

# 무인 설비 감시용 레일 가이드 구동장치에서 BLDC 전동기의 위치 제어

배종남<sup>1</sup>, 이동희<sup>†</sup>

## A Position Control of BLDC Motor in a Rail Guided System for the Un-manned Facility Security

Jong-Nam Bae<sup>1</sup> and Dong-Hee Lee<sup>†</sup>

### Abstract

A low-cost BLDC motor with hall sensor is used to drive the position control of a facility security monitoring system in this paper. Low measurable frequency of the hall sensor signal in low-speed regions results in difficulty in obtaining accurate speed detection and position control. To improve system control performance, we propose a variable gain of position controller and stop mode control scheme according to the motor speed and error position with pre-set deceleration time. The proposed stop mode control scheme is activated around the stop position to forcibly move the BLDC motor to the stop position in low speed. In the proposed stop mode, the motor current is controlled by the actual speed with the reference rotating angle. The control performance of the proposed position control is verified through experiments at the actual rail guided facility security monitoring system.

**Key words:** Variable gain position control, BLDC motor, Stop mode control

### 1. 서 론

최근 신재생 에너지를 이용한 발전기술과 마이크로 그리드의 확산으로 인하여 변전설비, 소형 발전설비 등의 다양한 전력설비가 증가하고 있고, 이러한 전력설비는 도심지와 원거리 또는 근거리에서 무인으로 운용되고 있는 경우가 대부분이다. 하천이나 해안가에서 배수 펌프나 발전소 등이 운전되는 다양한 설비의 경우에도 무인으로 운영되는 중요한 설비들에 해당한다. 이러한 무인 설비들은 원격으로 동작 상태 등이 관리되고는 있지만 실제 원격으로 수신되는 정보는 제한적이고 설비내의 각 장비의 상태를 정밀하게 모니터링하기가 매우 어렵다. 일부 설비에서는 원격 CCTV를 활용하

여 영상정보를 통해 무인 설비의 상황을 모니터링 하고 있으나, 설비의 영역이 넓은 경우에는 다수의 CCTV를 설치하여야 하는 문제가 있다. 또한 수신되는 정보는 전체적인 개략적 영상에 해당하여 각 장비의 계측상태 등의 다수의 지점에 대한 근접 영상은 확보하기가 매우 어려운 단점이 있다<sup>[1],[2]</sup>.

최근에는 무인 설비내에 이동형 장비를 사용하여 다수의 지점에 대한 영상정보 등을 모니터링 하는 기술이 적용되고 있고, 이러한 보안장비에는 라인 트래킹(Line Tracking) 방식, 자율 주행 방식 및 가이드 레일 방식 등이 활용되고 있다. 라인 트래킹 방식은 실내의 가이드 라인을 따라서 주행장치가 주행하며 영상 정보를 전달 하는 방식으로 주행 시스템의 설계가 용이하다. 하지만 실내 바닥면이 평탄하지 않은 설비에는 적용이 어렵고 장비의 이동이 있는 경우에는 가이드 라인을 변경해야 하는 단점이 있다. 또한 자율주행 방식의 경우에도 실내 바닥면의 영향을 많이 받게 되며 자율 주행 시스템의 설계가 어려워 비용이 증가하는 단점이 있다. 가이드 레일 방식<sup>[1]</sup>은 설치된 가이드 레일을 따라서 이동하는 방식으로 초기 설치는 다소 어렵지만, 설비 내의 장비의 이동에 큰 영향을 받지 않고 바닥면의 평탄도나 마찰

Paper number: TKPE-2017-22-3-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: leedh@ks.ac.kr, Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University  
Tel: +82-51-663-4693 Fax: +82-51-626-4773

<sup>1</sup> Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University  
Manuscript received Jan. 25, 2017; revised Feb. 1, 2017;  
accepted Feb. 20, 2017

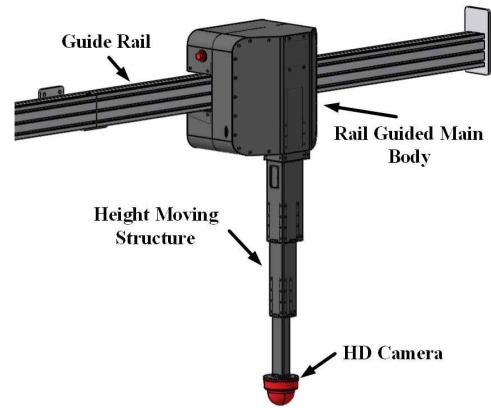
등에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

일반적인 위치 제어<sup>[5]</sup> 시스템의 경우에는 저속에서 위치 제어가 가능해야 하므로 정밀도가 높은 엔코더를 사용하는 서보 전동기를 사용하는 것이 일반적이나, 이러한 경우에는 매우 고가의 시스템으로 설계되어야 한다. 또한 별도의 모션 제어기를 사용해야 하는 어려움이 있고 HD-카메라를 제어하는 제어기와 TCP-IP 통신 모듈을 사용하는 제어기를 필요로 하게 된다. 이에 비하여 BLDC 전동기는 홀센서로 간단히 속도 제어를 수행할 수 있는 저가형 시스템에 매우 적합한 장점이 있다. BLDC 전동기의 경우에는 홀센서의 정밀도로 인하여 저속 운전이 매우 어렵고 이로 인하여 위치 제어가 매우 어렵다는 단점이 있다<sup>[6-11]</sup>.

