

NC 선반공정에서 주축 전류 모니터링을 통한 구속적응제어 시스템

Adaptive Control Constraint System through Current Monitoring of Spindle in NC Lathe Process

신동수*, 광경남(화천기공(주)), 정성중(한양대 기계공학부), 현웅근(호남대 전자공학부)
D.S. Shin*, K.N. Kwak(Hwacheon Machine Tool Co., Ltd.),
S.C. Chung (Hanyang Univ.), W.K. Hyun (Honam Univ.)

Abstract

In Order to regulate cutting force at a desired level during NC lathe process, a feedrate override Adaptive Control Constraint system was developed. Nonlinear model of the cutting process was linearized as an adaptive model with a time varying process parameter. Performance of the ACC system was confirmed on the NC lathe equipped with the developed NC system through a large amount of experiments.

1. 서론

절삭공정에서 적응제어는 크게 구속적응제어(Adaptive Control Constraint, ACC), 최적적응제어(Adaptive Control Optimization, ACO), 기하학적적응제어(Geometric Adaptive Control, GAC)로 분류되며, 고속 고강성 가공의 경우 안정된 절삭조건하에서 최적절삭계수 추정을 통한 생산성 향상의 방향으로 ACC에 대한 연구가 요구되어지고 있는 것이 작금의 상황이다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 Adaptive 이송속도 알고리즘 개발에 대해 제시하였으며 제시된 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션과 함께 실험을 통해 구성된 적응제어 시스템의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 본론

2.1 토크 및 이송속도 해석

선반에서의 주축베어링 시스템에 대한 운동방정식 모델은 Fig. 1과 같이 정의할 수 있다. 그림에서와 같이 모터, 풀리, V-벨트 및 스피들로 구성되어 있으며, 모터에서 발생하는 토크는 T_m , 모터의 관성모멘트는 J_m , 모터의 각속도는 ω_m 및 그때의 주축각속도는 ω_{sp} , 외란토크는 T_d 라고 하자.

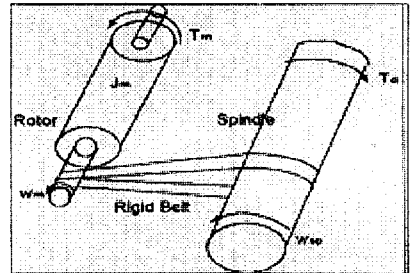


Fig. 1 System Configuration

Fig. 1에서 토크에 대한 운동방정식은 식 (1)과 같다⁽²⁾

$$\begin{aligned} \Sigma T &= J\theta = J \frac{d\omega_m}{dt} \\ T_m - T_f - T_d &= J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (1) \\ T_m &= J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_f + T_d \end{aligned}$$

여기서,

- T_m : 모터 토크
- J_m : 모터축으로 환산된 등가관성
- B : 모터축으로 환산된 점성감쇠
- T_f : 모터축으로 환산된 쿨롱마찰 토크
(Dry friction)
- T_d : 외란 토크 ($= r_e F_e + l F_m$)

이다. 이때 F_e 는 외력이며, r_e 는 힘과 중심축 간의 거리이다. F_m 은 잘못된 정렬에 의한 힘이 되며, l 은 스핀들 축에서 잘못된 정렬까지의 수직거리임을 나타낸다. 또한, 주축의 모터는 교류 유도모터 (Fuji:11/7.5Kw)를 사용하며 인버터에 의해 속도제어하는 형태로 구성하였다. 여기서, 인버터, 모터 및 스핀들의 형태로 시스템을 구성하였으며, 이때의 모터와 모터 토오크사이의 관계식은 식 (2)와 같다.

$$T_m = K_t \cdot I_m \quad (2)$$

여기서, T_m 는 모터 토오크의 순간치이며 K_t 는 모터 토오크 상수 (or Motor gyrator modulus)이고 I_m 은 모터 전류의 순간치를 나타낸다.

