

채터진동 검출 및 회피를 위한 가상 동적 가공시스템 구축

김혁^a, 조문호^a, 구준영^a, 이종환^b, 김정석^{c*}

Virtual Dynamic Machining System for Chatter Detection and Avoidance

H. Kim^a, M. H. Jo^a, J. Y. Koo^a, J. H. Lee^b, J. S. Kim^{c*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Republic of Korea^b Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Aviation Polytechnic, Republic of Korea^c School of Mechanical Engineering, NCRC/NSDM, Pusan National University, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	10	April	2014
Revised	3	June	2014
Accepted	10	June	2014

Keywords:

Chatter vibration
Self-excited vibration
Milling
Impact test
LabVIEW

ABSTRACT

This study presents a chatter vibration avoidance program for the milling process. Chatter vibration has a negative effect on workpieces and spindle-tools. When chatter vibration occurs, the cutting tool is loaded dynamically, a chatter pattern is generated on the workpiece, and the tool life is reduced.

The developed program is composed of various modules such as an FFT analyzer, an impact test analyzer, a chatter vibration indicator, and a spindle speed recommender. The proposed program is verified using an AISI D2 cutting experiment in milling process. The effect of chatter vibration on the machining condition can be simulated by the suggested method, and successfully exploited to avoid chatter vibration.

1. 서론

공작기계의 고속화 고정밀화에 따라 최근에는 고품위의 제품이 많이 생산되고 있다. 그러나 가공물의 품질을 떨어뜨리는 채터진동은 공작기계의 발전과는 별도로 여전히 나타나고 있는 실정이다. 여기서 발생하는 채터진동은 크게 강제진동(Forced Vibration)과 자력진동(Self excited Vibration)으로 나눌 수 있는데,^[1] 가공 공정 중 문제가 되는 것은 채터진동이라고 불리는 자력진동이다. 채터진동이 발생하게 되면 가공물의 표면에 물결무늬의 채터마크가 나타나게 되어 가공품위가 떨어지며 진동으로 인해 주축계의 부하가 증가하고 공구의 수명 감소, 파손등이 일어나게 된다. 이는 가공비용의 증가로 이어지며 생산성이 떨어지는 결과를 보인다.

따라서 채터진동을 감지할 수 있고 주축계의 동특성에 따라 채터

진동을 회피하고 안정 스핀들 속도를 제시하여 주는 모듈에 대한 연구가 필요하다. 로브선도(Lobe Diagram)는 스핀들의 회전속도 대 절삭 깊이에 대한 그래프로 채터진동에서 가장 기초적인 이론이나^[2-3] 실제 산업현장에서 적용하기엔 많은 파라미터를 필요로 하여 잘 사용되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 로브선도를 통해 안정 불안정 영역을 파악하지 않고 채터가 발생하였을 때의 채터 주파수만을 통해 안정 속도를 추천하여 채터진동을 회피하여 실제 산업에 적용할 수 있을 정도의 간략화에 중점을 주었다.^[4]

본 논문에서는 가공중 채터진동이 발생하였을 때의 신호 특성을 분석하고 채터진동을 회피할 수 있는 가공조건을 제시하여 주는 가상 동적 가공 시스템(Virtual Dynamic Machining System, VDMS)을 LabVIEW를 이용하여 개발하고자 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-3079

Fax: +82-51-518-7207

E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong Suk Kim).

2. 가상 동적 가공 시스템

가상 동적 가공 시스템의 목적은 가공중에 발생하는 chatter진동을 정확하게 파악하고 효과적으로 감소시키는 것을 목적으로 한다.

기존의 chatter진동에 관한 연구에서는 chatter진동의 실체를 파악하기 위해 수많은 변수들을 사용하였으나, 본 연구에서는 단순히 chatter진동의 파악에 주안점을 두어 상대적으로 적은 변수로 chatter진동을 검출해 낼 수 있도록 하였다.

본 모듈은 주축계의 충격 가진 실험 출력부, 가공신호의 FFT 분석기, chatter진동 발생 Indicator, 안정 스피들 속도 추천부로 절삭주파수를 검출하기 위한 인디케이터로 구성되어 있다. 입력 파라메터는 실제 가공시의 스피들 회전수만 입력하면 절삭주파수와 chatter주파수를 구분할 수 있도록 간략화하였다.

