

연삭 스피들류의 실시간 외경 측정기법

이만형*, 정영일**, 배종일***

Real-Time Measurement Technology for Bi-directional Diameter in Ground Spindles

Man Hyung Lee*, Young Il Jung**, Jong Il Bae***

ABSTRACT

This paper presents an in-process measurement system for shaft radius measurement during grinding process. This system does not require to stop the grinding process, which can enhance productivity and quality. In order to measure the radius, the system employs an eddy current sensor that can measure without any contact with the shaft. This type of sensor is very appropriate because it is insensitive to interference such as cutting fluid, coolant, contact pressure, and wear. For data analysis, the measurement system is modeled as a linearized discrete form where the states with noise are estimated by an extended Kalman filter. This system has been validated through simulations and experiments.

Key Words : Process measurement system(공정 측정시스템), Grinding process(연마 공정), Eddy current sensor(와전류 센서), Linearized discrete form(선형 이산형), Extended Kalman filter(확장 칼만필터)

1. 서론

연삭 가공과 같은 가공의 최종 단계에서는 가공물의 정확한 형상 및 치수를 얻기 위해서는 정밀 측정이 요구된다. 이러한 정밀 측정작업은 정밀 측정실과 같은 아주 이상적인 장소에서 수행하여야 하므로, 가공물을 측정실로 옮겨서 여러가지 준비작업을 거치고 난 후에 측정을 수행하게 된다. 그

러나, 이러한 일련의 정밀 측정작업들은 많은 시간과 경비가 소요되므로, 생산성을 고려해서 실제 작업현장에서는 몇 개의 표본에 대해서만 이러한 정밀 측정작업을 수행하고 있는 실정이다⁽¹⁾.

많은 작업현장은 정밀 측정을 수행하기에는 열악한 환경인 경우가 대부분이다. 특히, 소음, 진동, 절삭유, 냉각수 등이 정밀 측정작업을 어렵게 하는

* 부산대학교 기계공학부, 정형정밀 및 금형가공 연구센터

** 부산대학교 대학원

*** 부경대학교 전기·제어계측공학부

요인들이다. 그러므로, 이러한 환경속에서도 정밀 측정을 수행할 수 있는 측정시스템을 개발할 수 있다면 생산성 향상을 기대할 수 있으리라 생각된다.

본 연구에서는 원통의 연삭 가공에 있어서 가공물을 연삭기의 고정 chuck에 장착 상태에서 측정하는 시스템을 구현하는 것을 목적으로 한다. 즉, 측정시 가공물을 연삭기에 부착한 상태에서 비접촉식 센서를 사용하여 측정을 수행하고, 잡음이 포함된 측정 데이터를 확장 칼만필터 (EKF, Extended Kalman Filter)⁽²⁻⁶⁾를 이용하여 처리하고, 그 측정된 결과를 이용하여 측정물의 형상 및 치수를 판단할 수 있는 시스템을 개발하였다.

2. 측정시스템의 모델링 및 확장 칼만필터 알고리즘

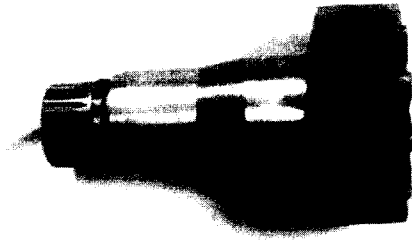


Fig. 1(a) Typical real ground spindle

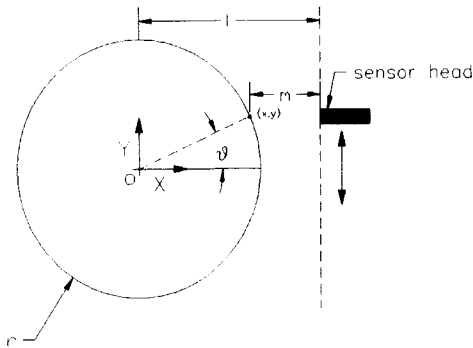


Fig. 1(b) Jig frame and eddy current sensor model for measurement system

측정시스템(센서와 측정물)의 기하학적인 형태는 Fig. 1과 같다. 이 측정시스템을 모델링하여 그 모델을 근거로 확장 칼만필터를 구성하고자 한다.