식 (1)을 변형하면,

$$K_t \cdot I_{ms} = J_e \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_f + (r_e F_e + l F_m) \quad (3)$$

이 된다. 순간적인 값을 취하므로 시간에 따른 각속도의 변화가 없으며 ($\frac{d\omega_m}{dt} = 0$, $B\omega_m + T_f = Const.$), 주축의 정렬이 올바르다고 할 경우 ($F_m = 0$) 식 (4)와 같다.

$$K_t \cdot I_{rms} = C + r_e F_e \quad (4)$$

식 (4)는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = A_1 F_e + A_2 \quad (5)$$

여기서, $A_1 = \frac{r_e}{K_t}$, $A_2 = \frac{C}{K_t}$ 가 된다.

또한, 절삭계수 모형화를 통해 공칭초기 절삭계수를 선정된 후, 실시간으로 최적 절삭계수를

추정하면서 이송속도 제어를 통해 일정 절삭력 제어를 수행한다. 일정 절삭력 구속적응제어는 Air Cutting 시간의 감소, 절삭계수 및 절삭조건 안정화·최적화 그리고 고속 및 고강성 절삭의 실현, 채터(Chatter) 방지 등의 이익을 얻을 수 있다.^(3,4)

같은 이송속도의 가공상태라도 Doc (Depth of Cut)의 관계에 따라 부하계에서 받는 부하 값이 다르게 나타난다. 또한,

$$F = K_s \cdot d^a \cdot f^b \cdot s^y \quad (6)$$

의 관계를 통하여 이송속도와 부하에 대한 관계를 추정한다. 여기서, K_s 는 절삭계수, d 는 절삭깊이 및 f 는 이송속도이다. 식(6)을 정리하여 쓰면 다음 식 (7)과 같다.

$$F(t) = (K_c \cdot d^a \cdot f^{b-1} \cdot s^y) f = K_c(t) f(t) \quad (7)$$

또한 A/D 샘플후 절삭력 오차를 제거하기 위해 게인 K_p 와 K_i 그리고 샘플시간 T 를 갖는 PI 제어기는 식 (8)과 같다.

$$U(i) = [K_p + \frac{K_i T}{1-z^{-1}}] E(i) \quad (8)$$

이송속도 명령의 출력에 필요한 Zero Order Hold와 동작기계 이송계의 동특성을 고려하면 식 (9)가 된다.

$$\frac{F_c(i)}{U(i)} = K_m K_c \frac{(1-e^{-\frac{T}{\tau}})z^{-1}}{1-e^{-\frac{T}{\tau}}z^{-1}} \quad (9)$$

샘플시간이 시정수에 비해 크기 때문에 $e^{-\frac{T}{\tau}} = 0$ 이므로 간략하게 식 (10)이 된다.

$$\frac{F_c(i)}{U(i)} = K_m K_c z^{-1} \quad (10)$$

이와 같이 식 (10)까지의 일정한 절삭력에 대한

디지털 제어시스템은 Fig. 2와 같이 요약할 수 있다.

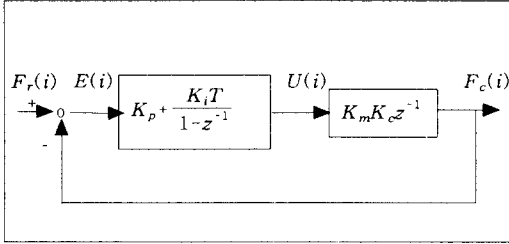


Fig. 2 Digital control System for Cutting Force Regulation

Fig. 2 의 기준 절삭력과 실제 절삭력 사이의 전달함수를 구하면 식 (11) 이 된다.

$$G(z) = \frac{F_c(i)}{F_r(i)} = \frac{(K_p K_m K_c + T K_i K_m K_c z^{-1} - K_p K_m K_c z^{-1})}{1 + (K_p K_m K_c + T K_i K_m K_c) z^{-1} - K_p K_m K_c z^{-1}} \quad (11)$$

여기서 Pole은 $z_{1,2} = \frac{1}{2} [(1 - K_p K_m K_c - T K_i K_m K_c) \pm \sqrt{(1 - K_p K_m K_c - T K_i K_m K_c)^2 + 4 K_p K_m K_c}]$ 이다. 제어시스템의 안정조건은 식 (12) 와 같이 표현할 수 있다.⁽¹⁾

$$z_{poles} = |z_{1,2}| < 1 \quad (12)$$

따라서 $K_c(i)$ 의 변화에 관계없이 극점값을 만족시키기 위해서는 절삭공정의 파라미터를 실시간으로 추정하는 것이 필요하며, 추정치 $K_c^e(i)$ 는 적분형 추정기를 도입하면 식 (13), (14)와 같다.

