

볼엔드밀 절삭공정에서 위치 및 절삭력 동시제어 (Simultaneous Control of Position and Cutting Force Based on Multi-input Multi-output Model in Ball End Milling Process)

이건복(숭실대학교), 임동희(숭실대학교)

Gun Bok Lee(Soongsil University), Dong Hee Lim(Soongsil University)

Key Words : Cutting Force(절삭력), Feed Velocity Control(이송속도제어), Spindle Speed Control(주축회전속도제어), Simultaneous Control(동시제어)

ABSTRACT

This research proposes a new advanced control method and demonstrates its realization in part. By incorporating shape machining and cutting force control at a time, this integrated scheme makes it possible to machine a desired shape and avoid the trouble of programming feedrate and spindle speed before machining and also reduce the shape error. The main idea proposed to achieve those goals consists in giving commanded path and desired cutting force at the same time, which makes it possible for position and force controller to distribute the corresponding velocity of individual axes and main spindle by an appropriate interpolation. That indicates we can replace the built-in interpolator of commercial machine tools by the developed algorithm.

1. 서론

CNC는 공작기계와 성능과 효율성을 진보된 하드웨어 및 소프트웨어 기술과의 결합을 통하여 향상하고자 하는 노력은 CAM 시스템이 지향하는 중요한 목표이다. 이는 제품의 사양에 따라 공성설계로부터 공구나 가공조건의 결정, NC 프로그래밍작성등의 원활한 진행은 물론 실제의 가공 상황에 대한 감시 및 진단을 통한 제어와 관리를 통하여서만 가능하다.

또한 위와 같은 내용은 공작기계의 제어방식 및 기능의 우수성, 절삭상황의 감시 및 진단능력에 따라 크게 단순화를 기할 수 있으며 이들 상호간의 상승효과를 통하여 더욱더 생산성 향상을 도모할 수 있다.

이상과 같은 목적을 위한 첫 번째 핵심이 되는 과제는 공작기계를 이용한 고속, 정밀절삭의 달성이다. 그러나 고속절삭은 공구파손, 마모, 가공정도 저하, 공구수명 단축, 채터링 등 여러 가지 문제들 야기 시키기 때문에 절삭조건과 절삭특성의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 제어방식의 개발을 필요로 한다. 이러한 문제들은 제어 이론 관점에서는 모델링 오차, 외란, 측정오차 등으로 기인한 안정도 문제 제어기의 강인성 등에 관계되기 때문에 이들을 만족시키는 제어 알고리즘의 개발 및 적용의 필요성이 대두되는 것이다.

공작기계를 사용한 절삭공정에 있어서 절삭속도 및 이송속도는 생산성 및 가공정도에 영향을 미치는 중요한 두 가지 인자이다. 즉 절삭속도 및 이송속도를 주어진 조건 내에서 최대로 유지함으로써 생산성을 크게 향상시킬 수가 있으며 지난 수십 년 간 공작기계 제어는 이러한 목적을 달성키 위한 노력을 꾸준히 추구하여 왔다. 본 연구에서는 고속절삭시 발생할 수 있는 문제에 신속히 대처하기 위하여 절삭속도와 이송속도의 두 가지 실시간 제어변수를 동시에 제어하므로써 그러한 문제들을 능동적으로 극복하고 공작기계의 효율성을 최대로 유지할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

2. 절삭공정의 동적 모델

절삭공정의 동적모델링은 시간영역에서 신호처리 부분과 절삭공정을 일체화한 상태에서 단위신호를 가하여 그에 대한 응답을 기준으로 모델링 하였다. 이와 같은 방법을 이용하기 위하여 일반적으로 다음과 같은 세 가지 경우에 대해서 동적모델링을 수행하여야 한다. 즉,

- ① 절삭깊이 변화에 의한 동적 응답
- ② 이송속도 변화에 의한 동적 응답
- ③ 절삭속도(주축회전속도)의 변화에 의한 동적 응답이다.

