

BTA 드릴링에 있어서 SM55C의 가공면 형상에 관한 연구

장성화*(동아대 대학원), 장성규(동의공업대), 박정보(삼척대), 전언찬(동아대)

A study on analysis of SM55C worked-shape in the BTA drilling

S. H. Jang*, S. G. Jang, J. B. Park, E. C. Jeon.

Abstract

BTA drilling among the deep hole drilling is using for the improvement of productivity and the high-efficient working.

As the deep hole drilling with BTA drill is satisfied with the required quality by one-pass processing, more deeper hole depth, the accuracy of materials is affected by bending vibration and cutting speed.

This paper is studied that the shapes of material (surface roughness, roundness) is affected by cutting condition compared actual roundness with lobe shape with modeling of computer through the experiments in the BTA drilling system with BTA drill.

Key word : 심공가공(Deep hole drilling), 굽힘 진동(Bending vibration), 로브형상(Lobe shape), 표면조도(Surface roughness), 진원도(Roundness)

1. 서론

구멍가공은 기계가공의 약 30%를 차지하는 중요한 공정이나, 일반적인 절삭가공 중 선삭가공, 밀링가공 등이 자유로운 가공방식을 선정할 수 있는 것에 비하여, 구멍가공은 폐쇄된 조건에서 가공하기 때문에 특히 심공가공상에 많은 제약이 따르고 이에 따른 칩의 신속한 배출, 가공물 형상 및 정밀도 등의 문제점을 지니고 있다¹⁾.

이를 극복하기 위하여 고압의 절삭유를 공급할 수 있는 공구를 사용하여 심공가공을 행하고

있으며, 여기서 심공가공이란 길이/직경(이하 L/D)의 비가 통상 5배이상의 경우를 일컫으며 그 대표적인 방법이 BTA드릴이다. 이러한 BTA 드릴은 구멍깊이가 깊을수록 가공품의 정밀도에 미치는 영향이 크며 절삭속도에 따라, 그리고 칩의 신속한 배출의 유무가 가공면 형상에 영향을 미치고 있다.^{2)~4)} 또한, BTA드릴에 의한 심공가공은 1회 가공에 의하여 요구되는 정밀도 및 가공물의 형상 등의 품질을 만족시켜야 하므로 이에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 BTA드릴링 시스템에서 BTA드릴을 사용하여 심공가공할 때 공작물의 형상(표면조도, 진원도)에 미치는 절삭조건의 영향에 대하여 실험을 통하여 분석하고자 하였다.

2. 이론적 배경

BTA방식에서 L/D 비가 큰 경우 가공 중에 공구의 진동과 여러 가지의 영향으로 인하여 가공구멍이 다각형의 형상으로 된다. 이것은 심공가공용 공구가 동일한 절삭날을 4개 가진 리이머와 같이 다인공구의 절삭현상을 단순화시킨 형태로 볼 수 있고, 그 날과 공작물 상호간에 생성되는 로브(lobe)의 형상은 Fig. 1과 같이 5각형으로 나타낼 수 있다. Fig. 1의 a)는 공구회전식인 경우의 로브의 형상을, Fig. 1의 b)는 공구고정-공작물회전식인 경우의 로브의 형상을 나타내었다.

BTA드릴의 자려진동 및 강제진동에 의한 드릴축 중심궤적 및 공구날이 회전하는 절삭날 끝에 의한 가공면의 형상은 ㅁㅁㅁ이 반복되는 형상이고 절삭날 끝이 ㅁㅁㅁ을 생성시킨 다음 후속 날끝이 앞에서 생성한 ㅁㅁㅁ을 따라 가면서 운동을 한다.

