

# 주기적 이송속도 변화를 이용한 심공드릴가공

왕덕현\*, 이윤경\*, 김원일\*, 김용제\*\*

## Deep Hole Drilling by Using Periodical Change of Feedrate

Duck Hyun Wang\*, Yun Kyeong Lee\*, Won Il Kim\*, Yong Je Kim\*\*

### Abstract

Experimental study of drilling for duralumin A2024 was conducted with intermittently accelerated and decelerated feedrate. It is achieved through a programmed periodic increase and decrease in the feedrate using a machining center. The following experimental results were performed with the objective of solving chip to disposal problems. In conventional drilling of aluminum, long continuous chips are produced with winding around the drill and causing difficulties in eliminating chips from the cutting zone. In order to acquire the basic data necessary to regulate the chip profile, the relationship between cutting variables and chip shape was investigated. The following conclusions are established from the experimental results. At a suitable feed fluctuation ratio, intermittently decelerated feed drilling proved successful in breaking chips to appropriate lengths while maintaining stable cutting. Thus, it is an effective method for improving chip disposal. The amplitude of the dynamic component of cutting force in intermittent feed drilling is influenced by the feed fluctuation ratio.

**Key Words :** Drilling(드릴가공), Deep Hole Machining(심공가공), Cutting force(절삭력), Chip disposal(칩처리), Feedrate fluctuation ratio(이송속도변동비), Roundness(진원도), Roughness(표면거칠기)

### 1. 서 론

최근 산업분야는 컴퓨터의 발달과 더불어 유연생산시스템, 컴퓨터통합시스템 등 생산의 합리화 및 제품경쟁력의 강화를 위한 생산시스템의 자동화 및 무인화로 급진전되고 있다. 이러한 일련의 활동은 기계가공에 있어서 경험자

의 경험이나 숙련도보다 정리된 가공방법으로 가공하여 예측 가능한 가공성 및 효율성의 보장을 필요로 한다. 또한 금속가공중 드릴가공은 선삭과 더불어 가장 중요한 공정중 하나이며 모든 절삭공정중 약 30%(막힌 구멍작업 22%)를 차지한다. 과거의 드릴가공은 대부분 높은 치수 정밀도를 필요로 하지 않는 구멍의 가공이 대부분이었다.

\* 경남대학교 기계자동화공학부  
\*\* 경남대학교 대학원 기계공학과

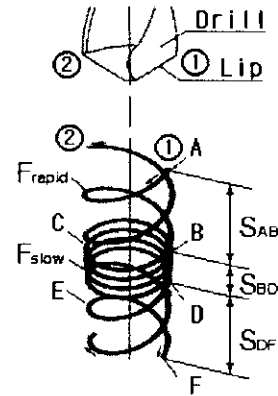
그러나 드릴의 강성 및 동적 대칭성의 한계가 있기 때문에 절삭속도 및 치수정밀도를 높이려는 노력으로 공구가 점점 고경도화 되어 가는 추세이다. 반면, 드링공구로 고경도화된 공구는 취성과파괴와 가격이 비싸다는 점 때문에 일반적으로 피삭재의 가공에는 대부분 고속도강이 널리 사용된다. 또한 최근에 사용되는 피삭재는 가벼우면서 고경도인 소재 개발이 활발하여 특히 알루미늄에 마그네슘이나 아연을 첨가한 가벼운 고경도합금들이 항공기나 스포츠용구 등으로 널리 사용되고 있다. 특히, 그 중에서도 듀랄루민의 발달이 두드러진다.

드릴가공에 대한 연구는 Toneshoff 등<sup>(1)</sup>, Chin 등<sup>(2)</sup>, DeVries 등<sup>(3)</sup>, Kasahara<sup>(4)</sup> 등의 학자들이 드릴가공의 기술, 공구의 재료 및 형상에 따른 절삭력과 공구수명, 칩형상에 따른 압력신호와의 관계에 관해 연구하였다. Tlustý 등<sup>(5)</sup>은 엔드밀에 있어서 절삭력의 동특성을 연구하였으며, Sakurai 등<sup>(6)</sup>은 이송변동에 따른 칩의 처리에 관하여 연구하였다.