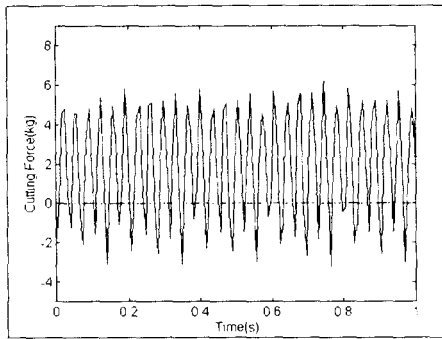


Fig. 1 Raw Cutting Force Signal in Ball-end Milling Process

일반적으로 위의 첫 번째 경우처럼 절삭깊이를 변화시키는 경우는 실용적인 측면에서 그다지 활용되지 않으며, 실제로 절삭공정중 절삭깊이의 변화는 모두 외란으로 간주되기 때문에 두번째, 세번째 경우에 대해서만 동적 실험을 통하여 실험하였다. 동적 모델링에 있어서 절삭공정만의 동특성(Cutting Process Dynamics)을 별도로 실험적으로 추출하는 것은 현실적으로 의미가 적고 또한 이와 같은 현실적 제약과 실용적 측면을 고려하여 주축 및 이송모터 구동 드라이버와 모터, 신호처리 부분, 절삭공정이 모두 일체화된 시스템에 대해 모델링을 수행하였다. 그러나 모델링에 앞서 실제절삭력은 Fig.1에서 보는 것과 같이 정상상태에서도 날의 수와 주축속도에 관계되는 신호주파수를 기본주파수로 하여 재료의 재질, 공구의 마모정도와 가공시 고응력, 고온에 의한 소성변형등에 의한 절삭력 변동으로 기본주파수

에 많은 고주파 성분을 포함하고 있기 때문에 이러한 실제절삭력 신호를 제어하기보다는 기초 절삭력 신호를 신호처리한 평균 절삭력 신호에 대해 제어를 수행하였다. Fig.2는 절삭과정의 정상상태의 실제절삭력과 신호처리한 평균 절삭력을 나타낸다.

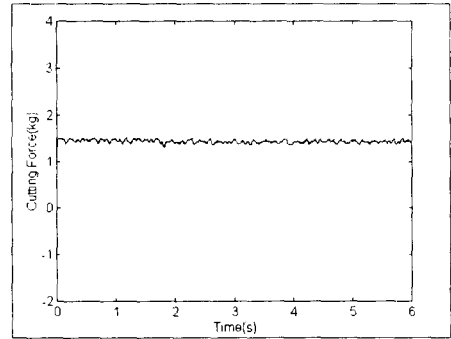


Fig. 2 Averaged Cutting Force Signal in Ball-end Milling Process

2. 1 이송속도 제어 - 주축회전 속도 일정

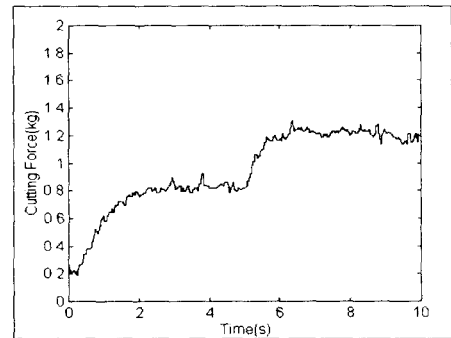


Fig. 3 Average Cutting Force Signal due to Step Change in Feed under Constant Spindle Speed

이송속도의 변화에 의한 절삭력제어 모델링은 Fig.3에서처럼 주축회전 속도를 일정하게 유지한 채 절삭공정의 이송을 공급하는 X-Y테이블의 이송모터 구동드라이버에 계단입력 신호를 가하여 그에 대한 절삭력 변화를 출력으로 하여 모델링 하였다. Fig.3은 이송속도 변화에 대한 절삭력 변화의 스텝응답을 나타내고 있으며 대체로 일차계의 동특성을 나타내고 있다. 시스템의 모델은

Fig.3로부터 다음과 같이 1차계로 모델링 하였다.

$$P_f(s) = \frac{K_{ff} e^{-\tau_f s}}{\tau_f s + 1} \quad (2.1)$$

식(2.1)의 T 는 샘플링 시간이며 $e^{-\tau_f s}$ 는 디지털

제어기를 구성할 경우 제어기 및 입출력 신호의 연산시간과 관련된 시간지연요소이다.

위에 상술되는 바와 같이 일차계로서의 모델링을 통하여 제어기 구조의 단순화를 기할 수 있을 뿐만 아니라 실제 절삭실험을 통하여서도 우수한 제어성능을 나타내고 있기 때문에 일차계로의 모델링은 충분히 그 정당성을 갖는 것으로 간주할 수 있다. 또한 동특성은 절삭속도와 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따라서 다소의 차이를 나타내나 이러한 점은 모델링 오차로 간주하여 제어기 설계시 반영하여 영향을 받지 않도록 함으로써 본래의 목적인 절삭력 추종제어를 원활히 달성할 수 있다.

