

〈論 文〉

초음파 진동선삭에서의 절삭 및 진동특성에 관한 연구

A Study on the Cutting and Vibration Characteristic of Ultrasonic Vibration Cutting

이규배* · 임영호** · 이계철***

Kyu-Bae Lee, Young-Ho Lim and Kye-Chul Lee

〈1993년 12월 20일 접수 ; 1994년 3월 28일 심사완료〉

ABSTRACT

In this study, ultrasonic vibration cutting system was constructed by installing throw-away-tool tip (KT 350) by screw lock on the bending vibration mode in free-free beam. During the conventional cutting and ultrasonic conventional cutting of SM45C, variations of cutting force, roughness and acceleration were measured. The results were compared and analyzed in detail, and it was found that the ultrasonic vibration cutting was more effective in reducing cutting force compared with the conventional cutting.

기 호 설 명

- CC : 일반절삭
- UC : 초음파 진동절삭
- UCL : 저진폭 초음파 진동절삭
- UCH : 고진폭 초음파 진동절삭

1. 서 론

절삭가공에 관한 연구 개발과 발달에 의해 절삭가공에 진동이나 초음파 진동의 적용이 다양하게 시도되고 있으며 특히 최근에 이르러 각종 기계의 경량화, 고정밀화, 고성능화가 요구되면서 고인성, 고내열성, 고강도 등의 특성을 가진 재료를 고정밀하게 또한 우수한 가공면의 표면거칠기를 가지면서 능률적으로 제작할 수 있는 절삭가공이 절실하게 요구되고 있는 실정이다.

1985년 Kumehara⁽¹⁾는 진동흔 및 절삭공구를 직선

으로 연결하는 구조로 설계 제작한 초음파 진동공구를 선반가공에 적용시켜 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향에 관하여 고찰하였고, Miyasaka⁽²⁾는 1988년 압전소자의 초음파 진동자를 이용한 진동 절삭장치를 구상하여 고망간 강재에 대한 가공에서 가공면의 표면거칠기를 종전의 방법보다 1/3 정도 향상시킬 수 있는 결과를 제시하였다.

1990년 Zhao⁽³⁾는 1/4 파장을 갖는 진동흔을 설계하여 외팔보 형태의 초음파 진동절삭을 실험적으로 시도하였다.

페라이트를 사용한 자왜(磁歪) 진동자가 광대역 주파수 영역에 나타나는 특성에 비해 랑지방(Langevin) 진동자는 좁은 주파수 대역이며 온도변화의 특성과 안정성이 높기 때문에 안정된 초음파를 발생할 수 있는 시스템의 개발에서 초음파 발생장치로 개선되면서 부터 절삭가공, 방전가공 등 다양하게 활용되고 있다.

초음파 가공에서 초음파 진동자의 탄성진동과 전달에 사용되는 진동흔에는 각종의 특성을 지니고 있는 계단형이 활용되고 있고, 초음파 진동자와 진동흔의 체결을 당초에는 브레이징을 시도하였으나 분

*정회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

**숭실대학교 기계공학과

***숭실대학교 대학원 기계공학과

해, 조립 및 진동흔 등의 교환에 불편이 많은 단점이 있어 최근에는 볼트 체결방법을 적용하게 되었다.

따라서 본 논문에서는 선삭가공에서 초음파 진동 절삭을 적용하기 위하여 압전형 진동자를 이용한 볼트 체결형 랑지방 초음파 진동자, 진동흔과 양단자유보의 굽힘진동형 공구홀더 및 초음파 진동의 왜곡 현상을 제거하여 공구의 교환이 가능한 throw-away-tool tip를 설계 제작하여 절삭가공 시스템을 구성하고, SM45C 재를 선정된 절삭조건으로 선삭실험을 실시하였다. 또한 같은 조건으로 선삭실험을 실시한 일반절삭과 그 절삭특성 즉 절삭력, 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향 및 공구대의 진동 가속도 등을 비교 분석, 고찰하였다.

2. 초음파 진동절삭 시스템

2.1 초음파 진동절삭 시스템 설계

본 실험을 위해 진동자 단면의 진폭을 확대하는 초음파 진동흔에서 양 단면적의 면적비가 동일하다면 진폭확대율이 가장 좋은 계단형을 선정하였고, 진동자의 진동흔은 볼트 체결방법을 적용시켰다. 본 연구에 사용한 초음파 진동절삭 시스템은 고주파 발전기, 전원공급장치, 초음파 진동자, 진동흔 및 공구홀더로 구성되어 있다.

