

◆ 특집 ◆ 시뮬레이션 기반 기계장비 설계 기술

## 밀링 가공시 채터 현상 예측 기술개발

### Prediction of the Chatter during the Milling Process of the Machine Tool

서재우<sup>1</sup>, 박형욱<sup>1,✉</sup>  
Jae Woo Seo<sup>1</sup> and Hyung Wook Park<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 울산과학기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, UNIST)  
✉ Corresponding author: hwpark@unist.ac.kr, Tel: +82-52-217-2319

Manuscript received: 2015.4.14. / Revised: 2015.4.20. / Accepted: 2015.4.21.

*Chattering during the milling process causes severe problems on both the workpiece and cutting tools. However, chatter vibration is the inevitable phenomenon that operators require the prediction before the process or monitoring system to avoid the chatter in real-time. To predict the chatter vibration with the stability lobe diagram, the dynamic parameters of machine tool are extracted by considering cutting conditions and adapting the material properties. In this study, experimental verifications were taken for various aluminum types with different feed rates to observe the effect of the key parameters. The comparison between experimental results and the predictions was also performed.*

KEYWORDS: Chatter prediction (채터 현상 예측); Stability lobe diagram (안정성 선도); Chatter marks (채터마크)

#### 1. 서론

기계장비를 이용한 절삭 가공은 스핀들, 공구, 그리고 CAD/CAM 등의 기술의 발전과 함께 경쟁력을 갖췄으며, 제조산업의 한 축을 담당하고 있다. 특히 최근엔 항공우주, 자동차, 그리고 금형과 같은 분야의 업계에서 기계장비를 통한 고속 정밀 가공이 쓰이며, 그에 따라 빠르게 상용화되었다.<sup>1,2</sup> 하지만 여전히 산업계에서는 기계장비의 생산력 상상을 필요로 하며, 이는 결국 기계장비의 공작물 제거율(Material removal rate)과 관련이 있다. 이 송속도, 스핀들의 회전속도 그리고 절삭량의 상승이 공작물 제거율 상승을 위해 필수적이며, 이에

따라 기계장비는 열적, 동적으로 가혹한 환경에 노출되었다. 이를 극복하기 위해서 많은 연구들이 이뤄졌으며, 많은 문제들이 해결되어 지금의 수준에 도달했지만, 기계장비 가공 중 채터 현상은 여전히 절삭 공정상의 장애물로 남아 있다.<sup>3</sup>

기계장비의 동적 불안정으로 인한 진동문제와 달리 채터 현상 자체는 가공 시 공구와 가공물간의 상호작용에 의해 발생하는 자연적인 현상으로 완전한 제거가 불가능하다.<sup>4</sup> 강체(Rigid body)가 아닌 공구는 절삭력에 의한 변형을 하며 가공물에 표면파형(waviness)을 만든다. 표면파형은 공구에 작용하는 절삭력을 지속적으로 변화시키며, 그로 인해 특정한 임계점을 넘어선 가공조건에서는 기

계장비에 자려진동이 발생한다. 그리고 자려진동은 채터 현상이 일어나는 가장 큰 원인 중 하나이다. 가공 중 채터 현상이 발생하면 가공물의 표면 품질 저하와 가공오차를 야기하며, 공구의 수명 또한 빠르게 줄어든다. 연구자들은 미리 채터 현상 자체를 예측하여 가공조건을 설정하거나, 센서를 통한 모니터링과 현상 발생시 가공조건 변화 그리고 액츄에이터나 댐퍼를 설치하여 현상을 억제하는 방법 등을 연구하고 있다.

본 연구에서는 밀링 가공 중에서 발생하는 채터 진동을 예측하기 위한 시뮬레이터를 개발하였으며, 이에 대한 검증을 데스크탑(desktop) CNC가공기와 여러 종류의 알루미늄으로 시행하였다. 또한 그에 따른 표면상태를 확인하여 채터 진동 발생 유무를 판별하였다.

