한국공작기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집 pp.685~690

공구 여유각 변화가 선삭가공의 채터 진동에 미치는 영향에 관한 연구

최영휴*(창원대), 이정상(창원기계공고)

An Experimental Study on the Effect of Relief Angles on the Chatter Vibration in Turing

Young-Hyu Choi*(Changwon Univ.),
Jeong-Sang Lee(Changwon Mechanical Technical High School)

Abstract

In this study the relationship between relief angles and chatter vibration in turning was examined by using the direct cutting test, in which the cutting depth of a tapered workpiece is varied continuously and the limiting depth of cut is measured at the time when chatter occurs. Test results reveal that 1) limiting depth of cut increases in proportion to side relief angles between 0° and 3° , 2) limiting depth of cut does not show any evident change in spite of side relief angle increases from 3° to 12° , 3) also limiting depth of cut does not change despite front angle change from 0° to 12° .

1. 序論

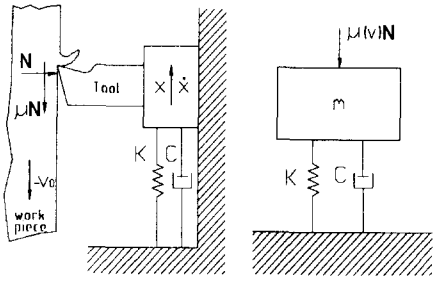
최근 高速切削 또는 强力切削이 증가됨에따라 진동문제가 중요한 과제로 등장하게 되었다. 그 중에서도 채터진동은 불안정 진동으로서 가공의 精密度와 表面組度에 악영향을 미치고 가공능률 저하시킨다.

채터진동의 원인은 공작기계 구조, 공작물과 공구의 특성, 절삭조건 등이 있다. 절삭조건과 공구 특성과 채터진동의 관계에 대한 연구 동향을 보면 Marui[1] 등은 선삭시 채터진동을 측정한 결과 절삭폭 1mm 이하에서는 절삭속도가 높을수록 진폭이 적고 절삭폭 2mm 이하에서는 절삭속도가 높을수록 진폭이 커짐을 밝혔다. 또한 연강을 절삭속도 63m/min로 가공하였는데 앞면 여유각이 클수록 진폭이 적었다. Doi[2]등은 가공계의 컴플라이언스(Compliance)치가 낮을 때 耐채터 진동성이 높다고 하였다. Marui[1,3] 등은 重複係數(Overlap factor) 0에서 0.8의 범위에서 가공했는데 중복계수가 작을수록, 절삭속도가 클수록 진폭이 컸다. Tlusty[4]과 Marui[3,5]는 재생 채터진동에 대해 연구하였다. 김규일[6]은 선삭시 공구의 오버행(Overhang)이 적을수록, 회전속도가 적을수록 한계절삭깊이가 크다고 하였다. Toshiba사의 자료[7]에는 공구의 여유각이 커질수록 채터진동이 생기기 쉽다고 한다. 특이한 것은 Toshiba Tungaloy사의 자료에는 여유각이 클수록 채터진동이 생기기 쉽다고 하였으나 Marui[1,3]등의 논문에서는 앞면 여유각이 클수록 진동의 진폭이 작다는 것이다. 이처럼 모호한 공구여유각이 채터진동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 본 논문에서는 공구의 여유각을 여러 가지로 변화시키면서 시험편을 가공할 때 발생하는 진동을 측정하여 채터링이 일어나는 한계절삭깊이를 산정하고자 한다.

2. 채터진동 기구 모델링

공작기계는 질량, 스프링, 감쇠분포를 갖는 무한 자유도의 진동계이다. 그러나 실제로 생기는 채터 진동의 대부분은 특정한 몇 개 운동자유도 방향에 한정되어 있고 이들 방향의 고유진동수 하나를 중심으로 하는 진동수를 갖는다. 즉, 진동의 1차 모드만이 불안정하게 된다. 따라서, 진동계를 1 자유도의 진동계로 가정할 수 있다.

Fig. 1은 선삭시의 채터 현상을 해석하기 위한 1 자유도 등가 진동계 모델링이다[8].