공구홀더는 양단자유보의 형태를 갖는 굽힘진동형으로 설계하여 공구대에 2점을 지지하였으며 절삭가공시 충분한 강성을 유지할 수 있는 사각형 단면을 가진 양단자유보의 해석을 검토하였다.

고주파 발전기는 트랜지스터 방식을 선택하였고 발전기에서 발생한 고주파 전력의 신호를 기계적은 초음파 진동으로 변환하는 부분의 형식은 주파수 특성이 협대역인 압전소자(piezo-electric element)를 이용한 랑지방 진동자를 사용하였다. 이때 공진점과 반공진점을 평가한 그림은 Fig. 1과 같다.

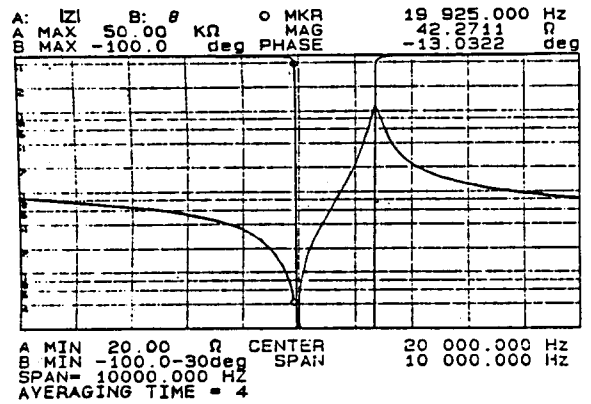
굽힘진동형 공구홀더를 설계함에 있어서 단면이 균일한 사각형을 적용시켰으며 이때의 굽힘진동 방정식은 다음과 같다.

$$EK_c^2 \frac{\partial^4 Z}{\partial X^4} + \rho \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

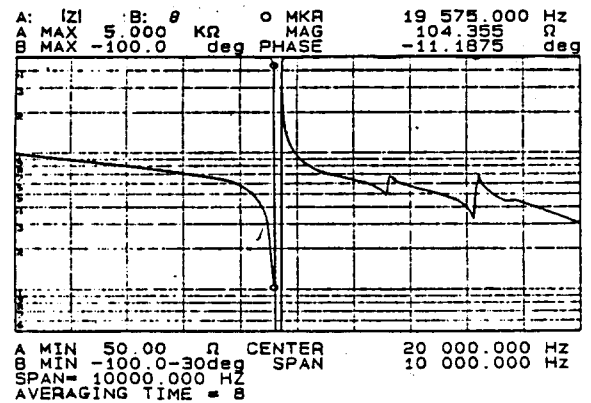
$$K_c^2 = \frac{1}{A} \iint Z^2 dydz \quad (2)$$

여기서, K_c : 회전방경 A : 단면적

양단자유보의 경우 굽힘 진동방정식에서 경계조건은,



(a) Ultrasonic transducer



(b) Bending Vibration tool holder

Fig. 1 Impedance and phase vs. frequency

$$X=0; \frac{\partial^2 Z}{\partial X^2}=0, \frac{\partial^3 Z}{\partial X^3}=0$$

$$X=L; \frac{\partial^2 Z}{\partial X^2}=0, \frac{\partial^3 Z}{\partial X^3}=0 \quad (3)$$

또한 굽힘진동형 공구홀더가 사각단면일때 그 길이 (L)은,

$$L = M_i \sqrt{\frac{K_c C_{sp}}{\omega}} \quad (4)$$

$$K_c = \sqrt{1/12h^2} \quad (5)$$

$$\cos M_i \cosh M_i = 1 \quad (6)$$

여기서, M_i : 정수

C_{sp} : 음속

i : 진동모드의 차수(1, 2, 3, ...)

양단자유보에서의 해는 다음과 같다.

$$Z = B_1 (\cos(kx) + \cosh(kx)) + B_2 (\sin(kx) + \sinh(kx))$$

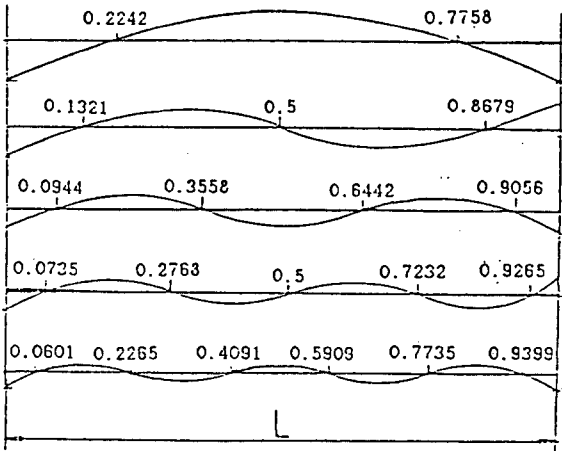


Fig. 2 Vibration model shape of free-free beam

Table 1 Natural frequency of free-free beam

Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th
Natural frequency (Hz)	1,497	4,126	8,089	13,372	19,977

