

## A study on the simulation for chatter vibration stability improvement of end milling process

Joon Hwang<sup>†</sup> and Won-Kuk Lee<sup>\*</sup>

*Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea*

*\*Department of Advanced Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea*

(Received January 26, 2016)

(Revised February 5, 2016)

(Accepted February 12, 2016)

**Abstract** End milling process is one of the broadly used manufacturing process for precision machined parts and products. 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. 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 parameters to affect to chatter vibration stability. Acquired knowledge from this study will apply the optimal cutting conditions to improve a machining process.

**Key words** Chatter vibration stability, End milling process, Numerical analysis and experimental approaches

## 엔드밀링 채터 안정성 개선을 위한 시뮬레이션

황준<sup>†</sup>, 이원국<sup>\*</sup>

한국교통대학교 공과대학 항공·기계설계학과, 충주, 27469

\*한국교통대학교 산업대학원 첨단기계설계학과, 충주, 27469

(2016년 1월 26일 접수)

(2016년 2월 5일 심사완료)

(2016년 2월 12일 게재확정)

**요약** 엔드밀링 공정은 3차원 형상의 다양한 부품, 제품, 금형을 가공하는데 널리 사용되고 있는 핵심 가공 프로세스이다. 가공정밀도 요구수준과 가공형상 난이도 수준이 날로 높아짐에 따라 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 엔드밀링공정에서 발생하기 쉬운 채터진동의 안정성을 향상시키기 위해 절삭모델에 근거한 채터진동 안정성 시뮬레이션 방법론을 연구하고, 엔드밀링 절삭조건이 채터진동에 미치는 영향을 다양한 조건하에서 예측하고자 하였다. 본 연구결과를 더욱 발전시켜 채터진동과의 상관성을 연구하고, 향후 채터진동 저감형 가공시스템 개발을 위한 근간 기술자료로 활용코자 한다.

### 1. 서론

엔드밀링 공정은 3차원 형상의 다양한 부품, 제품, 금형을 가공하는데 널리 사용되고 있는 핵심 가공공정이다.

가공정밀도 요구수준과 가공형상 난이도 수준이 날로 높아짐에 따라 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. 기계가공 중 공작물과 절삭공구 사이에 스스로 발생하는 상대운동이 불안정 상태에 도달하여 생기는

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

격심한 진동을 chatter 진동이라 한다[1]. 이는 가공 절삭 시에 이송속도, 회전속도에 상대적으로 비례하며, 공작물의 표면 거칠기를 극대화시켜 가공정밀도를 저하시킬 뿐만 아니라 공작기계의 수명을 감소시키고 절삭공구의 마멸과 파손을 가져오며 이런 진동이 심할 경우에는 공작기계에서 원하는 절삭작업의 수행이 불가능하게 된다. 이처럼 chatter 진동은 공작기계의 생산성을 떨어뜨리고 공작물의 정밀성에 중대한 영향을 미치고 있기 때문에 공작기계의 성능을 평가하는데 있어 지극히 중요한 의미를 가지고 있다. chatter에 대해서는 진동이 발생하는 조건의 관점에서 많은 연구 성과가 축적되어 왔다[3, 4]. chatter와 같은 동적반응은 최종가공물 표면에 직접적인 영향을 주므로, chatter의 예측은 중요하다. chatter의 연구는 현재까지 이론적으로 완전히 정립되고 검증되지 않아 실험과 가공 현장에서의 경험을 토대로 진행되고 있으나, 좀 더 효율적인 chatter의 예측을 위해서는 정확하고 신뢰성 있는 모델의 예측이 필요하다[5, 6]. 또한 가공 정밀도를 만족하면서 제조비용 절감 및 생산성 향상을 위해서는, 적합한 공구 형상의 설계와 최적의 절삭 조건이 필요하다. 본 연구에서는 수치해석 모델을 통한 엔드밀링의 chatter 안정성을 예측하는 연구를 제안한다.

