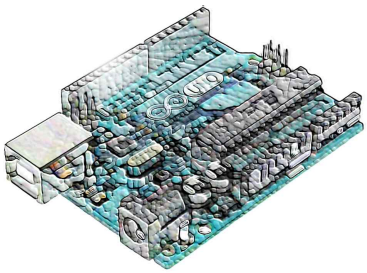


* 본 자료는 서경대학교 아두이노 프로그래밍 수업 수강자를 위해 작성된 강의 교재입니다.

강의교재– 아두이노 프로그래밍

14장 인터럽트

서경대학교 김진헌

14

인터럽트

내용

14.1 인터럽트(Interrupt)의 개념
14.2 아두이노의 인터럽트 벡터와 단자.
14.3 아두이노의 인터럽트 프로그래밍 개요
14.4 인터럽트 관련 아두이노 표준 함수
14.5 외부 인터럽트 프로그래밍 예제
14.6 주기적 인터럽트
14.7 nested interrupt에 대한 검토
14.8 고찰

14.1 인터럽트(Interrupt)의 개념

인터럽트는 프로세서의 동작을 잠시 중단하고 다른 일을 처리하게 만드는 동작이다. 인터럽트 동작은 외부에서 발생한 사건에 대한 처리를 실시간으로 처리할 수 있도록 마련한 프로세서의 주요 사이클[1] 중 하나이다.

인터럽트 처리를 위해 운영체제와 디바이스 드라이버는 사전에 인터럽트 서비스 루틴(**ISR**:Interrupt Service Routine, 혹은 Interrupt Handler)과 인터럽트 벡터 테이블(**IVT**: nterrupt Vector Table)을 사전에 초기화해 둔다. ISR은 인터럽트가 발생하면 처리할 루틴을 말하며, 이는 IVT는 ISR의 위치를 정보를 담고 있다. 인터럽트의 유형에 따라 처리되는 내용이 다른데 이는 인터럽트 타입번호(**type number**)에 의해 관리된다. 프로세서는 인터럽트가 접수되면 어떤 인터럽트 타입번호를 갖고 있는지 단자번호를 통해 알 수 있다.

프로세서는 인터럽트가 들어오면 CPU는 메인 루틴의 수행을 잠시 중단하고 인터럽트 서비스 루틴(ISR)으로 분기한다. 이때 IVT 내에서 참조할 곳의 위치는 인터럽트 type number가 인덱스로 활용된다.

그림 14.1.1에 보인 바와 같이 프로세서가 여러 개의 명령어(instruction 01~n+1 등)로 이루어진 메인 루틴을 수행하는 사례를 예로 들어 인터럽트가 처리되는 과정을 살펴보자. 현재 instruction 04를 수행 중에 event A에 의해 인터럽트가 발생한 것으로 가정하자[2].

현재 수행 중인 명령어(04)의 수행을 마친 후 인터럽트 벡터 테이블의 정보를 참조하여 인터럽트 서비스 루틴(ISR)이 위치한 곳으로 분기한다[3].

---

1) 프로세서의 사이클은 크게 ① 메모리 혹은 I/O 읽기/쓰기 사이클, ② 인터럽트 사이클, 그리고 ③ DMA 동작이 일어나는 idle cycle로 대별하여 분류할 수 있다.

2) 이러한 이벤트의 사례로는 외부에서 키를 입력했다던가, 통신 장치를 통해 처리해야 할 데이터가 유입되었다던가 등의 사례를 들 수 있다. 이러한 이벤트는 CPU의 인터럽트 단자(pin)를 통해 H/W 신호로서 보고된다.

3) 인텔의 x86 프로세서군에서는 IVT에 ISR의 주소가 기록되어 있다. ARM을 비롯한 임베디드 프로세서 계열에서는 IVT의 위치에 ISR로 분기하는 명령어가 들어가 있다. 이 부분에 대한 초기화(주소 혹은 명령어를 넣는 일)는 부팅과정 중에 운영체제 혹은 디바이스 드라이버가 담당한다.

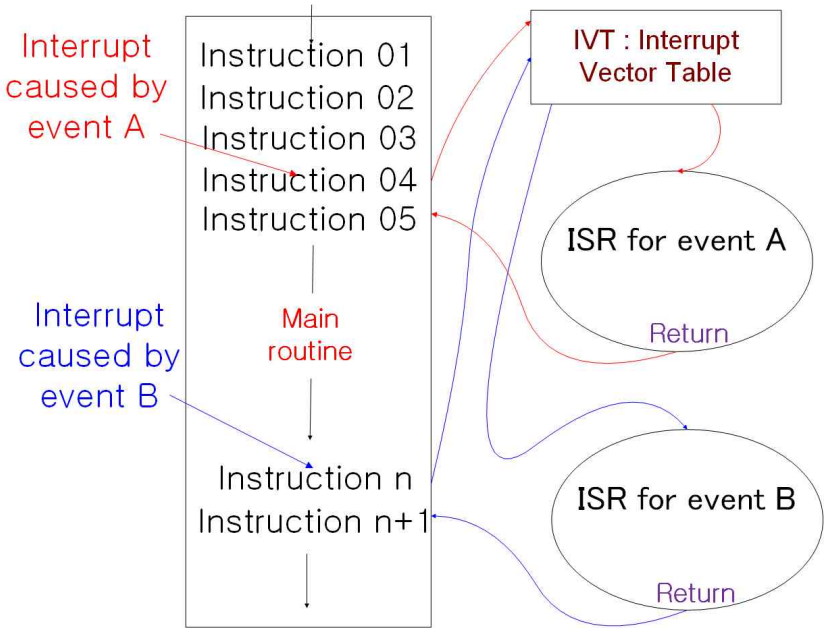


그림 14.1.1 인터럽트 동작의 개념도

그 ISR 루틴은 event A가 발생할 것에 대비한 처리 루틴이 미리 마련되어 있어서 해당되는 요청에 필요한 서비스를 수행한다[4]. ISR의 끝 부분에는 회귀(return) 명령어가 있어서 메인 루틴으로 복귀하도록 준비되어 있다. 본 사례의 경우에는 이벤트 A의 처리가 끝나면 메인 루틴의 05번째 명령어를 계속 수행하게 된다. 같은 방식으로 이벤트 B에 의한 인터럽트가 발생한다면 n반째 instruction의 수행을 마친 후에는 B의 ISR의 처리를 분기하여 해당 서비스를 수행하고 난 후 n+1번째의 instruction을 수행한다.

현재 상황에서 기억해야 할 주요 사항
1. 기술 용어: Interrupt Vector Table, Interrupt Service Routine, Interrupt Type Number
2. 인터럽트 처리 과정(flow)
3. IVT, ISR의 초기화/탑재의 주체

4) 운영체제나 디바이스 드라이버 등은 각 해당 인터럽트의 처리 루틴을 부팅 중에 미리 메모리에 탑재한다.

표 14.1.1 인터럽트 관련 주요 용어

설 명 의 수준	관계된 전문 용어	설명	상세설명
기초	IVT : Interrupt Vector Table	인터럽트가 발생하면 IVT를 참조하여 분기한다.	분기할 곳의 주소가 들어 있다. -> x86 Intel CPU
			분기하라는 명령어가 들어있다. -> ARM, AVR을 비롯한 여타의 임베디드 프로세서, 마이크로콘트롤러가 이에 해당한다.
	ISR : Interrupt Service Routine	인터럽트가 발생하면 처리하는 함수	IVT를 참조하여 ISR로 분기한다. ISR의 끝에는 복귀하는 명령어가 있어야 한다.
중급	PC : Program Counter	다음 수행할 명령어의 위치를 지정하는 레지스터	ISR로 진입하기 전에 PC를 stack에 넣는다. stack은 주기억 장치 안에 존재한다. ->x86 Intel CPU
			ISR로 분기하기 전에 PC를 복귀전용 return address register에 넣는다. -> ARM, AVR을 비롯한 여타의 임베디드 프로세서, 마이크로콘트롤러
	IE : Interrupt Enable flag	IE flag는 외부 터럽트의 허가 여부를 담당한다. IE=0 : 금지 IE=1 : 허가	ISR로 진입하기 전에 flag를 스택에 저장하고 IE=0으로 만든다. 이로서 ISR 내에서는 원천적으로 외부 H/W 인터럽트를 받지 못한다. -> 프로그래머가 ISR 내부 첫 명령어에서 IE=1로 만드는 명령어를 수행시켜 우선순위가 높은 인터럽트가 서비스될 수 있게 한다.
고급	nested interrupt	ISR 수행 중에 외부 인터럽트를 받아 다른 ISR로 진입하는 동작을 말한다.	인터럽트 제어기는 보통 더 높은 순위의 인터럽트만 CPU에 요구한다. 따라서 우선 순위가 낮은 인터럽트에게는 nested interrupt가 허가되지 않는다. -> x86, ARM 등의 일반적인 프로세서 인터럽트 제어기는 가리지 않고 모든 인터럽트를 CPU에게 요구한다. -> AVR 프로세서