Table 2 Vibration node point of theoretical and experimental data for free-free beam

Node point	4	3	2	1	-1	-2
Theory	165.989	121.590	72.689	24.361	24.361	68.760
Experiment	168	130	85	45	40	75

식 (3)의 초기조건을 식 (7)에 대입하여 진동모드를 절점에 따라 표시하면 Fig. 2와 같다. Table 1은 본 연구를 위해 설계 제작한 굽힘진동형 양단자유보 공구홀더의 진동모드에 대한 1차~5차까지를 이론적으로 계산한 결과 값이다.

초음파 발생기에서 발생된 신호가 랑지방 진동자를 거쳐 설계제작한 공구홀더에 초음파 진동을 가했을 때 발생하는 진동을 측정하였다. 이때 굽힘진동형 공구홀더에 초음파 진동을 가한 다음 절삭공구가 장착된 부분을 헬륨-네온 레이저원을 사용한 레이저 진동측정기로 측정하고, 이론적으로 계산한 값과 실험치를 비교해 보면 Table 2와 같다. 또한 주파수 분석한 결과를 도시하면 Fig. 3과 같다.

절삭가공에서 가장 영향을 크게 미치는 인자는 절삭조건이지만 절삭실험을 실시하기 전의 상태를 규명하기 위하여 척과 가공물, 굽힘진동형 공구홀더와 공구대 및 프레임 등에 대한 각 부의 고유진동수를

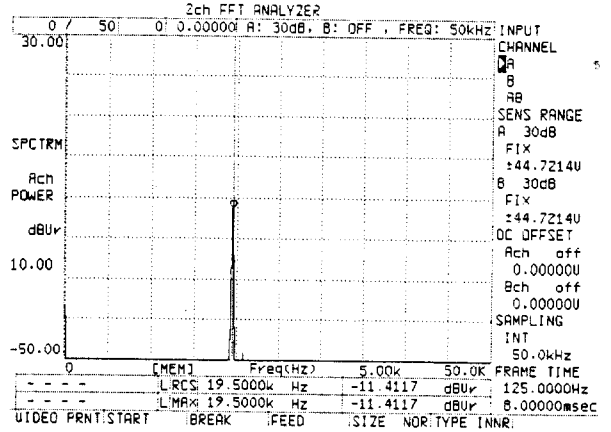


Fig. 3 Spectrum analysis of tool tip position for ultrasonic system

Table 3 Results of natural frequency in vibration cutting system

Test position		Natural mode (Hz)			
		1st mode	2nd mode	3rd mode	4th mode
1. Specimen	with tailstock	70	128	202	336
	without tailstock	42	130	192	256
2. Chuck	with tailstock	58, 70	120	204	338
	without tailstock	78	140	192	250
3. Tool holder		36	68	84	128, 204, 378
4. Tool post		36	66	86	-
5. Lathe bed		20	70	84	134, 204, 342

측정하고, 절삭실험 중에 발생하는 공구대의 진동 가속도 레벨의 상호간 관련성을 밝히고자 초음파 진동절삭계의 진동모드 실험을 실시하였다.

시험편, 척, 공구홀더, 공구대 및 베드 등에 선정 한위치에서 압전형 진동가속도계를 사용하여 충격해머에 의한 실험방법으로 진동모드를 확인하였다. 특히 시험편과 공구홀더는 심압대의 사용 유무를 적용시켜 반복 실험을 실시하였다. Table 3에는 이들 실험에서 측정된 결과를 나타내고 있다.

2.2 초음파 진동절삭 시스템 평가

진동절삭계의 시스템을 분석한 결과 진동모드는 심압대 사용 여하에는 관계없이 시험편은 130 Hz근방에서, 시험편을 체결하고 있는 척은 200 Hz근방에서 형성되고 있음을 확인할 수 있었다.

또한 설계 제작한 초음파 공구홀더의 진동모드는 36, 68, 84 Hz, 공구홀더를 설치한 공구대의 진동모

드는 36, 66, 86 Hz로 나타나 공구홀더와 공구대는 충분한 강성상태로 지지되고 있다고 볼 수 있다.

