

스텝모터 역기전력을 이용한 폐루프 시스템 구현에 관한 연구

임성빈* · 정상화*

*조선대학교 기계공학과

A study on the implementation of closed-loop system using the stepper motor back-EMF

Sungbeen Im* · Sanghwa Jeong*

*Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University

Abstract

In this paper, the control technique of the stepping motor using back electromotive force(B-EMF) without encoder is investigated. The stepping motor generally uses the rotary encoder to detect the rotor position. Since this method increases the cost and the motor configuration size, the new closed-loop control method applied for the B-EMF was implemented by using current detect circuit, AD-converter, and micro controller unit(MCU). The control loop of stepping motor became very simplified. The current change of stepping motor measured by the amplifier was measured and analyzed, when the missing step is occurred. Based on the data from current feedback, position errors were compensated and confirmed by using AD-converter.

Keywords: Stepping motor, MCU, Closed loop control, Back EMF, AD-converter

1. 서론

제조 및 생산현장, 의료기, 자동차, 컴퓨터 데이터 디스크 드라이버 등 다양한 분야에 정밀을 요구하는데 스텝모터가 적용되고 있으며, 모터 특성으로 보통 개루프(open-loop)방식으로 구동하고 있다. 이와 같은 방식은 일시적인 역회전, 탈조가 발생할 수 있다[5]. 그래서 안정적으로 높은 정밀도를 위한 폐루프(close-loop)제어로서 효과를 높일 수 있는데[6], 이러한 폐루프 제어는 모터의 회전자 위치검출을 하기 위해 정밀도가 높으나 가격이 비싸고, 부착 공간이 필요한 엔코더방식, 리졸버방식의 센서를 사용하여야 한다.

그러나 이러한 센서들은 위치 정보를 검출하여 위치 오차를 보상할 수 있으나 모터 주변의 외란 또는 모터 드라이버에서 각 상(phase)별의 출력부의 문제가 발생

하여 어떠한 오차가 발생한 것인지에 대해서는 판별하는데 문제가 있다.

최근에는 영구자석형 센서리스 BLDC모터 제어방식으로 상전류의 역기전력(B-EMF: Back Electromotive Force)을 이용하여 회전자의 위치에 따른 상제어를 하는 방법이 진행되어지고 있다 [1][2][3]. 영구 자석형 스텝핑 모터를 구동하기 위해 각 상별로 순차적으로 여자를 한다. 이때 상을 바꾸면서 여자되지 않은 상에서 역기전력이 발생한다. 회전자가 회전하면서 발생하는 역기전력의 전류를 저항과 콘덴서에 의한 직렬-분압회로를 통해 전압으로 변환하여 회전자의 위치를 찾는 것이다. 이러한 방식으로 스텝핑 모터가 가동하면서 탈조에 의한 모터의 오동작 및 위치오차의 이상을 찾게 되는 것이다.

† Corresponding Author: Sanghwa Jeong

Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University, E-mail: shjeong@chosun.ac.kr

Received June 16, 2015; Revision Received September 08, 2015; Accepted September 11, 2015.

본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되어지는 2상 스텝핑 모터 제어를 이용하여 Atmega8 MCU(micro control unit), AD-converter 및 기타 수동소자를 이용하여 B-EMF신호를 이용한 피드백 제어를 설계하고자 한다.

2. 스텝핑모터

스텝핑모터는 위치 및 속도제어가 쉽고, 비용이 저렴하지만 고정밀을 요구하는 장치에 사용되고 있다. 일반적으로 많이 사용되어지는 영구자석(Permanent magnet)형은 영구자석으로 구성된 회전자와 전자석의 고정자 사이에 발생하는 힘을 이용하므로 큰 토크를 발생하지만, 미세한 회전을 위한 세밀한 제어는 스텝핑정밀도가 떨어지는 단점이 있다.

