
마이크로컨트롤러 기능

제 16장 인버터의 PWM 제어



ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

인버터의 PWM 제어

1. PWM 인버터
2. PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기
3. BLDC 모터
4. 인버터를 이용하여 BLDC 모터 제어하기



ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

PWM 인버터

□ PWM 인버터

- ❖ PWM 인버터의 파형은 구형파에 비해서 주파수가 높다.
- ❖ 이로 인해 스위칭 주파수가 높아지게 되고, 이에 따라 흐르게 되는 모터의 전류에는 고조파 성분이 적게 포함되어 있다.
- ❖ PWM 제어 방법
 - 정현파 PWM 변조방식(Sinusoidal PWM : SPWM)
 - 정현파 형태의 레퍼런스 전압을 사용하여 전압을 변조하는 기법



PWM 인버터

□ PWM 인버터

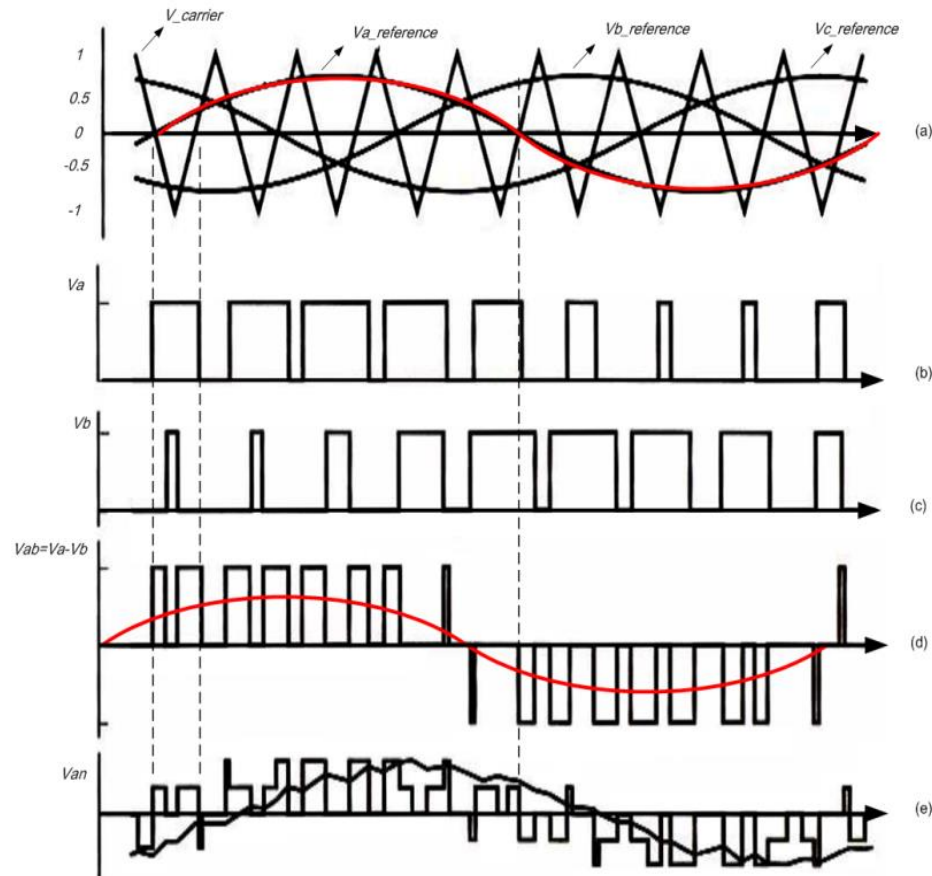
- 본 교재에서는 PWM 제어의 가장 기본이 되는 정연파 PWM 제어 기법을 사용한다.
- 3상 인버터의 정연파 PWM 제어는 일정한 직류 입력전압 V_{DC} 로부터 출력 전압의 크기와 주파수를 가변할 수 있다.
- 3상 인버터에서 정연파 PWM 제어는 각 폴의 폴전압을 정연파 PWM을 인가하여 다음 그림과 같이 반송파 신호 $V_{carrier}$ 를 사용하여 각 폴에 3상 정연파의 기준파 신호 $V_{a_reference}$, $V_{b_reference}$, $V_{c_reference}$ 를 이용하게 된다.
- 반송파 신호와 기준파 신호에 의해 각 폴에 다음 그림과 같이 정연파 PWM으로 제어하게 된다.
- 정연파 PWM 제어되는 3상 인버터에서 출력선간전압은 단극성 파형인 3레벨 파형이다. 부하에 걸리는 부하 상전압은 5레벨의 파형이 된다. 여기서 부하 상전압이 0으로 되는 구간의 경우 인버터의 직류측과 교류측 사이에는 전력의 흐름이 발생하지 않으며, 부하전류는 부하와 인버터 사이를 환류 (freewheeling)한다.



PWM 인버터

□ PWM 인버터

❖ 3상 인버터의 정현파 PWM 제어



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□실습 개요

- ❖ 정현파 PWM 기법을 사용하여 인버터를 제어해 60Hz 사인파를 생성하는 실습을 하도록 한다.
- ❖ ATmega128A의 16bit Timer1과 3을 사용하여 2쌍으로 이루어진 PWM 3개를 생성하여 3상 인버터를 실습을 하도록 한다.