<turning mechanics> <equivalent model>

Fig. 1 An Equivalent Model for the Analysis of the Chatter with Flank Wear

Fig. 1의 선삭 메커니즘에서 공구는 절삭속도 v의 방향으로 평행 이동하며, 가공면에 수직인 절삭력 N는 일정한 것으로 가정하고, 공구 끝단의 상당질량 m, 스프링 상수 k, 감쇠계수 c, 공구와 공작물 사이의 마찰감쇠계수를 c_μ, 작용력을 $F(t)$라 하면, 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$m\ddot{x}+(c+c_\mu)\dot{x}+kx=F(t) \qquad (1)$$

위 식의 c_μ는 다음과 같이 표현된다. 즉, 마찰력 $\mu(v)N$의 동마찰계수 $\mu(v)$이 공구와 가공물의 상대속도 v에 비례하여 변동하는데, 상대속도 v는 절삭속도 v_0와 진동속도 $\dot{x}$의 합인 $v=v_0+\dot{x}$로 표시되므로 Taylor 급수 전개를 이용하여 전개한 다음 고차 항을 무시하면 다음과 같이 표현된다.

$$\mu(v)-\mu(v_0) \approx \left.\frac{d\mu}{dv}\right|_{v_0}\dot{x} \qquad (2)$$

그런데 절삭속도 v_0는 일정하므로 채터 진동을 유발하는 변동 마찰력은 다음과 같다.

$$[\mu(v)-\mu(v_0)]N=\left\{\left.\frac{d\mu}{dv}\right|_{v_0}N\right\}\dot{x} = c_\mu\dot{x} \qquad (3)$$

여기서,

$$c_\mu=\left\{\left.\frac{d\mu}{dv}\right|_{v_0}N\right\} \qquad (4)$$

운동방정식에서 Laplace변환된 응답을 구하면 다음과 같다.

$$X(s)=\frac{F(s)}{ms^2+(c+c_\mu)s+k} \qquad (5)$$

Routh-Hurwitz 판별법으로부터 진동응답이 안정할 조건은 다음과 같다.

$$c+c_\mu>0 \qquad (6)$$

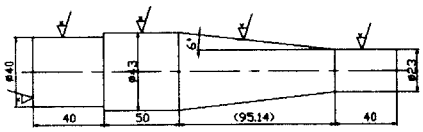
그런데 마찰계수가 공구와 공작물의 상대속도에 대해 감소하는 특성을 갖는다면, 즉 $\frac{d\mu}{dv}<0$인 경우에는 $c+c_\mu$가 陰(-)이 될 수 있으므로 계는 동적 불안정 상태가 되어 진동이 급격하게 증가될 수 있다.

그런데 절삭력은 본질적으로 전단면의 전단응력과 마찰면의 전단응력에 관계되고, 절삭력과 마찰력은 2차원 절삭이론에 의하면 주로 공구경사각(Rake angle), 전단각(Shear angle), 마찰각(Friction angle)의 기하학적 분력관계로 표현된다[9,10]. 그리고 주절삭력 방향(Vertical)보다 배분력 방향 Rradial)의 공구-지지계의 진동속도가 상대적으로 증가되면 공구 여유면에 마찰이 증가될 수 있다고 알려져 있으므로[9] 이 경우 공구여유각은 마찰력에 영향을 줄 수 있을 것이다. 그러나 지금까지 공구 여유각이 선삭 채터진동에 미치는 영향에 대한 해석적 또는 실험적 방법의 연구결과가 명확하게 알려진 바가 없다.

3. 채터 振動의 實驗的 解析

3.1 시험편

가공시험편의 형상 설계도와 제작된 시험편을 Fig. 2에 나타내었다. 시험편의 재질은 연강(SM20C)이다. Fig.2 (a)의 시편 왼쪽 40mm 부분이 척에 고정된다. 오른쪽 40mm위치에서부터 0.075mm/rev속도로 이송시키면서 테이퍼진 부분을 절삭한다.



(a) 형상 설계도

(b) 제작된 시편

Fig. 2 Test Work Piece

3.2 切削工具 條件

실험용 절삭공구는 KS 3202 33형 초경 외날 바이트를 사용하였으며 여유각을 제외한 공구각은 연강을 초경 바이트로 가공할 때 권장하는 각도를 사용하였다. 공구의 단면규격은(19mm × 19mm)이다. 공구각의 명칭은 Fig. 3과 같다.