제어방법으로는 제어기의 단순함과 조작의 간편함으로 과부하의 위험이 없는 시스템에 적용하는 개루프(open-loop) 방법을 사용한다. 그러나 개루프 운전은 모터 운전지령 펄스가 지나치게 높거나 모터에 인가되는 부하가 높을 경우 제어에 응답이 떨어지거나, 토크리플이 크게 나타나는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 회전자의 위치를 검출하여 고정자의 상을 여자시키는 페루프(close-loop) 제어방식으로 한다[1] [4].

<Table 1> Rotation principle of the step motor

<p>A phase ON</p>	<p>B phase ON</p>
<p>/A phase ON</p>	<p>/B phase ON</p>

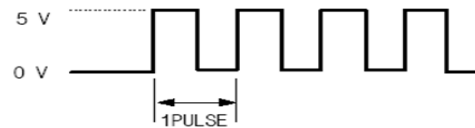
스텝핑모터는 고정자 권선과 회전자의 종류, 재질, 권선방법 및 고정자 권선의 여자방식에 따라 모터를 구분하게 되며, <Table 1>은 스텝모터의 회전원리를 나타내었다. A상 권선이 여자되어 회전자 자석의 성질에 의해 A상과 일렬로 되어 토크가 발생하지 않고 회

전하지 않는 것이다.

그리고 A상의 여자를 OFF하고 B상에 여자를 하면 회전자는 B상과 일렬로 되기까지 회전을 하게 된다. 이러한 과정을 반복하면 회전자는 제어시간과 스텝수에 따라 회전속도와 위치가 바뀌는 것이다. 또한 <Table 1>의 스텝순서를 반대로 바꾸어주면 회전방향이 반대로 작동한다.

스텝핑모터에서 스텝각은 스텝모터가 위치 결정할 수 있는 최소 회전각도를 말한다. 그리고, 스텝각을 제어하기 위해서는 펄스(pulse)신호를 공급하고, 일반적으로 제어신호의 최대전압으로 DC 5V와 최소전압 DC 0V를 반복하면서 모터구동 전압이 낮은 경우에는 직접 모터에 펄스를 공급하지만, 모터구동 전압이 높은 경우에는 드라이버에 펄스를 공급하는 방식으로 스텝핑 모터를 사용한다.

[Figure 1]에서와 같이 일반적으로 DC 5V를 기준으로 ON상태를 H(High) level, OFF상태를 L(Low) level이라 하며, 이러한 1회 반복을 1사이클(Cycle)이다. 1사이클에 펄스의 수에 따라 스텝핑모터의 속도와 위치를 제어할 수 있다.



[Figure 1] 1 pulse of stepping motor

스텝핑모터의 가/감속을 할 경우에는 1펄스에 1스텝으로 작동하지만 회전하면서 탈조될 우려가 있어 속도를 천천히 올리고, 내리는 방식으로 하며, 펄스가변제어방식인 PWM(Pulse Width Modulation)방식으로 제어한다.

따라서, 스텝핑모터의 위치, 속도제어는 목표시간에 펄스 개수제어와 목표시간 제어를 통해서 이루어진다. 즉 속도를 높이기 위해서는 스텝의 이동속도를 높인다. 신호의 주기가 반으로 줄어들면 2배의 속도가 된다.

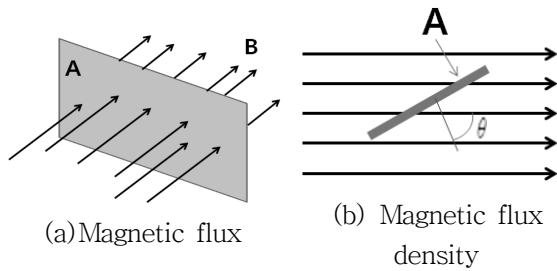
2.1 역기전력

서론에서 언급했듯이 센서를 이용한 모터의 위치검출은 많은 단점이 있어 역기전력을 이용한 방법을 제시하였다. 역기전력은 각 권선에 전류를 보내지 않고, 회전자를 회전하면 권선에서 역기전력이 발생한다. 이러한 현상이 모터와 발전기의 반대의 개념이 되는 현상이다.