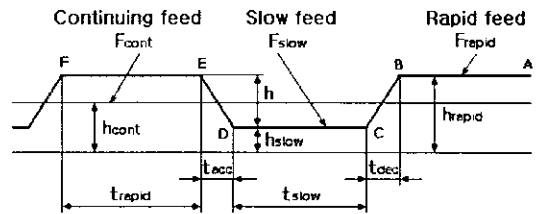
전통적인 알루미늄합금의 드릴가공에서, 발생하는 긴 연속형 칩은 드릴을 휘감아서 절삭영역으로부터 제거된 칩에 의하여 절삭을 어렵게 만든다. 따라서 이러한 난삭재의 드릴가공에서 발생된 칩에 의한 방해작용을 줄이기 위하여 칩처리의 개선은 중요하다. 따라서 미래 지향적인 소재인 듀랄루민의 드릴가공시 절삭조건에 따른 절삭력, 표면거칠기, 진원도의 변화 및 칩처리에 대한 연구는 가치 있는 일이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 듀랄루민(Duralumin) A2024 소재를 머시닝센터에서 기존의 연속적인 드릴가공뿐만 아니라 이송주기를 일정하게 변화시킨 단속적인 드릴가공의 수행을 통하여 발생하는 절삭력 신호의 변화를 측정하여 비교분석하고 표면거칠기, 진원도 및 칩형상을 측정하였다. 칩처리의 개선을 위하여 절삭조건과 절삭력, 절삭조건과 칩형상 사이의 상호관계에 대한 메커니즘을 분석하여 그 특성을 규명하고자 하고자 한다.

## 2. 관련이론

머시닝센터에 의한 심공드릴가공은 이송속도는 일정하고 이송을 간헐적으로 위쪽 방향으로 하여 칩을 파손제거시키는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 이송속도 방향을 변환하는 방법이 아닌, 이송속도를 주기적으로 변화시킨 단속적 이송 드릴가공에 관한 것으로, 회전속도는 이송속도의 주기적인 증가 및 감소를 통하여 이송 속도가 변화하는 동안 일정하게 유지된다. 단속적 이송 드릴가공 메커니즘을 묘사하고 있는 절삭날의 운동은 Fig. 1에서 나타



(a) Loci of both cutting edges



(b) Rapid and slow feed for different depth of cut

Fig. 1 Illustration of intermittent feed drilling

내고 있다.

Fig. 1(a)는 드릴공구의 양쪽 절삭날끝 점 ①과 점 ②을 나타내며, 또한 양쪽 각각의 날끝 점들의 궤적을 나타내고 있다. 한편, Fig. 1(b)는 절삭날에 관하여 절삭날에서 점 ①에 상응하는 절삭깊이 변동곡선을 나타내고 있다. Fig. 1(a) 및 Fig. 1(b)에서 보이는 것처럼, 고속이송속도  $F_{rapid}$  (mm/sec)는 절삭구간  $S_{AB}$ 에서 저속이송속도  $F_{slow}$  (mm/sec)로 이해하여 절삭구간  $S_{BD}$ 에 적용되었다. 단속적 이송 드릴가공은 가공이 일어나는 동안 이러한 작용이 반복된다. 고속이송속도  $F_{rapid}$ 는 점 A에서부터 점 B까지 적용되었고, 즉시 고속이송속도  $F_{rapid}$ 는 점 B에서 저속이송속도  $F_{slow}$ 로 되돌려진다. 이것은 점 B로부터 점C까지  $t_{dec}$  시간 동안 드릴을 회전시켜 사용하고, 이러한 휴지기동안 고속 이송속도에서 절삭날 ②로부터 가공된 표면이 낮은 부분은 저속이송속도에서 절삭날 ①에 의하여 가공된 결과로서, 절삭깊이는 고속이송속도  $F_{rapid}$ 에 대한 절삭깊이  $h_{rapid}$  (mm)로부터 저속이송속도  $F_{slow}$ 에 대한 절삭깊이

$h_{slow}$  (mm)까지 급속하게 떨어진다. 이것은 점 D로부터 점 E까지 회전시키는데  $t_{acc}$  시간이 걸리고, 저속이송속도  $F_{slow}$  가 완전히 고속이송속도  $F_{rapid}$ 로 변화하는 점이다. 이에 반하여 이러한 휴지기동안 절삭깊이는  $h_{slow}$ 로부터  $h_{rapid}$ 까지 급속하게 증가한다.

