 직경 10mm이며, 그 외관은 Fig. 1과 같다. 또한, 한번 실험에 사용된 드릴은 재차 비틀림 각도 등의 형상변경을 할 수 없으므로 시료 드릴을 제작할 때 비틀림 각도등 형상이 각기 다른 드릴을 준비하여 실험에 사용하였다.

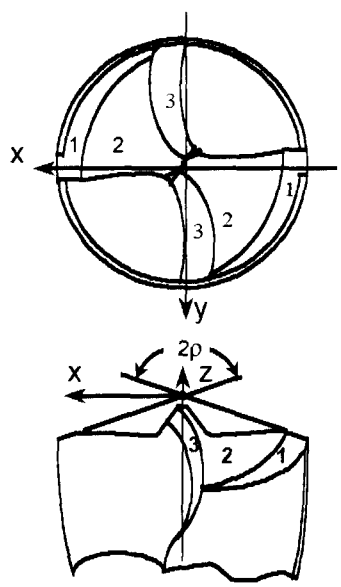


Fig. 1 Configuration of multi-facet-drill used in the experiment

Table 1 General conditions in dry drilling experiment

Item		Conditions	Remark
1. Drill	Diameter(mm)	10	
	Length(mm)	135/100	Total/Flute length
	Material	HSS	Non-coated HSS
2. Workpiece material		A319 aluminum alloy	□500×400×36t mm
3. Machine tool		MV-40E	Mori Seiki
4. Depth of cut(mm)		36	Thickness of workpiece
5. Type of feeding		Through feed	Non-step feed

사용된 공작기계는 Mori Seiki의 머시닝센터를 사용하였으며, 드릴링시에는 어떠한 절삭유도 사용하지 않는 건식 드릴링을 하였다. 또한, 실험에 사용된 공작물은 A319 알루미늄 합금으로 가로×세로×두께가 500×400×36 mm인 소재를 사용하였다. 목표로 하는 구멍의 가공깊이는 36 mm로 하였으며, 드릴이 파손될 때까지 연속적으로 드릴링을 수행하였다. 실험에 적용된 전술의 공통된 조건을 정리한 것이 Table 1이다.

3.2 드릴형상변수와 절삭조건변수와의 관계

3.2.1 드릴수명실험

드릴의 주요형상과 절삭조건들이 드릴수명에 미치는 영향을 분석하기 위하여 선택된 실험변수를 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 이용하여 실험계획을 수립하여 실험을 수행하였으며, 선택된 실험인자와 수준은 Table 2와 같다.

Table 2의 4개의 실험인자에 대한 각각 3수준의 절삭변수를 $L_9(3^4)$ 직교 배열표를 이용하여 실험계획을 수립, 각 인자와 각 수준의 9개의 실험조합에 대해 실험을 수행한 결과를 나타낸 것이 Table 3이다. 여기서 수명시험결과는 하나의 드릴로서 가공한 구멍의 숫자를 나타내며, 같은 조건에서 각각 3회 실험하여 평균을 취한 값이다. 이 표로부터 실험번호 2, 3번의 최소 1.7개로부터 실험번호 6의 최대 11.3개까지 구멍가공을 하는 것으로 드릴의 수명이 분포되어 있음을 확인하였다.

Table 2 Factors and factor levels

Factors \ Levels		level 1	level 2	level 3
A: helix angle(degree)		26	31	40
B: point angle(degree)		129	137	145
C: cutting speed	rpm	1000	3000	5000
	m/min	31.2	93.5	155.9
D: feed rate (mm/rev)		0.127	0.19	0.254

3.2.2 응답 및 분산분석

3.2.2.1 신호 대 잡음비(S/N ratio)

Table 4은 Table 3의 실험결과를 이용하여 각 실험번호별 신호 대 잡음비와 평균치 오차를 구한 것이다. 공구수명의 경우는 목적하는 값이 클수록 좋은 경우이므로 망대특성에 대한 공식을 사용하여 각 실험번호별 신호 대 잡음비로 전환시켰다.[5] 여기서 사용된 망대특성에 대한 신호 대 잡음비(η)와 신호 대 잡음비의 평균치 오차(take-