역기전력에서 다루는 용어에서 자기력선의 묶음을 자속이라 하며 기호로는 'Φ'로 표시한다. 자계에 수직인 단위 면적당 자속의 양을 자속밀도라 한다. 자속밀

도의 단위는 테슬라, 기호로는 'B'라 하며, 단위면적을 'A'라 하면, 자속과의 관계는 식(1)과 같고, <Figure 2>에서 이와 같은 관계를 그림으로 나타내었다.

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1)$$



[Figure 2] Expression of Magnetic flux and Magnetic flux density

[Figure 2]에서 (b)는 회전자의 위치가 'A'의 상태라면 'A'에 수직인 자속밀도는 $B\cos\theta$ 가 되고 그 면적과 쇄교(Linkage)하는 자속 ' Φ '는 식(2)와 같이 된다.

$$\Phi = AB\cos\theta \quad (2)$$

따라서 역기전력은 권선에 쇄교하는 자속의 시간에 대한 변화율로 계산할 수 있다. 'A'의 자속변화는 Faraday법칙에 의해 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a = -\frac{d\theta_a}{dt} \quad (3)$$

여기에 회전자의 회전속도와 자속의 위치에 대한 변화율로서 역기전력을 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

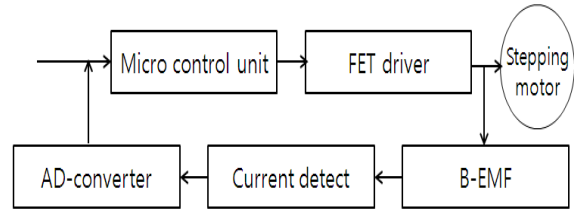
$$e_a = \omega \frac{d\theta_a}{d\theta} \quad (4)$$

e_a 는 회전자의 위치의 역기전력, θ 는 회전자의 상태 위치, ω 는 회전자의 속도이며, 각 상에 동일하게 적용된다. 따라서 역기전력은 회전자 위치와 동기화하기 때문에 역기전력을 이용하여 회전자의 위치를 알 수 있다[1].

2.2 제어방법

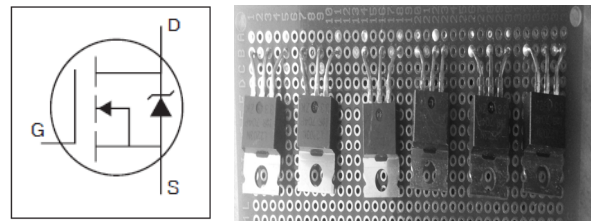
[Figure 3]은 본 논문에서 제안된 스텝모터의 역기전력을 이용한 스텝모터 제어기의 구성도이다.

MOSFET driver는 스텝모터 전용드라이버를 사용하지 않고, <Figure 4>의 MOSFET소자를 이용하여 모터에 PWM으로 전압을 공급하게 하였으며, 각 상에서 발생하는 역기전력을 전류검출 AD-컨버터에서 제어값과 상에 공급되어지는 값을 비교할 수 있도록 하였다.



[Figure 3] Control schematic of stepping motor

본 연구에서 다루고 하는 스텝모터는 구동전압이 DC 12V로서 마이크로컨트롤러의 펄스전압으로는 직접 구동이 안된다. 그래서 MOSFET를 이용하여 드라이버를 만들었으며, MOSFET는 IR사의 TO-220 타입의 IRL2203N으로 'N'형 타입이며, Drain(Vdss)에는 최대 DC 30V, Id는 116A, Rds(ON)은 7.0m Ω 이다. Source('S') 단자는 스텝모터가 구동하면서 발생하는 역기전력을 검사하기 위한 Current detect와 병렬로 연결한다.