지금까지 설명한 내용은 인터럽트의 기본 개념을 설명한 것이라 할 수 있다. 표 14.1.1에는 현재의 상황을 점검하는 용도로 인터럽트의 그 분석 수준

과 그에 따른 주요 기술 용어와 설명을 보였다.

❐ 참고: 인터럽트 적용 사례 - 키보드 동작의 경우

키보드 장치의 입력을 받기 위해 사용자가 키보드를 눌렀는지를 프로세서가 루프를 돌면서 계속 감시한다면 그동안 다른 일을 할 수 없기 때문에 효율적인 방법이 될 수 없다. 키보드 입력 장치에 인터럽트에 활용되는 사례를 예로 하여 ATmega CPU의 인터럽트 동작을 기준으로 설명하여 인터럽트의 개념과 필요성을 생각해 보기로 한다.

1. 키보드 장치는 사용자가 키를 눌렀을 때 이 사실(event A)을 CPU에 연결되어 있는 인터럽트 제어기(혹은 인터럽트 유니트)에게 알린다.
2. 인터럽트 제어기는 CPU의 단자를 통해 인터럽트 사건이 발생하였음을 알린다.
3. CPU는 인터럽트 단자에 신호가 유입되면 현재 수행 중인 명령어의 수행이 완료되는 대로 다음 인터럽트 사이클에 들어간다.
4. 먼저 다음 수행할 명령어의 주소를 복귀주소 전용 레지스터에 대피시킨다[5]. 다음 수행할 명령어의 주소는 보통 (PC: Program Counter)가 담당하므로 PC의 값을 그 레지스터에 저장한고 보면 된다. 이후 IVT에서 event A의 위치에 있는 명령어를 수행한다. AVR CPU의 경우에는 IVT에는 해당 ISR로 분기시키는 명령어들이 나열되어 있다.
5. ISR에 진입하면 임베디드 프로세서는 현재의 레지스터의 일부를 스택에 대비시킨다. 이러한 루틴은 컴파일러에 의해 자동 생성된다.
6. ISR 안에서 키보드 장치의 문자를 읽어 키보드 버퍼에 저장한 후 인터럽트 종료 명령어를 수행한다.
7. 인터럽트 복귀 명령어가 수행되면 복귀 주소 전용 레지스터 혹은 스택에

5) x86 프로세서의 경우에는 복귀주소를 메모리에 위치하는 스택에 대피시킨다. 스택은 용량이 충분하므로 ISR 수행 중에 발생한 다른 ISR의 분기 상황에도 복귀주소를 저장하기에 유리한 점이 있다.

서 복귀 주소를 읽어 복귀한다. 그 주소는 인터럽트가 발생할 당시 수행하던 명령어의 다음 위치이다.

❐ 참고-인터럽트 종류(인터럽트를 발생하게 하는 원인)

인터럽트에 대한 분류체계는 CPU마다 조금씩 다르기 때문에 일괄적으로 정하기는 어렵지만 크게 보면 표 14.1.2와 같이 구분해 볼 수 있다. 이는 인터럽트의 원인이 CPU 외부에서 단자를 통해서 유입되는가 혹은 내부에서 어떤 조건이 되면 스스로 발생하는지에 따라 구분한 것이다[6].

표 14.1.2 인터럽트의 종류

분류	*명칭 / -발생 원인	
외부 인터럽트 (External Interrupt) : H/W 신호로 CPU에게 접수된다.	NMI(Non Maskable Interrupt)	* 기계 착오 인터럽트(Machine Check Interrupt) - 프로그램 수행 중에 H/W(메모리, 버스) 결함으로 발생 * 전원 이상(Power Fail) 인터럽트 - 정전 혹은 전원공급 이상 시에 발생
	Maskable Interupt	- 외부 I/O 장치로부터 입출력 요청, 종료, 오류 발생 - 타이머에 의한 지정된 시간 경과
내부 인터럽트 (Internal Interrupt): CPU 스스로 발생한다.	* 프로그램 검사 인터럽트(Program Check Interrupt) -MCU에 정의되어 있지 않은 명령 실행 -0(Zero)로 나눗셈 시도 -보호된 메모리 영역 접근 -명령어 인터럽트를 수행	

6) 임베디드 이상의 프로세서를 기준으로 보았다고 할 수 있다. 이를 군에서는 인터럽트라는 표현과 익셉션(exception)을 혼용해서 사용하고 있다.

14.2 아두이노의 인터럽트 벡터와 단자

❐ 아두이노 우노의 인터럽트 단자

그림 14.2.1에 아두이노 우노에 사용되는 프로세서 Atmega328(DIP 28핀)의 단자 배정도를 보였다. 그림에서 1~28번은 프로세서 단자에 할당된 pin number이다[7].

Atmega328에서 제공하는 인터럽트의 개수는 실제로는 총 26개이지만 아두이노 우노에서 프로그래머에게 쓸 수 있도록 지원하는 인터럽트는 외부 인터럽트라 불리는 INT0, INT1 총 2개 뿐이다. 이 인터럽트는 단자 번호 4번(PD2), 5번(PD3) 단자에 외부 장치로부터 디지털 신호로 요구가 접수되면 발생하는 인터럽트이다.

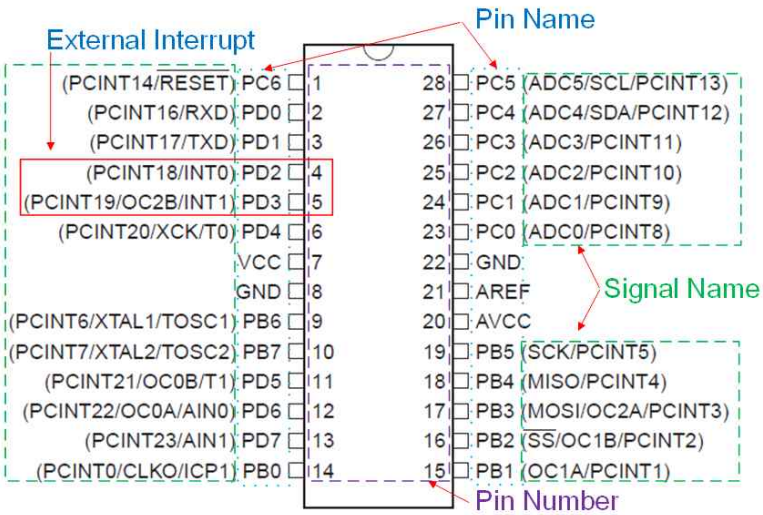


그림 14.2.1 아두이노 우노의 인터럽트 단자

---

7) 이 번호는 아두이노의 단자 번호와는 다르므로 착오 없기를 바란다. 아두이노 프로그램에 쓰이는 단자 번호는 논리적 번호로서 스케치 컴파일러에서 보드를 선택할 때 논리 번호가 실제의 단자 번호인 물리 번호로 매핑되는 변환과정을 거친다고 해석할 수 있다. 우노의 경우 INT0, INT1은 실제로는 단자번호 2번과 3번을 사용한다.

