

향상된 절삭력 모델을 이용한 고속 가공의 이송속도 스케줄링

이한울*(포항공대 대학원 기계공학과), 고정훈(포항공대 자동차기전연구소),
조동우(포항공대 기계공학과)

Feedrate Scheduling for High Speed Machining Based on an Improved Cutting Force Model

H. U. Lee* (Mechanical Eng. Dept., POSTECH), J. H. Ko(Automotive Mechatronics Center, POSTECH),
D. W. Cho(Mechanical Eng. Dept., POSTECH)

ABSTRACT

This paper proposes an analytical model of off-line feed rate scheduling to obtain an optimum feed rate for high speed machining. Off-line feed rate scheduling is presented as an advanced technology to regulate cutting forces through change of feed per tooth, which directly affects variation of uncut chip thickness. In this paper, the feed rate scheduling model was developed using a mechanistic cutting force model using cutting-condition-independent coefficients. First, it was verified that cutting force coefficients are not changed with respect to cutting speed. Thus, the feed rate scheduling model using the cutting-condition-independent coefficients can be applied to set the proper feed rates for high speed machining as well as normal machining. Experimental results show that the developed feed rate scheduling model makes it possible to maintain the cutting force at a desired level during high speed machining.

Key Words : High Speed Machining(고속 가공), Cutting Force(절삭력), Feedrate Scheduling(이송속도 스케줄링), NC Code Modification(NC 코드 수정), Tooth Passing Frequency(이물림 주파수)

1. 서론

최근 가공 업체의 납기단축 방법의 일환으로 절삭 속도 증가를 통해 생산성 및 가공 정밀도 향상 효과를 가져올 수 있는 고속 가공의 도입이 활발히 이루어지고 있다. 고속 가공은 티타늄 합금과 같은 고경도 난삭재 가공과 생산성 향상, 그리고 가공 표면 품질과 정도 개선을 위해 많이 도입되고 있으며, 가공 정밀도 향상, 높은 표면 조도, 버(Bur) 발생량 감소, 우수한 칩 배출 효과, 절삭 시 높은 안정성 등의 장점을 가지고 있다^[1]. 그러나 고속 단속 절삭을 대상으로 한 절삭 현상의 메커니즘이 아직 명확히 규명되지 않아 주로 경험치에 의존하여 절삭 조건을 선정하고 있다.

일련의 논문들에서 고속 가공의 절삭 특성과 절삭 조건 선정을 위한 연구가 수행되었다. Schulz^[2]는 고속 가공에서 공구의 기울기에 따른 공구의 마모 특성과 이를 기반으로 자유 곡면 가공에 최적의 절삭 조건을 계산하였으며, Dewes 와 Aspinwell^[3]은 고

속 가공을 이용하여 고경도 재질을 가공하였을 때 발생하는 현상에 대하여 연구하였다. 강 등^[4] 높은 고유진동수를 가지는 공구동력계를 개발하여 고속 가공에서의 절삭력을 측정하였고, 이를 기반으로 공구 형상에 대한 연구를 수행하였다. 그리고, Fuh 와 Hwang^[5]은 고속 가공에서의 절삭력을 주축 회전수, 이송속도, 절삭 폭, 그리고 절삭 깊이를 이용하여 예측 모델을 개발하여 적용하였다. 그러나 고속 가공에 필요한 적절한 절삭 조건을 제시하기 위해서는 임의의 가공조건에서 정확한 절삭력을 예측할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 고속 가공의 절삭 특성을 분석하기 위하여 주축 회전수의 변화에 따른 절삭력의 변화 여부를 측정하였다. 실험 결과를 바탕으로 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 사용하여 절삭력을 예측할 수 있는 절삭력 모델^[6,7]을 고속 가공에 적용하여 보았고, 이를 기반으로 개발된 이송속도 스케줄링 모델^[8]을 볼 앤드밀링의 고속 가공에 적용하여 보았다.