□실습 목표

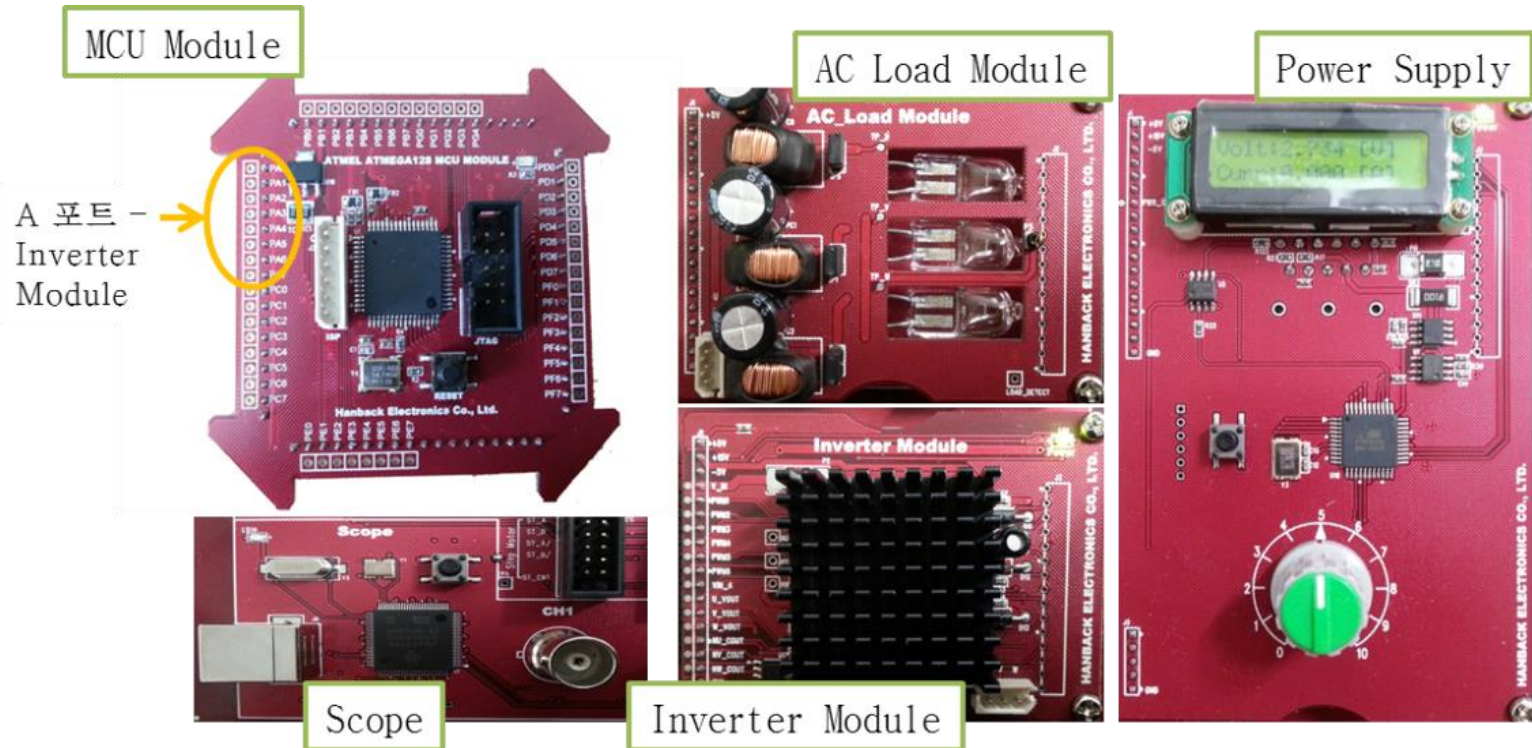
- ❖ PWM을 이용한 3상 인버터의 동작원리를 이해
- ❖ ATmega128A를 이용한 PWM을 사용한 인버터 제어 방법 습득



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 사용 모듈

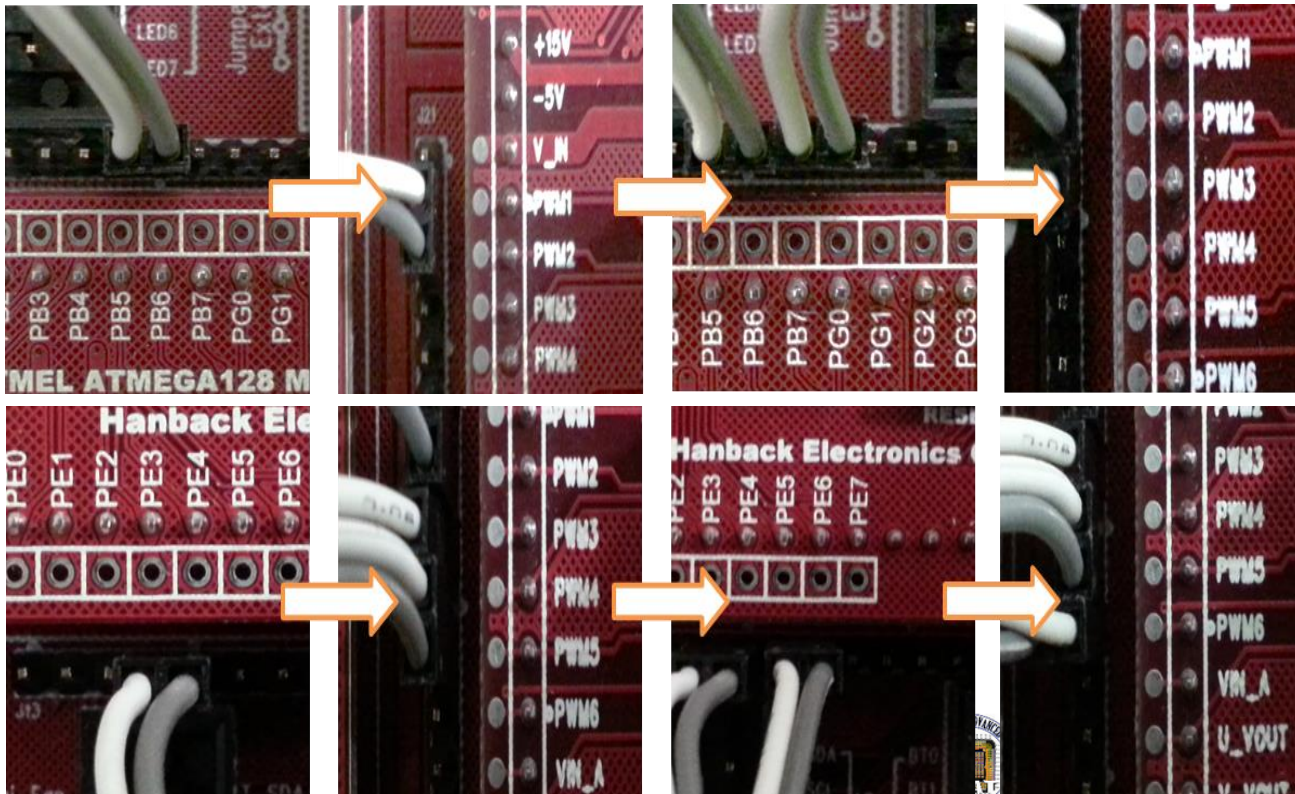
- ❖ MCU 모듈, Scope 모듈, AC Load 모듈, Inverter 모듈, Power Supply



