

# 선반에서 공정변수가 가공물의 동적 거동 변화에 미치는 영향에 관한 연구

김기호\*, 오재윤\*\*

## A Study on the Effects of Process Parameters on Dynamic Behavior Changes of Turning System

Kiho Kim\*, Chaeyoun Oh\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the influence of the process parameters on the change in dynamic behavior of a turning system. With variation of feed rate, depth of cut, direction of tool motion, cutting speed and tool location along the workpiece, the dynamic characteristics of stable cutting, chatter transition and fully developed chatter regions are demonstrated. The workpiece vibration during machining is continuously measured at different tool locations along the workpiece and quantitatively analyzed. Complex linear behavior due to change of process parameter values as well as fundamental system nonlinearity due to change of process configuration indicated by a tool path dependence of the locations of chatter onset and disappearance are described. Finally, the structural characteristics of the turning system which can have large and nonlinear effects on system behavior are presented.

**Key Words** : Chatter(채터), feed rate(이송율), process parameter(공정변수), phase plane(위상평면), displacement(변위), workpiece(가공물)

### 1. 서론

가공 중에 발생하는 가공시스템(machine-tool-workpiece system)의 예기치 못한 변동은 제품 품질 저하, 공구 수명 단축, 치수 부정확성과 기계 수명 단축을 초래할 수 있다. 회전 중에 발생하는 바람직하지 못한 동적 거동은 채터(chatter)로 알려져 왔다. 가공물의 동적 반응은 최종 가공물 표면에 직접적으로 영향을 미치므로 채터

의 제어는 중요하다. 효율적인 공정제어를 위해서는 제어 동작을 나타내는데 사용될 정확하고도 신뢰성이 있는 공정모델이 필요하다. 따라서 가공시 채터를 나타내는 모델이 필요하다. 완전히 진행된 채터를 나타내는 모델에 덧붙여 채터의 진행과정을 나타낼 수 있는 모델도 필요하다. 만약 채터의 진행과정이 정확하게 모델링될 수 있으면 가공 중에 채터를 모니터 하여 완전히 진행되지 않도록 제어할 수 있다. 본 논문에서는 완전히 진행된 채터보

\* 한국원자력연구소 원전용로봇시스템 개발팀  
 \*\* 전북대학교 기계공학부

다는 채터의 발생과 제어에 영향을 미치는 요인들에 관한 연구를 수행하였다. 가공시스템의 구성(가공물에서 공구의 위치)과 절삭조건이 가공공정 거동(machining process behavior)변화에 미치는 영향들이 기술된다.

지금까지는 많은 연구가 가공 중에 발생하는 채터의 원인, 메커니즘, 모델링과 안정성 한계에 대해서 수행되었다. 많은 연구원들은 가공공정을 선형적으로 모델링하였다. 회전 공정에서 비선형성(예, 진폭의 급증과 급감, 발산 등)이 매우 중요한 역할을 한다는 증거가 있음에도 불구하고 발표된 많은 문헌들은 비선형성에 많은 관심을 보이지 않았다. Kato와 Mauri<sup>(1)</sup>는 가공물의 선 가공에 의한 표면 기복에 기인하는 진동인 비선형적으로 재 발생하는 채터에 대해 연구하였다. 이들은 재생하는 채터가 선 가공에 의한 기복이 있는 표면과 현 가공면 사이의 위상 지연에 의해 발생된다고 보고하였다. Tlusty와 Ismail<sup>(2)</sup>은 회전시스템의 비선형 모델을 개발하여 채터시 발생하는 진폭에 관한 모의시험을 실시하였다. Kondo, Kawano와 Sato<sup>(3)</sup>는 다중 재 발생효과를 고려하여 채터가 시작된 후의 시스템 동적 거동을 해석하였다. 이 연구에서는 공구와 가공물 사이의 상대 운동에 의한 저항력은 낮은 절삭속도에서는 안정성을 향상시킨다는 사실과, 채터 발생후 채터 진폭이 일정하다는 것을 보여주었다. Kaneto, Sato, Tani와 O-hori<sup>(4)</sup>는 가공 공정에서 발생하는 한정된 진폭의 진동과 저항력 현상을 입증하였다. 그리고 가공물의 매 회전시 발생하는 진동 위상차이에 관계없이 진동주파수가 약간 변함에 따라 가공물 표면형상이 변함을 보여주었다. Marui, Ema와 Kato<sup>(5)</sup>는 회전시 공구면과 가공물 사이의 마찰력에 의한 진동이 에너지가 증가되어 자기 발생적인(self-excited) 진동이 생성될 수 있음을 지적하였다.