**2. 채터 현상 예측 기술개요**

채터 현상을 예측하는 방법론은 안정선 선도(Stability lobe diagram)를 기반하는 방식이 일반적이다. 기본적으로 이차원 안정선 선도에서는 가로축은 스피ndl의 속도 그리고 세로축은 축방향의 절삭량을 의미한다. 채터 진동에 대한 수학적인 규명은 Tobias와 Fishwick의 지연 미분 방정식(Delay differential equation)에 의해 시작되었다.<sup>5</sup> 이후에 Altintas와 Budak에 의해 개발된 0차 순서 근사(Zeroth order approximation)를 기반한 푸리에 급수(Fourier series)를 통한 안정선 선도 예측이 현재의 대부분의 채터 현상 예측에 기반이 되고 있으며,<sup>6</sup> 이를 응용하여 더 정확하고 범용적으로 쓰일 수 있는 모델들이 개발되고 있다.

**2.1 채터 예측 시뮬레이터 개발**

본 연구에서의 채터 현상 예측 시뮬레이터는 상용 수치해석 프로그램인 MATLAB의 GUI를 기반으로 개발 되었다. 채터 현상 예측에 쓰이는 수식은 위에서 언급한 Altintas의 Fourier series 방법과 Tlusty의 average tooth angle 방법을 기반으로 하였으며, 각 방법에 따른 두 가지의 다른 안정선 선도를 보여준다. 현재 개발된 시뮬레이터는 동일한 이송속도 조건에서 직선운동을 하는 엔드밀 기반 밀링 가공을 할 때에 대한 예측을 수행할 수 있다. 채터 현상 예측에 쓰이는 파라미터들로는 기계장비 자체의 동특성, 가공 조건 그리고 가공소재 특성으로 크게 분류 될 수 있으며, Fig. 1에 안정선

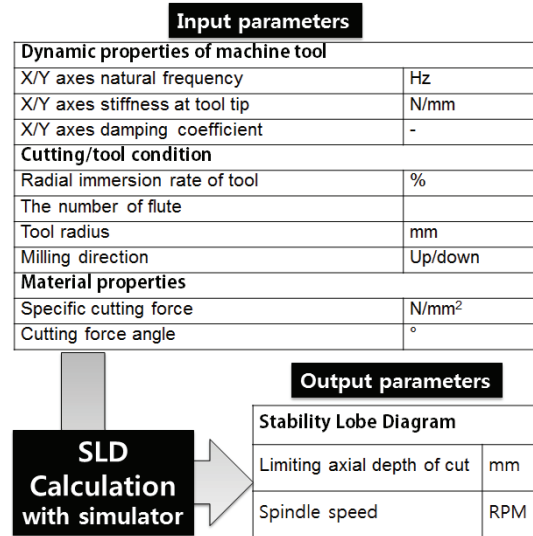
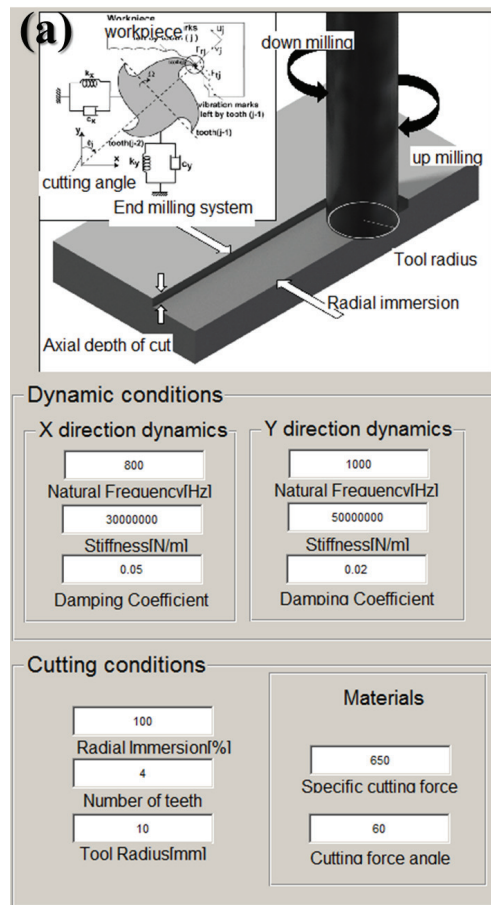


Fig. 1 Flow chart of chatter prediction with input and output parameters



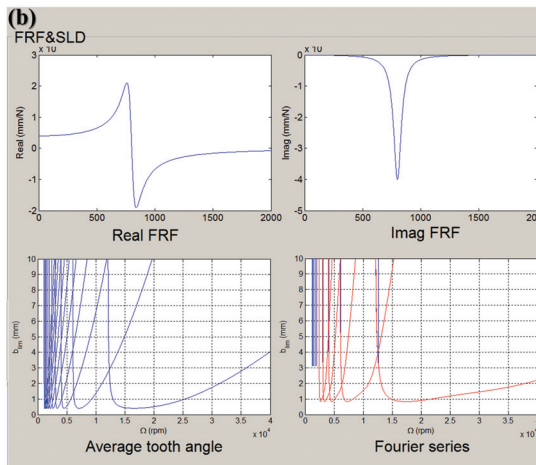


Fig. 2 Illustration of the developed simulator for two dimensional chatter prediction divided into (a) left and (b) right sides of window

선도 계산 방식 및 단위와 함께 자세히 소개되어 있다.