Table 3 Number of drilled holes according to orthogonal array

Factors / Test No.	Helix angle A(degree)	Point angle B(degree)	Cutting Speed C(rpm)	Feed rate D(mm/rev)	Results (# of holes)
1	(1) 26	(1) 129	(1) 1000	(1) 0.127	8.7
2	(1) 26	(2) 137	(2) 3000	(2) 0.191	1.7
3	(1) 26	(3) 145	(3) 5000	(3) 0.254	1.7
4	(2) 31	(1) 129	(2) 3000	(3) 0.0254	4.5
5	(2) 31	(2) 137	(3) 5000	(1) 0.127	4.8
6	(2) 31	(3) 145	(1) 1000	(2) 0.191	11.3
7	(3) 40	(1) 129	(3) 5000	(2) 0.191	6.0
8	(3) 40	(2) 137	(1) 1000	(3) 0.254	9.0
9	(3) 40	(3) 145	(2) 3000	(1) 0.127	8.0

Table 4 Analysis of S/N ratios

Columm / Test No.	A (helix)	B (point)	C (speed)	D (feed)	# of drilled holes	S/N Ratios(dB)	
						Original	Take off mean
1	1	1	1	1	8.7	18.79	4.52
2	1	2	2	2	1.7	4.61	-9.66
3	1	3	3	3	1.7	4.61	-9.66
4	2	1	2	3	4.5	13.06	-1.21
5	2	2	3	1	4.8	13.62	-0.65
6	2	3	1	2	11.3	21.06	6.79
7	3	1	3	2	6.0	15.56	1.29
8	3	2	1	3	9.0	19.08	4.81
9	3	3	2	1	8.0	18.06	3.79
Total					55.7	128.45	0.02

off mean, Δ)는 다음의 식(1)과 식(2)를 이용하였다.

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

여기서, n은 주어진 시험조건에서의 실험반복횟수, y_i는 특성치(구멍가공 개수)를 나타낸다.

$$\Delta = \eta_i - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\eta_i \quad (2)$$

여기서, N은 총 시험조건의 수, η_i는 각 시험조건에 대한 특성치를 나타낸다. 실험번호 2 및 3의 최소구멍가공수명에서 신호 대 잡음비가 4.61로 가장 낮은 값을, 실험번호 6의 최대구멍가공수명에서 21.06으로 나타남을 알 수 있다. 즉, 신호 대 잡음비가 높은 쪽이 잡음의 영향을 적게 받으며 수명이 양호하게 됨을 알 수 있다.

3.2.2.2 응답해석(response analysis)

각 인자수준의 효과를 분석하기 위해서 Table 4를 이용하여 인자수준별 신호 대 잡음 비, 허용차 및 드릴수명에 미치는 영향도를 분석한 것이 Table 5이다. Table 5에서 인자 레벨의 변화에 따른 공구수명 변화 폭을 나타내는 델타 값으로부터 드릴수명에 미치는 영향이 선단각, 이송속도, 비틀림각도, 절삭속도의 순으로 크게 됨을 알 수 있고, 비틀림각도의 기여도가 38.7%, 절삭속도가 44.3%로서 이 두 가지 인자가 드릴수명에 미치는 strong factors임을 확인할 수 있다. Fig. 2는 Table 4의 각 인자수준별 신호 대 잡음 비를

Table 5 Response table of dry drilling test

Levels / Factors	Levels 1	2	3	Delta	Contribu -tion(%)	Sum of Squares	Contribu -tion(%)
A: Helix angle	-14.8	4.93	9.89	24.69	33.5	341.157	38.7
B: Point angle	4.6	-5.5	0.92	10.1	13.7	52.266	5.9
C: Cutting speed	16.12	-7.08	-9.02	25.14	34.2	391.34	44.3
D: Feed rate	7.66	-1.58	-6.06	13.72	18.6	97.896	11.1
Total				73.65	100.0	882.684	100.0