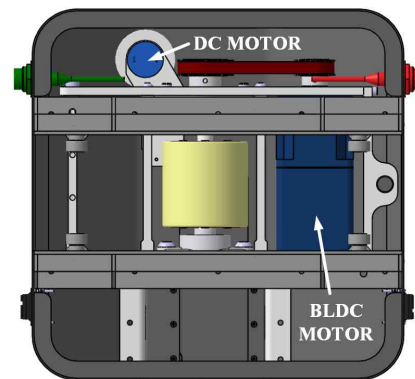
본 논문에서는 가이드 레일 방식의 원격 모니터링 장치에서 주행용 전동기로 엔코더를 사용하지 않는 홀센서 방식의 BLDC(Brushless DC) 전동기를 사용하여 설계하고, 원격 모니터링을 위해 설정된 다수의 프리셋(Pre-set) 위치에 안정적으로 도달하기 위한 위치 제어 방식을 제안하고 있다. 제안된 방식에서는 레일을 주행하는 함체(Moving body)의 이동 구간에 따라 부드러운 운전과 홀센서를 이용한 BLDC 전동기의 저속 운전의 어려움을 고려한 연구를 하였다. 이를 위해 가속과 감속을 자동으로 설정하는 가변이득 방식의 위치제어기와 정지 구간에서 진동 특성에 따른 저속 강제 주행모드를 수행하여 정지하는 방식과, 정지 위치 부근에서 오픈루프 방식의 속도제어와 연동되는 전류 제어로 프리셋 위치에 정밀하게 도달하는 방식을 제안하고 있다. 제안된 가변이득 제어기는 함체의 부드러운 감속을 통한 정지로 기계적인 진동을 억제하고 설정된 정지시간에 도달하도록 하며, 진동기의 현재 속도와 잔여 펄스로부터 감속시간에 필요한 지령속도를 발생하기 위해 위치 제어 이득이 가변적으로 동작하는 방식이다. 또한 정지 제어 모드는 홀센서 기반의 BLDC 전동기가 저속 정지위치 부근에서 정상적으로 저속 제어가 어려워 이로 인한 위치 제어에 진동이 발생하는 것을 억제하기 위해서 지령 속도로 연산되는 전류값을 통해서 오픈루프의 속도제어를 위한 전류 제어로 강제로 정지위치까지 이동시키는 방식을 적용하였다. 제안한 정지모드 제어에서 속도의 변동을 억제하기 위해서 보상전류 이득을 포함하여 안정적으로 정지위치에 도달하도록 하였다. 제안된 방식을 적용하여 실험을 하였으며 실제 함체의 주행에서 위치 오차가 발생하지 않고 안정적인 제어성능을 가지는 것을 실험을 통해 확인하였다.

## 2. 레일 가이드 주행 시스템의 설계

제안된 레일 가이드 주행 시스템은 원격모니터링 장치에서 요구된 지령 사항에 따라 구동 함체의 위치 및 카메라의 정보를 송수신하기 위한 주제어기, 지정된 위



(a) Rail guided monitoring system



(b) Inside of the moving body

Fig. 1. Rail guided system.

치로 함체를 이동시키는 주행용 BLDC 전동기 및 주행 제어기, HD 카메라를 상하 방향으로 이동하여 감시범위를 확장하기 위한 DC 전동기와 제어기 및 HD 카메라 제어부로 구성된다. 이때 주 제어기는 3개의 채널로 구성되며 원격 모니터링 장치와는 TCP-IP 기반의 통신<sup>[2]</sup>으로 위치 정보와 함체의 실시간 상태를 송수신하고, 주행제어기와는 구동 함체를 움직이는 BLDC 전동기의 지령 위치와 동작을 제어하며, DC 전동기 제어기와는 카메라의 상하 위치 동작을 제어하게 된다.

주행 제어기는 TMS320F28035로 설계된 BLDC 전동기 제어부로 설계하여 함체가 설정된 위치로 부드럽게 주행하기 위한 알고리즘이 적용되어 동작하게 된다.

그림 1(a)는 본 논문에서 설계한 레일 가이드 기반의 주행 장치를 나타내고 있다. 그림 1(a)에서 시스템은 설치된 레일 가이드 위를 움직이는 구조로 되어 있으며 레일 위를 움직이기 위한 BLDC 전동기와 HD 카메라의 높이 조절을 위한 DC 전동기가 내장된 구동 함체와 감시를 위한 HD 카메라 그리고 HD 카메라의 전방위 감시를 위해 필요한 높이 조절용 축으로 구성되어 있다. 그림 1(b)는 레일 가이드 시스템의 구동 함체를 나타내고 있다. 함체 내부에는 BLDC 전동기 제어를 위한 주행 제어기와 DC 전동기를 제어하기 위한 제어기, 그리고 HD 카메라와 원격 모니터링 장치와의 통신 및 주행

제어기와 DC 전동기 제어기 및 카메라 제어를 위한 주 제어기가 배치되어 있다.

구동 함체의 중앙에는 설치된 레일 위를 움직이는데 필요한 레일 무브 롤러가 설치되어 있고 타이밍 벨트에 연결된, 함체의 우측에 위치한 BLDC 전동기에 의해 움직이게 된다. 설치된 레일 위에서 이동 시 레일과의 마찰로 인한 진동을 최소화하기 위해 레일 무브 베어링이 결합되어 있으며 양쪽 상단부분에 근접센서를 부착하여 벽면에 접근할 경우 벽면과의 충돌 위험성을 감소시켰으며 가이드 레일의 양쪽 벽면 기준 위치 오프셋을 설정하여 시스템의 위치 정확성을 높였다. 또한 주행 중 함체의 주변에 사람이나 물체가 존재할 경우 사고 발생의 위험성이 높아지게 되므로 함체의 하단부 양쪽 측면에 적외선 센서를 부착하였다. 적외선 센서는 주행 중 함체 주변의 접근하는 물체의 거리를 상시적으로 검출하여 함체와 충돌할 위험성이 있다고 판단되는 거리까지 접근할 경우 함체를 일시적으로 정지하는 동작을 수행하게 된다. 그리고 상단 좌측부분에는 HD 카메라의 높이를 조절을 위한 DC 전동기가 설치되어있고 HD 카메라와 연결된 벨트에 의해 HD 카메라의 높이가 조절되어 원하는 장소의 영상 정보를 얻을 수 있도록 하였다.

