

## A study on the chatter vibration characteristics simulation for cutting tooling of turning machine tool

Joon Hwang<sup>†</sup>

Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

(Received November 24, 2014)

(Revised December 2, 2014)

(Accepted December 12, 2014)

**Abstract** Machining performance is often limited by chatter vibration at the tool-workpiece interface. Chatter vibration is a type of machining self-excited vibration which originated from the variation in cutting forces and the flexibility of the machine tool structure. Cutting tooling method is one of major factor to chatter vibration in turning process. Even though lots of cutting tooling methods are developed and used in machining process, precise analysis of cutting tooling effect in view of chatter vibration behavior. This study presents numerical and experimental approaches to verify and effects of various cutting tooling geometry and clamping method on the onset of chatter vibration. Acquired knowledge from this study will apply the optimal geometry design of cutting tooling and adjusting of machining process.

**Key words** Chatter vibration, Turning, Tooling, CAE (Computer Aided Engineering), Finite element analysis

## 터닝센터에서의 툴링과 채터 특성 시뮬레이션 연구

황준<sup>†</sup>

한국교통대학교 공과대학 항공·기계설계학과, 충주, 380-702

(2014년 11월 24일 접수)

(2014년 12월 2일 심사완료)

(2014년 12월 12일 게재확정)

**요약** 가공정밀도 요구특성의 지속적인 향상에도 불구하고, 공작기계와 절삭공구를 이용한 절삭가공공정에서의 채터 진동은 아직도 개선의 여지가 많이 남아있다. 특히, 더욱 고속화, 고정밀화 되고 있는 가공현장에서 채터진동의 효과적인 감소대책에 대한 다양한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 고정밀 공구동력계를 이용한 실시간 절삭력 측정과 유한요소해석 방법을 이용해 사용 빈도와 활용이 매우 큰 터닝센터(turning center)에서 폭넓게 적용되고 있는 3중의 절삭공구 툴링에서의 채터진동 특성을 평가하여, 공구형상 및 툴링 특성에 따른 채터진동과의 상관성을 연구하고, 향후 채터진동 저감형 공구개발을 위한 근간 기술자료로 활용코자 한다.

### 1. 서론

기계가공 중 공작물과 절삭공구 사이에 스스로 발생하는 상대운동이 불안정 상태에 도달하여 생기는 격심한 진동을 채터 진동이라 한다[1]. 이는 가공 절삭 시에 이송속도, 회전속도에 상대적으로 비례하며, 공작물의 표면 거칠기를 극대화시켜 가공정밀도를 저하시킬 뿐만 아니라 공작기계의 수명을 감소시키고 절삭공구의 마멸과 파

손을 가져오며 이런 진동이 심할 경우에는 공작기계에서 원하는 절삭작업의 수행이 불가능하게 된다. 이처럼 채터 진동은 공작기계의 생산성을 떨어뜨리고 공작물의 정밀성에 중대한 영향을 미치고 있기 때문에 공작기계의 성능을 평가하는데 있어 지극히 중요한 의미를 가지고 있다. 채터에 대해서는 진동이 발생하는 조건의 관점에서 많은 연구 성과가 축적되어 왔다[3, 4]. 채터는 가공능률을 저해하기 때문에 가공능률을 낮추지 않고 체진효과를 향상시키는 적극적인 방지책이 여러 가지로 시도되고 있으나 지금까지는 실용적인 의미에서의 성공에는 아직 이르지 못하고 있다. 본 연구에서는 기존에 실험한 공구동력계(Kistler 9257B)를 이용해 측정된 절삭력 데

<sup>†</sup>Corresponding author  
Tel: +82-43-841-5376  
Fax: +82-43-841-5370  
E-mail: jhwang@ut.ac.kr

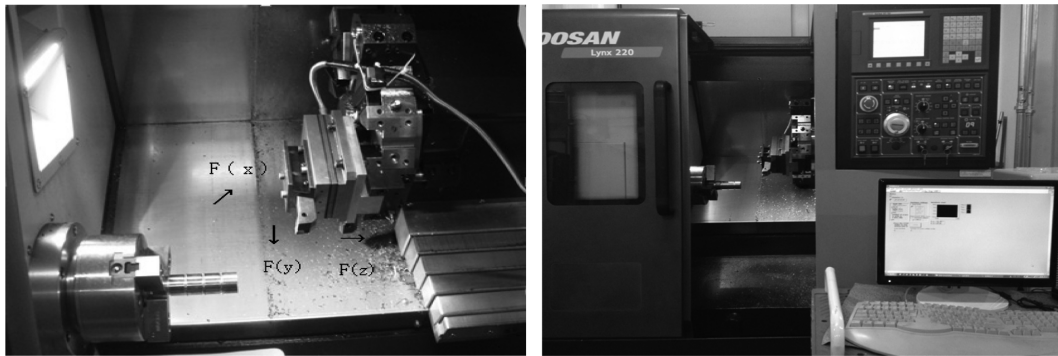


Fig. 1. Operation set-up of cutting tool on the dynamometer.