2.1 확장 칼만필터 알고리즘

본 연구에서는 시스템방정식과 측정방정식이 비선형이므로, 비선형시스템에 사용될 수 있는 확장 칼만필터를 사용하였는데, 확장 칼만필터의 필터에 의해 추정된 상태벡터의 경로에 대해 매 스텝마다 선형화하는 특징을 가지고 있다.

일반적인 이산시간 비선형 차분방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} X_{k+1} = f(X_k, k) + g(X_k, k)w_k & : \text{System} \\ Z_k = h(X_k, k) + v_k & : \text{Measurement} \end{cases} \quad (1)$$

식(1)의 비선형방정식을 아래와 같이 선형화할 수 있다.

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi_k X_k + w_k \\ Z_k = H_k X_k + v_k \end{cases} \quad (2)$$

여기서, X_k : 상태변수 벡터, Z_k : 측정변수 벡터

$$\Phi_k = \frac{\partial f}{\partial x_k} (\hat{X}_k, k), \quad H_k = \frac{\partial h}{\partial x_k} (\hat{X}_k^-, k)$$

\hat{X}_k : k 스텝까지의 측정데이터로부터 k 스텝의 추정값

\hat{X}_k^- : $k-1$ hinge 스텝까지의 추정데이터로부터 k 스텝의 추정값

w_k : 시스템잡음

v_k : 측정잡음

식(2)의 시스템에 대해서 확장 칼만필터는 아래와 같이 구성된다.

$$\hat{X}_k^- = \Phi (\hat{X}_{k-1}, k-1) \quad (3)$$

$$\hat{Z}_k^- = H(\hat{X}_k, k) \quad (4)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (5)$$

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T \quad (6)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (7)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - \hat{Z}_k^-) \quad (8)$$

여기서, Q_k 의 R_k 는 각각 시스템잡음과 측정 잡음의 자기상호분산행렬, P_k 는 추정오차의 상호 분산행렬, K_k 는 칼만게인이다.

2.2 측정시스템의 수학적 모델링

Fig. 1로 부터 (r, θ) 와 (x, y) 의 기하학적인 관계를 이용하여 본 측정시스템의 측정방정식을 구하면, (r, θ) 와 (x, y) 는 아래와 같다.

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

$$x = l - m \quad (10)$$

여기서, m 은 센서가 실제로 측정하는 데이터이다. 측정시스템의 상태변수를 아래와 같이 반경, 각 그리고 각속도로 선정하였다.

$$X_k = [r_k \ \theta_k \ \dot{\theta}_k]^T$$

측정시스템에서 센서는 수직(Y축)방향으로 일정속도로 이동하는 것이 효과적이다. 센서의 수직 방향으로 이동속도가 일정하다면, 측정지점의 각속도가 일정한 것으로 가정하여 선형화된 시스템과 측정방정식을 유도할 수 있다. 선형화된 식(2)의 시스템행렬과 측정행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad h(X_k, k) = \begin{bmatrix} r_k \cos \theta_k \\ r_k \sin \theta_k \end{bmatrix}$$

$$H_k = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -r_k \sin \theta_k & 0 \\ \sin \theta_k & r_k \cos \theta_k & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 모델링 오차

측정시스템의 모델링시 선형화로 인한 오차를 구해보자. 측정시스템에서 θ 와 y 축 방향의 위치와의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\theta_r = \sin^{-1}(y/r) \quad (11)$$

그리고, Y축 방향으로의 변위에 대한 각의 변화량이 미소하다는 가정으로 선형화하면 다음과 같다.

$$\theta_l = y/r \quad (12)$$

여기서, 아래첨자 r 와 l 은 각각 측정시스템과 선형화된 시스템을 나타낸다.

위 식에서 측정시스템과 선형화된 시스템의 각에 대한 오차를 구하면 다음과 같다.

$$error \ \theta = \theta_r - \theta_l \quad (13)$$

같은 방법으로 측정시스템에서의 각속도를 구하면

$$\dot{\theta}_r = \frac{\dot{y}}{r \cos \theta_r} \quad (14)$$

각 변위가 미소하다는 가정 하에 식(14)를 선형화하면

$$\dot{\theta}_l = \frac{\dot{y}}{r} = const \quad (15)$$

측정시스템과 선형화된 시스템의 각속도에 대한 오차를 구하면 다음과 같다.

$$error \ \dot{\theta} = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l \quad (16)$$

식(14)과 식(15)로 부터 반경이 35[mm]인 가공물에 대한 각과 각속도에 대한 오차를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 횡축은 측정지점의 각도가 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 위치 범위에서 Y축 방향의 이동을 나타내고, 외전류 센서의 출력 오차의 표준편차를 Table 1을 참조하여 구하면 각에 대해서는

$2.3593 \times 10^{-4} [rad]$, 각속도에 대해서는 $0.0015 [rad/sec]$ 이며, 이 값은 확장 칼만필터의 설계시 설계 파라미터를 결정하는 기준으로 사용할 수도 있다.