2. 고속 가공의 절삭 특성

2.1 실험방법 및 내용

고속 가공의 절삭 특성을 해석하기 위하여 낱당 이송량(Feed)을 일정하게 유지하고, 주축 회전수를 변화시키면서 절삭력 측정 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 고속 가공기는 MAKINO V55 이며, 주축 회전속도는 최대 20,000rpm, 최대 이송속도는 20,000mm/min 이다. 공구는 한국야금(株)의 고속 가공용 엔드밀 HSE6100 과 HSBE2100 을 사용하였고, 형상은 표 1 과 같다. 가공 재질은 SKD61(HRC 18) 이다. 높은 고유 진동수를 가지는 고속 가공용 공구 동력계(Kistler 9256A2)를 이용하여 절삭력을 측정하였고, 높은 이물림 주파수에서 발생하는 공구 동력계의 오차 성분을 아날로그 필터를 이용하여 제거하였다.

평 엔드밀 실험에서 절삭 폭은 0.5mm, 절삭 깊이는 2mm 이며, 낱당 이송량은 0.05mm/tooth 이 되도록 하였다. 볼 엔드밀 실험에서는 절삭 폭은 하프컷(Half-cut)이 되도록 하고, 절삭 깊이를 0.6mm 로 유지하였으며, 낱당 이송량은 0.025mm/tooth 이 되도록 하였다.

2.2 실험결과

고속 가공에서 주축 회전수가 변화할 경우 평 엔드밀링에서의 절삭력은 그림 1 과 같다. 그림 1 에서 (a), (b), (c)는 각각 낱당 이송량이 일정할 때 주축 회전수가 4000rpm, 8000rpm, 17000rpm 인 경우

Table 1 Geometry variables of end mill

	Diameter	Number of flutes	Helix angle	Rake angle
HSE6100	10mm	6	45 °	15 °
HSBE2100	10mm	2	30 °	10 °

의 절삭력 측정 결과이다. 측정된 절삭력 데이터에서 저대역 통과 필터(Low-pass filter)를 이용하여 잡음과 오차 성분을 제거하게 되면, 그림에서 볼 수 있듯이, 절삭력은 주축 회전수에 관계없이 항상 일정한 값을 가지게 된다. 그림 1 의 (c)는 (a), (b)에 비하여 런아웃(run-out)에 의한 영향이 크게 나타나지만 평균적인 절삭력의 크기는 일정함을 확인할 수 있다. 공구의 형상과 시편의 재질이 동일할 경우 절삭력은 미변형 칩두께의 크기에 따라 결정된다. 주축의 회전수가 증가하더라도 낱당 이송량이 같으면 미변형 칩두께가 일정하므로, 절삭력은 변하지 않고 일정한 값을 가지게 되는 것이다.

그림 2 는 낱당 이송량을 일정하게 유지하고 주축 회전수를 변화시켰을 때, 볼 엔드밀링의 절삭력을 측정한 결과이다. 볼 엔드밀링의 경우에도 낱당 이송량이 일정할 경우, 주축 회전수의 변화에 관계없이 절삭력의 크기는 일정하게 된다. 실험에 사용된 볼 엔드밀의 이물림 주파수는 평 엔드밀에 비하여 낮기 때문에 낮은 주축 회전수에서는 저대역 통과 필터를 사용하지 않더라도 정확한 절삭력을 측정할