이터 값을 적용하여 선삭용 공구 선택이 선삭가공 채터에 미치는 영향에 대하여 해석을 통해 그 특성을 파악하고, 선삭공구 툴링의 방향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

선삭 가공 시 3종 인서트의 채터 발생에 따른 절삭력 변화를 측정하기 위해 Fig. 1와 같이 CNC 선반 자동

터릿에 공구동력계를 장착하였으며, 측정된 절삭력 신호를 정적성분과 동적성분으로 구분하여 분석했다. 가공 조건에 따른 절삭력과 가속도신호의 특성을 파악하기 위하여 고속가공용 공구동력계에서 선삭공구 툴링조건을 변경하여 절삭력과 가속도신호를 획득하였고, 공구동력계의 응답특성을 파악하였다. 공구동력계의 절삭력측정 방향에 맞추어 주분력을  $F(x)$ , 배분력을  $F(y)$ , 이송분력을  $F(z)$ 로 각각 나타내었다.

Fig. 2는 선삭 채터 특성을 알아보기 위해 3가지 선삭공구 툴링에 따른 절삭력신호 변화를 나타낸 것이다. 절삭조건  $S = 1500 \text{ rpm}$ ,  $f = 0.4 \text{ mm/rev}$ 일 때 측정한 결과이며, TNMG가 가장 큰 절삭력변화가 나타남을 알 수 있다. Table 1은 절삭조건  $S = 1500 \text{ rpm}$ ,  $F = 0.4 \text{ mm/rev}$ 일 때의 절삭력측정결과이다. TNMG의 경우  $F(x)$ 는 908.5 N,  $F(y)$ 는 130 N,  $F(z)$ 는 446 N, CNMG의 경우  $F(x)$ 는 868 N,  $F(y)$ 는 322.5 N,  $F(z)$ 는 383 N, SNMG의 s 경우  $F(x)$ 는 775 N,  $F(y)$ 는 357 N,  $F(z)$ 는 231 N로 절삭력이 측정되었다. 주분력에선  $\text{TNMG} > \text{CNMG} > \text{SNMG}$  순으로 절삭력의 크기가 크게 나타났고, 배분력에선  $\text{SNMG} > \text{CNMG} > \text{TNMG}$ , 이송분력은  $\text{TNMG} > \text{CNMG} > \text{SNMG}$  순으로 나타났다.

