

선형홀센서를 이용한 전기식 구동장치의 속도 신호 구현

논문

59-1-12

A New Velocity Measurement Method using Linear Type Hall-effect Sensor for Electro-mechanical Fin Actuator

구정회* · 송치영*
(Jeong-Hoi Gu · Chi-Young Song)

Abstract - The objective of this paper is to propose a new velocity measurement method for an electro-mechanical fin actuator. The model of the electro-mechanical fin actuator includes uncertainties such as unknown disturbances and parameter variations in flight condition. So, an electro-mechanical fin actuator system needs robust control algorithm which requires not only position information but also velocity information. Usually, analog tachometers have been used for velocity feedback in an electro-mechanical fin actuator. However, using these types of sensors have problems such as the cost, space, and malfunction. These problems lead to propose a new velocity measurement method using linear type Hall-effect sensor. In order to verify the proposed method, several experiments are performed using Model Following Sliding Mode Controller(MFSMC). It is shown that the MFSMC with a new velocity measurement method using linear type Hall-effect sensor can satisfy the requirements without using of velocity sensor.

Key Words : BLDC Motor, Fin Actuation System, Sliding Mode Control(SMC), Linear type Hall-effect Sensor, Reduced Order Observer(ROO)

1. 서 론

최근 모터를 이용하는 전기식 구동장치는 자성재료, 전력 전자, 마이크로프로세서, 모터설계, 배터리 등의 요소기술의 발전에 힘입어 응용영역이 급속히 확대되고 있으며, 유도무기의 조종날개 구동장치로도 전기식 구동장치가 널리 이용되고 있다. 유도무기용 구동장치는 공간이 협소하면서도 고출력을 요구하기 때문에 포화요소와 같은 비선형성과 모터의 발열로 인한 파라미터 변동 및 유도탄이 비행중에 받는 공기력으로 인한 외란(disturbance)이 존재한다. 이와 같은 문제에 잘 대처하기 위해서 구동장치의 위치제어기로 고전 제어이론을 적용하기보다는 강건 성능이 높은 현대 제어이론을 적용하는 것이 바람직하다.

강건제어기로는 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller)[1-2], 시간지연 제어기(Time Delay Controller), H^∞ 제어기 등 여러 가지 방법이 제안되었으며, 이와 같은 강건제어기들을 구현하기 위해서는 구동장치의 위치 정보뿐만 아니라 속도 정보도 필요로 하게 된다. 기존의 속도 정보 획득 방법으로는 타코미터(Tachometer)에 의한 속도 피드백 신호를 사용하여 왔다. 하지만 이와 같은 방법은 타코미터의 정류자와 브러쉬(Brush) 사이의 접촉면 상태에 따라 센서 감도가 달라질 수 있는 문제점이 있으며, 뿐만 아니라 정

제성, 센서장착 공간 확보 및 센서 고장 가능성 등의 측면에서 불리하다. 이러한 타코미터의 문제점을 해결하기 하기 위해 소프트웨어적으로 구동기의 속도를 측정할 수 있는 관측기의 적용[3-4] 및 BLDC 모터의 홀센서 클럭을 통한 속도 추정방법[5] 등이 제안되었다. 기존의 관측기를 통한 속도 추정 방법은 외란 및 파라미터 변동에 다소 민감하여 시스템의 성능과 안정도를 함께 만족시킬 수가 없으며, 구형파 형태의 센서 출력값을 갖는 홀센서의 클럭을 이용한 M방식, T방식, M/T방식 등은 어느 정도 이상의 고속에서는 속도 추정이 가능하지만 저속 구간에서는 홀센서의 펄스 수가 적어 위상지연 및 잘못된 속도 정보가 제공되어 유도무기용 조종날개 구동장치와 같은 시스템에 적용하기가 곤란하다. 따라서, 기존의 관측기가 갖는 문제점인 강건성 문제와 홀센서의 클럭을 통한 속도 추정 방법이 갖는 저속에서의 속도 추정 문제를 극복할 수 있는 방법을 본 논문에서 제안하였다.