## 2. 절삭력 수치해석 모델

절삭력은 비절삭 칩의 면적과 끝부분의 접촉 길이의 함수로써 나타낼 수 있다.  $j$ 번째 미소 절삭 끝날 부분에 작용하는 서로 다른 접선방향( $dF_t$ ), 반경방향( $dF_r$ ), 축방향( $dF_a$ )은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dF_{ij}(\theta, z) &= [K_{ic} + K_{ic}h_j(\theta, z)]dz \\ dF_{rj}(\theta, z) &= [K_{rc} + K_{rc}h_j(\theta, z)]dz \\ dF_{aj}(\theta, z) &= [K_{ac} + K_{ac}h_j(\theta, z)]dz \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

- $h_j(\varphi, z)$ : Uncut Chip thickness
- $dz$ : the differential length in cutter axis
- $f_j$ : the Feed rate for  $j$ th tooth
- $K$ 's: Cutting coefficients for each tooth
- $\theta$ : the immersion (or tool rotation) angle

비절삭 칩 두께는 다음과 같이 정의될 수 있으며,

$$h(\theta_j, z) = f_z \sin\theta_j(z) \quad (2)$$

축 방향  $z$ 에서 서로 다른  $j$ 번의 절입비는 다음과 같다.

$$\theta_j(z) = \theta + \sum_{n=1}^{j-1} \theta_{pn} - k_{iz} \quad (0 < j < N)$$

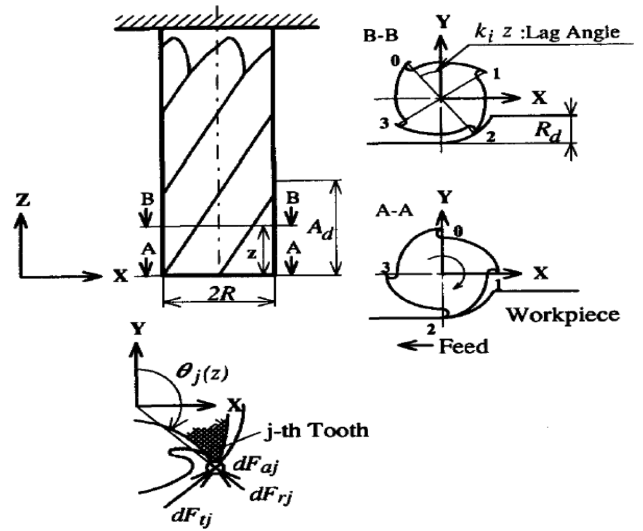


Fig. 1. The geometry of milling process [2].

$$k_{iz} = \frac{z \tan(\beta_i)}{D/2} \quad (3)$$

여기서,  $k_{iz}$ 는 축 방향 깊이  $z=0$ 에서 절삭날  $j$ 의 헬릭스 뒤짐각이다.  $\theta$ 는 첫번째 날각 위치이고,  $\theta_{pn}$ 는 각 날 사이의 피치 각이다. 절삭날  $n$ 의 Feed rate는 다음과 같다.

$$f_j = \frac{Nf_i\theta_{pn}}{2\pi} \quad (4)$$

여기서,  $N/f$  [mm/rev]는 스피들 1회전에서의 절삭날 전체의 선형 이동이다. 식(2)와 식(3), 식(4)를 식(1)에 대입하면 절삭력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dF_{ij}(\theta, z) &= [K_{ic} + K_{ic}f_j \sin\theta_j(z)]dz \\ dF_{rj}(\theta, z) &= [K_{rc} + K_{rc}f_j \sin\theta_j(z)]dz \\ dF_{aj}(\theta, z) &= [K_{ac} + K_{ac}f_j \sin\theta_j(z)]dz \end{aligned} \quad (5)$$

$j$ 번째 미소 절삭 끝날 부분에 작용하는 서로 다른 절삭력은 (피드방향( $dF_x$ ), 법선방향( $dF_y$ ), 축 방향( $dF_z$ )) 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dF_{xj}(\theta, z) &= [-dF_{ij}(\theta, z)\cos\theta_j(z) - dF_{rj}(\theta, z)\sin\theta_j(z)]dz \\ dF_{yj}(\theta, z) &= [dF_{ij}(\theta, z)\sin\theta_j(z) - dF_{rj}(\theta, z)\cos\theta_j(z)]dz \\ dF_{zj}(\theta, z) &= -dF_{aj}(\theta, z)dz \end{aligned} \quad (6)$$

이를 통해 축 방향 힘을 제외한 나머지 힘을 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_t &= K_{ic}bf_j \sin\theta + K_{ic}b \\ F_r &= K_{rc}bf_j \sin\theta + K_{rc}b \\ F_x &= -F_t \cos\theta - F_r \sin\theta \\ F_y &= F_t \sin\theta - F_r \cos\theta \end{aligned} \quad (7)$$

