

## 볼엔드밀 공구의 헬리컬 운동을 이용한 구멍가공 특성

김근오\*, 박규열\*\*

Drilling Characteristics Using the Helical Motion  
of Ball End Mill Tools

G. O. Kim\*, K. Y. Park\*\*

## ABSTRACT

Drilling is an indispensable process in manufacturing of the die and mould and the other mechanical parts which needs high dimensional and surface accuracy. In this paper, a new type of drilling method was proposed in order to improve both processing efficiency and accuracy. Specifically, the helical motion using ball end mill tools, instead of normal drilling method, was applied to perform an effective hole machining. In this paper, an theoretical background of the new type of drilling method was established, and the feasibility of the proposed theory was proved by experiments, where proposed drilling process in the paper gave a different machining specification than general method did.

**Key Words** : Helical-feed drilling(헬리컬 이송 구멍가공), Ball end mill (볼엔드밀), Helical motion(헬리컬 운동), Helical feed angle (헬리컬 이송 경사각), Cutting force(절삭력)

## 1. 서론

절삭가공은 가장 높은 체적 제거효율과 에너지 효율을 갖는 가공법인 동시에 생산기술 중에서 가장 일반적으로 구사되는 가공법으로서 적용용도에 따라서는 극히 높은 가공능률이 요구되는 분야에서부터 극히 높은 가공정밀도가 요구되는 분야까지 폭넓게 적용되고 있다. 단, 절삭가공에 있어서 가공능률과 가공정도는 상호 배반적인 관계에 있으며 가공정도를 향상시키고자 할 경우에 가공능률은 상대적으로 제한된다. 그러나 최근 절삭가공에 있어

서 형상, 치수 및 표면 거칠기를 포함한 가공정도와 가공능률을 동시에 향상시키고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다.

한편, 정밀기계 부품 및 금형과 같이 다양한 형상을 갖는 제품의 제조시에 가공능률의 저하요인으로 작용하는 대표적인 작업형태로서 구멍가공을 들 수 있다. 절삭가공에 의하여 구멍형상을 창성하고자 할 경우에는 일반적으로 드릴(Drill)을 사용하여 드릴의 회전축 방향으로 공구를 직선 이송시키는 방법이 적용된다. 그러나 이와 같은 형태의 구멍가공 중에는 일반 절삭가공에 비하여 가공기

\* 울산대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 울산대학교 기계공학과

구에 기인한 커다란 추력(Thrust force)이 발생되며 또한 절삭발열의 정제현상 등의 문제로 인하여 구멍가공업의 고속화에는 한계가 존재하는 것으로 알려져 있다<sup>(4-5)</sup>. 이와 같이 구멍가공 중에 발생하는 각종 문제점을 극복하고 가공능률 및 가공정도의 향상을 도모하기 위한 많은 연구가 보고되어 있다. 일례로, John S. Agapiou는 절삭력의 과다집중을 유발하는 드릴의 치즐 에지(Chisel edge)를 없애고 다수의 절삭날(Cutter blade)을 성형하고 공구를 통해 직접 절삭부위를 냉각, 윤활시킬 수 있도록 절삭유의 공급경로를 갖는 새로운 드릴을 설계하였다<sup>(6)</sup>. 이외에도 기존 드릴의 형태를 변화시켜 드릴의 가공효과를 증대시키고자 하는 연구가 보고되어 있다<sup>(7)</sup>. 또한 드릴이송의 형태를 조절하기 위한 부대장치(Attachment)를 설계하고, 가공시 발생하는 버(Burr)를 줄이기 위한 최적의 조건을 산출하는 등 기존의 드릴형태를 그대로 유지하면서 가공방법의 보완이나 부가적인 장치의 활용을 통한 드릴링 작업의 효율성을 증대시키는 등의 연구도 수행되고 있다<sup>(8,9)</sup>. 이와 같은 많은 연구개발에도 불구하고 구멍형상의 성형과정에 있어서 전술한 구멍가공 기구에 연유한 제반 문제점을 명쾌하게 극복함에는 한계가 존재한다.