앞서 말한 것처럼, 절삭깊이의 변화는 이송속도의 증가 및 감소에 기인하고 있다. 따라서, 고속이송속도  $F_{rapid}$ 와 저속이송속도  $F_{slow}$  사이에 이송속도변동비( $F_f$ ) 변화에 관한 세부적인 실험을 위하여 다음과 같이 주었다.

$$F_f = \frac{F_{rapid}}{F_{slow}} \quad (1)$$

절삭깊이비  $h_{rapid}/h_{slow}$ 는 이론적으로 이송속도변동비에 따라서 증가하고 감소하는 특성이 있다. 이것은 Fig. 1(b)에서 관찰할 수 있는 것처럼 절삭깊이의 급한 증가와 감소는 피삭재 표면에서 모멘트가 진동 임펄스에 영향을 주고 이송은 드릴을 반회전시키는데 잠시의 휴지시간까지 변화한다. 이러한 진동 임펄스의 특이한 특성은 그것의 발생과 강도가 변화된  $F_f$ 와 일치하고,  $F_f$ 는 칩 형상에 크게 영향을 미친다.

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 2에서와 같이 드릴가공은 통일중공업의 TNV-40A 머시닝센터에서 수행하였고, 절삭력 측정은 Kyowa사 (Japan)에서 제작한 SATO AST-MM 밀링용 공구동력계를 사용하였다.

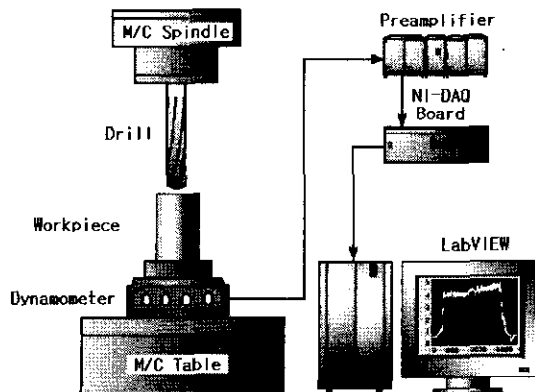


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 2와 같이 밀링용 공구동력계 위에 피삭재를 클램핑하여 드릴가공을 수행하면서 검출된 신호를 Dynamic strain amplifier에서 증폭하고 증폭된 신호는 National Instrument사(USA) DAQ board를 통하여 디지털 신호로 변환시켰다. 또한 변환된 신호는 NI사의 LabVIEW 프로그램을 실행하여 컴퓨터에 저장하고 해석하도록 하였다. 절삭력 및 이송속도의 변화에 따른 가공성의 비교검토를 위해 공구현미경으로 칩형상을 측정하고 진원도측정기로 진원도를 측정하였다.

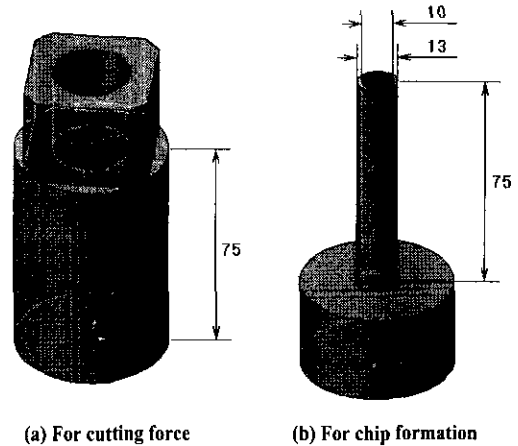


Fig. 3 Dimension of testing workpiece

본 실험에 사용한 시험편은 Al-Cu-Mg계 알루미늄인 듀랄루민 A2024를 가공해 Fig. 3과 같이 절삭력 및 칩형상 측정용의 2가지를 제작하였다.

또한 실험에 사용된 절삭공구는 태화기계(주)에서 생산된  $\phi 15\text{mm}$ 인 고속도강(HSS) 표준드릴을 사용하였다. 가공시 드릴이 정확한 위치에서 진행할 수 있도록 수작업으로 Centering한 후 자동상태에서 절삭에 임하였다. 가공이 끝난 후 드릴이 빠져 나올 때 드릴홈(Flute)에 끼어있는 칩의 굽힘으로부터 구멍벽면을 최대한 보호하기 위하여 드릴회전을 정지시킨 상태에서 빠져 나오게 하고 수용성 절삭유형태의 유체를 공급하면서 가공하였다.

기존의 연속적인 드릴가공에서는 관통심공을 Table 1의 절삭조건으로 가공하였다. 그리고 주기적인 이송변화에 의한 단속적인 드릴가공은 Table 2의 절삭조건을 사용하고 이송속도의 주기적인 변화는 프로그래밍을 통하여 획득하였다.