드릴의 회전 각속도 ω_t , 드릴직경 D_t , 드릴축 중심의 궤적을 조화함수(Harmonic function)로 가정하고 드릴축 중심이 반경 R_a , 각속도를 ω_a 라 하면 임의의 절삭날 끝부분의 외주궤적 좌표 벡터 \vec{R} 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{R} = |\vec{R}| e^{j\theta} = |\vec{R}_a| e^{j(\omega_a t + \psi_0)} + |\vec{R}_t| e^{j(\omega_t t + \theta_0)} = x\vec{i} + y\vec{j} \quad \text{----(1)}$$

임의의 최대 외주 절삭날 A부 궤적의 좌표 x, y 성분은 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_a = \frac{D_a}{2} \cos(\psi_0 + \omega_a t) + \frac{D_t}{2} \cos(\theta_0 + \omega_t t) \quad \text{----(2)}$$

$$y_a = \frac{D_a}{2} \sin(\psi_0 + \omega_a t) + \frac{D_t}{2} \sin(\theta_0 + \omega_t t)$$

절삭날이 Z 인 공구의 절삭날간 간격은 $2\pi/Z$ 이고 단속 절삭되는 절삭날은 $2\pi/Z, 2(2\pi/Z), 3(2\pi/Z), \dots, (Z-1)(2\pi/Z)$ 씩 지연되어 공작물에 접촉된다. 순차적인 다음 절삭날 또는 안내패드 B부의 궤적좌표성분은 식(3)과 같이 된다.

$$x_a = \frac{D_a}{2} \cos(\psi_0 + \omega_a t) + \frac{D_t}{2} \cos(\theta_0 - \frac{2\pi}{Z} + \omega_t t) \quad \text{----(3)}$$

$$y_a = \frac{D_a}{2} \sin(\psi_0 + \omega_a t) + \frac{D_t}{2} \sin(\theta_0 - \frac{2\pi}{Z} + \omega_t t)$$

절삭날 또는 패드 B부가 절삭날 A부와 같은 위치를 지나게 되는 조건은 다음 식(4)와 같다.

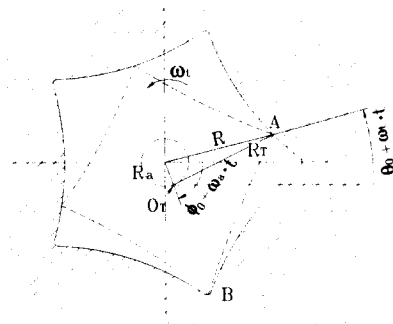
$$x_b(t = t_0 + 2\pi/(Z\omega_t)) = x_a(t = t_0) \quad \text{----(4)}$$

$$y_b(t = t_0 + 2\pi/(Z\omega_t)) = y_a(t = t_0)$$

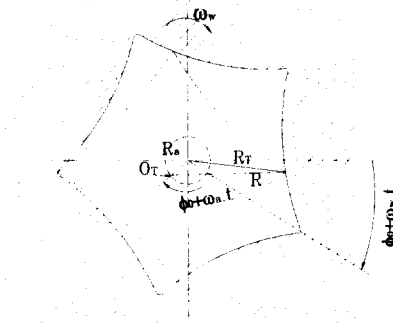
식을 만족하는 조건으로는 $\omega_a / \omega_t = nZ$ (n :정수, ω_a, ω_t 가 같은 방향으로 회전하는 경우는 +, 반대방향인 경우 -)가 얻어진다. 즉 드릴축의 중심이 공구자전의 nZ 배로 공전할때 각각의 절삭날이 같은 궤적을 지나고 있음을 나타내고 이 절삭날 끝의 궤적을 \vec{R} 라고 하면 자취궤적의 크기를 나타내는 벡터의 크기는 식(5)과 같다.

$$|\vec{R}| = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{1}{2} \sqrt{[D_a^2 + D_t^2 + 2D_a D_t \cos((nZ-1)\omega_t t + (\varphi_0 - \theta_0))] \quad \text{----(5)}$$

식(5)는 $|nZ-1|$ 의 다각형을 갖는 로브형상을 나타낸다.



a) For tool rotating



b) For workpiece rotating

Fig. 1 Generation of lobe for the rotation of tool and workpiece

Fig. 1에서 BTA드릴인 경우로써 공구의 절삭날이 혹은 안내패드 등의 돌출부가 $\pi/2$ 간격으로 배치되었다고 가정할 경우의 다각형 로브형상을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 공구 1회전시 nZ 회의 축중심의 진동이 있고 공작물이 회전할 경우는 공작물의 회전각속도 ω_w , 드릴축 중심의 공전각속도를 ω_a' 이라 하면 공