회전시스템 거동을 해석하는데 기계-가공물 구조 특성 등과 같은 공정변수들을 고려한 연구는 상대적으로 많지 않다. Hanna와 Tobias<sup>(6)</sup>는 가공물 법선 방향 공구변위의 삼차함수로서 집중 질량시스템 강성도(lumped system stiffness)를 고려한 채터모델을 개발하였다. Klamecki<sup>(7)</sup>는 비대칭성, 비선형성, 공구-공구대 강성도(tool-toolpost stiffness)등을 고려하여 회전시스템의 복잡한 거동을 보여줄 수 있는 모델을 개발하였다. Kim과 Ha<sup>(8)</sup>는 가공물 위의 공구 위치가 시스템의 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 여기서 채터를 제거하기 위한 점탄성 댐퍼를 개발하는 과정에서 선반 왕복대의 위치에 따라 채터주파수 중 하나가 변한다는 것을 알아냈다. 그

러나 거동의 변화나 원인들을 고려하지 않고 단지 거동을 보상하기 위하여 댐퍼를 조절하였다. 만약 위의 현상이 시스템과 시스템의 동적 거동에 중대한 비선형성을 유발한다면 이와 같은 기계-가공물 구조 효과는 중요할 것이다. 시스템의 비선형 동특성을 포함해서 잘 만들어진 모델은 회전공정의 제어뿐 아니라 일반적인 가공공정을 좀 더 잘 이해하는데 매우 유용할 것이다.

본 논문은 회전시 제어 가능한 절삭조건들의 영향에 따른 채터 진행과정의 특성과 가공물위의 절삭공구 위치가 가공시스템 동적 거동에 미치는 효과를 연구한다. 특히 본 연구를 통하여 1) 시스템 구조에 의존하는 시스템의 복잡한 동특성에 대한 좀 더 많은 이해를 하고, 2) 채터 진행과정을 정확하게 기술하고, 3) 완전히 진행된 채터를 기술하고자 한다. 절삭속도, 이송율, 절삭깊이, 이송방향과 가공물 위의 공구위치 등이 미치는 효과 등이 연구된다. 수평 수직방향에서 가공물의 휨이 측정되어진다. 측정된 데이터는 회전시 가공시스템의 동적 거동 변화에 공정변수가 미치는 영향을 조사하고 시스템 거동 변화의 특징을 해석하는데 이용된다.

본 연구에서 선반 회전공정의 상태는 가공물위의 절삭공구 위치로 정의된다. 시스템 거동이 경로변경에 의존함을 연구하기 위해 주어진 가공물위의 위치로 절삭공구를 다른 여러 경로로 접근시키면서 시스템의 동적 거동을 살펴해보았다. 여기서 경로들은 주로 가공물에서 절삭공구의 운동방향을 변경함에 의해 생성되었다. 즉, 이송방향을 변경시키면서 채터발생과 소멸되는 위치들을 측정해서 비교하였다. 이외에 절삭속도, 절삭깊이와 이송율(feed rate)이 공정변수들로 사용되었다.

가공물위에서 시스템 동적 거동 변화 위치 외에도 상세한 동적 거동의 특성들이 측정되어졌다. 가공물 축에 수직인 가공물 변위가 채터의 성장, 감쇄와 완전히 진행된 채터 거동을 나타내기 위해 절삭 중에 측정되어졌다.

## 2. 실험 장치의 구성 및 실험 방법

터릿선반(turret lathe)에 실험장치를 설치하였으며, Fig. 1은 가공물의 수직과 수평방향 운동을 측정하기 위한 실험장치와 측정장비 및 데이터 획득시스템을 보여준다. 센서 지지대는 선반 크로스슬라이드의 측면에 설치되어서 선반베드를 따라 공구 진행방향으로 움직이며 절삭 중에 변위센서가 수직과 수평 양 방향을 동시에 측정 가능하도록 설계하였다. 또한, 절삭시 채터로 인한 진동이

크로스슬라이드를 통하여 센서지지대에 전달되지 않도록 지지대와 크로스슬라이드 사이에 고무패드를 부착하였다. 실험 중에 변위신호를 연속적으로 계속하여 기록하였다. 0.254mm(0.01 in) - 1.270mm(0.05 in) 범위에서 선형성을 보여 주는 전자기 변위센서와 최대 처리량이 130K Hz인 12-bit A/D 변환기 보드(해상도:  $4.88 \times 10^{-3}$ , 각 채널당 처리량 : 65K Hz)를 사용하였다. 두개의 A/D 채널을 이용하여 수직과 수평방향 아날로그 변위신호를 각 채널당 2K Hz의 샘플링율로 샘플링하였다.