**Table 1** Cutting conditions of conventional drilling test for duralumin A2024

Feed rate [mm/min]	227
Spindle speed [rpm]	1159
Drilling depth [mm]	75

**Table 2** Cutting conditions of intermittent feed drilling test for duralumin A2024

	Number of cutting condition				
	1	2	3	4	5
$F_{rapid}$ (mm/min)	272	303	324	341	353
$F_{slow}$ (mm/min)	182	151	130	113	101
$F_f$	1.5	2	2.5	3	3.5
$N$ (rpm)	1159				

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 연속적인 드릴가공에서 $F_f$ 와 절삭력 관계

기존의 연속적인 드릴가공과의 성과비교를 위하여, Table 1에서 주어진 절삭조건인 연속적인 드릴가공시 측정된 절삭력을 나타내었다. 절삭력과 칩형상은 구멍깊이, 드릴의 작용에 의하여 변화하기 때문에 최초 관통으로부터 완전히 정지하기까지 드릴은 Fig. 4에서 증명되고 있는 것과 같이 네가지 단계로 분류하였다.

단계 I은 치끝날(Chisel edge)과 피삭재 상단사이에 접촉이 시작되어 전체 절삭날이 피삭재에 묻어버릴 때를 나

타내고 있고 이때 구멍 전체의 직경에 대한 드릴가공이 시작된다. 단계 II에서는 전체의 절삭날이 피삭재와 충돌한다. 이것은 안정적인 절삭력에 의하여 특성을 나타내는 것과 같이 안정적인 절삭현상이다. 단계 III에서는 절삭력이 일정하게 유지되다가 드릴이 피삭재를 관통하기 시작함으로써 절삭력이 급격하게 감소하는 특성을 나타내고 있다. 단계 IV는 치끝날의 완전한 정지에 앞서 절삭날의 완전한 정지 사이에 주기를 나타내고 있다.

이것은 연속적인 드릴가공에서 절삭력 성분이 단계 II에서 사실상 거의 일정하게 증가한다는 것을 Fig. 4에서 나타내어진 곡선으로부터 알 수 있다. 단계 II는 가공시 발생된 긴 연속형 칩이 드릴의 둘레를 푹푹 감음으로써 나타나는 칩 처리에 대한 특성을 나타내었다. 드릴가공된 구멍에서 절삭력 성분은 가공된 구멍 벽에 대한 방해작용으로 인하여 단계 II의 중반부 이후로도 계속 증가한다. 또한 구멍 벽에 대한 방해작용은 단계 III으로 갈수록 더욱 증가하고 절삭력 성분의 점진적인 감소는 18sec 주위에서 시작된다.

#### 4.2 단속적인 드릴가공에서 $F_f$ 와 절삭력 관계

Fig. 5는 Table 2에서 주어진 조건인  $F_f=3$ 인 경우에 절삭력 측정결과를 나타내고 있다. 이 측정결과로부터 얻어 낼 수 있는 것은 단속적인 이송 드릴가공에서 절삭력은 이송의 변화를 응용한 주기적인 파동 때문에 그 성분이 발생함으로써 그 특성이 나타난다는 것이다. Fig. 5에서 나타나고 있는 것처럼, 여러 가지  $F_f$ 에 대한 절삭력 성분은 이송속도가 주기적으로 가속 및 감속되는 절삭상태와 관련되어 변화한다.