2. 2 주축회전속도 제어 - 이송속도 일정

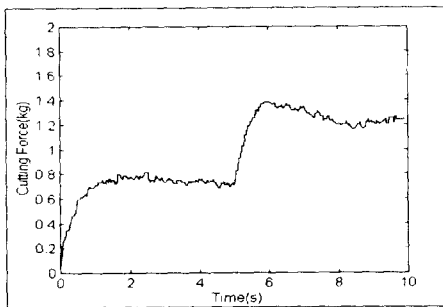


Fig. 4 Average Cutting Force Signal due to Step Change in Spindle Speed under Constant Feed Velocity

주축회전 속도 변화에 의한 절삭력제어 모델링은 X-Y테이블의 이송속도를 일정하게 유지한 채 Fig.4에서처럼 주축모터 구동 드라이버에 계단입력 신호를 가하여 그에 대한 절삭력 변화를 출력으로 하여 모델링 하였다. Fig.4는 주축회전속도 변화에 대한 CNC 공작기계의 볼랜드밀 절삭공정의 절삭력 변화를 나타내고 있으며 역시 이송속

도 변화와 마찬가지로 1차계의 동특성을 나타내고 있다. Fig.4로부터 주축회전 속도 변화에 대한 절삭공정의 모델은 다음과 같이 1차계로 나타낼 수 있다.

$$P_s(s) = \frac{K_{ss} e^{-\tau_s s}}{\tau_s s + 1} \quad (2.2)$$

정상상태 이득(Steady-state gain) K_{ss} 는 이송도 제어의 경우와는 달리 주축회전 속도가 증가함에 따라 절삭력이 감소하는 반비례 관계이므로 음의 값을 갖는다.

3. 2자유도 시스템의 제어기 설계

본 장에서는 앞에서 도출된 구동드라이버에 의한 인가전압을 입력으로 하고 절삭력을 출력으로 한 입출력 모델을 근거로 하여 볼랜드밀 가공시의 절삭력 추종제어를 위한 다입출력 모델을 설정하고 제어기의 설계기법에 대하여 설명한다

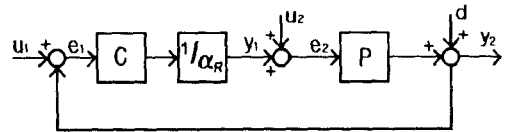


Fig.5 Feedback System

이미 주축회전 속도와 이송속도 변화에 대한 절삭공정에 대한 모델이 구해졌으므로 다입출력 제어에 대한 볼랜드밀의 모델은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_b}{s} & 0 \\ \frac{K_f}{s+T_1} & \frac{K_s}{s+T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

y_1 : 이송모터의 위치 u_1 : 이송모터의 전압입력
 y_2 : 절삭력 u_2 : 주축모터의 전압입력

위의 모델을 Bezout Identity Equation을 만족할 수 있도록 다음과 같이 기약분해한다.

(1) 우기약분해 표현: $X N_P + Y D_P = I$ (3.2.a)

(2) 좌기약분해 표현: $\tilde{D}_P \tilde{Y} + \tilde{N}_P \tilde{X} = I$ (3.3.b)

플랜트 P와 제어기 C의 좌우기약분해 표현으로부터 제어기가 폐루프 시스템을 안정화할 조건은 다음과 같다.

$$\tilde{D}_P D_C + \tilde{N}_P N_C = I \quad (3.3.a)$$

$$\tilde{D}_C D_P + \tilde{N}_C N_P = I \quad (3.3.b)$$

또한 P를 안정화하는 모든 C의 집합을 S(P,C)라 하면 모든 안정화 제어기는 다음과 같이 매개변수(Parameter) Q, R을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$S(P,C) = \{C = (Y - R\tilde{N}_P)^{-1}(X + R\tilde{D}_P) : \det(Y - R\tilde{N}_P) \neq 0\} \quad (3.4)$$

$$= \{C = (\tilde{X} + D_P Q)(\tilde{Y} - N_P Q)^{-1} : \det(\tilde{Y} - N_P Q) \neq 0\}$$

$$Q, R \in m(R_N(s))$$

이때 Q와 R은 설계 매개변수(Design Parameter)로서 설계자 임의로 설정할 수 있다. 위와 같이 설계된 제어기에 저주파 기준입력에 대한 추종성능을 높이기 위해 다음과같이 적분제어를 포함시킨다.

$$\tilde{D}_{CI} = \frac{\tilde{D}_I}{\alpha_R} \in RH_\infty \quad (3.5)$$

위의 조건이 만족할 수 있도록 R을 택한다. 여기서 α_R 은 위치와 절삭력 제어기에서 적분항에 대한 최대불변인자(max. invariant factor)이다. 위와 같은 과정으로부터 구한 제어기 C는

$$C = \tilde{D}_C^{-1} \tilde{N}_C \quad (3.6)$$

와 같다.