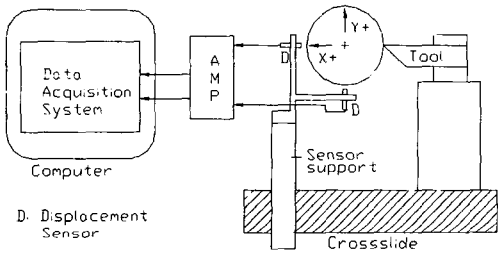


Fig. 1 The experimental setup

Table 1 Cutting conditions

Test	Depth of Cut (in.)	Speed (sfpm)	Feed (in./rev)
1	.030	254	.011
2	.040	254	.011
3	.030	254	.015
4	.030	367	.011
5	.040	367	.011
6	.030	367	.015

길이 279.4mm(11 in)인 냉간압연강을 가공물로 사용하였다. 각 가공물의 처음 직경은 시스템 거동에 가공물 직경이 미치는 영향을 배제하기 위하여 35.56mm(1.4 in)로 고정하였다. 가공물 한쪽은 3개 턱을 가지는 척으로 고정하고 다른 한쪽은 회전하는 센터로 지지하였다. 시스템 성능에 공구 마모가 미치는 영향을 배제하기 위해 틀인스트를 자주 교환하였다. Table 1은 절삭실험에 사용된 절삭조건들을 보여준다. 이외에도 절삭실험 중에 절삭공구 기송방향(척을 향하거나 척으로부터 멀어지는)도 변경시켰다.

절삭 중 가공물의 수직과 수평방향 휨을 여러 가지 절삭조건에서 가공물 길이방향을 따라서 측정하였다. 절삭 데이터 획득은 가공물의 알려진 위치에서부터 시작하였고, 절삭 끝지점 위치는 데이터 기록으로부터 구하였다. 가공물의 수직과 수평방향 속도는 실험적으로 얻어진 수

직과 수평방향 변위로부터 계산하였다. 각 샘플링간 평균 속도는 두개의 연속한 변위값을 샘플링시간(500 $\mu$ s)으로 나누어서 계산하였다. 각 샘플링 점에서 평균속도는 두개의 연속한 시간구간에서 평균으로 하였다.

가공물을 따라 긴 거리에 걸쳐 절삭 중 얻어지는 데이터의 양이 너무 많으므로 다음의 데이터를 줄이기 위한 절차에 따라 줄여진 데이터를 이용하여 시스템 거동을 기술하였다.

1. 가공물의 수직과 수평방향 변위 데이터는 가공물을 6.35mm(0.25 in) 구간으로 나누어서 해석한다.
2. 각 구간별 가공물의 수직과 수평방향 최대와 최소변위를 정한다.
3. 모든 절삭실험에서 구한 최대 변위차이에 대해 각 구간의 최대와 최소 변위사이의 차이를 정규화 한다.
4. 정규화된 각 절삭구간의 변위차이를 그린다.

회전시 동적 거동 변화를 지배하는 공정변수들의 역할을 조사하기 위하여 측정된 변위 데이터를 세 가지 측면에서 해석하였다. 다음 절은 이송율, 절삭깊이, 절삭속도와 공구운동 방향에 의존하는 채터의 발생과 소멸위치를 보여준다. 그리고 위의 데이터 축소절차를 이용하여 가공물 변위와 속도를 정량적으로 기술한다. 그 다음 절은 Jacobsen<sup>(9)</sup>과 Doi<sup>(10)</sup> 및 Thompson<sup>(11)</sup>에서 이용된 위상 평면 궤적을 사용하여 데이터를 도식적으로 표현한다. 그리고서 가공시스템의 채터주파수를 기술한다.

### 3. 채터 발생과 소멸

절삭가공이 심압대 부근에서 시작하면 처음에는 채터영역에 있으나 절삭이 진행됨에 따라 짧은 거리에서 채터는 점차 줄어들다가 소멸됨을 보여 주었다. 가공이 척 부근에서 시작하면 처음에는 안정하나 심압대 쪽으로 절삭공구가 움직이기에 따라 짧은 거리에서 채터가 발생하였다. 본 논문에서 채터의 발생과 소멸은 척으로부터 시스템의 거동변화가 많이 발생하는 지점까지의 거리로 정의하였다. 위의 데이터 처리에서 언급한 바와 같이 6.35mm(0.25 in) 구간 별로 해석된 측정 데이터로부터 근접 구간별 최대 변위(정규화된 변위)를 비교하여 이전 구간과의 최대변위 차이가 10%이상 발생 할 때를 채터 발생(척으로부터 멀어지는 절삭방향)과 소멸(척으로 향하는 절삭방향)로 정의하였다.

여러 이송방향, 절삭속도, 절삭깊이와 이송율에서 채터 발생과 소멸위치는 Fig. 2에 보여진다. 이 그림에서 시스

템 거동 변화위치는 Table 1의 절삭조건 번호와 공구 운동 방향을 나타내는 문자에 의해 ("A": 칩으로부터 멀어지는 이송방향, "T": 칩을 향하는 이송방향) 표시된다. "A"는 채터 발생위치를 나타내고 "T"는 채터 소멸위치를 보여준다.

