

드릴의 선단각, 나선각 및 가공조건이 가공성에 미치는 영향

이영식*, 정석주**

The Effect of Drill Helix Angle, Point angle, and Cutting Conditions on the Drilling Performance

Lee Young-Sik*, Chung Suk-Choo**

Abstract

The optimal drill helix angle, point angle, and cutting conditions are recommended in the study so as to maximize the drilling performance by investigating the experimental results concerning with the state of chip formation, roundness of machined holes, and geometry of projected burr at hole exit, which are examined under the conditions of various helix angles, drill point angles of twist drill, cutting speeds, and feeds in operational parameters.

In the easiness of chip escape, the helical type of chip is produced when a helix angle is 30° , drill point angle 118° , 140° and feed is set between 0.1 and 0.15mm/rev. Roundness of machined hole is improved when the helix angle is 37° , drill point angle is 118° , and feed is 0.15 mm/rev. The height of projected burr at the button of machined hole increases when the drill point angle and helix angle becomes large.

Keywords : State of chip formation(칩의 형상), Roundness(진원도), Burr(버어)

1. 서론

최근 현장에서는 기계가공의 자동화 및 무인화를 추구하기 위하여 우발적인 절삭공구의 손상을 미연에 방지하거나 적시에 검출하여 항상 정상적이고 안정된 상태의 절삭공구를 유지하는 것이 필수적이다. 그러나 공구가 손상되는 현상은 돌발적인 경우가 많고 지배 인자가 다양하므로 이를 일목요연하게 표현하거나 해석, 고찰하는데는 많

은 어려움이 뒤따른다. 이 중에서 드릴에 의한 구멍가공시 중점적으로 논의되고 있는 것은 절삭저항과 드릴 수명, (1)(2)(3)(4) 드릴의 우발적인 파괴 방지 및 적절한 검출기술 (5), 마멸 특성, (6) 칩(chip)의 처리 문제 (7)(8)(9) 및 이들을 종합적으로 검토하려는 연구가 보고된바 있다. 본 논문에서는 드릴가공시 요구되는 조건 즉, 용이한 칩처리, 가공 정밀도, 버어의 생성방지 등에 적합한 드릴형상 및 절삭조건 선택을 위하여, 고속도강 트윈스트 드릴을 대상으로

* 성남기능대학 생산기계기술학과 교수

** 서울산업대학교 기계설계학과 교수

나선각, 선단각, 절삭속도, 이송량을 다양하게 변화시키면서 드릴가공시 요구되는 조건들에 수렴될 수 있는 칩 처리성, 진원도 및 버어 측정 실험을 수행 하였으며, 이들 실험을 통하여 요구조건에 최적한 드릴형상 및 절삭조건을 탐색하였다.

2. 관련 이론

2.1 드릴가공시 생성되는 칩의 형상

일반적으로 나선각이 작아지면 칩 배출이 좋아지고, 선단각이 커지면 칩이 두꺼워지는 경향을 나타내지만 나선각과 선단각뿐만아니라 가공조건에 따라서 칩의 형상은 다양하게 나타난다. 트위스트 드릴(Twist Drill)로 구멍을 가공할 때 생성되는 칩의 형상은 다음과 같은 6가지로 구분⁽¹⁰⁾하였다. Fig.1에 칩의 형상을 나타내었다.





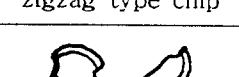
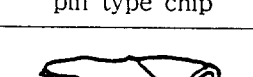
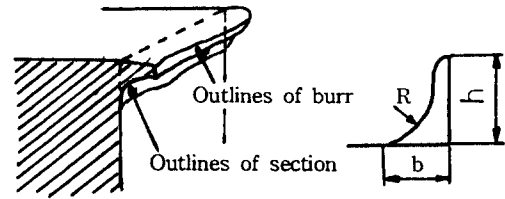
	
helical type chip	long pitch type chip
	
zigzag type chip	pin type chip
	
sector type chip	cutting-off type chip

Fig.1 formation of chips.

2.2 버어(Burr)의 생성

알루미늄이나 그 합금으로된 연질금속을 드릴가공할 때에는 많은 버어(burr)가 발생하는데 이것을 제거하는 데에는 많은 시간이 필요하다. 이같은 시간을 줄이기 위하여 버어의 발생이 문제시 되는 작업에서는 버어가 작게 발생하는 조건을 선택할 필요가 있다.