[Figure 4] MOSFET driver

제어방법으로는 <Table 1>에서와 같은 방식에 따라 Step_A -> Step_B -> Step_/A -> Step_/B의 순으로 각 상에 여자하게 알고리즘으로 설계하였다. 만약에, 역회전을 하기 위해서는 앞에서 제시한 순서의 반대로 하면 된다. <Table 2>는 1상 여자방식에 의한 Full step이라고도 한다. 1개의 코일만을 차례로 여자하는 방식이며, 한 개 스텝당 정밀도가 높으나, 감쇠 진동이 크고, 탈조가 발생할 수 있다. 모터가 회전할 때 모터의 온도 상승이 낮고, 전류가 낮아도 구동이 가능하다.

<Table 2> Step of 1-phase ON control

구분	1	2	3	4	5	6	7
A	H	L	L	L	H	L	L
/A	L	H	L	L	L	H	L
B	L	L	H	L	L	L	H
/B	L	L	L	H	L	L	L

<Table 3>은 항상 2개의 상에 전류를 흐르게 하는 방식으로 기동토크가 주어지며, 탈조현상이 1상 제어 방식보다 적다. 상 전환할 때 한 개의 상은 여자되어 있으므로 제동효과가 높다. 그러나 모터의 온도상승이 있고, 1상 제어방식에 비해 2배의 입력신호를 필요로 하게 되어 효율이 떨어진다.

<Table 3> Step of 2-phase ON control

구분	1	2	3	4	5	6	7
A	H	H	L	L	H	H	L
/A	L	H	H	L	L	H	H
B	L	L	H	H	L	L	H
/B	H	L	L	H	H	L	L

본 연구에서는 <Table 3>의 순서에 의한 방식으로 제어설계를 하였다.

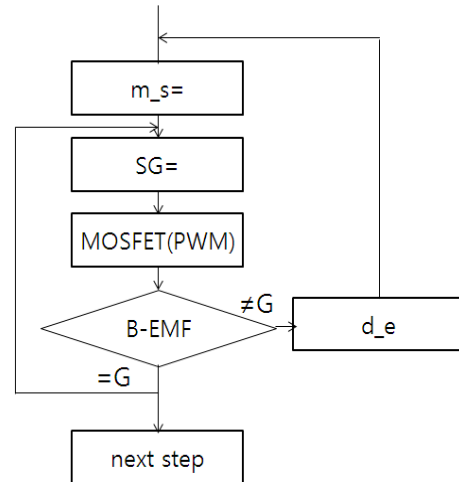
3. 실험장치 설계 및 구성

3.1 제어 알고리즘

역기전력을 이용한 스텝모터 위치오차를 줄이기 위해 제어하기 위해 식(5), 식(6)의 모터의 오차 $e(n)$ 와 위치/속도 오차변화량 $\Delta e(n)$ 을 만든다. 이러한 변화의 차이에 대해 피드백제어 프로그램을 설계하여 이득값을 전달한다.

$$e(n) = w_r^*(n) - w_r(n) \quad (5)$$

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n-1) \quad (6)$$



[Figure 5] Control algorithm flow chart of Stepping motor

제어 알고리즘은 <Table 4>와 같이 제어기 입출력에 따른 제어는 목표값과 오차값의 범위에 따라 G(good), F(≠G:fail)로 하여 제어하고자 하는 목표값에 가감할 수 있는 구조이다. 이와 같은 구조를 <Figure 5>에서 제어 알고리즘을 설계하였다.