4. 실험결과 및 고찰

실험은 SISO(Single-Input Single-Output) 제어와 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 제어 두 가지 경우로 나누어 실행하였다. 먼저 SISO제어에서는 두 주축 회전속도하에서와 일정이송속

도하에서 기준절삭력의 변동폭을 달리하여 실험을 수행하였다. 일정한 주축 회전속도하에서 이송속도 제어방식에 의한 결과는 Fig.6,7과 같다. 그림에서는 실제절삭력, 제어입력, 기준절삭력과 실제 절삭력과의 오차 등을 보여주고 있다.

Fig.8는 기준 절삭력이 변화하는 경우에 대한 추종제어의 실험결과이며 반적으로 변동하는 기준 입력에 대하여 원활하게 추종하고 있음을 보여 주고 있고 일정한 이송속도 하에서 주축회전속도제어의 수행결과를 나타내며 이송제어의 경우와 마찬가지로 실제절삭력, 제어입력, 기준절삭력과 실제절삭력과의 오차 등을 보여주고 있다. 그리고 기준절삭력이 변동하는 기준 절삭력 추종제어를 수행한 결과로서 일정기준 절삭력 제어의 경우와 마찬가지로 양호한 제어가 수행되고 있음을 알 수 있다.

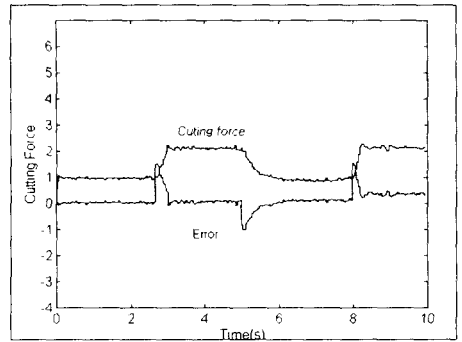


Fig. 6 Experimental Results of Constant Force Control under Constant Spindle Speed

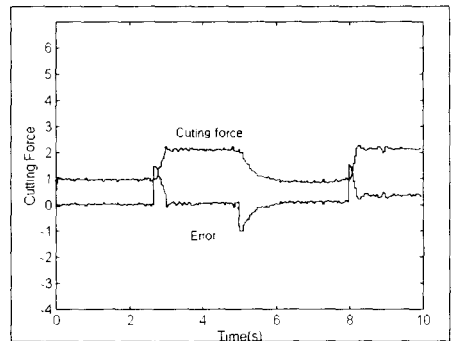


Fig. 7 Tracking Force Control under Constant Spindle Speed (Max. Ref. Force = 2kg)

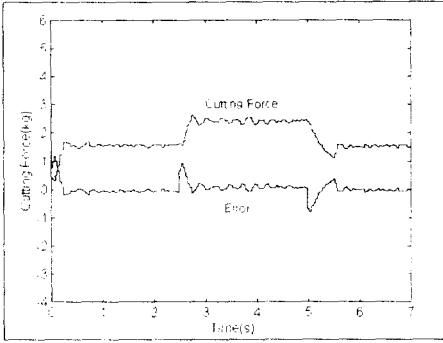


Fig. 8 Tracking Force Constant under Constant Feed Velocity (Max. Ref. Force = 2kg)

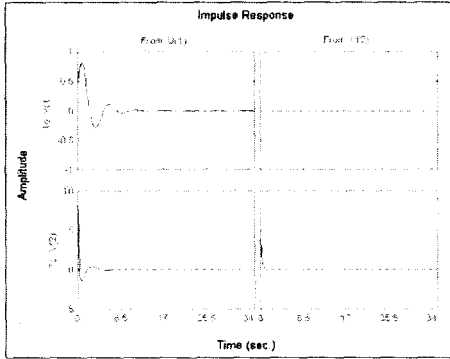


Fig. 9 Impulse Response of Closed Loop System for Stability Check-up

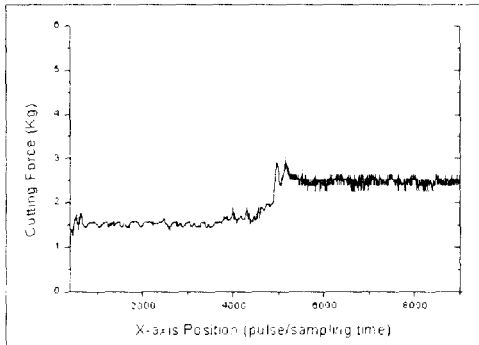


Fig. 10 Tracking Force Control under Simultaneous Control (Ref. Force 1.5kg - 2.5kg)

Fig.9는 동시제어를 위한 페루프 시스템의 안정성을 확인한 시뮬레이션 결과로서 페루프 시스템 행렬의 각각의 요소들이 안정함을 보여주고 있다.