❐ 아두이노 우노의 벡터테이블과 인터럽트 서비스 루틴

표 14.2.1 Atmega328(우노의 프로세서)의 인터럽트

VectorNo.	Program Address(2)	Source	Interrupt Definition
1	0x0000(1)	RESET	External Pin, Power-on Reset, Brown-out Reset a
2	0x0002	INT0	External Interrupt Request 0
3	0x0004	INT1	External Interrupt Request 1
4	0x0006	PCINT0	Pin Change Interrupt Request 0
5	0x0008	PCINT1	Pin Change Interrupt Request 1
6	0x000A	PCINT2	Pin Change Interrupt Request 2
7	0x000C	WDT	Watchdog Time-out Interrupt
8	0x000E	TIMER2 COMPA	Timer/Counter2 Compare Match A
9	0x0010	TIMER2 COMPB	Timer/Counter2 Compare Match B
10	0x0012	TIMER2 OVF	Timer/Counter2 Overflow
11	0x0014	TIMER1 CAPT	Timer/Counter1 Capture Event
12	0x0016	TIMER1 COMPA	Timer/Counter1 Compare Match A
13	0x0018	TIMER1 COMPB	Timer/Coutner1 Compare Match B
14	0x001A	TIMER1 OVF	Timer/Counter1 Overflow
15	0x001C	TIMER0 COMPA	Timer/Counter0 Compare Match A
16	0x001E	TIMER0 COMPB	Timer/Counter0 Compare Match B
17	0x0020	TIMER0 OVF	Timer/Counter0 Overflow
18	0x0022	SPI, STC	SPI Serial Transfer Complete
19	0x0024	USART, RX	USART Rx Complete
20	0x0026	USART, UDRE	USART, Data Register Empty
21	0x0028	USART, TX	USART, Tx Complete
22	0x002A	ADC	ADC Conversion Complete
23	0x002C	EE READY	EEPROM Ready
24	0x002E	ANALOG COMP	Analog Comparator
25	0x0030	TWI	2-wire Serial Interface
26	0x0032	SPM READY	Store Program Memory Ready

표 14.2.1은 아두이노 우노에 사용되는 프로세서인 Atmega328 프로세서의 인터럽트(vector) 번호에 따른 IVT 기준 번지로부터의 주소, 요구원(source)과 그 활용처를 보인 것이다. 인터럽트 벡터 번호는 x86 CPU에서는 인터럽트 타입이라 불리는 것과 같은 개념으로 IVT의 시작점에서의 인덱스 역할을 담당한다. 만약 벡터 번호가 N이라면 시작 번지로부터의 주소는 (N-1)x2 번지가 된다.

모든 인터럽트는 IVT내에 독립적인 인터럽트 벡터를 보유하고 있으며 인터럽트의 벡터번호가 낮을수록 더 높은 우선순위의 인터럽트를 보유한다. 만약 두 종류가 인터럽트가 동시에 발생하게 되면 더 우선순위가 높은 인터럽트의 ISR이 먼저 수행되고 난 후 다음 우선순위의 인터럽트에 해당하는 ISR이 수행된다.

표에서 인터럽트 벡터를 담고 있는 IVT의 시작 주소(혹은 base address)는 설정에 따라 표 14.2.2와 같이 선택하여 바꿀 수도 있다.

표 14.2.2 Reset과 IVT의 base Address(Start Address)

BOOTRST	IVSEL	Reset Address	Interrupt Vectors Start Address
1	0	0x000	0x002
1	1	0x000	Boot Reset Address + 0x0002
0	0	Boot Reset Address	0x002
0	1	Boot Reset Address	Boot Reset Address + 0x0002

만약 BOOTRST=1, IVSEL=0의 설정이라면 그림 14.2.2와 같이 메모리 $0000번지부터는 인터럽트 벡터 테이블이 위치하게 될 것이고 이후에 ISR과 응용 프로그램 등이 설치될 것이다.

```
Address  Labels  Code                Comments
0x0000           jmp    RESET        ; Reset Handler
0x0002           jmp    EXT_INT0     ; IRQ0 Handler
0x0004           jmp    EXT_INT1     ; IRQ1 Handler
0x0006           jmp    PCINT0       ; PCINT0 Handler
0x0008           jmp    PCINT1       ; PCINT1 Handler
0x000A           jmp    PCINT2       ; PCINT2 Handler
0x000C           jmp    WDT          ; Watchdog Timer Handler
0x000E           jmp    TIM2_COMPA   ; Timer2 Compare A Handler
0x0010           jmp    TIM2_COMPB   ; Timer2 Compare B Handler
0x0012           jmp    TIM2_OVF     ; Timer2 Overflow Handler
0x0014           jmp    TIM1_CAPT    ; Timer1 Capture Handler
0x0016           jmp    TIM1_COMPA   ; Timer1 Compare A Handler
0x0018           jmp    TIM1_COMPB   ; Timer1 Compare B Handler
0x001A           jmp    TIM1_OVF     ; Timer1 Overflow Handler
0x001C           jmp    TIM0_COMPA   ; Timer0 Compare A Handler
0x001E           jmp    TIM0_COMPB   ; Timer0 Compare B Handler
0x0020           jmp    TIM0_OVF     ; Timer0 Overflow Handler
0x0022           jmp    SPI_STC      ; SPI Transfer Complete Handler
0x0024           jmp    USART_RXC    ; USART, RX Complete Handler
0x0026           jmp    USART_UDRE   ; USART, UDR Empty Handler
0x0028           jmp    USART_TXC    ; USART, TX Complete Handler
0x002A           jmp    ADC          ; ADC Conversion Complete Handler
0x002C           jmp    EE_RDY       ; EEPROM Ready Handler
0x002E           jmp    ANA_COMP     ; Analog Comparator Handler
0x0030           jmp    TWI          ; 2-wire Serial Interface Handler
0x0032           jmp    SPM_RDY      ; Store Program Memory Ready Handler
;
0x0034   RESET:  ldi    r16, high(RAMEND); Main program start
0x0035           out    SPH,r16      ; Set Stack Pointer to top of RAM
0x0036           ldi    r16, low(RAMEND)
0x0037           out    SPL,r16
0x0038           sei                 ; Enable interrupts
0x0039           <instr>  xxx
  ...     ...    ...     ...
```

그림 14.2.2 IVT와 RESET의 ISR이 설치된 메모리 내용

사례 1) 그림에서 RESET 인터럽트가 들어오면 0x0000 번지의 IVT의 명령어를 수행하여 0x0034 번지로 분기한다. 이 번지는 RESET의 ISR 프로그램의 시작 번지이다.

사례 2) 외부 인터럽트 EXT_ INT0가 발생하면 이는 인터럽트 벡터가 2이므로 (2-1)x2 번지의 명령어(jmp EXT_INT0)를 수행한다. 그리하여 해당 서비스 루틴으로 분기한다.

시작 번지를 $0000을 사용할 경우의 IVT와 ISR의 가상 배치 상황을 그림 14.2.3에 보였다.