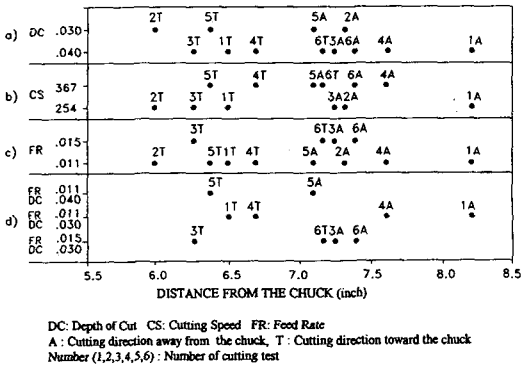


Fig. 2 Location of change in vibration as cutter moves toward or away from the chuck

Fig. 2는 네 번의 연속된 실험결과이다. 모든 경우에서 채터의 성장과 감소의 위치가 다르다. Fig. 2-a는 절삭깊이가 작아짐에 따라 채터의 발생과 소멸위치가 칩에 약간 가까워진다는 것을 보여준다. 거동변화는 채터 발생시 22.86mm(0.9 in), 소멸시 12.7mm(0.5 in) 만큼의 거리 차이가 있다. Fig. 2-b는 693rpm(254 sfpm)의 절삭속도로 가공되는 279.4mm(11 in) 짜리 가공물의 채터 발생위치와 소멸위치 사이 거리가 25.4mm(1.0 in)에서 44.45mm(1.75 in) 사이임을 보여준다. 1001rpm(367 sfpm)의 절삭속도에서는 채터 발생위치와 소멸위치 사이의 거리가 줄어든다 아직도 서로의 위치가 명확히 구분된다. 이송율 변화에 따른 결과인 Fig. 2-c는 양 절삭방향에서의 시스템 거동 변화위치를 보여준다. 이송율이 증가됨에 따라 채터의 발생과 소멸위치가 칩에 좀 더 가까워진다. 그리고 칩을 향하는 절삭이 칩으로부터 멀어지는 절삭보다 이송율에 대한 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 절삭력은 제거되는 양을 나타내는 이송거리 곱하기 절삭깊이로 정의되는 칩하중에 따라 대략 선형적으로 변한다. Fig. 2-d는 동일 칩하중에서 이송방향에 따라 채터의 발생과 소멸위치가 달라짐을 보여준다. 모든 실험결과는 시스템 동적 거동 변화가 발생하는 위치에 절삭방향이 가장 큰 영향을 미침을 보여준다.

Fig. 1에서 정의된 X와 Y 양 방향의 변위를 측정하였다. 전형적인 거동변화를 보여주는 결과가 Fig. 3과 Fig. 4에서 보여진다. 이 그림들은 이송방향에 따른 채터의 발생과 소멸위치에서 변위차이와 주 진동방향에서 변위차이 및 가공물에서 거동변화가 일어나는 거리 사이에서 변위차이를 보여준다. 더욱이 채터가 진행됨에 따른 시스템의 상태변화 정도를 보여준다.

본 연구에 이용된 실험장치에서는 X방향 변위가 Y방향 변위보다 이주 작았다. 좀 더 흥미로운 사실이 칩으로부터 멀어지는 절삭시 관찰되었다. 절삭속도가 693rpm(254 sfpm)과 1001rpm(367 sfpm) 경우인 Fig. 3-a와 Fig. 4-a에서 보여주는 바와 같이 각 경우 완전히 진행된 채터가 대략 50.8mm(2.0 in)와 58.42mm(2.3 in) 거리 사이에서 발생하였다. 칩을 향한 절삭이 진행되는 경우인 Fig. 3-b와 Fig. 4-b에서는 각각 101.6mm(4.0 in)와 81.28mm(3.2 in) 거리에 걸쳐 진동진폭이 감소하여 채터가 완전히 소멸되었다. 완전히 진행된 채터는 절삭속도가 증가함에 따라 더욱 더 복잡해지며, 거동변화 위치와 정도는 시스템 상태에 접근하는 경로에 의존하였다.