Fig.11은 본 논문에서 제시한 제어기로 하여급 계단입력 신호에 대하여 절삭력 변화에 대한 실험결과이다. Fig.10의 기준 절삭력 2.5kg부근에서의 고정된 추종값은 안전성과 생산성을 고려하여 설계자가 미리 정해놓은 주축 및 이송축의 최소 입력값에 의한 영향력이 크다고 보여지기때문에 Fig.11에서는 추종값을 2.5kg에서 2kg로 변환한 계단입력에 대하여 절삭력을 출력한 실험 결과이다. 앞에서의 SISO제어보다 좀더 나은 응답성능을 보여주고 있다.

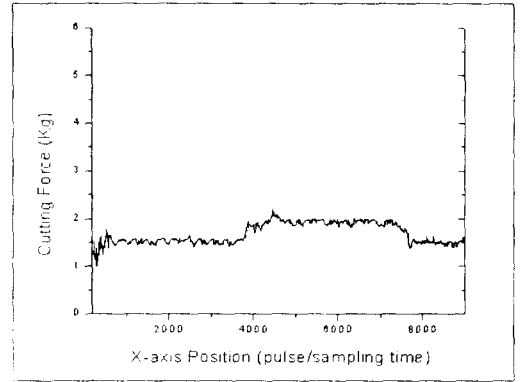


Fig. 11 Tracking Force Constant under Simultaneous Control (Ref. Force 1.5kg - 2kg - 1.5kg)

5. 결론

본 실험은 일정 주축회전속도-가변속 이송속도 제어, 일정이송속도-가변속 주축회전속도제어와 주축회전 속도제어 및 이송속도의 동시제어 모두 세 가지 경우로 나누어 실행하였다.

첫 번째 실험과 두 번째 실험은 세 번째 실험에 대한 제어 가능성을 보여주기 위한 실험이었다. 세 번째 실험은 다입력 다출력 제어이론의 주과수 영역제어기 설계법을 적용하여 2자유도 제어기 구조를 갖는 주축회전-이송속도 동시제어 실험이다. 예시한 바와 같이 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제어가 양호한 성능을 나타내고 있음을 확인하였으며 이로써 절삭력과 위치제어를 동시에 수행하면서 임의의 형상을 가공할 수 있

는 가능성이 제시되었다. 머시닝센터를 이용한 볼엔드밀의 능동적 절삭력제어에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 다음의 결론을 도출하였다. 먼저 위치와 절삭력의 동시제어를 통하여 고응답성을 갖는 공작기계 제어가 가능하며 공구파손, 공작물 재질변화, 마모 등의 발생에도 불구하고 절삭력의 급격한 증가 없이 가공을 원활히 수행할 수 있다.

5. 참고문헌

- Koren, Y., and Masory, O., "Adaptive Control with Process Estimation.", Annals of the CIRP, Vol.30, 1981
- Masory, O. and Koren, Y., "Stability Analysis of a Constant Force Adaptive Control System for Turning," Trans of ASME, J. of Eng. for Industry, Vol.101, Nov.1985
- Jun-Ho, Oh, "Model Reference Adaptive Control of the Milling Process," Ph.d. Dissertation, UCB, 1985
- Lauderbaugh, L.K, and Ulsoy, A.G, "Model Reference Adaptive Control in Milling." Thomas Kailath, Linear Systems, Prentice-Hall, Inc., 1980
- Gun Bok, Lee, "Digital Control for Burr Minimization in Drilling" , Ph.D. Dissertation, UCB, 1989
- Koren, Y., Computer Control of Manufacturing System, McGraw Hill Book Company, 1983
- Bollinger, J.G., Stute, G., Van Brussel, H, and Dirsdale, J., "Digital Controls of Feed Drives-State of the Art and New Developments", Annals of the CIRP, Vol.29, 1980
- Tomizuka, M., Dornfeld, D., Bian, X.Q., and Cai, H.G., "Experimental Evaluation of the Preview Servoscheme for a Two-axis Positioning system", ASME J. of Dynamic System, Measurement and Control, Vol.106, 1989