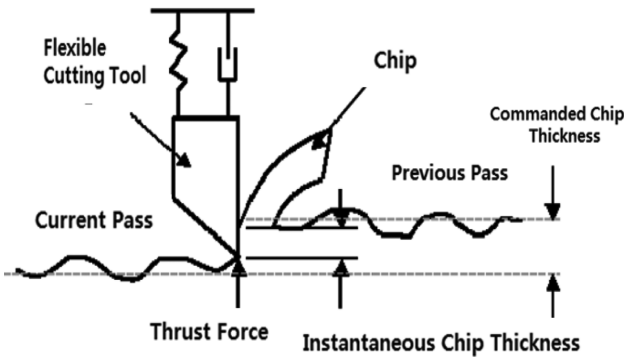


Fig. 2. Chip thickness variation due to cutter vibrations [4].

### 3. 시간영역 모델

시간 영역 시뮬레이션은 이산적인 단계에서 오일러 적분을 사용하여 시간에 따라 진행한다. 각 단계에서 커터는 작은 각도인,  $d\theta$ 만큼 회전한다. 절삭날은 반경방향 절삭비에 의해 미리 언급된 각도 범위 이내에 있다. 칩 두께  $h$ 는 절삭 형상 및 현재 시스템의 진동에 따라 결정된다.  $h$ 가 0보다 큰 값을 갖는 경우, 절삭력은 식에 기재된 힘 모델을 이용하여 계산된다.  $h$ 가 0와 그 이하의 값을 가지는 경우, 절삭력은 0으로 설정된다.

절삭력 시뮬레이션은 Modal 매개 변수, 공구 형상, 가공 사양의 입력을 필요로 한다. Modal 매개 변수는  $x$  및  $y$  방향의 각 도구 모드의 강성, 감쇠와 고유 진동수를 포함한다. 공구 형상은 헬릭스각, 피치각, 엔드밀 직경, 가공 편차를 포함한다. 가공 사양은 시작 및 종료 각도, 스핀들 속도, 절삭 축 깊이와 feed/tooth이다. 부등 피치 공구의 feed/tooth( $f_i$ )는 Tooth-Tooth 각도( $\theta_{pn}$ ) (deg), 절삭날 당 평균 feed(ft(m/tooth)), 절삭날수( $N$ )의 함수이다.

$$f_i = \frac{Nf\theta_{pn}}{2\pi} \quad (8)$$

안정성은 스핀들 속도와 축 방향의 깊이의 조합과 절삭 범위의 힘인 Peak to Peak Force(PTP)값을 플롯하여 결정된다. 절삭이 안정 영역에 있을 때, PTP 힘은 주축

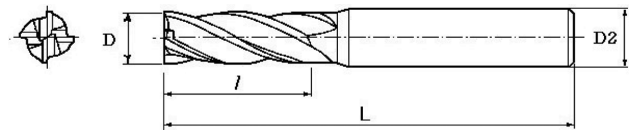


Fig. 3. Configuration of end mill for uniform pitch (TSE).

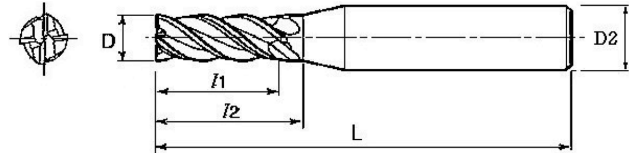


Fig. 4. Configuration of end mill for variable pitch (SED).

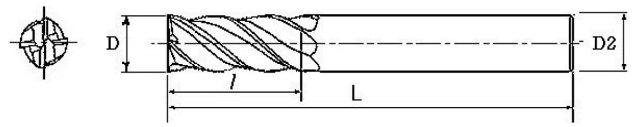


Fig. 5. Configuration of end mill for uniform pitch (VFE).

속도의 작은 변화에 변화하지 않는다. 절삭이 불안정 영역에 있을 때, PTP 힘은 주축 속도의 작은 변화에도 극적으로 변화한다. 균일 피치 공구에서 PTP 플롯은 기존의 안정 로브 개발에서 발견된 불안정 영역과 근접하게 일치하는 불안정 영역을 보여준다. chatter 안정성 선도(chatter vibration stability lobes diagram)은 프로세스 매개변수, 공구 형상, 절삭 매개 변수와 시스템 역학의 함수이다.