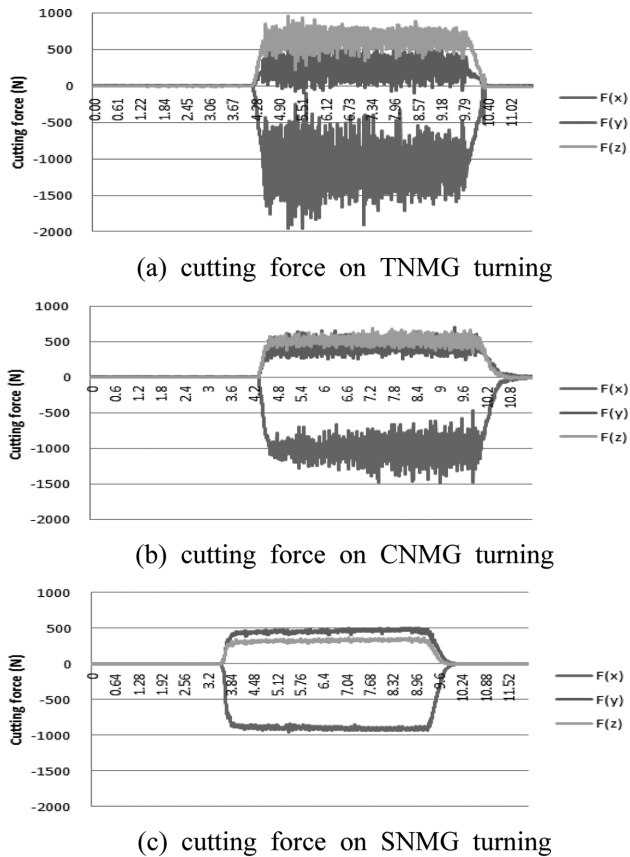


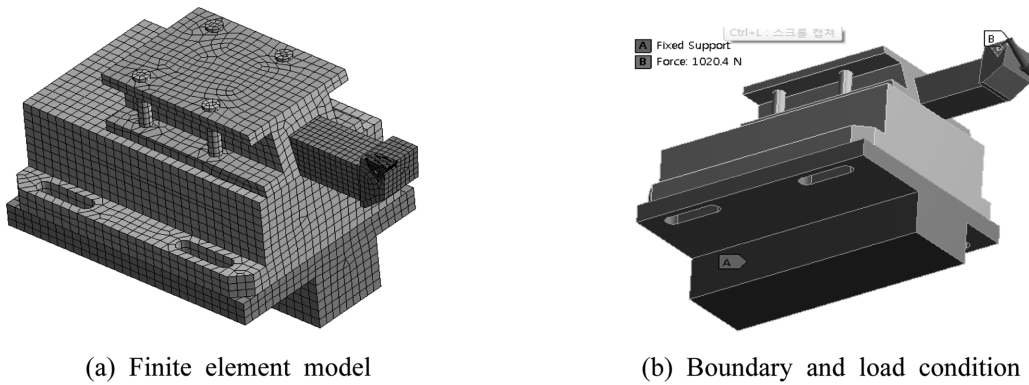
Fig. 2. Comparison of measured cutting force signal for chatter vibration analysis ( $S = 500 \text{ rpm}$ ,  $f = 0.4 \text{ mm/rev}$ ).

3. 유한요소해석법을 이용한 툴링 채터 해석

3종의 선삭용 인서트(CNMG, SNMG, TNMG)를 사용한 선삭가공에서의 채터특성을 알아보기 위해서, 터닝센터 Turret에 장착된 공구동력계-툴홀더-인서트로 구성된

Table 1  
Cutting force measurement results

	TNMG	CNMG	SNMG	Unit
Principal force	908.5	868.0	775.0	N
Radial force	130.0	322.5	357.0	N
Feed force	446.0	383.0	231.0	N



(a) Finite element model (b) Boundary and load condition

Fig. 3. Finite element analysis for cutting tool chatter vibration simulation.

CAE(Computer Aided Engineering) 방법중에 가장 널리 사용되는 유한요소해석법을 적용하였으며, Fig. 3(a)에는 공구-공구대-공구동력계 시스템의 유한요소모델형상을 나타내었으며, Fig. 3(b)에는 유한요소해석을 위한 경계 조건으로서 공구끝에 작용하는 절삭력 벡터와 공구대 하단부의 구속조건을 각각 나타내었다. 사용된 공구홀더의 단면은 25 mm × 25 mm이다.

구조해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench Ver. 12를 사용하였다. 각 모델의 주요 치수는 다음과 같다. 공구동력계의 최대길이는 170 × 140 mm, 툴홀더 길이는 TNMG 151 mm, CNMG 150 mm, SNMG 152 mm이다.

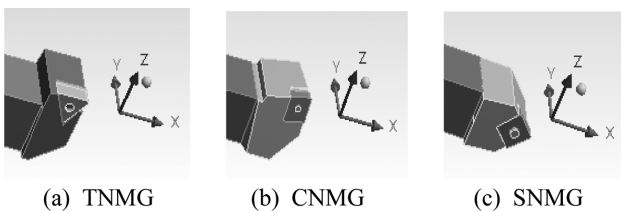
알고자 하는 주요 변형은 인서트에 대한 것이므로 각 인서트부에만 Mesh를 조밀하게 생성하였으며, 하중조건은 Fig. 4에 나타나 있는 축을 기준으로 주분력은 Y축, 배분력은 X축, 이송분력은 Z축으로 하여 입력하였다. 실제 공구동력계를 이용한 실험에서 공구에 작용되는 채터 진동을 극대화시키기 위해 인서트의 돌출길이를 75 mm로

하여 실험하였으므로, 해석모델에서도 돌출길이를 75 mm로 하였다. 해석을 간단히 하기 위하여 툴홀더-인서트 형상을 제외한 공구동력계부의 변형은 채터에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. Table 2에는 유한요소해석을 위한 사용된 툴홀더 및 인서트의 물성값을 나타내었다.