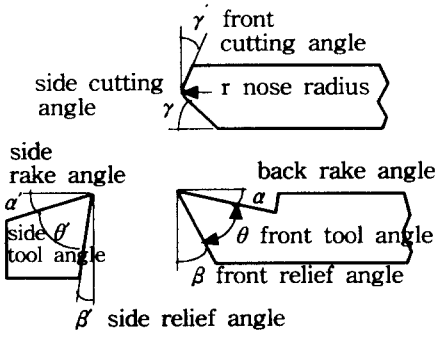


Fig. 3 Tool Designation

옆면 여유각 및 앞면 여유각을 초경 바이트로 연강을 가공할 때 공구의 각도는 각각 5~10° 범위에서 사용하도록 추천하고 있다. 그러나 1차 가공실험 결과 추천각도 범위에서는 옆면 및 앞면 여유각의 변화가 채터진동에 미치는 영향이 거의 나타나지 않았으므로 여유각을 0° 부터 12° 까지 변화시키면서 실험하기로 하였다. 실험에 사용된 공구 각도는 Table 1과 같다.

Table 1 Relief Angle Variations of Tools Used in the Cutting Test

Tool No.	Tool designation angles (deg)					
	β'	β	α	α'	γ	γ'
1	0	3	2	6	15	0
2	1					
3	2					
4	3					
5	6					
6	9					
7	12					
8	3	0				
9		3				
10		6				
11		9				
12		12				

3.3 절삭조건

1) 유동형 칩이 발생할 수 있는 절삭속도인 약 100m/min에 가까운 조건이 되도록 가공시험편의 직경 23mm를 기준으로 1260rpm으로 선정하였다.

2) 이송속도 : 0.075mm/rev

3) 공구 오우버행 : 30mm

4) 시편 중심 오차: 2/100mm

5) 절삭유 : 사용않음

6) 시운전 : 1260 rpm에서 1시간

7) 주변여건 : 주변기계는 정지상태

3.4 절삭실험 및 측정장치 구성

3.4.1 선반 사양

절삭실험용 선반은 범용 선반으로 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Specifications of the Test Lathe

Contents	Specification
Maker	화천기공
Model	WL-380B
Main Motor	4.6hp
Swing on the Bed	400 mm
Spindle Speed	45~1800 rpm

3.4.2 측정기기

공구와 시험편의 상대운동을 측정을 위하여 설치한 측정장치는 Fig.4와 같고 갭센서의 사양은 Table 3과 같다.

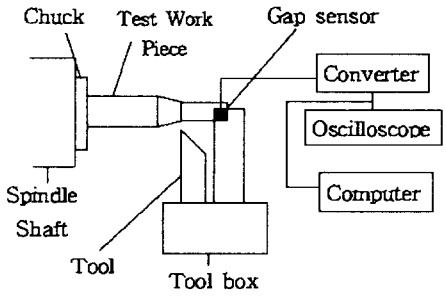


Fig. 4 Test Equipment Setup

Table 3 Specification of the Gap Sensor

Contents	Specification
Maker	(株) 電子應用 Japan
Resolution	TG-46
Model	AEC-5509
Measuring Range	0 ~ 4.0㎜
Output	±5V

3.5 加工實驗 및 測定方法

직접절삭시험법[8]으로 선삭가공시 공구의 옆면여유각과 앞면여유각을 여러 가지로 변화시키면서 각각의 경우에 채터의 발생시점과 그때의 절삭깊이를 측정한다.

마찰접촉력이외의 영향을 최소화시키기 위하여 절삭속도, 이송속도, 공구의 오버행, 시험편의 재질 등을 일정하게 유지하고, 외부 가진력이 없는 상태에서 가공을 한다.

베이스를 공구대에 설치하고 이 베이스에 갭센서를 설치하여 시험편(공작물)과 공구의 상대변위를 측정한다.

갭센서에서 측정된 신호로부터 진폭이 갑자기 크게 변하는 시간을 읽어 가공한 총시간을 산정한다. 총 가공시간을 이송속도와 곱하여 절삭거리를 계산한다. 절삭거리에 시험편의 단면 기울기 값을 적용하여 공구가 채터진동을 일으킨 때의 한계절삭깊이를 결정한다.

한편, 가공실험은 유효한 측정이 각 공구형상마다 2번씩 되도록 총 24번의 실험을 하였다. 실험시 워밍업(Warming up)을 위하여 시운전은 1시간 시행하였으며 실험의 정확성을 높이기 위하여 주변의 공작기계들은 모두 정지시킨 상태에서 실험대상 공작기계만 작동시켰다.