### 3. 제안된 위치 제어 방식

#### 3.1 일반적인 위치 제어 시스템

BLDC 전동기에서 정밀한 엔코더 등을 사용하는 경우에는 속도 검출의 정밀도가 높아져서 비교적 저속의 운전이 안정적으로 가능하게 되지만 홀센서를 기반으로 속도를 제어하는 경우에는 저속 영역에서 속도 측정과 제어가 어려운 단점이 있다<sup>[3],[4]</sup>. 특히 저속 영역의 속도 검출 성능을 향상시키기 위해서 관측기를 사용한 수학적 연산방식을 도입한다 하더라도 측정 오차가 한 주기에 6번씩 검출되기 때문에 실제 관측기의 성능을 만족하기가 어렵고, 저속에서의 실제 속도는 전기적 1회전 구간에서도 변동이 심하기 때문에 관측기 기반으로 저속의 영역에서 운전이 매우 어렵다. 또한 홀센서의 듀티비가 정확하지 않은 경우에는 한주기에 3번의 구간에서만 속도 측정이 가능하기 때문에 실제 측정 속도와 관측기 추정속도의 오차로부터 관측기의 추정속도에 수렴시키는 것이 매우 어려워진다. 따라서 기존의 엔코더를 사용하여 위치를 결정하기 위해 폐루프 위치제어를 사용하는 경우에는 결정위치 부근에서 저속제어의 문제로 인하여 떨림과 진동이 발생하는 문제가 있다. 또한, 레일의 주행에서 실제 위치는 전동기의 홀센서를 기반으로 결정되기 때문에 레일 가이드에서 슬립이 발생하는 경우 위치 오차가 발생하게 되는 문제가 있다.

제안된 위치 제어 방식에서는 설정위치까지 이동하는 경우에 저속 및 고속 제한에 따른 속도 제어모드로 가속-정속-감속 운전을 수행하고, 위치 결정구간에서는 최

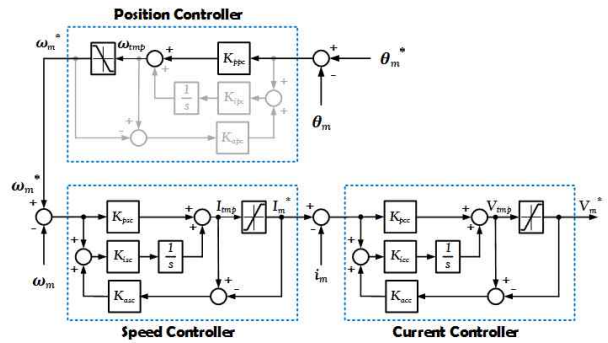


Fig. 2. Conventional position control block diagram.

저속도로 강제 주행하여 결정위치에 도달하도록 하는 페루프-하프 오픈루프(Half-Open loop) 제어를 하도록 한다. 또한 위치 결정 모드에서 주행 장치가 안정적으로 구동하도록 하기 위한 전압 보정기를 추가하여 설정위치에 도달하는 방식을 제안하고 있다.

그림 2는 일반적인 위치 제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 2에서 위치제어기는 최상위에 위치제어기가 구성되고 위치제어기의 출력은 속도 지령을 출력하며 이에 따른 내부 속도제어기와 전류제어기가 구성되어 있다. 위치제어기는 제어기의 구성 형태에 따라서 단순한 비례제어기로 구성하는 경우와 PI 제어기로 구성되는 경우가 있는데, 이는 시스템의 구성에 따라 다르게 설계될 수 있다. 위치제어기에서 위치 오차에 따라 토크 제어기가 바로 연계되는 제어기도 제시되고 있지만, 가이드 레일을 주행하는 함체의 경우에는 주행 가속도의 변동이 큰 경우에는 함체의 진동이 심해진다. 이에 따라 함체의 상하부로 이동하는 HD-카메라 장치의 진동이 심해져서 정확한 영상 정보의 획득이 어려워진다. 따라서 가속도를 제한하여 진동을 억제하는 위치 제어기의 경우에는 내부에 속도제어기를 포함하는 시스템의 설계가 일반적이다.

비례제어기로 구성되는 일반적인 위치 제어 시스템의 속도 지령은 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\omega_m^* = K_{ppc} \cdot (\theta_m^* - \theta_m) \tag{1}$$

단,  $\omega_m^*$  은 속도 지령[rad/s]이며,  $\theta_m^*$  은 위치 지령 펄스 수이고,  $\theta_m$  은 실제 위치 펄스이며,  $K_{ppc}$  는 위치 제어기의 비례이득을 나타낸다. 제어이득  $K_{ppc}$  는 지령 펄스 수에 따라, 실제 전동기가 정해진 시간 이내에 해당되는 위치에 도달하기 위해 결정되는 계수이며, 위치 펄스의 오차가 낮은 경우의 지령속도  $\omega_m^*$  는 매우 저속의 지령속도로 된다. 실제 위치 제어기로 사용하는 서보 드라이브의 경우에는 고정도의 위치 엔코더를 사용함으로써 저속의 지령속도에 대한 운전과 제어가 가능하다. 하지만 BLDC 전동기에서 홀센서를 사용하는 경우에는

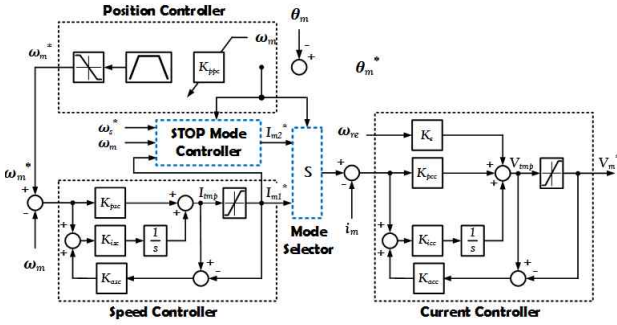


Fig. 3. The proposed position control block of a BLDC motor.