VDMS의 Front panel 은 Fig. 1에 제시하였으며, Front panel의 좌측의 그래프는 충격가진 모듈을 나타내며 우측의 그래프는 FFT 분석기를 나타내고 있다. 상단에는 chatter발생시의 안정적인 스피들 속도를 추천해주고 있으며 가장 우측에는 chatter검출 Indicator가 위치해 있다. Fig. 2는 본 프로그램의 Mechanism을 제시하였다.

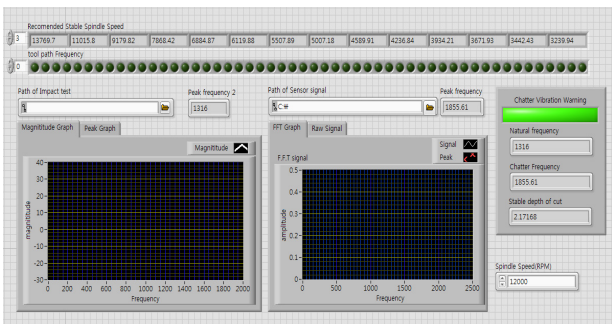


Fig. 1 Front panel of Virtual Dynamic Machining System

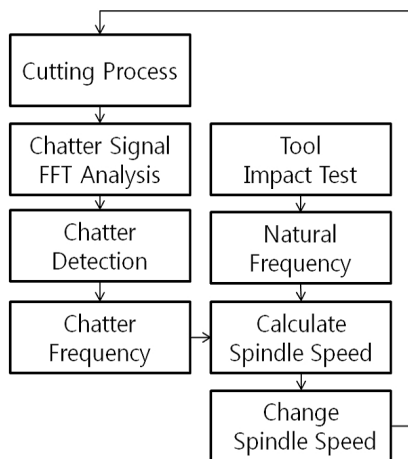


Fig. 2 Block diagram of VDMS program mechanism

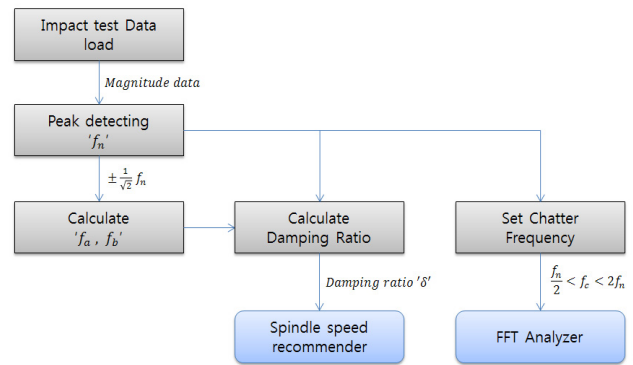


Fig. 3 Block diagram of impact hammer test

2.1 주축계의 충격 가진 실험 모듈

먼저 주축계에 동특성을 파악하기 위하여 YG-1사의 WCCarbide 공구를 공구홀더(BT40)에 설치후 스피들에 장착하였다. Impact Hammer와 가속도계를 사용하여 충격가진 실험을 하였고 응답 데이터를 획득하여 모듈에서 Load한다.

Load된 데이터의 최대피크값의 주파수를 통해 고유진동수를 획득한다. 주축계의 감쇠비는 최대피크값의 $\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 배 되는 두 지점의 주파수 값을 f_a, f_b 로 선정하였고, 감쇠비 ζ 는 0.0269로 식 (1)

$$\zeta = \frac{f_b - f_a}{2f_n} \quad (1)$$

로 계산할 수 있다. 여기서 f_n 은 고유진동수이다. 본 과정을 연산하게되는 새로이 개발된 프로그램 소스의 블록선도는 Fig. 3에 제시하였다. 측정 파일 읽기 모듈에서 Magnitude 데이터를 불러와 데이터를 2차원의 데이터배열을 1차원으로 변환시켜 각각 삼입하였다. Peak 검출기를 통해서 배열에서의 최대값을 찾아 1차모드의 고유진동수를 구할 수 있으며 식 (1)을 통해 감쇠비를 연산한다. 연산된 고유진동수는 FFT분석기로 전달되어 chatter진동 범위를 결정한다.

2.2 chatter진동의 FFT분석 및 검출 모듈

모듈의 신뢰성을 파악하기 위하여 안정적인 가공영역과 불안정한 가공영역의 데이터를 각각 모듈상에서 Load하여 데이터 분석을 실시하였다. 모듈에서 데이터를 Load하면 원신호와 FFT분석된 신호를 Front Panel에서 볼 수 있게 Tab을 통해 구분되어 있으며 기본화면은 FFT분석된 신호이다.