이와 같은 배경 하에서 고능률, 고정도 구멍가공 방법의 개발은 정밀기계 부품 및 금형 등의 생산성 향상은 물론 높은 가공정도의 확보를 통하여 제조업 분야에 있어서의 제품설계 및 생산방식의 융통성 확장에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 구멍형상의 창성가공의 고능률화와 고정도화의 실현을 목표로 하여 볼엔드밀 공구의 헬리컬 운동(궤적)을 이용하는 새로운 구멍가공 방법을 제안하고 이의 이론적 근거를 확립하였으며, 또한 다양한 가공실험을 통하여 기존의 구멍가공법에 비하여 제안된 가공방법의 유용성을 확인하였다.

## 2. 헬리컬 궤적을 이용한 구멍가공법의 개요

헬리컬 궤적을 이용한 구멍가공법의 개요를 그림 1에 나타낸다.

본 가공은 구멍형상의 절삭 성형법이라는 관점에서는 일반 드릴을 사용하는 구멍가공법과 동일하다. 그러나, 사용공구로서 형상가공용 공구 중에 하나인 볼엔드밀을 사용하고 공구의 운동궤적으로서 구멍깊이 방향의 일직선 운동이 아닌 x,y,z 삼축의 동시운동으로 구성되는 헬

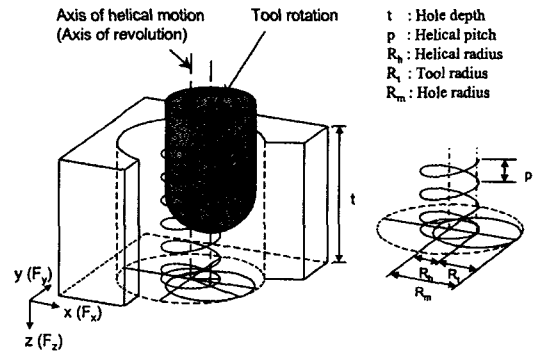


Fig. 1 Schematic diagram of helical-feed drilling using ball end mill

리컬 궤적을 이용하는 차이점을 갖는다. 일반적으로 절삭 및 연삭공구의 헬리컬 운동은 지그연삭(Jig grinding) 혹은 일부 절삭가공에서는 이미 존재하는 구멍의 내부를 다듬질 또는 구멍내경을 확장하는 작업에 적용되고 있다. 또한, 금속결합재의 슛돌(Metal bonded coring wheels)을 사용한 연삭 구멍가공 시에 공구의 헬리컬 운동을 이용하면 연삭스튬의 눈때움현상>Loading)이 방지되며, 이와 같은 효과를 이용하면 고강도 세라믹 재료 및 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon fiber reinforced plastics: CFRP)의 지속적인 구멍가공이 가능하다는 사실이 보고되어 있다<sup>(10, 11)</sup>.

한편, 헬리컬 궤적을 이용한 구멍가공에 있어서는 공구의 운동은 절삭속도의 발생을 위한 회전운동(Rotational motion)과 헬리컬 궤적의 생성을 위한 공전운동(Revolutional motion)으로 구성된다. 따라서 헬리컬 궤적에 의해서 가공되는 구멍의 반경;  $R_m$ 은 공구반경;  $R_t$ 과 헬리컬(공전)반경;  $R_n$ 에 의하여 하기의 식 (1)과 같이 결정된다.

$$R_m = R_t + R_n \quad (\text{단, } R_n \approx 0) \quad (1)$$

이는 임의의 직경을 갖는 단일공구를 사용하여  $R_n$ 를 변경함으로써 다양한 직경의 구멍가공이 가능함을 나타낸다. 또한, 공구와 가공구멍 간에 존재하는  $(2\pi R_m - 2\pi R_t)$ 에 해당하는 간극을 통하여 절삭점에 절삭유제의 공급이 용이해지고 이로 인해 가공 중에 발생된 절삭열의 발산이 원활하다는 가공기구상의 특징을 갖게 된다. 또한 헬리컬 궤적을 이용함으로써 설정된  $R_n$ 에 따른 공전방향의 원주거리;  $2\pi R_n$ 와 헬리컬 피치;  $p$ 에 의해서 단일 피치분의

구멍가공 시에 필요한 공구의 실제 이송량; S와 구멍깊이 방향에 대한 공구의 이송경사각(Helical-feed angle);  $\theta$ 는 다음의 식 (2)와 같이 표시된다.

$$S = \sqrt{(2\pi R_h)^2 + p^2}, \theta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{2\pi R_h}\right) \quad (2)$$