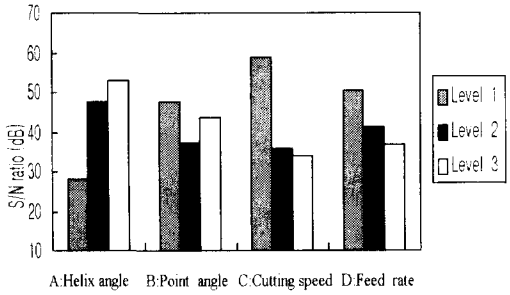


Fig. 2 Response graph of factors

Table 6 Variance analysi

Items / Factors	Degree of freedom(Φ)	Sum of Squares(S)	Average of sum of squares(V)	Variance ratio(V/F)
A: Helix angle	2	113.72	56.86	6.5
B: Point angle	2	17.42	8.71	1.0
C: Cutting speed	2	130.45	65.22	7.5
D: Feed rate	2	32.63	16.32	1.9
E: Error	0			
Total	10	294.22		
F: Pooling Error	2	17.42	8.71	

이용하여 인자별 응답을 도표화한 것이다. 이 그림으로부터 선단각, 절삭속도 및 이송속도는 1수준에서 높은 응답을 나타냄을 알 수 있고, 비틀림각의 경우는 3수준에서 높은 응답을 나타내고 있으며 이것은 비틀림각의 증대에 따라서 경사각이 증대되어 절삭을 양호하게 한 결과라고 생각된다.

3.2.2.3 분산분석

인자효과들의 상대적 크기는 각 인자들에 대해 분산분석(ANOVA)을 통하여 잘 파악할 수 있으며, 그 계산 결과를 Table 6에 나타내었다. 이 표로부터 비틀림 각도 및 절삭속도의 분산비가 선단각 및 이송속도에 비해 훨씬 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 비틀림 각도 및 절삭속도의 인자 수준범위에 대한 분산 값이 큼을 의미한다. 즉, 이러한 인자수준의 제어에 따라서 드릴수명이 현격히 달라 질 수 있음을 의미하는 것이다.

3.3 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 이용한 교호작용 분석

본 절에서는 3.2절에서 수행된 연구결과를 기초로 하여 건식 드릴링시 드릴수명에 미치는 절삭조건과 드릴형상과의 교호작용을 $L_8(2^7)$직교배열표를 이용하여 추가 실험을 행하여 조사, 관찰하여 최적의 드릴형상과 절삭조건을 찾는다. 3.2절의 3수준 실험결과에서 찾아진 최적의 인자조합 $A_3B_1C_1D_1$으로 검정실험을 행하여야 하지만, 이러한 조건이 최적의 조건으로 선택된다 하더라도 기존에 비해 생산성의 저하를 유발시키기 때문에 생산현장에 적용할 수 없는 것으로 판단되어 가공시간을 좀더 단축시킬 수 있는, 생산 현장에 적용 가능한 인자 수준에 의한 실험계획에 의해 2차 실험을 실시하여 적정의 인자조합을 재검토하였다. 즉, 실용성을 중시한 적정 절삭조건과 공구형상을 결정하고자 하였다. 새로운 실험에 사용된 요인인자의 수는 5종류이고, 수준은 각 인자별 2수준으로 하였으며 Table 7에 상세한 조건을 나타내었다.

Table 7의 5개의 실험 요인인자에 대한 드릴수명과 신호 대 잡음 비(SN비)의 결과를 나타낸 것이 Table 8이다. 이 표로부터 실험번호 5번의 최소 5.5개로부터 실험번호 2번의 최대 13개까지 구멍가공을 하는 것으로 드릴의 수명이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 3.2절의 실험조건에서의 수명산포 1.7~11.3개 보다 산포의 정도가 낮은 수준이며, 드릴수명도 증대되어 있음을 알 수 있다. 이것은 선택된 인자의 수준이 보다 최적의 수준으로 접근되었음을 의미하는 것이라 할 수 있다.

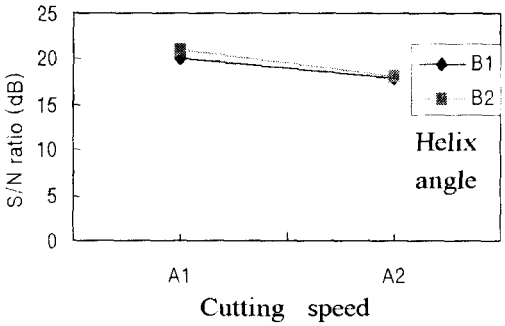
Table 7 Factors and factor levels

Factors / Level A	Cutting speed (rpm)	Helix angle B (degree)	Point angle C (degree)	Relief angle D (degree)	Feed rate E (mm/rev)
level 1	2,000	31	125	15	0.286
level 2	4,000	40	160	25	0.191