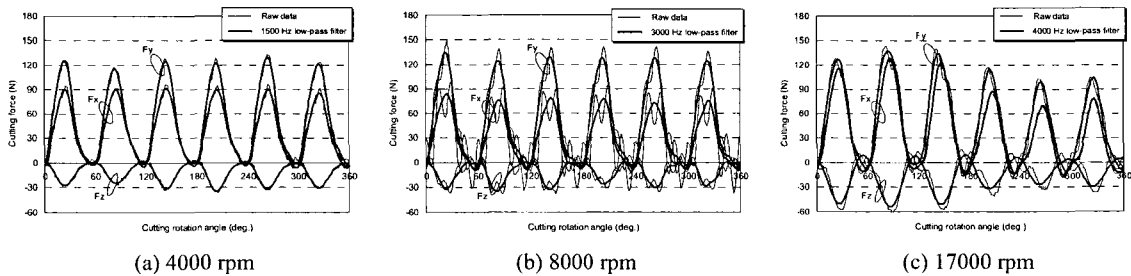


Fig. 1 Comparison of cutting forces in flat end milling before and after filtering with respect to spindle speed.

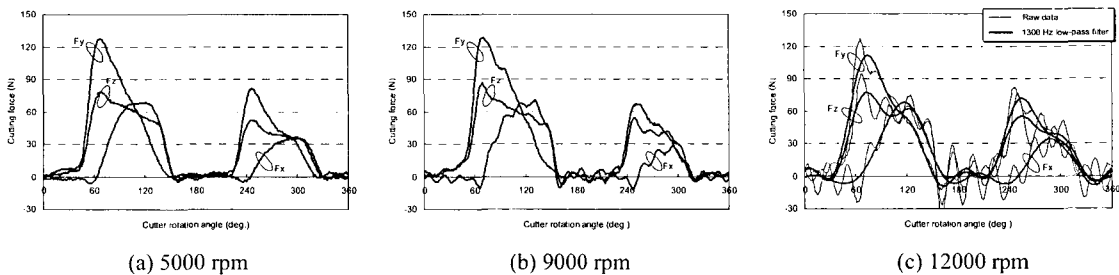


Fig. 2 Comparison of cutting forces in ball end milling before and after filtering with respect to spindle speed.

수 있었지만, 높은 주축 회전수에서는 반드시 저대역 통과 필터를 사용하여 고주파 오차 성분을 제거해 주어야 한다.

3. 고속 가공의 이송속도 스케줄링

3.1 절삭력 모델

향상된 절삭력 모델^[6]을 이용하여 고속 가공의 절삭력을 예측하였다. 향상된 절삭력 모델은 주축 회전수, 이송속도, 절삭 폭, 절삭 깊이 등의 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 사용하므로 임의의 절삭 조건에 대한 정확한 절삭력 예측이 가능하다. 앞장에서 언급한 바와 같이 주축 회전수 변화에 관계없이 절삭력 계수는 항상 일정하므로 임의의 주축 회전수에서 얻어진 절삭력 계수를 이용하여 고속 가공의 절삭력을 예측할 수 있다. 본 논문에서는 1000rpm의 주축 회전수에서 측정된 절삭력 데이터를 이용하여 얻어진 표 2와 같은 볼 엔드밀링의 절삭력 계수^[8]를 사용하여 15000rpm에서의 절삭력을 예측하고 이송속도를 스케줄링 하였다.

3.2 이송속도 스케줄링

이송속도 스케줄링 모델^[8]을 고속 가공에 적용하여 그림 3과 같은 형상을 가공하고 절삭력을 측정하였다. 그림 3은 홈이 파여진 형상을 볼 엔드밀을 이용하여 경사 가공하는 것이다. 먼저 향상된 절삭력 모델을 이용하여 절삭력을 예측하였고, 측정값과 예측값을 비교한 결과는 그림 4와 같다.

