

가속도 신호를 이용한 고속가공기용 공구상태 감시시스템 개발

Development of Tool Condition Monitoring System based on Acceleration Signal in High Speed Machining

*고정환, #남성호, 강은구, 이석우, 최현종

*J. H. Ko, #S. H. Nam(goddad@kitech.re.kr), E. G. Kang, S. W. Lee, H. Z. Choi

한국생산기술연구원 e가공공정팀

Key words : high speed machining, acceleration signal, tool condition monitoring, tool wear

1. 서론

고속 가공(High-Speed Machining)은 지난 수년 동안 가장 발전된 가공 시스템으로 기대되어 왔으며, 실제 산업현장에서는 정밀 금형 가공용으로 많이 사용되고 있다. 고속 가공이 일반 밀링 가공과 마찬가지로 보편화 되면서, 고속 가공에 적용되는 공구상태 감시 시스템에 대한 연구 또한 활발히 진행 되고 있다.^[1,2]

고속 가공은 공작 기계, 소재, 회전속도, 절삭깊이, 이송속도와 같은 가공조건에 따라 가공특성이 다양하게 변화한다. 과절삭 가공조건이나 가공조건 급격한 변화는 불안정한 가공을 초래하고 또한 가공 조건이 매우 다양하기 때문에 불안정한 가공을 예방하기 위해서 필요 이상으로 낮은 절삭속도를 적용하여 생산성이 떨어지는 문제가 있다. 현장에서는 이를 보완하기 위하여 작업자가 가공 상황에 따라 수시로 이송속도 오버라이드를 수동 조절하여 주축 부하를 조절하기도 한다.^[3]

따라서, 절삭가공 분야에서는 다양한 가공조건 및 외부환경에 따라 공구마모를 검출하는데 초점이 모아지고 있다. 공구마모 감시를 위해 가속도, AE, 주축전류 등 다양한 센서기반의 가공상태 모니터링 및 주축/이송계 고장감지에 대한 연구가 진행되고 있으며, 신호처리 알고리즘 개선 또는 퍼지 등을 통한 이상감지 패턴 규명, 실시간 피드백에 의한 이송속도 제어 등에 대한 시도가 이루어지고 있다. 이러한 연구를 바탕으로 주축부하 등 가공특성을 실시간 감지하여 이송속도 등의 가공조건을 실시간 제어하는 연구가 진행되었고, 실제로 일부 상용화되어 가공현장에 적용되고 있다.^[2,3]

일반적으로 공작기계의 상태감시에 주로 적용되는 방법으로는 주축 전류 측정을 통한 부하 감시나, AE 센서를 이용한 공구 파손 검출 등이 있다. 그러나 고속가공에서는 주축/이송계 고속운동으로 기인한 보다 복잡하고 다양한 요인에 지배되기 때문에 일반 선삭/밀링에 비해 매우 작은 칩 생성 상에서 발생하는 점진적인 마모 감시가 어려운 특징이 있으며, 주축/이송계의 부하 감시로 공구상태 감시시스템을 구축하기는 어렵다.^[4]

이러한 문제를 해결하기 위하여, 주축 부하 뿐만 아니라, 절삭력, 가속도, AE신호 등 다양한 동적인 측정 파라미터를 실시간 분석하고, 새로운 신호처리 기법을 이용하여 고속가공의 마모/채터 메커니즘을 규명하고 모니터링에 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 그러나, 실시간으로 공구마모를 감지하는 것은 아직 정확도와 신뢰도 측면에서 미흡하다.^[3]

본 연구에서는 가속도 측정을 이용하여 공구마모 특성을 파악하고, 추후에 이를 바탕으로 고속가공에 최적화된 실시간 공구마모 모니터링 시스템을 개발하여 모니터링의 정확도와 신뢰성을 향상시키고자 한다. 또한, 이러한 모니터링 기능을 시스템에 내장시켜 원격 이상감지(Condition Monitoring)에 적용하기 위한 방안을 마련코자 한다.

2. 실험장비 및 가공실험

고속 가공의 특성상 주축과 이송계의 고속 운동과 일반 밀링가공에 비하여 적은 절삭력으로 인하여 일반적으로 공구상태 감시 시스템에 가장 많이 적용되고 있는 주축/이송계 전류 감시는 고속가공기에 적용하기 어렵다.

따라서, 고속가공의 가공 특성과 부합하는 가속도계를 이용하

여 공구 상태감시에 적용하고자 하였다. 일반적으로, 공구마모가 발생하면, 공구와 공작물의 마찰저항으로 인하여, 절삭력이 증가하고 가공 시 발생하는 가속도도 증가한다.

고속가공 시 발생하는 가속도를 측정하기 위하여 가속도계를 바이스와 이송계에 장착하였다. 가속도계는 PCB社의 356B21 3축 가속도계를 설치하였고, 가속도 측정은 가공이 이루어지는 지점인 바이스와 시스템에 내장하기 위하여 이송계에 장착하여 절삭가공 시 발생하는 가속도를 측정하였다. 그리고, 데이터의 비교를 위하여 공구동력계를 설치하여 절삭력을 측정하였다.