본 논문에서 제안한 속도 추정 방법은 기존의 BLDC 모터 구동신호 생성을 위한 래치 형태의 홀센서를 자계의 세기에 비례한 전압 출력값을 나타내는 선형 홀센서로 적용함으로써 모터 구동신호 뿐만 아니라 속도 구현 알고리즘을 통하여 강건성 및 저속 추종 성능이 우수한 속도 신호를 구현 할 수 있었다. 제안된 속도 추정 방법의 우수성을 검증하기 위하여 조종날개 구동장치의 위치제어기로 모델추종 슬라이딩 모드 제어기를 적용하여 타코미터와 관측기를 적용한 경우와 비교 실험을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선형 홀센서를 이용한 속도신호 구현 방법에 대하여 기술하고, 3장에서는 제안된 속도신호 구현 방법의 우수성을 검증하기 위하여 사

† 교신저자, 정회원 : 국방과학연구소 선임연구원
E-mail : 9334931@hanmail.net

* 정 회 원 : 국방과학연구소 선임연구원
접수일자 : 2009년 8월 18일
최종완료 : 2009년 12월 9일

용된 모델추종 슬라이딩 모드 제어기에 대하여 간략히 서술한다. 4장에서는 선형 홀센서를 이용한 조종날개 구동장치에 대한 무부하/부하 계단과 응답시험 및 저속 추종 성능을 검증하기 위한 저속의 정현파 시험을 수행하였다. 끝으로, 5장에서는 본 논문에 대한 결론이 기술되어 있다.

2. 속도신호 구현 방법

그림 1은 BLDC 모터 내부 구성도이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 BLDC 모터는 종래의 일반적인 DC 모터에서의 정류자와 브러쉬에 의한 기계적 정류를 스위칭 소자를 이용한 전자적 스위칭을 통해 모터를 구동하는 방식이다. 이와 같은 전자적 스위칭을 위해서는 모터의 회전자 위치 정보를 필요로 하며 대표적으로 사용되는 것이 래치 홀센서(Latched Hall-effect sensor)이다.

본 논문에 사용된 홀센서는 기존의 래치 홀센서와는 달리 모터 구동을 위한 신호생성 뿐만 아니라 모터의 속도신호 구현을 위해 선형 홀센서(Linear Hall-effect sensor)를 사용하였다.

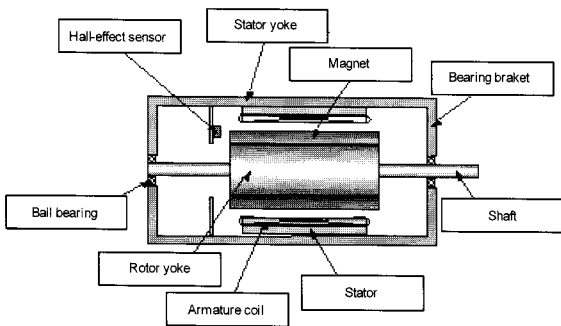


그림 1 BLDC 모터 내부 구성도
Fig. 1 Construction of brushless dc motor

1.1 래치 홀센서(Latched Hall-effect sensor)를 이용한 속도신호 구현

기존의 래치 홀센서는 회전자의 자극 위치를 제공하므로 이 신호를 통하여 모터의 회전속도를 알 수가 있다. 그 대표적인 방법으로 그림 2와 같이 홀센서의 한 주기(T) 동안에 시스템 클럭 수를 계산하여 식(1)을 통해 모터의 회전속도를 얻을 수가 있다. 이와 같은 방법을 T방식이라 한다. T방식을 이용한 조종날개 구동장치의 속도신호 구현 결과가 그림 3에 나타나 있다.