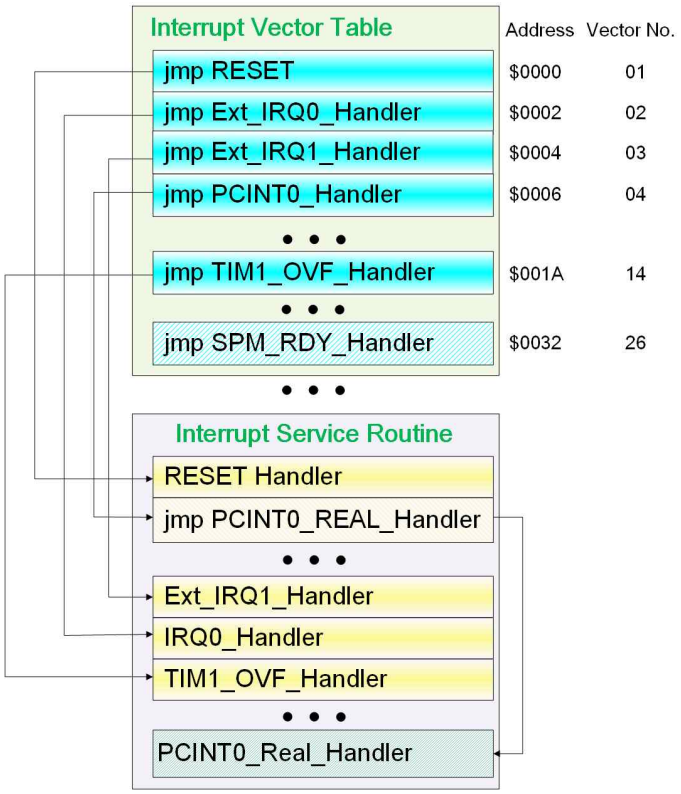


그림 14.2.3 Atmega328의 IVR와 ISR

사례 1) PCINT0 인터럽트는 벡터 3으로 서비스 된다. 해당 지점에는 ICINT0의 핸들러로 분기하는 명령어가 들어있어야 한다. 분기를 하면 그곳에 PCIINT0_REAL_Handler로 분기하는 명령어가 들어 있는데 이는 해당 ISR이 더 먼 곳에 있거나 프로그램의 길이가 길어 다 담지 못할 때 여유있는 메모리 공간으로 분기시키는 사례를 가상하여 개념적으로 기술한 것이다.

사례 2) 벡터 26 지점에는 원래 SPD_RDY의 ISR로 분기하는 명령어가 들어 있어야 한다. 그러나 이를 사용지 않을 때는 그 메모리 장치가 의미없는 쓰레기 데이터로 메워져 있거나, dummy ISR로 분기시키는 명령어가 들어 있을 수도 있다.

❐ 메가 2560의 인터럽트

표 14.2.3 ATmega2560의 인터럽트 벡터 테이블의 일부(총 1~57까지)

Vector No.	Program Address(2)	Source	Interrupt Definition
1	$0000(1)	RESET	External Pin, Power-on Reset, Brown-out Reset, Watchdog Reset, and JTAG AVR Reset
2	$0002	INT0	External Interrupt Request 0
3	$0004	INT1	External Interrupt Request 1
4	$0006	INT2	External Interrupt Request 2
5	$0008	INT3	External Interrupt Request 3
6	$000A	INT4	External Interrupt Request 4
7	$000C	INT5	External Interrupt Request 5
8	$000E	INT6	External Interrupt Request 6
9	$0010	INT7	External Interrupt Request 7
10	$0012	PCINT0	Pin Change Interrupt Request 0
11	$0014	PCINT1	Pin Change Interrupt Request 1
12	$0016(3)	PCINT2	Pin Change Interrupt Request 2
13	$0018	WDT	Watchdog Time-out Interrupt

.....(생략)...

47	$005C(3)	TIMER5 CAPT	Timer/Counter5 Capture Event
48	$005E	TIMER5 COMPA	Timer/Counter5 Compare Match A
49	$0060	TIMER5 COMPB	Timer/Counter5 Compare Match B
50	$0062	TIMER5 COMPC	Timer/Counter5 Compare Match C
51	$0064	TIMER5 OVF	Timer/Counter5 Overflow
52	$0066(3)	USART2 RX	USART2 Rx Complete
53	$0068(3)	USART2 UDRE	USART2 Data Register Empty
54	$006A(3)	USART2 TX	USART2 Tx Complete
55	$006C(3)	USART3 RX	USART3 Rx Complete
56	$006E(3)	USART3 UDRE	USART3 Data Register Empty
57	$0070(3)	USART3 TX	USART3 Tx Complete

아두이노 메가 2560보드는 Atmega2560 프로세서를 내장하고 있다 이 프로세서의 인터럽트는 표 14.2.3에 그 일부를 보인 바와 같이 총 57개가 지원된다. 그림 14.2.4은 인터럽트 벡터와 IVT 및 ISR의 관계를 사례를 가정하여 보인 것이다.

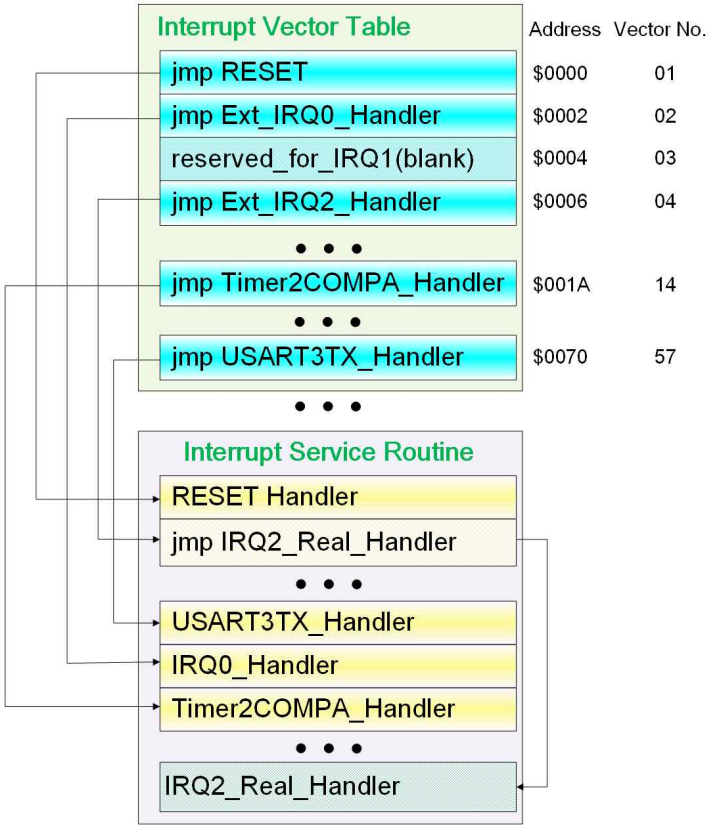


그림 14.2.4 Atmega2560 IVT, ISR과 벡터번호와의 관계

Atmega 2560은 외부 인터럽트 외에 다음과 같은 인터럽트를 제공한다.

■ 단자 상태 변화(pin change) 인터럽트(PCINT0~2)

다음과 같이 24개의 단자를 8개씩 3개 포트로 그룹지어 이 중 한 단자의 상태 변화가 다음 벡터 번호 10~12 중의 한 인터럽트 번호로 처리된다[8].

- PCINT7~PCINT0 : Pin Change Interrupt Request 0. 벡터 번호 10번
- PCINT15~PCINT8 : Pin Change Interrupt Request 0. 벡터 번호 11번

8) 아두이노에서는 이를 활용할만한 함수를 제공하고 있지 않다. 아두이노는 외부 인터럽만 지원한다.

▸ PCINT23~PCINT16 : Pin Change Interrupt Request 0. 벡터 번호 12번

■ Watchdog Time-out Interrupt-일정 시간이 경과하면 발생하는 인터럽트
■ 타이머 0~5 인터럽트 – capture/match
■ SPI, I2C 데이터 전송 관련 인터럽트
■ USART0~3 직렬통신 인터럽트
■ ADC 변환 인터럽트
■ EEPROM, FLASH 데이터 관련 인터럽트

14.3 아두이노 인터럽트 프로그래밍 개요

❑ 외부 인터럽트 사용법 개요

AVR 프로세서 자체는 여러 종류의 인터럽트를 보유하고 있지만[9] 아두이노에서는 일반 사용자에게는 단자로 제공되는 외부 인터럽트만 지원한다. 표 14.3.1에는 아두이노 모델의 일부 기종이 제공하는 인터럽트의 단자 번호와 인터럽트 번호를 보였다.

표 14.3.1 아두이노의 모델에 따른 단자 번호와 인터럽트 번호

모델 및 단자번호	인터럽트 번호[10]					
	INT0	INT1	INT2	INT3	INT4	INT5
Uno, Nano, Mini, other 328-based	2	3				
Mega, Mega2560, MegaADK	2	3	21	20	19	18
32u4 based (e.g Leonardo, Micro)	3	2	0	1	7	

아두이노 우노의 경우는 2개의 단자(2번과 3번)만 제공되며, Mega 2560은 6개의 단자(2, 3, 21~18번)를 지원한다. 우노의 경우 단자 2번은 인터럽트 0번으로 지원되며 3번 단자는 인터럽트 1번으로 제공된다[11]. 메가 2560과 우노는 단자 2번, 3번의 인터럽트 번호가 일치한다.

