

공작기계의 채터진동에 대한 켈스트럼 분석

Cepstrum analysis on the chatter vibration generated by the machine tool

김명구* · 최봉학** · 이흥식*** · 조종두****

Myounggu Kim , Bonghak Choi , Heungshik Lee and Chongdu Cho

Key Words : Chatter vibration(채터진동), Cepstrum analysis(켈스트럼 분석), Nonlinear vibration(비선형 진동), Subharmonic motion(고차조화운동), Superharmonic motion(분수조화운동)

ABSTRACT

There were many researches about the chatter vibration occur in the cutting process of machine tools. But there are insufficient research parts ; the frequency about the chatter vibration and its characteristics and its nonlinear properties. This paper measured signals of vibration that occur before and immediately after and after the chatter vibration. This signals were analyzed through autospectrum obtained by the Fast Fourier Transform(FFT). And then, the nonlinear characteristics were analyzed by cepstrum analysis through FFT of autospectrum.

1. 서 론

현대의 공작기계의 목표는 공작물 가공시 높은 생산성과 높은 정밀도를 구현시키는데 있다. 생산성을 높이기 위한 방법으로 단위시간당 절삭량이 높은 중절삭을 하고 이에 따라 절삭속도, 절삭깊이, 공구 등의 절삭조건 등을 기계의 동작범위 내에서 최대로 하는 것이다. 그러나 고속절삭과 중절삭 시 여러 종류의 진동이 발생하는데 그중 채터진동이 가장 심각한 문제를 일으키고 있다. 채터진동은 공구와 공작물 사이의 상대운동에 의해서 발생하는 격렬한 비선형 진동에 의해서 발생한다. 이 진동은 공작기계의 공구대, 공구 및 공작물을 상하게 할 뿐만 아니라 공작물의 가공정밀도를 현저하게 떨어지게 하여 고속절삭과 중절삭을 할 수 없게 한다.

따라서 채터 문제를 해결하기 위하여 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔으나, 그 거동자재와 발생원인이 대단히 복잡하여 아직도 완전한 해결책을 찾고 있지 못하고 있다.

이러한 채터발생의 검출에 관한 실제적인 연구는 1971년 영국의 공작기계 산업연구협회(MTIRA)가 처음으로 공작물 진동진폭의 변화를 측정, 채터소음 측정등의 방법으로 채터진동을 판별할 수 있다고 제안하였다.^{[1][2]}

그 이후 영국의 공작기계산업연구협회에서는 공작물 진동과 진폭을 측정하여 채터진동의 진동 유무를 판별하였다. 1892년 일본의 Marui^[3]는 '선삭 바이트의 채터 진동' 이라는 논문에서 절삭시 바이트의 휨량의 변화가 절삭에 미치는 영향에 대하여 조사하였고, 2002년 캐나다의 F. Ismail^[4]은 '유연한 부품의 5축 가공에서 발생하는 채터 억제' 라는 논문에서 알루미늄 블레이드 가공시 발생하는 채터진동에 대한 억제방법을 제시하였고 2002년 폴란드의 T. Kapitaniak^[5]는 '재생절삭과정에서의 혼돈진동' 이라는 논문에서 선반에서 재생 절삭시 발생하는 비선형 진동에 대하여 수치해석적인 연구를 하였다.

본 연구에서는 공구에 가속도계를 수직, 수평방향으로 공구 전면에 부착하여 정상 가공시 진동과 채터진동이 발생하기 전, 후의 진동을 측정하였다. 채터진동의 발생 전, 후의 진동을 오토스펙트럼(autospectrum)과 켈스트럼(cepstrum)으로 분석하여 채터진동시 발생하는 비선형 진동현상을 규명하였다. 그리고 채터진동에서 발생하는 분수조화운동(subharmonic motion)과 고차조화운동(superharmonic motion)의 특성을 연구하였다.