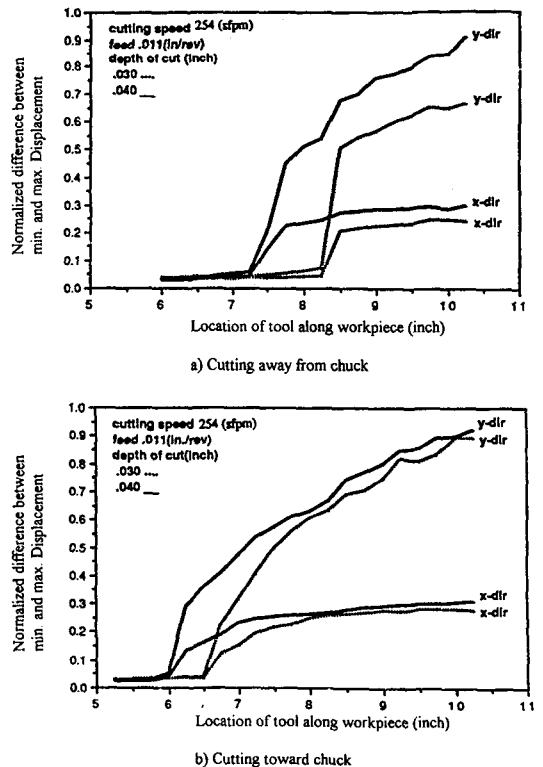


Fig. 3 Normalized displacement

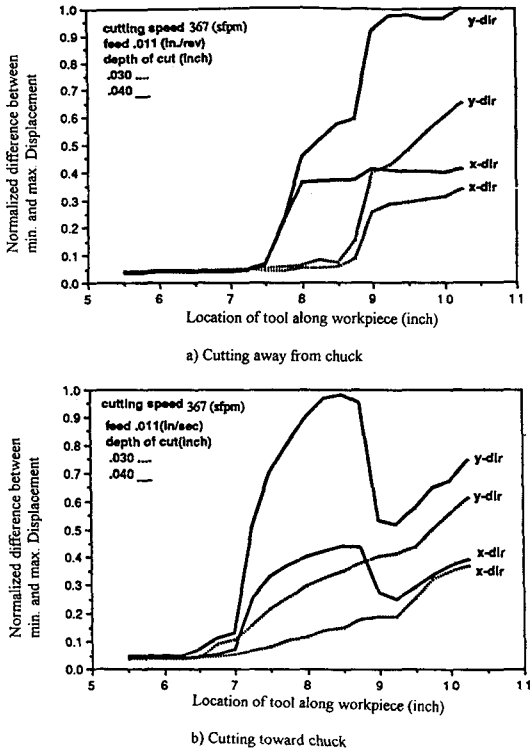


Fig. 4 Normalized displacement

#### 4. 시스템 거동의 기술

두개의 변수에 의해 기술될 수 있는 시스템에서 시스템 거동을 나타내는 편리한 방법은 위상궤적이다. 본 연구에서는 선반 회전공정의 동적 거동을 나타내기 위한 두 변수로 가공물의 변위와 속도를 선택하였다.

일반적으로 중요한 두 사항은 시스템 동적 거동의 진행과 시스템의 최종 거동이다. 특히 안정한 절삭의 특징은 채터의 자세한 진행과정 및 완전히 진행된 채터의 거동과 더불어 중요한 사항이다.

측정된 가공물 변위와 계산된 속도로부터 얻어진 전형적인 위상궤적이 Fig. 5와 Fig. 6에 보여진다. Fig. 5는 절삭 속도 693rpm(254 sfpm), 절삭깊이 1.016mm(0.04 in), 이송율 0.2794mm/rev. (0.011 in/rev.) 의 절삭조건을 가지고 척으로부터 멀어지는 방향으로 절삭을 할 때 가공물 여러 지점에서 수직변위와 속도를 보여준다. Fig. 6는 동일 조건에서의 수평방향 변위와 속도를 보여준다. 많은 양의 데이터는 거동 변화가 진행되는 자세한 과정을 물론

명하게 보여주지만 일반적인 경향은 확실히 보여준다. 수직방향 변위는 수평방향 변위보다 대략 2배 정도이다. 이 비율은 연구된 거동범위에 따라 일정하지는 않지만 일반적으로 수직방향의 변위가 수평방향의 변위보다 크다. 안정한 절삭은(Fig. 5-a와 Fig. 6-a) 작은 변위와 속도로 특징 지워진다. Fig. 5-b와 Fig. 6-b는 안정한 영역으로부터 채터가 진행되게끔 절삭을 할 때 변위와 속도의 진행과정을 보여준다. Fig. 5-c와 Fig. 6-c는 절삭이 척으로부터 멀어지는 방향으로 진행 될 때 변위와 속도의 진폭은 증가되고 루프형상의 위상궤적이 생성됨을 보여준다. 여기서는 위상평면의 원점으로부터 멀어 짐에 따른 특징적인 거동과 시스템 상태의 이동을 보여준다. Fig. 5-c는 채터시 데이터 중심부에 분명히 정의되는 빈