구자전량만큼의 차이가 생긴다. 또 $\omega_w = -\omega_t$ 가 되므로

$$\begin{aligned} \omega_a' &= \omega_a - \omega_t = (\omega_a / \omega_t - 1) \omega_t \\ &= -\omega_w (nZ - 1) \end{aligned} \quad \text{----(6)}$$

따라서, $\omega_a' / \omega_w = -(nZ - 1)$ 이고 $|nZ - 1|$ 개의 진동이 관측된다. 공작물이 회전할때 가공 구멍의 로브형상의 갯수 S를 나타내는 그림은 Fig. 1의 (b)와 같다.

BTA드릴이나 트위스트 드릴 및 리이머 등의 다인 공구의 경우 절삭날 수 Z와 다각형의 수 S의 사이에는 식(7)이 성립된다⁵⁾.

$$S = nZ \pm 1 \quad \text{---- (7)}$$

S : 다각형의 각의 갯수

n : 정수

Z : 절삭날 수

일반적으로 BTA드릴의 절삭날 및 안내패드는 다인공구의 절삭날 갯수 Z=4와 같이 볼 수 있으므로 이들의 상호배치 각도는 90°가 되어, 이때의 다각형의 각수는 3개 또는 5개가 된다고 할 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 시험편 및 공구

본 실험에 사용한 시험편은 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 기계구조용 탄소강 SM55C로 선정하였으며, SM55C의 열처리는 단조작업후 약 850°C 정도로 담금질을 행하였고, 620°C에서 2시간동안 템퍼링을 실시하였다. 시험편의 화학적인 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions of the workpiece (wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM55C	0.55	0.25	0.75	0.025	0.030

Table 2 Mechanical properties of the workpiece

Material	Yield strength (Kg/mm ²)	Tensile strength (Kg/mm ²)	Elongation(%)	Hardness(HB)
SM55C	539	735	10	232

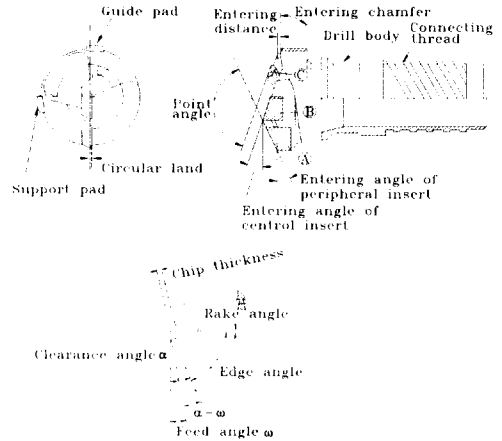


Fig. 2 Shape of the BTA drill

실험에 사용된 시험편은 길이 $\phi 45 \times 100$ mm의 환봉을 사용하였다. 실험에 사용된 공구는 $\phi 17.1$ 로서 인서트가 초경 P20계열의 다인 BTA드릴로써 형상은 Fig. 2와 같고, 구성은 3개의 절삭날(외측날, 중심날, 내측날)과 안내부 작용을 하는 안내패드 및 공구 본체로 구성되어 있다.

3.2 실험 장치

본 실험에 사용된 실험장치는 2-Spindle type의 CNC deep hole drilling M/C(Model:STGA2-450 CNC, Shin-il machine Co., Ltd)로써 가공 능력은 최대 $\phi 32$, 드릴링 깊이는 최대 250mm, 스피들의 회전수는 0~4,500rpm까지 변환 가능하며 Fig. 3에서는 실험장치의 개략도를 나타내었다.

시험편의 표면조도는 표면조도 측정기(Mahr GmbH-S3P)로, 진원도는 진원도 측정기(Form-meter F3P, Mitutoyo RA-2)로 측정하였다.

