

# Single Sensor를 이용한 3상 Slotless PM BLDC 전동기의 속도제어

이승준, 윤용호, 우무선, 원충연, 최유영\*  
 성균관대학교, (주)키네모션\*

## Speed Control of Three Phase Slotless PM BLDC Motor Using Single Sensor

S. J. Lee, Y. H. Yoon, M. S. Woo, C. Y. Won, Y. Y. Choe\*  
 Sungkyunkwan University, Kinemotion co. Ltd\*

### ABSTRACT

Slotless Permanent magnet Brushless DC Motor(PM BLDC) with the characteristics of high speed and high power density has been more widely used in industrial and automatic machine. Generally, PM BLDC motor is necessary that the three Hall-ICs evenly be distributed around the stator circumference in case of the 3 phase motor. The Hall-ICs are set up in this motor to detect the main flux from the rotor, therefore the output signal from Hall-ICs is used to drive a power transistor to control the stator winding current. However, instead of using three Hall-ICs, if only we used one Hall-IC, we estimate information of the others phase in sequence through a revolving rotor. This paper identified the characteristics and performance by using one Hall-IC for the 3 phase PM BLDC whose six stator and two rotor designed.

### I. 서 론

슬롯리스 영구자석 브러시리스 직류전동기 (Slotless PM Brushless DC Motor ; 이하 Slotless PM BLDC 전동기)는 회전자 위치 정보를 검출하기 위해 홀센서(Hall-ICs)나 엔코더(Encoder)와 같은 기계적 위치 센서가 필요하다. Slotless PM BLDC 전동기의 구동은 고정자에 부착된 홀센서의 신호를 검출하여 회전자의 위치정보를 추정하고 전동기에 인가되는 상전압을 분석하여 인버터를 제어함으로써 위상과 크기를 제어할 수 있다.

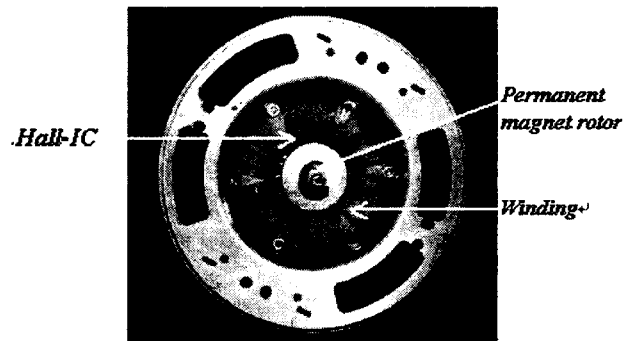


그림. 1. Slotless PM BLDC 전동기  
 Fig. 1. Slotless PM BLDC Motor

그림 1은 3상 2극 구조를 가진 전동기로서 1개의 홀센서(HA)가 부착된 Slotless PM BLDC 전동기를 나타낸다. 3상의 경우 홀센서는 회전자의 위치를 검출하기 위해서 3개의 홀센서가 전동기에 부착되어야 하고 회전자의 위치 검출 및 속도판별의 기준이 된다.

본 논문은 3개의 홀센서를 사용하는 대신에 1개의 홀센서를 사용하여 회전자 위치를 검출하는 회로를 개발하여 기존에 3개를 사용하던 것과 동일한 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

### II. Slotless PM BLDC전동기의 수학적 모델

그림 2는 Slotless PM BLDC 전동기의 등가회로를 나타낸다. Slotless PM BLDC 전동기는 영구자석 회전자와 그림 1과 같은 3상 전기자 권선으로 구성되어 있다.

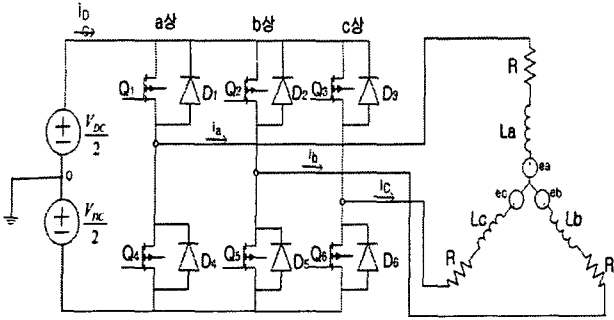


그림 2. slotless PM BLDC 전동기의 등가회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of the PM BLDC Motor