초음파 진동자와 진동혼은 볼트 체결 방법으로 설계 제작하고, 이를 임피던스 분석기로 분석한 결과 공진주파수는 19,925 Hz임을 찾게 되었는데 이는 전원 공급장치에서 제어가 가능한 영역 ± 800 Hz 이내에 해당됨을 확인할 수 있었다. 또한 초음파 진동자 및 공구 홀더를 체결한 초음파 진동절삭 시스템을 임피던스 분석기로 분석한 결과 위상과 임피던스의 공진제어가 가능한 주파수 대역 $20,000 \text{ Hz} \pm 800 \text{ Hz}$ 범위 내에 해당되므로 본 실험에 사용된 초음파 진동절삭 시스템은 매우 양호한 장치임을 확인하였다.

3. 실험

본 실험을 위하여 사용하는 절삭공구는 항상 새롭고 동일한 조건을 만족할 수 있도록 필요할 때마다 공구의 교환이 가능한 throw-away-tool tip을 사용할 수 있도록 공구와 공구홀더의 부착부분에 대한 초음파 진동의 왜곡현상을 제거하여 제작하였다.

절삭가공 시스템에 초음파 전원 공급장치에서 발생한 초음파 진동을 초음파 진동자에 공급하여 기계적인 진동 신호로 변환시켰다. 이때 진동방향은 초음파 진동자의 종방향(axial direction), 즉 가공물과 절삭공구가 접촉하는 절삭점에서 접선방향(tangential direction)으로 하였다.

진동혼에서 증폭된 진동을 곱힘진동형 공구홀더에 장착시킨 공구에, 초음파 진동자의 횡방향 진동, 즉 가공물과 절삭공구가 접촉하는 절삭점에서 반경방향(radial direction)을 제작한 초음파 진동자의 진동방향과 동일한 초음파 진동자의 종방향의 진동만을 작

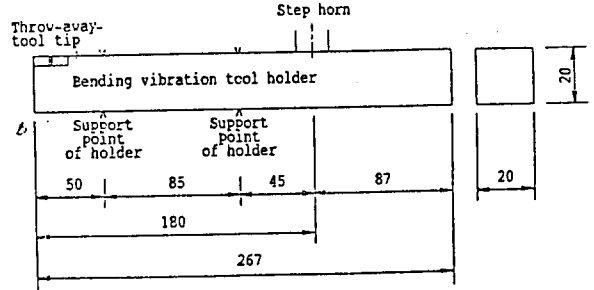


Fig. 4 Tool holder geometry

용시켰고, 선정된 절삭조건에 의해 초음파 진동절삭 실험을 실시하였다.

시험편은 SM45C재를 선정하였고, 절삭공구는 초경합금 KT350 throw-away-tool tip을 나사 체결 방법으로 공구홀더에 장착하여 사용하였다. Fig. 4는 공구를 장착한 공구홀더의 형상치수를 도시한 도면이다.

스트레인 게이지를 이용한 공구동력계 시스템을 제작하여 초음파 진동절삭실험에서 발생하는 주분력을 측정하였고, 압전형 가속도계를 공구대에 설치하여 여기서 출력된 신호를 진동분석기에 저장시켜 GPIB 인터페이스를 통하여 컴퓨터에 입력시켜 곱힘진동형 공구홀더를 지지하고 있는 공구대의 진동가속도와의 관계를 규명하였다. Fig. 5는 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

또한 본 실험에서는 같은 절삭조건일때의 일반절삭과 초음파 진동절삭 실험을 실시하여 각각의 절삭특성과 가공면의 표면거칠기 등을 비교검토하였다. 이때 초음파의 진동절삭에 대한 조건은 본 보고서 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 주파수 19,525 Hz에서 저진폭 초음파 진동 진폭을 $6.7 \mu\text{m}$ 와 고진폭 초

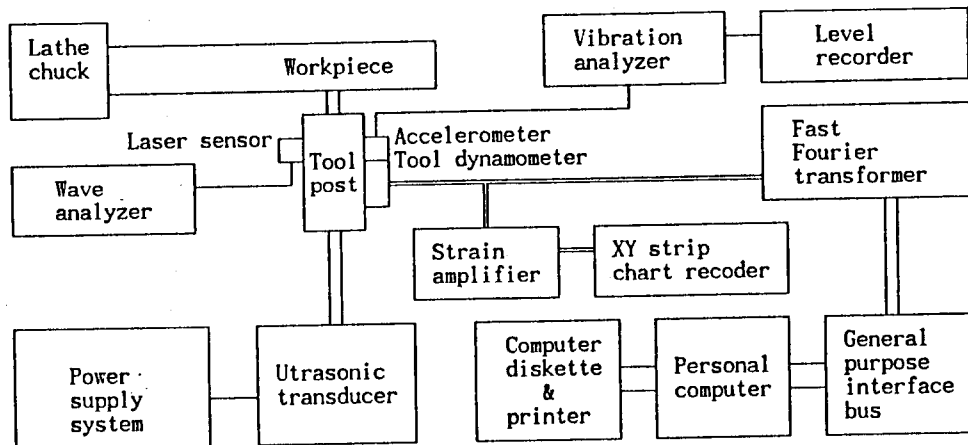


Fig. 5 Experimental apparatus of ultrasonic vibration cutting

음파 진동 진폭 $8.8 \mu\text{m}$ 를 적용하였다.