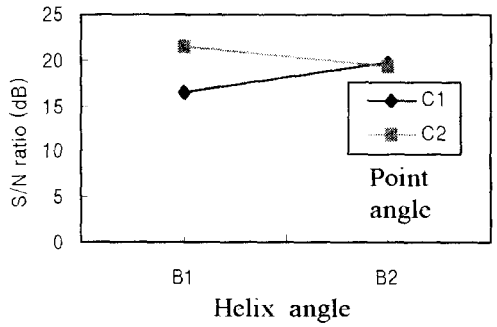
Table 8 Experimental condition and S/N ratios

Column / Test No.	1 A	2 B	3 AB	4 C	5 D	6 BC	7 E	Cutting condition	Results (holes)	S/N Ratios (dB)	
										Original	Zero Mean
1	1	1	1	1	1	1	1	$A_1(2,000)B_1(31)C_1(125)$ $D_1(15)E_1(0.286)$	8.0	18.06	-1.21
2	1	1	1	2	2	2	2	$A_1(2,000)B_1(31)C_2(160)$ $D_2(25)E_2(0.191)$	13.0	22.28	3.00
3	1	2	2	1	1	2	2	$A_1(2,000)B_2(40)C_1(125)$ $D_1(15)E_1(0.191)$	12.0	21.58	2.30
4	1	2	2	2	2	1	1	$A_1(2,000)B_2(40)C_2(160)$ $D_2(25)E_2(0.286)$	10.6	20.51	1.24
5	2	1	2	1	2	1	2	$A_2(4,000)B_1(31)C_1(125)$ $D_2(25)E_2(0.191)$	5.5	14.81	-4.46
6	2	1	2	2	1	2	1	$A_2(4,000)B_1(31)C_2(160)$ $D_1(15)E_1(0.286)$	11.0	20.83	1.55
7	2	2	1	1	2	2	1	$A_2(4,000)B_2(40)C_1(125)$ $D_2(25)E_1(0.286)$	8.0	18.06	-1.21
8	2	2	1	2	1	1	2	$A_2(4,000)B_2(40)C_2(160)$ $D_1(15)E_2(0.191)$	8.0	18.06	-1.21
total									76.1	154.19	0.0

Fig. 3은 Table 8을 이용하여 각 인자들에 대한 교호작용을 분석한 결과이다. Fig. 3(a)로부터 절삭속도와 비틀림각의 두 인자사이에는 교효작용 효과가 존재하지 않음을 알 수 있고, 절삭속도가 낮을수록 비틀림각이 클수록 각각 좋은 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 절삭속도가 낮을수록 마찰, 마멸속도가 느리며 비틀림각이 클수록 경사각이 증대되어 가공을 용이하게 하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 3(b)로부터 선단각과 비틀림각 사이에는 반향적 교호작용(antisynergistic interaction)이 존재함을 알 수 있다. 이러한 반향적 교호작용이 존재하는 경우의 최적의 조합을 얻기 위해서는 요인인자의 모든 조합에 대해 실험을 수행해야 하므로 바람직하지 못하다. 따라서 교호작용이 발생되지 않는 조건으로 더 많은 실험이 행하여 져야함을 의미하는 것이다. 또한, 3.2절에서는 선단각이 작을 때 공구수명이 우수하였으나, Fig. 3(b)에서는 선단각이 클 때 공구수명이 우수한 특성을 나타내는 상호모순이 발생됨을 알 수 있다. 이러한 모순의 발생은 절삭속도의 수준 선정범위의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 즉, 낮은 절삭속도 수준과 높은 절삭속도 수준이 혼재할 경우에는 선단각과 절삭속도의 반향적 교호작용이 발생되는 것에 의해서 절삭속도의 수준 범



(a) Cutting speed and helix angle



(b) Helix and point angle

Fig. 3 Response graph of each factor

위가 작은 것에 비해서 특성이 상이한 결과를 유발시킬 수 있음을 의미하는 것이라고 추정할 수 있다. 즉, 공구의 형상에 따른 절삭속도의 선정 내지는 절삭조건에 부합된 공구 형상의 결정이 필요함을 의미하는 것으로 판단된다. 즉, 절삭속도는 칩의 생성속도와 밀접한 관계가 있고, 선단각은 칩의 배출에 영향을 주며, 선단각이 클수록 칩 배출이 용이하여 특히 고속 가공에 효과가 있는 것으로 사료된다.