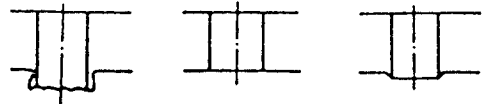
Fig.2 (a)는 버어의 외관, Fig.2 (b)는 버어의 단면형상에 대한 치수를 표현한 것이다.



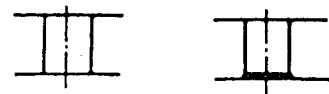
(a) Outside view of burr (b) Section of burr

Fig.2 Basic expression for the form & size of the burr.

버어의 기본유형은 압출형(Extruding type), 타발형(Punching type), 압출 및 타발형(Extruding & Punching type)의 3가지로 분류되며,⁽¹¹⁾ 가공물 재질에 따라 가공상태는 Fig.3과 같은 5가지의 경우로 취급할 수 있다.



(a) extrude (b) extrude & (c) punching type
type punching type



(d) punching type (e) punching type

Fig.3 Formation of drilling burr.

3. 실험

3.1 실험장비

본 실험에 사용한 실험장비는 Fig.4에 제시된바와 같이 드릴작업에 (주)세일 TNV-40A 모델의 머시닝 센터가 사용되었으며, 버어의 크기 측정에는 Mitutoyo 23-Z 모델의 전기마이크로미터를 사용하였다.

Kind of apparatus	CNC milling machine	Electric micrometer
Manufacture	SAEIL	Mitutoyo
Model	TNV-40A	23-Z
Capacity	Dimension : 500*400*400 (mm) Spindle speed : 100-4000 (rpm)	Min. : 0.0001(mm) Max. : 600(mm)

Fig.4 List of machine and measurement apparatus.

3.2 시편 재질 및 공구 규격

본 실험에 사용한 시편의 재질은 기계구조용 탄소강 (SM45C)이 사용되었고, 사용한 공구는 지름 12mm 고속도강 두출홀 트위스트 드릴을 나선각(Helix angle) 20°, 30°, 37°와 선단각(Point angle) 100°, 118°, 140°의 각각의 조합에 의한 9가지 종류의 규격을 갖도록 제작한 형상을 대상으로 하였다. 사용공구의 규격을 Fig.5에 나타내었다.

Material	Diameter	Helix angle	Drill point angle
SKH9	12(mm)	20°	100°
			118°
			140°
		30°	100°
			118°
			140°
		37°	100°
			118°
			140°

Fig.5 Kinds of drill geometries used for test tools.

3.3 실험 조건 및 방법

3.3.1 칩 처리성 실험 조건 및 방법

일반적으로 나선각이 작아지면 칩 배출이 좋아지고, 선단각이 커지면 칩이 두꺼워지는 경향을 나타내지만, 본 실험에서는 SM45C재질을 Ø12mm 고속도강재 드릴로 가공시 드릴 형상에 따라 어떤 영역의 절삭조건에서 어떤

형상의 칩이 생성되며, 칩 처리가 가장 용이한가를 알아보기 위하여 수직형 머시닝 센터(세일기계, TNV-40A)에서 절삭속도 20, 25, 30, 35, 40, 45m/min, 이송 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3mm/rev로 변화시키고 2mm 마다 스톱을 주고 가공하며 칩을 수집하였고, 수집된 칩을 가공조건별로 배열하여 촬영하였으며, 이 촬영된 사진을 놓고 양호한 절삭조건에서 생성되는 칩인 원추나선형 칩이 생성된 영역을 분석하였다.

3.3.2 진원도 측정 실험 조건 및 방법

진원도는 드릴공구 연삭시 연삭정도에 따라 많은 차이가 날 수 있으므로 재연삭된 드릴의 경우는 본 측정실험의 대상에서 제외하였으며, 드릴공구 전문 생산업체에서 제작완성된 선단각이 118°이고 나선각이 20°, 30°, 37°인 3종류의 드릴만을 선정하여, 정밀도가 요구되는 곳에 사용되는 재질인 6061알루미늄합금 시편을 가공한 경우에 적용하였다. 이때 가공조건은 이송을 0.15mm/rev로 일정하게 하였고, 절삭속도는 125, 150, 175, 200m/min의 4가지를 사용하였으며, 진원도의 측정값은 진원도 측정기에서 최소영역중심법으로 측정된 값을 진원도값으로 하였다.