그림 2에서 R과 L은 각각 전기자 권선의 저항과 인덕턴스를 의미하고  $e_a, e_b, e_c$ 는 각각 각 상의 역기전력을 의미한다. 고정자 3상 권선의 상변수 회로 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_b & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 3상 고정자 권선은 동일하다고 가정하고, 각 상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 동일하므로 정리하면 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

정상 상태에서 평균식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

그리고 토크 방정식은

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_r \quad (4)$$

또한, 기계적 방정식은

$$\frac{d}{dt} \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \quad (5)$$

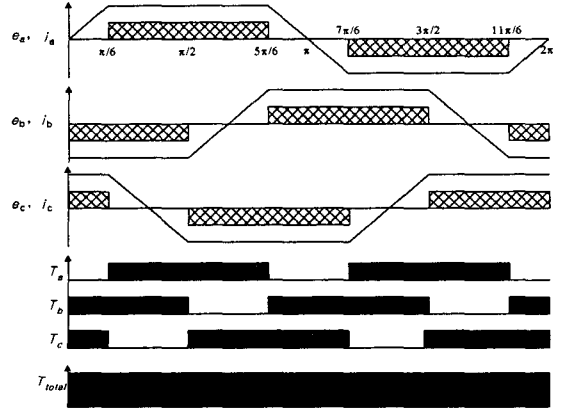


그림 3. slotless PM BLDC 전동기의 역기전력, 전류, 토크파형  
Fig. 3. Back EMF, current, torque waveforms of the slotless PM BLDC Motor

역기전력  $e_a, e_b$  그리고  $e_c$ 의 파형은 사다리꼴형이고 전류  $i_a, i_b$  그리고  $i_c$ 는 그림 3에서 보여주는 토크 맥동 없이 고정된 상태의 토크를 만드는데 필요하다.

### III. Slotless PM BLDC 전동기 제어

그림 4는 1개의 홀센서를 이용하여 Slotless PM BLDC 전동기의 회전자 위치 및 속도를 검출할 수 있는 페루프 제어 블록을 나타낸다.

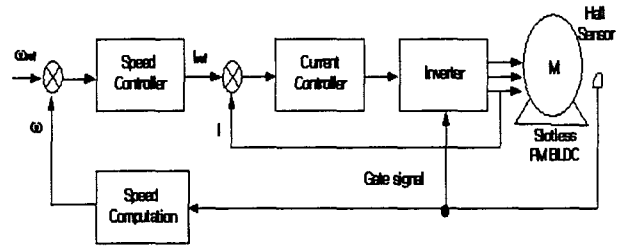


그림 4. slotless PM BLDC 전동기에 대한 페루프 제어  
Fig. 4. Closed-loop control for slotless PM BLDC Motor

그림 5는 기준값( $I_{ref}$ )과 피드백에 의해 얻어진 실제 전류( $I_{real}$ )를 비교하는 히스테리시스 전류제어기를 나타낸다.

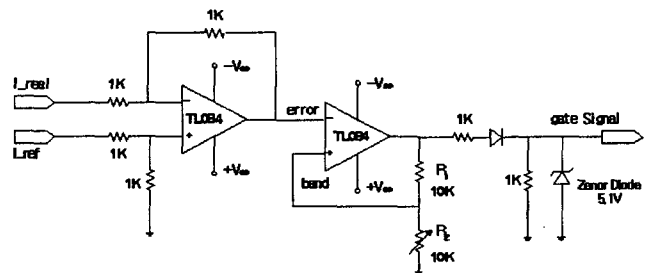


그림 5. 히스테리시스 전류 제어기  
Fig. 5. Hysteresis current controller

히스테리시스 전류 제어기의 동작원리는 전류센서로 부터 얻어진 실제 전류( $I_{real}$ )와 80C196KC에서 계산된 기준값( $I_{ref}$ )사이의 오차가 OP-amp 반전단자의 입력으로 가해지며, OP-amp의 출력은 저항으로 분압되어져 비반전 단자의 입력으로 들어가 히스테리시스 밴드를 형성하게 된다.

실제 전류( $I_{real}$ )와 기준값( $I_{ref}$ )과의 비교를 통해 히스테리시스 밴드 내에서 일정한 전류가 유지되도록 게이트 신호가 온-오프를 반복하게 된다.