레오나르도 모델의 경우에는 2번 단자는 인터럽트 1번으로 지원된다. 이렇듯 선택한 모델에 따라 단자의 번호와 해당 인터럽트 번호가 달라질 수 있다.

---

9) Atmega 프로세서의 내부 레지스터를 사용한다면 이를 기능을 모두 이용할 수 있겠지만 스케치 함수로 제공되는 인터럽트는 단자를 사용하는 이른바 "외부인터럽트" 뿐이다.

10) 아두이노에서는 인터럽트 타입 번호를 인터럽트 번호라고 부른다.

11) 단자 번호 말고도 인터럽트 번호가 따로 관리되는 이유는 실제로 인터럽트는 인터럽트 번호(즉, 인터럽트 타입번호)가 IVT 내의 실제 ISR을 지정하는 인덱스로 쓰이기 때문이다.

아두이노 스케치 프로그램에서는 아래와 같이 인터럽트 번호에 따라 ISR 루틴을 연결짓는 함수(attachInterrupt)를 제공한다. 또한 단자 번호를 인터럽트 번호로 변환하는 함수(digitalPinToInterrupt)도 함께 제공하고 있다.

```
void attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinNum), FuncPtr ISR, int mode)
```

이 함수는 pinNum으로 지정된 단자에 인터럽트가 발생하면 ISR() 함수를 수행하도록 지정한다[12].

사례 1) 예를 들어 아두이노 우노보드에서 아래와 같이 설정한 인터럽트는 아두이노 3번 단자의 신호가 RISING(Low에서 High로 신호가 바뀜)이면 인터럽트 1[13]이 발생하여 함수 myISR()이 수행되도록 설정한다.

```
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), myISR, RISING)
```

사례 2) 보드가 메가 2560이라면 18~21번 단자를 사용할 수 있다. 만약 아래와 같이 설정하였다면 아두이노 19번 단자의 상태가 High에서 Low로 신호가 바뀌면 인터럽트 4가 발생하면 yourIsr() 함수가 수행되도록 설정한다.

```
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(19), yourIsr, FALLING)
```

위 함수를 이용해 인터럽트 서비스 루틴을 IVT에 링크를 걸면 특별한 조작이 없어도 해당 단자로 조건에 맞는 신호가 유입될 때마다 해당 함수가 계속 호출되게 된다.

이때 인터럽트를 발생하기 위한 단자의 신호 조건은 다음과 같다.

---

12) 즉 타입 번호(혹은 벡터 번호)에 맞는 IVT의 초기화 작업을 수행하며, IVT의 해당 위치에 ISR() 함수로 분기하게 하는 명령어를 삽입한다.
13) 우노의 경우는 단자 3의 인터럽트 번호는 1이다.

❑ 인터럽트 발생의 조건

attachInterrupt()에서 설정하는 인터럽트 조건은 위에서 제시한 사례를 포함해서 다음과 같이 총 4가지의 모드를 지원한다.

```
LOW :  해당 단자가 LOW 상태일 때 인터럽트 발생
RISING : LOW→HIGH로 바뀔 때 인터럽트 발생
FALLING : HIGH→LOW로 바뀔 때 인터럽트 발생
CHANGE : 상태가 바뀔 때 인터럽트 발생(LOW→HIGH 혹은 HIGH→LOW로 변할 때 중 어떤 경우든 발생)
         RISING+FALLING의 OR 조건이라 볼 수 있다.
```

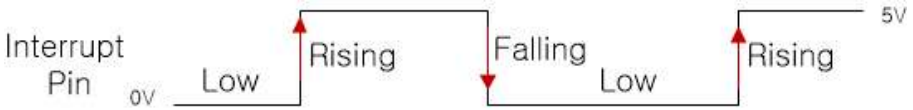


그림 14.2.1 인터럽트 입력 단자의 상태

예를 들어 아래와 같이 아두이노 2번 단자를 사용하여 인터럽트 조건을 CHANGE로 설정하였다면 단자가 HIGH로 되었을 때와 LOW로 되었을 때 모두 인터럽트가 발생한다. 이 경우 조건을 만족할 때마다 인터럽트가 발생하여 myISR()에 함수를 호출하게 된다.

```
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), myISR, CHANGE)
```

단자의 상태는 외부의 입력에 의해 제공되는 것이 일반적이지만, digitalWrite() 등의 함수로 출력한 결과에 의해 상태가 바뀌어도 인터럽트가 발생한다.

❑ 인터럽트 프로그래밍 주의사항

1) ISR 함수 안에서는 delay() 함수를 사용할 수 없다. delay() 함수가 사실은 인터럽트를 사용하는데 ISR 안에서는 다른 인터럽트가 금지되기 때문이다.
2) millis() 함수 값이 증가하지 않는다. delayMicroseconds()는 정상 가동한다[14].
3) 이 함수 안에서 받은 직렬 데이터는 손실될 수 있다.
4) 함수 내에서 변경하는 변수에 대해서는 '*volatile*'로 선언해야 한다[15].
5) ISR() 함수는 입력 파라미터를 사용할 수 없고, 어떤 값도 반환할 수 없다.
6) ISR 안에서는 가급적 빨리 수행루틴을 마무리하도록 작성한다.
7) ISR을 동시에 여러 개 수행할 수는 없다. 한 순간에는 우선 순위가 높은 그 중 하나만 수행된다.
8) 현재의 아두이노 지원체계에서는 기본적으로는 ISR 수행 중에 다른 인터럽트가 발생하였을 때 이를 처리하지는 않는다[16]. 만약 ISR 중에 인터럽트를 받고자 한다면 ISR 시작 당시에 interrupt() 함수를 수행하면 된다[17].

---

14) 설명을 보면 카운터를 쓰지 않기 때문이라고 했는데 '인터럽트를 사용하지 않아서' 라고 의역할 수 있다. 이렇게 되려면 타이머 카운트의 값이 64비트여야 하는데 타이머 카운트는 실제로는 16비트가 최대라서 의문이 든다(??).
15) volatile은 컴파일러에게 변수를 어떻게 다루어야 하는지를 알려주는 일종의 directive로서 variable qualifier라고 한다. 이 지시어는 컴파일러는 이들 변수의 값을 실제로 읽어보지 않고 CPU 내의 레지스터에 저장시켜 놓고 이를 재활용하여 사용하는 최적화를 시행하는 것을 금지한다. 변수의 값이 값이 바뀌었는데도 컴파일러는 나름 최적화를 꾀하기 위해 변하지 않은 레지스터의 값을 읽어 사용하는 문제를 방지하기 위한 조치이다. 참조 URL
16) 사실 여기에는 상당한 복잡한 메카니즘의 문제점이 도사리고 있다. 경험으로 관찰한 바에 따르면 Atmega는 nested interrupt를 지원하지 않는다. 이 구조가 허용된다면 우선순위가 높은 인터럽트가 발생하면 일단 그 인터럽트를 허가하고 그 다음 순위의 인터럽트로 돌아와야 한다. 일반적으로 ISR 내부에서는 모든 인터럽트는 금지된다. 따라서 별도로 추가 인터럽트를 허가하는 명령을 수행해야 한다. 아두이노도 이를 지원한다. 그러나 이 인터럽트는 무조건 모두 허용하기 때문에 우선순위가 높은 인터럽트의 동작의 수행을 보장하지 않는다.
17) 인터럽트에 대한 자세한 고찰은 다음 URL을 참고하기 바란다.
참조 URL: http://gammon.com.au/interrupts

14.4 인터럽트 관련 아두이노 표준 함수

1) 인터럽트 설치 함수– attatchInterrupt()