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□모듈 결선 방법

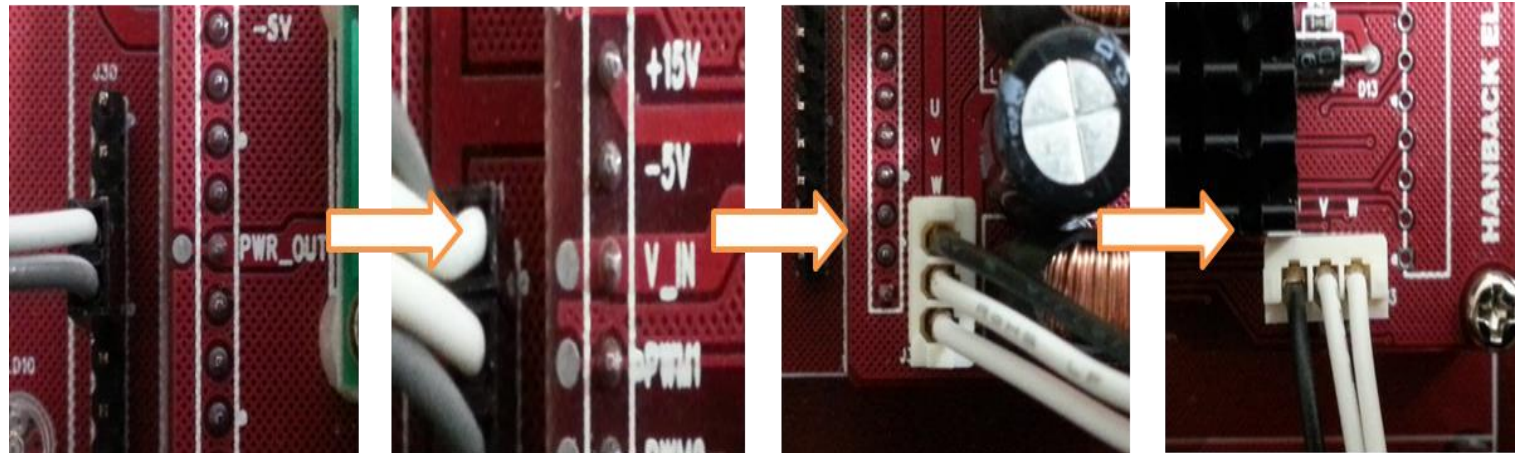
- ❖ MCU 모듈 포트 B의 PB5~PB7을 Inverter 모듈의 PWM1~PWM3에 연결
- ❖ MCU 모듈 포트 E의 PE3~PE5를 Inverter 모듈의 PWM4~PWM6에 연결



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□모듈 결선 방법

- ❖ Power Supply 모듈의 PWR_OUT핀을 Inverter 모듈의 V_IN 핀에 연결
- ❖ Inverter 모듈의 U, V, W 핀은 AC Load 모듈의 입력인 U, V, W 핀에 연결



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ Inverter의 라이브러리 함수

- Inverter 라이브러리 함수들은 inverter.c 파일에 포함되어 있다.
- `pwm_init(void)` : Timer 1 및 3의 PWM을 초기화 한다.
- `pwm_set (unsigned int pwmFreq,unsigned int pwmDuty)` : `pwmFreq`의 값을 갖는 주파수와 `pwmDuty`의 값을 갖는 듀티비의 PWM 파형을 설정한다.
- `U_pwm_duty(unsigned int pwmDuty)` : 인버터의 U상을 제어하는 PWM 파형의 듀티비를 `pwmDuty`의 값으로 설정한다.
- `V_pwm_duty(unsigned int pwmDuty)` : 인버터의 V상을 제어하는 PWM 파형의 듀티비를 `pwmDuty`의 값으로 설정한다.
- `W_pwm_duty(unsigned int pwmDuty)` : 인버터의 W상을 제어하는 PWM 파형의 듀티비를 `pwmDuty`의 값으로 설정한다.
- `phase_init(unsigned char sample)` : 각 상의 위상을 초기화 한다.
- `MakeSineTable(unsigned int amplitude)` : 사인파를 듀티비로 환산하여 사인 테이블에 저장한다. 여기서 `amplitude`는 사용하는 PWM 파형의 최대 듀티비이다.



ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ pwm_init() 함수

```
void pwm_init(void)
{
    DDRB |= 0xE0;           // OCR1A, OCR1B, OCR1C 출력
    DDRE |= 0x38;           // OCR3A, OCR3B, OCR3C 출력
                             // PWM mode 14
                             // 14.7456MHz
    TCCR1A = 0xBA;           //PWM, Fast PWM
    TCCR1B = 0x19;
    TCCR1C = 0x00;

    TCCR3A = 0xEE;           //PWM, Fast PWM
    TCCR3B = 0x19;
    TCCR3C = 0x00;

    TIMSK |= 0x04;
    TIFR = 0x04;
    sei();
}
```



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 소스분석

❖ inv_triple_pwm.c

1)	<pre>#include <avr/io.h> #include "inverter.h"</pre>
2)	<pre>int main(void){ phase_init(20); // 샘플링 갯수, 20개</pre>
3)	<pre>MakeSineTable(100); // 듀티비 변화로 사인파 생성, 0~100%까지 변화한다.</pre>
4)	<pre>pwm_set(1200,0); // 샘플링 갯수*인버터 출력파형 주파수=>20*60(Hz) = 1200</pre>
5)	<pre>pwm_init(); // PWM 초기화</pre>
6)	<pre>while(1); return 0; }</pre>



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 실행 결과

- ❖ Scope를 PC에 연결하고 인버터 모듈의 출력 중 'U' 핀과 'V' 핀에 프로브를 찍어 파형을 확인하도록 한다.



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 실행 결과

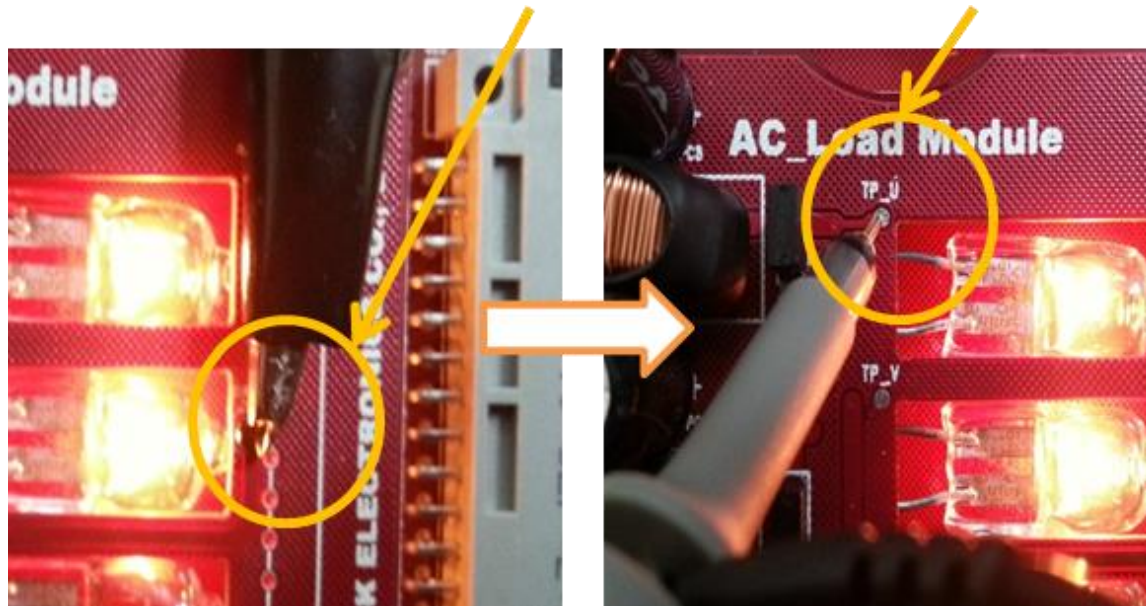
- ❖ AC Load 모듈의 JP5, JP1, JP2의 점퍼 케이블이 연결되었는지 확인한다. 실제로 사인 파형이 나오는지 확인하기 위해서이다.