#### IV. 제안한 홀 센서 추정 방법

Slotless PM BLDC 전동기는 회전자의 위치 검출을 위해 회전자 주위에 120°간격으로 일정하게 3개의 홀센서를 부착한다.

그러나 본 논문은 1개의 홀센서를 이용하여 회전자의 위치 및 속도를 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 회전자 위치검출방법을 설명하기 위해 그림 6에서 1개의 홀센서를 가진 Slotless PM BLDC 전동기의 홀센서 검출방법을 간략하게 블록화 하였다.

이것은 1개의 홀센서  $H_A$ 와 추정된 신호( $H_B, H_C$ )를 통해 기존의 3개의 홀센서 신호와 동일한 신호를 검출하여 회전자의 위치를 추정할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

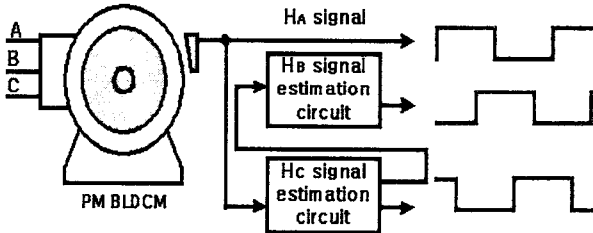


그림 6. 제안한 slotless PM BLDC 전동기의 구동 시스템 (1개의 홀센서 사용)

Fig. 6. The proposed slotless PM BLDC Motor driving system.(Using 1 Hall-IC)

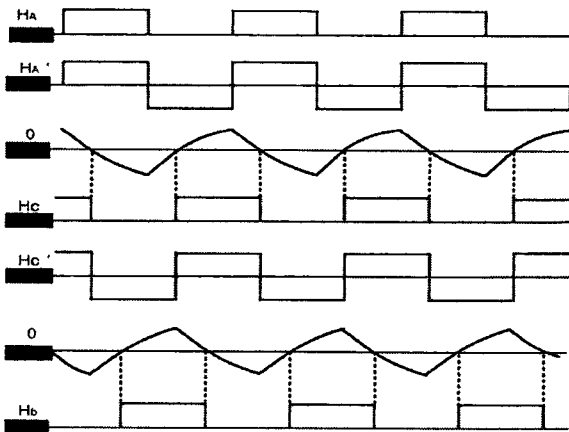


그림 7. 홀 센서 추정방법( $H_B, H_C$ )

Fig. 7. Estimation Hall-ICs signals( $H_B, H_C$ )

그림 7은 입력으로 사용된 홀센서( $H_A$ )신호와 bipolar 시킨  $H_A'$  그리고 실용 적분회로를 통해 출력되는 삼각파와 영점(ground)을 비교하여 영점이상 값에서 펄스가 발생되도록 구성하였다. 이러한 방법으로 발생된  $H_C$ 신호를 이용하여 같은 방법으로  $H_B$ 신호를 추정할 수 있다.

홀센서 신호와 추정된 신호는 전동기가 회전하는 초기에 발생되고 이 신호를 조합하여 주파수를 변화함으로써 회전자의 속도를 조절한다.

Slotless PM BLDC전동기의 홀센서 신호는 120도의 위상차를 가지고 발생하며, 각 상은 서로 60도씩 교차하게 되어있다. 추정된  $H_B, H_C$ 를 이용하여 EPLD내에서 60도마다 펄스가 발생되도록 회로를 구현하였고, 엔코더에서 발생되는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있도록 6펄스를 검출하여 저 분해능의 엔코더를 구성하였다.

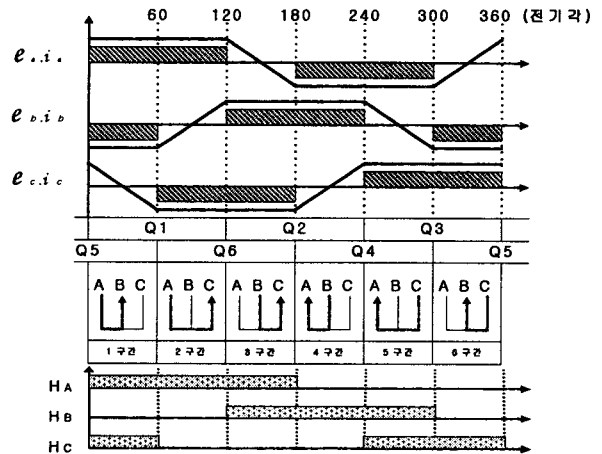


그림 8. 역기전력, 전류, 인버터 스위칭, 홀센서 신호  
Fig. 8. Back EMF, current waveforms, Inverter switching, Hall-IC signals( $H_A, H_B, H_C$ )

그림 8은 홀센서 신호에 의해 6 구간별로 인버터를 스위칭하여 각 상에 순차적으로 전류를 도통하는 것을 나타낸다. 제안한 방법으로 전동기를 운전할 경우 초기에 강제 정렬방법을 사용하여 스위칭(Q1, Q5)에 ON신호를 인가한다.