### 4. 실험 방법 및 실험

본 연구에서는 공구틀링에 따른 chatter 특성을 알아보기 위해 다음과 같이 엔드밀 공구를 TSE(등 헬릭스각, 등 피치각), SED(등 헬릭스각, 부등 피치각), VFE(부등 헬릭스각, 부등 피치각) 엔드밀로 구분하여 실험을 시행하였다.

엔드밀링 가공중 발생하는 chatter진동은 머시닝센터(Mynx400, Doosan-infracore)상에 장착된 공구동력계

Table 1  
The specifications of end mill for the experimentation

Item	TSE (Flat)	SED (Flat)	VFE (Flat)
Specification	Uniform pitch Uniform Helix	Variable pitch Uniform Helix	Variable Helix
No. of teeth	4	4	4
Helix angle	30°	45°	40°/43°
Variable pitch angle	90°	85°/95°	84°/96°
D (outside diameter)	8	8	8
Material	Solid carbide	Solid carbide	Solid carbide

Table 2  
Experimental conditions

Items	Specification
Material	AL6061-T6
Spindle speed (rpm)	2000~7000
Feed rate (mm/min)	88
Depth of cut (mm)	2.5
Cutting fluid	Dry

(Kistler9257B)로부터 측정되는 절삭력과 절삭력수치해석모델 예측값과 비교하였다. 본 해석모델과 실험에서는 알루미늄 합금의 일종인 AL6061-T6을 소재로 사용하였다. 실험에 사용된 공구사양 및 절삭조건은 Table 1과 Table 2와 같다.

5. 절삭력 수치해석 모델을 이용한 채터안정성 분석

절삭력 수치해석 모델 기반으로 채터안정성 시뮬레이션 프로그램을 작성하였으며, 이를 이용하여 엔드밀링공정에서의 절삭조건 변화에 따른 채터안정성 특성을 예측 분석하였다[7].

특히, 3종의 엔드밀 커터의 특성을 비교하기 위해 한계절삭깊이와의 상관성을 알아보기 위한 시뮬레이션과

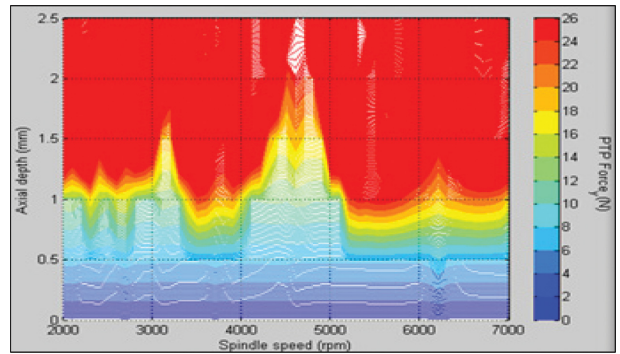


Fig. 8. The Stability lobes Diagram (VFE).

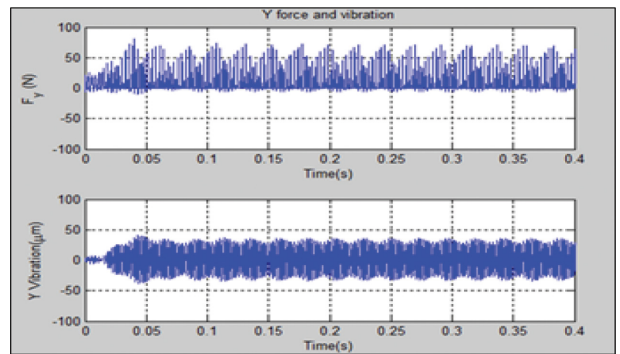


Fig. 9. The Fy, Ypos Diagram (TSE, 6700 rpm).

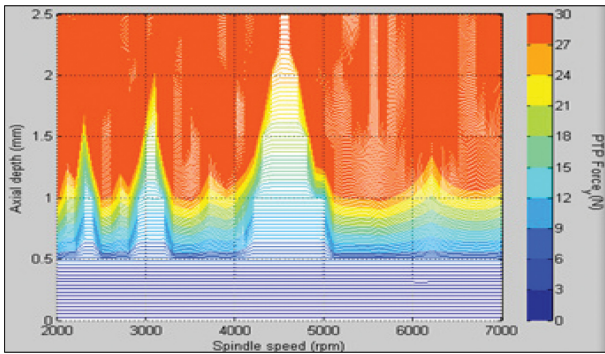


Fig. 6. The Stability lobes Diagram (TSE).