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 실행 결과

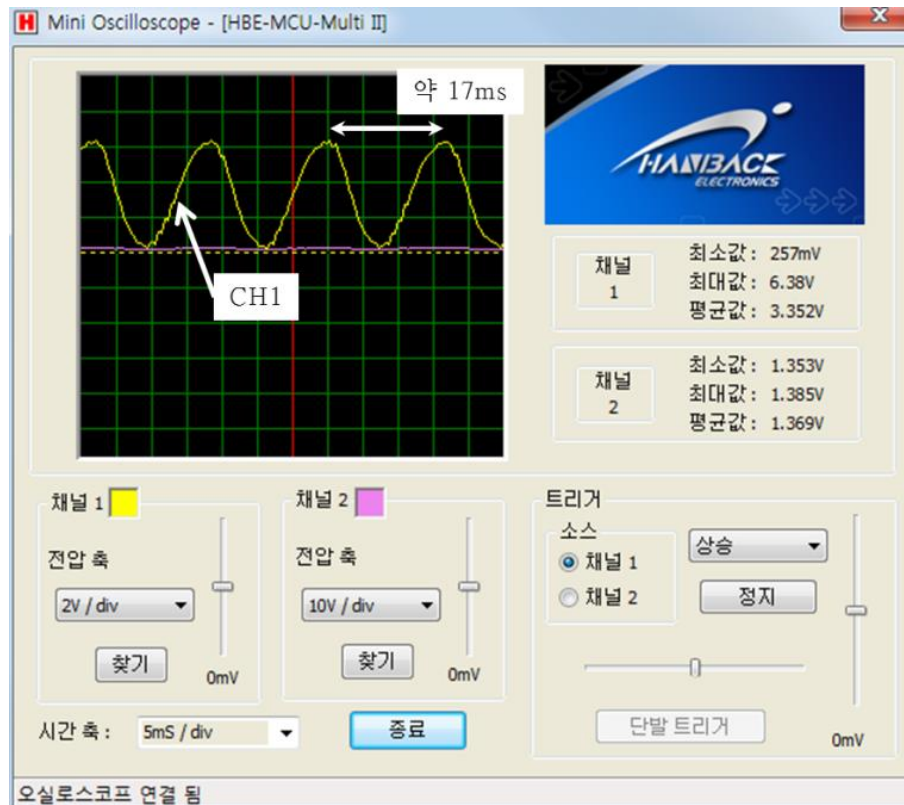
- ❖ 프로브(CH1)의 그라운드를 TP5에 연결하고 TP_U를 찍는다.



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 실행 결과

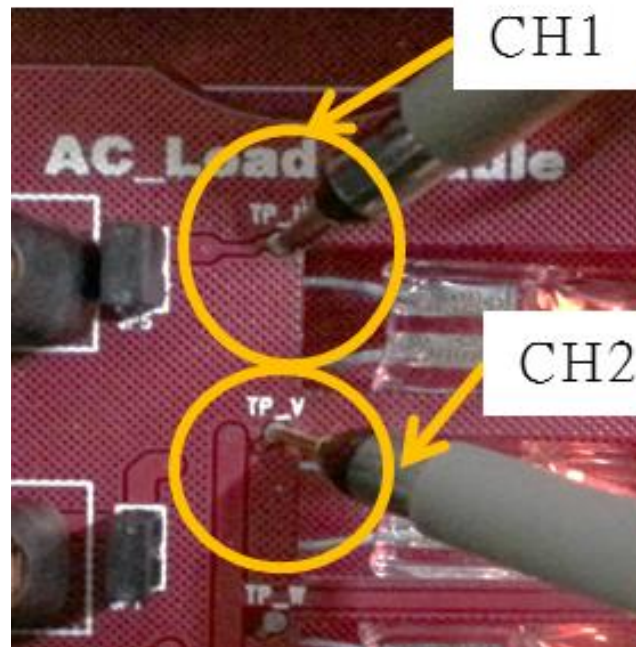
- ❖ CH1인 U의 파형이 주기가 약 17ms로 59Hz정도 되는 사인파 형태를 이루고 있는 것을 확인할 수 있다.



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 실행 결과

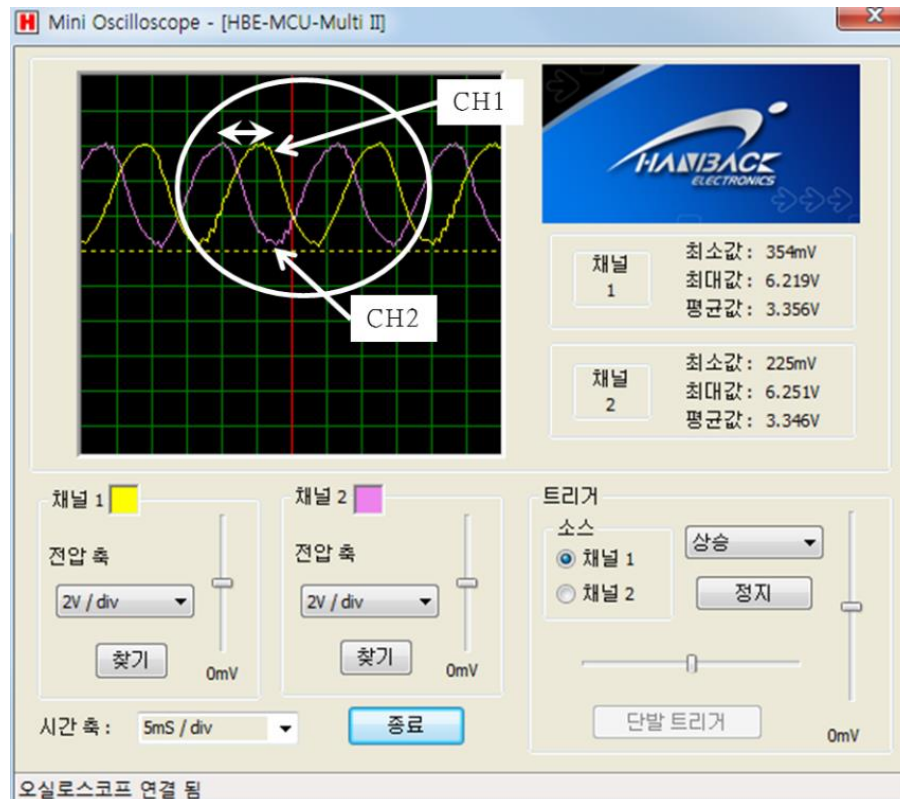
- ❖ U, V의 위상차를 확인하기 위해 프로브(CH1)가 TP_U에 찍힌 상태에서, 다른 프로브(CH2)를 TP_V에 찍는다.