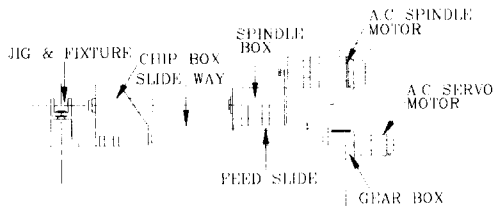


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

3.3 실험방법

본 실험은 CNC deep hole M/C축의 Collet holder에 튜브를 고정시키고, 그 선단에 공구를 장착시켰다. 그리고 절삭유는 압력헤드를 통하여 공구의 외측에서 공급할 수 있도록 하였으며, 공구 내부로 칩이 배출되도록 하였다. 실험은 공구 회전 및 공구이송방식을 채택하였으며, 축은 1-Feed unit에서 2축이 동시에 가동될 수 있는 구조로 하고 절삭속도를 58, 70, 80m/min 변화시키고 이송량은 0.1, 0.15, 0.2mm/rev로 변화시키면서 가공하였다. 실험에 사용된 절삭유는 비수용성 황화염화계(KS 2종 13호)로서 심공가공전용 절삭유인 Yushiron cut DS-50N을 사용하여 343MPa의 압력으로 공급하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 표면조도의 변화

BTA가공에서 가공면의 거칠기는 통상적으로 강인 경우 9~25S(Rmax)정도, 주철이나 알루미늄인 경우는 12.5S(Rmax)정도이다⁶⁾. 그리고 가공정밀도는 통상 IT7~8급 정도로 대체로 리이머 등과 같은 2차가공은 필요로 하지 않는다.

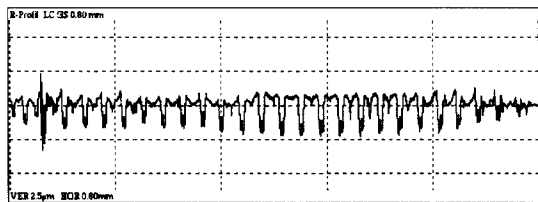


Fig. 4 surface roughness for the BTA drilling

Fig. 4는 $V=70\text{m/min}$, $f=0.15\text{mm/rev}$ 의 조건에서 측정된 대표적인 표면조도의 형상을 나타내었다. Fig. 5에서는 절삭속도의 변화에 따른 SM55C의 표면조도 분포를 나타내고 있다.

$V=70\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/rev}$ 에서 5S(Rmax)이하이며, 평균 $2.3\mu\text{m}$ 으로 표면조도가 가장 양호하게 나타났으며, $V=70\text{m/min}$, $f=0.15\text{mm/rev}$ 에서는 구간에 따라 다소 차이는 있으나 평균 $7.16\mu\text{m}$ 로 양호하게 나왔다. 표면조도는 이송속도에 영향을 많이 받으므로 절삭속도를 $V=70\text{m/min}$ 로 고정시키고 이송속도를 $f=0.1\text{mm/rev}$ 에서 $f=0.15\text{mm/rev}$ 로 증가시켰을 때, 표면조도가 나빠지는 것을 알 수 있었지만, 하지만 각 조건에 대한 실험결과 전체적으로 $10\mu\text{m}$ 이하로 양호하게 나타났다.

이처럼 표면조도가 대체로 양호한 이유는 가공이 이루어진 후에 안내패드에 의한 버니싱 효과에 의한 것으로 생각된다.

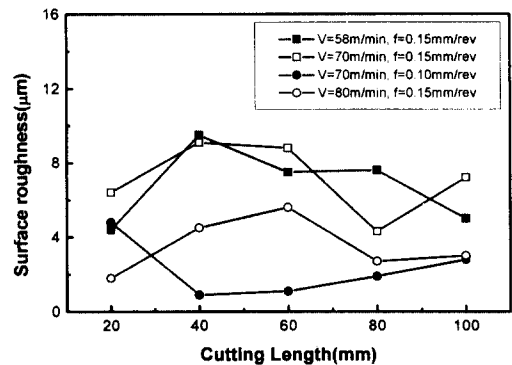


Fig. 5 Relation between surface roughness and cutting condition with BTA drilling

4.2 진원도의 상태변화

Fig. 6에서는 진원도를 측정된 결과를 나타내었으며, 일부 $17\mu\text{m}$ 까지 나타나는 경우도 있지만 대개 $12\mu\text{m}$ 이하의 구간에 분포되었다.