이와 같은 관계로부터, 임의의 구멍깊이; t를 가공하기 위한 공구의 총이송량;  $S_{tot}$ 는 식 (3)과 같이 구해진다.

$$S_{tot} = S \cdot n = \frac{S \cdot t}{p} > t \quad (\text{이 때, } n = t/p) \quad (3)$$

### 3. 구멍가공 실험 및 고찰

#### 3. 1 구멍가공용 장치 및 실험방법

실험에 사용된 실험장치의 사양을 표 1에 나타낸다. 가공용 기계로는 국내 화천중공업(HWACHEON HEAVY INDUSTRY Co., Ltd.)사의 머시닝센터(Machining Center; M/C) SIRIUS-2형을 사용하였다. 본 M/C는 주축의 최고회전수(Maximum rotational speed)가 8,000 rpm으로서 본 연구에서는 보다 높은 절삭속도를 얻기 위하여 DAISHOWA SEIKI Co., LTD.(Japan)사의 5배속 증속스핀들(High speed spindle)을 설치하여 설정 가능한 주축 최고회전수를 20,000RPM까지 확장하였다. 또한 구멍가공용 공구는  $\phi 10$  mm의 직경을 갖는 고속도강(High speed steel; HSS), 알루미늄(Aluminum; Al)과 질화 티타늄(Titanium Nitride; TiN)으로 복합코팅된 초경합금계(Al-TiN coated tungsten carbide; Al-TiN WC) 볼엔드밀을 사용하였다. 구멍가공 실험 중에 발생하는 절삭력의 측정에는 스트레인게이지 타입(Strain gauge type)의 공구동력계(Tool dynamometer)를 사용하였다. 구체적인 실험장치 및 절삭력 측정의 처리순서를 그림 2에 나타낸다.

피삭재료는 공업재료 중에서 열적, 기계적으로 대조적인 특성을 갖는 열가소성 수지(Thermal plastics)인

Table 1 Experimental equipments for helical-feed drilling

Machine	Machining Center SIRIUS-2 [HWACHEON HEAVY INDUSTRY Co., Ltd.]
Tool	$\phi 10$ mm HSS, Al-TiN coated tungsten carbide
Workpiece	PMMA; poly(methyl methacrylate)
Spindle attachment	High Speed Spindle (Max. 20,000 rpm)

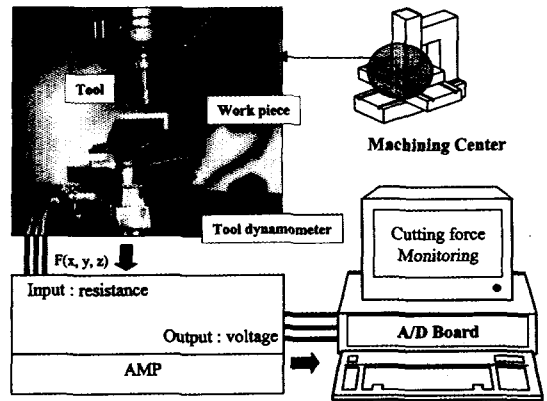


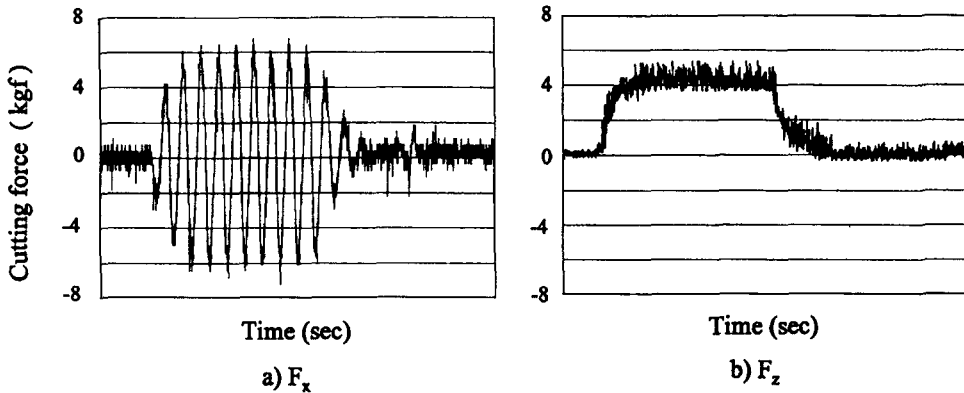
Fig. 2 Experimental setup of helical-feed drilling

PMMA(Poly methyl methacrylate)와 일반 탄소강(S15C)을 선택하여 실험용도에 따라서 사용하였다. 플라스틱 재료는 일반 절삭가공에서는 가공 정밀도를 높이기 비교적 어려운 것으로 알려진 재료로서, 특히 가공시 발생하는 열에 의하여 가공특성이 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다<sup>[13]</sup>.

