

주축 모터 출력 특성에 근거한 무인 선삭 제어

박장호* · 홍성함* · 이병휘** · 허건수*

(2001년 12월 28일 접수, 2002년 5월 8일 심사완료)

Unmanned Turning Process Control Based on Spindle-Motor Power Characteristics

Changho Pak, Sunghahm Hong, Byeonghwee Lee and Kunsoo Huh

Key Words : Reference Cutting Force(기준 절삭력), Reference Feed(기준 이송), Spindle Motor Power (주축 모터 출력), Fuzzy Logic Control(퍼지 논리 제어)

Abstract

In the turning process, the feed is usually selected by a machining operator considering workpiece, cutting tool and depth of cut. Even if this selection can avoid power saturation or tool breakage, it is usually conservative compared to the capacity of the machine tools and can reduce the productivity significantly. This paper proposes a selection method of the feed and the reference cutting force based on MRR(material removal rate), maximum spindle power and specific energy. In order to estimate and control cutting force accurately in transient and steady state, this study utilizes a synthesized cutting force estimation method and a Fuzzy controller. The experimental results show that these systems can be useful for the unmanned turning process

1. 서론

생산공정에 있어서 선삭에 의한 가공기술은 지난 수십년간 수치제어(CNC) 공작기계의 발전과 함께 눈부신 발전을 하였다. 선삭 과정에서 절삭력 정보의 중요성은 그 동안 공작기계 분야에서 익히 강조되어 왔으며,¹⁾ 실시간의 주절삭력 정보는 공구 파손을 예측하고 마모를 감지하며 그 밖의 다른 오 동작을 검출해 내는 데 있어 매우 중요한 것으로 잘 알려져 있다.²⁾ 절삭력의 세 가지 성분 중에서 주절삭력은 대개의 경우 가장 큰 것으로서 일정한 절삭력을 유지하는 연구에 많이 활용되는 변수이다. 그러나 이러한 연구를 함에 있어 일정한 절삭력의 설정에 대한 근거를 설명하기엔 앞서 선행된 연구에서 당위성을 찾기에 부족하다.

본 연구에서는 CNC 선반의 주축 출력한도 내에서 가장 적절한 절삭력, 즉 최대 주축 출력(P_{c_max})과 최대 급속 제거율(MRR_{max}), 그리고 최대 이송(f_{max})을 고려하여, 안전한 영역 내에서 절삭작업이 원활히 이루어질 수 있게 하는 것을 목표로 한다.³⁾ 전동기의 특성상 회전수가 증가함에 따라 주축의 출력이 증가하지만, 기준속도(base speed)를 전후로 하여 주축의 출력의 변화가 있으며 기준속도 이전에는 회전수의 증가에 따라 주축의 출력이 선형적으로 증가하나, 기준속도 이후에는 제한속도까지 일정한 출력을 유지한다.

이에 본 연구에서는 대상으로 하는 주축 전동기 특성을 고려한 최대 절삭소요동력과 최대 급속 제거율을 이용하여 가장 생산성이 용이한 기준 절삭력과 기준 이송을 결정하고자 한다. 이때 결정되어지는 기준 절삭력을 절삭력 제어의 기준 값으로 사용하고 일정 절삭력 제어기를 설계하여 무인 선삭 가공이 이루어지도록 한다.

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 산업자원부 기술료지원

* 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : khuh2@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0437 FAX : (02)2295-0437