한 전기적 주기에 6개의 신호만을 검출할 수 있으므로 10[rpm]의 운전이 요구되는 경우에 검출 신호는 1초에 해당하게 되며 실제 홀센서의 검출 펄스만으로는 위치 결정 구간에서의 속도 검출과 제어가 매우 어려워진다.

위치 펄스의 오차가 커서 일정 속도 이상이 되는 경우에는 내부의 속도제어기가 정상적으로 동작할 수 있으며, 이에 따라 전동기의 토크를 결정하는 속도 제어기의 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$I_m^* = K_{psc} \cdot \Delta\omega_m + K_{isc} \int (\Delta\omega_m + K_{asc}(I_{tmp} - I_m^*)) \cdot dt \quad (2)$$

단,  $K_{psc}$ ,  $K_{isc}$  및  $K_{asc}$ 는 속도제어기의 비례이득, 적분이득 및 Anti-windup 제어기 이득을 나타내고 있으며,  $\Delta\omega_m$ 은 속도 오차를 나타낸다.  $I_{tmp}$ 는 제어기에서의 지령제한을 거치지 않은 지령전류이며,  $I_m^*$ 은 전동기의 지령 전류를 나타내고 있다.

### 3.2 제안된 위치 제어 시스템

#### 3.2.1 가감속 패턴 및 가변이득 위치 제어기

그림 3은 본 논문에서 제안하는 홀센서 기반의 BLDC 전동기의 위치결정 제어기의 구조를 나타내고 있다.

일반적인 고정이득 및 가변이득 제어 방법<sup>[12]</sup>은 BLDC 전동기가 정지 상태에서 최대속도에 도달하는 동안에 제어이득을 변화하여 속도제어를 하는 방식으로 감속 및 정지구간에서는 적용하기 어려우며 특히 지령된 위치로 이동하는 경우 거리에 따라 도달해야하는 시간도 달라지기 때문에 적합하지 않다. 또한 가이드 레일에서는 가속, 정속, 감속의 세 구간이 있어야만 정확하고 안정적인 위치 제어가 가능하다. 따라서 제안하는 방식에서는 위치 제어기의 제어이득  $K_{ppc}$ 가 위치 오차와 속도에 따라 가변적으로 적용되며, 지정 위치에 도달하기 위해서 기존의 속도 제어기로 속도를 제어하다가, 위치 펄스의 오차가 적정 범위 이내에 도달하면 본 논문에서 제안하는 정지 모드 제어기(Stop Mode Controller)의 출력으로 지령전류를 제어하여 정지위치에 도달하게 하는

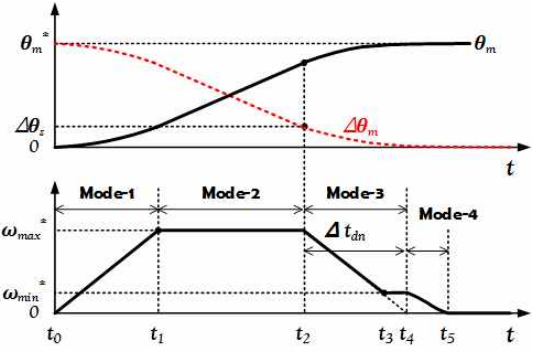


Fig. 4. The acceleration and deceleration pattern of the proposed position control.

방식이다. 제안된 방식을 적용할 경우 가속 및 감속하는 전 구간에서 부드러운 주행이 가능하며 슬립 및 진동의 감소로 정확한 위치제어와 고품질의 영상을 얻을 수 있다. 그림 3에서 모드 선택 스위치(Mode Selector)는 위치 오차에 따라 속도제어기와 정지모드 제어기의 출력을 선택적으로 전류제어기로 연결하여 가감속 속도에 따라 주행한 함체를 정지시키도록 하고 있다.

그림 4는 제안된 위치결정 제어기에서의 가감속 속도 패턴을 나타내고 있다. 그림 4에서 Mode-1은 주행함체의 진동을 고려한 가속 구간이며, Mode-2는 정속구간에 해당되고, Mode-3은 주행하는 함체가 서서히 감속하여 정지위치까지 주행하는 감속구간을 나타내고 있고, Mode-4는 제안된 시스템에서의 정지 모드 제어기 제어 구간을 나타내고 있다.

그림 4에서  $\omega_{max}^*$ 는 주행 속도의 최대값을 나타내고 있는데, 이는 지령 위치의 크기에 따라서 현재 프리셋 위치에서 다음 프리셋 위치로 이동할 때 함체의 진동을 고려하여 정속구간이 확보될 수 있도록 하기 위해 적용하고 있다.

본 논문에서 함체를 구동하는 BLDC 전동기의 정속구간 최대 속도는 다음과 같이 결정된다.

$$\omega_{max}^* = K_{\theta} \cdot \theta_{max}^* \quad (3)$$

$$\theta_{max}^* = \max(|\theta_{LMT}^*|, |\Delta\theta_m|) \quad (4)$$

$$\Delta\theta_m = \theta_m^* - \theta_m \quad (5)$$

단,  $K_{\theta}$ 는 최대 이동 위치  $\theta_{max}^*$ 에 대한 비례 이득이며,  $\theta_{LMT}^*$ 는 지령위치  $\theta_m^*$ 의 제한값을 나타내고 있다. 본 논문에서는 지령위치  $\theta_m^*$ 이 작은 경우에는 속도 지령의 제한값  $\omega_{max}^*$ 가 제한되어 가속 후 정속을 유지하는 구간이 발생하도록 설계하였다.

본 논문에서 가속구간의 Mode-1에서는 1초당 1000[rad/s]의 속도가 가속되도록 가속도를 제한하고 있으며, 최대 속도 1500[rad/s]에 도달하는 시간이 1.5[sec]



에 해당하도록 설계하였다. 이는 함체의 주행을 고려하여 1분에 최대 15[M] 이상의 주행을 고려한 가속도 제한값에 해당한다.

