고속 가공을 위한 채터 안정성 평가에서의 정확도 향상에 관한 연구

Study on Improvement of Accuracy for Evaluation of Chatter Stability in High-Speed Machining

이강재 [1], M. A. Donmez[2], 양민양 [3], 장한기 [1]

*K. J. Lee (kangjae.lee@doosan.com)[1], M. A. Donmez[2], M. Y. Yang[3], H. K. Jang[1]

[1] 두산인프라코어 기술원, [2] 미국 표준 · 기술 연구소 (NIST), [3] 한국과학기술원 기계공학과

Key words : chatter stability, stability lobes, tool-holder-spindle dynamics, in-situ measurement, RCSA

1. 서론

밀링 공정에서 생산성 및 가공 품위 향상을 위해 가공 안정성 확보가 요구된다. 특히 항공기 부품과 같이 깊은 포켓 가공(honeycomb pocket machining)이 요구되는 고속 가공인 경우 기계에 허용된 최대 스핀들 속도 내에서 최대 안정 속도가 설정되어야 하며 이 때 결정되는 최대 절삭 깊이 역시 정량적으로 평가되어야 한다.

밀링 머신에서의 채터 특성은 구조적으로 가장 낮은 강성 (most flexible)을 보이는 공구-홀더-스핀들 계에서의 동특성에 크게 영향을 받는다. 따라서 공구-홀더-스핀들 계 동특성을 가공 위치인 공구 팁에서의 해머 가진 시험을 통한 주파수 응답함수 (FRF)로써 획득하며 공구 및 공작물의 정보와 획득된 FRF 를 입력 인자로 밀링 공정을 시뮬레이션 하여 스핀들 회전 속도와 축방향 절삭 깊이로써 가공 안정 영역을 나타내는 가공 안정성 선도를 구하게 된다.

하지만 이러한 해석에 필요한 해머 가진 및 데이터 처리에는 능숙한 전문가의 섬세한 기술이 요구된다. 정확한 FRF 획득을 위해서는 공구 팁에서 단일 가진, 공구 축에의 수직 가진, 가진 점의 반복 등이 이루어져야 하는데 작업자의 수동 가진 (manual impact)으로는 구현이 매우 어려우며 특히 고속 가공에서 많이 적용되는 얇고 긴 공구의 경우 거의 불가능하여 매우 많은 시간이 소요된다. 이러한 해머 가진 시험의 비 신뢰성은 FRF 측정 내 불확실성의 주요인 되며 이를 바탕으로 생성된 안정성 선도의 신뢰성 문제는 생산 분야에서의 넓은 적용을 막아왔다. 안정성 선도의 정확성을 저하시키는 또 다른 원인은 밀링 공정 중 공구의 변화, 공구-홀더-스핀들 계의 체결 조건의 변화 등에서 기인한 동특성 변동이다. 즉, 공정 중 필요 시점에 동특성을 재 측정하여 가공 안정성 선도를 업데이트 해야 하는데 위와 같이 측정 공정의 신뢰성 및 편의성이 보장되지 않으면 더욱 적용성 제한이 발생된다.

본 논문에서는 이러한 문제로부터 비롯된 기존의 대안적인 연구들에 대해 분석하고 정확한 가공 안정성 확보를 위한 방안으로 In-situ 측정 시스템을 소개한다. 마지막으로 적용성 극대화를 위한 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

2. 채터 예측을 위한 대안적인 연구

대안적인 연구는 기존 해머 가진 시험을 동반한 채터 예측 해석방법의 낮은 적용성을 해결하는 목적으로 진행되었으며 대표적인 방법은 크게 전처리 접근과 실시간 접근으로 구분될 수 있다.