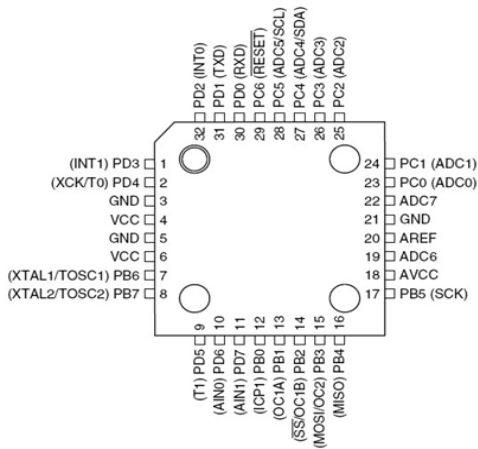
<Table 4>에서 'motor_s'는 실제 모터 회전자의 속도를 'SG'는 스텝모터에 인가하는 목표제어 변수 값이다. 'd_e'는 식(5), 식(6)에 의한 실제값과 제어 목표값과의 차이이다. 'm_s'는 오차에 따른 스텝모터 제어 목표값에 가감하기 위한 조건 판단용 변수가 되며, 목표값의 오차에 대한 차이값을 변환한다.

<Table 4> Control algorithm of Stepping motor

If motor_s>SG and d_e>0.1 Then m_s is F
If motor_s>SG and d_e<0.1 Then m_s if G
If motor_s<SG and d_e>0.1 Then m_s is F
If motor_s<SG and d_e<0.1 Then m_s if G

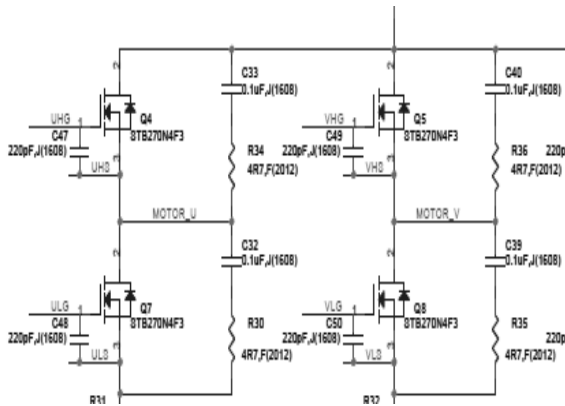
3.2 제어 및 역기전력 측정 회로

스텝모터의 구동 제어를 위한 MCU는 Atmel사에서 나오는 AVR Atmega8을 사용하였다. 스텝모터의 각 상에 전원공급은 <Figure 4>의 MOSFET로 구성하였으며, 각 상에 역기전력 신호증폭은 범용으로 사용하는 Fairchild 사의 LM-741 op-amp로 설계하였다. 본 연구에서의 모터 제어 및 역기전력 측정회로 구성을 위한 Atmega8 핀 위치, MOSFET 드라이브 회로와 B-EMF 신호를 감지하는 전류-전압변환 회로는 각각 [Figure 6], [Figure 7]와 [Figure 8]과 같이 구성하였다.

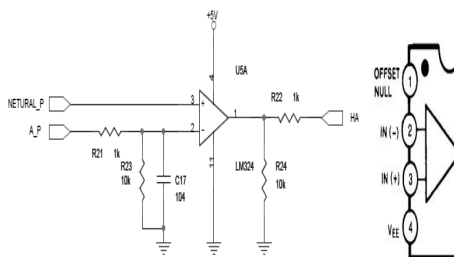


[Figure 6] Atmega8 MCU pin-layout

MOSFET driver에서 마이크로컨트롤러의 전류공급의 PWM신호는 Atmega8의 OC1A포트(PB1) 하나에 NAND 게이트를 통해 스테핑 모터에 전압을 공급하는 구조이다. 이는 MCU가격도 저렴하면서 크기가 작은 MCU를 선정하기 위해서이다. 그리고 역기전력을 Op-amp를 통해 증폭한 신호를 ADC0 포트(PC0)에 연결하여 AD-컨버팅 하였다.