정렬된 후부터는 홀센서  $H_A$ 신호와 추정된 신호( $H_C, H_B$ )를 이용하여 전동기를 구동한다.

#### V. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안된 알고리즘을 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 과정을 통해 그 타당성을 검증하였다.

그림 9는 Slotless PM BLDC 전동기 구동 시스템의 전체적인 블록도를 나타낸다.

전체 구성은 Slotless PM BLDC 전동기, 인버터, 게

이트 드라이버, 스위칭 로직, 6펄스 로직, 홀센서 H<sub>A</sub> 그리고 히스테리시스 전류제어 블록으로 구성되어 있다.

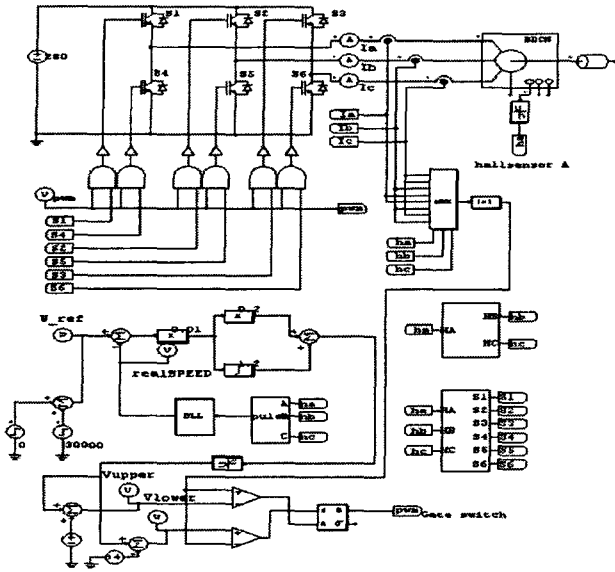


그림 9. 시뮬레이션 전체 구성도  
Fig. 9. Configuration of simulation

홀센서 추정방법은 홀센서 H<sub>A</sub> 신호를 이용하여 bipolar 시킨 구형파로 변환할 수 있고, 변환된 신호로 OP-amp의 적분된 출력인 삼각파를 영점과 비교하여 H<sub>C</sub>를 추정할 수 있다.

이와 같은 방법으로 추정된 H<sub>C</sub>를 이용하여 H<sub>B</sub> 신호를 추정할 수 있다.

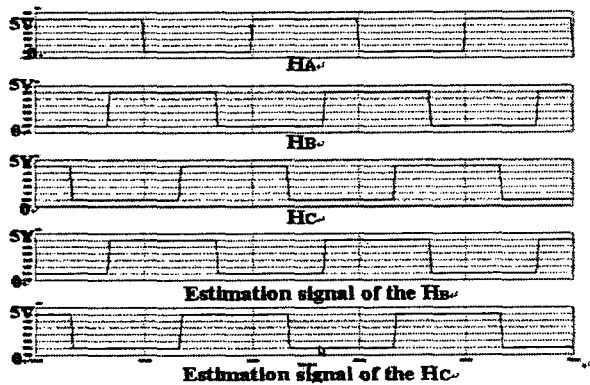


그림 10. 홀 센서 신호와 추정된 신호(H<sub>B</sub>, H<sub>C</sub>)  
Fig. 10. Hall-IC signals and estimation signals of the(H<sub>B</sub>, H<sub>C</sub>)

그림 10은 각 상의 홀센서 신호와 추정된 신호(H<sub>B</sub>, H<sub>C</sub>)를 나타내는 것으로 홀센서 신호와 추정된 신호가 같음을 알 수 있다.

그림 11은 6펄스와 1개의 홀센서(H<sub>A</sub>)를 이용하여 추정된 신호(H<sub>B</sub>, H<sub>C</sub>)를 나타낸다.