#### 4. 공구의 채터진동에 대한 정적해석 결과

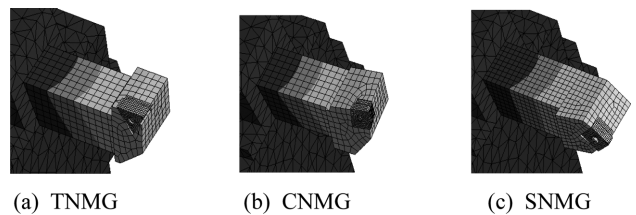
Fig. 5는 각각의 인서트에 작용한 절삭력에 따른 변형 양상에 대해 나타낸 것이다. 공구동력계를 이용하여 측정한 실험데이터를 하중조건으로 입력하여 정적 변위량과 응력분포에 대한 해석을 하였다.

Table 3에 나타낸 바와 같이, 예측된 Total deformation은 TNMG가 41.964 m로 가장 크며, CNMG, SNMG 순으로 크기가 크다고 해석되었다. Equivalent stress 또한 TNMG가 4457.9 MPa로 가장 높았으며, CNMG, SNMG 순으로 높은 값을 나타냈다. 해석결과 TNMG 인서트



(a) TNMG (b) CNMG (c) SNMG

Fig. 4. Geometric model of cutting tooling for turning process.



(a) TNMG (b) CNMG (c) SNMG

Fig. 5. Total deformation distribution of each insert.

Table 2  
Material properties used in the FEM simulation

	Steel (holder)	Tungsten (insert)	Unit
Density	7850	19300	kg m <sup>-3</sup>
Young's modulus	200	370	GPa
Poisson's ratio	0.3	0.17	
Yield strength	250	750	MPa
Ultimate strength	460	980	MPa

Table 3  
Static FE analysis results

	TNMG	CNMG	SNMG	Unit
Von-Mises stress	4457.9	4428.5	4015.1	MPa
Deviation of deformation	41.964	37.302	35.202	m
Principal force	37.031	36.146	32.391	m
Radial force	15.615	8.718	7.374	m
Feed force	0.528	0.556	0.444	m

및 툴홀더가 다른 두 툴링보다 동적강성이 작아 변형 및 응력발생이 많이 발생 되는 것으로 판단된다.

### 5. 공구의 채터진동에 대한 동적해석 결과

각 인서트의 형상에 따른 고유진동수를 알고, 각 모드에서 구조물의 변형양상을 확인해, 그 결과를 이용한 주파수응답해석을 하기 위하여 Modal 해석을 하였다.

공구동력계가 Turret에 고정되기 위해 접촉하는 지점을 Fixed해 자유도를 모두 구속하였다. Table 4에는 선삭툴링의 6차 모드까지 Modal 해석한 결과이며 Fig. 6는 1차와 2차 모드형상이다.

Fig. 6에서 각 인서트의 1차 모드에서 변위는 주로 구분력 방향으로 작용하고, 2차 모드에서는 배분력 방향으로 작용한다는 것을 알 수 있다. 고유진동수의 크기는 1

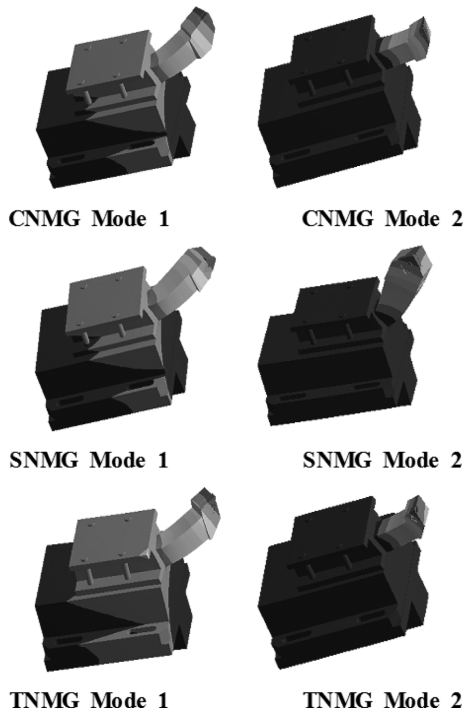


Fig. 6. First and Second mode shape of each cutting tooling method.