4. 드릴의 기학학적 형상결정

드릴의 중요한 기하학적 형상은 선단각, 비틀림각, 경사각 및 여유각으로서 표시되어 왔으나 최근 드릴의 끝 모양을 개선하여 여러 개의 절삭 면으로 분할한 다면 드릴(multi facet drill)을 사용하여 초기 드릴의 진입시 가공의 불안을 해소하고, 가공 정밀도 및 공구 수명을 획기적으로 향상시키고 있다. 본 장에서는 이러한 제 요소들을 변화시켜 건식 절삭에 최적인 드릴형상을 결정 한다.

이에 대한 최적조건을 검토하기 위하여 3장의 실험결과를 이용하여 Table 9와 같이 절삭조건변수는 일정하게 하고 드릴형상에 관련된 요인인자 3가지에 대하여 각각 2수준의 직교배열 실험계획을 수립하였다. 여기서, 절삭조건변수는 드릴 형상변수와의 교호작용효과를 배제시키기 위하여 일정하게 하였고, 단위 시간당 칩의 제거 량은 생산성에 부합되는 45㎤/min(드릴의 단면적*절삭회전수*이송속도= 45 ㎤/min)을 만족하는 조건으로 하였다.

Table 10은 Table 9의 요인인자 및 수준을 가지고 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 이용하여 실험계획을 수립하고 실험을 수행한 결과를 나타낸다.

Fig. 4는 Table 10의 실험결과를 이용하여 각 요인인자의 수준별 응답성을 도표로 나타낸 것이다. 이것으로부터 최적의 드릴형상변수의 조합은 $A_2B_2C_2$임을 알 수 있다. 즉, 비틀림각, 선단각 및 비틀림각와 선단각의 교호가 드릴링의 수명에 큰 영향을 미치고, 비틀림각, 선단각 및 여유각이 클수록 공구수명에 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있다.

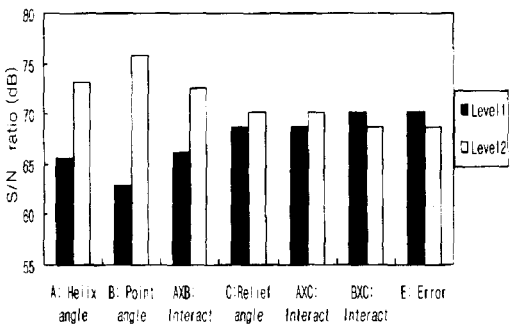


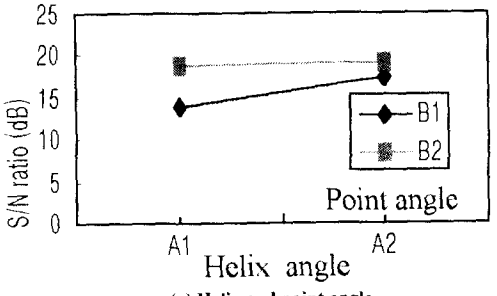
Fig. 4 Response graph of factors

Table 9 Factors and factor levels

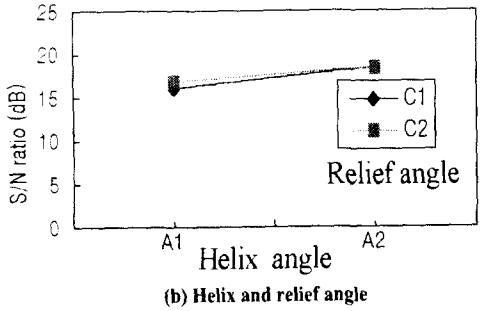
Factors / Level	Helix angle A (degree)	Point angle B (degree)	Relief angle C (degree)	Cutting speed (rpm)	Feed rate E (mm/rev)
level 1	31	129	15	3,000	0.191
level 2	39	160	25	3,000	0.191