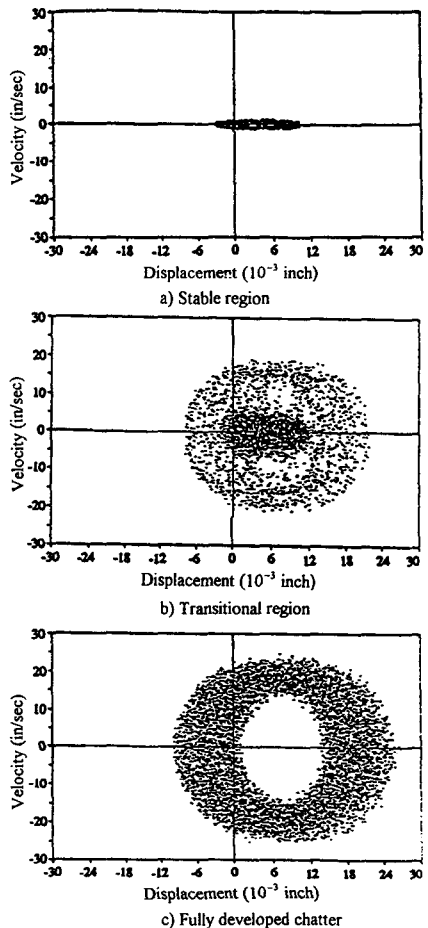


Fig. 5 Phase plots of vertical direction(cutting away from chuck)

공간을 가짐에 비해, Fig. 6-c의 수평방향 변위와 속도 위상계적은 채터의 일반적인 구조인 데이터 중심부에 분명히 정의되는 빈 공간을 가지지 않는다.

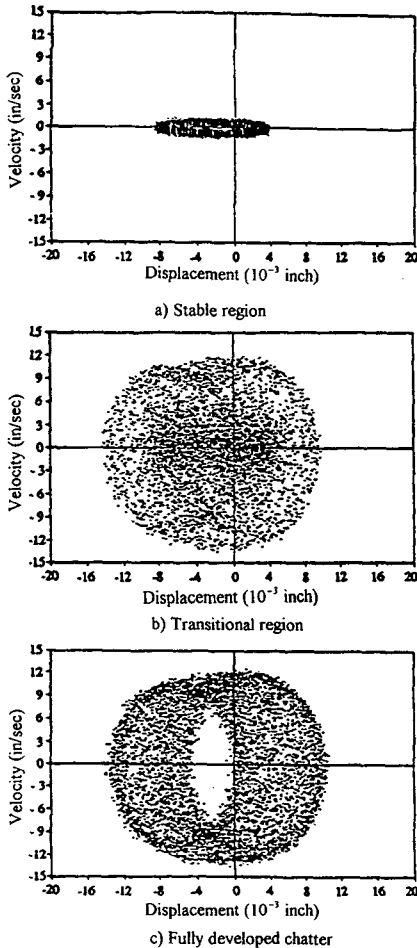


Fig. 6 Phase plots of horizontal direction(cutting away from chuck)

위의 절삭방향만이 다른(즉, 척을 향하는) 절삭조건을 가지는 절삭실험에서 실험초기에 발생된 잘 진행된 채터는 척에 가까워짐에 따라 소멸되었다. 앞과 같이 수평방향에서 보다 수직방향에서 데이터 중심부에 좀 더 분명한 빈 공간이 형성되었다. 절삭공구가 척에 가까워짐에 따라 진동진폭은 감소하고 거동변화의 진행은 척으로부터 멀어지는 절삭시에 채터가 성장하는 경우와 반대 방향의 경향을 보였다. 비록 거동은 유사하였지만 채터가 소멸하는 위치와 생성하는 위치가 달랐다.

척으로부터 멀어지는 방향으로 절삭시 절삭속도 증가에 따라 수직방향에서 진동현상의 변화가 발생하였다. Fig. 5-c에 보여지는 바와 같이 채터시 분명히 형성되는 루프와는 달리, Fig. 7의 위상계적 형상은 채터시 데이터 중심부에 빈 공간을 가지지 않고 이중으로 교차하는 사이클로 구성된다. 그러나 모든 실험에서 수평방향의 일반적인 거동은 절삭조건에 관계없이 같았다.

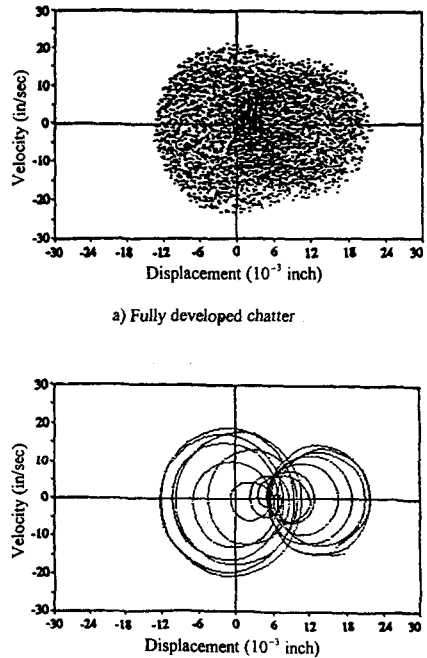


Fig. 7 Phase plots of fully developed chatter in vertical direction

시스템 상태를 나타내는 상세한 궤적을 연구함에 의해 수평과 수직방향에서 분명히 다른 위상계적을 확인할 수 있고, 가공중 채터의 진행을 명확하게 나타낼 수 있다. 채터의 발달은 변위와 속도의 증가로 나타나며, 이러한 증가는 위상평면에서 직경이 큰 환형 고리형상의 루프로 묘사된다. 따라서 채터시 서로 다른 직경과 중심 축을 가진 루프형상 궤적이 형성되며, 그들의 중심 축들은 주기적으로 변화한다.