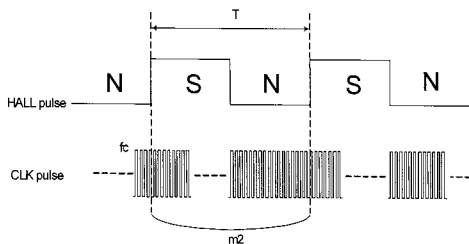


그림 2 속도구현 방법 - T방식
Fig. 2 Velocity measurement using T-method

$$f = \frac{f_c}{ppr \times m2} [revolution/sec] \quad (1)$$

하지만, 이와 같은 홀센서의 클럭을 통한 속도 추정 방법은 고속에서는 속도센서인 타코미터와 거의 유사한 값이 얻어지지만, 저속 구간에서는 모터 속도에 비례하여 홀센서의 펄스 주파수도 느려져 속도센서에 비해 지연현상이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

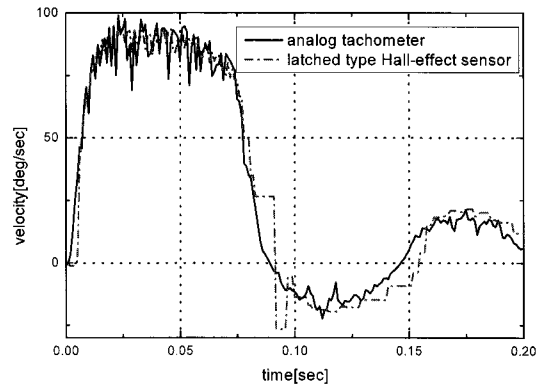


그림 3 실험결과 - T방식
Fig. 3 Experimental results using T-method

1.2 선형 홀센서(Linear Hall-effect sensor)를 이용한 속도신호 구현

1.1.1 선형 홀센서

그림 3에 나타난 바와 같이 기존의 래치 홀센서를 이용한 속도신호 구현은 저속에서 문제가 됨을 알 수 있다.

이 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 선형 홀센서를 사용하였으며, 그림 4에 실험에 사용된 BLDC 모터 및 선형 홀센서 사진이 나타나 있다. 실제로 래치 홀센서와 선형 홀센서의 크기와 형태는 완전히 동일하여 추가적인 하드웨어 변경없이 선형 홀센서 적용이 가능하다.

그림 5에 나타난 바와 같이 래치 홀센서는 자극의 위치에 따른 ON/OFF 형태의 구형파로 나타나지만, 선형 홀센서는 고정시 자계 세기의 편차를 최소화하여 조립하면 정현파 형태의 출력을 얻을 수 있게 된다.

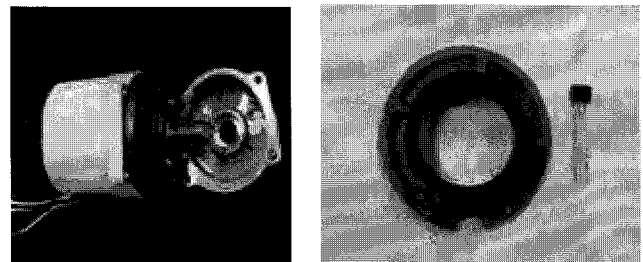
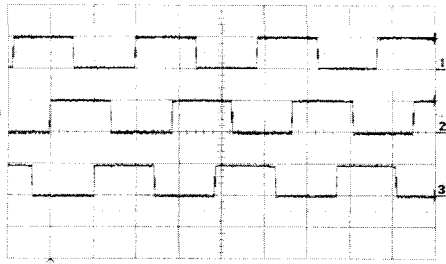
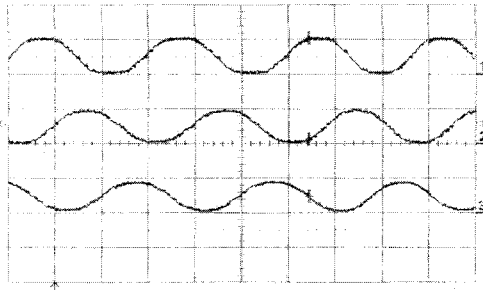