#### 3. 2 실험결과 및 고찰

그림 3은 PMMA를 사용하여 볼엔드밀 공구의 헬리컬 운동을 이용한 구멍가공 중에 발생하는 절삭력의 형태를 나타낸다. 일반 드릴을 사용하는 구멍가공에서는 추력과 토크(Torque)만이 발생하는 반면, 헬리컬 궤적을 이용하는 경우에는 추력에 해당하는  $F_z$ 와 공구의 측면에서 원주방향의 성분에 해당하는 절삭분력  $F_x$ ,  $F_y$ 가 발생된다. 그리고 평면상에 작용하는 이 두 절삭분력  $F_x$ 와  $F_y$ 는 동일한 크기를 갖는 Sine의 형태로서 상호간에  $90^\circ$ 의 위상 차이를 갖게된다. 이 때  $F_x$ 와  $F_y$ 는 공구의 절삭작용에 의해 공구에 작용하는 토크로 나타나게 된다. 따라서 헬리컬 궤적을 이용한 구멍가공 중에는 원주방향의 절삭분력과 공구홀더의 지지점으로부터 돌출된 공구의 길이를 모멘트 팔(Moment arm)로 하는 공구의 굽힘모멘트(Bending moment)가 작용하게 된다.

일정한 깊이를 갖는 구멍의 가공 중에는 공구의 기하학적 형상에 기인하여 공구와 공작물간의 접촉형태에 변화가 발생한다. 이에 따라 볼엔드밀 공구의 선단부분이 공작물과 접촉하게 되는 가공초기와 공구의 선단부가 공작물을 관통하기 시작하는 가공 후기로 나누어지게 된다. 이러한 현상에 의해 가공초기때가 가공후기 때보다 상대



Tool :  $\phi$  10mm HSS Ball End Mill, Workpiece : PMMA

Fig. 3 Drilling force using the helical motion of ball end mills

적으로 작은 값의 절삭력을 갖게 된다. 이와 같은 절삭력의 추이는 일반 드릴을 사용한 구멍가공에서도 미소하게나마 존재하는 현상으로서 볼엔드밀 공구의 사용 시에는 볼 부위의 곡률과 가공구멍의 깊이와의 상관관계에 의해서 전반적인 절삭력의 형태가 좌우된다.

그림 4는 PMMA와 S15C를 사용하여 이송률의 차이에 따른 절삭력의 변화를 조사한 것이다. 실험결과, 이송률이 커질수록 공구의 단위 회전당의 제거량의 증가와 더불어 절삭력이 점진적으로 증대하는 결과가 얻어졌다.

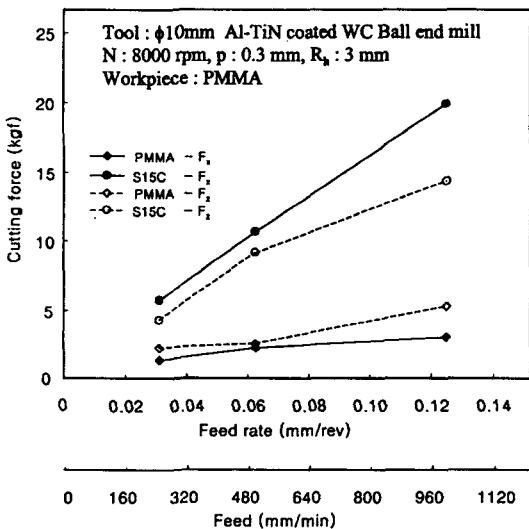


Fig. 4 Cutting force variations with feed rate

단, PMMA의 경우에는 추력 성분인  $F_z$ 가 원주방향 성분인  $F_x$  보다 큰 값을 갖는 반면에 S15C에서는 상반되는 결과로 나타났다. 이는 주로 소재의 기계적, 열적 특성의 차이와 볼엔드밀의 외주부로 갈수록 실질적인 절삭속도가 높아지게 되는 가공기구에 기인한 것으로서, 특히 열에 취약한 PMMA의 경우에는 절삭발열로 인한 소재의 열화현상이 현저하게 작용한 결과로 사료된다.