FFT변환된 신호의 피크점을 찾는 소스를 작성하였으며, 입력 값으로는 Threshold를 받아 원하는 진폭이상의 피크만을 찾을 수 있

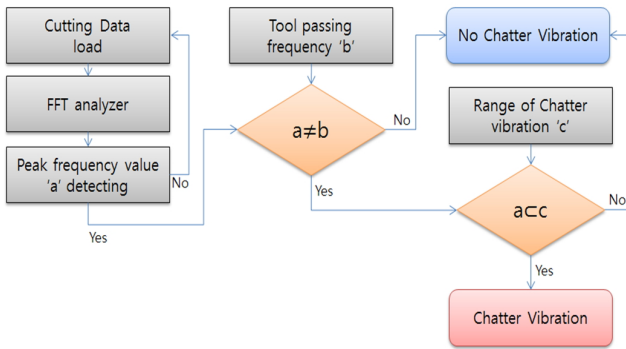


Fig. 4 Block diagram of FFT analyzer

도록 코딩되었다. 주축계의 고유진동수를 통해 채터주파수의 범위를 정하였고, 다음 식 (2)의 범위에서 채터진동이 발생하는

$$\frac{f_n}{2} < f_c < 2f_n \quad (2)$$

것으로 가정하였다. 채터진동의 주파수영역은 주축계의 고유진동수 근방에서 발생하는 것으로 알려져 있고^[5] 예비실험에서 발생한 채터진동의 발생범위를 이용하여 식 (2)로 정하였다. 또한 절삭주파수의 Harmonic 성분은 제외시키는 알고리즘으로 채터주파수를 검출하였다. 즉 주파수범위내에서 최대진폭을 가지며 절삭주파수의 Harmonic 성분이 아니며 최대진폭의 크기 역시 일정 값 이상을 가질 때의 주파수 성분을 채터 주파수로 보았다. Harmonic 성분을 구별하기 위해 가공속도역시 입력 값으로 받아서 연산을 실시한다.

본 과정을 연산하게 되는 새로이 개발된 프로그램의 블록 선도는 Fig. 4와 같다. 마이크로폰으로 얻어진 절삭신호는 각각 f_0 , df , Magnitude로 분리되어 배열에 삽입하였다. 이 중 Magnitude 신호를 Peak 검출기를 통해 최대값을 파악하며 입력된 가공속도를 통해 최대값이 절삭주파수가 아닌 영역에서 발생하는지를 비교 연산을 수행한다. 이 비교 연산 후에 충격가진 모듈에서 구해진 고유진동수의 근방에서 발생하는지를 확인하고 두 가지 조건이 모두 충족될 때 비교연산자에서 채터진동으로 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 주축계의 충격가진실험

본 연구의 채터진동 회피 프로세스는 주축계의 고유진동수를 통해 채터 진동수를 검출하는 메커니즘이기 때문에 주축계의 동특성을 파악하는 것이 우선되어야 한다. Impact Hammer는 Bruel & kjaer사의 Type 8206-002를 사용하여 가진하였고 가속도계는 Bruel & Kjaer사의 Type 4384를 이용하여 응답신호를 얻었다.

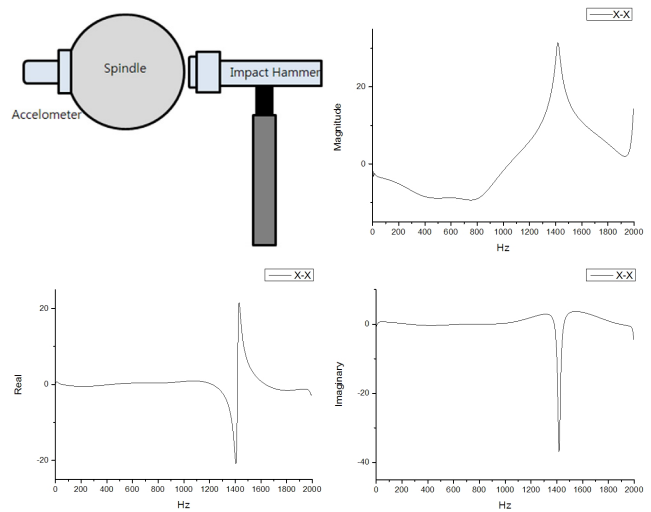


Fig. 5 Result of spindle-tool impact hammer test

충격 가진 실험의 경우 실험자의 숙련도가 결과에 많은 영향을 미치므로 Coherence 함수의 신뢰도가 있는 실험에서의 데이터만 사용하여 10회 평균값 연산을 통해 주파수 응답을 구하였다. 실험장치의 개략도와 주파수응답함수의 결과 데이터는 Fig. 5에서 나타내었고, 충격가진 모듈에서 데이터를 받아와 Magnitude의 Peak 값을 연산한 주축계의 고유진동수는 1,384 Hz로 파악되었다.

