

## 원동 외경 연삭 가공의 절삭력 해석에 관한 연구

김 성 모 , 안 유 민

(한양대학교 대학원 정밀기계공학과, 한양대학교 기계공학과)

### 1. 서 론

산업발달과 첨단 제품의 개발이 촉진되어지고 각종 기계부품의 정밀가공이 요구되어지고 있다. 따라서 정밀가공의 중요성 증대와 함께 연삭가공의 사용량이 늘어가고 있다. 이때 연삭가공시 연삭기 공작기계 구조내의 진동 등에 의하여 chatter가 발생 되어지고, 이로 인하여 가공물의 가공치수등에 나쁜 영향을 미친다.

본 논문에서는 연삭가공에 대해 밝혀진 이론적 해석과 연구 실험 결과를 토대로 기본적인 연삭가공 조건변화에 따른 연삭력과, 연삭기 공작기계를 역학적으로 모델링하여 시간에 따른 동적인 연삭력의 변화를 예측해 보고자 한다. 또, 공작물이 가공되어지기 위해서 필요한 최소의 연삭력을 임계 연삭력이라 하는데, 이것은 연삭력 예측에 중요한 역할을 한다. 그러므로 임계 연삭력도 예측해 보고자 한다.

연삭력의 수직분력이 가공물 연삭량과 연삭숫들의 마멸량에 밀접한 관계가 있음이 많은 실험에 의해 밝혀져있다. [1] 연삭력과 연삭량 혹은 마멸량과는 일반적으로 선형적인 관계가 있으며 이들 사이의 비례도는 연삭숫들의 드레싱 조건과 연삭가공 조건에 따라 결정되어진다. 여러 실험에 의해 비례 정도를 나타내는 비례상수 값이 실험적으로 제시되어 있으며 연삭력의 수직분력을 근사적으로 구하는 데 사용될 수 있다. 연삭력의 접선분력과 절삭 속도의 곱은 공작물을 연삭가공하기 위해 필요한 동력을 나타내게 된다. 이 동력은 가공물질을 연삭가공에 의해서 불필요한 부분을 제거하는데 필요한 에너지에 의해 좌우된다. 많이 사용되는 가공물 재질에 대해서는 연삭가공 비에너지가 실험적으로 구해져 있으며 이 자료를 이용하면 연삭력 접선분력의 예측이 가능해진다.

동적인 경우를 고려하기 위해 R.A.Thompson[10]과 Liao & Shiang[9]등이 발표한 논문을 보면, Thompson은 연삭력을 sin함수와 exponential함수의 곱으로 설정하여 이 식의 계수들을 구해나가는 방법으로 예측하였다. 그러나 고려해야 할 계수들이 너무 많아 복잡한 감이 있다. Liao & Shiang은 비록 연삭력 자체를 예측하지는 않았으나 연삭력이 관련되어 있는데, Inasaki & Yonetsu[11]이 도입한 1자유도계로 모델링하여 시뮬레이션을 하였다. 그러나 임계 연삭력은 고려하지 않았다. 본 논문에서는 임계 연삭력을 비교적 간단한 방

법으로 구하고, Liao & Shiang과 같이 모델링하여 연삭력을 예측해 보고자 한다. 이때, 가공시 발생하는 열이나 가공유 등의 영향은 무시하였다.

### 2. 절삭력 모델링

연삭력은 그방향에 따라 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 그것은 연삭숫돌면과 가공면에 수직으로 작용하는 수직력( $F_n$ )과 접선력( $F_t$ )이다. 주어진 연삭 조건으로  $F_n$ 과  $F_t$ 를 예측하기 위하여 기존의 여러 실험식과 자료를 이용한다.

#### 2.1 수직력 ( $F_n$ )

수직력을 구하기 위해서 다음의 관계식을 이용한다. [1]

$$Z_w = \Lambda_w (F_n - F_{no}) \quad (2.1)$$

$$Z_s = \Lambda_s F_n \quad (2.2)$$

여기서,

$Z_w$ : 연삭가공률(Metal removal rate)

$Z_s$ : 연삭숫돌 마멸률(Wheel removal rate)

$\Lambda_w$ : 연삭가공변수(Metal removal parameter)

$\Lambda_s$ : 연삭숫돌 마멸변수(Wheel wear parameter)

$F_{no}$ : 임계력(Threshold force)