4. 절삭조건과 절삭저항

선삭실험에서 선정된 동일한 절삭조건을 일반절삭과 초음파 진동절삭을 실시하여 주분력의 변화관계를 도기한 것이 Fig. 6과 7이다.

그림에서와 같이 절삭속도와 이송량을 일정하게 선정하고 절삭깊이를 증가시키면 주분력은 증가되는 경향을 가지고 있다. 본 실험에서와 같은 절삭조건에서는 어느 경우나 일반절삭에 비해 초음파 진동절삭을 적용시켰을때 현저하게 주분력이 감소되는 사실을 발견할 수 있다. 초음파 진동절삭에서도 절삭깊이의 증가에 따른 주분력의 증가경향은 같으나 그 증가율은 일반절삭보다 완만한 경향임을 알 수 있다. 초음파 진동절삭에서도 절삭깊이의 증가에 따른 주분력의 증가경향은 같으나 그 증가율은 일반절삭보다 완만한 경향임을 알 수 있다. 이는 초음파 진동절삭으로 인한 마찰저항을 감소시키는 효과에서

오는 현상으로 볼 수가 있으며 결과적으로 초음파 진동절삭을 적용시키므로써 일반절삭에 비해 절삭동력을 감소시키는 효과를 기대할 수가 있다.

초음파 진동절삭에서 주파수 $19,524 \text{ Hz}$ 에서 초음파 진동 진폭을 $6.7 \mu\text{m}$ 와 $8.8 \mu\text{m}$ 로 적용시켰을 때 주분력은 진동 진폭의 증가에 반비례하여 감소되는 현상을 보이고 있지만 그 감소효과는 2 kg_f 정도로 그다지 큰 값은 아니다.

한편 Fig. 8과 9는 절삭깊이를 0.4 mm , 절삭속도를 15 m/min , 29 m/min 로 선정하고 이송량을 변화시켰을 때의 일반절삭과 초음파 진동절삭에서 주분력 값의 변화관계를 도기한 그림이다. 그림에서와 같이 절삭깊이와 절삭속도를 일정하게 선정하고 이송량을 변화시켰을 때 주분력은 모두 이송량의 증가에 비례해서 거의 직선적으로 증가되는 경향이다. 이와같은 변화관계는 일반절삭이나 초음파 진동절삭에서도 다같은 양상이지만 절삭력의 크기는 일반절삭에 비해 초음파 진동절삭일 때가 현저하게 작은 값을 형성하고 있음을 알 수 있다. 다만 초음파 진

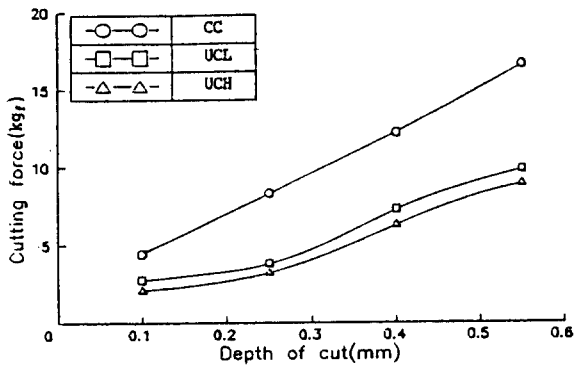


Fig. 6 Cutting force vs. depth of cut ($V=15 \text{ m/min}$, $F=0.06 \text{ mm/rev}$)

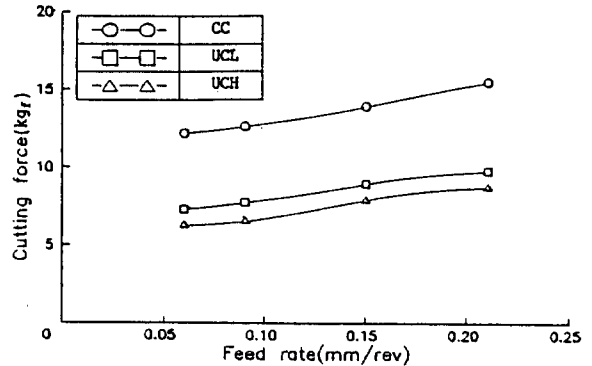


Fig. 8 Cutting force vs. feed rate ($t=0.40 \text{ mm}$, $V=15 \text{ m/min}$)