<table>
<tr><td colspan="3">void attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinNum), FuncPtr ISR, int mode) 추천
<s>void attachInterrupt(uint8_t intNo, FuncPtr ISR, int mode) 비추천. 설명생략</s>
<s>void attachInterrupt(uint8_t pinNo, FuncPtr ISR, int mode) 비추천. 설명 생략</s></td></tr>
<tr><td>기능</td><td colspan="2">인터럽트 발생 시 처리할 ISR을 지정(연결).
주의! : 아두이노는 외부 인터럽트만 지원한다.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">매개변수</td><td>digitalPinToInterrupt(pinNum)</td><td>digitalPinToInterrupt(pinNum) 함수는
단자번호(pinNum)를 지정하면 다음과 같이 외부 인터럽트 번호(INT0~INT5)로 변환해 준다.
<table>
<tr><th>인터럽트 번호</th><th>단자 번호</th><th>인터럽트 번호</th><th>단자 번호</th></tr>
<tr><td>0</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr>
<tr><td>2</td><td>21</td><td>3</td><td>20</td></tr>
<tr><td>4</td><td>19</td><td>5</td><td>18</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>FuncPtr ISR</td><td>인터럽트 발생 시 분기하여 수행할 ISR 함수.
callback 함수라고도 부른다.</td></tr>
<tr><td>int mode</td><td>인터럽트가 언제 발생할 것인지 지정
- LOW : 해당 단자가 LOW 상태일 때 발생[18)]
- RISING : LOW→HIGH로 바뀔 때 발생
- FALLING :HIGH→LOW로 바뀔 때 발생
- CHANGE : 상태가 바뀔 때 발생(LOW→HIGH 혹은 HIGH→LOW로 변할 때 중 어떤 경우든 발생)</td></tr>
<tr><td>리턴값</td><td>void</td><td>없음</td></tr>
</table>

18) 실험에 의하면 ISR을 빠져 나오면 단자가 LOW를 계속 유지하는 이상 계속 인터럽트가 발생하는 것으로 관찰되었다.

attachInterrupt() 함수는 외부 인터럽트 번호, 혹은 단자와 이곳에 인터럽트가 발생할 경우 호출될 ISR 함수를 연결하는 작업을 수행한다. 인터럽트를 사용하기 전 이와 같은 초기화 설정을 통해 인터럽트가 발생되면 해당 ISR로 분기할 수 있도록 IVT를 초기화하는 작업을 수행하도록 미리 ISR 함수를 정의해두는 작업이 필요하다.

이 함수의 첫 번째 인자는 인터럽트 번호 혹은 인터럽트 단자 번호를 첫 번째로 지정하게 되어 있는데 이와 같이 인터럽트 번호 혹은 단자 번호 숫자를 직접 지정하는 것은 입력하는 값이 단자 번호인지 인터럽트 번호인지가 애매하기 때문에 권장하지 않는다.

이보다는 **digitalPinToInterrupt()** 함수를 사용하여 **단자 번호를 지정**하여 이를 인터럽트 번호로 치환하여 사용하는 방법을 추천하고 있다. 아래에 스케치 통합환경에 digitalPinToInterrupt() 함수의 실제로 정의된 내용을 보였다.

```
Arduino₩Arduez_sketch_v16₩hardware₩arduino₩variants₩mega₩pins_arduino.h
#define digitalPinToInterrupt(p) ((p) == 2 ? 0 : ₩
((p) == 3 ? 1 : ((p) >= 18 && (p) <= 21 ? 23 - (p) : NOT_AN_INTERRUPT)))
```

이를 관찰하여 보면 단자번호와 INT 번호와의 관계는 다음과 같음을 알 수 있다.

digitalPinToInterrupt(2) -> 0을 반환. 단자번호=2. INT번호=0.
digitalPinToInterrupt(3) -> 1을 반환. 단자번호=3. INT번호=1.
digitalPinToInterrupt(21) -> 2를 반환. 단자번호=21. INT번호=2.
digitalPinToInterrupt(20) -> 3을 반환. 단자번호=20. INT번호=3.
digitalPinToInterrupt(19) -> 4를 반환. 단자번호=19. INT번호=4.
digitalPinToInterrupt(18) -> 5을 반환. 단자번호=18. INT번호=5.

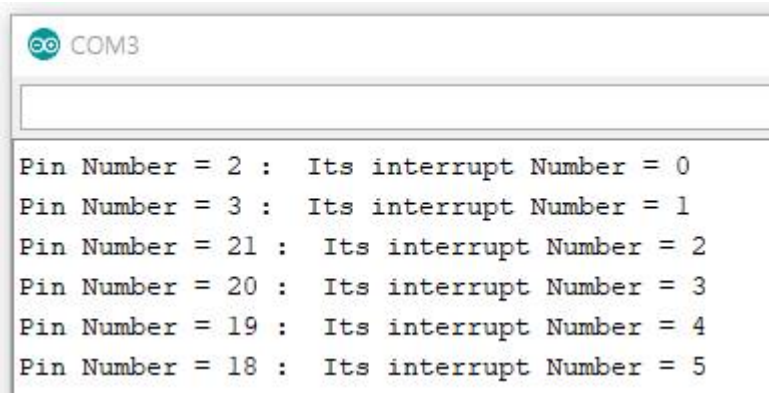
본 자료의 정확도를 판단하기 위해서는 **digitalPinToInterrupt()** 함수를 사용해 입력한 단자가 몇 번째의 INT 번호로 할당되는지 실험 프로그램을 작성

하여 출력해 보면 알 수 있다.

❒ 실험 4.1 : 아두이노 메가 2560
digitalPinToInterrupt()의 역할을 살펴본다. 단자번호를 입력하면 해당 인터럽트 번호를 반환하는 기능을 수행한다.

digitalPinToInterrupt.ino : 아두이노 표준 함수, digitalPinToInterrupt()

```
01  int pinNumList[6] = {2, 3, 21, 20, 19, 18}; // 인터럽트 단자번호 목록
02  void setup() {
03    Serial.begin(9600);
04    for (int i=0; i<6; i++) {
05      Serial.print("Pin Number = ");
06      int pinNum = pinNumList[i];
07      Serial.print(pinNum);
08      Serial.print(" :  Its interrupt Number = ");
09      Serial.println(digitalPinToInterrupt(pinNum));
10    }
11  }
12  void loop() {
13  }
```



digitalPinToInterrupt.ino의 수행결과(메가 2560)

```
COM5

Pin Number = 2 :  Its interrupt Number = 0
Pin Number = 3 :  Its interrupt Number = 1
Pin Number = 21 :  Its interrupt Number = -1
Pin Number = 20 :  Its interrupt Number = -1
Pin Number = 19 :  Its interrupt Number = -1
Pin Number = 18 :  Its interrupt Number = -1
```

digitalPinToInterrupt.ino의 수행결과(아두이노 우노)

이상의 결과를 종합하여 보면 아두이노 우노는 인터럽트를 2개만 지원하며 메가 2560과 인터럽트INT0와 INT1와 단자번호까지 같음을 알 수 있다. 실험 결과를 정리하여 보면 표 14.4.1과 같다.

표 14.4.1 인터럽트 번호와 아두이노 논리 단자 번호 매핑 관계

지원하는 모델	인터럽트 번호	단자번호	인터럽트 번호	단자번호
Uno, Mega 2560	**INT0**	**2**	**INT1**	**3**
Mega 2560	**INT2**	**21**	**INT3**	**20**
	INT4	**19**	**INT5**	**18**

2) 인터럽트 해제 함수– detachInterrupt()

detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinNum)) 추천 ~~detachInterrupt(interrupt) 비추천. 설명 생략.~~ ~~detachInterrupt(pin) 비추전. 설명생략.~~		
기능	지정한 외부 인터럽트의 사용을 중지한다. 해당 단자(pinNum)에 인터럽트를 발생시킬 수 있는 조건(신호 유입 등)이 되어도 인터럽트가 발생되지 않는다. 따라서 ISR 함수도 수행되지 않는다. 프로세서 내부의 인터럽트제어기의 마스크 레지스터 해당 비트를 설정하는 방식으로 수행된다.	
매개변수	digitalPinToInterrupt(pinNum)	없음
리턴 값	void	없음

3) 인터럽트 금지, 허가 함수 – noInterrupts(), interrupts()

attatchInterrupt()와 detachInterrupt() 함수가 지정한 특정 단자의 인터럽트를 금지하는데 반해 noInterrupts() 함수는 모든[19] HW 인터럽트를 금지한다. 여러 종류의 인터럽트를 접수하는 맨 마지막 단계에서 금지하는 명령어라고 할 수 있다. 인터럽트에 관련된 초기화 작업 이전에 이 명령어를 사용하면 준비되지 않는 상태에서 인터럽트가 발생하여 오류가 발생하는 일을 막을 수 있다.