3.6 實驗結果

3.6.1 측정 데이터

절삭속도, 이송속도, 공구의 오버행, 시험편의 재질 등을 일정하게 한 상태에서 테이퍼진 시험편을 절삭할 때 공구와 시험편의 상대변위를 갭센서로 측정한 데이터의 예를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 진폭이 갑자기 상승한 점이 채터 발생 시점이다. Table 1의 공구조건에서 실험을 하여 총 24개의 유효 측정데이터를 기록하였다.

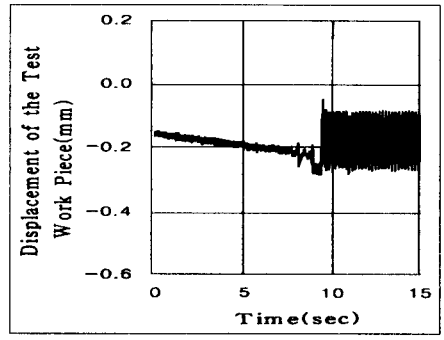


Fig.5 Measured Vibration Gap Signal Between Tool and Work Piece

3.6.2 한계절삭깊이 산출

Fig. 5와 같이 측정된 갭센서 신호에서 채터가 발생한 시간을 구하여 한계절삭깊이를 계산한다. Fig. 6은 절삭깊이 계산을

위하여 공구와 절삭시편의 기하학적 관계를 도시한 그림이다.

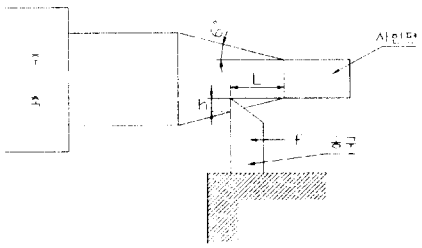


Fig. 6 Schematic of Work Piece and Tool for the Cutting Depth Calculation

Fig. 6에서 이송속도(단위시간당 이송거리) f로 가공할 때 t_c시간 경과시 채터가 발생하였다면 채터 발생 가공거리(공구의 직진 이송 거리) L_c는 다음과 같이 계산된다.

$$L_c = F \times t_c \qquad (7)$$

그러므로 시험편의 경사각(Taper angle)이 θ일 때, 한계절삭깊이 h_{limit}는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h_{lmit} = L_c \times tan\theta \qquad (8)$$

3.6.3 채터 진동 측정결과

Table 4는 각각의 실험 공구각 조건별로 선삭실험을 하여 측정된 유효한 2개씩의 진동변위 데이터로부터 산출한 채터진동 발생시간과 그 때의 가공거리 및 절삭두께를 정리한 것이다.

Table 4에서 공구번호 1번에서 7번까지는 앞면 여유각은 3 °로 일정한 상태에서 옆면 여유각을 변화시킨 경우이고, 공구번호 8번에서 12번까지는 그와 반대로 옆면 여유각이 3 °로 일정한 상태에서 앞면 여유각을 변화시킨 경우의 측정값이다.

Table 4 Chatter Vibration Test Results

공구번호	공구각		채터 발생 시간 (s)	가공 거리 (㎜)	한계 절삭 깊이 (㎜)
	옆 면 여유각 (β'°)	앞 면 여유각 (β°)			
1	0	3	8.90	14.02	1.47
			10.20	16.07	1.69
2	1	3	16.60	26.15	2.75
			13.00	20.48	2.15
3	2	3	25.00	39.38	4.14
			21.50	33.86	3.56
4	3	3	25.50	40.16	4.22
			26.20	41.27	4.34
5	6	3	24.80	39.06	4.11
			28.00	44.10	4.63
6	9	3	28.00	44.10	4.63
			28.00	44.10	4.63
7	12	3	28.00	44.10	4.63
			32.00	50.40	5.30
8	3	0	26.80	42.21	4.44
			22.80	35.91	3.77
9	3	3	27.50	43.31	4.55
			21.50	33.86	3.56
10	3	6	24.50	38.59	4.06
			20.00	31.50	3.31
11	3	9	22.51	35.45	3.72
			26.92	42.40	4.46
12	3	12	26.80	42.21	4.44
			20.50	32.29	3.39

4. 結果 檢討

선삭가공 실험결과 옆면 여유각과 앞면 여유각의 변화와 한계절삭깊이와의 관계선도를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

먼저 Fig. 7에서 옆면 여유각을 변화시키면서 실험한 경우를 보면, 채터 발생 절삭깊이는 옆면 여유각이 커질수록 절삭깊이가 비례하여 커지나 옆면 여유각이3° 이상에서는 절삭깊이의 증가가 거의 일어나지 않았다.