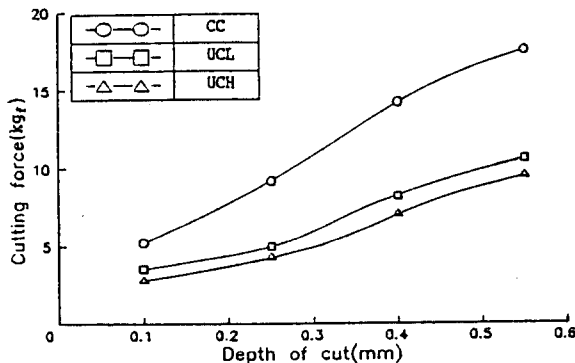


Fig. 7 Cutting force vs. depth of cut ($V=29 \text{ m/min}$, $F=0.06 \text{ mm/rev}$)

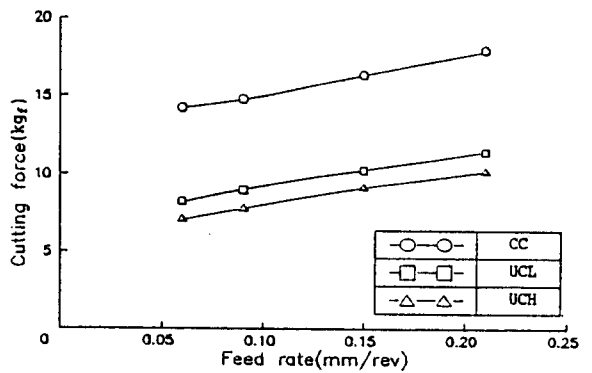


Fig. 9 Cutting force vs. feed rate ($t=0.40 \text{ mm}$, $V=29 \text{ m/min}$)

동절삭에서의 UCL과 UCH의 경우는 UCH의 경우가 다소 작은 주분력값을 형성하기는 하지만 UCL과의 차이는 별로 크지 않다. 따라서 같은 조건에서도 초음파 진동절삭을 시도한다면 일반절삭에 비해 절삭동력을 감소시키는 효과를 기대할 수가 있다.

5. 절삭조건과 가공면의 표면거칠기

선정된 절삭조건에 의해 일반절삭과 초음파 진동절삭을 실시한 시험편 가공면의 표면거칠기를 표면거칠기 측정기로 측정한 결과에서 이송량과 절삭속도를 일정한 값으로 선정하고 절삭깊이를 변화시켰을 때의 가공면의 표면거칠기 변화관계를 도시하면 Fig. 10 및 11과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 절삭깊이를 증가시키면 가공면의 표면거칠기는 다소 불량해지는 경향이지만 거의 큰 변화는 나타나지 않는다. 그러나 초음파 진동절삭을 실시할 때는 일반절삭으로서는 기대할 수 없는 거울면의 표면거칠기가 얻어짐을 알 수가 있다. 그러므로 선정된 절삭조건

에서 거울면에 가까운 가공면의 표면거칠기를 얻으려면 초음파 진동절삭을 시도하는 것이 바람직하다.

Fig. 12와 13은 절삭깊이와 절삭속도를 일정하게 선정하고 이송량을 변화시켰을 때 가공면의 표면거칠기의 변화관계를 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 이송량이 증가됨에 따라 모두 비례하며 가공면의 표면거칠기는 불량해지는 경향임을 알 수가 있다.

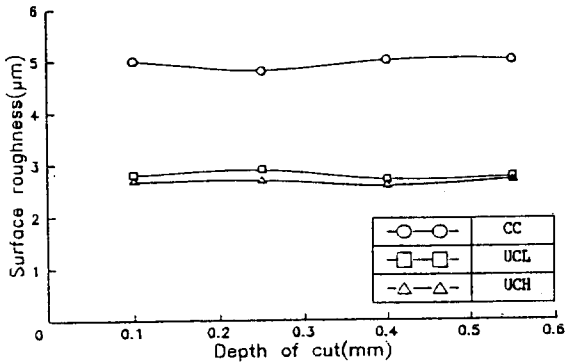


Fig. 10 Surface roughness vs. depth of cut ($V=15$ min, $F=0.21$ mm/rev)

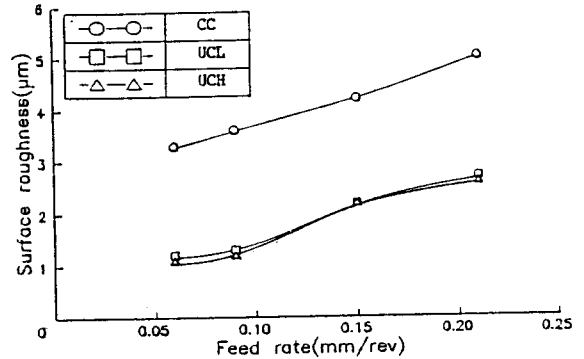


Fig. 12 Surface roughness vs. feed rate ($t=0.40$ mm, $V=15$ m/min)