그림 5는 PMMA를 사용하여 공구 회전수 및 이송속도의 차이에 따른 절삭력의 변화를 조사한 결과이다. 공구의 회전수가 동일한 조건하에서는 그림 4의 결과와 동일하게 이송속도의 증가와 더불어서 절삭력이 점진적으로 상승함을 볼 수 있다. 그러나, 동일한 이송속도의 경우에는 공구 회전수가 높은 조건하에서 절삭력이 감소하였다. 이는 회전수와 이송속도의 상관관계에 의하여 이송률이

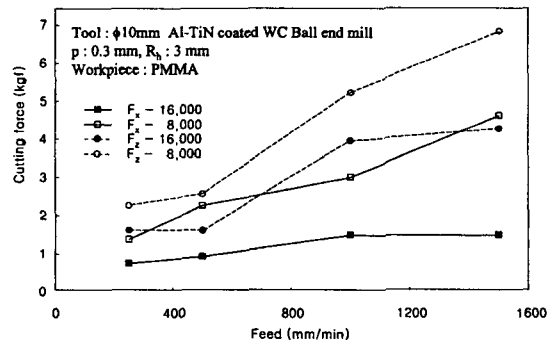


Fig. 5 Cutting force variations with cutting speed

변화하며, 이송률이 작은 조건하에서 절삭력이 감소한 결과이다. 또한 동일한 이송속도의 경우, 공구 회전수 16,000rpm에 비하여 8,000rpm의 조건은 이송률이 2배에 상당하며, 이와 같은 조건을 감안할 경우에 동일한 이송률의 조건하에서는 높은 공구 회전수에서 상대적으로 보다 낮은 절삭력이 얻어졌다. 이와 같은 결과는 PMMA 대신 S15C를 사용한 그림 6의 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 높은 절삭속도에 따른 절삭발열에 의해 소재가 연질화 되고, 이에 따른 항복강도의 저하와 마찰계수의 감소를 동반하여 절삭력이 감소하는 고속절삭의 효과에 기인하는 것이다. 특히, S15C의 실험결과를 강재료의 열전도능을 고려하면 주로 후술한 마찰계수의 감소효과가 크게 작용한 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 헬리컬 운동을 이용한 구멍가공에 있어서도 절삭속도의 고속화로 인하여 구멍가공 능력의 향상은 물론 가공상태의 안정화 효과가 동시에 얻어지는 사실을 시사하는 것으로 판단된다.

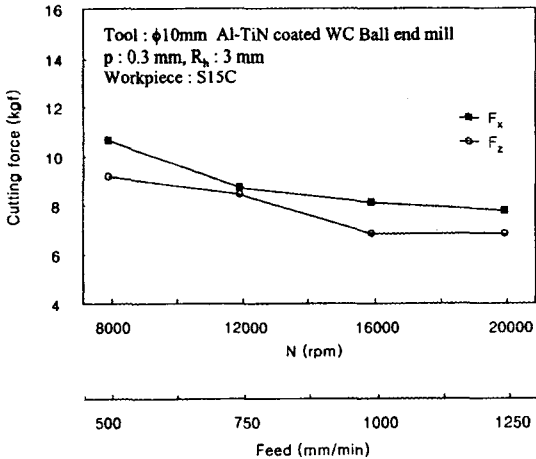


Fig. 6 Cutting force variations with cutting speed

헬리컬 궤적의 경우, 헬리컬 피치;  $p$ 와 헬리컬 반경;  $R_h$ 와의 상관관계에 의해서 식 (2)에서 언급한 공구의 이송 경사각이 결정된다. 그림 7은 공구이송의 경사각의 차이에 따른 구멍가공 특성의 차이를 조사한 결과로서 일정한 헬리컬 반경의 조건하에서 헬리컬 피치의 변화에 따른 절삭력  $F_z$ 의 변화를 나타낸다. 헬리컬 반경이 상대적으로 작은 0.1mm라는 조건하에서, 헬리컬 피치가 작은 영역(공구이송의 경사각이 큰 영역)에서는 절삭력이 급격하게