3.2 절삭 실험

본 실험은 MAKINO V55 3-Axis Machining Center에서 수행되었고, 절삭시의 신호는 가속도계와 거의 유사한 데이터 획득이

Table 1 Machining conditions

Workpiece	AISI D2
Spindle Speed	4,000 RPM 6,000 RPM
Feed Rate	120 mm/rev
Feed for tooth	0.02 mm/tooth
Depth of cut	1.1 mm 1.2 mm 1.3 mm 1.4 mm 1.5 mm 1.6 mm
Cutting type	Slotting
Tool	6Φ 2teeth Flat End-mill

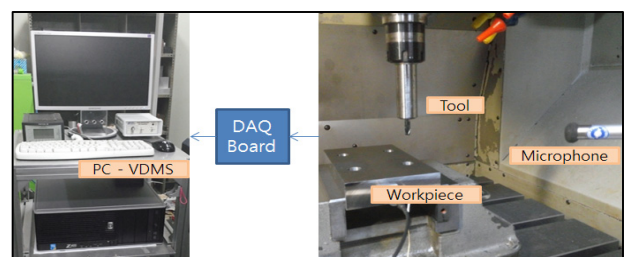


Fig. 6 Experimental configurations

가능하며, 사용 및 신호측정의 편의를 위해 마이크론(Bruel & Kjaer, Type 4189)을 사용하여 데이터를 획득하였고 센서와 가공이 일어나는 지점간의 거리는 300 mm정도를 유지하였다.

신호측정은 Sampling Rate 20 KHz로 설정하여 음향신호를 측정하였고, DAQ Board를 통해 PC로 전송받았다. 가공은 절삭유를 사용하지 않는 건식절삭을 수행하였다. 소재는 150 mm × 90 mm × 20 mm크기의 Bulk형태로 세장비가 낮아 소재 자체의 진동은 발생하지 않도록 바이스에 장착을 하였고, 공구길이는 대략 25 mm로 장착하여 주축계의 채터진동이 발생하도록 장비를 설치하였다. 본 실험의 절삭조건은 Table 1에 나타내었고 Fig. 6은 실험에 사용된 장비의 구성을 보여주고 있다.

4. 실험 결과

4.1 채터진동 검출 실험

절삭실험결과 제시한 실험조건중 스핀들 회전속도 4,000 RPM 일 때 절삭깊이 1.6 mm까지 안정적인 절삭을 보였고, Raw 신호를 FFT 분석한 결과 최대 진폭을 가지는 주파수는 133 Hz의 절삭주파수임을 알 수 있었다.

스핀들 회전속도 6,000 RPM일 때 절삭깊이 1.2 mm부터 1.6 mm까지 모두 채터진동이 발생하였다. 각각의 절삭깊이에서 채터 주파수는 1,573 Hz~1,578 Hz 범위에서 나타났으며, 스핀들 회전속도 6,000 RPM 절삭깊이 1.2 mm에서 검출된 채터주파수는 1,574 Hz이다. FFT 분석 결과는 안정가공과 불안정가공의 특성이 가장 잘 나타나는 각 스핀들속도에서 절삭깊이 1.1 mm와 1.2 mm 조건만을 제시하였으며, Fig. 7~Fig. 10에 나타내었다.

스핀들 회전속도 6,000 RPM 절삭깊이 1.1 mm에서는 채터진동이 발생하지 않았으나 절삭깊이 1.2 mm에서 채터진동이 발생하였기 때문에, 스핀들 회전속도 6,000 RPM은 안정선도상의 로브의 최저점 근방으로 예상할 수 있다.