Table 10 Orthogonal array and S/N ratios

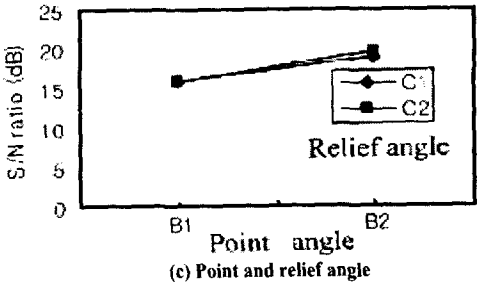
Column / Test No.	1 A	2 B	3 AB	4 C	5 AC	6 BC	7 E	Drill geometry	Results (holes)	S/N Ratios (dB)
1	1	1	1	1	1	1	1	$A_1(31)B_1(129)C_1(15)$	5.0	13.98
2	1	1	1	2	2	2	2	$A_1(31)B_1(129)C_2(255)$	5.0	13.98
3	1	2	2	1	1	2	2	$A_1(31)B_2(160)C_1(15)$	8.0	18.06
4	1	2	2	2	2	1	1	$A_1(31)B_2(160)C_2(25)$	9.5	19.55
5	2	1	2	1	2	1	2	$A_2(39)B_1(129)C_1(15)$	7.5	17.50
6	2	1	2	2	1	2	1	$A_2(39)B_1(129)C_2(25)$	7.5	17.50
7	2	2	1	1	2	2	1	$A_2(39)B_2(160)C_1(15)$	9.0	19.08
8	2	2	1	2	1	1	2	$A_2(29)B_2(160)C_2(25)$	9.0	19.08
total									59.5	138.73



(a) Helix and point angle



(b) Helix and relief angle



(c) Point and relief angle

Fig. 5 Response graph of each factor

Fig. 5는 Table 10을 이용하여 각 공구형상 인자사이의 교호작용을 나타낸 것이다. 그림으로부터 비틀림각과 선단각 인자사이에는 동향적 교호작용(synergistic interaction)이 존재하고(Fig. 5(a)), 여유각과 비틀림각(Fig. 5(b)) 및 여유각과 선단각(Fig. 5(c)) 인자사이에는 교호작용이 존재하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 본 실험에서 선정된 최적의 드릴형상변수의 조합, $A_2B_2C_2$ 수준의 조합을 최적 공구형상의 조건으로 결론 지을 수 있다고 판단된다.

5. 절삭속도와 이송속도의 결정

드릴링 절삭조건에서의 주요한 관심사는 이송속도(혹은 칩 두께) 및 주축의 회전수(절삭속도)이다. 두꺼운 칩은 하나의 빔(beam) 형태로 될 수 있고, 새로이 생성되는 칩이 칩 배출을 담당하게 되며 점차 칩 배출력이 과중하게 된다. 두께가 엷은 칩은 가볍고, 원심력에 의해서 쉽게 배출될 수 있으나 여러 조각으로 된다. 절삭속도가 클수록 원심력은 증대하고 칩의 두께는 엷어진다. 이러한 관점에서 이송속도와 절삭속도를 변화시키면서 실험을 수행하여 최적의 절삭조건을 선정하여야 한다.

실험에 사용된 드릴형상 변수는 전 절의 실험결과에서 드릴링 수명에 가장 유리한 특성을 나타낸 $A_2B_2C_2$ 수준(비틀림각 39°, 선단각 160°, 여유각 25°)인 드릴을 사용하였으며, 절삭조건변수는 실용성을 중시하여 칩 배출을 45㎤/min을 만족시키는 절삭속도와 이송속도의 조합으로 구성시켰다. 세부적인 절삭속도와 이송속도 및 그 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다.