실습 26 : PWM을 이용한 3상 인버터 제어하기

□ 실행 결과

- ❖ 오실로스코프를 보자. CH2인 V가 CH1인 U에 120도 정도 뒤에 있는 것을 확인할 수 있다.



BLDC 모터

□BLDC 모터

- ❖ DC 모터와 전기적인 특성은 유사하지만 전자적인 정류를 사용하여 유지보수가 필요한 기계적인 접촉 구조의 정류 기구를 제거하여 신뢰성을 향상시킨 전동기가 바로 브러시리스(Brushless) DC(BLDC) 모터이다.
- ❖ 이러한 BLDC 모터에서 전자적인 정류를 실행하기 위해서는 영구자석 회전자의 자극 위치를 검출하는 센서와 그 센서 신호를 이용해 상전류들을 전환하도록 하는 반도체 소자를 사용한 구동 회로가 필수적으로 요구된다.
- ❖ BLDC 모터의 구조는 브러시리스화를 위해 전류가 흐르는 전기자 권선을 고정자 축으로 배치하고, 영구 자석이 회전자 축으로 되어있다.
- ❖ BLDC 모터는 고효율, 고�출력밀도, 고토크/관성 비의 특성과 더불어 고속운전이 가능하고 구동 방식이 간단하며 가격이 저렴하다
- ❖ 응용
 - 팬, 송풍기, VCR, 세탁기, 냉장고, 재봉틀, 등의 가전기기로부터, HDD, DVD, CD 플레이어 등의 정보통신기기와 서보 구동 및 전기 자전거, 전기 스쿠터 등에 이르기까지 다양한 분야에 널리 사용되고 있다.



ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

BLDC 모터

□ BLDC 모터의 특징

- ❖ 신뢰성이 높고 수명이 길다.
- ❖ 제어성이 우수하다.
- ❖ 효율이 좋다.
- ❖ 전기적(불꽃 발생), 자기적 잡음이나 기계적 소음이 거의 없다.
- ❖ 소형화, 박형화가 용이하다.
- ❖ 고속운전이 가능하다.
- ❖ 순간허용 최대토크와 정격토크의 비가 크다.
- ❖ 냉각이 용이하다.



ICAT

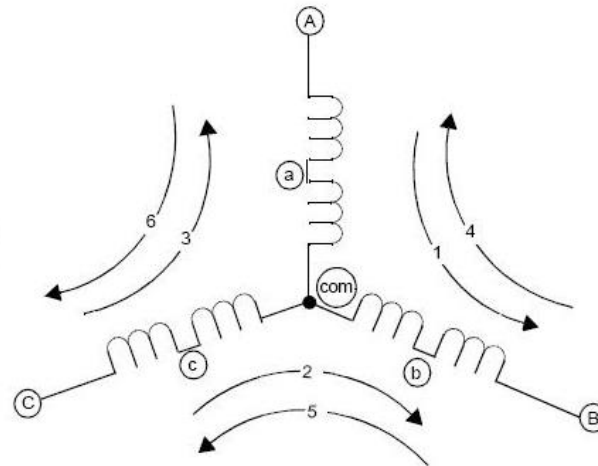
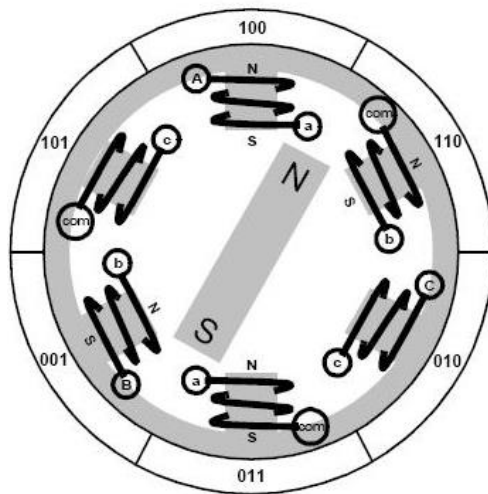
Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

BLDC 모터

□ BLDC 모터의 구조

❖ BLDC 모터의 내부 구조

- 그림 왼쪽에는 간단한 형태의 BLDC 모터의 내부를 나타내고 있으며, 오른쪽은 stator의 전기적인 구성을 나타내고 있다.



- HBE-MCU-Multi II 에서는 그림과 반대로 회전자가 권선으로 되어있고, 회전자 주위로 고정된 영구 자석이 4개 위치하고 있다.
따라서 4극(pole) BLDC 모터이므로 30도씩 제어가 된다.

BLDC 모터

□BLDC 모터의 구조

❖ BLDC 모터의 내부 구조

- BLDC 모터는 영구 자석으로 된 회전자와 권선으로 되어 있는 스테이터 폴들로 이루어져있다.
- 영구 자석 회전자와 전류가 인가된 권선으로부터 생성되는 자기장 사이의 관계에 의해 전기 에너지는 회전자를 회전시킴으로써 기계적인 에너지로 변환된다.
- 앞에서 설명한 구조는 내부 rotor가 하나의 N, S극 이루BLDC 내부 구조이다. 만약, rotor가 2 pole이 아니라 4 pole이라면, 내부 둘레의 stator의 개수도 6개가 아닌 12개가 된다. 그렇게 되면, stator에 인가되는 전류의 상이 바뀔 때, 60도씩 움직이는 것이 아니라 30도씩 움직이게 된다.