그림 14.4.1에는 여러 종류의 인터럽트를 입력하는 개념도를 보였다. noInterrupt() 함수는 CPU 코어가 받아들이는 최종 단계에서 인터럽트를 금

19) 14.2절에 나온 H/W 기반의 모든 인터럽트(8종)를 금지한다.

지할 수 있는 함수이다. 이는 CPU의 제어 플래그(flag), IEF를 해제함으로써 이루어진다.

그림에 보인 바와 같이 모든 인터럽트는 인터럽트 제어기에 의해 의해 관리된다. 아두이노에서 지원하는 외부 인터럽트(그림에서 Ext. INTs)도 여타의 인터럽트와 같이 인터럽트 제어기에 접수되어 CPU 코어에게 전달된다. noInterrupt() 함수는 사실상 IEF를 클리어[20]하는 역할을 담당하기 때문에 다른 여타의 인터럽트들도 모두 접수가 차단된다. 이렇게 금지할 수 있는 인터럽트를 통틀어 maskable 인터럽트라고 칭한다.

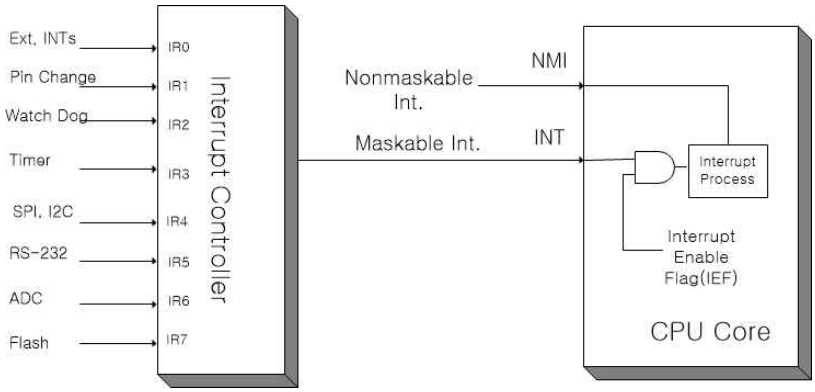


그림 14.4.1 인터럽트 입력 개념도

20) AND 게이트의 한쪽 입력에 IEF에 연결된다. 이 비트가 0이면 인터럽트에서 요구되는 모든 인터럽트 신호가 making되어 CPU 코어의 인터럽트 처리 과정으로 전달되지 않는다.

void noInterrupts()		
기능	메인 프로그램이 시작할 때는 인터럽트는 허용하는 것이 본래 기본값으로 설정되어 있다. 본 함수는 CPU 차원에서 이를 불허하도록 CPU의 상태 레지스터 중 IE(Interrupt Enable) 비트를 0으로 해제한다. IE가 0이면 외부에서 인터럽트가 발생해도 CPU는 이를 무시한다. 외부 인터럽트를 설정하는 작업이 마무리되지 못하였거나, 시간을 다투는 중요한 루틴을 수행하기 전에 호출할 수 있다[21]. IE가 0이면 직렬통신의 송신 작업이 진행되지 않으며 너무 오래 이 상태를 유지하면 타이머 동작 등이 제대로 진행되지 않을 수 있다. "cli() // clear interrupt flag." 명령으로 대신할 수 있다.	
매개변수	void	없음
리턴 값	void	없음

인터럽트를 금지 후 attachInterrupt() 함수로 인터럽트 서비스 루틴을 설치하고 나면 다시 인터럽트를 허가할 때 interrupts() 함수를 수행한다. 이 함수는 CPU가 인터럽트를 받는 일을 허가한다.

void interrupts()		
기능	인터럽트 요청에 따른 ISR 처리를 허용한다. noInterrupts()함수로 인터럽트 요청을 불허했던 것을 해제한다. CPU의 상태 레지스터 중에서 인터럽트를 받아들이도록 하는 비트 IEF가 1로 설정된다. "sei() // set interrupt flag." 명령으로 대신할 수 있다.	
매개변수	void	없음
리턴 값	void	없음

21) CPU의 상태 레지스터에는 보통 외부 인터럽트를 무시하는 제어 비트를 갖고 있다. 아마도 이 비트(Global Interrupt Enable)를 제어하는 것으로 추정된다.

14.5 외부 인터럽트 프로그래밍 예제

본 절에서는 INT 단자를 통해 인입되는 외부 인터럽트를 처리하는 사례를 연습해보기로 한다.

예제(5.1) - GPIO 출력에 의한 INT 단자의 인터럽트 요구 발생 - 인터럽트 기반의 LED 점등(LED 회로 결선 필요)

❒ 예제 5.1 : 아두이노 우노/메가 2560 점검 완료.
메인 루틴에서 1초마다 행하는 출력 동작이 인터럽트에 의해 토글된 state의 값을 출력한다.

INT_LED.ino: 아두이노 표준 함수, attachInterrupt(), digitalPinToInterrupt()

```
01  int pinINT = 2;  // pin number of INT0. connected to LED
02  volatile int state = HIGH;
03  void setup() {
04      pinMode(pinINT, OUTPUT);
05      digitalWrite(pinINT, LOW);
06      attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinINT), blink, CHANGE);
07  }
08  void loop() {
09      digitalWrite(pinINT, state); // Int occurs because of pin state change
10      delay(1000);
11  }
12  void blink() {       // Interrupt Service Routine
13      state = !state;  // Toggle the state
14  }
```

본 예제 프로그램의 실습을 위해서는 그림 14.5.1에 보인 바와 같이 단자 2번을 LED에 연결하여 저항을 통해 접지시켜야 한다. 예제 프로그램을 수행

하면 LED가 점등된 이후 1초 주기로 소등과 점등을 무한 반복한다.

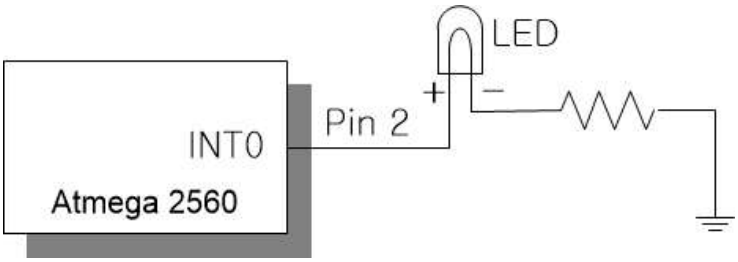


그림 14.5.1 실험을 위한 LED 연결도

그림 14.5.2에는 예제 프로그램의 흐름도를 보였다. 단자 2번에 변수 state를 쓰는 동작(소스의 11번 줄)에서 초기 0->1로 상태가 변하면서 인터럽트가 발생한다. 인터럽트가 발생하면 ISR로 분기하여 그곳에서 state를 토글시키고 돌아온다. 이후 delay함수를 1초가 수행시킨 후 digitalWrite() 함수를 수행하면 LED는 소등되면서 다시 단자 2의 상태가 바뀌어 인터럽트가 발생한다. 이는 다시 ISR을 수행하게 만들고 변수 state를 토글하게 하여 이 같은 동작을 무한 수행하게 된다.