3.3.3 버어 크기 측정 실험 조건 및 방법

본 실험은 버어 발생문제가 중요시 되는 2017알루미늄 재질의 시편들을 CNC머시닝센터에서 주축 회전수 1000rpm, 이송 0.2mm/rev로 일정하게 주고 가공하는 경우를 대상으로 하였다. 실험조건으로는 드릴의 나선각과 선단각이 각각 다른 9종류의 드릴을 사용하는 각각의 경우에 대해 깊이 15mm의 관통구멍을 가공하여, 구멍의 출구쪽에 생긴 버어(Exit burr)를 측정하는 것을 대상으로 하였다. 이때 버어의 크기는 스펀들을 가진 지렛대식 전기마이크로미터 검출기를 스탠드에 부착한후 버어의 돌출부위 원호를 등간격의 6개소로 분할한 후 각 부분의 높이를 측정하였으며, 이들 6개 값들의 평균값을 µm단위로 나타낸 값을 버어의 높이로 하였다.

4. 실험 결과 고찰

4.1 드릴의 형상 및 가공조건과 칩 처리성

Fig.6은 공구형상별 절삭속도 20, 25, 30, 35, 40, 45(m/min)와 이송 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25,

0.3(mm/rev)으로 절삭조건이 변할 때 생성된 칩의 형태를 나타낸 것이고, Fig.7에는 양호한 조건에서 생성되며 자발적으로 구멍 밖으로 유출되는 원추나선형 칩이 생성되는 절삭조건을 나타냈다. Fig.6에서 칩이 없는 부분은 실험도중에 드릴이 가공조건을 이기지 못하고 파손됨으로 인하여 더이상 칩을 수거하지 못한 부분이다.

Fig.6과 Fig.7에서 (a)는 나선각 20°, 선단각 100°인 드릴로 위와 같은 절삭조건에서 드릴 가공한 경우인데 절삭속도 20, 25, 30m/min에서는 이송이 0.05mm/rev로 작은 경우에 긴피치형 칩이 나타나고 있으며, 절삭속도가 35, 40, 45m/min로 높아짐에 따라 0.05, 0.1mm/rev의 이송조건까지 긴피치형 칩이 나타나고 있다. 또 가장 이상적인 절삭조건으로 원추나선형 칩이 나타나 추천할만한 절삭속도와 이송의 범위는 절삭속도 30m/min, 이송 0.1mm/rev와 절삭속도 35, 40, 45m/min, 이송 0.15mm/rev의 조건으로 비교적 좁게 나타났으며, 이것보다 절삭속도에 비하여 이송이 큰 영역에서는 절단형 칩이 나타나고 있어 드릴의 기하형상 측면에서 바람직하지 못한 것으로 파악된다.

(b)는 나선각 20°, 선단각 118°인 드릴로 위와 같은 절삭조건에서 드릴가공한 경우인데 절삭속도 25, 30m/min, 이송 0.1, 0.15, 0.2mm/rev인 절삭조건에서 원추나선형 칩이 나타났으나 이 경우도 원추나선형 칩이 생성되는 범위가 좁게 나타나 드릴의 기하형상 측면에서 바람직하지 못한 것으로 파악된다.

(c)는 나선각 20°, 선단각 140°인 경우인데, 이 경우에는 선단각이 118°의 경우보다 절삭속도가 높은 35, 40, 45m/min, 이송 0.15, 0.2mm/rev의 절삭조건에서 원추나선형 칩이 나타나고 있다. 즉 선단각이 118°보다 크거나 작아지면 절삭속도를 118°의 경우보다 1.5배정도 높여야 원추나선형 칩이 생성되는 것으로 고찰 되었다.

(d)는 나선각 30°, 선단각 100° 드릴로 위와 같은 절삭조건에서 드릴가공한 경우인데 20, 25, 30m/min의 낮은 절삭속도에서는 이송이 0.2mm/rev보다 크면 절삭저항이 과다하여 절단형 칩이 나타날뿐만 아니라 드릴의 파손이 많이 나타나고 있으며, 절삭속도 45m/min, 이송 0.05mm/rev와 절삭속도 45 m/min, 이송 0.05, 0.1mm/rev의 절삭조건에서는 긴피치형 칩이 나타나고 있다. 이밖에 절삭속도 30, 35, 40, 45m/min이고, 이송 0.05, 0.1mm/rev의 절삭조건에서는 원추나선형 칩이 나타나고 있어 비교적 양호한 드릴의 기하형상인 것으로 고찰된다.