* 인하대학교 기계공학과
E-mail : mgkim21@hotmail.com
Tel : (032)860-7321, Fax : (032)868-1716

** 인하대학교 기계공학과
*** 인하대학교 기계공학과
**** 인하대학교 기계공학과

2. 이론적 배경

2.1 chatter진동의 발생

자려채터(self-excited chatter)는 절삭계의 외부에서 주어지는 어떤 외란 없이 그 자체의 불안정에 의해 발생되므로 발생현상에 대한 역학적 이해와 근본적인 원인을 밝혀내지 않고서는 억제하기가 매우 곤란하다. 이러한 자려채터는 발생조건에 따라 초기채터(primary chatter: non regenerative)와 재생채터(regenerative chatter)로 분류할 수 있다. 초기채터는 계의 진동운동과 공작물의 전회전에서 생성된 굴곡표면 사이의 상호작용이 없는 절삭조건에서 일어나는 자려채터이며, 재생채터는 전회전 절삭에서 남겨놓은 공작물의 굴곡표면(inner modulation)이 그 다음 회의 절삭 표면(outer modulation)에 영향을 줌으로써 일어나는 자려채터이다. 실제 절삭 가공에서 재생채터는 초기 채터보다 일어나기 쉬우며, 대부분의 절삭에서 문제로 발생하는 것이 이러한 재생 채터이므로^[6] 이에 대한 발생 기구를 정확히 이해하는 것이 필요하다.

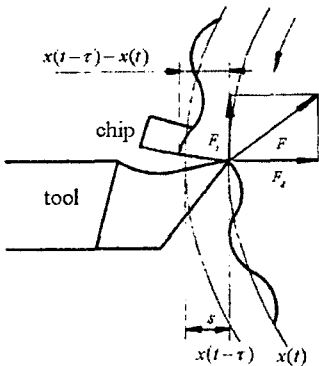


Fig.1 Model of orthogonal cutting

Fig.1은 선삭에서의 2차원 절삭가공을 표현한 것으로서, 외부에서 오는 충격이나 절삭 과정에서의 어떤 요인에 의하여 공구와 공작물 간에는 상대적인 변위가 생기게 되고, 이에 따라 공구 진입 방향으로의 절삭력 성분에 현저한 영향을 미치게 된다. 여기서 공구 공작물의 수직방향 진동변위 성분은 절삭력에 크게 영향을 주지 않고 채터가 발생하여도 절삭 합력이 작용하는 방향은 항상 일정하고 크기만 변화한다고 가정한다.^[7]

재생채터는 전회 절삭에서 남겨놓은 기록을 다음회 절삭에서는 약간 쳐져서 앞의 굴곡을 모방하여 절삭하는 현상으로 설명할 수 있다. 여기서 두 굴곡간에 생기는 위상지연(phase delay)의 값은 기계 구조계의 강성전달함수(stiffness transfer function)의 특성에 따라서 결정된다. 따라서 수평방향 절삭력 성분은 공구의 폭을 b , 동적 비절삭저항(dynamic specific cutting resistance)을 k_d 로 표시할 때

$$F_d = k_d \cdot b \cdot [X(t-\tau) - X(t)]$$

로 표현할 수 있다. 여기서 $X(t-\tau)$ 는 다음회의 절삭표면(outer modulation)의 효과, $X(t)$ 는 전회절삭에서 남겨놓은 공작물의 굴곡표면(inner modulation)의 효과이다. 일반적인 외경절삭에서는 이송량 S 로 인하여 절삭표면(outer modulation)이 그 다음 회 절삭에 미치는 영향의 정도가 변화하므로 중복계수의 도입이 필요하다. 중복계수(overlap factor) μ 굴곡표면(inner modulation)에 겹치는 절삭표면(outer modulation)의 정도를 표시하는 양으로 이송에 따라 $0 \leq \mu \leq 1$ 의 값을 가지며, 절단가공이나 플렌지 절삭에서는 $\mu=1$ 이 되고 나사절삭에서는 $\mu=0$ 되며 재생효과가 없다.

2.2 캡스트럼(cepstrum)

캡스트럼(cepstrum)은 '대수파워 스펙트럼의 파워스펙트럼'으로서 1963년에 최초로 정의되었다. 이것은 그 당시 지진신호의 에코(echo)검출을 위해 자기상관함수 보다 우수한 성질이 있어서 그 대안으로 제시되었다. 이것은 스펙트럼의 스펙트럼이기 때문에 스펙트럼(spectrum)의 단어를 바꾸어서 캡스트럼(cepstrum)이라는 용어를 만들어냈다. 캡스트럼의 독특한 특징은 이것이 스펙트럼의 스펙트럼인 것이 아니라 원래 스펙트럼의 대수변환인 것이다.