그림 4 BLDC 모터 및 선형 홀센서
Fig. 4 BLDC motor and linear type Hall-effect sensor



(a) 래치 홀센서



(b) 선형 홀센서

그림 5 홀센서 출력 비교

Fig. 5 Output waveforms of Hall-effect sensor

1.1.2 속도신호 구현 알고리즘

그림 5와 같이 모터의 회전에 따른 선형 홀센서의 출력 전압값은 기존의 구형과 형태의 홀센서와 달리 정현파 형태로 출력된다. 모터 구동을 위해 A상, B상, C상 3개의 홀센서를 사용하였으며, A상과 B상의 두 신호를 이용하여 그림 6과 같이 A상 좌표값(x1, y1) 및 B상의 좌표값(x2, y2)을 구한다. 그림 6에 나타난 바와 같이 A상을 Y축상의 좌표로 설정하면 B상은 A상과 전기적으로 120도의 위상차를 가지므로 B상이 X축과 이루는 각은 30도가 된다. 위의 관계를 이용한 A상 및 B상의 좌표값은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= 0, y_1 = h_A \\ x_2 &= h_B \times \cos(30^\circ), y_2 = h_B \times \sin(30^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

h_A = A상 홀센서 출력 전압

h_B = B상 홀센서 출력 전압

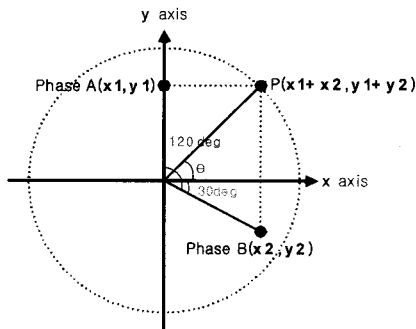


그림 6 홀센서 좌표계

Fig. 6 Coordinate system of linear type Hall-effect sensor

식(2)에서 얻어진 A, B상의 좌표값을 이용하여 합 좌표값을 계산한다. 즉, 합 좌표값은 $P(x1+x2, y1+y2)$ 이 된다. 이 합좌표값 P가 X축과 이루는 각도값 θ 는 식(3)을 통해 얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}(y1+y2)/(x1+x2) \\ \theta &= |\theta| \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$0^\circ \leq \theta < 90^\circ \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 얻어진 θ 는 1사분면 내의 각도이므로 실제의 θ 가 몇 사분면의 각인지를 P좌표값의 부호를 통해 식(5)와 같이 구하게 된다.

$$\begin{aligned} x1+x2 > 0 \quad y1+y2 > 0 \quad & \text{then } \theta = \theta \\ x1+x2 < 0 \quad y1+y2 > 0 \quad & \text{then } \theta = 180 - \theta \\ x1+x2 < 0 \quad y1+y2 < 0 \quad & \text{then } \theta = 180 + \theta \\ x1+x2 > 0 \quad y1+y2 < 0 \quad & \text{then } \theta = 360 - \theta \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 통해 구한 θ 값에서 고려해줘야 할 사항은 경계구간에서의 모터의 움직임이다. 예를 들어 4사분면의 각에서 1사분면의 각으로 변화할 때 식(5)를 통해 얻은 θ 값은 잘못된 값이 얻어지게 된다. 식(6)은 이런 문제를 해결하기 위한 수식이다.

$$\begin{aligned} \text{if } \text{abs}(\theta(k-1) - \theta(k)) > 180 \quad & \text{then} \\ \theta(k-1) - \theta(k) &= \text{abs}(\theta(k-1) - \theta(k)) - 360 \\ &\times (\theta(k-1) - \theta(k)) / \text{abs}(\theta(k-1) - \theta(k)) \end{aligned} \quad (6)$$

3. 제어기 설계

그림 7은 조종날개 구동장치의 전체적인 구성도를 나타낸다. 조종날개 구동장치의 위치제어기로 모델추종 슬라이딩 모드 제어가 사용하였으며, 이를 위한 속도 신호는 앞 절에서 기술한 선형 홀센서를 이용한 속도신호가 사용되었다.