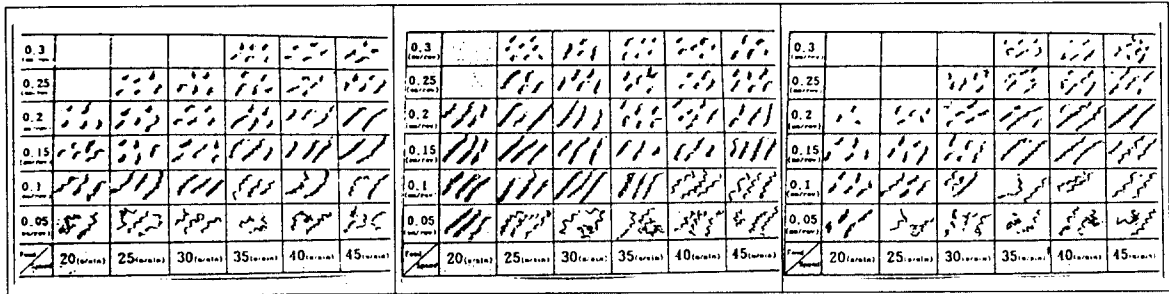
(e)는 표준드릴에서 일반적으로 사용하고 있는 나선각 30°, 선단각 118°인 드릴의 경우로 절삭속도 20, 25m/min에서는 0.05~0.3mm/rev의 모든 이송조건에서 원추나선형 칩이 나타나고 있으며, 절삭속도가 30m/min이상 높아지면 0.1~0.15mm/rev보다 작은 이송조건에서는 긴피치형 칩이 나타나고, 이보다 높은 이송 조건에서는 절단형 칩이 나타나고 있어 절삭속도 20, 25m/min에서는 0.05~0.3mm/rev의 비교적 낮은 절삭속도 영역에 적합한 드릴의 기하형상인 것으로 고찰된다.

(f)는 나선각 30°, 선단각 140°인 드릴로 가공한 경우인데 절삭속도가 35m/min이상이며, 이송 0.05mm/rev인 절삭조건에서는 긴피치형 칩이 나타나고 있으며, 0.25mm/rev이상에서는 절삭속도 20~45m/min의 모든 조건에서 절단형 칩이 나타나고 있다. 원추나선형 칩이 나타나는 범위는 이송이 0.1mm/rev이면 절삭속도 20~35m/min, 이송이 0.15mm/rev이면 절삭속도 20~45m/min의 모든 영역, 이송이 0.2mm/rev이면 절삭속도 30~45m/min의 절삭조건으로 비교적 넓은 범위에서 원추나선형 칩이 나타나고 있음을 알 수 있다.

(g)에서 (i)까지는 나선각 37°, 선단각 100°, 118°, 140°인 드릴로 가공한 경우인데 이 경우에는 같은 원추나선형 칩이라도 비틀림이 크게 나타난 특징을 보이고 있으며, 0.2mm/rev이상의 이송조건에서는 절단형 칩이 나타날뿐만 아니라 드릴이 파손되어 칩을 수거하지 못한 영역이 많이 나타나고 있는데 이는 나선각이 커짐에 따라 드릴이 약해진 원인에 의한 것으로 생각된다.

(g)에서 이송이 0.05mm/rev이며 절삭속도가 30, 35, 40, 45m/min의 조건에서는 다른 경우에는 볼 수 없는 거의 직선에 가까운 긴 피치의 칩이 나타났고, 이송이 0.2mm/rev이상이면 절단형이 나타나고 있으며, 절삭속도 25~45m/min, 이송 0.1, 0.15mm/rev의 절삭조건에서 원추나선형 칩이 나타나고 있다. (h)도 (g)와 비슷한 양상을 보이고 있으며, (i)는 0.1mm/rev의 이송 조건에서는 모든 절삭속도 즉, 20~45m/min에서 원추나선형 칩이 나타나고 있으나 0.15mm/rev이상의 이송조건에서는 절단형 칩이 나타나 이 드릴들은 SM45C재 절삭에는 적합하지 못한 기하형상인 것으로 파악된다.