Mode-2의 정속구간은 본 논문에서 속도 지령을 결정하는 가변속 비례이득  $K_{ppc}$  에 의해 결정되는데, 이는 위치 오차가 감소함에 따라 주행속도를 정해진 시간 이내에 적정위치에 도달하도록 감속 구간을 주행하도록 하기 위해 매우 필수적이다. 감속구간에서 속도가 일정하게 감속한다고 가정하게 되면, 감속구간동안 변동하는 위치는 다음과 같다.

$$\Delta\theta_{dn} = \frac{1}{2} \cdot \omega_m \Delta t_{dn} \quad (6)$$

이상적인 경우에, 위치 펄스 오차에 대하여 이 오차를 보상하기 위한 지령 속도는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\omega_m^* = \frac{2}{\Delta t_{dn}} \cdot (\theta_m^* - \theta_m) \quad (7)$$

하지만 실제 속도는 감속 지령 속도에 대비하여 오차를 가지게 될 수 있고, 속도가 감속하면서 위치 오차와 현재 속도에 따른 감속 시간도 실시간으로 변동하게 된다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 감속 속도에 따라, 속도지령을 결정하는 위치 제어기의 이득을 다음과 같이 가변하여 적용함으로써 정해진 감속시간  $\Delta t_{dn}^*$  에서 안정적으로 감속될 수 있도록 가변이득 제어기를 설계하였으며 제안된 가변이득과, 위치 제어기의 출력은 다음과 같이 결정된다.

$$K_{ppc(k)} = \frac{K_{ppc}}{\omega_m(k) \cdot \Delta t_{dn}^*} \quad (8)$$

$$\omega_m(k)^* = K_{ppc(k)} \cdot (\theta_m^* - \theta_m) \quad (9)$$

단,  $\Delta t_{dn}^*$  은 설정된 감속시간이며,  $K_{ppc}$  는 고정된 위치제어기의 이득이고,  $K_{ppc(k)}$  는 샘플링 시간에서 결정되는 가변제어 이득을 나타낸다. 실제 속도 지령은 그림 4에서 보이는 바와 같이 BLDC 전동기의 최저 제어 속도 제한과 함체의 주행을 고려한 최대 제어 속도 범위에서 제한되어 적용되었다.

### 3.2.2 정지 모드 제어기

본 논문에서 제안하는 정지모드 제어기는 그림 4에서 Mode 4에 해당하며, 위치 오차가 감소하여 지령속도가 일정속도 이하로 되면 실제 홀센서를 사용하는 BLDC 전동기의 경우 저속구간에서 속도 제어가 매우 어려우므로 지령속도는 제한된 최저속도  $\omega_{min}^*$  으로 제한되어

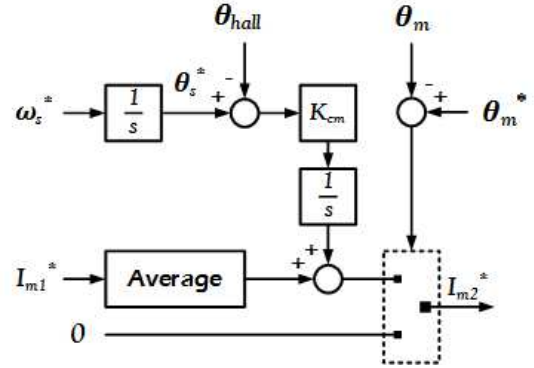


Fig. 5. The proposed stop mode controller.

TABLE I  
MOTOR SPECIFICATIONS

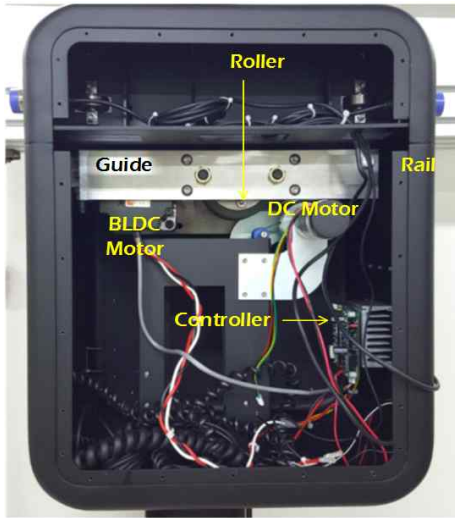
Parameter	Value	Unit
Rating Power	100	W
Rating Voltage	24	V
Rating Torque	6.0	Nm
Rating Speed	2500	rpm
Rotor Inertia	$0.611 \times 10^{-4}$	kgm <sup>2</sup>
Gear Ratio	50 : 1	-

유지된다. 본 논문에서 제한된 최저속도는 20[rad/s]로 제한하였다. 이 구간에서 지령전류  $I_m^*$  이 평균치로 연산되어, 위치오차가 설정된 오차 범위 이내에 오게 되면 속도 제어모드에서 강제 주행 모드로 전환된다. 강제 주행모드에서는 설정된 최저속도  $\omega_s^*$  의 적분에 의해 정지 상태에 도달하기 위한 전기각  $\theta_s^*$  가 결정되고, 홀센서 신호  $\theta_{hall}$  과 비교하여 최저속도  $\omega_{min}^*$  으로 주행하기 위해 사용된 지령전류  $I_{m1}^*$  의 평균값에 보정을 하여 강제 주행을 하게 된다. 이때 홀센서의 신호 변화가 정지상태의 지령 전기각  $\theta_s^*$  보다 빠르거나 늦게 되면, 보정 전류를 가감하여 서서히 정지시키게 되고, 위치 펄스 오차가 0이 되면 정지하여 동작이 완료된다.