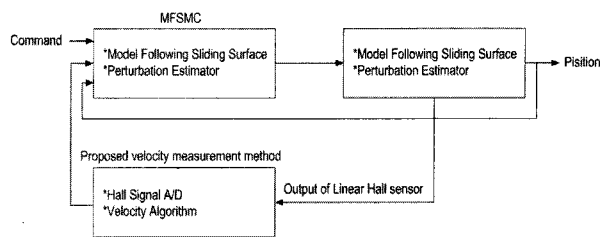


그림 7 전체 구성도

Fig. 7 Overall structure

모델추종 슬라이딩 모드 제어기는 시간지연 신호를 이용한 섭동 추정기를 가진 슬라이딩 모드 제어에 기준모델을 추종하는 기법을 추가한 것이다. MFSMC의 설계는 슬라이딩 면의 결정과 빠른 시간 내에 안정적으로 선정된 슬라이딩 면에 접근하도록 하는 동력학을 설계하는 두 부분으로 나눌 수 있다. 추종오차를 없애기 위하여 적분 형태의 슬라이딩 면을 식(7)과 같이 선정하였다.

$$s = x^{(n-1)} + a_1 x^{(n-2)} + \dots + a_{n-1} x + a_n \int (x - x_r) dt \quad (7)$$

유도된 제어법칙은 식(8)과 같으며, 채터링을 방지하기 위하여 $\text{sgn}(s)$ 는 식(9)와 같이 Slotine이 제안한 포화함수로 대체하였다.

$$u = b^{-1}[-hs - ksat(s) - f - \sum_{k=1}^{n-1} a_k x^{(n-k)} + a_n(x - x_r) - \dot{\Psi}] \quad (8)$$

$$sat(s) = \begin{cases} s/\epsilon, & |s| \leq \epsilon \\ sgn(s), & |s| > \epsilon \end{cases} \quad (9)$$

설계된 모델 추종을 위한 기준모델은 시스템 제원을 감안하여 고유진동수 w_n 과 감쇠비 ζ 를 각각 $30\pi(\text{rad/sec})$ 와 0.8을 사용하였다. 슬라이딩 모드 제어기의 설계 변수로 주로 h 를 가변시키면서 계인값을 적용하였으며, 채터링을 완화시키기 위한 경계층의 두께와 관련된 변수 ϵ 은 0.1로 선정하였다.

4. 실험 결과

4.1 실험 구성

그림 8에는 본 실험에 사용된 실험장치의 전체 구성도를 나타내었다. 실험장치의 세부구성은 디지털 제어기, 구동기, 부하시험장치로 이루어져 있다. 디지털 제어기는 DSP 전용 마이크로프로세서인 TMS320C31을 이용하여 설계하였으며 제어대상인 구동기의 위치를 읽어 들이기 위하여 12bit A/D 변환기를 사용하였다. 구동기는 BLDC 모터와 감속기, 속도 센서인 타코미터, 위치센서인 포텐쇼미터로 구성되어 있다. 부하시험장치는 조종날개의 관성을 모사한 관성부하(Equivalent Inertia), 비행중 받는 공력을 모사하기 위한 스프링부하, 토크 센서로 구성되어 있다.

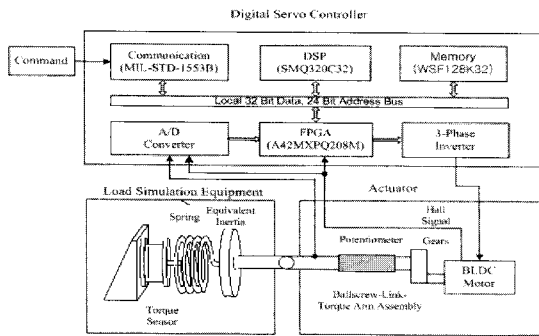
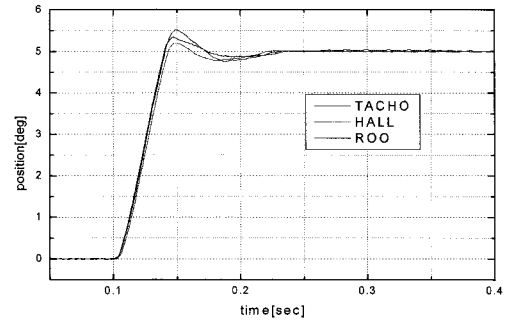