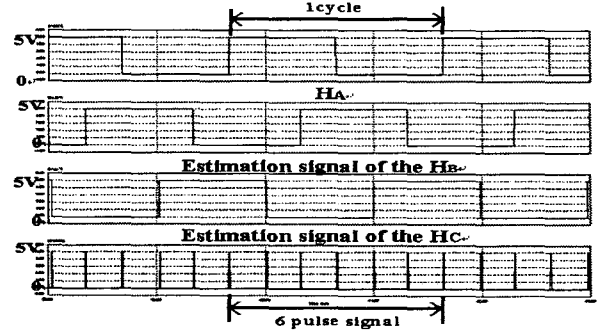


그림 11. 6펄스와 홀센서 신호(1개의 홀센서 사용)  
Fig. 11. 6 pulse and Hall-IC signals.(Using 1Hall-ICs)

## VI. 실험 결과

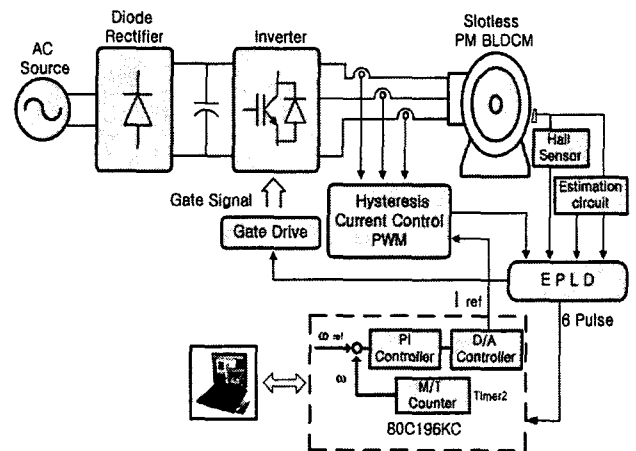


그림 12. Slotless PM BLDC 전동기 구동 시스템  
Fig. 12. Slotless PM BLDC motor driving system

그림 12는 Slotless PM BLDC 전동기 구동을 위한 실험 세트 블록을 나타낸다. 실험세트는 Slotless PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, EPLD (Erasable Programmable Logic Device) 그리고 PI 제어기로 구성되어 있다.

EPLD에는 스위칭 로직과 속도 측정을 위한 6펄스 발생 블록, 신호 추정 알고리즘을 로직화하여 구현하였으며 마이크로 프로세서는 INTEL사의 80C196KC를 사용하였다.

실험에 사용된 전동기는 Slotless PM BLDC 전동기로서 영구자석 회전자, 2극, Y결선으로 구성되어 있다.

Slotless PM BLDC 전동기의 사양은 표1과 같다.

표1. slotless PM BLDC 전동기의 사양

고정자 저항	0.88 Ω
정격 전압	90V ~ 340Vdc
정격 입력	1 kW
정격 출력	0.9 kW
정격 속도	33000rpm
정격 전류	3.6Amps at 280Vdc
극 수	2

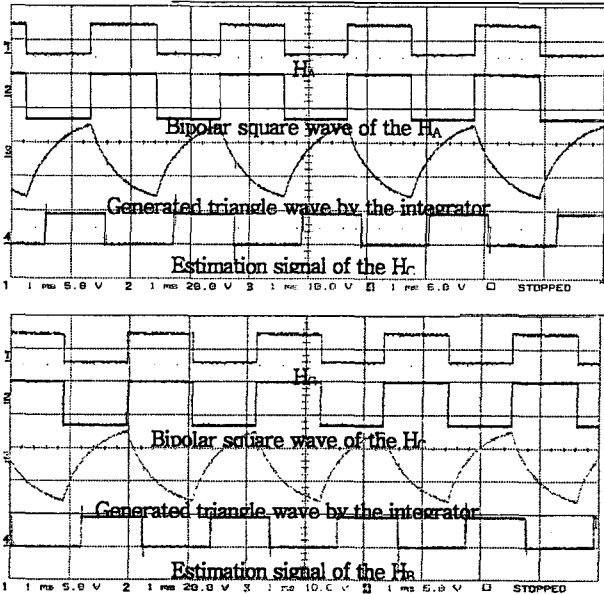


그림. 13. 홀센서 추정( $H_B$ ,  $H_C$ )  
 Fig. 13. Estimation Hall-IC signals( $H_B$ ,  $H_C$ )  
 (5V/div, 1ms/div, 27000rpm)

그림 13은 홀센서  $H_A$  신호를 이용하여 bipolar시킨 구형파로 변환하고, 변환된 신호로 OP-amp의 적분된 출력인 삼각파를 영점과 비교하여  $H_C$  및 같은 방법으로  $H_B$ 를 추정한 실험결과이다.