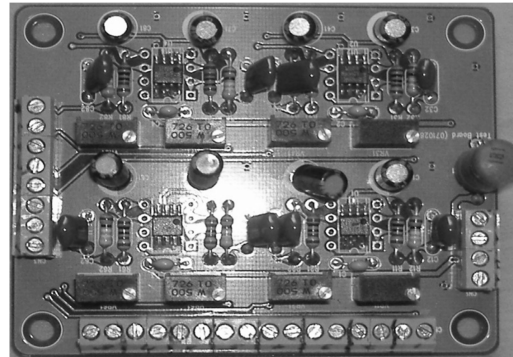
[Figure 7] MOSFET driver circuit



[Figure 8] Op-741 and current detect circuit

스테핑 모터의 역기전력 값을 활용한 속도 측정은 회로구성에 따라 상전류 또는 전압을 측정하는 방법으로 나뉜다. <Table 3>의 제어시스템을 [Figure 7]의 각

FET에 전원이 ON과 OFF를 반복하면 스테핑모터의 코일에서 역기전력이 발생한다. 본 연구에서는 [Figure 8]과 같이 상 전류측정 방법을 적용하여 역기전력 검출회로를 설계하였다.



[Figure 9] Current detect PCB

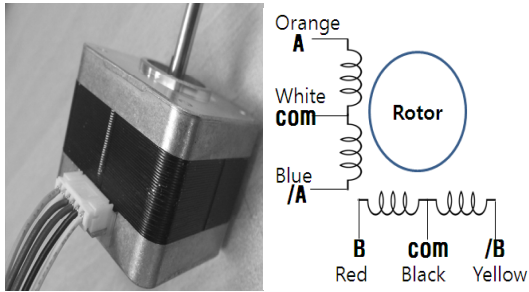
[Figure 9]는 4개의 상에서 발생하는 역기전력을 읽어 들이는 PCB이다. [Figure 8]의 op-741은 8 pin으로 앰프회로가 1개씩 구성된 부품이다. op-741을 사용한 이유는 모터의 각 상에서 하나의 신호가 문제가 되었을 때 또는 앰프가 문제가 발생하였을 때 쉽게 찾아내거나 복구하기 위해서이다.

3.3 2상 스테핑모터 제어시스템

스테핑모터는 <Figure 2>에서와 같이 스텝상태에서 각 상에 펄스 순서를 부여하여 주어진 펄스 수에 비례하여 회전 속도와 위치가 결정된다.

[Figure 10]의 (a)는 스테핑모터의 역기전력 시험을 하기 위한 산요사의 2상 7선식 스테핑 모터로서 홀딩토크는 $0.37N \cdot m$, 정격전류 각 상별로 1.2A, 내부저항은 3.3Ω , 인덕턴스는 3.4mH이며 스텝당 1.8° 의 규격이다.

내부 결선은 <Figure 10>의 (b)와 같이 되어 있다. 결선에 따라 2개 이상의 상을 구성해야 하는데 권선에서 바로 전원선이 나오는 바이폴라(Bipolar)와 권선 정중앙에서 하나씩 2개의 전선이 나오는 유니폴라(Unipolar)방식이 있고, 2상 스테핑모터에서 유니폴라는 바이폴라보다 선이 2개 더 있는 원리이다.

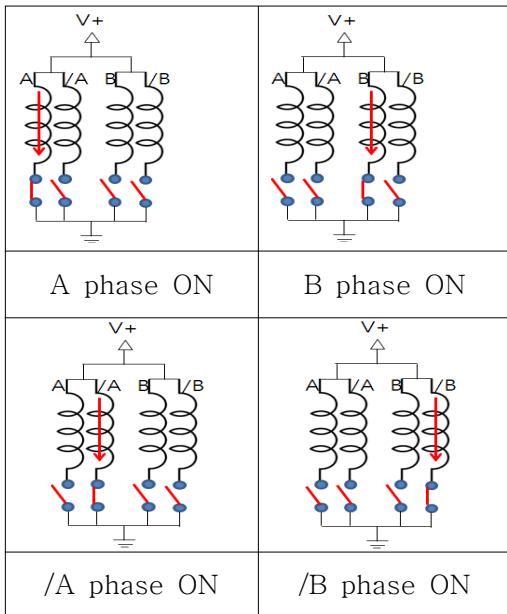


(a) Stepping motor (b) Wiring diagram
[Figure 10] 2-phase 6-wire Stepping motor

<Table 5> Control step of 2-phase motor

Step	B/W	A Orange	B Red	/A Blue	/B Yellow
1	+	-	-		
2	+		-	-	
3	+			-	-
4	+	-			-