Fig.6과 Fig.7에서 공통적인 현상은 절삭속도에 비하여 이송이 큰 경우에는 절단형 칩이 나타나고, 절삭속도와 이송이 적절한 경우에는 원추나선형 칩이 나타내며, 절삭속도에 비하여 이송이 작은 경우에는 긴피치형 칩이 나타남을 알 수 있다.



Helix angle : 20°
Drill point angle : 100°

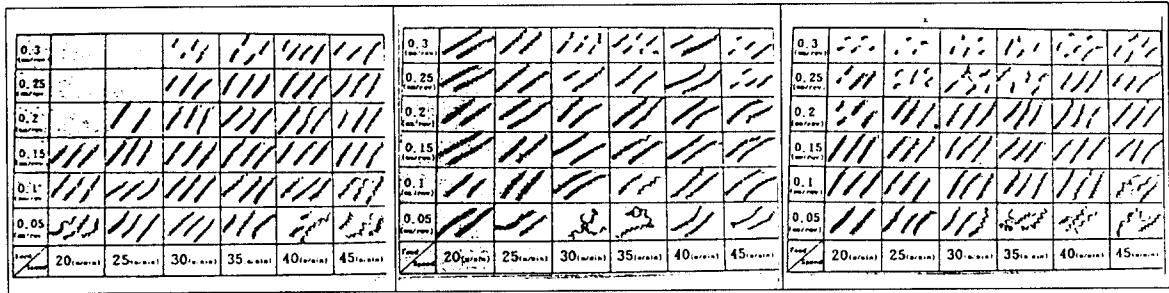
(a)

Helix angle : 20°
Drill point angle : 118°

(b)

Helix angle : 20°
Drill point angle : 140°

(c)



Helix angle : 30°
Drill point angle : 100°

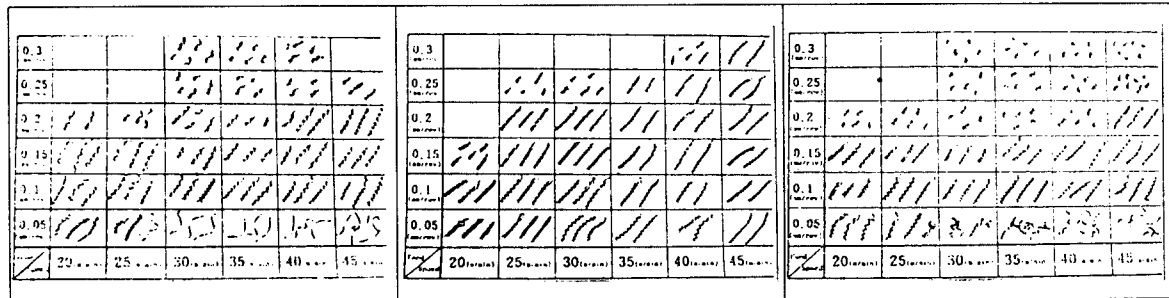
(c)

Helix angle : 30°
Drill point angle : 118°

(b)

Helix angle : 30°
Drill point angle : 140°

(d)



Helix angle : 37°
Drill point angle : 100°

(g)

Helix angle : 37°
Drill point angle : 118°

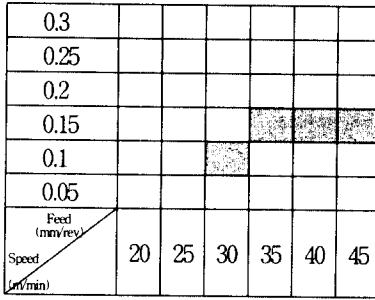
(h)

Helix angle : 37°
Drill point angle : 140°

(i)

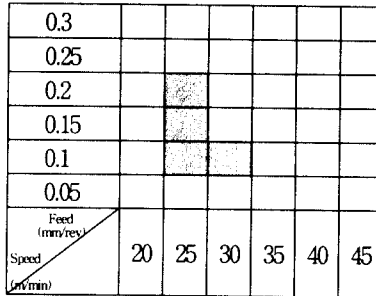
Workpiece material : SM45C
Drill diameter : 12mm

Fig. 6 Configuration of chip formation according to cutting speed and feed.