$$E_f(i) = F_c(i) - K_m K_c^e(i-1) U(i) \quad (13)$$

$$K_c^e = K_c^e(i-1) + g_c E_f(i) \quad (14)$$

여기서, $K_c^e(0)$ 와 g_c 는 안정성과 추정속도를 고려하여 선정한다. 극점배치 적응제어에서 추정된 PI 계인은 식 (15) 와 같다.⁽¹⁾

$$K_p^e(i) = \frac{-z_1 z_2}{K_m K_c^e(i)},$$

$$K_i^e(i) = \frac{1 - (z_1 + z_2) + z_1 z_2}{T K_m K_c^e(i)} \quad (15)$$

전체적인 PI형 적응제어의 블록선도는 Fig. 3 과 같이 표현할 수 있다.

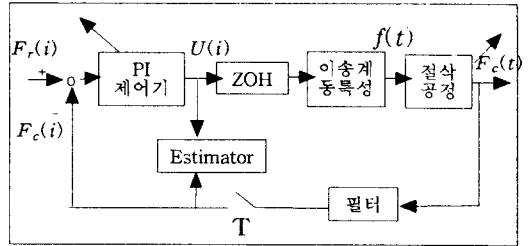


Fig. 3 Block Diagram of the PI Adaptive Controller

구체적인 연구수행을 위한 알고리즘을 설명하면 Fig. 4 와 같은 의미를 말하는 것이다.

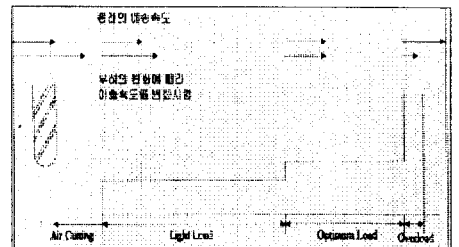


Fig. 4 Meaning of Adaptive Control Constraint in the developed system

부하에 따라 이송속도 오버라이드 (%) 가 변화하여 무리한 가공을 없애며, Air Cutting 시간을 줄일 수 있는 방법을 말하는 것이다.

Fig. 5 의 A 부분과 같이 나타난다면, 점차적으로 이송속도를 증가시켜서 하한구역 밑으로 가지 않도록 최적의 이송속도를 부하계의 값을 통해 선택한다. 또한, Fig. 5 의 B 부분의 경우가 된다면 이송속도를 점차적으로 낮추어서 상한구역 위로 가지 않도록 최적 이송속도를 부하계의 값으로 조절하여 선택한다.

이와같이 먼저 Fig. 1 의 수식을 통해 환산된

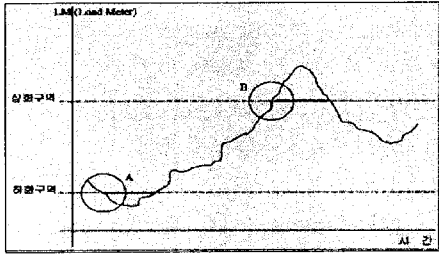


Fig. 5 Concepts of the developed system

힘과 부하계의 관계를 정의하고 이를 통하여 Fig. 5의 상한구역과 하한구역을 선정 한 후에 점차적으로 부하계의 값이 Decay out 되는 %를 선택하여 최적 이송속도 값을 활용할 수 있도록 한다.

2.2 실시간 OS상에서 실현

실시간 OS 상에서 질삭력에 따른 이송속도 적응 제어를 실현하기 위해서는 아래와 같은 Table 1의 절차를 수행하여야 한다.

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> ① 토오크의 범위 점검 ② 각 정상상태 회전수에 따른 토오크의 샘플링 가능한 영역 체크 ③ NCK 상에서 샘플링 신호 생성 ④ OP (Operation Panel) 의 I/O 체크 구간 설정 |
|---|

Table 1. Procedure for Adaptive Control on RTOS (Real Time Operating System)

2.2.1 입력 및 출력 관계

입력값은 샘플링된 토오크와 현재 이송속도 값이며, 출력값은 현재 이송속도에 대한 이송속도 Override 값 (0 ~ 210 %) 값이 된다. 이송속도 적응제어는 다양한 가공형태에 따라 발생하는 주축의 토오크를 샘플링하여 레퍼런스 토오크 데이터베이스를 통해 적절한 이송속도를 적응제어 방법으로 얻기 위한 것이다.