파워 캡스트럼의 정의는 다음과 같다.

$$C_{AA}(\tau) = F^{-1}[\log S_{AA}(f)]$$

$C_{AA}(\tau)$: 파워 캡스트럼 (Power cepstrum)

$S_{AA}(f)$: 오토스펙트럼 (Autospectrum)

F^{-1} : 역푸리에 변환 (Inverse Fourier Transform)

캡스트럼을 쉽게 설명하면 오토스펙트럼을 다시

한번 더 푸리에변환한 것이다. 이것은 오토스펙트럼 상에서 고주파의 하모닉성분이나 측대파 (side band frequency) 의 성분들이 어느 일정한 주파수 간격으로 스펙트럼이 나열되어 있으면 그 간격을 하나의 주기로 표현할 수 있다. 캡스트럼에서는 고주파의 하모닉 성분과 측대파 성분들이 시간축에서 하나의 피크(peak) 성분으로 나타나기 때문에 주파수 변조나 비선형 현상을 분석하는데 유용하다.

3. 실험장치 및 실험내용

공작기계의 절삭공정에서 발생하는 채터진동은 공구와 공작물 사이의 심한 상대적인 진동을 발생시킨다. 채터진동에 의한 공구의 절삭력의 변화는 직접적으로 공구를 가진 시키므로 공구에서 발생하는 진동현상을 분석함으로써 채터 진동의 발생유무를 판별 할 수 있다.^[8] 채터진동의 발생시의 시편의 진동 변화등을 측정할 수 있도록 Fig. 2, Fig.3 와 같이 실험장치를 구성하였다.

공구의 진동은 공구 전면에 부착시킨 가속도계를 사용하여 측정하였고 가속도계는 상하 방향(z축), 좌우방향(x축)으로 각각 한 개씩 가속도계를 부착하였다.

공작기계의 절삭공정이 안정된 상태에서 불안정한 상태로 점차 진입시키기 위하여 테이퍼진 원통형 시편을 사용하였다. 테이퍼진 시편을 공작기계의 주축대에 고정시키고 심압대에서 주축대방향으로 일정한 회전속도에서 절삭을 진행함으로써 절삭 깊이가 연속적으로 증가하여 절삭량이 증가하도록 하였다. 절삭량의 증가로 절삭계는 점차 불안정하게 되고 어느 한계 절삭 깊이에 도달하게 되면 채터진동이 발생하기 시작한다. 채터진동이 발생후에도 계속 절삭을 하여 채터진동이 발생하기 전과 후의 진동을 측정하여 비교 분석 하였다.

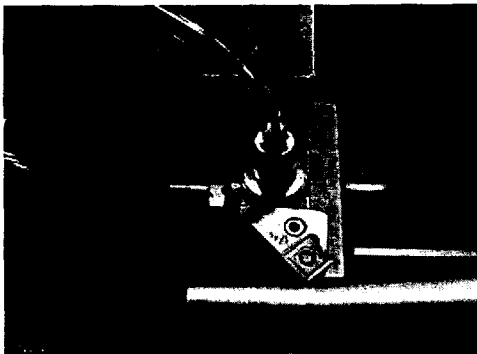


Fig.2 Set-up for the tool

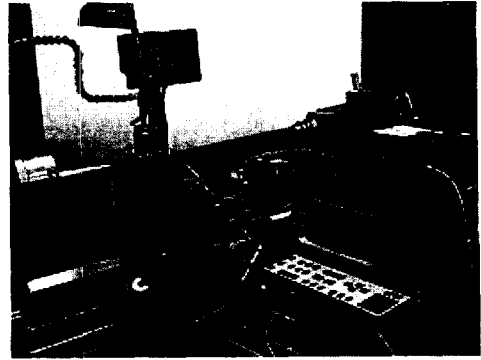


Fig.3 Set-up for the experiment

공구전면에 부착되어 있는 가속도계에서 측정된 신호는 전하증폭기(charge amp)을 통하여 증폭이 되어서 테이프 레코더(SONNY DAT)에 저장을 하였다. 측정된 진동신호는 오토스펙트럼과 캡스트럼 분석방법을 이용하여 신호분석을 하였다.

3.1 절삭공구

본 실험에 사용된 절삭공구는 CNMA 1906 규격으로 초경 4720 외날 바이트를 사용하였으며 여유각을 제외한 공구각은 연강을 초경 바이트로 가공할 때 권장하는 각도를 사용하였다. 공구바이트의 특성으로 써메트는 4720, Tin 코팅은 6370, 반경은 0.8mm 의 바이트를 사용하였다.