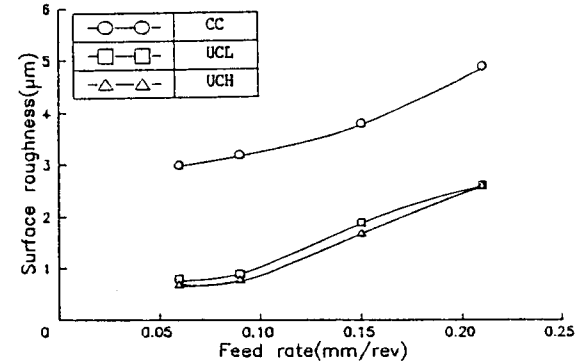


Fig. 13 Surface roughness vs. feed rate ($t=0.40$ mm, $V=29$ m/min)

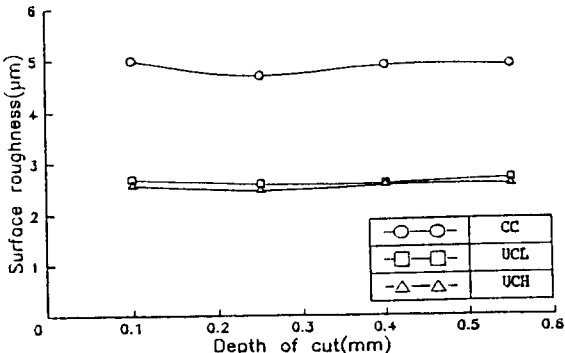


Fig. 11 Surface roughness vs. depth of cut ($V=29$ m/min, $F=0.21$ mm/rev)

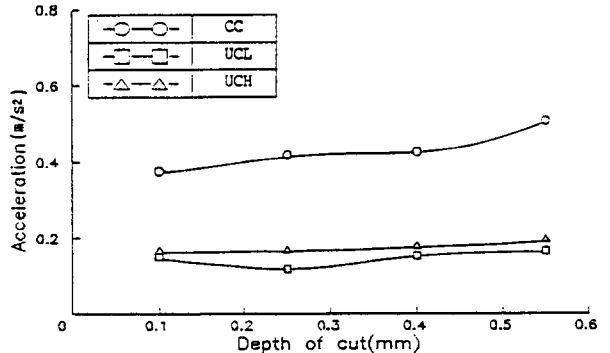


Fig. 14 Acceleration vs. depth of cut ($V=15$ m/min, $F=0.06$ mm/rev)

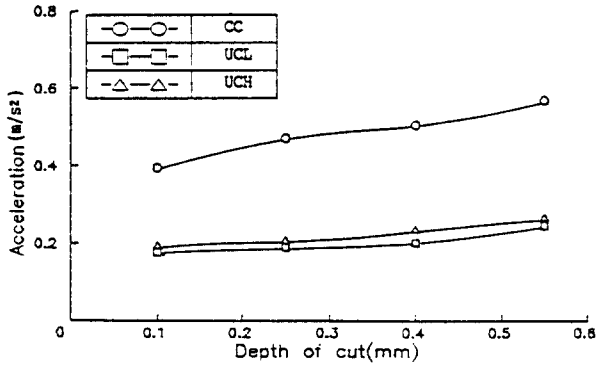


Fig. 15 Acceleration vs. depth of cut ($V=29$ m/min, $F=0.06$ mm/rev)

이와 같은 변화관계는 일반절삭이나 초음파 진동절삭에서 다 같은 양상을 형성하고 있지만 같은 조건에서도 초음파 진동절삭에 의한 가공면의 표면거칠기는 일반절삭에 의한 표면거칠기 보다 거울면에 가까운 양호한 표면거칠기를 형성하고 있음을 알 수가 있다.

그러나 초음파 진동절삭에서의 UCL과 UCH의 경우는 UCH의 경우가 UCL의 경우보다 다소 양호한 가공면의 표면거칠기를 형성하나 별로 차이가 없는 상태이다.

6. 초음파 진동절삭에서의 진동가속도

선정된 절삭조건으로 절삭가공을 실시할 때의 진동현상을 규명코자 공구대 설치한 진동 가속도계에 비하여 약 2배정도 높은 것으로 나타났다. 이는 초음파 진동절삭일 때 구조물의 지지강성이 보다 효율적인 지지형태를 유지하고 있음을 알 수가 있다.

절삭속도를 증가시켰을 때 발생하는 진동가속도는 다소 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 절삭깊이를 증가시켰을 때는 일반절삭이나 초음파 진동절삭 모두 진동가속도는 증가되고 있지만 초음파 진동절삭일 때가 일반절삭일 때 보다 증가폭이 완만하다. 이는 초음파 진동절삭에서 초음파 진동이 절삭가공 중 연속적으로 충격을 가하게 되어 일정한 진동레벨이 절삭깊이의 증가에 따른 변화폭을 감소시키는 효과에서 나타나는 현상이라 볼 수 있다.

7. 결 론

SM45C재를 초경 합금 공구 KT350 throw-away-tool tip으로 절삭할 때 굽힘진동형 공구홀더를 설계

제작하고 양단자유보 형태의 5차 진동모드를 적용시켜 초음파 진동절삭 시스템을 구성하고 선정된 절삭 조건으로 일반절삭과 초음파 진동절삭을 실시하여 주분력의 변화 거동, 가공면의 표면거칠기 및 진동가속도 등을 측정하고 이를 분석 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 선삭가공에서 초음파 진동절삭은 일반절삭에 비해 절삭저항을 크게 감소시키고 절삭동력을 줄이는 효과를 갖게 된다.

(2) 초음파 진동절삭에서 가공면의 표면거칠기는 일반절삭에 비해 매우 우수하며 거울면에 가까운 표면거칠기를 얻을 수 있다. 일반절삭에 비해 이송량 0.1 mm/rev 이하에서는 약 3배, 그 이상의 이송량에서는 약 2배의 가까운 향상을 기대할 수 있다.

(3) 선삭가공에서 발생하는 진동가속도는 초음파 진동절삭일 때가 일반절삭에 비해 약 40 dB 이상의 신호대 잡음비를 갖는 결과를 얻게 되었다.

참고문헌

- (1) Kumehara, H. and Mori, M., 1985, "Study on Threaded Joints in Ultrasonic Vibration System — The Case where Threaded Joints are Located Between Transducer and Horn," JSPE, Vol. 51, pp. 2241~2246.
- (2) Miyasaka, K., Kasuya, U. and Yoshikawa, T., 1988, "Study on Cutting Technology of Difficult to Machine Materials — Structure and Cutting Performance of Ultrasonic Cutting Machine," JIMM, Vol. 42, No. 3, pp. 89~96.
- (3) Zhao, J., Li, H. and Wang, L., 1990, "An Ultrasonic Vibration Cutter System with 1/4 Wavelength Horn Type Concentrator," ACTA Acoustica, Vol. 15, No. 1, pp. 67~70.
- (4) Moore, D., 1986, "Ultrasonic Impact Grinding," Carbide and Tool Journal, pp. 21~23.
- (5) Thavasimuthu, M., Palanichamy, P. and Subramanian, C. V., 1989, "Evaluation of Abrasive Wheels by an Ultrasonic Dry Couplant Technique," British J. of NDT, pp. 388~390.
- (6) Kohls, J. B., 1984, "Ultrasonic Manufacturing Process: Ultrasonic Machining (USM) and Ultrasonic Impact Grinding (USIG)," the Carbide and Tool Journal, pp. 12~15.
- (7) Dharmadhikari, S. W. and Sharma, C. S., 1985,

- “Optimization of Abrasive Life in Ultrasonic Machining,” J. of Engineering for Industry, Vol. 107, pp. 361~364.
- (8) Seimiya, K., Kikuchi, K. and Ito, S., 1979, “Frequency Characteristics of Cavitation Ultrasonic Waves in Electrochemical Machining,” UDC 621.9, pp. 30~39.
- (9) Koshimizu, S. and Inasaki, I., 1989, “Hybrid Machining of Cemented Carbide-Combination of Ultrasonic Machining and Electric Discharge Machining,” JSME(C), Vol. 55, No. 509, pp. 197~200.
- (10) Mukha, I. M., Udanovich, M. R. and Vinnichenko, V. N., 1987, “Ultrasonic Hardening of Carbide Twist Drills,” Sverkhtverdye Materialy, Vol. 9, No. 2, pp. 39~41.
- (11) Zhao J., Wang, L. and Li, H. 1991, “A New Side Clamped Ultrasonic Vibration Cutting System with Two Stage Amplification,” Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, No. 3, pp. 249~256.
- (12) Komaraiah, M., Manan, M. A., Reddy, P. N. and Victor, S., 1988, “Investigation of Surface Roughness and Accuracy in Ultrasonic Machining,” Precision Engineering, pp. 59~65.