이송속도 스케줄링은 기준 절삭력을 100N과 150N으로 설정하여 수행하였다. 그림 5와 7은 각각 기준 절삭력이 100N과 150N일 때 스케줄링된 이송속도를 나타낸다. 그림 6, 8은 이송속도 스케줄링을 통하여 수정된 NC 코드를 이용하여 가공하였을 때의 절삭력과 스케줄링 전의 절삭력을 비교한 것이다. 스케줄링 후 기준 값에서 절삭력이 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 8의 경우, 앞부분에서는 최대 이송속도인 20,000 mm/min으로 가공을 하였지만, 절삭 조건이 작기 때문에 기준 값인 150N에 도달하지 못하는 것을 볼 수 있다. (고속 가공기의 가감속 특성으로 인하여 그림 5와 7의 시뮬레이션된 가공 시간에 비하여 실제 가공 시간이 가감속 시간만큼 늘어났음을 확인할 수 있다.) 기준 절삭력이 100N인 경우에는 절삭 부하를 적게 하기 위하여 스케줄링 전보다 속도를 감소시켰으므로 전체 가공 시간이 길어진 반면, 기준 값이 150N인 경우에는 전체적인 속도 증가에 따라 가공 시간이 단축되었다. 스케줄링의 목적에 따라 기준 절삭력을 조절함으로써 가공 시간의 단축 또는 공구에 걸리는 부하를 줄임으로써 안정적인 가공을 수행할 수 있다.

Table 2 Cutting coefficients in ball end milling

Workpiece material	K_n	K_f	θ_c
Al2024-T4	A1=6.81316	B1=0.95901	C1=0.08989
	A2=8.59477	B2=2.91378	C2=-0.15829
	A3=0.63607	B3=0.78907	C3=0.92392
	A4=1.69407	B4=0.71390	C4=1.89312

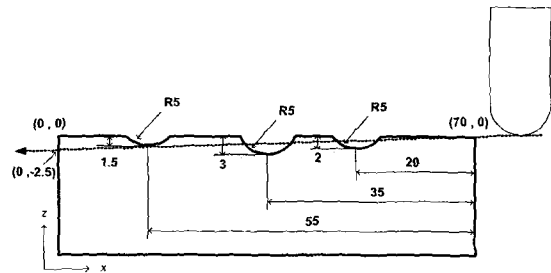


Fig. 3 Workpiece geometry for machining along the inclined path.

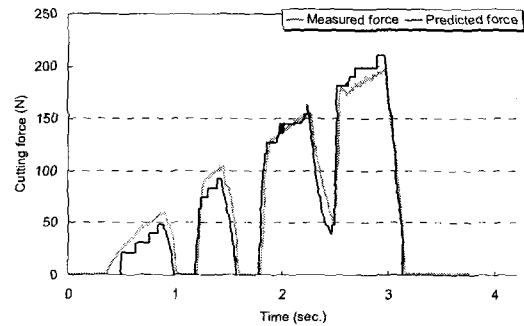


Fig. 4 Comparison between measured and predicted cutting forces.

4. 결론

본 논문에서는 이송속도 스케줄링을 고속 가공에 적용함으로써 경험에 의존하던 고속 가공의 절삭 조건을 최적화 할 수 있는 방법을 제시하였다. 이송속도 스케줄링의 기반이 되는 향상된 절삭력 모델을 고속 가공에 적용하기 위하여 먼저 주축 회전수에 따른 절삭 특성을 연구하였다. 실험 결과에 의하여 날당 이송량이 일정할 경우, 즉 미변형 칩두께가 일정할 경우에는 주축의 회전수에 관계없이 절삭력은 항상 일정하다. 즉 절삭력 계수는 다른 절삭 조건과 마찬가지로 주축의 회전수에 독립된 값이며, 임의의 주축 회전수에서 구해진 절삭력 계수를 이용하여 고속 가공의 절삭력을 예측할 수 있다.