Fig. 2는 개발된 시뮬레이터의 GUI를 보여주고 있다. 좌측 상단의 그림은 입력변수들에 대한 설명과 함께 기본적인 밀링 공정에 대한 설명을 보여준다. 좌측 중반부터 하단까지는 다양한 입력 변수를 사용자가 입력할 수 있게끔 하는 빈 칸들이 만들어져 있다. 우측 상단의 두 그래프는 설정된 입력 변수를 통해 얻은 주파수 응답함수 그래프를 보여주며, 우측 하단의 두 그래프는 각각 average tooth angle 방법과 Fourier series 방법에 대한 안정선 선도 계산 결과를 보여준다.

### 3. 채터 현상 예측 모델 실험적 검증

본 연구에서는 채터 예측에 대한 실험적 검증을 위해서 비교적 구조가 단순하고 강성이 약한 데스크탑 CNC 가공기를 기반으로 실험을 수행하였다.

#### 3.1 기계장비 정,동강성 실험

채터 현상 예측을 위해서는 특정한 장비와 공구 조합에 따른 공구 끝단에서의 정강성과 동강성에 대한 정보가 필요하며 이는 예측을 위한 입력 변수로 쓰이게 된다. 이번 실험에서 쓰이게 된 앤드밀 공구에 지름 5mm의 4개와 3개의 날을 가진 유니툴사의 제품들을 사용하였으며, 공구 끝단은

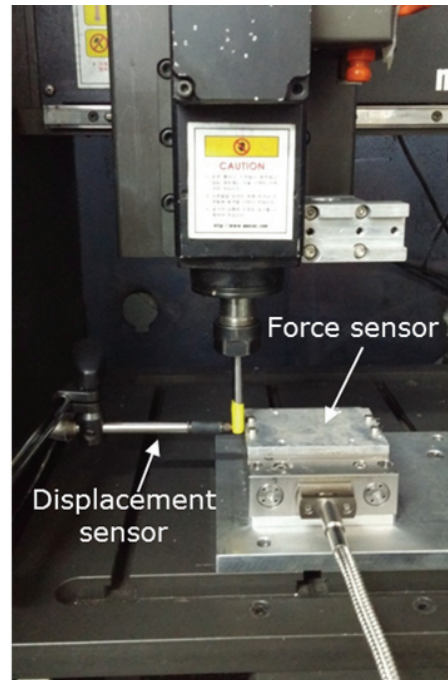


Fig. 3 Illustration of experimental setup for the stiffness of the desktop CNC machine

척에서 25mm 길이로 장착되었다.

먼저 기계장비의 정강성을 측정하기 위해서 Fig. 3과 같이 측정장비가 준비되었다. 접촉식 변위 센서를 공구 끝단에 고정시킨 후, Kistler사의 공구 동력계를 사용하여 이송에 의한 힘과 변위를 측정하였다. 0.1mm, 0.2mm 그리고 0.3mm를 이송하였을 때 힘을 측정하였으며 그것의 평균값을 정강성으로 선정하였다. 이러한 방법론으로 본 연구에 사용된 기계장비 테이블의 X축과 Y축에 대해서 수행하였다. 정강성 실험을 통하여 얻은 데스크탑 CNC 가공기에 강성은 일반적인 기계장비보다 비교적 약한 결과를 보여주었다. X축으로는 3500 kN/m, Y 축에서는 500kN/m 강성 값들이 얻어졌다. 정강성을 측정한 후에 기계장비의 주파수응답함수 (Frequency response function)를 얻기 위한 실험을 Fig. 4와 같이 수행하였다. 자성을 가진 가속도 센서를 공구의 끝단에 부착한 후에 충격 망치를 통하여 주파수 응답함수를 얻었다. Dewetron사의 신호증폭 및 수집장치(DEWE-43)를 통하여 데이터를 분석하였다. 기계장비의 동특성 실험을 통하여 얻은 진 데스크탑 CNC 가공기의 고유주파수는 250Hz, 댐핑계수는 0.05이다.