2. 연구배경

절삭력 추정에 대한 연구는 지난 수십년간 많은 발전이 있었다. 절삭 현상의 원리를 수학적으로 모델화하여 절삭력을 추정해 내는 방식들을 들 수 있다.⁽¹⁰⁾ 그러나 이 방식들은 절삭조건에 근거하여 절삭력이 계산되므로 가공소재, 공구 등에 따라 모델변수들이 튜닝되어야 하는 번거러움이 있었다. 모델에 기초한 모니터링 시스템은 기계 진단 분야에서 널리 이용되어 왔으며, 이러한 방식의 원리는 기계적 오류를 모델 파라미터의 변화나 상태의 변화로서 감지하는 것이다.⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 예를 들면 교류 주축 드라이브(AC Spindle-Drive)의 모델을 이용하여 절삭 가공시 절삭력을 간접적으로 추정할 수 있는 방식이 개발되었으며,⁽¹²⁾⁽¹³⁾ 이러한 간접 모니터링 방식은 공작기계의 구동부를 대상으로 하므로 가공 소재와 공구의 조합이나 절삭 조건에 상관없이 적용할 수 있다는 큰 장점을 지니고 있다. 또한 절삭 가공 중 공구와 공작물간의 가해진 힘, 마찰력, 절삭온도, 절삭시간에 따라 변하는 감쇠 계수, 마찰 토크 등의 비선형 요소와 가공 중 발생하는 속도변화까지 고려하여 절삭력을 예측해내는 것이다. 또한 예측된 절삭력을 토대로 선반 가공 시 절삭력의 실시간 제어기술도 개발된 바 있으며,⁽¹⁴⁾ 절삭 깊이와 가공소재와 상관없이 원하는 절삭력 값으로 유지되도록 이송속도가 자동으로 조정되는 것이다. 그러나 이 기술이 무인 선삭 가공에 적용되기 위해서는 주어진 가공소재와 사용하는 공작기계의 용량을 고려한 적절한 이송속도와 기준 절삭력 값을 설정할 수 있어야 한다. 하지만 현재까지 이와 관련된 연구는 거의 진행되지 않고 있는 실정이다.

3. 기준 이송과 기준 절삭력의 설정

본 연구는 CNC공작기계의 주축 전동기의 특성을 고려하여, 전동기의 출력 곡선도와 토크 곡선도에 대해 회전수의 증감에 따른 소요동력과 무부하시 소요동력과의 차이를 모델링을 하여 전동기의 최대 출력에 근접한 영역에서 작업이 이루어질 수 있도록 소요동력을 최대한 활용하고자 한다. 사용된 CNC선반은 통일 중공업 TSL-6UM이며, 대상 주축모터의 출력-속도 특성은 Fig. 1과 같이 기준속도를 전후하여 다른 출력특성을 나타내고 있다.

공작기계의 주축 구동 전동기에서 쉽게 측정이 가

능한 전동기 각속도, 고정자 전압(전동기 입력 전압), 고정자 전류(전동기 입력 전류)등을 이미 설치되어 있는 센서를 이용하여 신호를 출력하도록 하였다. 측정된 신호를 토대로 절삭력을 추정하는 것은 이미 개발된 기술⁽¹⁵⁾을 적용하며, 이송속도 값과 함께 기준 절삭조건을 설정하는데 활용하고자 한다.

본 연구에서는 주축모터의 출력특성과 가공조건의 비절삭 에너지 값을 토대로 기준 이송속도와 기준 절삭력을 선정하는 방법을 제안하고 있다.

3.1 기준 절삭력값 선정

일반적으로 주축모터의 출력특성을 고려하기 위하여 최대 절삭동력(P_{Cmax})은 다음 식으로부터 구할 수 있다. 이때 주축 모터의 최대 출력(P_{S0})은 Fig. 1에서와 같은 특성을 갖으며, 모터의 무부하 출력(P_0)은 절삭이 없는 공회전으로부터 측정되어진다.

$$P_{Cmax} = P_{S0} - P_0 \quad (1)$$

그러나 위 식 (1)의 최대 절삭동력(P_{Cmax})은 최대 출력(P_{S0}) 상태에서 결정되는 값이므로, 실제 절삭 가공시에는 다음 식과 같이 절삭 소모 출력(P_S)과 주축 모터의 무부하 출력(P_0)과의 관계를 이용할 수 있다. 이때 절삭동력(P_{C0})은 최대 절삭동력(P_{Cmax})보다 작아야($P_{C0} < P_{Cmax}$) 안전할 연속 영역에서 절삭 가공이 이루어질 수 있다.

$$P_{C0} = P_S - P_0 \quad (2)$$

선반가공시 절삭속도(V_C)와 절삭깊이(a_0), 그리고 기준이송(f_0)의해 결정되는 금속 제거율(MRR)은 다음 관계식으로 표현할 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$MRR = a_0 \cdot V_C \cdot f_0 \quad (3)$$

