



## 밀링가공 시 공구 경로에 따른 chatter링 분석

김동은<sup>a</sup>, 이재경<sup>a</sup>, 서재우<sup>a,\*</sup>

## Toolpath Dependent Chatter Stability analysis During Milling Process

Dongeon Kim<sup>a</sup>, Jaegyong Lee<sup>a</sup>, Jaewoo Seo<sup>a,\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National University

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	5	March	2024
Revised	3	April	2024
Accepted	4	April	2024

## Keywords:

Chatter  
Milling process  
Toolpath  
Stability lobe diagram

## ABSTRACT

During the milling process, interaction between the cutting tool and workpiece can result in a chatter phenomenon. This not only adversely affects the workpiece's surface finish, but also the performance of the machine tool system. Stability lobe diagram is a widely accepted method to prevent chatter, in which the maximum permissible depth of cut is calculated for a given spindle speed. This paper introduces a comprehensive approach for deriving the stability lobe diagram using a simulation model. The method encompasses the dynamic identification of the tool tip, cutting force analysis, and stability calculations. Moreover, while most existing chatter prediction studies focus on slot milling, this paper uniquely offers a method to predict chatter stability, particularly during pocket milling processes.

## 1. 서론

자동차, 항공, 금형제조 산업에서 고품질 부품에 대한 수요가 증가함에 따라 고속 가공은 주요 공정 중 하나가 되었다. 공작기계, CAD/CAM 소프트웨어, 공구경로 생성, 절삭공구 등 다양한 분야의 기술개발로 가공 공정의 발전이 이루어졌다. 그럼에도 불구하고, 고속, 고정밀 가공 공정을 방해하는 몇 가지 문제가 남아 있다. 가공 공정 중 chatter 진동 현상은 기존의 밀링, 터닝, 드릴링 공정은 물론 마이크로 밀링 공정에서도 해결되어야 할 문제 중 하나이다. 특히 chatter 진동은 자력 진동에 의해 발생하는 현상이다. 절삭 공구와 공작물의 상대적인 움직임은 공작물 표면에 물결 모양을 남기고 이는 공작기계-공작물 시스템의 공진으로 발생하는 연속적인 진동의 원인이 된다. chatter 진동으로 인해 공작물 표면에 chatter 자국이 남고 소음이 발생하며 절삭 공구 모서리에 심각한 손상이 발생한다. 이는 가공물의 정밀도, 공작 기계와 공구의 수명에 영향을

미치며, 생산성 감소와 비용 증가로 이어진다.

생산의 효율성을 위해서는 가공 경로 및 가공 조건의 변화를 통해 chatter 진동을 감소시키는 것이 중요하다. 시뮬레이터 개발을 통해 가공 경로별 chatter 진동의 안정성을 분석하고자 한다.

## 1.1 Literature review

chatter 진동과 관련된 세 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 Altintas, Budak이 개발하고 개선한 stability lobe diagram을 계산하여 가공 공정 전 chatter 진동을 예측하는 것이다. Zeroth-order-approximation은 후속 연구자들에게 chatter 안정성을 예측하는 데 필수적인 수학적 모델이 되었다<sup>[1,2]</sup>. Quintana는 경사면 형상의 공작물에 대한 chatter 진동 감증을 위한 실험적 방법을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 미세 가공 중 chatter 진동 예측은 절삭력으로 새로운 연구 주제가 되었으며, 기존 가공 공정과 동일한 방법으로는 공구의 움직임을 얻을 수 없었다. Biermann과 Baschin은 마이크로 밀링 공정 중

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-250-7306

E-mail address: jseo7717@gnu.ac.kr (Jaewoo Seo).

cutting edge의 영향에 대해 발표했다<sup>[4]</sup>. Filizet은 마이크로 엔드밀의 tool-tip dynamics를 분석하고 결과를 검증했다<sup>[5]</sup>. Novakov와 Jackson은 마이크로 밀링 공정 중 새로운 절삭력 모델을 제안했다<sup>[6]</sup>. Stability lobe diagram을 이용한 chatter 진동 예측을 위해서는 parameters of tool tip dynamics, 절삭 조건 및 동적 절삭 계수의 매개변수가 필요하다. 공구 포인트 동역학은 tool tip의 modal identification을 통해 얻어진다. 동적 절삭 계수는 특정 절삭 공구 및 가공물 재료의 절삭력 결과의 영향을 받는다.

두 번째 방법은 가공 공정 중 chatter 진동 감지에 중점을 두며, machining dynamics의 완벽한 분석을 통해 첫 번째 방법을 수행할 수 있는 경우 수행이 가능하다. 이 분야에서는 신호 처리 기술이 필수적이다. Schmitz는 밀링 소리의 통계적 평가를 통해 chatter 진동을 인식하는 방법을 제안했다<sup>[7]</sup>.

세 번째 방법은 active vibration reduction system으로 chatter 진동을 제거하는 것이다. Al-Regib은 스피들 속도 분산 방법을 사용하여 능동 chatter 진동 억제 모델을 개발했다<sup>[8]</sup>.

본 연구에서는 chatter 진동 연구 분야의 첫 번째 방법과 관련된 특정 포켓 밀링에 대한 chatter 진동 안정성을 예측한다. 이전 연구에서 수행된 chatter 진동 분석의 대부분은 하나의 경로에 대한 안정성 다이어그램을 계산하는 데 중점을 두었다. 그러나 본 연구에서는 시뮬레이션을 기반으로 전체 공구 경로의 chatter 진동을 결정하는 모델을 개발했다. 복잡한 공구 경로에 대하여 경로별 chatter 진동 분석을 분석하기 위한 것이다. chatter 분석을 위한 매개 변수 값을 결정하기 위해 dynamic identification 및 절삭력 분석을 수행하였으며, 전체 경로에 대한 chatter 진동을 방지할 수 있는 임계 절입 깊이를 제시하는 것이 목표이다. 기계 가공 전 시뮬레이션을 통하여 경로에 따른 chatter 진동의 예측이 가능하고, 생산성을 높일 수 있는 가공 조건을 찾을 수 있다는 장점이 있다.

## 2. Methodology

### 2.1 Parameter analysis

Stability lobe diagram 계산을 위해서는 기계 장비 특성과 절삭 조건에 관련된 여러 입력 변수가 필요하며, 그 결과는 입력 변수에

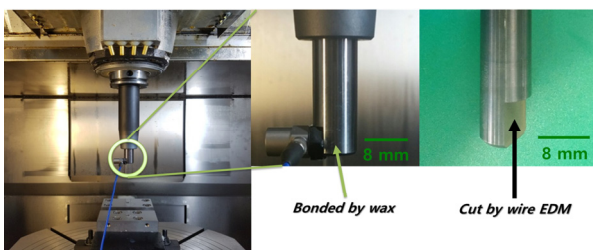


Fig. 1 Blank tool trim method for the impact hammer test

따라 바뀐다. 시뮬레이션 기반 chatter 진동 분석에서 모든 공구 홀더-절삭 공구의 움직임은 직접 테스트하는 것은 어려움이 있기 때문에 실험 결과와 FEA 시뮬레이션 결과를 비교하여 해석방정식 도출 과정을 수행하였다. 본 연구에 사용된 공작기계는 Hermle사의 5축 머시닝 센터이다.

공구 직경이 작은 경우 센서 부착이 쉽지 않아 절삭 공구 끝부분에 대한 충격 테스트에 어려움이 있다. 절삭공구의 끝부분을 Fig. 1과 같이 절단하여 센서와 절삭공구를 완전히 부착하였다. 해석식을 도출하기 위해 공구 지름, 오버행 길이(overhang length), 그리고 톨 홀더 타입에 따라 모달 해석을 수행하였다. 해석 결과에서의 첫번째 모드에 해당하는 공진 주파수를 결과값으로 지정하였으며, 이에 대한 대표적인 결과를 Table 1에 작성하였다.

회귀분석을 통해 각 공구 홀더에 대한 분석 식은 다음과 같이 도출되었으며, 공구 직경과 오버행 길이에 따른 공진 주파수의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

$$f_{short} = -1.8.5201(O-15.05)+242.574D \quad (1)$$

$$f_{long} = -21.63(O+1.113)+299.7D \quad (2)$$

$$f_{chuck} = 1.098(O+892.9)+0.05D \quad (3)$$

Table 1 Results of dynamic identification tests

Cutting tool diameter (mm)	Overhang length (mm)	Tool holder type	1st mode (Hz)
8	50	Short shrink fit	1074
8	60	Short shrink fit	903
8	60	Long shrink fit	754
8	60	Short shrink fit	1269
12	30	Short shrink fit	3100
16	30	Milling chuck	3647

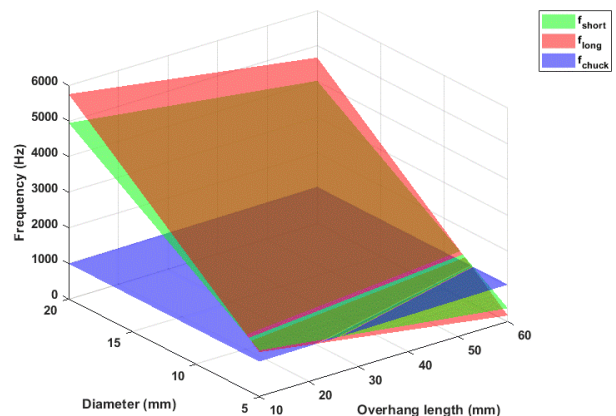


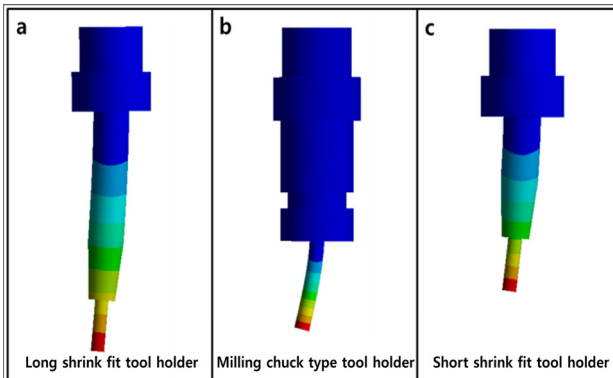
Fig. 2 1st mode Frequency between overhang length and tool diameter

**Table 2 Material properties used in FEM**

Materials	Young's modulus (GPa)	Mass density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
Tool holder (structural steel)	560	14400	0.22
Cutting tool (tungsten carbide)	200	7850	0.29

**Table 3 Frequency response of tool diameter of 8 mm with tool holder type with variance of overhang length**

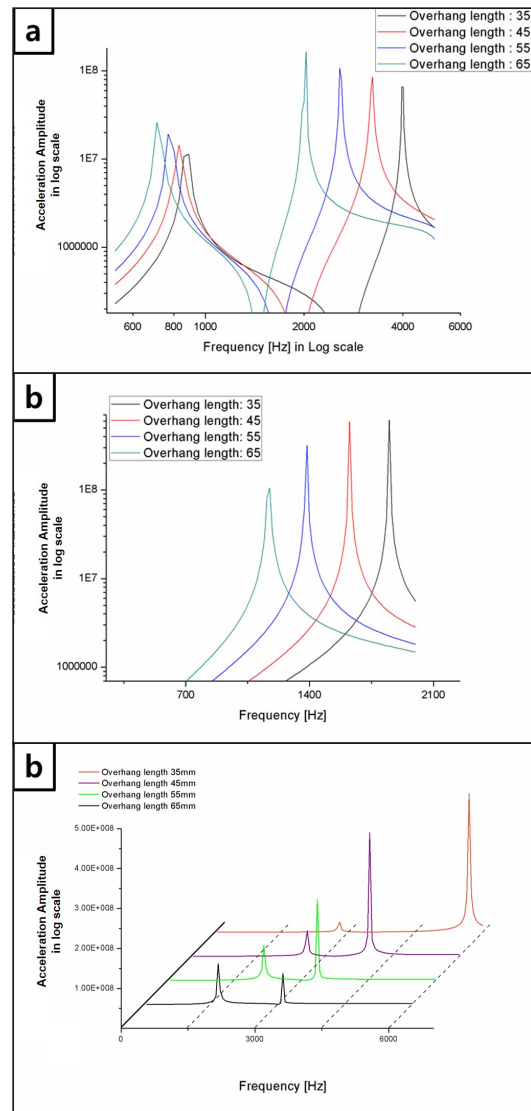
Tool holder type	Overhang length (mm)	1st mode (Hz)
Long shrink fit	35	890
	45	830
	55	770
	65	710
Short shrink fit	35	1850
	45	1625
	55	1385
	65	1160
Milling chuck	35	2800
	45	2600
	55	2150
	65	1650



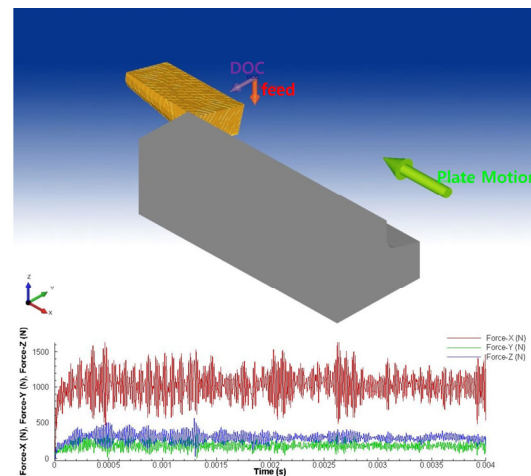
**Fig. 3 1st mode shapes of a) long shrink fit, b) milling chuck and c) short shrink fit tool holders**

여기서  $f_n$ 는 공구 홀더 및 절삭 공구 시스템의 첫 번째 모드의 공진 주파수를 나타낸다. 공구 홀더 별로 분석하였으며  $f_{short}$ ,  $f_{long}$ ,  $f_{chuck}$ 는 short shrink fit tool holder, long shrink fit tool holder, milling chuck type tool holder를 적용한 결과이다.  $O$ 는 공구 홀더까지 절삭 공구의 오버행 길이,  $D$ 는 절삭 공구의 직경을 나타낸다.

시뮬레이션 기반 채터 진동 분석을 위해 유한요소법을 이용하여 공구홀더-절삭공구 시스템의 동적 특성을 예측하고, 실험 결과와 비교하여 최적의 경계조건을 선정하였다. 유한요소 해석에는 절삭



**Fig. 4 Frequency response functions of tool diameter of 8 mm with (a) long shrink fit and (b) short shrink fit (c) milling chuck tool holder with variance of overhang length**



**Fig. 5 Cutting force analysis for the aluminum workpiece with feed rate of 150 mm/min using Advantedge software**

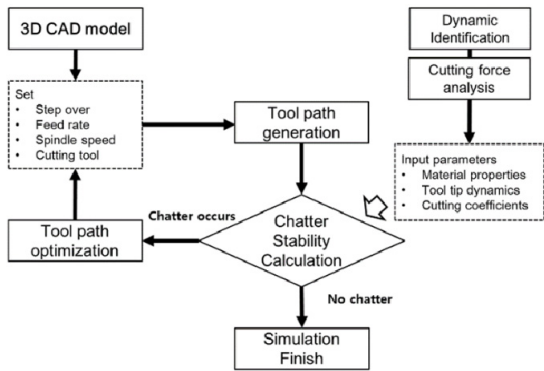


Fig. 6 Overview of chatter simulation concept

공구 팁의 조화 응답을 계산하는 데 적합한 상용 유한 요소 해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하였다. 절삭 및 공구 홀더의 재료 특성은 Table 2와 같다.

절삭 부분과 공구 홀더 사이에는 10 μm의 공차를 갖는 것으로 가정하였다. 조화응답해석을 위해서는 절삭공구 팁이 반경 방향의 하중 조건에 노출된다. 유한요소해석은 지름 8 mm의 공구에 대해서 진행하였으며, 결과는 Fig. 3, Fig. 4와 같다. Fig. 4의 오버행 길이에 따른 첫 번째 모드의 공진 주파수를 Table 3에 정리하여 작성하였다.

### 2.2 Cutting force analysis

절삭력 분석은 유한요소 해석으로 절삭력을 평가할 수 있는 Advantedge 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. Fig. 5는 특정 절삭력 계수를 얻기 위해 직교 절삭 조건에서 알루미늄 합금을 기준으로 수행된 분석이며, 절삭력을 기반으로 하여 specific cutting energy를 도출하였다.

### 2.3 Development of simulator

가공 공정에서 chatter 진동 발생 여부를 확인하기 위한 chatter 진동 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 본 모델의 목적은 Fig. 6과 같이 공구 경로 정보를 이용하여 공구 위치에 따른 가공 조건에서 chatter 진동의 안정성을 평가하는 것이다. 공구 경로는 작업자가 공구 경로 생성 소프트웨어를 통해 생성된 것을 사용하며, chatter 진동의 안정성은 stability lobe diagram을 통해 평가된다.

Fig. 7은 stability lobe diagram을 나타내며, 스피indle 속도에 따른 허용 절입 깊이를 알 수 있다. 6000 rpm, 10000 rpm에서 허용 절입 깊이가 가장 낮음과 8000 rpm, 16000 rpm에서 안정적 절단 영역이 증가함을 알 수 있다. 공구 홀더는 short shrink fit tool holder를 사용했으며, 사용된 공구는 8 mm solid endmill, 오버행 길이는 50 mm의 조건에서 계산된 결과이다.

실제 가공 공정에서 작업자는 3D CAD 모델을 그린 후 공구

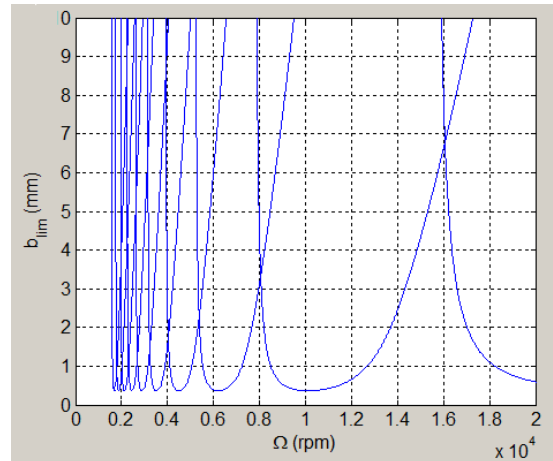


Fig. 7 Stability lobe diagram

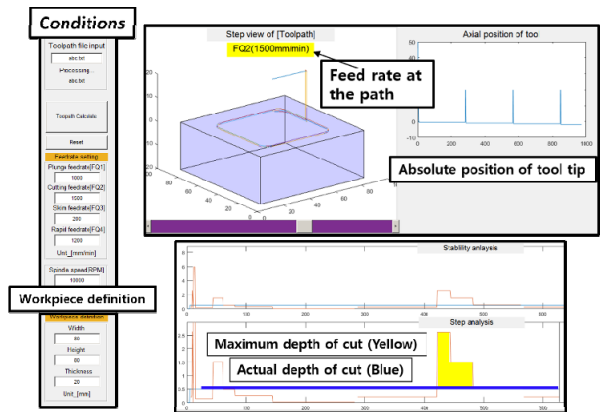


Fig. 8 Developed simulator with GUI interface

경로 생성 소프트웨어를 통해 공구 경로를 생성한다. 공구 경로 생성 시 작업자가 이송 속도, 절삭 깊이, 절삭 공구 및 스피indle 속도를 설정한다. 이러한 가공 조건은 공구 경로 파일에 입력되며, 공구 위치 정보가 포함된다. 시뮬레이션을 통해 작업자가 소프트웨어를 통해 생성한 공구 경로를 확인할 수 있고, 경로에 따른 chatter 진동의 안정성을 확인할 수 있다. Stability lobe diagram을 통해 계산된 결과는 해당 경로의 최대 절입 깊이로 표현되며, 작업자는 공구 경로에 입력된 절입 깊이와 최대 절입 깊이를 비교 후 가공조건 변경을 통해 chatter 진동을 방지할 수 있다. 공구경로 분석 및 경로별 chatter 안정성 분석을 위한 시뮬레이터 개발에는 MATLAB GUI를 활용하였다.

Fig. 8은 시뮬레이션 결과를 보여준다. 왼쪽에는 가공 조건과 공작물에 대한 정보가 포함되며, 오른쪽 상단부에는 실제 가공 경로를 확인할 수 있다. 그림 하단 중앙 그래프의 파란색 선은 실제 공구 경로에서의 절입 깊이를 나타내고, 노란색 선은 계산된 최대 절입 깊이를 나타낸다. 노란색 선이 파란색 선 위에 있으면 최대 절입 깊이가 실제 절입 깊이보다 크다는 의미이며, 이 경우 안정적

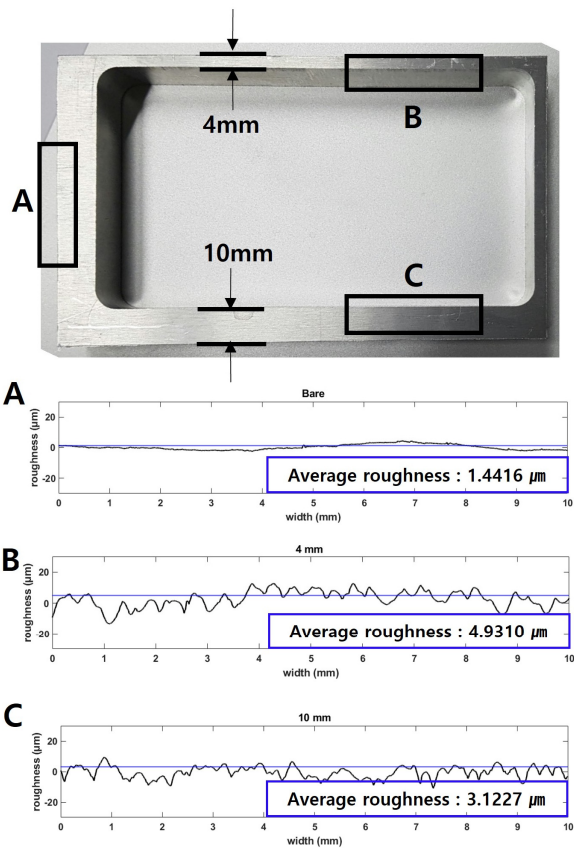


Fig. 9 Experimental results for pocket milling case with the roughness profile of section A(4 mm wall) and B(10 mm wall)

인 절삭이 가능하다.

### 3. Experimental validation

실험적 검증은 알루미늄 가공물의 포켓 밀링을 통해 수행하였다. 공작물의 크기는 170 mm × 85 mm × 20 mm이고, 사용된 공구는 직경 8 mm의 솔리드 엔드밀과 오버행 길이가 60 mm인 긴 shrink tool holder를 사용하였다. 이송 속도는 1500 mm/min, 스피indle 속도는 6000 RPM으로 설정하였다. 머시닝센터는 동적 강성이 상대적으로 우수하기 때문에 chatter 진동에 민감한 가공 조건에서 실험을 진행하였다. Fig. 9에 보이는 것처럼 가공 전 공작물에 해당하는 Section A, 밀링 가공 시 chatter 진동이 발생한 Section B, Section C 각각 10 mm 폭의 거칠기 프로파일을 측정하여 비교하였다. 가공 전 평균 거칠기 Ra는 1.4416 μm로 나타났다. 벽의 두께가 4 mm인 Section B의 평균 거칠기는 4.9310 μm로 나타났고, 벽의 두께가 10 mm인 Section C의 평균 거칠기는 3.1277 μm로 나타났다. 측정결과 벽의 두께가 4 mm인 구간 A에서 chatter 진동이 벽이 10 mm인 구간보다 더 크게 나타났다. 이는 공구 위치

에 따른 공작물의 동적 특성과 강성 때문이다.

### 4. 결론

FEA 시뮬레이션 기반의 동특성 해석과 절삭력 분석을 포함한 공구 경로에 따른 chatter 진동 예측을 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. chatter 진동이 발생하는 공진 주파수를 찾기 위해 실험과 ANSYS를 통한 유한요소 해석을 진행하였다. 공구 홀더, 오버행 길이에 따른 주요 공진 주파수를 찾았고, 회귀 분석을 통해 공구 홀더별 공진 주파수의 식을 도출하였다. 이를 기반으로 시뮬레이션 모델에서 stability lobe diagram 계산을 수행하였고, 공구 경로에 따라 계산되는 최대 절입 깊이를 통해 가공 중 공구경로에 따른 chatter 진동 발생 여부 확인하였다. 이를 통해, chatter 진동 발생 시 가공 조건 및 경로 변경을 통해 가공의 효율성을 향상시킬 수 있는 조건을 판단하였다. 실험적 검증으로 벽의 두께가 다른 알루미늄 가공물의 포켓 밀링을 진행하였다. 두께가 4 mm인 벽에서 평균 거칠기는 4.9310 μm, 10 mm인 벽에서 3.1277 μm로 4 mm의 벽에서 chatter 진동이 더 크게 발생하였다. 향후 연구에서는 공구 경로를 고려하여 얇은 벽 또는 마이크로 밀링에서의 chatter 진동 예측을 수행할 예정이다. 위의 가공 공정은 상대적으로 약한 동적 시스템에서 수행되기 때문에 각 경로에 대한 individual coupled dynamic model이 필요하며, 지금까지 개발된 공구 경로 시뮬레이션 모델이 적용된다면 새로운 chatter 진동 분석 알고리즘을 기대할 수 있다.

### 후 기

이 논문은 한국연구재단의 기초연구사업 지원(과제번호: 2021 R111A1A01051407) 및 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원을 받아 수행된 연구임(2021-4000000520, 자원순환(재제조) 산업 고도화 인력양성).

### References

- [1] Altintas, Y., Budak, E. 1995, Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, CIRP Annals, 44:1 357-362, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62342-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62342-7).
- [2] Altintas, Y., 2001, Analytical Prediction of Three Dimensional Chatter Stability in Milling, JSME International Journal Series C Mechanical Systems, JSME Int. J. Ser. C-Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf., 44:3 717-723, <https://doi.org/10.1299/>

jsmec.44.717.

- [3] Quintana, G., Ciurana, J., Teixidor, D., 2008, A New Experimental Methodology for Identification of Stability Lobes Diagram in Milling Operations, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 48:15 1637-1645, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.07.006>.
- [4] Biermann, D., Baschin, A., 2009, Influence of Cutting Edge Geometry and Cutting Edge Radius on the Stability of Micromilling Processes, *Production Engineering*, 44:1 357-362, <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0188-7>.
- [5] Filiz, S., Cheng, C.-H., Powell, K. B., Schmitz, T. L., Ozdoganlar, O. B., 2009, An improved tool-holder model for RCSA tool-point frequency response prediction, *Precis. Eng.-J. Am. Soc. Precis. Eng.*, 33:1 26-36, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.03.003>.
- [6] Novakov, T., Jackson, M. J., 2010, Chatter Problems in Micro-and Macrocutting Operations, Existing Models, and Influential Parameters—A Review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 47 597-620, <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2213-6>.
- [7] Schmitz, T. L., 2003, Chatter Recognition by a Statistical Evaluation of the Synchronously Sampled Audio Signal, *J. Sound Vibr.*, 262:3 721-730, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00119-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00119-6).
- [8] Al-Regib, E., Ni, J., Lee, S. H., 2003, Programming Spindle Speed Variation for Machine Tool Chatter Suppression, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 23:1 121-122, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00126-3).



**Dongeun Kim**

Master Course in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National University. Her research interest is Machine Tool and Composite Machining Process.  
E-mail: dong2@gnu.ac.kr



**Jaegyong Lee**

Undergraduate Student in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is Machine Tool.  
E-mail: leemcjk@gnu.ac.kr



**Jaewoo Seo**

Assistant Professor of Mechanical Convergence Engineering at Gyeongsang National University. His research interests mainly include Composite Machining and Advanced Manufacturing Processes.  
E-mail: jseo7717@gnu.ac.kr