진원도의 경우는 절삭조건이 $V=70\text{m/min}$, $f=0.15\text{mm/rev}$ 일 때, 초기구간에서 $4\sim6\mu\text{m}$, 60mm 구간에서는 $2.5\sim2.1\mu\text{m}$, 100mm 구간에서는 $2.2\mu\text{m}$ 로 전구간에 걸쳐서 평균 $3.38\mu\text{m}$ 로써 가장 양호하게 나타났으며, $V=70\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/rev}$ 의 조건에서는 평균 $10.66\mu\text{m}$ 으로 나타났다.

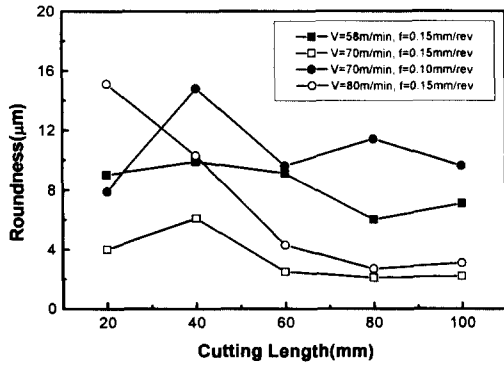


Fig. 6 Relation between roundness and cutting condition with the BTA drilling

이처럼 진원도는 이송속도보다는 절삭속도에 영향을 많이 받으므로 이송속도를 $f=0.15\text{mm/rev}$ 로 고정하고 절삭속도를 증가시켜 비교한 결과 $V=70\text{m/min}$ 보다 $V=80\text{m/min}$ 일 때가 진원도가 나쁘게 나타났으며, 이것은 가공깊이가 깊어짐에 따라 안내패드의 마멸과 더불어 구멍가공면에 있어서 버니싱 작용으로 공구에 무리한 힘이 가해지게 되고, 절삭속도가 높으면 공구의 절삭상태가 불안정한 상태로 되기때문에, 안내패드부에 작용하는 절삭력이 분산됨으로 인하여 공구의 반경방향으로 작용하는 힘이 약하게 되어 유압이나 공구진동에 영향을 받기 쉽게 되어 다각형의 형상오차가 발생하기 쉽기 때문이다⁷⁾.

본 실험조건에서 최적의 절삭조건은 표면조도와 진원도 모두 고려하여 전체적으로 평균을 내어 비교한 결과 $V=70\text{m/min}$, $f=0.15\text{mm/rev}$ 임을 알 수 있었다.

Fig. 7에서는 실제의 진원도 형상을 나타내었다. 이는 본 실험에서 발생된 다각형의 진원도 중에 가장 보편적인 것이며, 일부 타원형이나 4각형이 발생함을 볼 수 있었다.

BTA드릴링에서 다각형 형상의 원인 중의 하나는 진동이며, 그 진동형태가 보통 3가지로 종진동, 회전진동, 굽힘진동이 있으며 그 중 가장 지배적으로 로브에 영향을 미치는 것으로서는 굽힘진동이라 할 수 있다⁷⁾. 이는 공구의 형상조건과 지지조건 또 공작물의 특성이 일정하다면, 로

브형상이 공구의 진동주파수 ω_t 에 따라 로브의 수가 변하며, 이론적으로는 회전수가 증가할수록 구멍의 형상은 진원에 가까진다고 알려졌다. Fig. 9는 축중심의 운동에 따라 이론적으로 전개된 수식을 컴퓨터 프로그래밍으로 모델링한 로브(S=3, 5개)의 궤적이다.