2.2.2. 다양한 입력에 따른 이송속도 적응제어

2.1 절에서 유도된 수식을 통해 Fig. 6 과 같은

시뮬레이션을 수행하였으며, 임의의 토오크와 현재 이송속도 값을 입력으로 하여 이송속도 Override의 출력값을 본 것이고 그에 따른 계인 값들의 변화를 살펴본 것이다. Fig. 7은 실제 아날로그 OS 상에서 구현한 것이며, 토오크에 따른 이송속도 Override의 변화를 살펴본 것이다.

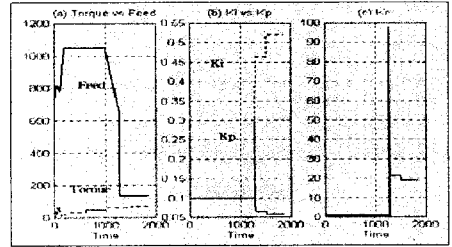


Fig. 6 Simulation of the Adaptive Control according to Torque

Fig. 7에서는 OP에서 설정된 이송속도 Override보다 낮으면 출력하고 아니면 그때의 OP에 설정된 이송속도 Override를 출력하게 되어 있다. 이것은 적응제어 알고리즘을 거쳐서 출력된 이송속도 Override가 현재 패널 상에 지정된 값보다 크면 안전 상의 문제가 발생할 것을 대비하여 구성한 것이다.

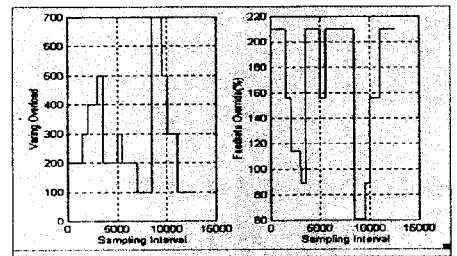


Fig. 7 Adaptive Control on Analog Operating System

Fig. 8은 실제 기계 상에서 주축속도 1000 rpm에서 생성된 토오크의 데이터를 살펴본 것이며 데이터가 2 단계 형태로 나온 것은 기어박스에 의한 High vs Low 체인지로 인해 발생한 것이다. Fig. 9는 회전속도 1500 rpm에서 살펴본 것이며, 그때의 토오크와 회전수에 대해 묘사하였다. 회전수는 직선형태의 가속을 수행하고 있으며,

정상상태의 토크까지는 도달된 목표 회전수에 대해 약 8000 msec 임을 알 수 있다. 소프트웨어 적인 파라미터의 조절이나 하드웨어 문제로 인해 토크에 대한 값이 그다지 좋은 실정은 아니다.

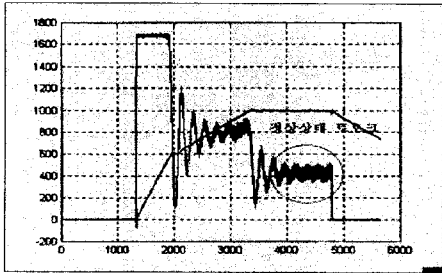


Fig. 8 Torque and Speed of Spindle in case of 1000 rpm

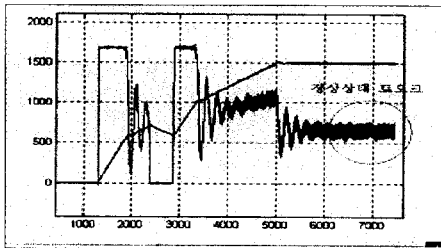


Fig. 9 Torque and Speed of Spindle in case of 1500 rpm

2.2.3 토크 모니터링에 의한 이송속도 적응제어

실제 기계 상에서 실험된 데이터로 Table 2 에 실험조건을 나타내었다.