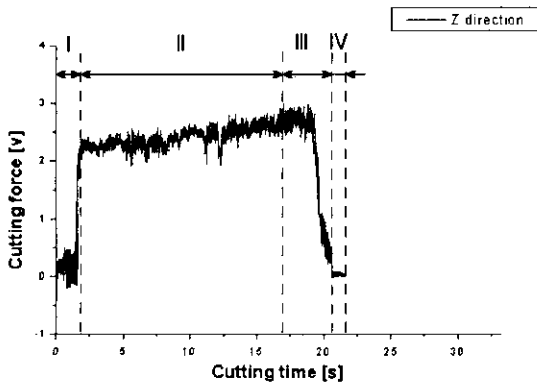


Fig. 4 Cutting force in conventional drilling

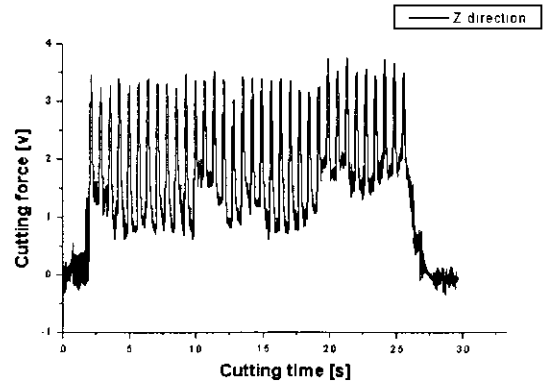


Fig. 5 Measured cutting force in case of  $F_f=3$

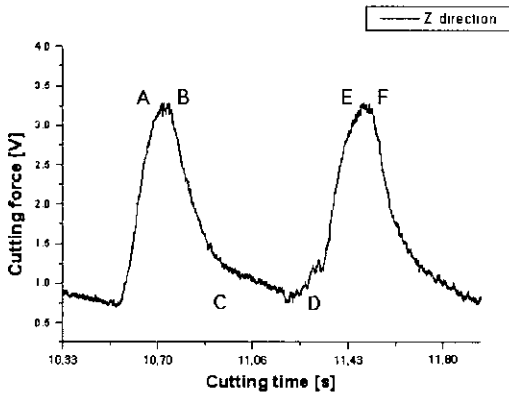


Fig. 6 Measured cutting force in case of  $F_f=3$

Fig. 6은 특정한 이송속도변동비  $F_f=3$ 에 대한 절삭력 성분의 측정값을 나타내고 있는데, 대략 10~12sec사이의 절삭시간 대한 절삭력 성분을 보여주고 있다.

이것은 절삭력 성분의 파동주기가  $F_f$ 가 변화하는 것과 마찬가지로 변화한다는 사실을 이러한 측정결과에서 알 수 있다. 이것에서 관찰할 수 있는 것처럼, 최대값은 점 A와 점 B사이에서 가속되는 이송영역에서 발생하고, 상대적으로 부드러운 곡선은  $h_{rapid}$ 로부터  $h_{slow}$ 까지 절삭깊이가 급격하게 감소하기 때문에 점 B와 점 C사이에서와 같이 나타난다. 점 C와 점 D사이에서 나타나는 최저값은 저속 이송속도  $F_{slow}$ 가 점 C와 점 D사이에서 적용되었을 것이라 생각된다. 드릴이 회전하는 동안에 점 D와 점 E사이의 신호의 급격한 증가는  $h_{slow}$ 로부터  $h_{rapid}$ 까지 절삭깊이의 갑작스런 증가에 있다고 생각된다.

가공된 표면과 칩에서 작용하는 절삭력과 진동 임펄스 사이에 강한 상호관계가 존재하고, 이러한 진동 임펄스는 칩 처리에 영향을 미친다고 여겨진다. 또한 칩이 드릴의 치출날(Chisel edge)과 바깥 코너부에 대한 절삭날에서 구멍가공 작업을 제한하여 절삭능률을 저하시킨다.

Fig. 7은  $F_f$ 와 절삭력 성분의 RMS값과 평균값 사이에 대한 측정결과를 보여주고 있다. 이 측정결과는  $F_f$ 가 증가함에 따라서 절삭력성분의 RMS값과 평균값이 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것으로부터 절삭력성분의 RMS값과 평균값이  $F_f$ 와 거의 반비례의 관계임이 명백하다.

반면, Fig. 8은  $F_f$ 와 절삭력성분의 진폭 사이에 대한 측정결과를 나타내고 있는데,  $F_f$ 가 증가함에 따라서 절삭력성분의 진폭은 계속 증가하고 있다. 따라서 절삭력성분의 진폭은  $F_f$ 와 거의 비례하여 나타나고 있다.

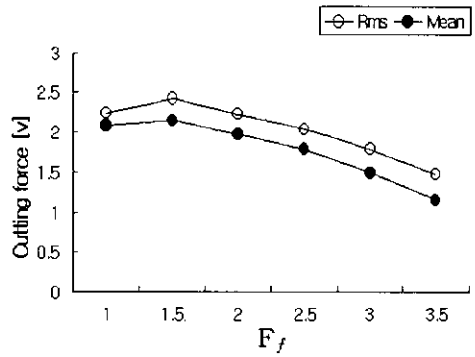


Fig. 7 Relation between  $F_f$  and cutting force

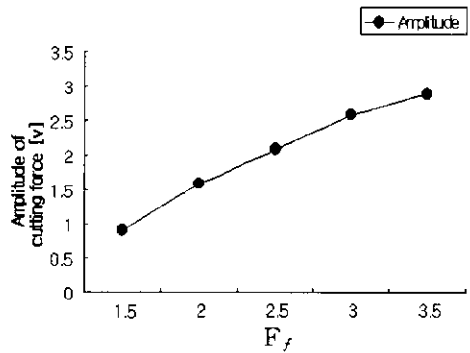


Fig. 8 Relation between  $F_f$  and amplitude of cutting force

### 4.3 칩 분해에서 $F_f$ 의 효과

칩의 형상을 측정하기 위한 실린더형 시험편은 Fig. 3.(b)에서 나타낸 것처럼 구멍가공 실험에서 이용된 것과 같은 13mm의 외경과 10mm의 내경의 시험편으로 실험을 수행하였고, 실험을 수행하기 위하여 선단각(Point angle) 118°, 나선각(Helix angle) 32°, 여유각(Clearance angle) 16°의 형상기하를 가지는  $\phi 15$ mm의 드릴을 사용하였다.