2.1 전처리 측정 방법

해머 가진 시험에서 야기되는 문제를 피하기 위해 안정된 속도 평가 장비 (Rapid speed device)의 연구가 진행되었다. 비접촉 자기장 가진에 의해 해머 가진 없이 공구 팁 응답을 측정하였다. 정지 상태의 스핀들을 허용 최대 속도까지 연속적으로 증가시켜 (Ramping) 전 rpm 영역에 대한 동특성 응답을 빠른 시간 내에 확인하였다. 반면 가진 힘은 측정되지 않으므로 FRF 를 획득할 수 없어 안정 속도만을 제공하는 정성적인 안정성 선도만을 구하게 된다. 또한 비철 및 비금속 공구에는 자기장 가진이 불가능하여 적용 범위가 제한된다.

2.2 전처리 예측 방법

Receptance Coupling Substructure Analysis (RCSA)가 대표적인 전처리 예측 방법이다. 구조를 공정 중 동특성 변경이 예상되는 공구-홀더 요소와 상대적으로 일정한 스핀들 요소로 나눠 유한 요소 (FEM) 혹은 해석적인 방법으로 각 요소의 동특성을 예측하고 기초 가진 시험과의 상호관련 (Correlation)을 통해 연결 동특성 계수를 획득하였다. 획득된 스핀들 동특성 및 연결 계수와 FEM 에 의하여 획득되는 공구-홀더에서의 동특성으로부터 공정에 따라 변경되는 FRF 및 가공 안정성을 예측하였다. 공구-홀더의 변경 시 추가 가진 시험 없이도 FRF 획득이 가능하며 공구 튜닝 (Tool tuning)에 의해 가공 안정 영역을 향상 시키고자 하였다. 다만 기초 가진 시험을 피할 수 없으며 RCSA 의 모델 정확도가 FRF 의 정확도에 영향을 미친다.

2.3 실시간 평가 방법

크게 가공 중 외부에서 측정된 신호를 처리하는 방법과 공구에 내재된 (Embedded) 무선 가속도계를 통해 동특성을 획득하는 방법으로 구분된다. 측정된 시간 영역 가공 신호 및 주파수 영역에서의 에너지 스펙트럼으로 채터 발생을 감지하거나 공구에 장착된 무선 가속도계에서 측정된 가속도로부터 가공 안정성을 평가한다. 가진 시험 없이 가공 상태를 실시간으로 평가하는 장점이 있으나 가공 안정 영역을 선행적으로 제안하기 어려우며 정확한 정량적인 안정성 선도 획득 역시 어렵다. 또한 가속도계 장착 공구의 경우, 부가적인 질량으로 인해 회전 시 공구에 편심 현상이 발생할 수 있다.

2.4 적용성을 위한 정확도 향상

채터 예측 해석에 관한 여러 방법에서의 낮은 적용성은 획득된 공구-홀더-스핀들 계 동특성 (FRF)의 낮은 신뢰성에서 비롯되므로 본 논문에서는 동특성 획득 및 그에 따른 가공 안정성 평가의 정확도 향상에 관한 연구 내용 중심으로 기술한다.

3. In-situ 측정을 통한 안정성 평가의 정확도 향상

정량적인 안정성 선도를 구하는 가장 직접적인 방법은 공구-홀더-스핀들 계의 FRF 를 측정하는 것이다. 또한 그림 1 과 같이 공정 중 변동하는 안정성에도 대처해야 하므로 본 연구에서는 피할 수 없는 FRF 측정 공정에서의 불확실성 최소화로 신뢰성을 높이기 위하여 In-situ 측정 시스템을 고안하였다. 측정 시스템은 크게 자동 가진 모듈, 측정 모듈, 인터페이스 모듈로 구성된다.

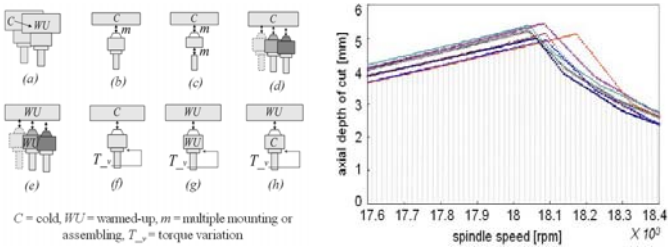

Fig. 1 Factors for FRF Changes and Variation of Stability Lobes

3.1 설계 및 기능적 요구사항

기존 해머 가진 측정 공정의 낮은 적용성을 야기시키는 문제점을 해결하기 위해 설계 시 요구사항을 고려하였다.