증가하지만 헬리컬 피치가 점차적으로 커짐(공구이송의 경사각이 작아짐)에 따라서 절삭력의 상승폭이 완만해지는 것으로 나타났다. 단, 헬리컬 피치에 무관하게 비교적 완만한 공구이송의 경사각을 갖게되는 헬리컬 반경 3mm의 조건하에서는 헬리컬 피치의 증가와 더불어 절삭력이 점진적으로 상승하는 결과가 얻어졌다. 한편, 일정한 헬리컬 피치의 조건하에서 헬리컬 반경의 변화에 따른 절삭력의 변화를 조사한 결과, 그림 8에 나타난 바와 같이 헬리컬 반경이 작은 영역(공구이송의 경사각이 큰 영역)에서는 특히 원주방향 성분의 절삭력이 급격히 상승하며 헬리컬 반경의 증가와 더불어 완만해지는 것으로 나타났다.

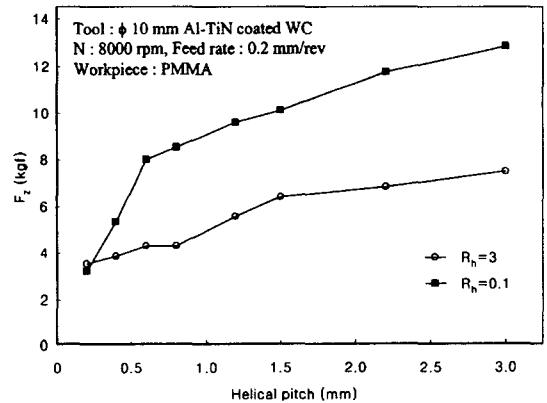


Fig. 7 Cutting force variations with helical pitch

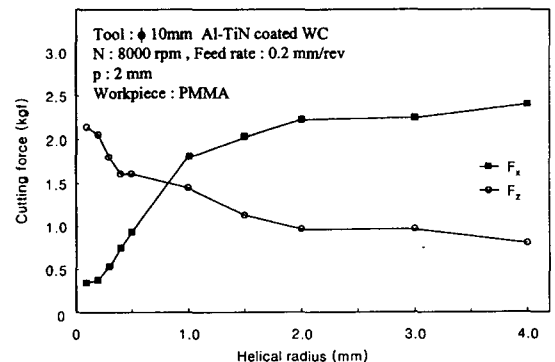


Fig. 8 Cutting force variations with helical radius

이 두 실험결과에서 볼 수 있듯이 공구이송의 경사각은 구멍가공시 각각의 절삭분력의 크기를 결정짓는 중요한 요소로 작용하게 된다. 그리고 그 크기의 변화 요인 중

에서 특히 공구 이송경사각이 클 경우에는 절삭능력이 낮은 공구의 중심부위에서 절삭작용이 이루어지며, 따라서 공구이송 중에 수직방향의 운동성분이 증가함으로써 상대적으로 추력이 증대하는 것으로 판단된다. 이와 같은 사실은 그림 9를 통해 자세히 설명되어질 수 있다.

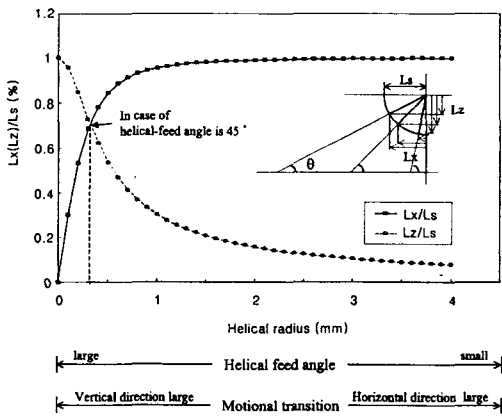


Fig. 9 Relationships between helical-feed angle and motion-al transition ratio

그림 10은 서로 다른 재질을 갖는 공구를 사용하여 공구홀더로부터 돌출된 공구의 길이의 차이에 따른 가공구멍의 치수오차를 조사한 결과를 나타낸다. 공구의 돌출길이 짧아질수록, 공구의 강성이 높아질수록 보다 높은 가공정도 즉, 보다 낮은 가공경 오차를 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 헬리컬 궤적을 이용하는 구멍가공의 경우에는 전술한 바와 같이 절삭력의 원주방향 성분이 공구에 굽힘모멘트로 작용하는 가공기구에 기인한 결과이다. 따라서 헬리컬 궤적을 이용하는 구멍가공에 있어서는 가공구멍의 치수정도가 공구재질의 강성 및 장착조건