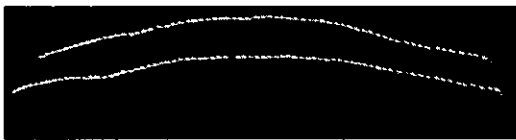
연속적인 드릴가공에서, 약 100~180mm정도의 긴 연속형 원추형상으로 된 나선형 칩이 단계 I과 단계 II사이에서 형성되었으며, 이때 원추의 외경은 약 2.5mm로 매우 적고, 드릴홈 때문에 칩이 원활하게 제거될 수 있었다. 하지만, 그러한 긴 연속형 칩은 공구 돌래를 감싸기 때문에 칩 처리에 대한 관점에서는 문제점으로 작용한다.

단속적인 이송 드릴가공에서, 약 100~150mm의 길이를 가지는 긴 연속형 원추형상으로 된 나선형 칩이  $F_f=1.5$ 에서 단계 I과 단계 II 사이에서 발생하였다. 그러나, 이송속

도가 가속 및 감속되는 동안에 원추형상으로 된 나선형 칩 피치(Helical pitch)에서 차이는 나지 않았으며, 칩 피치의 평균값은 3mm였다. 그러므로,  $F_f=1.5$ 의 경우에서 칩 분해는 명백하지 않다.  $F_f$ 의 값이 작으면 원추형상으로 된 나선형 칩 피치의 변동도 작고 또한 굽힘이 쉽게 발생하는 아주 얇은 칩을 형성함으로써 이송속도가 가속 및 감속되는 동안에 비교적 안정된 절삭상태는 칩 분해의 방해를 초래한다고 생각된다.

$F_f=2$ 의 경우에서도 100~150mm의 긴 연속형 원추형상으로 된 나선형 칩이 발생하였으나  $F_f=1.5$ 의 경우와 같이 칩 분해가 명백하지 않아서 고려하지 않았다. 그러나, 이송속도가 가속 및 감속되는 동안에 원추형상으로 된 나선형 칩 피치에서 명백한 차이가 없다고 할지라도, 피치의 평균값은 각각 대략적으로 2.5mm와 3mm였다.

Fig. 9에서 나타난 것처럼  $F_f=3$ 의 경우, 원추형상으로 된 나선형 칩은 단계 I에서 단계 II사이의 드릴가공을 제외하면 대략적으로 15~30mm의 길이로 절단되었다. 이송속도가 가속 및 감속되는 동안에 원추형상으로 된 나선형 칩 피치는 보다 명백한 차이를 보여주고 있다.  $F_f=1$ 일 때 및  $F_f=3$ 일 때에 대한 칩 피치의 평균값은 각각 약 2.4mm와 3.1mm였다.  $F_f=3.5$ 의 경우, 칩은 보다 짧은 길이에서 분해되기 시작하는데, 이러한 경향은  $F_f$ 가 증가하면서 이송속도가 가속 및 감속되는 주기도 길어짐으로써 칩 분해가 명백한 차이를 보이는 것이라고 생각된다. 그리고  $F_f$ 가 증가할수록 발생하는 칩의 길이가 짧아져 보다 원활한 칩 처리가 이루어지는 것으로 생각된다.