Figure No.	Condition of Spindle		Feedrate	
	Start	rpm	Start	
Fig. 10	Start	1500	Start	2.667
	50 ~ 120 %		$2.667 * 300 / 4 = 200$ mm/min	
Fig. 11	Start	1500	Start	5.667
	50 ~ 120 %		$5.667 * 300 / 4 = 425$ mm/min	
Fig. 12	Start	1500	Start	8.667
	50 ~ 120 %		$8.667 * 300 / 4 = 650$ mm/min	

Table 2 Experimental Conditions

Fig. 10은 회전속도 1500 rpm에서 시작하여 Spindle 50 ~ 120 %로 변화하였을 경우 토크에 따른 이송속도 적응제어 데이터를 나타내고 있다. 이송속도 적응제어 값은 150%로 한계이므로 현재 이송속도에 대해 최대 150%를 나타낸다. 토크가 최대 높이인 경우는 45%까지 떨어지며 낮은 경우는 150%로 올라감으로써 적응제어가 잘됨을 알 수 있다.

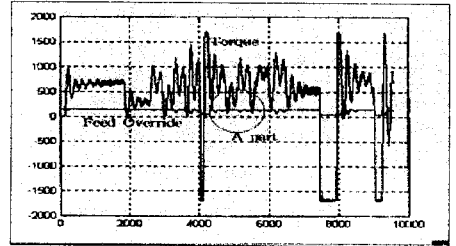


Fig. 10 Adaptive Feedrate Control according to Spindle Torque

Fig. 11도 Table 2의 실험조건으로 수행되었으며 이송속도는 최대 150% 최소 22%로 가변됨을 알 수 있었다. 이송속도 적응제어가 잘됨을 알 수 있다.

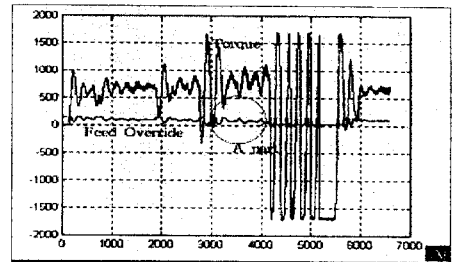


Fig. 11 Adaptive Feedrate Control according to Spindle Torque

Fig. 12는 Table 2의 실험조건으로 수행되었고 이송속도 적응제어 Override 값이 최대 150% 최소 16%로 나타남을 알 수 있었다. 이는 Fig. 10의 최소 이송속도 Override 45%, Fig. 15의 22% 및 Fig. 12의 16%에서 볼 수 있듯이 같은 레퍼런스 토크에 대해 초기 이송속도가 높아짐에 따라 적응제어된 이송속도 Override 값이 작아짐은 적응제어가 잘 따라감을 나타냄을 알 수 있

다. 여기서 변화된 초기 이송속도 값이 그다지 큰 변동폭이 아님을 고려할 경우 민감하게 적응 제어 시스템이 잘 따라감을 볼 수 있다.

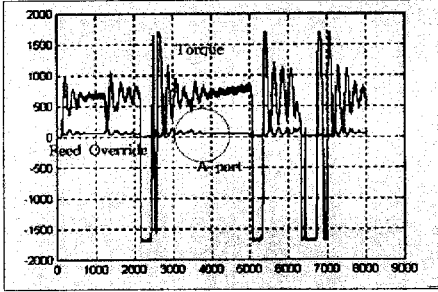


Fig. 12 Adaptive Feedrate Control according to Spindle Torque

2.3 실 기계상에서의 구현

2.2절에서 구현된 OS 상에서의 Adaptive 적응 제어를 실제 기계상태에서 가공시 스피indle에 걸리는 부하에 따라 절삭이송 속도를 제어한다. 이를 통하여 스피indle이나 공구 및 서보 축에 과도한 부하가 걸리는 것을 방지한다. 실시간으로 최적 절삭계수를 추정하면서 이송속도 제어를 통해 부하가 일정하게 절삭력이 되도록 제어를 수행한다.

항 목	내 용
MACHINE	PUMA-6(대우선반)
RAPID FEED	5000 mm/min
FEED	0.1mm/rev
WORK	알루미늄
SPINDEL RPM	1500[rpm]
TOOL	0.8 nose R
DEPTH OF CUT	1 [mm]

Table 3 Experimental Conditions

사용 파라메타로는 옵션파라메타 Adaptive 이송속도제어 ON/OFF기능을 갖는 10007 bit2, Adaptive 이송속도 제어 파라메타 P gain을 50 (내부 연산단위)으로 I gain을 50 (내부 연산단위)으로 설정 사용하였다.