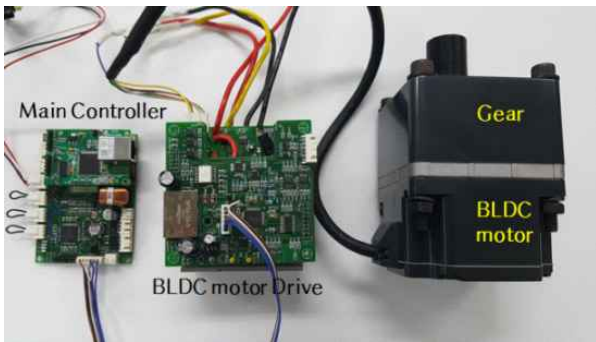
본 논문에서 정지 모드 제어기는 홀센서 신호 기준으로 8펄스 이내의 오차 범위에서 강제 주행 모드로 전환되도록 설계하였으며, 보정전류 이득  $K_{cm}$  은 매우 낮은 이득으로 하여 서서히 정지하도록 설계하였다.

## 4. 실험 결과

제안된 위치제어 시스템을 검증하기 위해서 실제 가이드 레일 주행 함체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 전동기는 기어가 장착된 100[W] BLDC 전동기로 구체적인 사양은 표 1과 같다.



(a) System configurations of the body



(b) BLDC motor and motor drive

Fig. 6. Designed rail guided moving system and driving motor.

그림 6은 본 논문에서 설계한 전체 제어 시스템의 사양을 나타내고 있으며, BLDC 전동기의 제어장치는 TI사의 TMS320F28035로 설계하였고, 전류는 ACS-712 센서로 검출하여 DSP의 12비트 ADC로 검출한다.

합체의 주제어기는 외부 원격 모니터링 시스템에서 카메라의 위치와 합체의 주행위치를 결정하는 데이터를 TCP-IP 통신으로 받아 본 논문에서 설계된 주행 제어기의 통신으로 데이터를 전송한다. 그리고 주행 제어기는 위치의 상태와 주행 상태를 주제어기로 전송하여 이를 다시 외부 원격 모니터링 시스템으로 전송하는 구조이다. 그림 6에서 설계된 구동 제어기와 주행 전동기는 레일을 주행하는 합체 내부에 위치하며, 합체 외부의 HD-카메라는 상하로 이동할 수 있도록 직류 전동기의 위치 제어를 통해서 제어하게 된다.

원격 모니터링 시스템은 주제어기(Main controller)와 TCP-IP로 통신을 하여 HD-카메라의 영상 및 주행 장치의 상태를 모니터링하고 주행하려고 하는 위치를 설정하게 된다.

그림 7과 그림 8은 기존의 위치제어 방식을 적용한 경우와 제안된 위치 결정 방식을 적용한 경우에 지령위

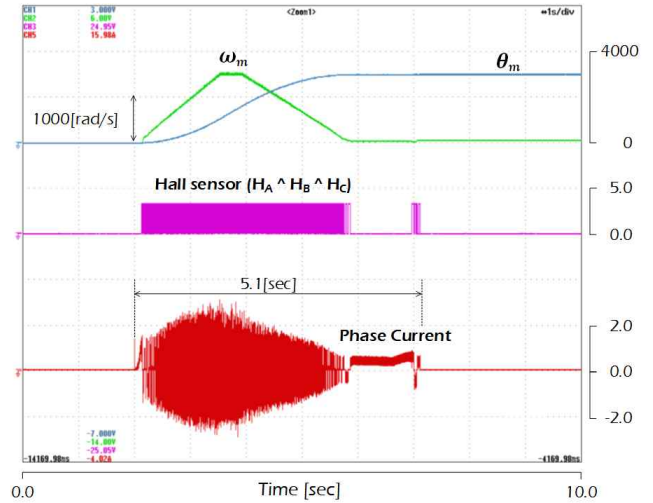


Fig. 7. Experimental result of a conventional position controller.

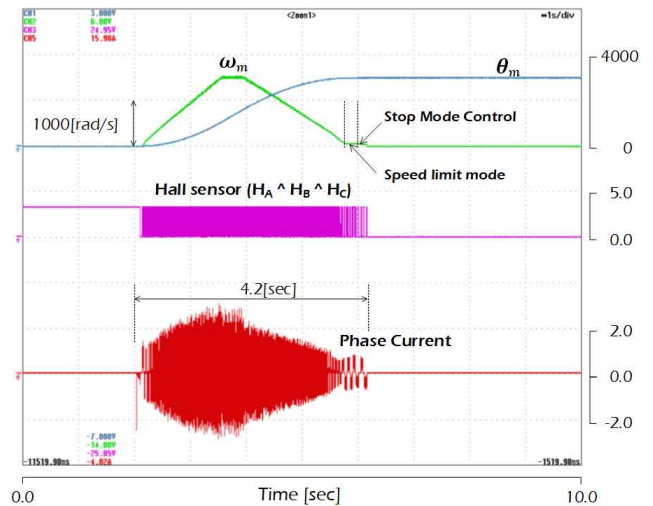


Fig. 8. Experimental result of the proposed position control scheme in high speed range.

치가 3000펄스인 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. 주행 전동기의 최대 속도는 1500[rad/s]로 제한되어 동작하게 되며 이는 최대속도 3580[rpm]에 해당된다. 주행상의 속도 제어를 수행하는 최저속도는 75[rad/s]로 동작하게 되며, 잔여 위치 펄스가 8펄스 이하에 해당되면 제안된 정지 주행 모드로 동작하게 된다. 위치 지령 펄스는 전동기의 홀센서를 조합한 신호로 전기적인 1회전당 6펄스가 발생하는 위치검출 신호를 통해서 위치 제어를 수행하게 된다.