3.2 절삭속도

절삭방향은 심압대에서 주축대 방향으로 절삭을 하였고 절삭시 유동칩이 발생할 수 있는 절삭 이송속도는 0.132 mm/rev 로 선정하였다. 공작물의 지름은 일정한 상태에서 주축대의 회전수를 510 rpm , 710 rpm, 1010 rpm으로 변화를 시켜서 가공 절삭속도를 변화시켰다.

$$v = \frac{\pi d n}{1000} = \frac{\pi * 24 * 510}{1000} = 38.45 \text{ mm/min}$$

v : 절삭속도 [mm/min]

d : 가공시 시편의 지름 [mm]

n : 주축대의 rpm [rev/min]

시편의 중심오차는 2/100mm 이하로 하였고, 선반을 1시간 동안 시운전을 하여 충분히 예열 시켰다. 절삭 후 공구의 바이트는 교환을 하여 공구의 마모로 인한 영향을 없었다. 그리고 주변기계는 정지

상태를 유지시켜 최대한 주변 진동이 없는 상태를 유지시켰다.

3.3 시편

절삭공정에 사용된 시편의 재질은 연강(SM20C)이고 NC선반을 이용하여 시험편을 정밀하게 가공하였다. 가공시험편의 형상 및 규격은 다음과 같다.

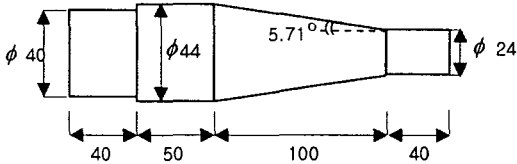


Fig.4 Test workpiece

3.4 선반

사용된 선반의 전반적인 특성은 다음 표와 같다.

Table 1 Specification of the machine-tool

Contents	Specification
Maker	Hwa Cheon Machine Tool
Model	H× 1000GL 460
Main Motor	7.5 HP
Swing on the Bed	460mm
Spindle Speed	1600rpm

Fig.4의 왼쪽 40mm 부분을 주축대의 척에 고정한다. 오른쪽 40mm 부분에서부터 가공시 자동이송으로 테이퍼진 부분을 절삭한다. 자동이동속도는 0.132 mm/rev을 사용하였다.

3.5 계측기

FFT는 B&K 2035(2ch FFT)를 사용하였고, DAT는 SONY DAT(4ch), 전하증폭기(charge amp)로는 B&K 2635(2EA), 충격망치(impact hammer)로는 B&K 8202, 가속도계로는 B&K 4370(2EA)와 B&K 4374를 사용하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 고유진동수 측정

시편의 고유진동수는 시편을 선반의 주축대에 고정시킨 후 충격망치(impact hammer) 방식을 이용하여 실험을 하였다. FFT에서 FRF(Frequency Response Function)을 사용하여 시편의 가공 전후 고유진동수를 측정하였고 측정된 고유진동수는 다음 표와 같다.

Table 2 Natural frequency of the workpiece after and before cutting

	Before	After
Bending mode 1st	311 Hz	319 Hz
Bending mode 2st	540 Hz	514 Hz
Torsion mode 1st	584 Hz	609 Hz

위의 표와 같이 시편의 가공전과 후의 고유진동수는 변화하며 특히 굽힘모드(bending mode) 2차에서 고유진동수의 변화가 가장 크게 나타나고 있다. 공구의 고유진동수를 보면 다음과 같다.

Table 3 Natural frequency of the tool

	Z-dir	X-dir	Y-dir(45°)
1	2616 Hz	1648 Hz	1880 Hz
2	2880 Hz	1824 Hz	2594 Hz
3	-	2584 Hz	2688 Hz
4	-	2888 Hz	2888 Hz

공구의 고유진동수는 오우버행이 50mm가 되도록 공구를 공구대에 고정시킨 후 충격망치 방식으로 고유진동수를 구하였다. 공구의 수직방향(z축), 수평방향(x축), 종방향(y축)의 고유진동수를 측정하였으며 공구는 x,y,z축의 모든 방향에서 1.8kHz 이상의 높은 고유진동수를 갖고 있음을 알 수 있다.

4.2 주파수 스펙트럼과 캡스트럼 비교

공작기계의 절삭공정에서 발생하는 채터진동 신호는 공구의 절삭량에 따라 진동신호의 특성이 변화하는 비정상(non-stational signal)이므로 순간순간을 측정하여 진동 스펙트럼의 변화추이를 분석하여야 한다. 여기서는 가공 시 발생하는 진동의 오토스펙트럼(auto spectrum)과 캡스트럼 측정하여 채터진동이 발생하기 전과 후의 스펙트럼 데이터와 비교 분석하였다. 그리고 주축대의 회전수를 510 rpm, 710 rpm, 1010 rpm으로 변화를 시켜가면서 절삭속도의 변화에 따라 채터진

동이 어떻게 변화하는지를 분석하였다.