스텝핑 모터를 구동하기 위한 제어 알고리즘은 <Table 5>와 같이 각 스텝별로 두 개의 상을 여자 시키는 순서에 의해 상 제어로서 회전하도록 하며, [Figure 11]에서와 같이 권선에 흐르는 전류를 항상 한쪽 방향으로 흐르는 유니폴라 구동원리 프로그램을 설계하였다.



[Figure 11] Current control of each phase

유니폴라 방식은 토크가 높아 탈조 될 위험이 적고 고속회전에 용이하다. 그리고 구동회로가 단순하다. 그러나 모터 코일에 저장된 에너지를 회생하지 않으므로 효율이 좋지 않고, 저속에서도 토크가 바이폴라보다 적다.



[Figure 12] Stepping motor control and current detect circuit

본 연구에서는 Atmega8 마이크로컨트롤러에 Firmware를 다운로드하기 위한 방법으로 구하기 쉬운 AVR-Studio 4.18과 ISP 모듈을 이용하였다. <Figure 12>는 Atmega8 마이크로컨트롤러와 MOSFET 드라이버 및 AD-컨버터를 각각 만능 PCB에 조립하여 스텝핑 모터의 역기전력 측정으로 구동한 회로이다. 다양한 종류의 스텝핑 모터를 실험하기 위해 2상, 5상 스텝핑모터에도 적용하고자 6개를 붙였고, 각각 독립적인 제어가 가능하게 결선하였다.

MCU 주변회로의 외부클럭은 16Mhz X-tal을 구성하고, MCU 내부클럭은 4Mhz로 설정하였다. 이것은 최대클럭으로 인해 마이크로컨트롤러의 오동작을 예방하고 입출력 제어가 많지 않기 때문에 하였다.

<Table 6> 2-phase control program

```

// timer interrupt
SIGNAL(SIG_OUTPUT_COMPARE0) { //
0.1msec
cli();
a++; b++;
int RIGHT, LEFT;
// direction & speed
if((cntR == 1) && (cntL == 0))
a=RIGHT;
else if((cntR==0)&&(cntL==1)) a=LEFT;
// motor drive
if(a==RIGHT){ // left side motor
switch(step1){
case 0x30 : step1 = 0x60;
break;
case 0x60 : step1 = 0xc0; break;
case 0xc0 : step1 = 0x90; break;
case 0x90 : step1 = 0x30;
break;
default : step1 = 0x30; break;
}
a=0;
}
if(a==LEFT){ // right side motor
switch(step2){
case 0x09 : step2 = 0x0c; break;
case 0x0c : step2 = 0x06; break;
case 0x06 : step2 = 0x03;
break;
case 0x03 : step2 = 0x09;
break;
default : step2 = 0x09; break;
}
b=0;
}
PORTC = (step1) | (step2);
}
    
```

각각의 MOSFET에 PWM에 의해 전류가 흐르는지를 확인하기 위해 LED 모니터 PCB도 별도로 연결하였다.

<Table 6>은 <Figure 12>의 회로를 통해 스테핑모터를 구동하기 위한 프로그램이다. 'a'변수에 시계방향 또는 시계반대방향을 선택하기 위한 데이터가 주어지고, 각 스텝별로 MCU 출력포트를 0x60, 0xc0, 0x90, 0x30의 Hex값은 시계방향으로 0x0c, 0x06, 0x03, 0x09의 Hex값은 시계반대방향으로 회전한다.