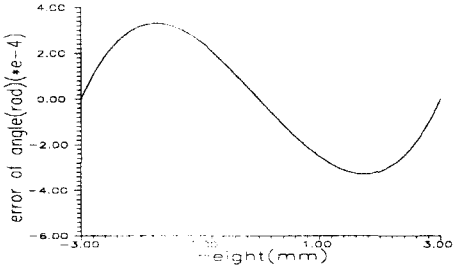


Fig. 2 Error of the linearized angles with respect to the real angles

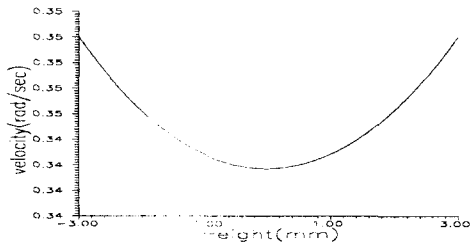


Fig. 3 Real angular velocity

Table 1 The measurement of height gauge

변위(*0.1mm)	첫 번째 실험		두 번째 실험	
	실험치	오차	실험치	오차
0	0.08000	-0.080000	0.002040	-0.00204
1	0.126800	-0.026800	0.068800	0.031200
2	0.262400	-0.062400	0.241720	-0.041720
3	0.315040	-0.015040	0.324700	-0.024700
4	0.418280	-0.018280	0.404860	-0.004860
5	0.517080	-0.017080	0.512880	-0.012880
6	0.621100	-0.021100	0.607340	-0.007340
7	0.728840	-0.028840	0.698000	0.002000
8	0.822620	-0.022620	0.804980	-0.004980
9	0.954720	-0.054720	0.902600	-0.002600
10	1.024900	-0.024900	1.024880	-0.024880

* 위의 표에서 변위는 Height gauge[mm]의 변위를

나타내며, 실험치는 센서로부터 나온 출력을 길스로 환산한 것이다.

3. 시스템의 구성

전체시스템은 측정센서와 saddle형 센서 고정장치를 이송하는 이송부, 센서로부터의 측정 데이터를 처리하는 측정부, 연삭기과 CNC로 구성되는 가공부, 지지용 프레임 등으로 구성되며, 실시스템은 Fig. 4에 나타내었다.

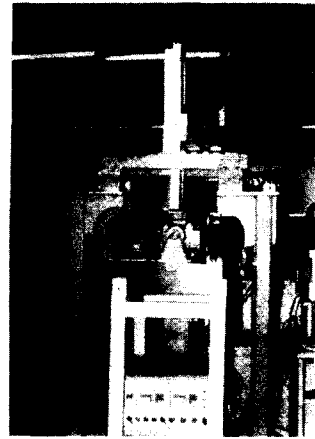


Fig. 4 The view for real system

3.1 측정센서와 센서 고정장치

측정센서는 접촉식센서와 비접촉식센서로 대별될 수 있는데, 접촉식센서는 비접촉식센서에 비해 절삭유나 냉각수와 같은 오염물질에 강인한 특징을 가지지만, 측정력과 센서헤드의 마찰에 의한 오차 등이 생길 가능성이 많으나, 비접촉식센서는 측정력과 센서헤드의 마찰로 인한 오차가 없으므로 고정도의 측정이 가능하다. 비접촉식센서로서 많이 사용되는 레이저센서는 절삭유나 냉각수와 같은 오염물질이 있으면 측정이 곤란하지만, 와전류센서(Eddy current sensor)는 절삭유나 냉각수와 같은 유체가 존재하는 환경에서도 고정도의 측정이 가능하다^{(7),(8)}. 그러므로, 본 연구에서는 측정력과 센서헤드를 마찰로 인한 오차가 없고, 절삭유나 냉각수와 같은 유체가 존재하는 환경에서도 고정도의 측정이 가능한 비접촉식 센서인 와전류센서를 사용하였다.

와전류센서의 측정원리는 Fig. 5과 같이 센싱코일에 고주파의 여자전류에 의하여 자기장이 발생하며, 측정물이 자기장내로 근접하면 전자기 유도에 의한 센서의 진동에너지를 감소시키는 와전류(Eddy current)가 발생한다. 이를 이용하여 금속표면에 와전류가 유도되고, 측정물의 근접거리에 의해 와전류가 증가하면 센서의 진동폭의 변화에 의하여 변조된 신호가 발생한다. 이러한 원리에 따라 와전류센서를 적용하였으며, 측정정밀도를 향상시키기 위해 측정범위가 0~1[mm]인 와전류센서 EX-501 (KEYENCE 社)를 사용하였다.

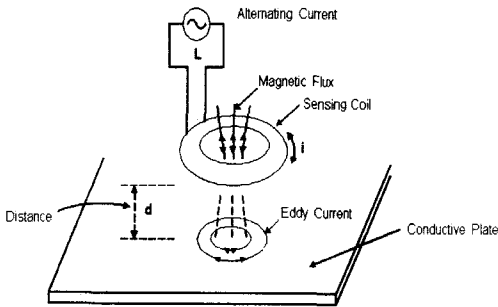


Fig. 5 Principle of eddy current sensor

센서 고정장치는 Fig. 6과 같이 ‘C’자 형태로, 그 끝면에 센서헤드가 측방향으로 일치하도록 고정하였고, 센서를 양쪽에 배치함으로써 센서의 이송시 발생하는 측정방향의 흔들림을 보정해 줄 수 있다. Fig. 7은 실시스템의 모습을 나타내고 있다.

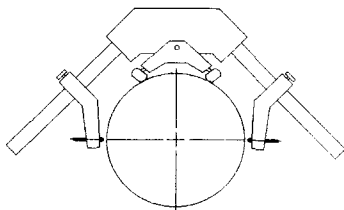


Fig. 6 Saddle frame and eddy current sensors with workpiece

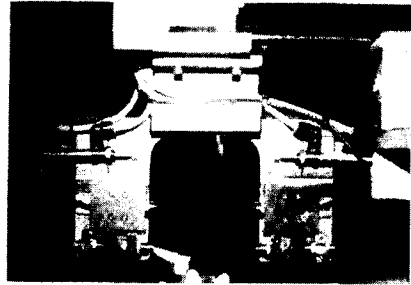


Fig. 7 The view of sensor attachment

3.2 이송부

전체시스템의 제어 개념도는 Fig. 8에 도시하였고, 시스템 사양은 Table 2에 나타내었다.

이송부는 직선유니트, 공압실린더, PLC 등으로 구성되며, 센서 고정장치의 Z축(전후)방향 이송은 공압실린더를, Y축(상하)방향과 X축(좌우)방향은 서보 모터를 이용하여 구동한다.

제어부는 PC를 사용하여 PLC 및 서보 드라이버로 명령을 내리고, 이송부의 모든 움직임을 PC에서 통제할 수 있다. X축과 Y축에 대한 정보는 서보 모터의 엔코더 신호를 카운터 보드에서 연산 처리하고, 또한 통신 포트를 통하여 X, Y축의 데이터를 access할 수 있다. Z축은 PLC를 통하여 제어하게 되고 그 위치를 STOPPER를 이용하여 두 지점간을 움직이게 된다.

3.3 측정부

센서와 측정물간의 거리는 측정센서(와전류센서)로 추정하여 센서 앰프와 A/D 보드를 이용하여 PC로 전달되고, 센서의 수직위치는 Y축 서보 모터의 엔코더 신호를 받아 DI 포트에 전송하여 PC로 전달된다.

측정센서로 부터의 측정데이터에는 센서의 앰프에 들어가는 전원파 A/D 보드 등에 의해서 여러 가지 잡음이 포함되기 때문에, 측정데이터를 바로 측정자료로 사용할 수는 없다. 이러한 측정잡음은 특정 주파수대역만의 성분이 아니라, 거의 모든 주파수대역에서 나타나므로, 특정주파수역을 통과시키는 필터(LPF, BPF, Notch Filter 등)를 사용하여서는 효과적인 제거가 불가능하다. 그러므로, 확률(Stochastic)시스템에서 상태변수의 추정을 위한 칼만필터(Kalman Filter)를 사용하여, 측정데이터로 부

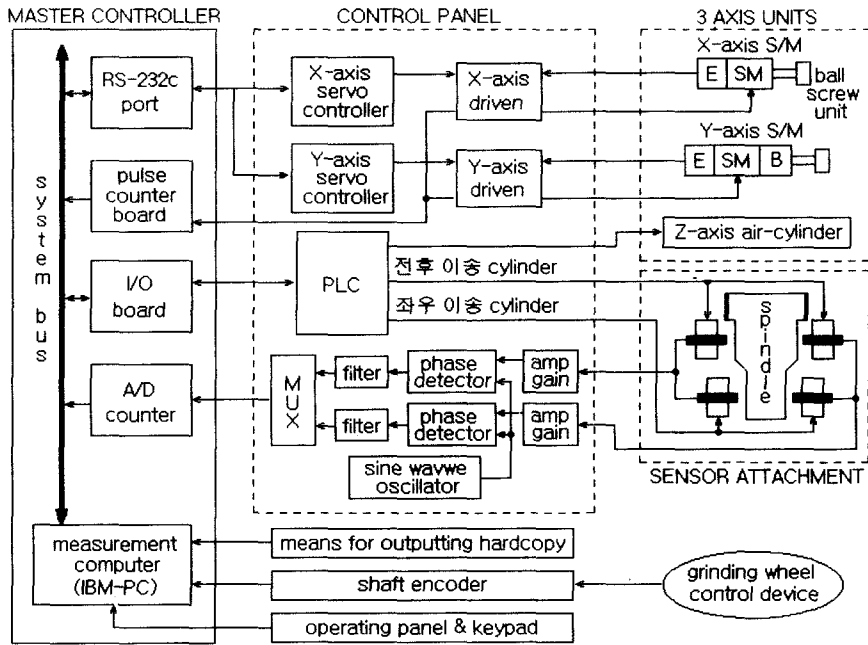


Fig. 8 Schematic Diagram of overall control system

터 가공물의 외경을 상태변수로 두고 이를 추정하고자 한다.^[9, 10] 그런데, 본 측정시스템은 그 동특성이 비선형이므로 비선형 칼만필터인 확장 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 사용하였다.

4. 시뮬레이션

반경 추정을 위한 확장 칼만필터의 적용 가능성을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 하였다. 측정물의 반경은 35[mm]로 선정하고, 센서는 1초 동안 $-10^\circ \sim +10^\circ$ (± 6 [mm]) 범위를 Y축 방향으로 일정하게 이동하는 것으로 설정하였으며, 측정데이터는 1초 동안 250개 획득되도록 설정하였다.

그리고, 시뮬레이션에 사용된 시스템 및 측정잡음의 공분산은 다음과 같다.

$$Q_k = \begin{bmatrix} 0.0005 \\ 0.0002 \\ 0.0015 \end{bmatrix} \quad R_k = \begin{bmatrix} 0.003 \\ 0.002 \end{bmatrix}$$

시뮬레이션 결과는 Fig. 9 ~ Fig. 13에 나타내었고, Fig. 9, 10, 11은 측정된 반경, 반경의 측정오

차이다. 추정된 반경이 측정된 반경에 비해 잡음성분이 제거됨을 알 수 있고, Fig. 11은 반경의 추정오차로서, 약 $\pm 3[\mu\text{m}]$ 이내로 잘 추정하고 있음을 알 수 있으며, Fig. 12과 Fig. 13은 각과 각속도의 추정오차로서 역시 잘 추정하고 있음을 알 수 있다.

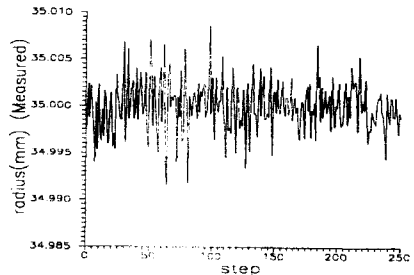


Fig. 9 Measured radius in the simulation

Table 2 Specification of overall control system

구분	2축 유닛		센서 ATTACHMENT	
	X-AXIS	Y-AXIS	V1-AXIS	V2-AXIS
운동방향	좌우	상하	측정물의 반경방향	
이송스트로크	75mm	600mm	7mm	4mm
최대이송속도	250mm/s	500mm/s	200mm/s	
구동모터	AC SERVO MOTOR(YASKAWA) · 형식 : SGM-02A312(b) *Y축 BRAKE · 정격출력 : 200W · 정격회전수 : 3000rpm · 정격토크 : 6.49kg · cm		AIR CYLINDER(LG) · ACM-10LR-15 · 튜브경 : 10mm	
구동기구	BALL SCREW BNFN-1605 · LEAD : 5mm · 외경 : 16mm	BALL SCREW BSE1510 · LEAD : 10mm · 외경 : 15mm		
안내가이드	HSR15AC0 · C : 8.33KN · CA : 13.5KN	SR20V2UUC0 · C : 7.16KN · C0 : 14.4KN	RSR9W · C : 2.45KN · C0 : 3.9KN	
측정정도	1회 Setting 후 반복 사용할 때 센서부 변동 변위량 : 1 μ m (열변형에 대한 영향은 제외)			
CYCLE TIME	10 sec (1회 이송완료 시간임. 단 측정 소요시간은 제외)			

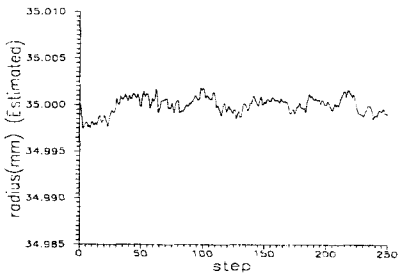


Fig. 10 Estimated radius in the simulation

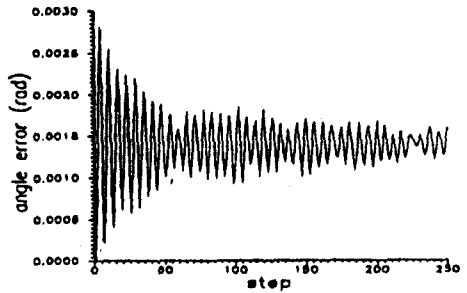


Fig. 12 Error of estimated angle

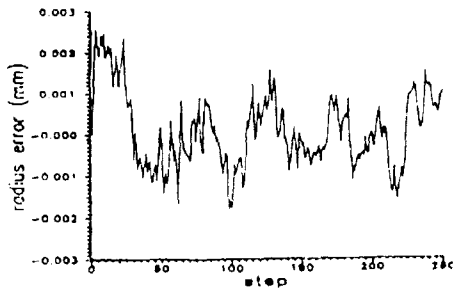


Fig. 11 Error of estimated radius in the simulation

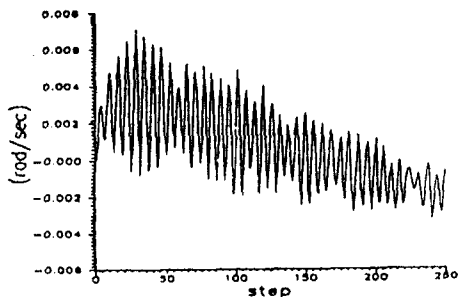


Fig. 13 Error of estimated angular velocity

5. 실험

시물레이션을 근거로 제작된 시스템에서 실험을 수행하였으며, 실험에 사용된 측정물은 반경이 40[mm]이고 오차가 ± 0.04 [mm]인 연삭된 스펀들을 삼성중공업(주) 중장비사업부의 정밀측정실에서 측정된 자료이며, 센서가 1초 동안 Y축 방향으로 $+14' \sim -14' (\pm 10$ [mm]) 범위를 일정하게 이송되도록 하여, 250개의 측정데이터를 얻을 수 있도록 설계하였다.

실제 실험 장치에서 수행되는 작업순서는 다음과 같다.

(1) 디지털 출력명령을 사용하여 원점 복귀명령을 내린다.

(2) 원점 복귀 여부를 판별하고, Z축 전진명령을 인가한다.

(3) Z축의 전진상태를 확인하고, 통신포트를 이용하여 Y축을 측정물의 측정 준비위치로 이송시킨다. (측정 준비위치 ; 엔코더신호의 영점 위치를 인가하기 위한 초기 위치로서, 측정물의 중심 위치보다 10[mm]위의 지점)

(4) Y축이 측정 준비위치에 정지하면, 카운터의 값을 영으로 설정하고, Y축을 측정 최종위치까지 이송시킨다. (측정최종위치 ; 측정물의 중심에서 10[mm] 아래의 지점)

(5) Y축이 이송되는 동안, 측정센서의 정보는 A/D보드로 accept하여 PC로 전송되고, Y축의 수직 위치는 카운터의 값을 카운트 보드의 DI 포트에 accept하여 PC로 전송한다. (샘플링 주기는 1/250초, 250개의 데이터를 취득)

(6) 확장 칼만필터 알고리즘을 이용하여, 측정데이터로부터 반경을 추정한다.

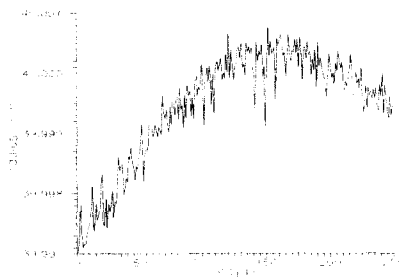


Fig. 14 Measured radius in experiment

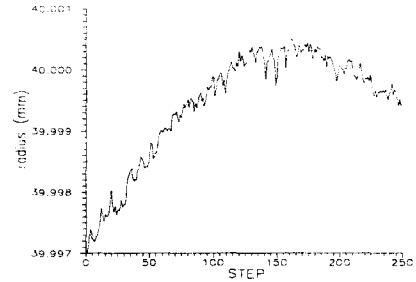


Fig. 15 Estimated radius in experiment

실험결과는 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었고, Fig. 14는 측정된 반경이고, Fig. 15는 추정된 반경이다. 추정된 반경이 측정된 반경에 비해 잡음성분이 제거됨을 볼 수 있고, 추정된 반경이 약 4[μ m] 정도의 범위를 움직이고 약 1[μ m]이내의 폭으로 추정이 됨을 알 수 있다.

6. 결론

비접촉식센서인 와전류센서를 사용하여, 공작물이 공작기계(연삭기)에 장착된 상태에서 외경을 측정할 수 있는 시스템을 구성하였다. 그리고, 측정데이터에 포함된 측정잡음을 확장 칼만필터를 이용하여 효과적으로 제거하고, 원하는 측정량인 외경을 측정할 수 있음을 시물레이션을 통하여 검증하였고, 또한 실험을 통하여 확장 칼만필터를 이용한 측정 알고리즘의 현장 적용 가능성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 교육부 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME-96-D06)와 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원하에 연구되었으며, 관계기관에 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Novak. A, "Sensing of Workpiece Diameter's Vibration and Out-Of-Roundness by Laser Way to Automate Quality Control," CIRP, pp. 473, 1981.
2. Lee. M. H, Kolodziej. W. J, and Mohler. R. R,

- "Stochastic Dynamic System Suboptimal Control with Uncertain Parameters," IEEE Trans. on Aero. & Elec. System, Vol. AES-21, pp. 594-600, 1985. 9.
3. Minkler. G and Minkler. J, Theory and Application of Kalman Filtering, Magellan, 1993.
4. Jazwinski. Andrew H, Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, 1970.
5. Doebelin, E. O., Measurement System : Application and Design, 4th Edition McGRAW -Hill, New York, 1990.
6. 윤강섭, "좌표변환을 이용한 확장된 칼만 필터의 구조적 개선에 관한 연구," 부산대학교 공학석사 학위논문, 1988.
7. 한국표준연구소, 가공체 치수의 자동 측정기술 개발 (I), KSRI-89-93-1R, 1989.
8. 한국표준연구소, 가공체 치수의 자동 측정기술 개발 (II), KSRI-91-91-1R, 1991.
9. 김종건, 배종일, 이만형, "가공물의 In-Line 실시간 측정기법의 개발," 한국자동제어학술회의논문집, pp 217-220, 1995.
10. Lee. J. N, Bae. J. I, Lee. S, Lee. M. H, and Lee. J. M, "Development of Real Time and In-Process Gauging Technology for Grinding Process of Cylindrical Workpieces," Proceedings of The IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'97, pp. 160-164, 1997.