기존의 홀센서 3개를 사용하여 회전자의 위치를 판별하는 것과 동일한 결과를 홀센서  $H_A$  신호와 추정된 신호( $H_B$ ,  $H_C$ )를 통해서 얻을 수 있었다.

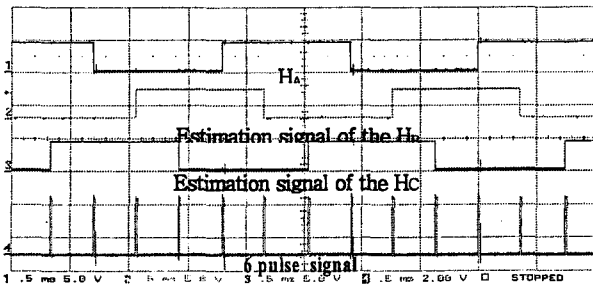


그림. 14. 홀 신호와 6펄스  
 Fig. 14. Hall signals and 6 pulse(5V/div, 0.5ms/div, 2700rpm)

그림 14는 27000rpm으로 회전하는 홀센서  $H_A$ 를 사용하여 추정된 신호  $H_B$ ,  $H_C$ 와 6펄스를 나타낸다.

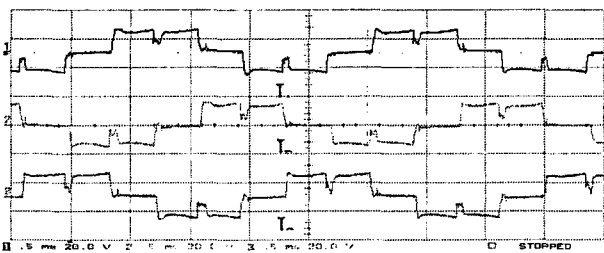


그림. 15. 각 상전류 파형  
 Fig. 15. Each phase current(2A/div, 0.5ms/div, 2700rpm)

그림 15는 27000rpm으로 회전하는 각 상전류를 나타내고 있다.



그림. 16. 실험 세트  
 Fig. 16. Experimental test setup

그림 16은 전체실험 세트를 나타낸다.

## VII. 결 론

기존 3개의 홀센서를 이용해 회전자의 위치를 판별하거나 고가의 엔코더나 레졸버보다는 단지 1개의 홀센서를 이용하여 회전자의 위치를 검출함으로써 구동 회로의 크기 및 가격을 낮출 수 있는 위치 검출 방법을 제안하였다.

이는 저가의 산업기기 및 자동차 기기에 적용될 수 있으며 정밀한 속도 제어를 요하지 않는 곳의 경우 홀센서를 가지고 속도 센서 역할을 대신 할 수 있으므로 진공청소기 등에 응용이 가능하다.

이 논문은 2004년도 산학연 공동기술개발사업 (2004-005) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] F.Caricchi, F.Giulii Capponi, F. Crescimbin, L. Solero, "Sinusoidal Brushless Drive with Low Cost Hall Effect Position Sensors", IEEE Trans. Ind. Application, pp.799-804, 2001.
- [2] Ting-Yu Chang, Ching-Tsai Pan, Jenn-Horng Liaw and Shinn-Ming Sue, "A Hall-Sensor-Based IPM Traction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Application, pp.840-843, 2002.
- [3] Pragasen Pillay, Ramu Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Drives", IEEE Trans. Ind. Application, vol.25, No.2, pp.274-279, 1989.
- [4] Jong-Bae Lee, Tae-Bin Im, Ha-Kyong Sung, Young-Ouk Kim "A Low Cost Speed Control System of Brushless DC Motor Using Fuzzy Logic", IEEE Trans. Ind. Application, vol.2, pp.433-436,1999.
- [5] Fang Lin Luo, Hock Guan Yeo "Advanced PM Brushless DC Motor Control & System for Electric Vehicles", IEEE Trans. Ind. Application, vol.2, pp.1336-1343, 2000.