그림 7에서 기존의 위치 제어 방식에서는 저속에서 잔여 펄스가 남은 경우에 저속의 제어가 매우 어려워 정지구간에서 흔들림이 발생하게 되며 이로 인하여 최종 정지 위치에 도달하는데 시간이 걸리게 되고, 작은 진동이 발생하고 있다. 실험의 중간과형은 각 상의 홀센서 신호를 조합한 실제 위치 펄스의 형상을 나타내고 있으며 실험에서 저속 이후 구간에서 정지위치에 도달

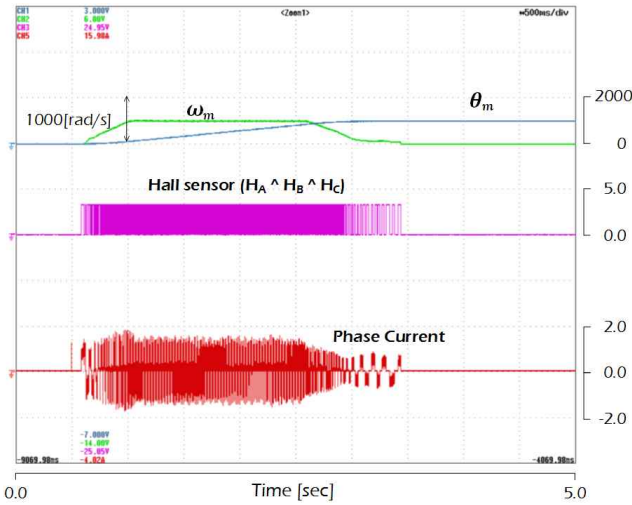


Fig. 9. Experimental result of the proposed position control scheme in middle speed range.

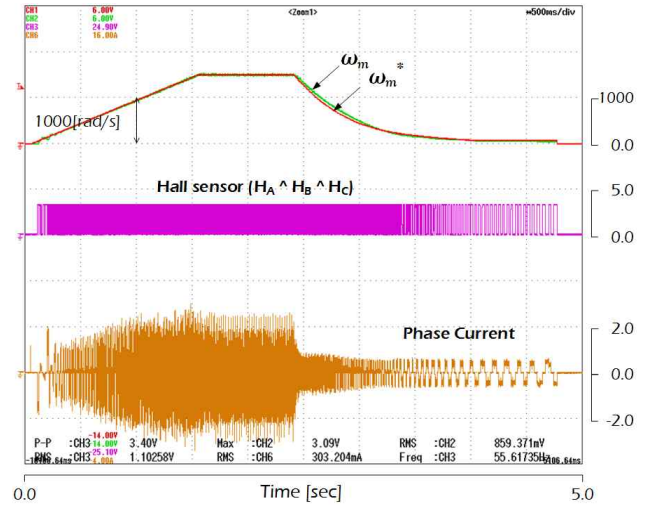
하는데 어려움이 있다. 이에 비하여 그림 8의 제안된 방식에서는 정지 위치 근처에서 제안된 정지 모드 제어를 통해서 빠르게 정지 위치에 도달하는 장점이 있다.

그림 9는 제안된 위치 제어 모드에서 위치 지령이 1000펄스로 짧은 거리를 주행해야 하는 경우에 있어서 지령 속도가 위치 지령 펄스에 따라 낮은 속도로 제한되어 운전되는 경우의 실험결과를 보이고 있다. 제안된 방식에서는 실제 주행 거리에 따라서 최대 속도를 제한하여 운전함으로써 함체가 레일을 주행할 때 안정적인 운전이 가능하도록 하였다.

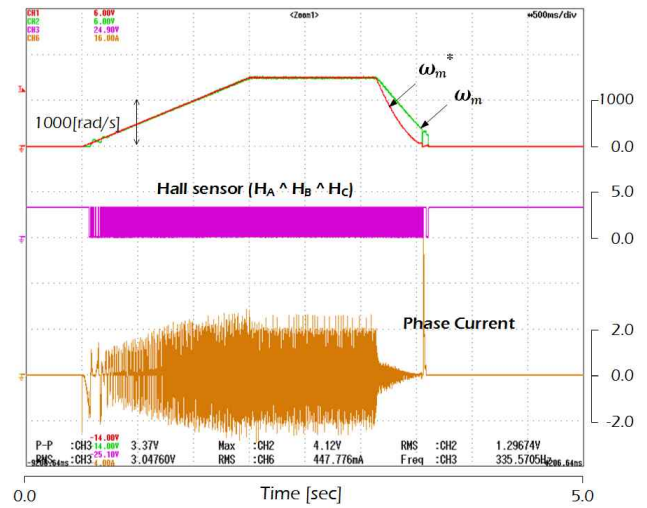
그림 10과 그림 11은 고정된 제어이득을 가진 경우와 제안된 가변 제어 이득의 경우의 실험결과를 나타내고 있다. 그림 10의 고정된 제어 이득을 가진 경우의 실험 결과에서 제어 이득이 낮은 경우에는 감속 시간이 매우 길어지게 되고, 제어 이득이 높은 경우에는 정속주행 시간이 길어지게 되어서 감속 시간이 급격히 짧아지게 되므로 이로 인하여 함체의 관성으로 인하여 실제 속도가 지령을 추종하지 못하게 되고 급속 정지에 따른 진동이 발생한다. 반면 그림 11에서 위치제어 이득은 위치의 잔여 펄스와 현재 속도 및 감속 시간을 고려하여 제어 이득이 가변하게 되므로 실제 속도가 안정적으로 감속하고 있음을 보이고 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 간단한 홀센서를 기반으로 하는 BLDC 전동기를 사용하는 레일 가이드 기반의 주행 장치에서 안정적인 위치 제어를 수행할 수 있는 제어 방식을 제안하고 있다. 기존의 고정밀도 엔코더 기반의 서보 전동기를 사용하는 위치 제어기와 달리, 홀센서 기반의 BLDC 전동기의 경우에는 저속 운전이 매우 어렵고 이로 인하여 정지 위치 부근에서 정지위치 오차가 발생하



(a) Experimental result at  $K_{ppc} = 2.0$



(b) Experimental result at  $K_{ppc} = 4.0$

Fig. 10. Experimental result of the fixed gain mode.