Fig. 1은 가속도계와 공구동력계를 도시한 그림이고, Fig. 2는 가속도계와 공구동력계를 시스템에 장착한 사진이다.

고속가공기는 두산인프라코어社의 FV-400과 Röders社의 RFM600을 사용하여 가공하였고, 각 장비의 제원은 Table 1에 명시하였다.

절삭공구는 SANDVIK社의 $\phi 4$ 불엔드밀을 사용하였고, 시편은 STAVAX 열처리강(HRc 53)을 사용하였다. 절삭 가공조건은 고경도강(HRc 50이상)의 일반적인 가공 조건인 25,000 rpm과 35,000 rpm에서 가공 하였으며 날당 이송량은 0.05-0.09 mm/tooth로 가공하였다.

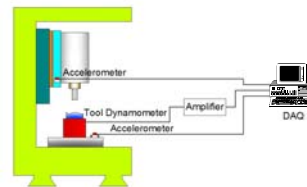


Fig. 1 Monitoring system layout using accelerometer and tool dynamometer

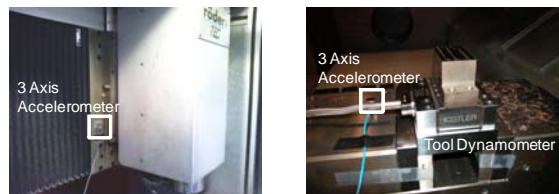


Fig. 2 Photograph of experimental set-up

Table 1 Specification of the high-speed machining systems

	Röders RFM 600	Doosan FV-400
Spindle(Max)	42,000 rpm	45,000 rpm
Feedrate(Max)	30 m/min	120 m/min
Feeding System	Ball screw	Linear motor

3. 가속도 모니터링에 따른 공구마모 감지

일반적으로 절삭 가공 공정에서 절삭 특성을 파악하고자 할 때에는 절삭이 이루어지는 지점에서 가장 가까운 부분, 즉 공구와 공작물이 맞닿아 가공이 이루어지는 부분에서 측정을 하는 것이 공구마모 모니터링을 하는데 있어서 가장 명확하고 신뢰도 높은 데이터를 얻을 수 있다.^[4]

그러나, 실제 산업 현장에서는 공구와 공작물의 크기가 천차만 별이고, 이에 따라 가공 조건과 방법도 다르다. 따라서 가속도계를 소재에 부착하는 것보다 시스템에 내장하여 데이터를 취득하는 것이 실제 산업 현장에 적용하기 유리하다. 따라서, 본 연구에

서는 고속가공기의 내장된 모니터링 시스템을 구축하기 위하여 가속도계를 이송계에 장착하였고, 공구마모를 감지하는 방안을 연구하였다.

3.1 이송계에서 가속도 측정 결과

가속도계를 이송계에 장착하면 바이스에 장착하였을 때보다 가속도의 신호 민감도가 떨어지는 반면, 주축회전과 이송운동에 의한 노이즈의 영향은 상대적으로 증가한다.

Fig. 3은 바이스에 장착한 가속도 신호와 이송계에 장착한 가속도 신호의 비교 그래프이다. 이송계에 장착한 가속도 신호는 신호의 크기가 작을 뿐만 아니라, 주축 회전 주파수가 섞여 있으므로, 측정된 데이터를 바로 분석하여 공구마모 여부를 감지할 수 없다.

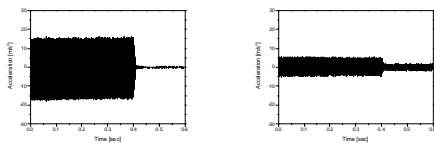


Fig. 3 Comparison of acceleration signal between workpiece and feeding system

이송계에 가속도계를 장착하였을 경우, 주축 회전 시 발생하는 회전 주파수가 함께 측정된다. 이를 밴드패스 필터를 이용하여 제거하면 노이즈의 영향을 감소시킬 수 있다.

주축 회전수가 35,000 rpm이었을 때의 주축 회전 주파수는 583.3Hz이다. 주축 회전 주파수를 밴드패스 필터를 이용, 583.3Hz를 제거하면 Fig. 4와 같은 데이터를 얻을 수 있다. 이와 같이 밴드패스 필터를 이용하여 주축 회전주파수를 제거하면 이후 가속도 신호처리에 유용한 데이터를 얻을 수 있다.