<Table 7>은 스테핑 모터에서 코일의 여자기능을 반복하면서 생기는 역기전력신호를 받아서 AD-컨버팅하는 과정의 프로그램이다. AD 분해능은 10bit (210 = 0~1023)로서 'value' 변수에 AD과정이 종료되면 변환값이 저장된다. 스테핑모터 구동 입력전압을 DC12V 입력으로 하여 약 DC 0.01V 단위로 측정하도록 하였다.

<Table 7> AD-converting program

```

void ad_start(unsigned char adc_input)
{
adc_int_ch = adc_input;// ADC CH
ADMUX = adc_input;// ADREF(0) + CH
ADCSRA |= 0x40; // AD conversion start
}
unsigned int ad_read(unsigned char adc_input)
{
ADMUX = adc_input; // ADREF(0) + CH
ADCSRA |= 0x40; // AD conversion start
while((ADCSRA & 0x10) == 0); //stand
by
ADCSRA |= 0x10; // AD flag clear
return ADCW;
}

int main(void)
{
// ADC initialization
ADMUX = 0x00; //standard AREF
ADCSRA = 0x8f;//ADC Enable,Clock
125.Khz,
interrupt
SFIO &= 0xEF;
adc_int_flg = 0; // ADC finish
adc_int_ch = 0; // ADC CH = CHO
com1_rx_eflg = 0;
while(exit_flg == 0){
ad_start(0);
}
if(adc_int_flg){ // ADC finish flag
value = adc_int_data;
adc_int_flg = 0;
}
}
// ADC stop
ADMUX = 0x00;
ADCSRA = 0x00;
SFIO &= 0xEF;
}
    
```

4. 결론

본 연구에서는 스테핑모터를 센서리스 BLDC모터의 상전류 측정방식을 이용하여 스테핑모터의 회전자위치 측정을 통한 제어회로를 설계하였다. 스테핑모터를 이용한 이동장치를 구성할 때 고가의 로터리엔코더와 같은 센서 없이 역기전력(B-EMF)를 이용한 폐루프 제어를 통해 스테핑모터의 제어가 가능함을 보였다.

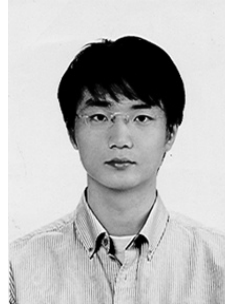
향후에는 고성능의 MCU를 통해 스테핑모터의 고속에 따른 위치측정 방법과 마이크로스텝제어를 통해 5상 스테핑모터에 적용하여 정밀제어시스템을 설계하고자 한다.

5. References

- [1] Choi. I.D.(2009), "Current feedback and feed-forward control for micro stepping of stepping motor." Hanyang University.
- [2] Kim. J.H.(2012), "Commutation point compensation method for misaligned Hall-effect Sensor of electric motorcycle brushless DC motor using Back-EMF Estimation." Pusan University.
- [3] Lee. J.H.(2007), "Current model based sensorless vector control for SPMSM using a back electro motive force estimator." Sungkyunkwan University.
- [4] Kim. C.H.(2013), "Sensorless Starting Control of Permanent Magnet Synchronous Motor." Mokpo national maritime University.
- [5] Bodson M., Sato J.S. and Silver S.R.(2003), "spontaneous Speed Reversals in Stepper Motors." IEEE Conference on Decision and Control, vol 4: 369-373.
- [6] Bodson M., Chiasson J.N., Novotnak R.T. and Rekowski R.B.(1993), "High-Performance Nonlinear Feedback Control of a Permanent Magnet Stepper Motor." IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 1: 5-14.
- [7] Atmega, <http://www.atmel.com/>.

저자 소개

임성빈



조선대학교 대학원 기계공학과 석사 취득 후 현재 조선대학교 기계공학과 박사과정 중
관심분야 : 자동제어, 기계계측, 시스템개발 등

정상화



한국과학기술원 기계공학 석사 졸업, 노스캐롤라이나 기계공학 박사 졸업, 현재 조선대학교 기계공학과 교수
관심분야 : 기계계측공학, 기계 시스템설계, 제어공학