위 관계식에서  $Z_w$ 와  $Z_s$ 는 각각 가공물과 연삭숫들의 단위 시간당 제거되어지는 부피를 말한다.  $F_{no}$ 는 연삭이 일어나기 위한 최소 연삭력을 말한다. 이때 이힘은 경작(plowing)을 일으키는데 필요한 힘이다. [2] 이 실험식에서  $\Lambda_w, \Lambda_s$ 와  $F_{no}$ 는 주어진 주어진 연삭 조건에서 일반적으로 비교적 일정한 값을 나타내므로 상수로 간주한다. 이때 연삭가공이 용이한, easy-to-grind(ETG), 재료와 그렇지 못한, difficult-to-grind(DTG), 재료에 따라 그 식이 조금씩 다르다. 또,  $\Lambda_s$ 는  $F_n$ 이 크게 증가함에 따라 일정하게 유지 되어지다가 그 값이 증가한다. 즉, 어느 순간의  $F_n$ 값부터는  $\Lambda_s$ 값이 증가하여 크게 2개의 연속적인 직선으로 나타내거나, 2차 곡선으로 나타낸다. 여기서는 후자를 택했다.  $\Lambda_w$ 와  $\Lambda_s$ 에 대한 식을 보면 [3,7]

가. Metal Removal parameter :

$$\Lambda_w(ETG) = 7.93(10)^5 \left(\frac{Vw}{Vs}\right)^{0.158} \left[1 + \frac{4ad}{3fd}\right] fd^{0.58} Vs$$

$$/ (de^{0.14} Vb^{0.47} dg^{0.13} Rkc^{1.42}) \quad (2.3)$$

여기서,

Vw: 가공물 (회전)속도      dw: 가공물 직경  
 Vf: 가공물 마멸속도      Vs: 연삭숫돌 회전속도  
 ds: 연삭숫돌 직경      Vi: 연삭숫돌 이송속도  
 ap: 연삭숫돌의 폭

de, Equivalent diameter

$$de = d_s / (1 + d_s/d_w) : \text{외경연삭}$$

$$= d_s / (1 - d_s/d_w) : \text{내경연삭}$$

Hn: 연삭숫돌 경도      Sn: 연삭숫돌 결합도

$$V_b = 1.33H_n + 2.2S_n - 8$$

ds = 0.0254 / 연삭입자 입도 (Mesh number)

fd: 드레싱 이송폭(Dress lead)

ad: 드레싱 깊이(Depth of dress)

Rkc: 로크웰 경도값

Wheel Grade	H	I	J	K	L	M	...
Hn	0	1	2	3	4	5	...

\* 위의 정의를 뒤에서도 계속 따르도록 한다.

\* 단위는 모두 SI Unit 로 하였다. 편의상 이후에 표시하지 않았음.

Λs(DTG) 는 연구되어진 실험식이 존재하지 않는다. 따라서 참고문헌에 실험적으로 구해진 자료값을 참고하기로 한다. [3]

<표2.1> Approximate Values of the Metal Removal parameter for Some Difficult to Grind materials

Metal Removal parameters			
Material	Description	in <sup>3</sup> /min	in <sup>3</sup> /min
T-15	Highspeed steel,	0.00015-0.0015	9-90
	tungsten type		
M-2	Highspeed steel,	0.0004-0.0011	25-70
	Molybdenum type		
Inconel X	Nickel alloy	0.0006-0.0025	37-150
M-4	Highspeed steel,	0.0002-0.002	12-120
	Molybdenum type		
M-50	Highspeed steel,	0.0019-0.0045	120-280
	Molybdenum type		

나. Wheel Wear parameter :

연삭가공이 쉬운 재료에 대한 Λs 는 다음과 같다. [4]

$$\Lambda_s(ETG) = Afd^2 \left(1 + \frac{2ad}{fd}\right) VsFn / de^{1.2/Vb} Vb^{0.85} ap = MfFn$$

$$\left(A = \frac{1.148(10)^{-7}}{0.0254^{1.2/Vb}}\right) \quad (2.4)$$

연삭가공이 어려운 재료에 대한 Λs 는 다음과 같다. [4]

$$\Lambda_s(DTG) = Bde^{2/3} VsFn^{5/3} / ap^{1.67} Vb^{1.86} = MfFn^{5/3}$$

$$(B = 2.679(10)^{-10}) \quad (2.5)$$

식(2.1)에서 Fn에 대해 풀면

$$F_n = Z_w / \Lambda_s + F_{no} \quad (2.6)$$

위에서 Zw는 연삭 방법과 조건에 따라 정해지고, Λw는 연삭숫돌의 드레싱에 따라 결정되어 진다. 임계력은 기존의 자료에서 추정하여 Fn을 예측한다.