주축대의 회전수가 510 rpm 인 경우 회전주파수는 8.5Hz (f_0) 이고 주기는 117.65ms 이다. 회전수가 510 rpm일 때 가공시 주파수 스펙트럼에서는 큰 변화가 없으나 캡스트럼 분석에서는 111.82ms에서 하나의 피크가 나타나며 이것은 회전 주파수 8.94Hz로 주축대의 회전주파수보다 조금 큰 값을 갖는다. 채터진동이 발생하기 전에는 오토스펙트럼에서 많은 하모닉 성분들이 나타나고 있으나 캡스트럼으로 보면 2개의 피크가 나타난다. 2개의 피크의 주파수는 112.79ms (8.87Hz)와 225.59ms (4.43Hz)이며 4.43Hz는 주축대의 회전수에 $1/2f_0$ 인 것을 알 수 있다. 채터진동이 발생 후 캡스트럼에서는 3개의 피크가 나타나는데 36.62ms(27.3Hz), 112.79ms(8.87Hz)와 225.586ms (4.43Hz)가 두드러지게 나타난다. 여기서 27.31Hz는 8.87Hz에 3배가 되는 $3f_0$ 의 고차조화진동(superharmonic vibration)이 발생하였음을 알 수 있다.

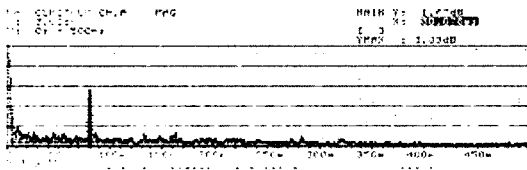


Fig. 5 Cepstrum analysis on the 510rpm (general processing)

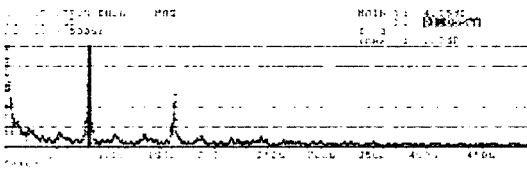


Fig. 6 Cepstrum analysis on the 510rpm (before chatter vibration)

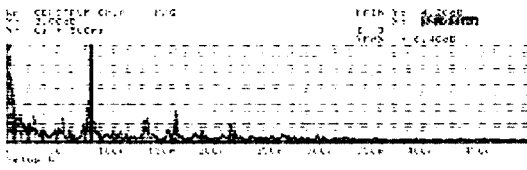


Fig. 7 Cepstrum analysis on the 510rpm (after chatter vibration)

주축대의 회전수가 710 rpm인 경우 회전주파수는

11.83Hz (f_0)이고 주기는 84.51ms 이다. 가공 시 회전 주파수가 710 rpm일 때 캡스트럼분석에서 하나의 피크인 80.09ms (12.49Hz)가 발생한다. 채터진동이 발생되기 전에는 81.06ms (12.34Hz)와 162.60ms(6.15Hz)에서 두 개의 피크가 발생하며 162.60ms(6.15Hz)의 피크는 회전주파수의 $1/2f_0$ 인 분수조화진동(subharmonic vibration)이 일어났음을 알 수 있다. 채터진동의 발생 후의 채터진동의 캡스트럼을 분석하여 보면 27.34ms(36.57Hz, $3f_0$), 53.71ms(18.62Hz, $1.5f_0$), 82.03ms(12.19Hz, f_0), 136.72ms(7.31Hz, $0.6f_0$)와 163.57ms(6.11Hz, $0.5f_0$)가 발생하였다. 채터진동시 주축대의 회전 주파수를 기준으로 하여 $3f_0$, $1.5f_0$ 의 고차조화진동운동과 $1/3f_0$, $1/2f_0$ 의 분수조화운동이 일어났음을 알 수 있다.