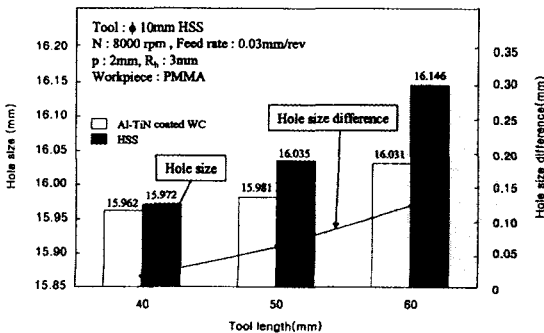
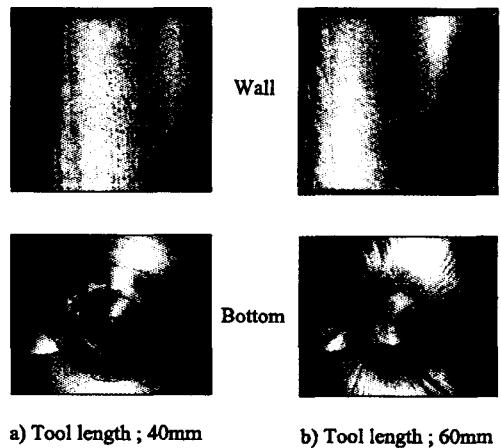


Fig. 10 Relationships between tool length and machined hole size

에 크게 좌우되는 것을 알 수 있다.

공구의 돌출길이가 가공상태에 미치는 영향을 조사하기 위하여 S15C의 구멍가공 중에 공구가 공작물을 관통하기 전에 가공을 중지하고 가공면을 관찰하였다. 그림 11은 WC 기재의 볼엔드밀을 사용하여 동일한 가공조건을 적용한 가공결과이다. 본 결과에서 나타난 바와 같이 공구의 돌출길이가 60mm의 경우에 40mm에 비하여 가공된 구멍의 벽면과 바닥면에 공구계(Tooling system)의 강성부족에 기인한 진동흔적(Chatter mark)이 현저하게 발생하게 된다. 이러한 결과로부터 공구재질을 포함한 공구계의 강성이 가공구멍의 치수정도는 물론 가공면의 상태에도 지대한 영향을 미치는 것으로 판단된다.



Tool :  $\phi$  10mm Al-TiN coated WC Ball End Mill  
Workpiece : S15C  
p : 0.3mm, R<sub>a</sub> : 3mm, N : 8,000rpm, Feed rate : 1,000 mm/min

Fig. 11 Variations of drilling characteristics by tool length

한편, 그림 12는 구멍가공 방식의 차이에 따른 가공정도의 차이를 가공구멍의 출구측의 상태를 관찰하여 비교한 결과이다.

일반드릴을 사용한 구멍가공에서는 사용된 재질의 차이에 따라서 PMMA의 경우에 치핑(Chipping)과 S15C의 경우에는 버(Burr)가 발생하는 반면, 볼엔드밀의 헬리컬 운동을 이용하는 구멍가공에서는 버 및 치핑이 현저하게 억제, 방지되는 것이 확인되었다. 이는 그림 13에 도시한 바와 같이 공구가 공작물을 관통하는 지점에서 볼엔드밀의 기하학적 특성에 기인한 수직성분 절삭력의 배분효과가 얻어진 결과로 사료된다.