Fig. 8은 Fig. 5-c의 완전히 진행된 영역에서 선택된 일부 궤적을 보여준다. 여러 다른 시스템 상태에서 시작하여 최종한계 사이클로 향해 움직이는 전 궤적의 영역을 보여준다. 최종 사이클 밖에 있는 상태(Fig. 8-b)에서는 최종 사이클로 안쪽으로 향하는 반면, 한계사이클 안에

있는 상태(Fig. 8-a)에서는 궤적이 최종 사이클로 바깥 쪽으로 확장된다. 이같은 유형의 동적 거동 진행은 모든 실험의 수직방향에서 관찰되었다. 잘 진행된 채터 결과를 보여주는 Fig. 5는 전형적으로 주기적인 운동을 보여준다. 그러나 수직방향에서 완전히 진행된 채터를 보여주는 Fig. 7과 진행중인 채터를 보여주는 Fig. 5-b와 Fig. 6-b는 좀 더 복잡한 거동을 보여 준다.

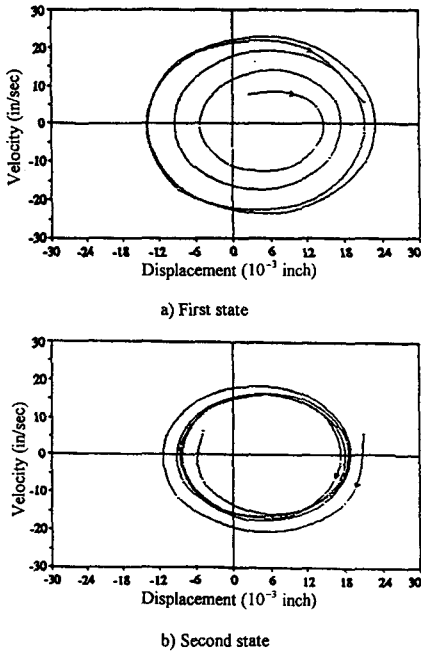
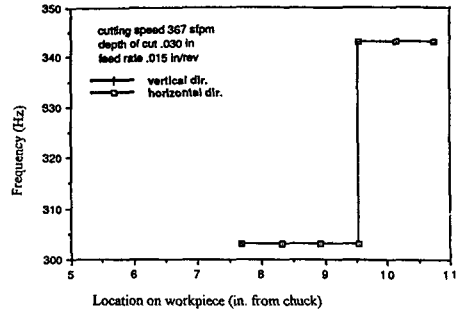


Fig. 8 Details of trajectories for selected regions in Fig. 5-c

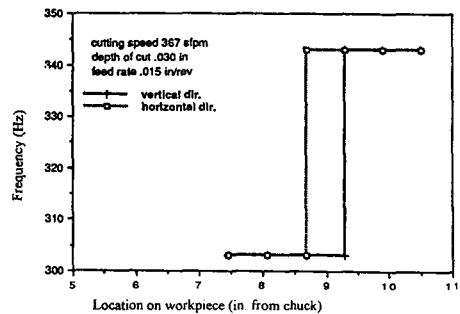
### 5. 채터주파수

본 절에서는 가공물을 따라 채터주파수를 측정하여 가공 시스템의 거동 변화를 좀 더 완벽히 기술하고자 한다. 주파수 스펙트럼은 가공물위의 여러 위치에서 얻어진다. 4,096개의 데이터로부터 주파수 스펙트럼을 계산하기 위해 FFT(fast Fourier transform)를 이용하였다. 수직과 수평변위 데이터로부터 스펙트럼을 구하고 이 스펙트럼으로부터 주진동주파수를 얻는다. 이와 같은 주진동주파수를 채터주파수라 부른다.

절삭속도 693rpm(254 sfpm)에서 절삭깊이, 이송율, 절삭방향을 변화시키면서 측정한 채터주파수는 수평과



a) Cutting away from chuck



b) Cutting toward chuck

Fig. 9 Chatter frequencies in vertical and horizontal direction

수직방향에서 294Hz로 일정하였다. 처음으로 채터가 발생하고 소멸하는 위치는 절삭조건에 따라 변하였다.