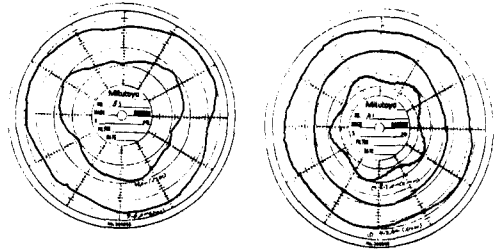


Fig. 7 Relation between lobe shape and roundness in the worked-shape

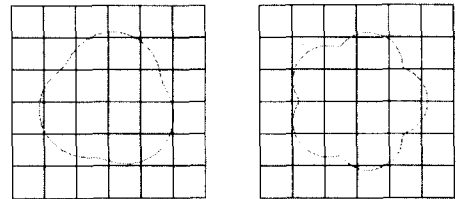


Fig. 8 Theoretical lobe profile(S=3, 5) of drilled hole

이것은 절삭속도의 변화에 따른 실제 진원도와 매우 유사한 경향으로 나타남을 알 수가 있었다. 또한, 다각형의 각수는 가공이 진행함에 따라 작아지는 경향이었으며^{7), 8)} 절삭속도가 변화함에 따라 로브형상은 3각형이 지속되었다. 그리고 BTA드릴 가공에서 로브형상은 홀수로 발생한다⁹⁾고 하지만 본 실험에서는 일부 짝수각형도 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 BTA 드릴링 시스템을 이용하여 BTA드릴로서 SM55C를 심공가공 하였을때 공작물의 표면조도 및 진원도 등에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻

었다.

(1) 표면 조도는 가공길이의 전구간에서 $10\mu\text{m}$ 이하로 되었다.

(2) 진원도는 $12\mu\text{m}$ 이하로 나오며, 다각형의 형상은 홀수각뿐만이 아니고 짝수각으로도 나오는 것이 확인되었다.

(3) 로브형상을 모델링한 결과와 실제 진원도의 관계가 매우 유사하며 지배적인 요소는 진동과 절삭속도의 변화임을 확인할 수 있었다.

(4) 본 실험조건 중에서 절삭속도는 70m/min , 이송량은 0.15mm/rev 일 때가 공작물의 가공면형상(표면조도, 진원도)이 가장 양호하였으며, 최적 조건임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 佐久間敬三, “穴加工技術の動向と問題”, 機械技術, 第30卷, 第8号, pp.2~10, (1982)
2. Griffiths, B. “Surface Integrity during Deep Hole Drilling, Proc. Int. Conf. Deep Hole Drilling and Boring”, 1, (1975~5)
3. 전태욱, 전연찬, 심성보, 장성규, “싱글튜브시스템 BTA 공구에 의한 박용부품 소재의 CNC 심공가공 특성에 관한 연구”. 한국해양공학회지, Vol. 8 No.1 pp. 131~143, 1994
4. 장성규, 심성보, 전연찬, 전태욱, “Deep Hole 가공시 공작물의 절삭성에 관한 연구”, 한국정밀공학회 '93년도 춘계학술대회논문집, pp. 76~80, 1993
5. Keizo Sakuma, Koichi Taguchi, Akio Katsuki, “Study on Deep-hole Boring by BTA System Solid Boring Tool”, 精密機械, 44卷, 9號, (1978)
6. 中村健三외; “穴加工ハンドブック”, pp. 154~200, 1979.
7. Katsuki, A., Onikura, h., Sakuma, K., Taguchi, K.; “The Influence of Tool Geometry on Axial Hole Deviation in Deep Hole Drilling -Shape of the Guide Pad-”, J. of the JSPE, Vol. 56, No. 524, pp. 1010~1016, 1990.
8. 심성보, “탄소강의 심공드릴 가공에 있어서 가공특성에 관한 연구”, 동아대학교 박사학위 논문, pp51, 1994
9. Sakuma, K., Taguchi, K., Katsuki, A; “Study on Deep Hole Boring by BTA System Solid Boring tool -Behavior of Tool and its Effects on Profile of Machined Hole -”, Bulletin of the JSPE, Vol. 44, No. 9, pp. 1111~1116, (1979)