Table 4  
Natural frequency of each cutting tooling method (unit: Hz)

Mode No.	TNMG	CNMG	SNMG
1	2588.4	2617.1	2602.3
2	2926.0	3000.4	2936.3
3	3215.6	3259.9	3194.0
4	4947.4	4944.8	4929.9
5	5630.7	5638.2	5615.2
6	8243.3	8254.0	8567.4

Table 5  
Dynamic FE analysis results of cutting tooling methods

	TNMG	CNMG	SNMG	Unit
Total deformation	69.034	1.3517	1.3306	μm
Axial deformation of principal force	12.242	0.011947	0.22562	μm
Axial deformation of radial force	27.811	0.28934	0.33666	μm
Axial deformation of feed force	0.35136	0.099014	0.014908	μm

차 모드에서 TNMG는 2588.4 Hz, CNMG는 2617.1 Hz, SNMG는 2602.3 Hz로 TNMG가 가장 낮은 주파수를 갖는다. 공구동력계로 측정된 동적거동에 대한 실험데이터와 Modal 해석결과를 비교해보았을 때 1차 모드에서의 고유진동수 값 차이가 크지 않은 것으로 보아 해석결과를 믿을 수 있다고 할 수 있다.

선삭가공 시 공구에 작용하는 가진력에 대한 응답을 구해 채터진동의 동적특성을 알아보기 위하여, 위에서 구한 Modal 해석결과를 이용해 Harmonic response를 해석하였다. Frequency response 분석을 통해 주파수의 크기와 위상을 알아본 결과, TNMG의 경우가 3000 Hz로 가장 높은 주파수응답이 나타났으며, CNMG는 2600 Hz, SNMG는 2900 Hz로 해석되었다.

Table 5에는 위 해석에서 얻은 주파수를 적용해 총변위 및 최대등가응력을 구한 것이다. 예측된 각 인서트의 최대 변형량은 TNMG가 69.034.2 m로 가장 크며 CNMG의 51.07배, SNMG의 51.88배에 해당한다. 가진에 의한 채터는 TNMG를 사용한 툴홀더-인서트에서 가장 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 선삭 가공 시 사용되는 절삭공구 인서트 선택이 채터진동 발생에 미치는 영향을 알기 위하여 3종의 인서트 툴링 특성에 대한 실험데이터를 활용한 해석적 고찰을 하였다.

1) 정적해석에서 최대변형량과 응력분포가 TNMG > CNMG > SNMG 순으로 나타난 것을 알 수 있다.

2) 동적해석의 1, 2차 모드에서 TNMG, SNMG, CNMG의 순으로 고유진동수가 나타났으며, 주파수응답해석에서 최대변형량과 응력의 크기가 TNMG > CNMG > SNMG 순으로 나타난 것으로 보아 TNMG 툴링의 구조 강성이 가장 낮아 채터발생이 가장 큰 것으로 확인할 수 있었다.

3) 공구동력계를 활용한 동적 실험에서 TNMG 툴링에서의 절삭력변화가 가장 컸으며, 발생하는 채터마크의

표면조도가 가장 컸다.

절삭공구의 툴링이 CNC 선삭 채터에 미치는 영향을 확인하였고 본 연구를 토대로 향후 정·동적강성을 높일 수 있는 채터프리(chatter free) 툴링시스템 개발에 이번 연구결과를 활용코자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

## References

- [ 1 ] G. Totis and M. Sortino, "Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning", *International Journal of Machine Tool & Manufacture* 51 (2011) 34.
- [ 2 ] J.S. Kim, B.J. Seong and S.M. Jo, "The present status and prospects of textile machinery industry", *Machine and Materials* 13(3) (2001) 87.
- [ 3 ] D. Yan, T.I. El-wardancy and M.A. Elbestawi, "A multi-sensor strategy for tool failure detection in milling," *The International Journal of Machine Tools & Manufacture* 35 (1995) 383.
- [ 4 ] Fi.I. Compean, D. Olvera, F.J. Campa, L.N. Lopez de Lacalle, A. Elias-Zuniga and C.A. Rodriguez, "Characterization and stability analysis of a multivariable milling tool by the enhanced multistage homotopy perturbation method", *The International Journal of Machine Tools & Manufacture* 57 (2012) 27.
- [ 5 ] C.K. Chang and H. Lu, "Design optimization of cutting parameters for side milling operations with multiple performance characteristics", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (2007) 18.
- [ 6 ] V. Savas and C. Ozay, "The optimization of the surface roughness in the process of tangential turn-milling using genetic algorithm", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37 (2007) 335.
- [ 7 ] J.I. Lee, C.W. Hong and J.H. Ryu, "Separation of Nickel and Tin from copper alloy dross", *J. Korean Cryst. Growth and Cryst. Technol.* 24 (2014) 224.
- [ 8 ] J.Y. Lim, M.J. Yoon, T.H. Kim, S.Y. Kim and T.G. Kim, "A study on the mechanical properties of structure rolled steel and stainless steel for the CO<sub>2</sub> welding", *J. Korean Cryst. Growth and Cryst. Technol.* 23 (2013) 207.