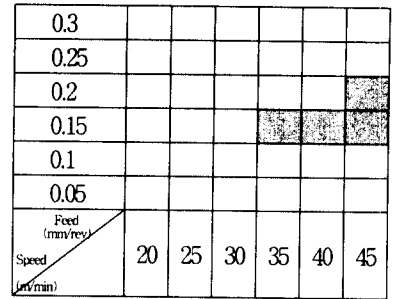
Helix angle : 20°
Drill point angle : 100°

(a)



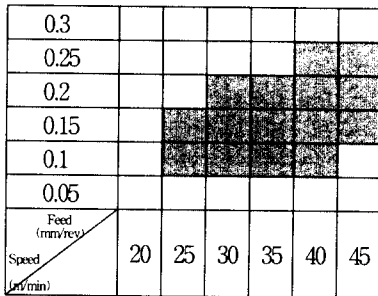
Helix angle : 20°
Drill point angle : 118°

(b)



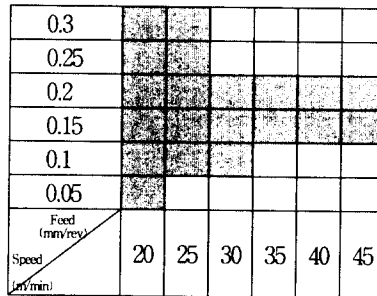
Helix angle : 20°
Drill point angle : 140°

(c)



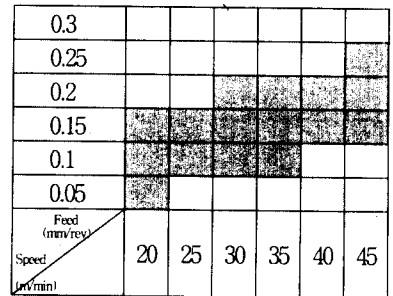
Helix angle : 30°
Drill point angle : 100°

(d)



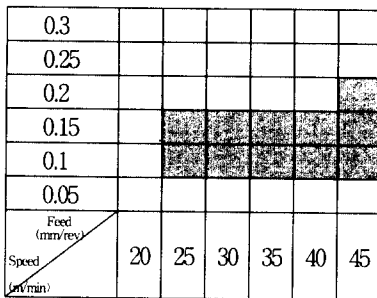
Helix angle : 30°
Drill point angle : 118°

(e)



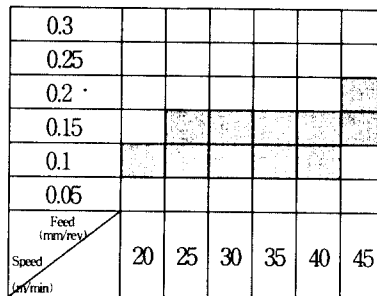
Helix angle : 30°
Drill point angle : 140°

(f)



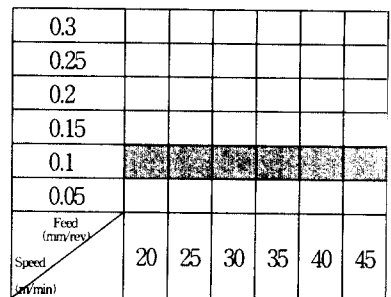
Helix angle : 37°
Drill point angle : 100°

(g)



Helix angle : 37°
Drill point angle : 118°

(h)



Helix angle : 37°
Drill point angle : 140°

(i)

Workpiece material : SM45C
Drill diameter : 12 mm

Fig.7 Regional diagram of helical type chip appearance.

Fig.8은 원추나선형 칩이 나타난 드릴의 형상별 절삭속도와 이송의 영역을 나타낸 것이며 여기에서 다음과 같은 점을 알 수 있었다. 나선각을 기준으로 보았을 때 칩처리가 용이한 영역이 가장 넓은 드릴의 형상은 나선각이 30°이고 선단각이 118°, 140°인 형상의 드릴이고, 칩처리가 용이한 영역이 가장 좁은 드릴의 형상은 선단각과 무관하게 나선각이 20°인 드릴임을 알 수 있으며, 나선각이 37°인 경우는 20°와 30°인 경우의 중간정도로 칩처리가 용이한 영역이 존재함을 알 수 있다. 선단각에 따른 영역은 큰 차이는 없지만 선단각이 커질수록 칩처리가 용이한 영역이 많아짐을 알 수 있다. 또한 칩처리가 용이한 이송은 절삭속도가 증가하면 약간(0.05mm) 증가시킬 수 있으나 전반적으로 0.1~0.15mm/rev의 범위가 가장 용이한 영역이며, 절삭속도는 30~45m/min로 관찰되었다.