- **신뢰성:** 측정 시스템은 정확한 FRF 획득으로 작업자에게 높은 신뢰성의 가공 안정 영역을 제공.
- **작업자 친화성**: 간단, 민첩하며 측정오차가 없어 전문가적 식견으로 측정값을 선별해야 하는 불편이 없어야 함.
- **유연성**: 공구의 다양한 재료 및 형상에 관계 없이 정확한 가진 및 측정이 이루어져야 함.

또한 이러한 설계적 요구사항을 구현하기 위한 기능적 요구사항은 다음과 같다.

- **올바른 가진**: 단일 가진, 공구의 x- 혹은 y- 축에 수직 가진, 공구 팁 동일 위치에 반복적 가진.
- **정확한 측정**: 부가 질량 영향을 피하기 위한 비접촉 센서, 예상되는 공구의 최대 및 최소 변위량에 따른 측정 범위와 분해능을 결정.
- **유연한 측정**: 다양한 공구에 따른 최적측정거리유지 위한 이동성, 다양한 공구표면에 대한 정확한 측정 민감도 확보.

3.2 In-situ 측정 시스템의 개발

- **자동 가진 모듈:** 공구 축에 수직이며 동일 위치 가진을 위해 4 절 링크 메커니즘이 가진부에 적용되었다. 가진 후 빠른 후퇴를 위해 역진자 (inverted pendulum) 모션이 가능하게 하였다. 관심 모드를 포함하는 주파수 영역까지 에너지를 전달하고 가진 부의 속도 조절이 용이하도록 가변 전력의 솔레노이드로써 4 절 링크의 가진부를 구동하였다. 다른 동특성을 갖는 다양한 공구에 대해 단일 가진을 구현하기 위해서는 강성 조정에 위한 가진부의 속도 조절이 요구되며 변경 가능한 가진 팁과 후퇴 (Retracting) 스프링 장치를 적용하였다. 후퇴 스프링 장치를 포함한 가진부는 다음과 같은 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 표현되며 가변 스프링 장치를 통한 강성 조정으로 가진부 후퇴 속도를 제어할 수 있어 단일 가진을 보장하였다.
- **측정 모듈**: 경제적인 비접촉 측정을 구현하기 위해 필요 측정 범위와 분해능에 요구에 맞는 광섬유 센서를 선택하였다. 20kH 까지 측정이 가능하며 0.4 μm 의 분해능으로 200 μm 변위 범위를 측정할 수 있다. 센서는 1 축 선형 스테이지 위에 장착되어 다양한 지름의 공구 측정에 적용될 수 있으며 항상 측정 공구 면에 수직으로 정렬된다. 측정 신호로부터 다양한 공구의 변위를 평가하기 위해 공구 표면 재질 및 상태에 따라 민감도 보상을 진행하여 측정하였다.
- **인터페이스 모듈**: 가진 공정 및 측정 공정의 편의성을 위해 DAQ 와 디지털 시퀀스 로직회로를 적용한 인터페이스 모듈을 그림 2 와 같이 구성하였다. 타이머와 릴레이를 통하여 가진에 의한 측정 및 FRF 획득이 자동으로 이루어지게 하였다. 이 측정 시스템의 prototype 에는 NI DAQ 와 CutPro 가 적용되었다.

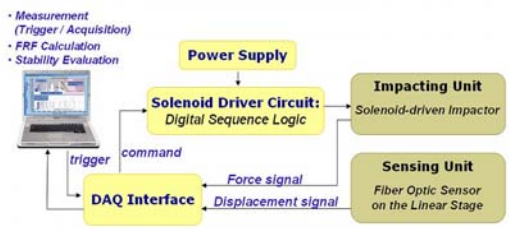

Fig. 2 Schematic Diagram of Interface Module

4. 결론: 결과 및 향후 연구 방향

4.1 정확한 FRF 획득: 가진 시험

기존의 해머 가진 시험에서는 단일 가진, 공구 축에 대한 수직 가진, 동일 위치의 반복적 가진 구현이 어려워 Coherence 가 높은 값만을 선별하여 FRF 평균을 취하기 위해 수많은 가진 시험을 수행하는데 그림 3 에 의하면 1 회, 3 회 평균값, 5 회 평균값이 모두 일치하는 것을 알 수 있어 한 번의 가진 시험으로 정확한 FRF 획득이 가능함을 확인하였다.