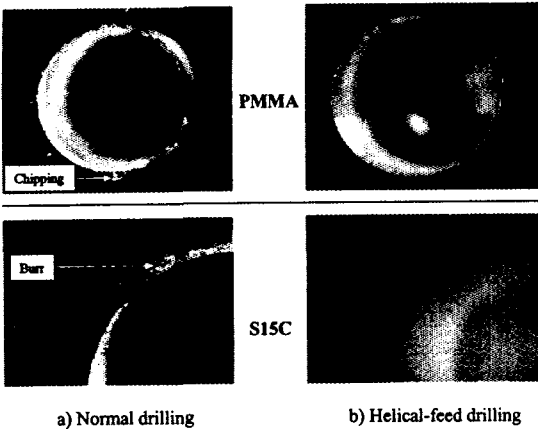


Fig. 12 Variations of drilling accuracy by drilling methods

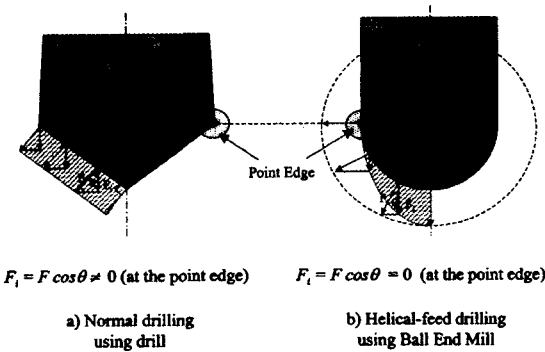


Fig. 13 Variations of drilling condition by tool shapes

#### 4. 결론

본 연구에서는 볼엔드밀 공구의 헬리컬 궤적을 이용하여 구멍형상의 절삭 성형가공 특성 및 가공기구에 관하여 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 볼엔드밀 공구의 헬리컬 궤적을 구멍가공에 적용하면 효과적인 구멍형상의 절삭성형이 가능하다.
- 2) 볼엔드밀 공구의 헬리컬 궤적을 이용하면 단일공구를 사용하여 다양한 직경의 구멍가공이 가능하다.
- 3) 헬리컬 궤적을 이용한 구멍가공에서는 소재의 특성 및 헬리컬 반경과 헬리컬 피치의 관계에 의하여 형성되는 공구이송의 경사각에 차이에 따라 서 수직분력과 원주방향분력의 구성비에 차이가 발생된다.
- 4) 볼엔드밀 공구의 헬리컬 궤적을 이용한 구멍가공에 있어서 절삭속도를 고속화함으로써 가공능률의 향상

과 더불어 가공상태의 안정화 효과가 얻어진다.

- 5) 헬리컬 궤적을 이용한 구멍가공에서는 일반 드릴을 사용한 구멍가공에 비하여 구멍 출구측의 치핑 및 버의 발생이 현저하게 감소된다.

#### 참고 문헌

1. A. B. Chatopadhyay and R. Roy, "Modification of Chisel Edge of Small HSS and Carbide Drills for Reducing Thrust," *Proc. of 9th MTDR Conf. at India*, pp. 138-143, 1980.
2. M. C. Shaw and C. J. Oxford Jr, "On the Drilling of Metals," *Trans. of ASME*, Vol. 79, pp. 139-148, 1957.
3. C. Rubenstein, "The Torque and Thrust Force in Twist Drilling," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 31/4, pp. 481-504, 1991.
4. D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, "Calculation of Main Cutting Edge Forces and Torque for Drills with Arbitrary Point Geometries," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 32/4, pp. 521-538, 1992.
5. J. S. Agapiou and M. F. DeVries, "On the Determination of Thermal Phenomena During Drilling," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 30/2, pp. 217-226, 1990.
6. J. S. Agapiou, "Design Characteristics of New Types of Drill and Evaluation of Their Performance Drilling Cast Iron," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 33/3, pp. 321-341, 1993.
7. M. Rahman, K. H. W. Seah and V. C. Venkatesh, "Performance Evaluation of Endrills," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 28/4, pp. 341-349, 1988.
8. S. S. Pande and H. P. Relekar, "Investigations on Reducing Burr Formation in Drilling," *Int. J. of MTDR*, Vol. 26/3, pp. 339-348, 1986.
9. D. Zhang, X. Feng, L. Wang and D. Chen,

- "Study on the Drill Skidding Motion in Ultrasonic Vibration Microdrilling," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 34/6, pp. 847-857, 1994.
10. K. Y. Park, J. H. Choi and D. G. Lee, "Delamination-Free and High Efficiency Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics," *J. of Composite Materials*, Vol. 29/15, pp. 1989-2002, 1995.
11. 朴圭烈, 大森整, 中川威雄, "メタルボンドコアリング砥石によるヘリカル切羽穴明け," *砥粒加工學會誌*, Vol. 39/5, pp. 270-275, 1995.
12. P. Lee, Y. Altintas, "Prediction of Ball-end milling Forces from Orthogonal Cutting Data," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 36/9, pp. 1059-1072, 1996.
13. 白松豊太郎, "プラスチック加工技術便覧," 日刊工業新聞社, pp. 618-623, 1988.