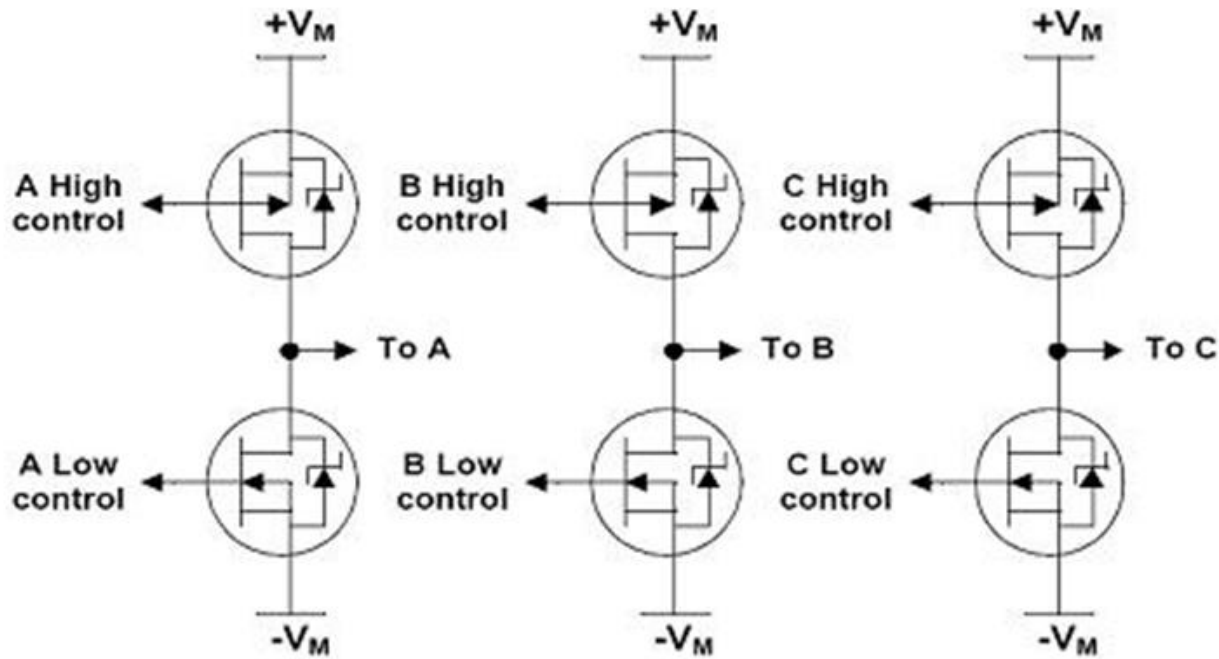
ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

BLDC 모터

□ BLDC 모터의 구동방법과 회로도

❖ 3상 브릿지 회로



BLDC 모터

□ BLDC 모터의 구동방법과 회로도

❖ 3상 브릿지 회로

- High 시그널이 입력되는 P-channel MOSFET 소자와 Low 시그널이 입력되는 N-channel MOSFET 소자로 구성되어 있다. 각각의 MOSFET 소자 사이가 모터의 A, B, C(U, V, W)에 연결되어 모터를 구동시키기 위한 전류를 공급하게 된다. 각각의 드라이브 컨트롤은 MOSFET에 High와 Low 시그널을 조합, 입력하여, A, B, C 터미널에 High 드라이브, Low 드라이브, Floating 드라이브가 걸리게 된다.
- 한가지 주의해야 할 점은 이런 형태의 회로에서는 모터전류 공급을 위한 하나의 드라이빙 회로에서 High MOSFET과 Low MOSFET을 동시에 활성화 시키면 안 된다는 것이다. 또한 마이크로컨트롤러에서의 신호를 즉시 인식시킬 수 있도록 드라이버 입력단에 반드시 풀-업과 풀-다운 저항을 연결해 주어야 한다.



ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

BLDC 모터

□ BLDC 모터의 구동방법과 회로도

❖ 드라이브 타이밍 순서

- MCU-Multi II에서 사용하는 BLDC는 내부 자극수가 4개이며, 360도를 4등분한 90도를 3등분(3개의 Hall 센서)하여 30도 간격으로 3개가 배치되어 있다.
- 앞의 그림 처럼 6step을 진행하면 총 180도가 움직이며, 한바퀴 회전하려면 6 step을 한번 더 진행하여야 한다.
- 이러한 홀센서 위치 및 내부 자극의 수 및 권선(코일)수 등은 모터 제조회사마다 틀리다. 이에 근거하여 모터 제조회사에는 상 변화 순서를 정의해서 판매가 되며, 우리는 이에 따라 모터를 제어하면 된다.
- 홀센서는 파워 소스를 필요로 하는데, 대략 4~24V의 전압을 요구하며, 5~15mA의 전류를 소모한다. 모터 제어회로를 설계할 때 이 점을 유의해야 한다. 홀센서는 보통 open-collector 타입으로 컨트롤러 쪽에 풀업 저항이 필요하다.



ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□실습 개요

- ❖ 인버터를 이용하여 BLDC 모터를 제어하는 실습을 하도록 한다.
- ❖ 제어 방법은 PWM 기법 중 바이폴라방식과 유니폴라 방식 중 한 상의 스위치만을 온/오프하여 스위칭 손실을 줄일 수 있어 전류 리플이 작아진다는 장점을 가진 유니폴라 방식을 사용한다.
- ❖ 유니폴라 PWM 방식 중에서도 상단 스위치 구동 방식을 적용한다.

□실습 목표

- ❖ 인버터를 이용한 BLDC 모터의 동작원리를 이해
- ❖ ATmega128A와 인버터를 이용한 BLDC 모터 제어 방법 습득



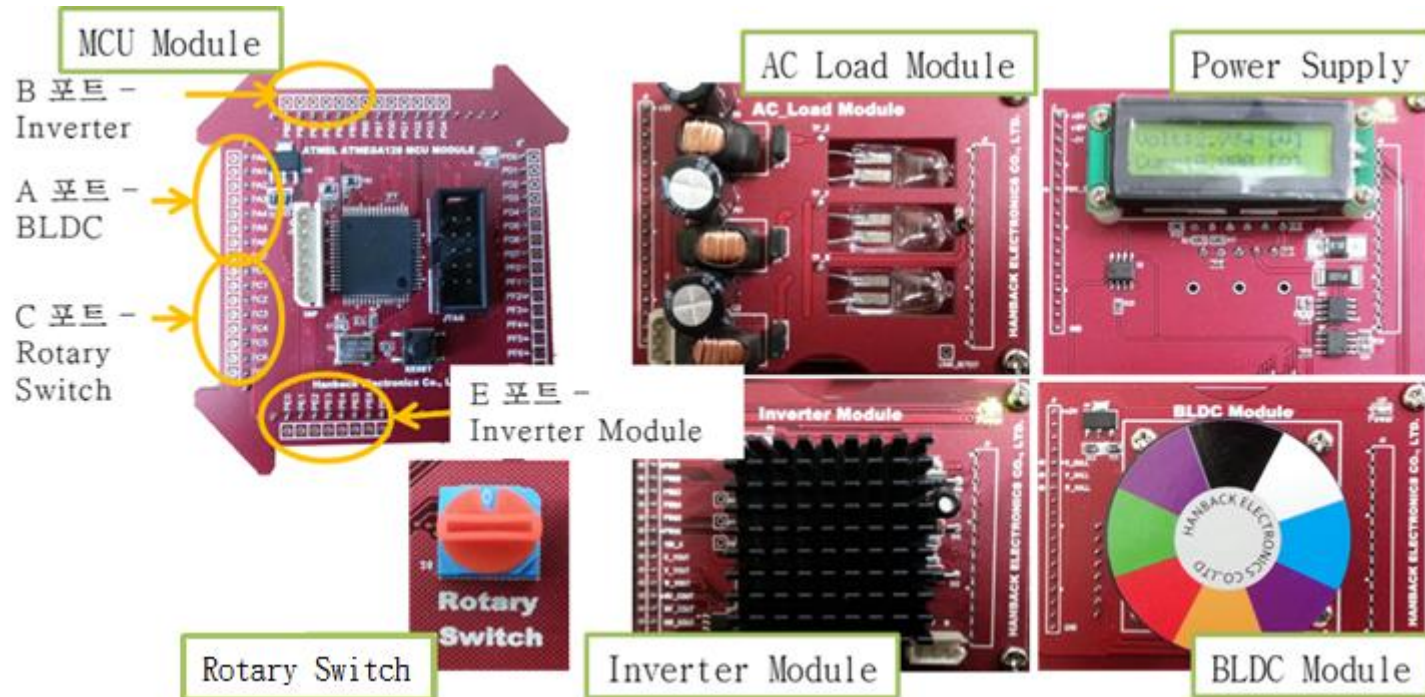
ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□사용 모듈