(a) In case of  $F_f=1$

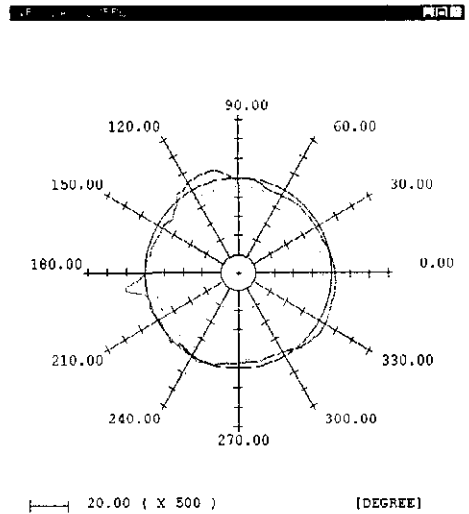


(b) In case of  $F_f=3$

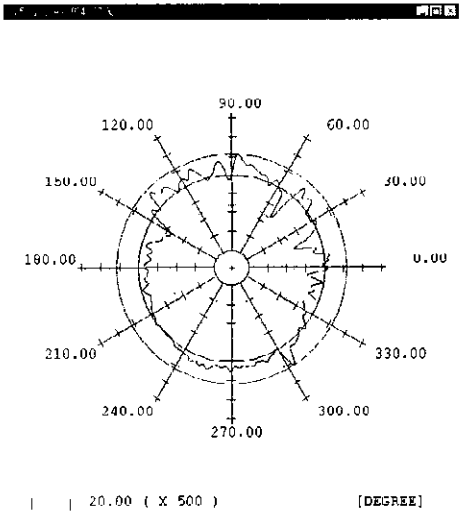
Fig. 9 Comparison of chip shape

#### 4.4 진원도 및 표면거칠기

Fig. 10은  $F_f=1$ 일 때, Fig. 11은  $F_f=3$ 일 때의 진원도



(a) In case of inlet



(b) In case of outlet

Fig. 10 Roundness in case of  $F_f=1$

측정결과를 나타내고 있다. 진원도값은  $F_f=1$ 인 연속적인 드릴가공이 양호한 값을 나타내고 있다. 이후 주기적인 이송변화를 기함으로써 진원도값이 대체적으로 나쁘게 나타나고 있으나,  $F_f=3$ 일 때는 연속적인 드릴가공보다 더욱 양호한 진원도값을 나타내었다. 또한 Fig. 12는  $F_f$ 가 1, 1.5, 2, 2.5, 3 및 3.5일 때의 진원도 측정값을 나타내었다.

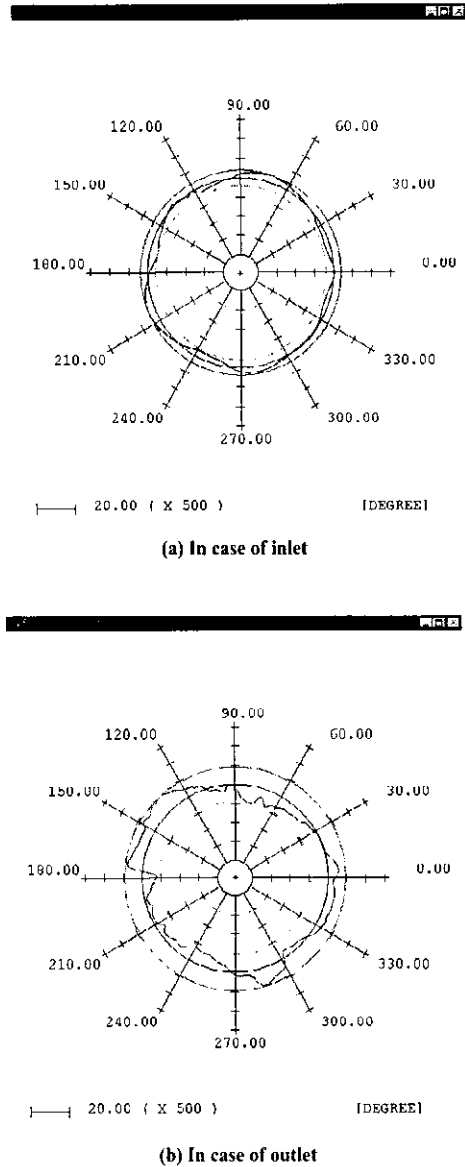


Fig. 11 Roundness in case of  $F_f=3$

$F_f$ 에 따른 표면거칠기를 측정하기 위하여 가공된 심공의 이송방향(Z축방향)으로 측정된 최대표면거칠기( $R_{max}$ ) 값들의 평균치를 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13에서 나타난 것과 같이 연속적인 드릴가공 즉  $F_f=1$ 인 경우가 이송속도에 변화를 준 경우보다 대체적으로 양호한 표면거칠기값을 보였다. 점차 이송에 주기적인 변화를 가함으로써 표면거칠기가 대체적으로 나쁘게 나