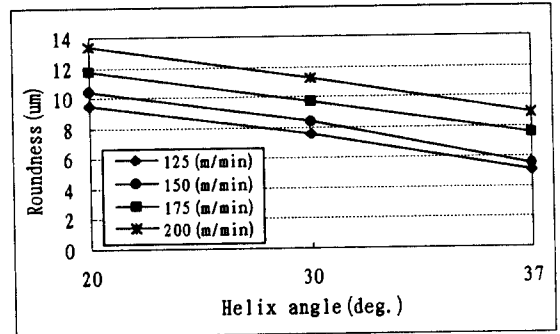
Drill type		Recommended feed values (mm/rev)					
Helix angle	Drill point angle	Grade of cutting speed (m/min)					
		20	25	30	35	40	45
30°	100°			0.1	0.15	0.15	0.15
	118°		0.1~0.2	0.1			
	140°				0.15	0.15	0.15~0.2
30°	100°	0.1	0.1~0.15	0.1~0.2	0.1~0.2	0.1~0.25	0.15~0.25
	118°	0.05~0.3	0.1~0.3	0.1~0.2	0.15~0.2	0.15~0.2	0.15~0.2
	140°	0.05~0.15	0.1~0.15	0.1~0.2	0.1~0.2	0.15~0.2	0.15~0.25
37°	100°		0.1~0.15	0.1~0.15	0.1~0.15	0.1~0.15	0.1~0.2
	118°	0.1	0.1~0.15	0.1~0.15	0.1~0.15	0.1~0.15	0.15~0.2
	140°	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Fig.8 Recommend feed value used in experiment of helical type chip.

4-4. 드릴형상과 진원도

Fig.9는 나선각과 절삭속도의 변화에 따른 진원도 측정값을 나타냈다. 여기에서 절삭속도와 진원도의 관계는 절삭속도가 125, 150m/min에서는 진원도값의 차가 작게 나타나지만 175, 200m/min으로 높아짐에 따라 진원도값의 차가 점점적으로 크게 나타났다. 그러나 전체적으로 보면 절삭속도가 높아지면 진원도가 나빠지는 현상을 보이고 있다. 나선각의 크기와 진원도의 관계는 나선각이 커지면 진원도값이 점점적으로 작게 나타났다. 즉 진원도

를 좋게 하려면 나선각이 37° 정도 큰 드릴을 사용하여 절삭속도는 150m/min이하로 하는 것이 효과적인 것으로 관찰되었다. 이것은 나선각이 커지면 절삭저항의 드리프트가 작아져 안정된 절삭이 이루어지므로 진원도가 좋아지고, 절삭속도가 175m/min이상 높아지면 기계적인 진동이 발생하여 진원도가 나빠진 것으로 생각된다.

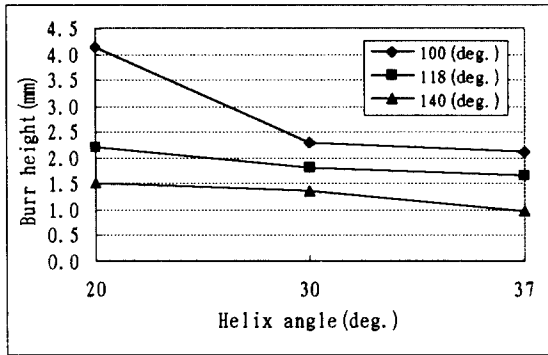


Workpiece material : Al(6061)
 Drill diameter : 12 mm
 Drill point angle : 118°
 Feed : 0.15 mm/rev

Fig.9 Comparison of roundness in machined holes under conditions of helix angle and cutting speed.

4-5. 드릴형상과 버어 높이

Fig.10은 나선각과 선단각의 변화에 따른 구멍의 돌출 버어 높이의 측정값을 나타낸다. 여기에서 선단각별 버어 높이는 선단각 100°인 경우 나선각이 20°일 때 가장 크고, 30°로 커지면 상당히 작아졌으며, 37°로 더욱 커지면 약간 작게 나타났다. 선단각 118°, 140°인 경우 나선각이 커지면 약간씩 작게 나타났다. 또한 나선각별 버어 높이는 나선각 20°인 경우 선단각 100°일 때 가장 크고, 선단각이 커짐에 따라 현저히 작게 나타났으며, 나선각이 30°, 37°인 경우 선단각이 커짐에 따라 약간씩 작게 나타나, 나선각 37° 선단각 140°인 경우가 가장 작게 나타났다. 이것은 선단각과 버어와의 관계에서 압출형 버어가 생성되는 선단각 조건과 일치하며, 나선각과 선단각이 커지면 절삭저항의 토크가 작아지므로 버어가 작게 생성된 것으로 생각된다.