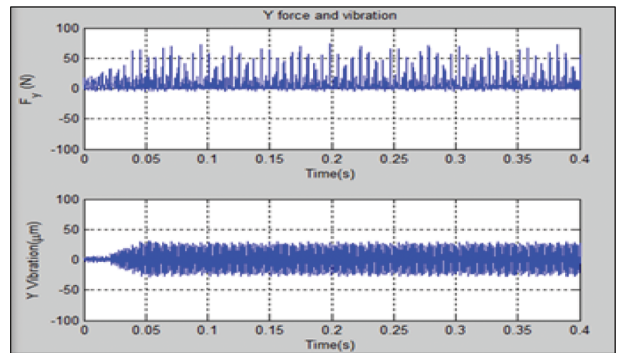


Fig. 10. The Fy, Ypos Diagram (SED, 6700 rpm).

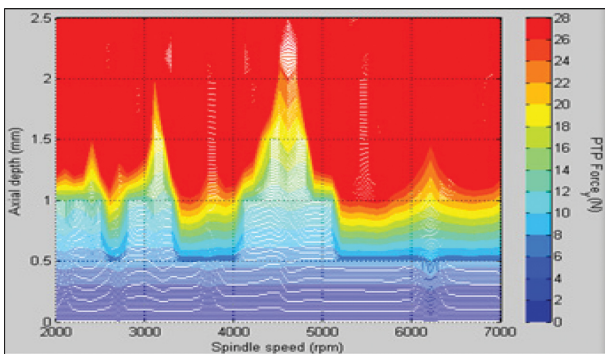


Fig. 7. The Stability lobes Diagram (SED).

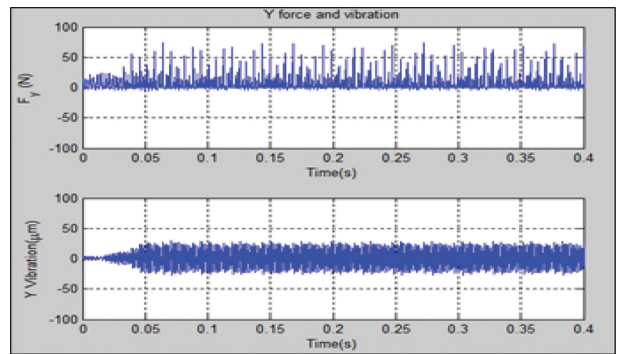


Fig. 11. The Fy, Ypos Diagram (VFE, 6700 rpm).

실험을 각각 실시하였으며, 예측결과는 PTP(최대-최소간 절삭력),  $F_y$ (이송방향 절삭력),  $Y_{pos}$ (이송방향 채터진동량)으로 도시하였다.

시뮬레이션 결과로부터 얻은 채터안정성 선도 비교결과에서는  $TSE < VFE = SED$  순으로 한계절삭영역이 넓게 나타남을 알 수 있었다. 이 결과들은 Fig. 6~Fig. 8와 같다.

또한, 절삭력 수치해석 모델을 통한  $F_y$ ,  $Y_{pos}$  비교결과 주축회전속도(6700 rpm)에서는 각각의 공구 종류  $TSE > SED = VFE$  순으로 높게 나타남을 알 수 있었다. 이 결과들은 Fig. 9~Fig. 11과 같다.

### 6. 절삭력 실험결과와의 비교

수치해석 모델의 예측값과 실험값에 대한  $F_y$ 값이 2200 rpm 일 때 93.1%, 4900 rpm 일 때 95.4%, 6700 rpm 일 때 91.7%의 일치, 평균 93.4%의 일치를 보임으로 실험값과 예측값이 정량적으로 일치했으며, 그 결과들은 Fig. 12~Fig. 14와 같다.