다음에 Fig. 8에서 앞면 여유각을 변화시키면서 실험한 경우를 보면, 채터 발생 절삭깊이는 앞면 여유각이 커져도 채터가 발생하는 한계절삭깊이는 거의 동일하다.

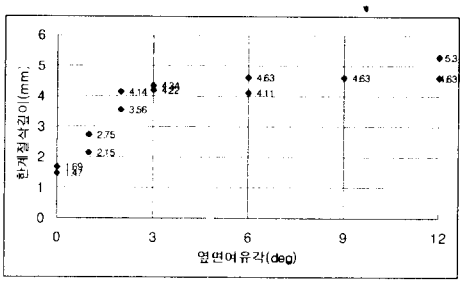


Fig. 7 Cutting Thickness versus Side Angle of Relief

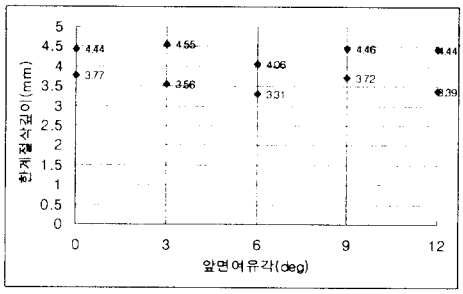


Fig. 8 Cutting Thickness versus Front Angle of Relief

5. 結論

본 논문에서는 초경공구를 앞면 여유각과 옆면 여유각을 0° ~12° 범위의 각도로 변화시키면서 테이퍼진 연강 시험편을 절삭속도 100mm/min, 이송 0.075mm/rev로 선삭가공할 때 생기는 시험편의 진동을 갭센서로 측정하여 채터링을 일으키는 한계절삭깊이를 알아보는 직접절삭실험을 수행하였으며 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 옆면여유각이 0° ~3° 사이에서 증가될 때 한계절삭 깊이는 여유각에 비례하여 증가한다.

2) 옆면여유각이 3° ~12° 사이에서 변화될 때 한계절삭깊이는 옆면여유각의 변화에 관계없이 거의 일정하다.

3) 앞면 여유각이 0° ~12° 사이에서 변화될 때 채터가 발생되는 한계절삭 깊이는 거의 일정하였다.

4) 앞으로 보다 다양한 재료의 시험편과 다양한 종류의 공구, 예를 들어 칩 브레이커를 부착한 바이트 등을 사용하여 가공실험을 하면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

(1) Etsuo Marui, Satoshi Ema, Shinobu Kato, "旋削 바이트의 채터振動" 日本 機械學會論文集, 제48卷 428號, pp.606~613, pp.614~621, 1982.

(2) Masahiro Doi and Yasuo Muroya,"旋盤의 動特性 試驗法의 開發" 日本 機械學會 論文集, 제56卷 529號, pp.2521~2526, 1990.

(3) Etsuo Marui, Masatoshi Hashimoto, Shinobu Kato,"旋削 바이트의 再生채터振動" 日本 機械學會 論文集, 제55卷 510號, pp.261~266, 1989.

(4) Etsuo Marui, Masatoshi Hashimoto, Shinobu Kato,"旋削 바이트의 再生채터振動" 日本 機械學會 論文集, 제56卷 530號, pp.236~241, 1990.

(5) J. Tlusy,"High Speed Milling," Keynote Speech at 6th IMEC Session I, pp.35~60, 1994.

(6) 金主一,"國産 旋盤의 動的 性能 試驗 및 評價에 關한 硏究,"서울대학교, 석사학위논문, 1982.

(7) Toshiba Tungalouy 카탈로그 '94~'95년판 pp.621~623.

(8) 李用成 : "切削 및 硏削理論", 東明社, pp.145~165, 1994.

(9) N. H. Cook,"Manufacturing Analysis," MIT Press, 1966.

(10) 김동원,"기계공작법," 청문각, 1993.