4.2 정확한 가공 안정성 획득: 절삭 시험

안정성 선도의 정확성 검증을 위해 표 1 과 같은 조건의 절삭 시험을 수행하였다. 그림 4 는 안정성 선도에 따른 절삭 조건의 채터 발생 결과 유·무를 보이고 있다. 기존의 해머 가진 시험 (FRF 의 평균값)으로 추천된 가공 안정 조건은 실제 가공 시험에서 불안정한 결과를 보이고 있는 반면 In-situ 측정 시스템의 가진 시험으로 추천된 가공 안정 조건의 정확성은 절삭 시험을 통해 확인되었다. 가공 안정성 선도의 안정 조건과 실제 가공 조건과의 차는 In-situ 측정 시스템 적용으로 인하여 23.3 % (0.7 mm)에서 3.6 % (0.1 mm)로 크게 감소하여 채터 안정성 평가의 정확도가 매우 향상 되었음이 검증되었다.

Table 1 Main Cutting Conditions for Verification of Stability Lobes

Machine Tool and Cutter
Max. Speed: 30,000 rpm Cylindrical Carbide End with 2 Flutes
Workpiece
Aluminum AL 7075-T6
Cutting Conditions
Down-milling, 50 % Radial Immersion

4.3 향후 연구 방향

본 연구에서는 채터 안정성 평가의 정확도를 향상하기 위해 In-situ 측정 시스템을 적용하였다. 본 시스템을 통하여 공구-홀더-스핀들 계의 FRF 를 측정 및 정량적인 안정성 선도에서의 높은 정확도 향상이 가능하므로 기존 해머 가진 시험 공정의 문제점을 최소화 시켜줄 것으로 기대한다. 고속 가공을 통한 생산성은 궁극적으로 1) “가공 안정성의 정확한 평가”와 2) “안정성 영역의 향상”을 통해 극대화가 가능하므로 In-situ 측정 시스템을 통한 측정 공정의 신뢰성 확보와 RCSA (공구 튜닝)를 통한 동특성 향상의 협력적인 (Hybrid) 연구가 이루어 져야 할 것으로 보인다.

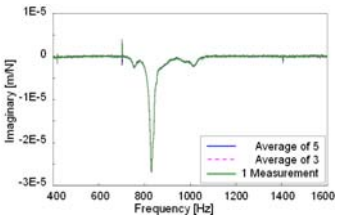

Fig. 3 Accuracy in FRFs

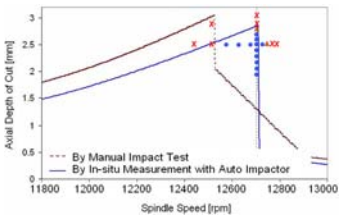

Fig. 4 Verification of Stability Lobes by In-situ Measurement

후기

본 논문은 NIST 의 Smart Machining Systems 과제와 두산인프라코어-한국과학기술원의 BK 21 산학과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. Schmitz, T. L., Davies, M. A., Medicus, K., Snyder, J., 2001, Improving High-speed Machining Material Removal Rates by Rapid Dynamic Analysis, Annals of the CIRP, 50.1: 263-268
2. Altintas, Y., 2000, Manufacturing Automation, Cambridge University Press, UK
3. Duncan, G., M. H., Schmitz, T. L., Snyder, J., 2006, Uncertainty Propagation for Selected Analytical Milling Stability Limit Analyses, Transactions of NAMRI/SME, 34: 17-24
4. Lee, K. J., Donmez, M. A., 2007, Repeatability Analysis on the tool point dynamics for Investigation on uncertainty in milling stability, IMECE-43480