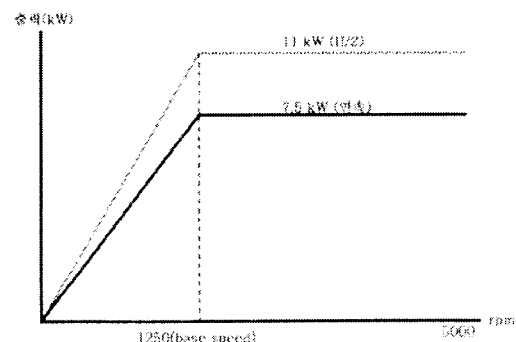


Fig. 1 Power-speed characteristics of the spindle motor

절삭 가공시 비절삭 저항은 단위 MRR 당 소모되는 절삭 동력이므로 비절삭 저항이 주어지면 가공소재의 경우 윗 식들로부터 허용 가능한 최대 금속 제거율을 구할 수 있게 된다. 예를 들어 본 연구에서 대상으로 한 CNC선반의 경우 주축모터의 속도별로 최대 절삭동력이 결정된 후에 비절삭 저항이 $4.0W \cdot s/mm^3$ 라 가정하면 최대 금속 제거율은 Table 1과 같이 구해진다. 그리고 절삭속도와 절삭깊이가 선정되면 최대 이송속도도 결정이 될 수 있다. 이에 기준 이송값이 0~255%까지 override가 가능한 선반의 경우는 최대 이송의 40%를 기준 이송값(f_0)의 초기치는 항상 1mm의 절삭깊이를 기준으로 Table 1과 같이 설정하며, 절삭깊이가 변하는 경우는 초기절삭을 수행하면서 측정되거나 추정된 절삭력을 기준 절삭력으로 설정하고 측정된 주축 전동기의 출력으로부터 다음과 같이 보정된다.

3.2 기준 이송의 보정

절삭공정에 있어서 가공소재에 대한 비절삭 에너지(specific cutting energy : u_c)는 하나의 값으로 주어지기 보다는 대개 범위로 주어지고⁽¹⁵⁾ 또 소재의 특성에 따라 바뀌므로 일정하지 않다. 따라서 자료에 나와 있는 비절삭 에너지를 초기값으로 활용한 후 절삭 작업시 보정 하여야 한다. 초기 절삭시 소요된 절삭동력을 측정하면 다음식을 만족하여야 한다.

$$P_{C0} = MRR \cdot u_c = MRR_0 \cdot \bar{u}_c \quad (4)$$

여기서, 이론상으로 u_c 와 \bar{u}_c 가 같아야 하지만 실제로는 같지 않기($u_c \neq \bar{u}_c$)에 다음 식 (5)에서와 같이 보정할 수 있다.

$$\bar{f} = \left(\frac{\bar{u}_c}{u_c} \right)^{-1} \quad (5)$$

따라서, 윗 식에서 보정된 이송을 기준이송(f_0)으로 선정한다.

$$f_r = \bar{f} \quad (6)$$

이때의 주축모터출력은 Fig. 1에서와 같이 주축 전

동기의 연속 출력 범위 내에서 작업이 이루어져야 한다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 주어진 주축 모터 절삭속도와 절삭깊이 그리고 이송과의 관계를 구할 수 있으며 한 예가 Fig. 2에 도시되어 있다. 기준 절삭력과 보정된 기준이송을 선정하기 위하여 예비절삭시의 데이터를 작성하는 예가 Table 2와 3에 나와 있다. 절삭소재는 SM45C와 stainless steel (SUS304)의 두 가지 소재를 이용하였으며 주축 회전수는 600, 800, 1200rpm으로 하고 SUS304의 u_c (비절삭 에너지)는 $5.5W \cdot s/mm^3$, SM45C의 u_c 는 $4.0W \cdot s/mm^3$ 로 가정 하였다.⁽¹⁵⁾ 여기서 중요한 것은 비절삭 에너지의 값이 같은 소재라 할지라도 차이가 발생하였으며 식 (5)를 토대로 보정한 값이 Table 2에 포함 되어 있다. 이 과정은 자동으로 이루어 지도록 무인가공 시스템이 구성될 수 있다.