Fig. 9에서 보여 주는바와 같이 1001rpm(367 sfpm)의 좀 더 빠른 절삭속도에서는 채터주파수의 변화가 관찰되었다. 칩으로부터 멀어지는 방향으로 절삭결과가 Fig. 9-a에 보여진다. 칩으로부터 대략 175.26mm(6.9 in) 지점에서 발생하는 채터는 주파수가 수평과 수직방향에서 모두 동일하게 303Hz이었다. 칩으로부터 대략 241.3mm(9.5 in) 지점에서는 주파수가 343Hz로 급증하였다. Fig. 9-b에 보여주는 바와 같이 칩을 향하는 절삭시 칩으로부터 218.44mm(8.6 in)와 236.22mm(9.3 in) 지점에서 수평과 수직방향 진동주파수가 343 Hz에서 303 Hz로 급감하였다. 이와 같은 시스템 거동변화는 시스템 구성에 의존하였다.

### 6. 결론

본 논문에서는 회전시 채터의 진행과정과 공정변수들이 채터 발달에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 본 연구의 주된 기여는 회전시스템의 구조적인 특성이 시스템 거

동에 크고도 비선형적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 입증한 것이다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1) 가공물 표면의 chatter 발생과 소멸 위치 관찰로 부터 가공시스템의 동적 거동은 공정변수들에 의존하며, 이송 방향은 시스템 거동변화에 가장 큰 영향을 미침을 확인하였다.

2) chatter 진행시 공정변수들의 변화에 따른 시스템의 수평거동을 나타내는 위상계적들은 유사한 형태를 보였으나, 절삭속도 변화에 따른 수직 거동을 나타내는 위상계적들은 한계 사이클의 중심이 이동하는 복잡한 형태를 보였다. 이러한 현상은 절삭속도가 chatter 발달과 발달된 chatter의 지속성에 크게 공헌함을 나타낸다.

3) 모든 절삭조건에서, chatter시 최대 수직변위는 최대 수평변위보다 대략 두 배 정도이었으나 안정된 절삭시에는 수직변위는 수평변위보다 약간 컸다. 그리고 chatter시 진폭이 커짐은 Tlusty와 Ismail<sup>(2)</sup>의 모의실험 결과와 유사한 양상을 보여주었다.

4) 이송방향에 따라 chatter 발생 및 소멸시 시스템 거동이 급격히 변화하였다. 척으로 부터 멀어지는 방향으로 절삭시 가공물 변위와 속도 증가는 척으로 향하는 절삭시의 변위와 속도 감소보다 더 급격하였다. 즉, 공정변수에 종속된 시스템 구조가 절삭시 구조적 특성을 변화시켜 시스템 비선형 거동에 큰 영향을 끼침을 의미한다.

5) 절삭속도와 이송방향은 chatter주파수 변화에 많은 영향을 주었다. 절삭속도가 증가함에 따라 chatter주파수도 증가하였다. 이송방향 변화에 따라 chatter주파수가 급격히 증가하거나 감소하였다.

결론적으로 공정변수, 특히 구조적인 영향이 선반 회전 시스템의 동적 거동 변화를 정하는데 있어서 매우 중요함을 보여주었다. 앞으로 좀 더 많은 연구가 가공시스템의 비선형성 정도를 규명하는데 필요하다고 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Kato, S. and Marui, E., "On the cause of regenerative chatter due to workpiece deflection", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 96 No. 1, pp. 179-186, 1974.
2. Tlusty, J. and Ismail, F., "Basic non-linear-

- ty in machining chatter", Annals of the C.I.R.P., Vol. 30 No. 1, pp. 299-304, 1981.
3. Kondo, Y., Kawano, O. and Sato, H., "Behavior of self-excited chatter due to multiple regenerative effect", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 103, pp. 324-329, 1981.
4. Kaneko, T., Sato, H., Tani, Y. and O-hori, M., "Self-excited chatter and its marks in turning", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 222-228, 1984.
5. Marui, E., Ema, S., and Kato, S., "Chatter vibration of lathe tools, Part 1: General characteristics of chatter vibration", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 105, pp. 100-106, 1983.
6. Hanna, N.H. and Tobias, S. A., "A theory of nonlinear regenerative chatter", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.96, pp. 247-255, 1974.
7. Klamecki, B.E., "On the effects of turning process asymmetry on proces dynamics", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 193-198, 1989.
8. Kim, K.J. and Ha, J. Y., "Suppression of machine tool chatter using a viscoelastic dynamic damper", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 58-65, 1987.
9. Jacobsen, L. S., "On a general method of solving second-order ordinary differential equations by phase-plane displacements", Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol.74, pp. 543-553, 1952.
10. Doi, S. and Kato, S., "Chatter vibration of lathe tools", Trans. ASME, Vol.78, pp.1127-1134, 1956.
11. Thompson, J.M.T., "An introduction to non-linear dynamics", Appl. Math. Modelling, Vol. 8, pp. 157-168, 1984.