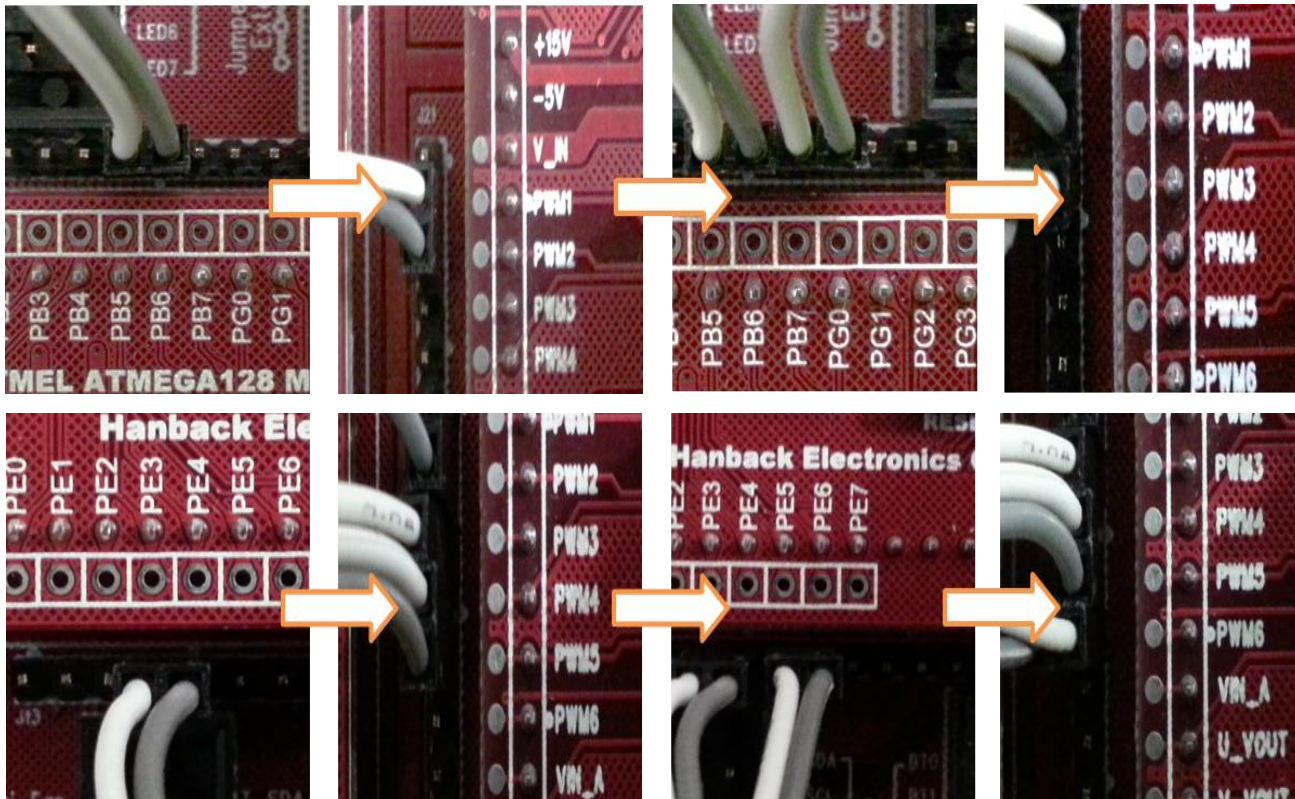
- ❖ MCU 모듈, Rotary Switch, AC Load 모듈, Inverter 모듈, BLDC 모듈, Power Supply



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 모듈 결선 방법

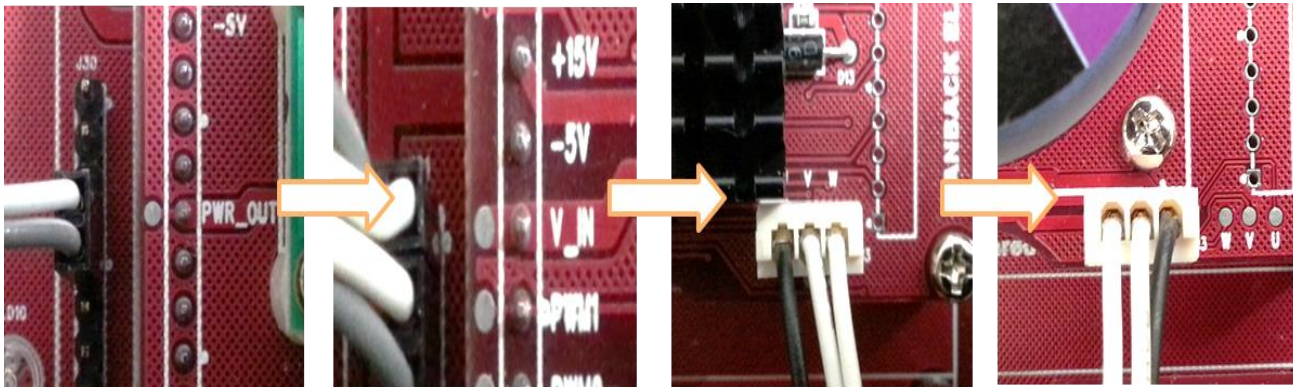
- ❖ MCU 모듈 포트 B의 PB5~PB7을 Inverter 모듈의 PWM1~PWM3에 연결
- ❖ MCU 모듈 포트 E의 PE3~PE5를 Inverter 모듈의 PWM4~PWM6 핀에 연결