## 2.2 접선력 (Fc)

접선력을 구하기 위해서 다음 관계식을 고려한다. [5]

$$POWER = F_c V_c = Z_w \quad (2.7)$$

$$F_c = \mu F_n \quad (2.8)$$

가 성립한다. 이때, Fc 와 Vc 는 가공면과 연삭숫돌면 사이에 작용하는 접선력과 접선속도이다. Zw는 앞에서 구했고, 연삭가공 비에너지 u는 주어진 조건에 해당되는 값을 실험측정치에서 참고하기로 한다. [6] 이때 해당 재료가 Table에 없을 때는 경도(hardness)값으로 비교하여 예측한다.

또, 식(2.1), (2.7), (2.8)에서 Fno를 무시하면

$$\mu = u \frac{\Lambda_w}{V_c} \quad (2.9)$$

을 얻는다. 이때 식(2.9)를 식(2.8)에 대입하여 Fc를 예측한다.

$$F_c = u \Lambda_w \frac{F_n}{V_c} \quad (2.10)$$

<표2.2> Approximate unit power requirements for surface grinding

Workpiece material	Hardness	Specific Energy(Ws/mm <sup>3</sup> )
Aluminum	150 HB	6.8 - 27
Cast iron (class 40)	215 HB	12 - 60
Low Carbon steel (1020)	110 HB	13.7 - 68
Titanium alloy	300 HB	16.4 - 55
Toolsteel(T15)	67 HB	17.7 - 82



고 보고 상수로써 처리를 한다.

1자유도계로 모델링하여 Laplace영역에서 나타 내면 다음과 같다.

$$\frac{Gm(s)}{Km} = \frac{\left(\frac{1}{Km}\right)}{\left(\frac{s}{wn}\right)^2 + 2\zeta wn \left(\frac{s}{wn}\right) + 1}$$

(4.9)

그리고 Xm과 Fn과의 관계는 다음과 같다.

$$Xm = \frac{Gm(s)Fn}{Km} \quad (4.10)$$

여기서 Km은 static(model) stiffness이고 ζ와 wn는 각각 연삭기의 감쇠비 고유진동수로서, 모델링 했을때 연삭기의 동적인 특성을 나타내는 값들이다. 그러므로 Km, ζ, wn는 우리가 입력값으로 대입하는 값들이다.

#### 2.4.2 시뮬레이션

식(4.10)을 시간 영역으로 표시하면 (4.11)을 얻는다. (단, 초기조건은 모두 영으로했음)

$$\frac{Km}{wn^2} \left( \frac{d^2}{dt^2} Xm + 2\zeta wn \frac{d}{dt} Xm + wn^2 Xm \right) = Fn \quad (4.11)$$

위 식에서 Kw, Ks는 정적상태의 연삭력 예측에서 구해지고, Kc, Km, wn, ζ는 우리가 입력값으로서 주는 input이다. 따라서 우리는 연삭조건, Kc, Km, wn, ζ를 input으로 준다.

이때 loop에서 t를 Δt만큼씩 증가시키고, Ww(t-Tw), Ws(t-Ts)는 Tw/Δt, Ts/Δt번 전의loop에서의 값을 기억하고 있다가 사용하였다. 미분방정식은 Runge Kutta Method를 사용하였고 Δt값에 민감한 반응을 보이므로 Δt값을 충분히 작게 잡아야했다.

### 2.5 임계연삭력 예측

앞에서는 임계연삭력을 이론적인 배경을 바탕으로 예측한 것이 아니었다. 다음은 임계연삭력을 예측할 수 있는 방법에 대해 보기로 한다.

우선 아래같이 가정한다.

1. 탄성 변형을 무시한다.
2. 진동의 영향을 무시한다.
3. 수직연삭력이 steady state에 있다고 본다.

위의 가정하에서 식(2.1), (2.2), (3.1), (3.2),

(3.3)과 식(4.7)을 고려하면,

$$\pi Dw Ap Vf = \Lambda w (Fn - Fno) \quad (5.1)$$

$$\pi Ds Ap rs = \Lambda s Fn = M1 Fn2 \quad (5.2)$$

$$u(t) = Ww(t-Tw) + Ws(t-Ts) + (Fn-Fno)/Kw + Fn/Ks$$

$$= Ww(t-Tw) + Ws(t-Ts) + (Fn-Fno)/Kw + M1 Fn2 / (Vs Ap) \quad (5.3)$$

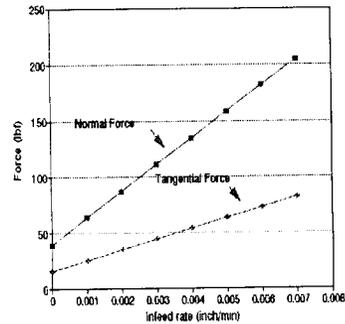
$$Vi - Vf = rs \quad (3.3)$$

Steady state를 가정하였으므로 모든 값들을 상수값으로 간주하면, 4개의 식과 4개의 미지수로 구성된 1차 방정식이 된다. 이때, u(t)와 Ww, Ws는 시간에 따라 변하지만, 위의 가정하에서 시뮬레이션을 한 결과 그 차이값은 거의 일정한 값을 보였다. 따라서 상수로써 볼 수 있다.

위의 식들을 연립하여 Fno에 대해 풀고, 초기값으로 Fno=0을 대입하여, 동적인 연삭력 시뮬레이션과 같은 방법으로 계산한다.

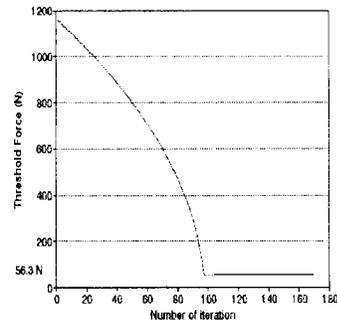
## 3. 결과

### 3.1 연삭력



<그림 3.1> 플런지 원통외경 연삭력

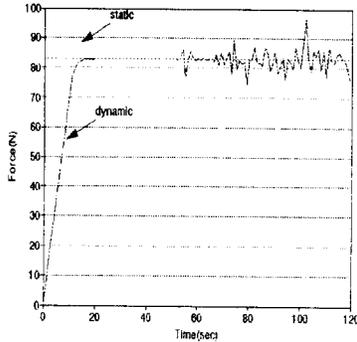
### 3.2 임계 연삭력



<그림 3.2> 임계 연삭력예측

위의 계산에서 단위폭당 임계 연삭력은 56.3 N으로 나왔다. 이것은 다른 실험자료에 나온 값과 비교해 볼 때 16.4% 정도의 오차를 보였다. [3]

### 3.3 동적연삭력



<그림 3.3> 연삭기의 진동을 고려한 동적 연삭력

### 참고 문헌

- [1] Robert S. Hahn & Richard P. Lindsay, "Principles of Grinding...part1 Basic Relationships in Precision Grinding," Machinery, July, 1971, pp55-62.
- [2] S. Malkin, "Grinding Technology theory and applications of Machining with Abrasives," John Wiley & sons, 1989, Chapter 5.
- [3] Geoffrey Boothroyd & Winston A. Knight, "Fundamentals of Machining and Machine Tools", Dekker, 1989, Chapter 10.
- [4] Robert S. Hahn & Richard P. Lindsay, "Principles of Grinding...part3 the wheel parameter." Machinery, Sept. 1997, pp33-39.
- [5] Richard P. Lindsay, "Principles of Grinding," Metals Handbook 9th Edition vol.16 Machining, 1989, pp. 421-426.
- [6] Sero Kalpakjian, "Manufacturing Engineering and Technology second edition", Addison Wesley, 1992, p. 784.
- [7] Robert S. Hahn & Richard P. Lindsay, "Principles of Grinding...part2 the metal removal parameter", Machinery, August, 1971, pp33-39.
- [8] K. Srinivasan, "Application of the Regeneration Spectrum Method to Wheel Regenerative Chatter in Grinding," Transactions of the ASME, February, 1982, pp. 46-54.
- [9] Y. S. Liao & L. C. Shiang, "Computer Simulation of Self-Excited and Forced Vibrations in the External Cylindrical Plunge Grinding Process".
- [10] R. A. Thompson, "On the doubly regenerative stability of a grinder: The theory of chatter", Transactions of ASME, May 1986, vol. 108, pp. 75-82.
- [11] Inasaki I., Yonestu S., "Regenerative Chatter in Grinding", Proceedings of the 18th International Machine Tool Design and Research Conference", 1977, Pergamon Press, pp. 423-429.