Fig. 7은 스핀들 회전속도 4,000 RPM 절삭깊이 1.1 mm 조건의 분석결과는 나타내며 최대주파수값은 133 Hz를 나타내고 있고 진폭은 0.18정도이다. Fig. 8은 스핀들 회전속도 4,000 RPM 절삭깊이 1.2 mm 조건의 분석결과를 나타내며 진폭은 0.13정도이고 최대주파수값은 133 Hz로 앞선 조건과 일치한다. Fig. 9는 스핀들 회전속도 6,000 RPM 절삭깊이 1.1 mm 조건의 분석결과이며 최대주파수값은 200 Hz이고 진폭은 대략 0.16이다. Fig. 7~Fig. 9에서 채터진동이 발생하지 않을 경우에는 인디케이터에 OFF가 표시되며 채터주파수는 표시되지 않는다. 진폭은 0.15 근방의 범위에 분포하며, 0.1 mm 수준의 절삭깊이 증가는 진폭에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. Fig. 10에서 제시된 스핀들 회전속도 6,000 RPM 절삭깊이 1.2 mm 조건에서는 채터진동이 발생하였고 인디

케이터에 ON이 표시되며 검출된 채터주파수인 1,574 Hz가 표시된다. 진폭은 대략 0.3이며 채터진동이 발생하지 않을 때보다 세 배정도 증가하였다. 이때의 가공표면은 다음 Fig. 11(a)와 같이 매우 불규칙적인 파형을 관찰할 수 있었고 따라서 프로그램상에서 제시한 검출방법을 신뢰할 수 있다고 판단된다.

4.2 채터진동 회피 실험

본 논문에서 추천하는 안정스핀들 회전속도 N 는 다음의 식 (3)을 사용한다.^[4,6]

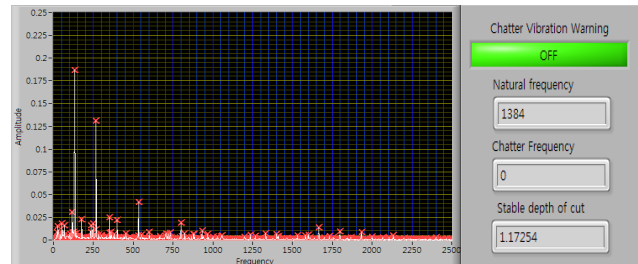
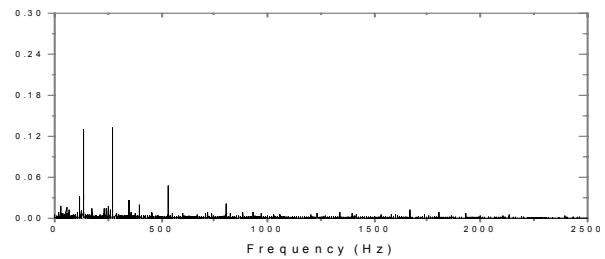


Fig. 7 FFT analyzed graph
(Depth of Cut 1.1 mm, Spindle Speed 4,000 RPM)

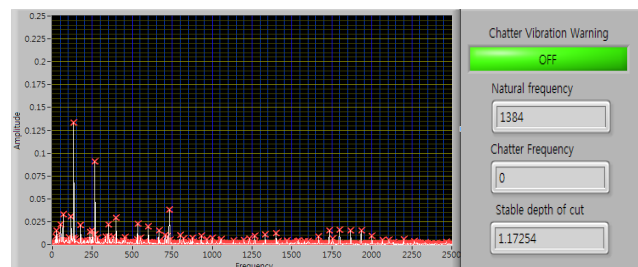
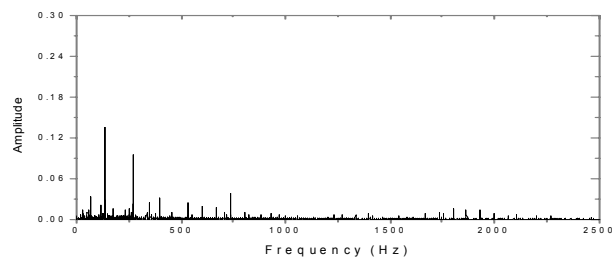


Fig. 8 FFT analyzed graph
(Depth of Cut 1.2 mm, Spindle Speed 4,000 RPM)

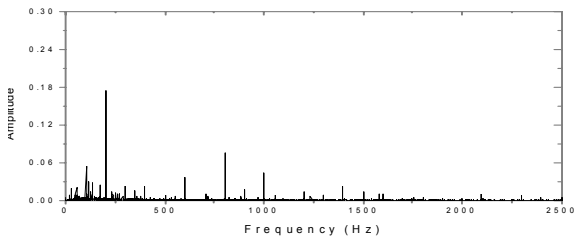


Fig. 9 FFT analyzed graph
(Depth of Cut 1.1 mm, Spindle Speed 6,000 RPM)