향상된 절삭력 모델을 이용한 이송속도 스케줄링 모델을 고속 가공에 적용하여 보았고, 스케줄링

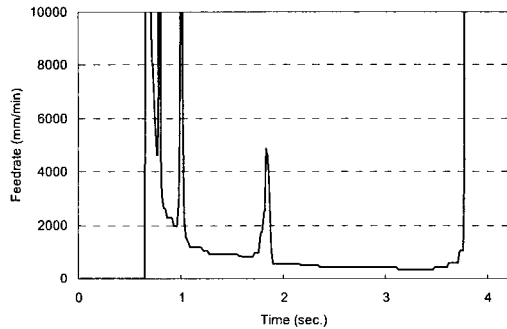


Fig. 5 Scheduled feedrate. (reference force = 100N)

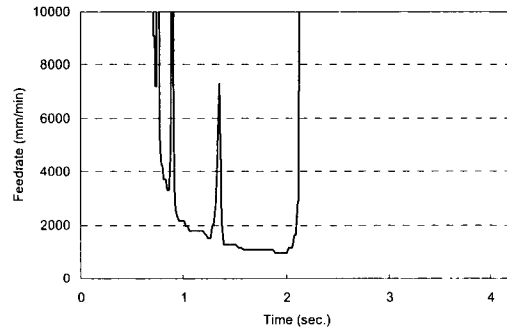


Fig. 7 Scheduled feedrate. (reference force = 150N)

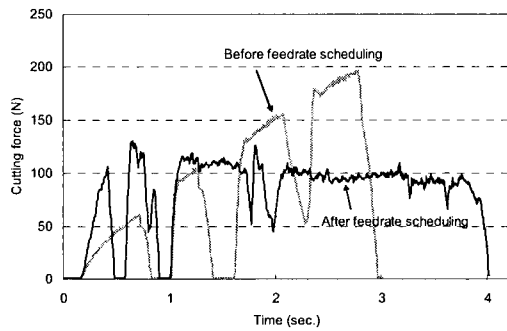


Fig. 6 Comparison of cutting force before/after feedrate scheduling. (reference force = 100N)

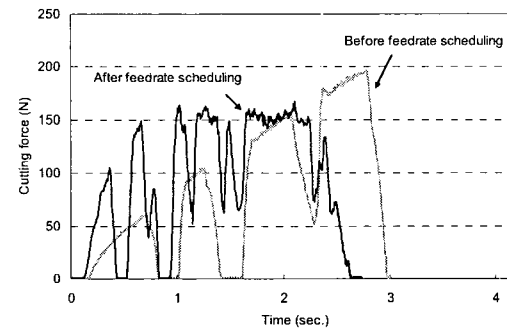


Fig. 8 Comparison of cutting force before/after feedrate scheduling. (reference force = 150N)

후 절삭력이 기준 값에서 일정하게 유지됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 ㈜터보테크 주관의 2002년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. H. Schulz, T. Moriwaki, "High-Speed Machining," Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 2, pp. 637-643, 1992.
2. H. Schulz, "High-Speed Milling of Dies and Moulds – Cutting Conditions and Technology," Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 35-38, 1995.
3. R. C. Dewes, D. K. Aspinwell, "The Use of High Speed Machining for the Manufacture of Hardened Steel Dies," Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXIV, pp. 21-26, 1996.
4. 강명창, 김정석, 이득우, 김광호, 하동근, "고속가공용 엔드밀 형상변화에 따른 가공성 평가", 한

국정밀공학회지, 19 권, 5 호, pp. 133-138, 2002.

5. K. H. Fuh, R. M. Hwang, "A Predicted Milling Force Model for High-Speed End Milling Operation," Int. J. Mech. Tools Manufact., Vol. 37, No. 7, pp. 969-979, 1997.
6. W. S. Yun, D. W. Cho, "An Improved Cutting Force Model Considering the Size Effect in End Milling," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida, pp. 223-229, 2000.
7. J. H. Ko, D. W. Cho, "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting-Condition-Independent Coefficients In Ball-End Milling", Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, Vol. XXX 2002, pp. 321-328.
8. 고정훈, 이한울, 조동우, "CNC 가공에서 절삭력 예측과 조절을 위한 절삭 시뮬레이션 시스템 개발", 한국정밀공학회 2002년도 추계학술대회 논문집, 서울, 연세대학교, pp.3-6, 2002.