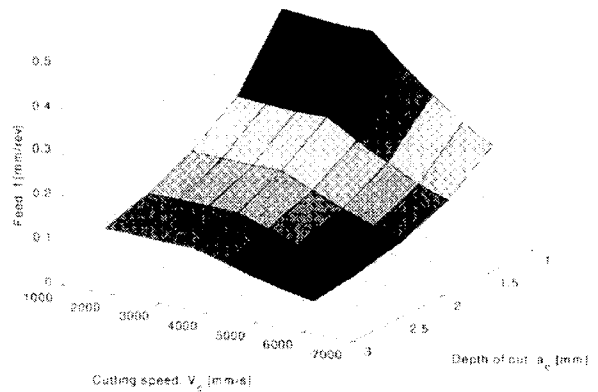
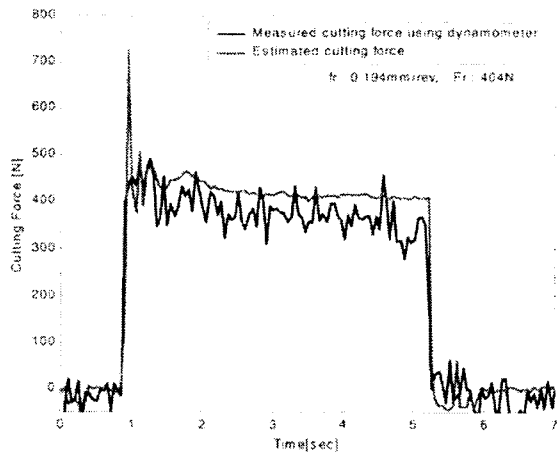


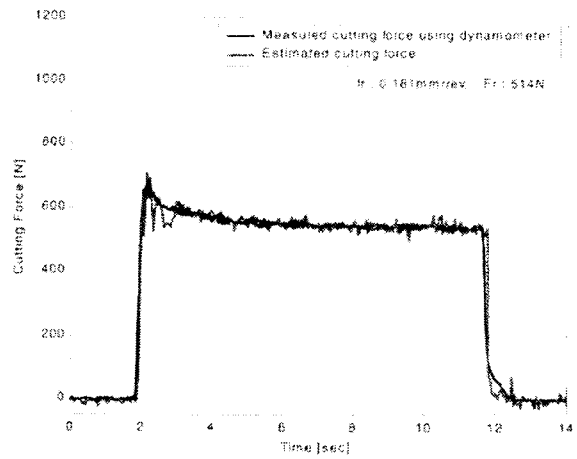
Fig. 2 Machinable range based on the motor power

Table 1 Initial feedrate selection based on motor power

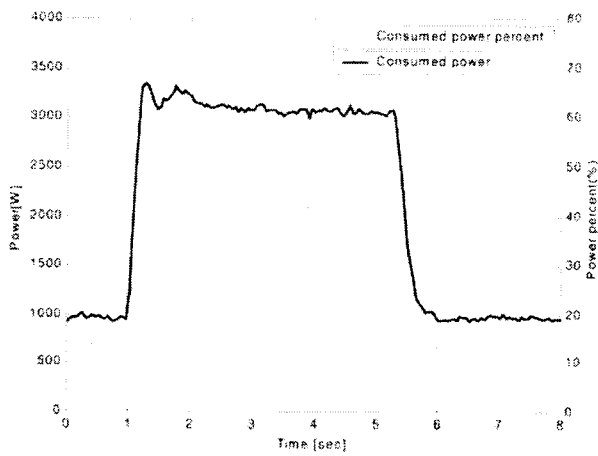
주축의 회전속도 [rpm]	최대 절삭동력 (P _{C max}) [W]	MRR _{max} [mm ³ /s]	P _{C max} 일 때 절삭깊이에 따른 f _{max} [mm/rev]	
			절삭깊이가 1.0mm일 때	f _{max} 의 40%
600	3225	806.25	0.435	0.174
800	4250	1062.5	0.4299	0.172
1000	5250	1312.5	0.425	0.17
1200	6300	1575	0.4248	0.17
1400	6300	1575	0.364	0.146
1600	6100	1525	0.309	0.123
1800	5750	1437.5	0.259	0.103
2000	5450	1362.5	0.22	0.088