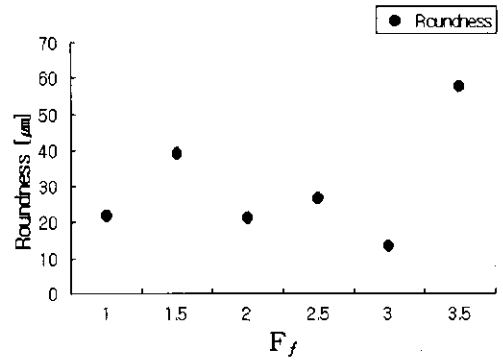


Fig. 12 Comparison of roundness

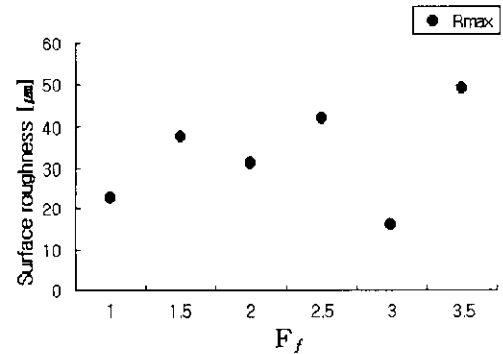


Fig. 13 Comparison of surface roughness

타고 있지만 이송속도변동비  $F_f=3$ 일 때는 연속적인 드릴가공보다 양호한 표면거칠기값을 나타내고 있다. 그러나  $F_f=3.5$ 인 경우 표면거칠기뿐만 아니라 전원도 값이 나빠진 것은 이송속도가 고속이 너무커서 발생한 것으로 생각된다.

전원도 및 표면거칠기 측정결과를 통하여, 드릴가공시 이송속도의 적절한 주기로 변화시켜 적당한 길이에서 칩을 분해시켜줌으로써 연속적인 드릴가공보다 양호한 가공면을 얻을 수 있었다.

## 5. 결론

듀랄루민의 드릴가공시 발생된 긴 연속형 칩은 드릴의 둘레를 휘감아서 가공작업을 방해한다. 따라서 양호한 칩 처리에 필요한 기본적인 데이터 획득을 위하여, 절삭 변수와 칩 형상 사이의 관계를 연구하였다. 실험적 결과로부터

다음의 결론을 확립할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) 연속적인 드릴가공( $F_f=1$ )과 이송속도를 주기적으로 가속 및 감속시킨 드릴가공에서,  $F_f$ 가 증가할수록 절삭력의 평균값은 감소하지만 각 드릴 절삭날에 작용하는 절삭력 성분의 진폭은 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 절삭력은 가공된 구멍의 표면에서 진동 임펄스의 거동을 통하여 가속 및 감속된  $F_f$ 에 의하여 영향을 받았다. 그리고  $F_f=1$ 일 때가 대체적으로 양호한 절삭력을 나타내고 있으나  $F_f=3$ 일 때는  $F_f=1$ 일 때보다 양호한 절삭력을 나타내고 있다.
- (2) 표면거칠기 및 진원도값은  $F_f=3$ 일 때의 드릴가공이 보다 양호하게 나타났다. 이 측정결과에서도 이상적인  $F_f$ 에서는 연속적인 가공방법보다 더 양호하다는 것을 알 수 있다.
- (3) 이상적으로 가속 및 감속된  $F_f$ 에서, 드릴가공시 칩은 적당한 길이에서 분해되어 칩처리가 보다 양호했다. 따라서, 칩처리의 관점에서 볼 때, 이송속도를 주기적으로 변화시킨 드릴가공은 효과적인 가공방법이라고 할 수 있다.
- (1) H. K. Toenshoff, W. Spintig, W. Koenig and A. Neises "Machining of holes - developments in drilling technology", *Annals of the CIRP*, Vol. 43, No. 2, pp. 551~561, 1994.
- (2) J. H. Chin and J. S. Wu, "Mathematical models and experiments for chip signals of single-edge deep hole drilling", *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 33, No. 3, pp. 507~519, 1993.
- (3) M. F. DeVries and M. K. Croscheck, "An investigation of the cutting mechanisms of the new point drill", *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1, pp. 73~78, 1988.
- (4) K. Kasahara, A. Hicota and Y. Kanda, "Geometrical analysis and preliminary experimental results", *J. of the JSPE*, Vol. 60, No. 3, pp. 372~377, 1994.
- (5) J. Thusty and P. Macneil, "Dynamic of cutting force in end milling", *Annals of CIRP*, Vol. 24, No. 1, pp. 21~25, 1975.
- (6) K. Sakurai and K. Adachi, "Chip disposal in intermittently decelerated feed drilling" Thirty-Second International MATADOR Conference held in Manchester, pp. 305~310, 1997.