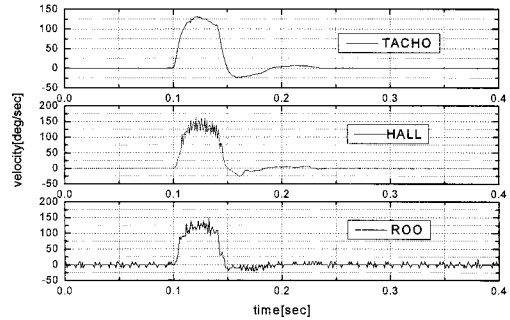
그림 8 실험장치 구성도
Fig. 8 Block diagram of experimental system

4.2 실험 결과

그림 9~11에는 본 논문에서 제안한 속도신호 구현 알고리즘의 속도 추종 특성을 알아보기 위하여 동일한 계인을 갖는 모델추종 슬라이딩 모드 제어기에 대하여 기존의 속도 센서(Tachometer) 및 감소차수관측기(Reduced Order Observer)를 사용한 경우와 비교 시험을 수행하였다. 그림 9는 조종날개의 관성부하(Equivalent Inertia)가 없는 상태에 대한 계단과 응답특성 및 속도 추종 특성을 나타낸다. 그림 10은 조종날개의 관성부하가 장착된 상태에 대한 계단과 응답특성 및 속도 추종 특성을 나타낸다.



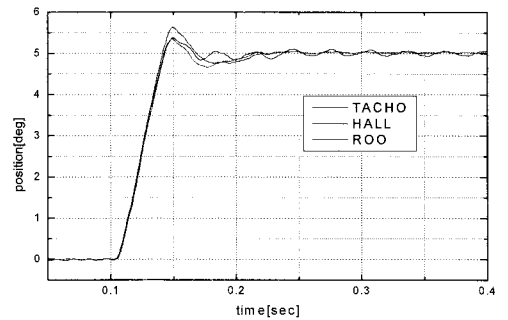
(a) 위치



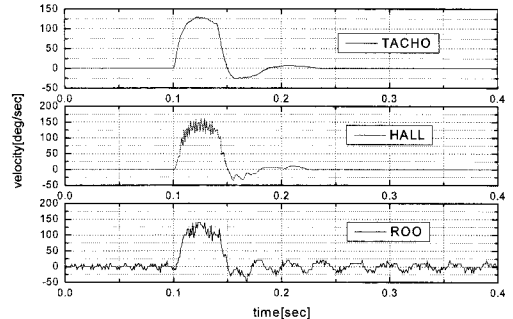
(b) 속도

그림 9 계단과 응답 특성 - 관성부하 미장착시

Fig. 9 Step responses without the fin inertia



(a) 위치



(b) 속도

그림 10 계단과 응답 특성 - 관성부하 장착시

Fig. 10 Step responses with the fin inertia

그림 9에 나타난 바와 같이 조종날개의 관성부하가 없는 경우에는 속도신호의 추정방법에 따라서 그 위치응답이 다르게 나타나지만 모든 경우에 대하여 안정된 위치응답을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 그림 10과 같이 조종날개

관성부하를 장착한 경우에는 속도센서 및 선형 홀센서를 이용한 경우에는 조종날개의 관성부하가 없는 경우와 유사한 응답 특성을 나타내지만, 관측기를 이용한 경우에는 관성 파라미터 변동으로 인해 그 위치응답이 날개 관성이 없는 응답에 비해 다소 진동이 발생함을 알 수 있다.