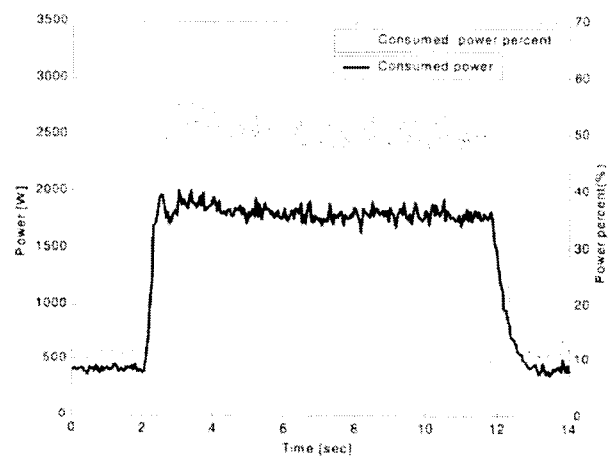
(a) Cutting force



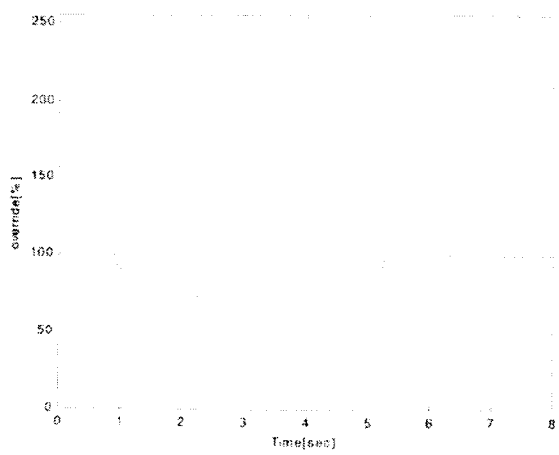
(a) Cutting force



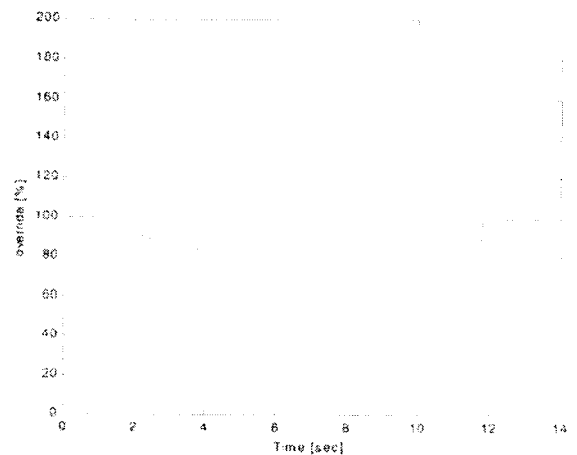
(b) Consumed power



(b) Consumed power



(c) Feed override



(c) Feed override

Fig. 6 Cutting experiment
 <workpiece: SM45C, 1200rpm, a_p : 1.0mm>

Fig. 7 Cutting experiment
 <workpiece: SUS304, 600rpm, a_p : 1.5mm>

스테인리스 강을 대상으로 기준이송과 기준 절삭력을 선정하여 제어 실험을 하였으며 그 결과가 Fig. 7에 보이고 있다. 절삭력 제어 실험 결과는 추정된 절삭력에 의한 일정 절삭력 제어결과, 절삭소요동력과 최대 주축 출력대비 퍼센트 그리고 이송override순으로 나타나 있다. 실험 결과에 의하면 본 연구에서 제시된 방법으로 설정된 기준 절삭력과 이송에 의해서 무인 가공의 제어가 용이함을 알 수 있다.