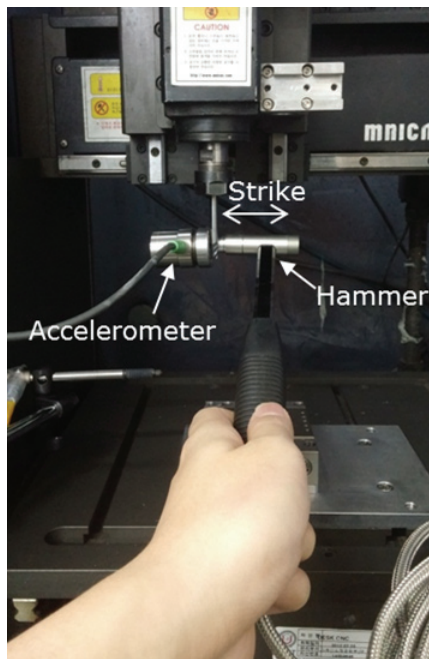


Fig. 4 Illustration of experimental setup for the FRF of the desktop CNC machine

### 3.2 예측모델의 실험적 검증

채터 진동의 발생 유무를 확인하기 위한 실험은 일반적으로 가속도계 혹은 마이크로폰 등의 센서를 이용하여 수행하지만, 본 연구에서는 가공 후 가공물의 표면의 상태를 확인하고 조도를 측정함으로써 이루어졌다. 가공소재로는 5052계열, 6061계열 그리고 7075계열의 각각 다른 알루미늄을 선택하였으며, 모든 가공은 슬로팅을 통한 절삭으로 수행하였다. 그리고 각각의 다른 이송속도, 스핀들 회전속도 그리고 절삭 깊이에 따른 실험을 수행하였다.

#### 3.2.1 절삭 깊이에 따른 실험적 검증

본 연구에서의 실험적 검증은 채터 예측 시뮬레이터로 그려진 안정선 선도와 실험에서 선정된 스핀들 회전속도에서의 채터 현상 유무에 대한 결과를 비교함으로써 이루어졌다.

4개 날을 가진 공구를 사용하였으며, 스핀들 회전속도는 3800RPM이며, 모든 가공조건에서 이송속도는 200mm/min으로 고정하였다. 그리고 절삭 깊이를 100 $\mu$ m에서 500 $\mu$ m로 100 $\mu$ m씩 변화시키며 실험을 수행하였다. Fig. 5에서는 실험결과와 채터 예측 시뮬레이터로 그려진 안정선 선도를 비교한 결

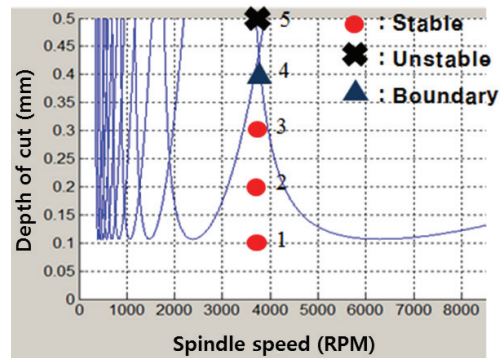


Fig. 5 Comparison between experimental result and stability lobe diagram predictions

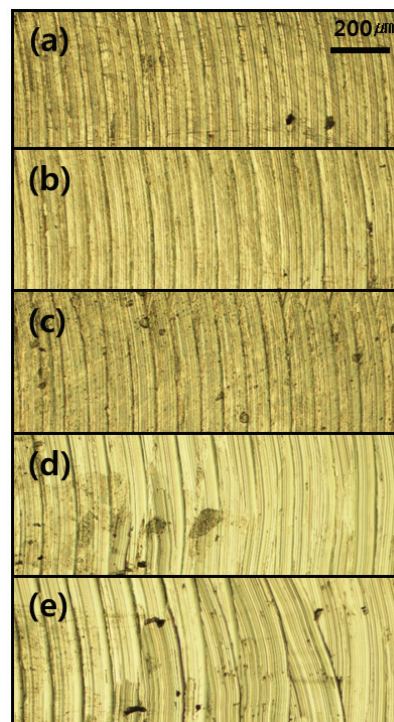


Fig. 6 Surfaces of the machined workpiece at each different depth of cut of (a) 100  $\mu$ m, (b) 200  $\mu$ m, (c) 300  $\mu$ m, (d) 400  $\mu$ m and (e) 500  $\mu$ m taken by optical scope with magnification of 50

과를 보여준다. 안정선 선도에서 가로축은 스핀들 속도 그리고 세로축은 절삭 깊이를 의미하고, 원 기호는 안정적인 구간 가위표 기호는 채터가 발생하는 구간을 의미하며, 각 조건에서 가공 실험이 진행되었다. Fig. 6은 광학현미경으로 촬영한 가공



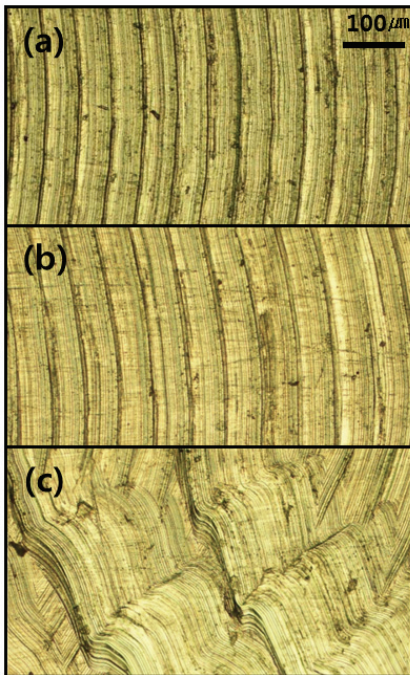


Fig. 7 Surfaces of the machined workpiece at each different feedrate of (a) 200mm/min, (b) 300mm/min and (c) 400mm/min condition taken by optical scope with magnification of 100

한 알루미늄의 표면상태를 보여준다. 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m 그리고 300 $\mu$ m에서는 일정한 패턴이 남아있었으며, 경계점인 400 $\mu$ m에서는 불확실한 결과 그리고 500 $\mu$ m에서는 고르지 않은 표면상태를 보여주며, 예측한 결과와 실험결과가 일치함을 알 수 있었다.

**3.2.2 이송속도에 따른 실험적 검증**

실험에서 사용한 데스크탑 CNC 가공기의 강성이 비교적 약해서 일어난 결과일 수도 있지만, 동일한 가공조건에서 이송속도에 따라서 선별적으로 chatter 현상이 발생하였다. 앞 절과 같은 가공조건에서, 경계점인 400 $\mu$ m의 실험을 수행하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 이송속도에 따라서 표면의 결과가 다르며, 특히 400mm/min에서는 chatter 현상이 발생하였다.

**3.2.3 시편 표면조도기반 실험적 검증**

이번 절에서는 chatter 현상 해석 예측 정확도를 일정한 범위의 스피들 회전속도와 절삭 깊이에서 슬롯팅(Slotting) 가공 시, 가공물 표면에 안정선 선

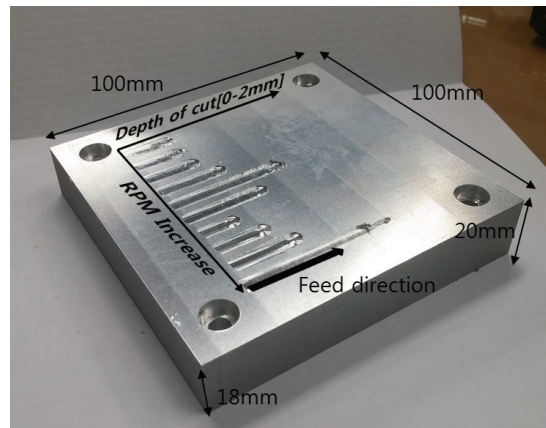


Fig. 8 Test specimen for verifying the chatter prediction

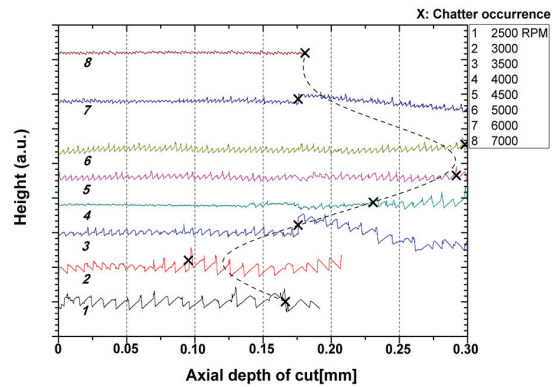


Fig. 9 Roughness data of workpiece for aluminum 7071 with the three flute 5mm end mill

도의 경향을 보여줄 수 있는 시편을 Fig. 8과 같이 제작하였다. 시편은 육면체의 한 면과 반대편면의 단차를 2mm로 만들고, 이때 절삭 방향을 절삭 깊이가 점점 더 깊어지게끔 설계하였다. 실험도중 소리나 시각적으로 판단하여 chatter가 발생하였을 때는 공구의 보호를 위해 가공을 중단하였으며, 여기에서는 오차가 발생하므로 조도 시험을 통해서 이를 검증하였다. 검증 실험에서 공구로는 3개의 날을 가진 직경 5mm의 엔드밀이 사용되었다.

Fig. 9는 7075 계열 알루미늄에 대한 조도 측정 실험에서의 각 가공면의 측정 단면 결과를 보여주고 있다. 조도 실험 결과를 분석하였을 때, 평균적인 조도값이나 위치에 따른 조도값들은 chatter 현상과 상관없이 일정하지 않았으며, 이는 스피들의 회전속도 그리고 이송속도와 같은 변수들이 존재하기 때문이라고 짐작된다. 하지만, 프로파일을 그

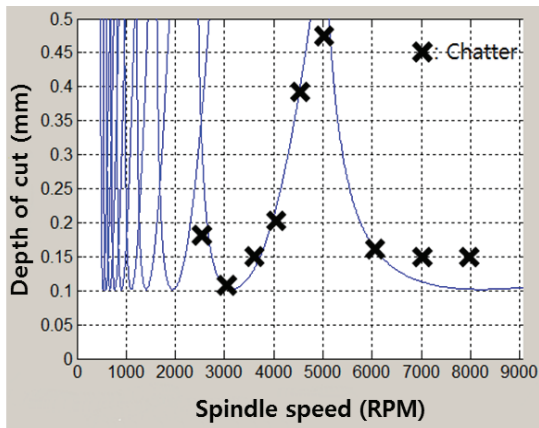


Fig. 10 Comparison between stability lobe diagram and test result for aluminum 7071 with the three flute 5mm end mill

려보면 채터 마크가 생길 시점에서는 프로파일이 급격하게 변화하는 모습을 보여주며, Fig. 10과 같이 프로파일을 통해 판단한 채터 마크와 해석으로 예측된 결과를 비교하면 동일한 경향을 보여주는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 채터 현상 예측을 위한 시뮬레이터를 수치해석 프로그램인 Matlab을 기반으로 하여, GUI 형식으로 개발하였으며, 이를 데스크탑 CNC 가공기를 사용한 가공 실험으로 검증하였다. 기존의 연구들에서 제대로 고려되지 않은 이송속도와 가공물의 표면에 중점을 두었으며, 그에 따라 이송속도가 채터 현상에 미치는 영향과 표면 조도 측정을 이용한 채터 현상의 발생 유무를 확인하였다. 이를 바탕으로 하여서 향후에는 이송속도에 따른 변수를 기존 채터 현상 해석의 수식에 조화하는 방법을 연구하여, 채터 현상 해석에 대한 정확도 향상시키고 검증을 시행할 것이다. 또한 채터 현상이 가공물 표면에 주는 영향을 정량적으로 정리할 방법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 “기계장비 정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술개발” 사업 및 지역혁신인력사업(No. 2012H1B8A2026133)으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. Quintana, G. and Ciurana, J., “Chatter in Machining Processes: A Review,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 5, pp. 363-376, 2011.
2. Altintas, Y. and Weck, M., “Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 2, pp. 619-642, 2004.
3. Abele, E., Altintas, Y., and Brecher, C., “Machine Tool Spindle Units,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 781-802, 2010.
4. Budak, E. and Altintas, Y., “Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling - Part 1: General Formulation,” *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 120, No. 1 pp. 22-30, 1998.
5. Hanna, N. H. and Tobias, S. A., “A Theory of Nonlinear Regenerative Chatter,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 96, No. 1, pp. 247-255, 1974.
6. Altintas, Y. and Budak, E., “Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 357-362, 1995.