실험 항목으로 소재에 걸리는 부하 토오르크를

일정하게 유지하여 위하여 속도를 제어 여부(토오르크 변동율 10% 감소)와 공작물에 일정 토오르크 적용 여부 등을 실험하였다. Fig. 13 은 Adaptive 이송속도 제어 시험을 위한 가공물 형상을 나타낸다.

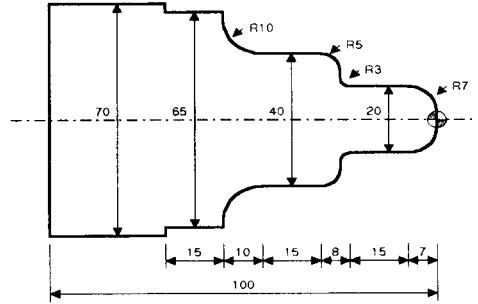


Fig. 13 Work Shape for Cutting

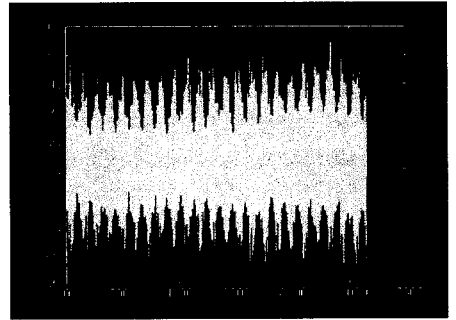


Fig. 14 Spindle Torque without Adaptive Control

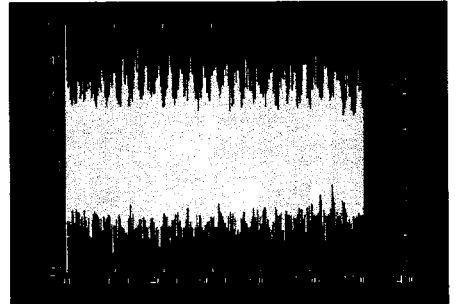


Fig. 15 Spindle Torque with Adaptive Control

Fig 14는 Adaptive 이송속도 제어 알고리즘 적용전의 가공중 Spindle Torque 변화 추이를 표시한 것이다. 데이터범위 70%「토오르크내부단위」를

가지며 다양하게 변화한다.

Fig. 15는 Adaptive 이송속도 제어 알고리즘 적용 후 Spindle Torque 변화 추이를 표시한 것으로 데이터범위 50%「토오크내부단위」로 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

3. 결 론

다음과 같이 Adaptive 이송속도 알고리즘에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이송속도 적응제어 알고리즘이 잘 적용됨을 알 수 있었다.
2. 개발된 시스템의 실시간 OS 에서도 이송속도 적응제어 알고리즘이 잘 적용됨을 실험을 통해 확인할 수 있었다.
3. 토오크의 변동과 초기 이송속도에 따라 이송속도 Override 값이 민감하게 변화함을 알 수 있었다.
4. 실제 기계상에서 가공을 수행하면서 일정 절삭력을 유지하며 이송속도를 변화시킴으로써 실제 가공에서도 적응제어가 잘 이루어짐을 알 수 있었다.

끝으로 본연구에 도움을 주신 대우중공업(공기반 중기거점 “수치제어장치 기술개발” 의 3 과제 주관기관) 의 관계된 여러분께 심심한 감사의 말씀을 전합니다.

4. 참 고 문 헌

- [1] 정성중, 1996, “엔드밀링 공정에서 극점배치구속적응제어 시스템”, 한국공작기계기술학회지, 제 5 권 제 2 호, pp. 63 - 68.
- [2] Stein, J.L., and Wang, C.H., 1990, "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 112., pp. 239 - 248.
- [3] 김승철, 한동엽, 정성중, 1998, “밀링공정에서의 외란관측기설계를 통한 일정절삭력 강인제어”, 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 1252 - 1255.

[4] K. Danai, A.G. Ulsoy, 1987, "A Dynamic State Model for On-Line Tool Wear Estimation in Turning", ASME Journal Engineering for Industry, Vol. 109, No. 4, pp. 396 - 403.