### 7. 결 론

본 연구에서는 수치해석모델을 이용하여 일반적으로 사용되고 있는 엔드밀의 절삭력 모델을 구현하였다. 엔

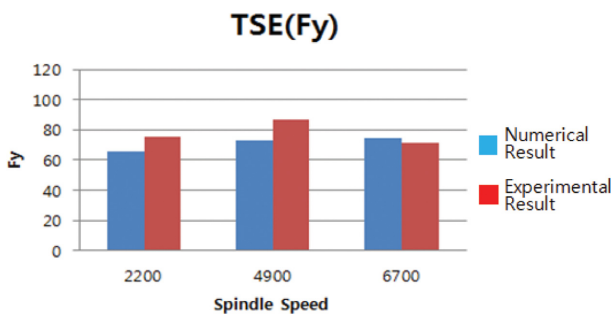


Fig. 12. The  $F_y$  vs. Spindle Speed Diagram (TSE).

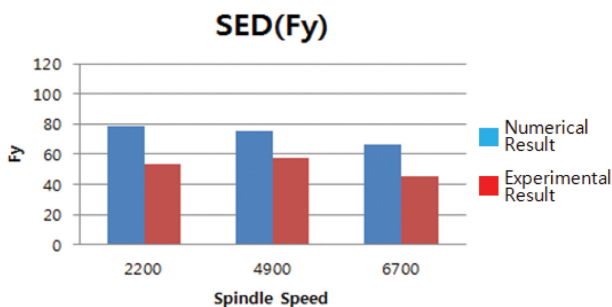


Fig. 13. The  $F_y$  vs. Spindle Speed Diagram (SED).

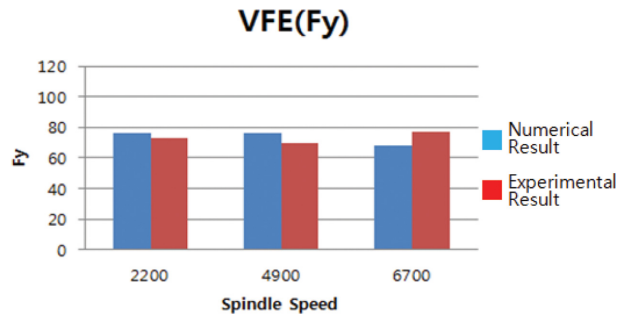


Fig. 14. The  $F_y$  vs. Spindle Speed Diagram (VFE).

드밀링용 공구 툴링 변화에 따른 채터 발생특성을 고찰하기 위해, 형상이 서로 다른 3중 엔드밀(TSE(등 헬릭스각, 등 피치각), SED(등 헬릭스각, 부등 피치각), VFE(부등 헬릭스각, 부등 피치각))의 절삭조건 변화에 따른 채터현상을 절삭력 모델을 통해 예측하였다. 이에 따른 수치해석 모델을 검증하기 위해 실험 결과와 비교하여 수치해석 모델을 검증하였다.

절삭력 수치해석 모델을 기반으로 채터안정성예측 프로그램을 작성하였으며, 절삭조건 변화에 따른 최대-최소 절삭력변화, 이송방향 절삭력, 채터진동량을 예측할 수 있도록 하였다. 절삭력예측모델로부터 예측된 값과 실험값의 비교결과, PTP  $F_y$ 경향은  $TSE > SED \geq VFE$  순으로 PTP  $F_y$ 가 높게 나타났으며, 실험값에 대한  $F_y$ 값에 비하여 2200 rpm 일 때 93.1%, 4900 rpm 일 때 95.4%, 6700 rpm 일 때 91.7%의 일치를 보임. 평균 93.4%의 일치를 보이므로 수치해석 모델이 성공적으로 구현되었음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 2014년도 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", Int. J. of Machine Tool & Manufacture 51 (2011) 34.
- [2] V. Savas and C. Ozay, "The optimization of the surface roughness in the process of tangential turn-milling using genetic algorithm", The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology 37 (2007) 335.
- [3] F.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 Int. J. of Machine Tools & Manufacture* 33 (2012) 28.
- [ 4 ] C.K. Chang and H. Lu, “Design optimization of cutting parameters for side milling operations with multiple performance characteristics”, *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology* 32 (2007) 18.
- [ 5 ] V. Savas and C. Ozay, “The optimization of the surface roughness in the process of tangential turn-milling using genetic algorithm”, *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology* 37 (2007) 335.
- [ 6 ] J. Hwang, “A study on the chatter vibration characteristics simulation for cutting tooling of turning machine tool”, *J. Korean Cryst. Growth Cryst Technol.* 24 (2014) 274.
- [ 7 ] 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 Cryst. Technol.* 23 (2013) 207.