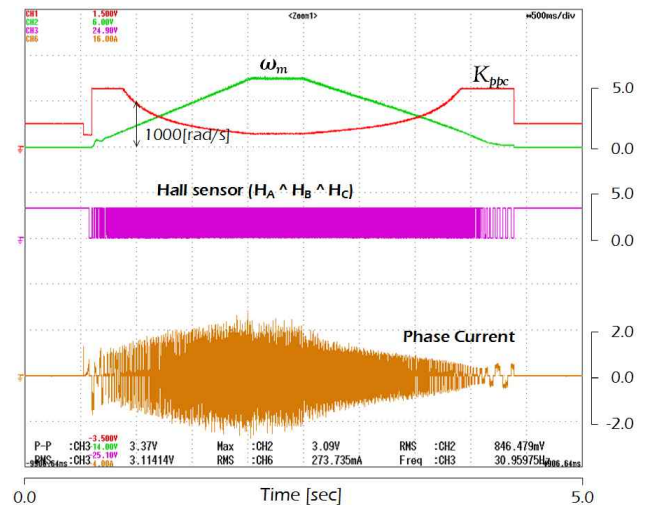


Fig. 11. Experimental result of the variable gain in the proposed scheme.

거나 정지위치에 도달하는 시간이 길어지는 문제가 발생하게 된다. 제안된 방식에서는 레일을 주행하는 합체의 진동을 억제하기 위해서 일정한 기울기의 가속 패턴을 가지고 주행하며, 감속 패턴은 잔여 위치 펄스에 따라서 위치 제어 이득이 가변적으로 변동하여 정지위치 부근에서 안정적으로 정지할 수 있는 위치 제어 방식이다. 또한 저속에서 홀센서로 검출하는 속도 정보는 홀센서의 신호 변화에 의존적이므로 잔여펄스를 강제 저속 주행 모드로 동작시켜 정지위치에 도달하게 하는 방식이다. 저속으로 주행하는 모드에서는 잔여펄스와 실제 위치펄스의 시간차이에 따라서 전압을 가변시켜서 부하의 변동에도 안정적으로 정지할 수 있도록 하였다.

제안된 방식은 홀센서 기반의 BLDC 전동기를 사용하는 실제 합체 주행에서 안정적이고 위치 오차가 발생하지 않는 제어 성능을 실험을 통해 검증하였다.

본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임 (NRF-2016H1D5A1910536)

## References

- [1] J. H. Kim, M. S. Jeon, K. T. Jeon, S. H. Lee, and D. H. Hong, "Development of horizontal locomotion robot using rail mechanism for H-beam structure," *JKSPE*, Vol. 30, No. 4, pp. 421-426, Apr. 2013.
- [2] M. Yoon, J. W. Chang, "Design and implementation of an advanced cattle shed management system using a infrared wireless sensor nodes and surveillance camera," *JKCA*, Vol. 12, No. 10, pp. 22-34, Oct. 2012.
- [3] Y. S. Jin, H. K. Shin, H. W. Kim, H. S. Mok, and K. Y. Cho, "Position controller for clutch drive system of PHEV(Plug in Hybrid Electric Vehicle)," *Transactions on KIPE*, Vol. 17, No. 2, pp. 166-173, Apr. 2012.
- [4] K. W. Lee, "Current-sensorless maximum torque per ampere control for a surface mounted permanent magnet synchronous motor with low-resolution position sensor," *Transactions on KIPE*, Vol. 14, No. 2, pp. 204-210, June 2009.
- [5] S. J. Kang, J. S. Kim, S. K. Sul, and D. K. Kim, "Precise position control with a low cost BLDCM drive," *Transactions on KIEE*, Vol. 44, No. 4, pp. 447-452, Apr. 1995.
- [6] H. W. Kim, H. K. Shin, H. S. Mok, Y. K. Lee, and K. Y. Cho, "Novel PWM method with low ripple current for position control applications of BLDC motors," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 5, pp. 726-733, Sep. 2011.
- [7] S. Y. Kim, H. G. Byun, B. J. Ko, and S. Y. Park, "An improved high-resolution rotor position estimation using gain scheduled speed observer in PMSM drives with hall-effect position sensors," *Transactions on KIEE*, Vol. 59, No. 10, pp. 1809-1815, Oct. 2010.
- [8] T. D. Batzel and K. Y. Lee, "Slotless permanent magnet synchronous motor operation without a high resolution rotor angle sensor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 15, No. 4, pp. 366-371, Dec. 2000.
- [9] A. Yoo, S. K. Sul, D. C. Lee, and C. S. Jun, "Novel speed and rotor position estimation strategy using a dual observer for low-resolution position sensors," *Journal of Power Electronics*, Vol. 24, No. 12, pp. 2897-2906, Dec. 2009.
- [10] N. Samolyenko, Q. Han, and J. Jatskevich, "Balancing hall-effect signals in low-precision brushless DC motors," in *Proc. IEEE APEC Conf. Expo.*, pp. 606-611, May 2007.
- [11] J. H. Song, "A rotor position estimation of brushless DC motors using neutral voltage compensation method," *Transactions on KIPE*, Vol. 9, No. 5, pp. 491-497, Oct. 2004.
- [12] S. Y. Yun, J. Lee, "Speed control of permanent magnet brushless DC motor using variable gain PI controller," *Transactions on KIEE*, Vol. 62, No. 9, pp. 1234-1239, Sep. 2013.



### 배종남(裴鐘男)

1991년 6월 20일생. 2016년 경성대 메카트로닉스공학과 졸업. 2016년~현재 경성대 대학원 메카트로닉스공학과 석사과정.



### 이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 선임연구원. 2005년~현재 경성대 메카트로닉스 공학과 교수. 당 학회 총무이사.