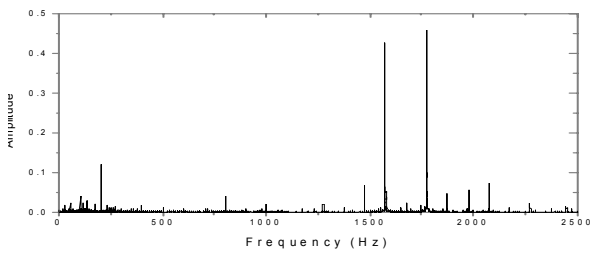


Fig. 10 FFT analyzed graph
(Depth of Cut 1.2 mm, Spindle Speed 6,000 RPM)

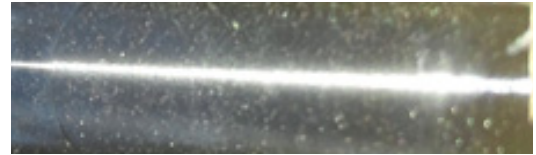
$$N = \frac{60f_c}{Zk(1+\zeta)} \quad (3)$$

위 식에서 k 는 로브 넘버이며, Z 공구 날수, ζ 감쇠비, f_c 채터주파수이다. 6,000 RPM과 가장 가까운 안정적인 로브는 7번째 로브이며, 그때의 스피들 회전속도는 6,571 RPM이다.

연산모듈에 의해 제시된 회전속도 6,571 RPM으로 가공하였을 때 안정적인 가공이 가능하였고, 가공표면은 Fig. 11(b)에서 보이는 바와 같이 채터진동에 의한 채터마크가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.



(a) With chatter vibration
(depth of cut 1.2 mm, spindle speed 6,000 RPM)



(b) Without chatter vibration
(depth of cut 1.2 mm, spindle speed 6,571 RPM)

Fig. 11 Workpiece surface profile

5. 결론

본 논문에서는 가공중 채터진동 회피가 가능한 가상 동적 가공 시스템을 제안하였다. 개발된 프로그램은 충격가진실험 데이터를 이용해 고유진동수 및 감쇠비를 연산하여, 가공데이터를 분석하여 채터진동이 발생유무를 판별할 수 있게 작성하였다. 또한 채터가 발생할때의 주파수를 통해 안정가공속도를 연산할 수 있도록 작성하였다.

공작기계 주축계의 고유진동수를 파악하기위해 충격 가진 실험을 하였으며, 고유진동수와 주축계의 감쇠비를 프로그램상에서 자동으로 계산해 내었고 그때의 고유진동수는 1,384 Hz 감쇠비는 0.0269임을 확인하였다.

채터발생시의 신호를 획득하기위하여 AISI D2 소재를 가공하였으며, 스피들 회전속도 6,000 RPM 절삭깊이 1.2 mm에서 채터진동이 발생함을 확인하였다. 이 때 발생한 채터주파수를 통해 구한 안정적인 가공이 가능한 스피들 회전속도는 6,571 RPM이었으며, 이 스피들 회전속도로 가공실험 한 결과 채터진동이 발생하지 않았으며, 양호한 가공 표면이 얻어졌다.

따라서 본 프로그램을 활용하여 소재의 가공조건을 선정한다면 채터진동을 회피하는 가공이 가능하게 된다.

후기

이 논문은 (주)두산인프라코어의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Tlustý, J., Ismail, F., 1981, Basic non-linearity in machining chatter, *Annals of CIRP* 30:1 299-304.
- [2] Merritt, H. E., 1965, Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, *Annals of CIRP* 44:1 357-362.
- [3] Jianping, Y., 2006, Creating a Stability Lobe Diagram, *IJME Session IT* 301-050.
- [4] Norikazu, S., Eiji, S., Hiroshi, U., 1984, Vibration Suppressing Method And Vibration Suppressing Device for Machine Tool, *US* 2010/0104388 A1.
- [5] Ewins, D. J., 2000, *Modal testing theory practice and application*, Research studies press, United Kingdom
- [6] Hiromitsu, M., Toru, Y., 2012, Tracing and Visualizing Variation of Chatter for in-Process Identification of Preferred Spindle Speeds, *3rd CIRP on PMI* 11-16.