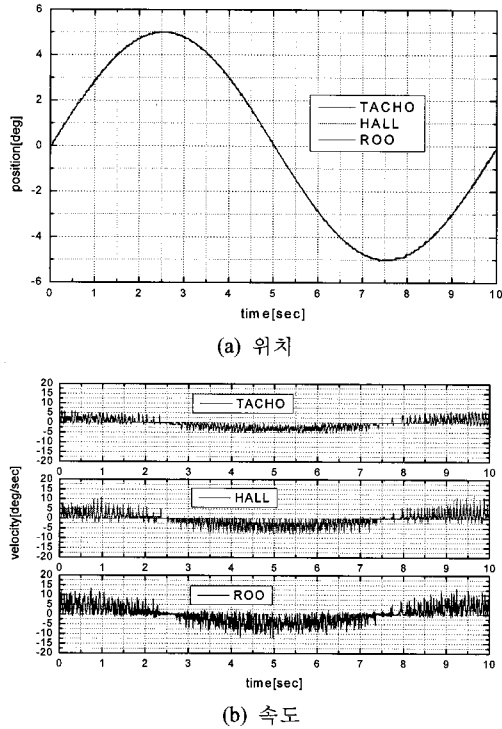


그림 11 정현파 응답 특성 - 관성부하 장착시
Fig. 11 Sinusoidal responses with the fin inertia

그림 11에는 저속에서의 속도추종 특성을 알아보기 위하여 0.1[Hz]의 정현파 응답특성 및 속도신호를 나타낸다. 모든 경우에 대하여 위치응답은 양호하지만, 관측기를 이용한 경우에 진동과 소음이 속도센서와 선형 홀센서를 이용한 경우보다 크게 나타났다.

그림 12~14에는 각각의 속도추종 방법에 따른 슬라이딩 모드 제어기의 게인값을 적절하여 튜닝하여 얻은 실험결과이다. 그림 12~14에서 오버슈트(Overshoot)의 차이는 ROO의 신호 지연 및 부하가 있을 경우에 존재하는 모델오차로 인한 것이라고 할 수 있다.

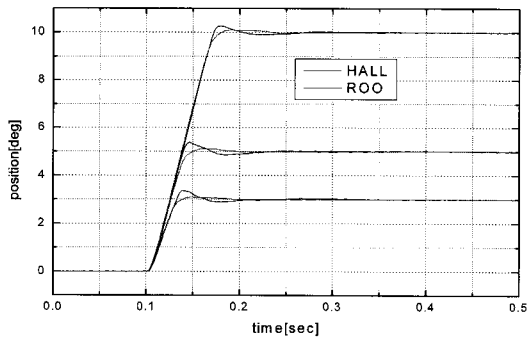


그림 12 계단파 응답 특성 - 관성부하 미장착시
Fig. 12 Step responses without the fin inertia

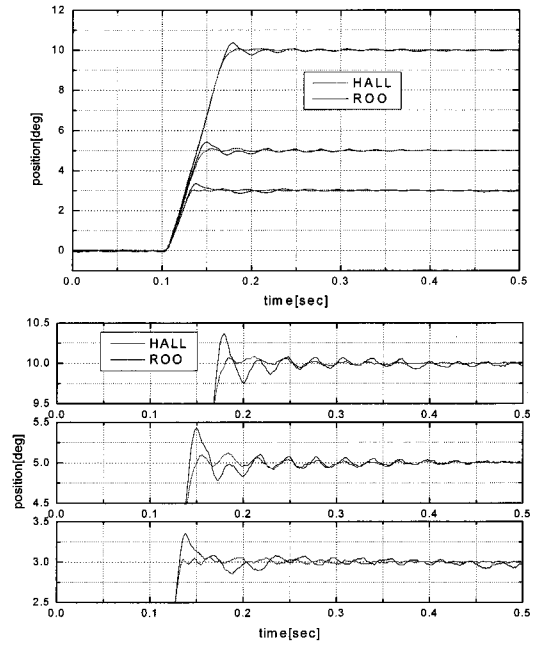


그림 13 계단파 응답 특성 - 관성부하 장착시
Fig. 13 Step responses with the fin inertia

그림 12에는 조종날개의 관성부하가 없는 상태에서의 3, 5, 10도 계단파 응답 특성이다. 조종날개 관성부하가 없는 상태에서는 관측기를 사용한 경우에 홀센서를 이용한 경우보다 오버슈트가 조금 크지만 전체적인 응답특성은 양호함을 알 수 있다. 그러나 그림 13과 같이 조종날개의 관성부하를 장착한 상태에서는 관측기를 사용한 경우에 시스템의 관성 파라미터 변동으로 인한 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 홀센서를 이용한 경우는 응답특성이 양호함을 확인 할 수 있다.