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 모듈 결선 방법

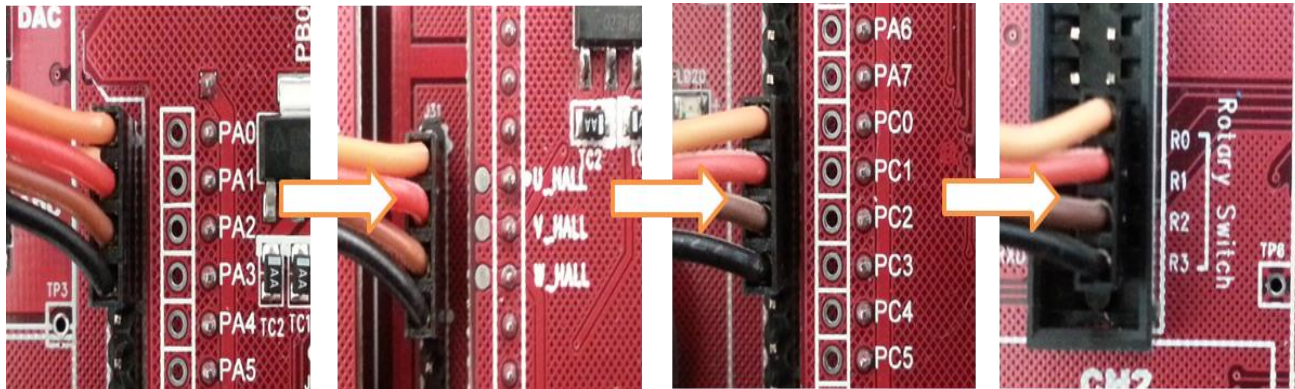
- ❖ Power Supply 모듈의 PWR_OUT핀을 Inverter 모듈의 V_IN 핀에 연결
- ❖ Inverter 모듈의 U, V, W 핀을 BLDC 모듈의 U, V, W 핀에 연결



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 모듈 결선 방법

- ❖ MCU 모듈 포트 A의 PA0~PA2를 BLDC 모듈의 U_Hall, V_Hall, W_Hall에 연결
- ❖ MCU 모듈 포트 C의 PC0~PC3은 Rotary Switch 모듈의 R0~R3에 연결



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ BLDC의 라이브러리 함수

- BLDC 라이브러리 함수들은 `bldc_upper_pwm.c` 파일에 포함되어 있다.
- `pwm_init(void)`
 - Timer 1 및 3의 PWM을 초기화 한다.
- `pwm_set (unsigned int pwmFreq, unsigned int pwmDuty)`
 - `pwmFreq`의 값을 갖는 주파수와 `pwmDuty`의 값을 갖는 듀티비의 PWM 파형을 설정한다.
- `U0_pwm_duty(unsigned int pwmDuty)`
 - AHigh의 PWM 파형 듀티비를 `pwmDuty`의 값으로 설정한다.
- `V0_pwm_duty(unsigned int pwmDuty)`
 - BHigh의 PWM 파형 듀티비를 `pwmDuty`의 값으로 설정한다.
- `W0_pwm_duty(unsigned int pwmDuty)`
 - CHigh의 PWM 파형 듀티비를 `pwmDuty`의 값으로 설정한다.



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ BLDC의 라이브러리 함수

- U0_pwm_On(void)
 - AHigh의 PWM 파형을 생성한다.
- V0_pwm_On(void)
 - BHigh의 PWM 파형을 생성한다.
- W0_pwm_On(void)
 - CHigh의 PWM 파형을 생성한다.
- U0_pwm_Off(void)
 - AHigh의 PWM 파형을 정지한다.
- V0_pwm_Off(void)
 - BHigh의 PWM 파형을 정지한다.
- W0_pwm_Off(void)
 - CHigh의 PWM 파형을 정지한다.



ICAT

Integrated Circuits for Advanced Technology Lab.

실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ BLDC의 라이브러리 함수

- U1_gpio_On(void)
 - ALow를 On 한다.
- V1_gpio_On(void)
 - BLow를 On 한다.
- W1_gpio_On(void)
 - CLow를 On 한다.
- U1_gpio_Off(void)
 - ALow를 Off 한다.
- V1_gpio_Off(void)
 - BLow를 Off 한다.
- W1_gpio_Off(void)
 - CLow를 Off 한다.



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ BLDC의 라이브러리 함수

- gpio_init(void)
 - Rotary switch 입력핀과 Hall 센서 입력 핀을 설정한다.
- unsigned char D_Digit(void)
 - Rotary switch의 값을 읽어온다.
- unsigned char BLDC_Hall_Status(void)
 - Hall 센서의 상태를 읽어온다.
- run_bldc(unsigned char hall_state)
 - Hall 센서의 상태에 따라 BLDC의 모터를 구동한다.



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ pwm_init() 함수

```
void pwm_init(void)
{
    DDRB |= 0xE0;           // OCR1A, OCR1B, OCR1C 출력
    DDRE |= 0x38;           // OCR3A, OCR3B, OCR3C 출력
                             // PWM mode 14
                             // 14.7456MHz
    TCCR1A = 0x8A;          //PWM, Fast PWM
    TCCR1B = 0x19;
    TCCR1C = 0x00;
    TCCR3A = 0x22;          //PWM, Fast PWM
    TCCR3B = 0x19;
    TCCR3C = 0x00;

    TIMSK |= 0x04;
    TIFR = 0x04;
    sei();
}
```



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 사전지식

❖ 드라이브 타이밍도의 각 스텝에서의 Hall 센서값 표

- Step1에서 Step6 까지 진행되면 모터는 시계 반대 방향으로 반 바퀴 회전하게 된다.

구분	Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step6
Hall 센서	6	2	3	1	5	4

❖ 시계 반대 방향 회전

- Hall 센서 값이 6이면 Step2의 제어 신호를 보내고, Hall 센서값이 2이면 Step3의 제어 신호를 보내면 된다.

Hall 센서	4	6	2	3	1	5
제어 신호	Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step6

❖ 시계 방향 회전

- Hall 센서 값이 6이면 Step6의 제어 신호를 보내고, Hall 센서값이 4이면

Hall 센서	2	3	1	5	4	6
제어 신호	Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step6



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 구동 프로그램 : 소스분석

❖ BLDC_Motor.c

1)	<pre>#include <avr/io.h> #include <util/delay.h> #include "bldc_upper_pwm.h" unsigned char duty = 0; int main(void){</pre>
2)	<pre> gpio_init();</pre>
3)	<pre> pwm_set(5000,0); // 5kHz</pre>
4)	<pre> pwm_init(); // PWM 초기화 while(1) {</pre>
5)	<pre> duty = D_Digit()*10; U0_pwm_duty(duty); V0_pwm_duty(duty); W0_pwm_duty(duty);</pre>
6)	<pre> run_bldc(BLDC_Hall_Status()); _delay_ms(1); } return 0; }</pre>



실습 27 : 인버터를 이용하여 BLDC모터 제어하기

□ 실행 결과

- ❖ Rotary 스위치의 값(1~A)을 변화시켜 PWM 듀티비에 따라 회전속도가 변화하는지 확인해보자.
- ❖ Power Supply 모듈의 출력 전압을 변화시켜 회전속도가 변화하는지 확인해 보자.



속도 제어