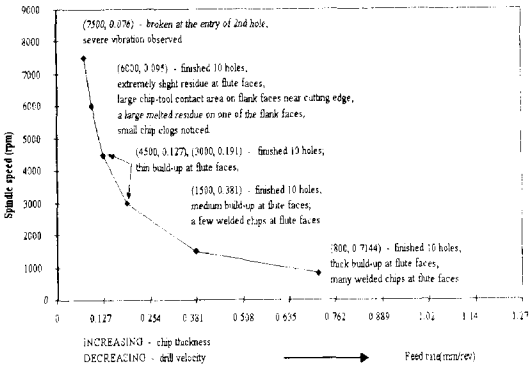


Fig. 6 Test conditions and results of dry drilling

Fig. 6으로부터 절삭속도가 높을수록 가볍고 긴 칩, 구성인선이 적고 칩의 용융이 감소됨을 알 수 있다. 그리고 높은 절삭속도에서는 원심력의 증대와 칩의 무게감소로 인하여 칩의 배출을 현저히 개선시킴을 알 수 있다. 반면에 극도로 높은 절삭속도(7500rpm)에서는 연속형에 가까운 칩과 구성인선의 발생이 적으나 여유면에서의 칩과 공구의 상호작용과 가혹한 공구의 진동이 주 관심사로 됨을 알 수 있었다. 또한, 적정 절삭조건의 영역이 절삭속도 3000~4500rpm(94.25~141.7 m/min)과 이송속도 0.127~0.191 mm/rev인 것으로 알 수 있다.

6. 결 론

A319 알루미늄 합금의 건식드릴링을 위한 드릴의 기하학적 형상 및 최적절삭조건의 선정에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 드릴의 최적형상은 비틀림각 39°, 선단각 160°, 여유각 25°인 드릴임을 확인하였다.

(2) 칩 배출율 45㎤/min을 만족시키는 최적의 절삭조건은 절삭속도 94.25~141.7 m/min, 이송속도 0.127~0.191 mm/rev임을 알 수 있었다.

(3) 환경친화를 목적으로 절삭유를 사용하지 않고 건식으로 알루미늄 합금을 드릴링 가공하기 위하여 드릴형상을 설계하고, 최적의 절삭조건을 설정하여 절삭가공을 수행하였다. 그러나 알루미늄 가공의 특성으로 인하여 완벽한 건식가공은 힘이 들며, 최소윤활유 사용 절삭방법 등의 새로운 절삭 방법의 모색이 필요하다.

참 고 문 헌

(1) Cselle, T., "New Directions in Drilling", Manufacturing Engineering, pp.77-80, Aug 1995.

(2) Koelsch, J. R., "Lubricity vs the Environment Cascades of Cleaniness", Manufacturing Engineering, pp.50-58, May 1997.

(3) Munoz, A. A., Sheng, P., "An Analytical Approach for Determining the Environmental Impact of Machining Processes", J. of Materials Processing Technology, Vol. 53, No.3-4, pp.736-758, Nov. 1995.

(4) Aronson, R. B., "Why Dry Machining", Manufacturing Engineering, pp.33-36, Jan 1995.

(5) Peace, G. S., Taguchi Methods : a hands-on approach, Addison-Wesley Publishing Company, pp.292-311, 1993.

(6) Wu, S. M. and Shen, J. M., "Mathematical Model for Multi-facet Drills", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 105, pp. 173-182, 1983.

(7) Chen, L. H. and Wu, S. M., "Further Investigation of Multi-facet Drills(MFD's)–Mathematical Models, Methods of Grinding, and Computer Plotting", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 313-324, 1984.

(8) 전준용, 고태조, 김희술, 오명석, "단속 하드터닝에서 절삭성과 표면품위에 관한 연구", 한국정밀공학회 1998년도 추계 학술대회 논문집, 서울, 서울시립대학교, pp. 169-172, 1998.

(9) Kubota, H., "Investigation of Chip Formation on Drill Edge under Wet and Dry Cutting", 日本機械學會論文集 (C編), 64卷 620 , pp. 1435-1441, 1998.

(10) Smith, I. J., Gillibrand, D., Brooks, J. S., M nz, W. D., Harvey, S., Goodwin, R., "Dry Cutting Performance of HSS Twist Drills coated with Improved TiAlN", Surface and Coatings Technology90, pp. 164-171, 1997.

(11) Lugscheider, E., Knotek, O., Barimani, C., Leyendecker, T., Lemmer, O., Wenke, R., "Investigations on Hard Coated Reamers in Different Lubricant Free Cutting Operations", Surface and Coatings Technology90, pp. 172-177, 1997.

(12) 김남훈, 이용성, "드릴가공에서 강재의 피삭성에 관한 연구", 한국공작기계학회지, 제5권 제4호, pp. 98-107, 1996.