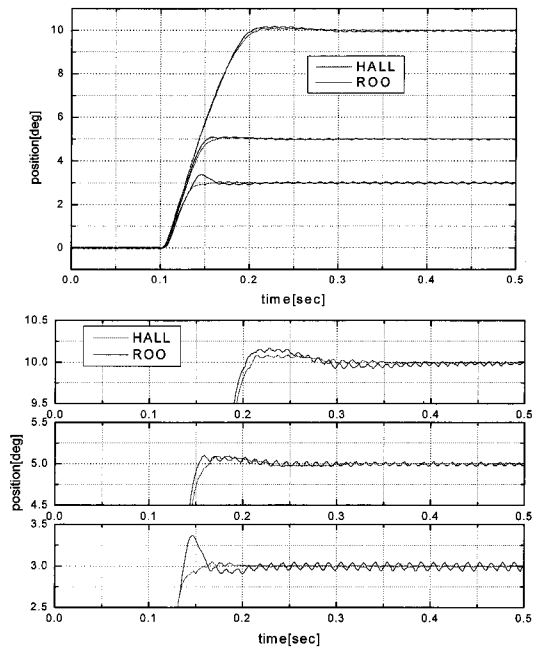


그림 14 계단파 응답 특성 - 스프링부하
Fig. 14 Step responses with the external load

그림 14에는 유도탄의 비행중 조종날개에 작용하는 공력을 스프링 부하로 모사한 상태에서의 계단과 응답 특성으로 관측기를 사용한 경우에 날개 관성부하 상태와 같이 진동 및 소음이 발생하지만, 선형 홀센서를 이용한 경우는 양호한 응답특성이 얻어짐을 알 수 있다.

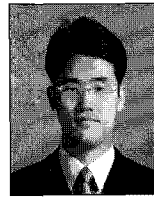
5. 결 론

선형 홀센서를 이용한 모터의 속도신호 구현을 통해 기존의 속도센서(Tachometer)가 갖는 장차 공간문제, 추가적인 비용 발생, 센서 고장 등의 문제점을 극복함과 동시에 기존의 관측기가 갖는 외란 및 파라미터 변동에 취약한 부분을 극복할 수가 있었다. 선형 홀센서를 이용한 속도신호를 강건제어기인 모델추종 슬라이딩 모드 제어기에 적용하여 기존의 속도센서를 대체할 수 있는 만족할 만한 성능을 실험을 통해 확인 할 수가 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Slotine, J. J.E., and Sastry, S. S., "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Applications to Robot manipulators", *Int. J. Contr.*, vol. 38-2, pp. 465-492, 1983.
- [2] Elmali, H. and Olgac, N., "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE) : A New Approach", *Int. J. Contr.*, vol. 56, no. 4, pp. 923-941, 1992.
- [3] Gene F. Franklin, J. David Powell and Abbas Emami-naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems", Addison Wesley, 1995.
- [4] Jang, P. H., and Lee, J. W., "Time Delay Observer: A robust observer for nonlinear plants", *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, vol. 119, pp. 521-527, 1997.
- [5] R. H. Brown, S. C. Schneider, and M. G. Mulligan, "Analysis of algorithms for velocity estimation from discrete position versus time data", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 39, pp.11-19, Feb. 1992

저 자 소 개



구 정 회 (具 晶 會)

1974년 6월 19일생. 2000년 동아대 전기공학과 졸업. 2002년 부산대대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 국방과학연구소 근무

Tel : 042-821-2443

Fax : 042-821-2224

E-mail : 9334931@hanmail.net



송 치 영 (宋 致 榮)

1970년 1월 18일생. 1992년 중앙대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 KAIST 전자전산학과 졸업(박사) 1994년~현재 국방과학연구소 근무

Tel : 042-821-2657

Fax : 042-821-2224

E-mail : chiyoung.song@gmail.com