Workpiece material : Al(2017)
 Drill diameter : 12 mm
 Spindle speed : 1000 rpm
 Feed : 0.2 mm/rev

Fig.10 Comparison of burr height in machined holes under conditions of helix angle and drill point angle.

5. 결론

본 논문에서는 드릴가공의 생산성을 높이는데 최적한 드릴의 나선각과 선단각 및 절삭조건을 탐색하기 위하여, 나선각과 선단각이 다른 여러 종류의 고속도강 트윈스트 드릴을 대상으로 각 절삭조건별 칩 처리성 실험, 가공된 구멍의 진원도 및 버어 높이의 측정실험을 수행하고 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. SM45C 재질에 두줄홈 트윈스트 드릴로 구멍가공 시 칩 처리가 가장 용이한 드릴형상은 나선각 30° 이고 선단각이 118°, 140° 인 드릴이며, 이송은 0.1~0.15(mm/rev)로, 절삭속도는 30~45(m/min)로 하는 것이 바람직하다.
2. 알루미늄(6061)재질을 이송 0.15(mm/rev)로 절삭시 진원도를 가장 좋게 할 수 있는 절삭속도는 150(m/min)이다.
3. 알루미늄(2017)재질 절삭시 버어가 적게 생성되도록 하려면 드릴의 나선각과 선단각을 37°, 140° 로 표준드릴(나선각 30°, 선단각 118°)보다 큰것을 선택하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

1. Hirota.A and Kasahara.K, "Analytical Prediction of Chip Formation and Cutting Forces in Drilling Operation (1st Report)-Cutting Model, Energy Method and Preliminary Results-", JSPE, Vol.49, No.8, pp.81-87, 1981.
2. Hirota.A and Kashara.K, "Analytical Prediction of Chip Formation and Cutting Forces in Drilling Operation (2nd Report)-Comparison of Predicted and Experimental Results-", JSPE, Vol.49, No.9, pp.74-80, 1981.
3. 전언찬외, "드릴가공시 절삭저항이 갖는 정보와 그 응용에 관한 연구", 한국정밀 공학회지 제5권 제4호, pp.39-47, 1988.12.
4. 조재규.전언찬, "ADI 재료의 드릴 가공시 절삭특성이 공구수명에 미치는 영향", 한국공작기계학회지 제5권 제2호, pp.46-56, 1996.6.
5. P.Bandyopadhyay and S.M.Wu,"Signature Analysis of Drilling Dynamics for On-Line Drill Life Monitoring", Sensors and Control for Manufacturing, PED-Vol.8, the winter Annual meeting of the ASME, NOV., 1985.
6. 김화영.안중환, "모터 전류를 기초로 한 드릴 마멸 모델링과 실시간 마멸 추정", 한국정밀공학회지 제12권 5호, pp.77-87, 1995.
7. K.subramanian, N.H.Cook, "Sensing of Drill wear and prediction of Drill Life", ASME, J of Eng. for Industry, pp.295-301, May 1977.
8. Hirota.A and Kashara.K, "Analytical Prediction of Chip Formation and Cutting Forces in Drilling Operation (3rd Report)-A Cutting Model for Chisel Edge With Restricted Tool-Chip Contact Length", JSPE, Vol.53, No.9, pp.106-112, 1987.
9. Hirota.A and Kashara.K, "Analytical Prediction of Chip Formation and Cutting Forces in Drilling Operation (4th Report)-Comparison of Predicted and Experimental Results for Chisel Edge-", JSPE, Vol.54, No.6, pp.148-154, 1988.

10. 奥島啓式, 岩田一明, 中谷征司, "金属材料の被削性に關する研究", JSME 論文集(B編), Vol.31, No.225, pp.847-854, 1965.

11. 大越, "薄版用錐の形状に關する研究", 精密機械, Vol.11, No 9, pp.145-154, 1975.