5. 결론 및 고찰

절삭공정에서의 절삭력 신호의 온라인 실시간 정보는 절삭력 제어에 있어서 가장 중요한 요인으로 작용한다. 주축 모터의 출력 특성을 고려하여 절삭조건을 선정하고 이에 적합한 기준 절삭력과 이송을 선정하였다. 주축 진동기의 출력 범위내에 근거하여 제안되어지는 이송을 기준으로 예비 절삭시 발생하는 절삭력을 기준 절삭력으로 결정하고 이때 보정되는 이송을 기준이송으로 결정하여 일정한 기준 절삭력을 유지하여 최상의 절삭 가공조건을 선정할 수 있다. 이와 같은 연구를 통하여 기존의 산업현장에서의 숙련된 작업자에 의존하던 절삭공정을 CNC공작기계의 절삭정보를 이용하여 무인자동화에 적합한 생산환경의 조성이 가능할 것이다. 또한 CNC공작기계의 기본적인 절삭 정보를 통한 공구 수명과 마모 등의 예측에 대한 연구가 이어져야 한다.

현재 대부분의 산업현장에서는 기계가 가지고 있는 최대 출력보다 훨씬 낮은 영역에서 생산공정이 이루어지므로 본 연구에서 제안하는 방식이 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 기존의 현장 기술자에 의해 가공되던 방식을 퍼지 논리 제어를 이용하여 가공하게 되므로, 향후 지능형 생산 시스템(IMS : Intelligent Manufacturing System)과 유연생산 시스템(FMS : Flexible Manufacturing System)등에 적극 고려 반영 되어질 수 있다.

참고문헌

- (1) Koren, Y., 1997, "Control of Machine Tools," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 749~753.
- (2) Tlustý, J. and Andrew, G.C., 1983, "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 2, pp. 563~572.
- (3) Week, M., 1983, "Machine Diagnostics in Automated Production," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 101~106.
- (4) Meng, Q., Arsecularatne, J. A. and Mathew, P., 2000, "Calculation of Optimum Cutting Conditions for Turning Operations using a Machining Theory," *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 12, Pages 1709~1733.
- (5) Arzooa, B., Ridgwayb, K. and Al-Ahmaric, A. M. A., 2000, "Selection of Cutting Tools and Conditions of Machining Operations using an Expert System," *Computers in Industry*, Volume 42, Issue 1, Pages 43~58.
- (6) Datsko, J., 1978, *Material Properties and Manufacturing Processes*, Jone Wiley & Sons, Inc.
- (7) Nair, R., Danai, K., and Malkin, S., 1990, "Turning Process Identification Through Force Transients," *Automation of Manufacturing Processes*, The Winter Annual Meeting of the ASME, Dallas, Texas, pp. 59~66.
- (8) Spiewak, S.A., 1995, "Acceleration based Indirect Force Measurement in Metal Cutting Processes," *Int. J. Machine Tools Manufacturing*, Vol. 35, No. 1, pp. 1~17.
- (9) Shiraish, M. and Aoshima, S., 1997, "Sensorless In-process Measurement of Instantaneous Depth of Cut and Cutting Force in Turning," *Proc. American Control Conf.*, pp. 155~159
- (10) Stein, J.L. and Wang, C.H., 1990, "Analysis for Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," *Transaction of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 239~248, June.
- (11) Stein, J.L. and Huh, K., 1992, "A Model-Based Monitor Design For Estimating the Cutting Force In A Lathe," *ASME Winter Annual Conference*.
- (12) Huh, K., Jung, J. and Lee, K., 1998, "A Cutting Force Monitoring System based on AC spindle Drive," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 3013~3017.
- (13) Pak Changho, Kim Jaeok, Huh Kunsoo, 1999, "Model-Based Monitoring of the Turning Force," *Proc. KSMTE*, pp. 11~15.
- (14) Kim Jaeok, Huh Kunsoo, 2000, "Turning Force Control Based on the Estimated Cutting Force," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 5, pp. 173~179.
- (15) Kalpakjian, Serope, Steven R. Schmid, 2001, *Manufacturing Engineering and Technology*, 4th Ed. Prentice-Hall.
- (16) Li-Xin Wang, 1997, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall.