

# 확장 칼만필터를 이용한 연삭스핀들 외경의 측정알고리즘

## Measurement Algorithm of Bi-directional Diameter in Ground Spindles Using Extended Kalman Filter

배종일\* · 배민성\*  
Jong-Il Bae · Min-Sung 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** : Measurement algorithm, Extended Kalman filter, Eddy current, Linearized discrete, Ground spindle

### 1. 서론

많은 작업현장은 정밀 측정을 수행하기에는 열악한 환경인 경우가 대부분이다. 특히, 소음, 진동, 절삭유, 냉각수 등이 정밀 측정작업을 어렵게 하는 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 [1-5]를 이용하여 처리하고, 그 측정된 결과를 이용하여 측정물의 형상 및 치수를 판단할 수 있는 시스템을 개발하였다.

### 2. 측정시스템

측정시스템의 기하학적인 형태는 Fig. 1과 같다. 이 측정시스템을 모델링하여 그 모델을 근거로 확장 칼만필터를 구성하고자 한다.

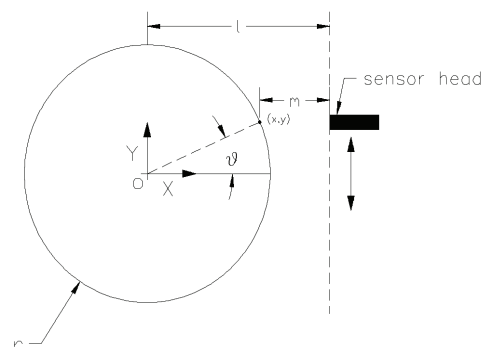
#### 2.1 확장 칼만필터 알고리즘

본 연구에서는 시스템방정식과 측정방정식이 비선형이므로, 비

선형시스템에 사용될 수 있는 확장 칼만필터를 사용하였는데, 확장 칼만필터의 필터에 의해 추정된 상태벡터의 경로에 대해 매 스텝



(a)



(b)

그림 1 (a) 실제 형태의 연삭스핀들

(b) 지그 프레임과 와전류센서의 측정시스템

Fig. 1 (a) Typical real grinded spindle, (b) Jig frame and eddy current sensor model for measurement system

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea.  
E-mail: jibae@pknu.ac.kr

\* Panasonic Eco Solutions Shin Dong-A Co., Ltd.

Received : December 13, 2016; Accepted : January 9, 2017

마다 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 측정데이터로부터  $k$  스텝의 추정값

$w_k$  : 시스템잡음

$v_k$  : 측정잡음전머

식 (2)의 시스템에 대해서 확장 칼만필터는 아래와 같이 구성된다.

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

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

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

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

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

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

여기서,  $Q_k$ 의  $R_k$ 는 각각 시스템잡음과 측정잡음의 자기상호분산 행렬,  $P_k$ 는 추정오차의 상호분산행렬,  $K_k$ 는 칼만게인이다.

### 2.2 시스템의 수학적 모델링

Fig. 1로 부터  $(r, \theta)$ 와  $(x, y)$ 의 기하학적인 관계를 이용하여 본 측정시스템의 측정방정식을 구하면,  $(r, \theta)$ 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 변경, 각 그리고 각속도로 선정하였다.

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

측정시스템에서 센서는 수직(Y축)방향으로 일정속도로 이송하는 것이 효과적이다. 센서의 수직방향으로 이송속도가 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  $\theta$ 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.

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

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.

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

식 (14)과 식 (15)로 부터 반경이 35[mm]인 가공물에 대한 각

과 각속도에 대한 오차를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 횡축은 측정지점의 각도가  $-10^\circ \sim +10^\circ$  위치 범위에서 Y축 방향의 이동을 나타내고, 와전류 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.

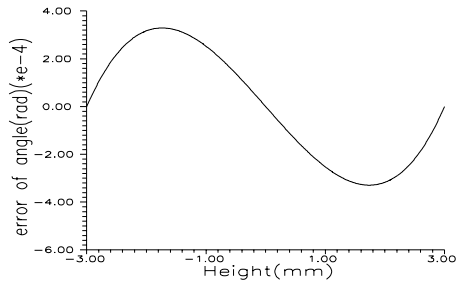


그림 2 실제 각과 선형화된 각의 오차  
**Fig. 2** Error of the linearized angles with respect to the real angles

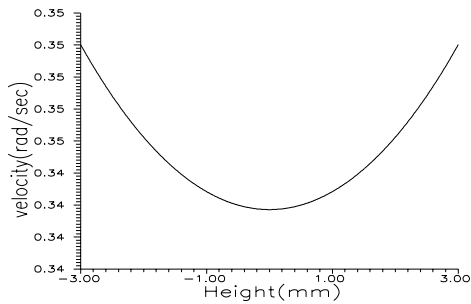


그림 3 실제 각속도  
**Fig. 3** Real angular velocity

표 1 게이지의 측정치

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

### 3. 시스템의 구성

시스템은 측정센서와 saddle형 센서 고정장치를 이송하는 이송부, 센서로 부터의 측정 데이터를 처리하는 측정부, 연삭기와 CNC로 구성되는 가공부, 지지용 프레임 등으로 구성되며, 실시간은 Fig. 4에 나타내었다.

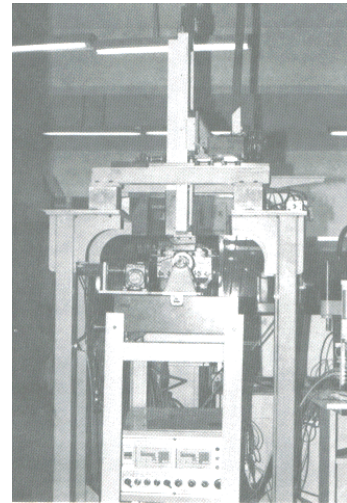


그림 4 실제 시스템  
**Fig. 4** The view for real system

#### 3.1 측정센서

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, 와전류센서는 절삭유나 냉각수와 같은 유체가 존재하는 환경에서도 고정도의 측정이 가능하다. 그러므로, 본 연구에서는 측정력과 센서헤드를 마찰로 인한 오차가 없고, 절삭유나 냉각수와 같은 유체가 존재하는 환경에서도 고정도의 측정이 가능한 비접촉식 센서인 와전류 센서를 사용하였다. 와전류센서의 측정원리는 Fig. 5과 같이 센싱 코일에 고주파의 여자전류에 의하여 자기장이 발생하며, 측정물이 자기장내로 근접하면 전자기 유도에 의한 센서의 진동에너지를 감소시키는 와전류가 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  $0 \sim 1 [mm]$ 인 와전류센서 EX-501 (KEYENCE社)를 사용하였다.

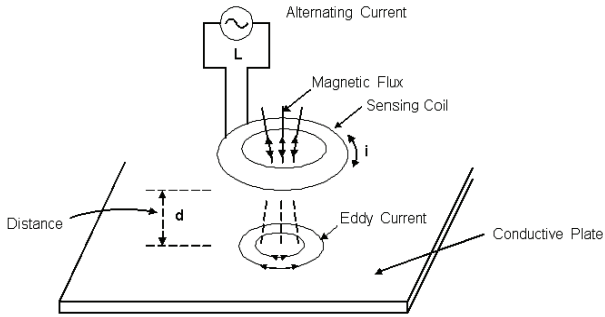


그림 5 와전류 센서의 원리  
 Fig. 5 Principle of eddy current sensor

센서 고정장치는 Fig. 6과 같이 'ㄷ'자 형태로, 그 끝면에 센서 헤드가 축방향으로 일치하도록 고정하였고, 센서를 양쪽에 배치함으로써 센서의 이송시 발생하는 측정방향의 흔들림을 보정해 줄 수 있다. Fig. 7은 실시스템의 모습을 나타내고 있다.

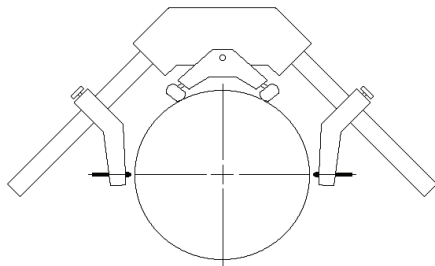


그림 6 새들 프레임과 와전류 센서의 연장  
 Fig. 6 Saddle frame and eddy current sensors with workpiece

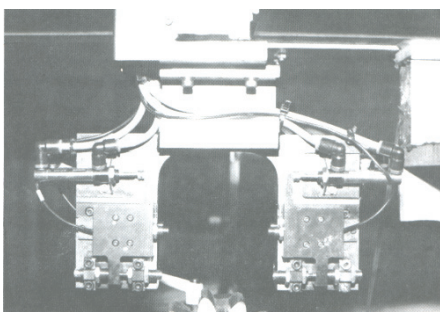


그림 7 센서 부착물  
 Fig. 7 The view of sensor attachment

### 3.2 이송부

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

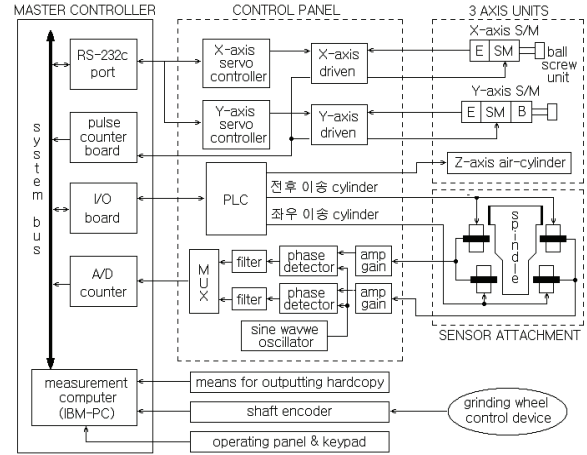


그림 8 제어 시스템의 개념도  
 Fig. 8 Schematic Diagram of overall control system

표 2 제어 시스템의 사양

Table 2 Specification of overall control system

구분	2축 유니트		센서 ATTACHMENT	
	X-AXIS	Y-AXIS	V1-AXIS	V2-AXIS
운동방향	좌우	상하	측정물의 반경방향	
이송 스트로크	75mm	600mm	7mm	4mm
최대 이송속도	250mm/s	500mm/s	200mm/s	
구동 모터	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	
구동 기구	BALL SCREW BNFN-1605 · LEAD : 5mm · 외경 : 16mm	BALL SCREW BSE1510 · LEAD : 10mm · 외경 : 15mm		
안내 가이드	HSR15A0 · 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 $\mu$ m(열변형에 대한 영향은 제외)			
CYCLE TIME	10 sec (1회 이송완료 시간임. 단 측정 소요시간은 제외)			

제어부는 PC를 사용하여 PLC 및 서보 드라이브로 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 위치

를 STOPPER를 이용하여 두 지점간을 움직이게 된다.

### 3.3 측정부

측정센서로 부터의 측정데이터에는 센서의 앰프에 들어가는 전원과 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 필터를 사용하여서는 효과적인 제거가 불가능하다. 그러므로, 확률시스템에서 상태변수의 추정을 위한 칼만필터를 사용하여, 측정데이터로 부터 가공물의 외경을 상태변수로 두고 이를 추정하고자 한다[6]. 그런데, 본 측정시스템은 그 동특성이 비선형이므로 비선형 칼만필터인 확장 칼만필터를 사용하였다.

## 4. 시뮬레이션

반경 추정을 위한 확장 칼만필터의 적용 가능성을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 하였다. 측정물의 반경은 35[mm]로 선정하고, 센서는 1초 동안  $-10^{\circ} \sim +10^{\circ} (\pm 6[\text{mm}])$  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 측정오차이다. 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.

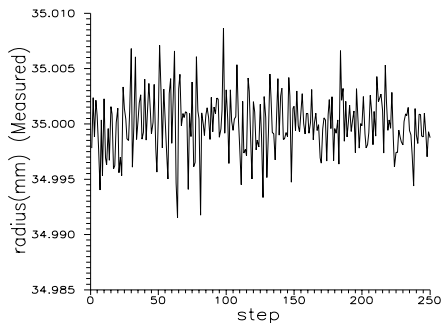


그림 9 측정된 반경  
Fig. 9 Measured radius in the simulation

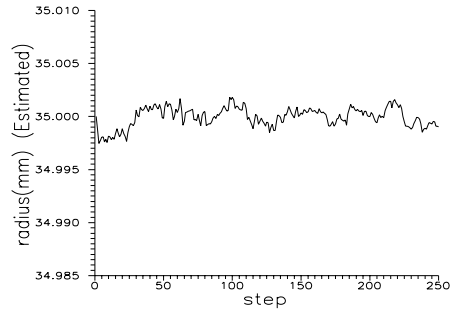


그림 10 추정된 반경  
Fig. 10 Estimated radius in the simulation

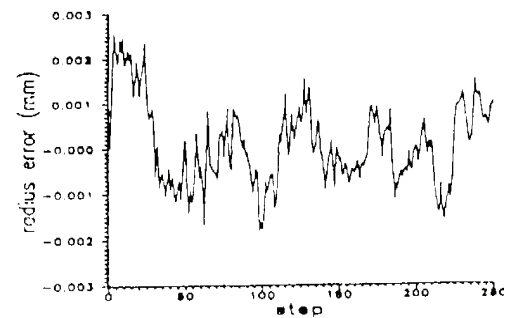


그림 11 추정된 반경의 오차  
Fig. 11 Error of estimated radius in the simulation

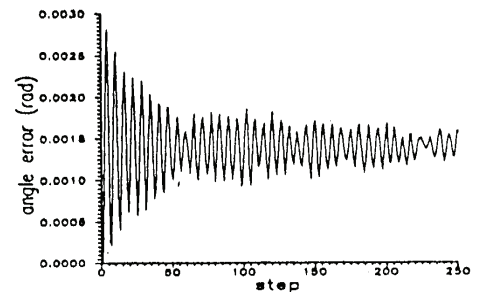


그림 12 추정된 각의 오차  
Fig. 12 Error of estimated angle

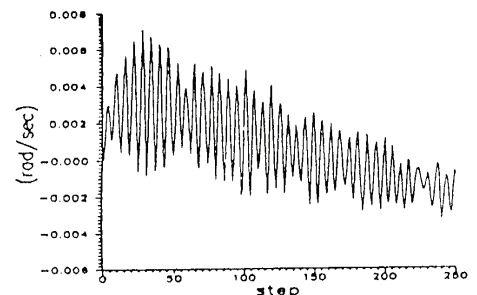


그림 13 추정된 각속도의 오차  
Fig. 13 Error of estimated angular velocity

## 5. 결 론

비접촉식센서인 와전류센서를 사용하여, 공작물이 공작기계에 장착된 상태에서 외경을 측정할 수 있는 시스템을 구성하였다. 그리고, 측정데이터에 포함된 측정잡음을 확장 칼만필터를 이용하여 효과적으로 제거하고, 원하는 측정량인 외경을 측정할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, 또한 실험을 통하여 확장 칼만필터를 이용한 측정 알고리즘의 현장에 적용 가능성을 입증하였다.

### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] Novak. A, "Sensing of Workpiece Diameter's Vibration and Out-Of-Roundness by Laser Way to Automate Quality Control," CIRP, pp. 473, 2001.
- [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, 2005
- [3] Minkler. G and Minkler. J, Theory and Application of Kalman Filtering, Magellan, 2013.
- [4] Jazwinski. Andrew H, Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, 2015.
- [5] Doebelin, E. O., Measurement System : Application and Design, 4th Edition McGRAW -Hill, New York, 2016.
- [6] 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.

## 저 자 소 개



### 배 종 일 (Jong-Il, Bae)

1954년 3월 11일생  
 1979년 중앙대 전기공학과 졸업  
 1981년 중앙대 전기공학과 졸업(석사)  
 1989년 성균관대 전기공학과 졸업(박사)  
 1986년-현재 부경대 전기공학과 교수  
 E-mail : jibae@pknu.ac.kr



### 배 민 성 (Min-Sung, Bae)

1981년 9월 1일생  
 2008년 부경대 제어계측공학과 졸업  
 2013년 부산대 경영학과 대학원 수료  
 2016년 부경대 전기공학과 졸업(석사)  
 2014년-현재 (주)파나소닉ES신동아  
 E-mail : bae.ms@kr.panasonic.com