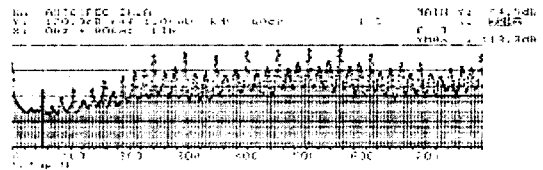


Fig. 8 Autospectrum analysis on the 710rpm (after chatter vibration)

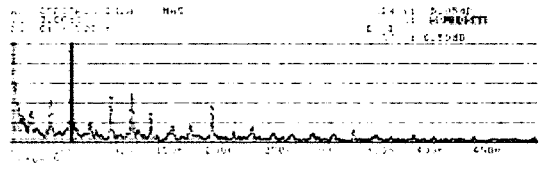


Fig. 9 Cepstrum analysis on the 710rpm (after chatter vibration)

주축대의 회전수가 1010 rpm인 경우 회전주파수는 16.82Hz (f_0)이고 주기는 59.42ms이다. 회전수가 1010 rpm일 때, 진동시호를 캡스트럼 분석을 하면 하나의 피크인 56.64ms(17.65Hz)에서 진동이 발생하기 시작한다. 여기서는 단위시간당 절삭량이 많아서 채터진동이 쉽게 발생하여 채터진동 발생전의 진동신호를 분석하기가 힘들다. 채터진동이 발생한 후 채터진동을 캡스트럼 분석을 하면 기본

주파수 f_0 (58.11ms, 17.21Hz)을 기준으로 고차조화 진동인 $3f_0$, $1.5f_0$ 와 분수조화진동(subharmonic vibration)인 $1/2f_0$, $3/7f_0$, $1/3f_0$, $3/10f_0$ 가 발생하였다.

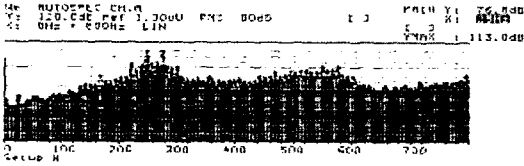


Fig.10 Autospectrum analysis on the 1010rpm (after chatter vibration)

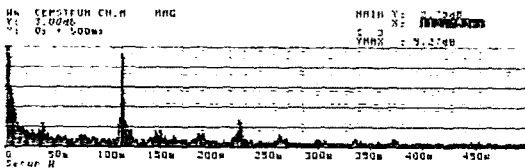


Fig.11 Cepstrum analysis on the 1010rpm (after chatter vibration)

5. 결 론

1. 주축대 회전수를 변화시키면 단위시간당 절삭량이 변화하므로 채터진동의 특성이 변화함을 알 수 있었다.
2. 공작기계의 절삭공정에서 채터진동은 주축대의 회전 주파수를 기준으로 $1/2f_0$ 의 분수조화진동이 발생한 후 $3f_0$ 의 고차 조화운동의 순서로 발생되었다.
3. 채터진동에 의한 고차조화운동인 $3f_0$, $1.5f_0$ 가 주축대의 회전주파수를 변화시켜도 항상 나타남을 알 수 있다.
4. 채터진동에 의한 분수조화운동인 (subharmonic motion) $1/2f_0$, $1/3f_0$ 가 주축대의 회전주파수를 변화시켜도 항상 나타남을 알 수 있다.

5. 채터진동에 의한 비선형현상은 절삭계가 동적 불안정하게 되면 $1/2f_0$ 의 분수조화진동이 발생하고, 이 상태에서 절삭량을 더 증가시키면 채터진동은 더 불안정하게 되어 $3f_0$, $1.5f_0$ 의 고차조화운동과 $1/3f_0$, $3/10f_0$ 의 분수 조화운동이 발생한다.

참 고 문 헌

- (1) Stone,B.J, 1971, "A Dynamic Performance Test for Lathes", MTIRA, Macclesfield.
- (2) T.Inamura, T.Senda, T.Sata, "Computer control of chattering in turning operation", Annals of CIRP, pp.181-186.
- (3) Etsuo Marui, Satoshi Ema, Shinobu Kato, 1982, "Chatter vibration of the machining tool bite", JSME, Vol48. No.428, pp.606~613, pp.614~621,
- (4) F.Ismail, R. Ziaei, 2002, "Chatter suppression in five-axis machining of flexible part", International Journal of Machine Tools & Manufacture 42.
- (5) T. kapitaniak, 2002, "Chaotic vibrations in a regenerative cutting process", Chaos solitons and Fractals 13, B&K Frequency analysis pp.271-304
- (6) Lee, A-C. and Liu, C-S, 1991, "Analysis of chatter vibration in a cutter-workpiece system", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.31, No.2, pp.221-234.
- (7) Rahaman, M. and Ito., 1972, "A Method to Determine the Chatter Threshold", JSPE, pp.191~196.
- (8) J.Thusty, 1981, "Basic nonlinearity in machine chatter", Annals of CIRP , pp. 300~304.