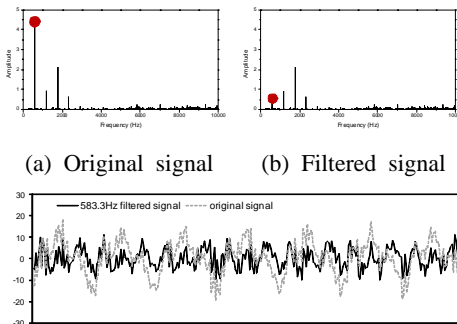


Fig. 4 Comparison of acceleration signals between original signal and filtered signal

3.2 가속도 측정 및 분석 결과

고속가공기의 이송계에 3축 가속도계를 장착하여 가속도 신호를 분석한 결과 각 축의 신호 결과에서는 뚜렷한 경향을 파악하기 어렵다. 공구마모 시 발생하는 가속도는 각 축의 영향 보다는 시스템 전체적인 영향이 크기 때문이다. Fig. 5는 주축회전수 35,000 rpm, 날당 이송량 0.05 mm/tooth의 가공 조건에서의 절삭력과 시스템에 발생한 가속도의 크기를 비교한 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 절삭력이 더 작다고 하더라도, 시스템의 영향에 따라 가속도의 크기가 차이가 날 수 있다.

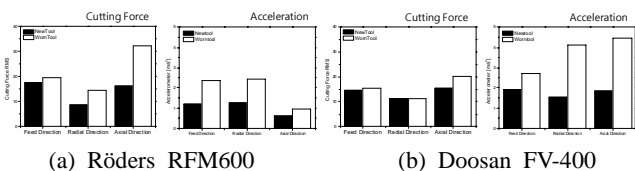


Fig. 5 Characteristics of the Rödgers and Doosan high-speed machine

또한, RFM600의 이송계는 볼스크류를 사용하였고, FV-400은 이송계에 리니어모터를 탑재하였는데, 두 고속가공기의 이송계에서 모두 공구마모를 감지할 수 있었다.

한편, 고속가공 시 발생하는 가속도 신호 분석의 신뢰성을 높이기 위해서, 각 축의 가속도 뿐 만 아니라 벡터의 크기를 비교해 보았다. 각 축의 가속도를 바탕으로 벡터의 크기를 비교하면 고속가공 시 공구 마모의 경향성 파악에 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 기대 할 수 있다.

Fig. 6은 공구마모 시 가속도의 벡터의 증가량에 따라 분석한 그래프이다. 고속가공기에서 일반적인 가공조건 뿐 만 아니라, 폭 넓은 가공조건을 적용 하여 실험 하였는데, 절삭깊이와 날당 이송량의 변화에 관계없이 공구마모 모니터링이 가능하였다. 그림에서 확인 할 수 있는 바와 같이 절삭깊이가 클수록, 날당 이송량이 많을수록, 가속도의 벡터의 크기가 커지는 것을 알 수 있다.

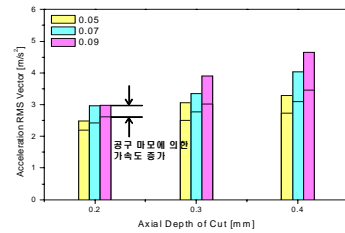


Fig. 6 Increase of acceleration vector value by tool wear

또한, 고속가공의 실시간 감지시스템을 개발하고자 이송계에서 가속도 벡터의 무빙 애버리지, 가속도 RMS 변화에 대한 공구마모를 비교한 결과 본 연구결과와 같이 마모에 의한 가속도 증가라는 결과를 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 향후 실시간 감지시스템화 하는 것이 충분히 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 고속가공기의 이송계에 가속도계를 장착하여 가공 시 가속도를 측정하였고, 이를 이용하여 고속 가공에서의 공구상태감시에 적용하였으며, 3축 가속도의 벡터를 이용하여 공구 마모에 의한 가속도 증가 및 공구상태감시에 관하여 연구하였다. 공구마모 모니터링을 시스템에 내장하기 위하여 이송계에 가속도계를 설치하여 가공 하여, 실제 공구 마모 시 가속도의 벡터 값이 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구의 실험 결과를 바탕으로 내장형 공구상태감시 시스템과 원격 이상감지 시스템을 개발하고자 한다.

후기

본 연구는 지식경제부의 “웹 운영 지능형 고속고정밀 가공시스템 개발” 과제 연구비를 지원 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Rodolfo E. Haber, Jose E. Jiménez, C. Ronei Peres, José R. Alique, "An investigation of tool-wear monitoring in a high-speed machining process", Sensors and Actuators A 116, pp.539-545, 2004
2. X. Q. Li, Y. S. Wong, A. Y. C. Nee, "Tool wear and chatter detection using the coherence function of two crossed accelerations", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 37, Issue 4, April 1997, pp. 425-435
3. Dimla E. Dimla, "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Issue 8, June 2000, pp. 1073-1098
4. J.H. Ko, S.H. Nam, Y.J. Choi, E.S. Lee, S.W. Lee, "Machining condition monitoring for high-speed & high-precision machining system", KSPE 2007 Autumn Conference pp. 123-124