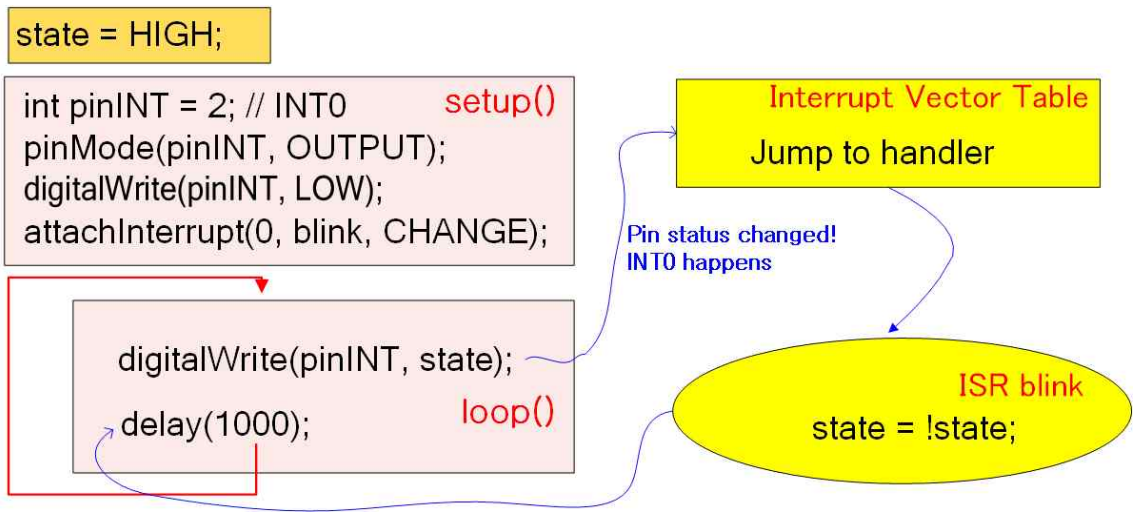


그림 14.5.2 프로그램의 흐름도

예제(5.2a) - GPIO 출력에 의한 INT 단자의 인터럽트 요구 발생 - 인터럽트 기반의 LED 점등(내장 LED 활용)

❒ 예제 5.2a: 아두이노 우노
5.1의 예제에 내장 LED를 점등하는 기능을 추가한다.

INT_LED_BUILTIN.ino: 표준 함수, attachInterrupt(), digitalPinToInterrupt()

```
01  int pinINT = 2;  // pin number of INT0. connected to LED
02  volatile int state = HIGH;
03  void setup() {
04      pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
05      pinMode(pinINT, OUTPUT);
06      digitalWrite(pinINT, LOW);
07      attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinINT), blink, CHANGE);
08  }
09  void loop() {
10      digitalWrite(pinINT, state); // Int occurs because of pin state change
11      digitalWrite(LED_BUILTIN, state); // 외장 LED와 반대의 동작을 한다.
12      delay(1000);
13  }
14  void blink() {        // Interrupt Service Routine
15      state = !state;   // Toggle the state
16  }
```

본 예제는 외장 LED와 내장 LED가 서로 반대로 LED가 점등되는 것을 관찰할 수 있다. 10번 라인에서 외장 LED를 점등하는 순간 인터럽트가 발생하여 14번의 blink() 함수를 수행하여 state 상태를 반전해 놓고 난 후 11번 라인으로 귀환하기 때문에 내장 LED는 반대로 동작하는 것이다[22].

☺ 미션 1: 본 실험을 기반으로 state 값을 시리얼 모니터로 출력해 보자.

22) 그런데 내장 LED만 활용하려고 외장 LED를 제거하면 동작이 잘 안되는 것을 관찰하였다. 여러분들은 어떤지 확인해보고 그 이유와 대책을 토론해 보도록 하자. => 예제 5.2b에서 분석한다.

예제(5.2b) - GPIO 출력에 의한 INT 단자의 인터럽트 요구 발생 - 예상치 못한 인터럽트의 발생

❒ 예제 5.2b: 아두이노 우노
5.2a에서 pinINT 단자에서 LED 연결을 제거하고, 내장 LED를 점등하도록 실험 내용을 바꾸면 갑자기 동작이 안된다. 이 원인을 분석하여 보니 pinINT 단자를 출력모드로 설정하는 순간 인터럽트가 발생하는 것으로 판단되었다.

INT_unexpected.ino: 표준 함수, attachInterrupt(), digitalPinToInterrupt()

```
01  // FALLING, CHANGE 모드는 초기화 과정에서 1회의 인터럽트를 발생한다.
02  #define MODE FALLING
03  int pinINT = 2;  // pin number of INT0. connected to LED
04  volatile bool state = LOW;
05  void setup() {
06      pinMode(pinINT, OUTPUT);  // 이 순간 인터럽트 발생
07      attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinINT), blink, MODE);
08      Serial.begin(9600); }
09  void loop() {
10    if ( state == LOW) { Serial.println("LOW: state is low...");
11        abc:  goto abc;  }
12    else { Serial.println("HIGH: state is High...");
13        efg:  goto efg;  }
14  }
15  void blink() {
16      state = !state; }
```

이 예제 프로그램은 얼핏 보면 10번 줄의 명령어가 수행될 것 같지만, 실제로는 12번의 명령이 수행된다. 이는 loop() 문에 들어가면서 이미 state 값이 반대로 바뀌어 있기 때문인 것으로 추정해 볼 수 있다. 예상치 않은 인터럽트가 발생하여 15번 줄의 ISR을 수행한다면 state의 값을 반전시킨다. 실제로 16번의 state를 반전하는 동작을 삭제하면 state 값이 바뀌지 않는 것을 확인할 수 있다.

인터럽트가 발생하려면 원래는 pinINT 단자에 FALLING에 해당하는 조건을 출력해야 하는데 본 사례의 경우에는 6번 줄의 pinINT 단자에 대한 출력모

드 설정만으로도 인터럽트 발생 조건을 만족하는 것으로 확인하였다.

이 인터럽트는 FALLING 모드와 CHANGE 모드에서만 1회성으로 작용하였다. RISING 모드에서는 문제가 없었다[23].

그렇다면 pinINT 단자를 외부 LED를 연결할 때는 왜 문제가 없었을까?

실험에 의하면 LED 뿐만 아니라 적절한 저항(1KΩ)을 통해 GND 단자에 연결해도 문제가 없었다.

추정 이유: 아두이노는 인터럽트 단자가 외부에 연결된 것이 없을 때는 그 입력 상태가 불안정한 부동(floating) 상태가 되어 이 때문에 인터럽트가 1회 발생한 것으로 기록되는 것으로 보인다. 실제로 인터럽트 제어기에는 외부의 인터럽트 요구가 있었다는 것을 기록하는 Interrupt Request Register가 있어서 당장은 처리하지 못하는 인터럽트는 이곳에 대기한다. ISR을 종료할 때는 IRR을 해제하고 종료하는 절차를 밟는 것이 보통이다[24].

대책 1: 아두이노 스케치 함수에는 이를 해제(clear)하는 하는 함수가 지원되지 않는다. 설사 있다고 해도 이는 이미 발생한 정상적으로 발생한 인터럽트에 대해 서비스를 마치고 해제하는 것이라 정상적인 대책이라 할 수 없다.

대책 2: 처음부터 floating 상태가 되지 않도록 하는 방법은 없을까? 문제는 출력이 정해지지 않은 상태에서 pinINT 단자를 출력 모드로 설정한 것이다. 이 때문에 이 단자를 무엇인가를 출력하기 전까지는 무엇인지 알 수 없는 부동상태로 있는 것이다. 이 같은 상황 때문에 GPIO 단자는 출력모드를 전하기 전에 미리 출력할 값을 써두는 레지스터를 내장하고 있다. 따라서 미리 출력 상태를 정의한 다음에 pinINT 단자를 출력모드로 설정하는 것이 부동상태를 막는 방법이 될 것이다.

아래 사례 프로그램을 관찰하여 보자. 본 프로그램은 5초간 내장 LED가 켜져 있다가 소등되는 예제 프로그램이다.

---

23) LOW 모드는 뒤에서 별도의 예제 프로그램을 만들어 설명하기로 한다.
24) 아두이노에서는 API(Application Programming Interface) 함수화하여 편리하게 제공하기 때문에 이 존재를 느끼지 못하는 것이다.

```
01  void setup() {
02      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);     // 미리 출력 값을 대기시킨다.
03      pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);    // 출력 모드로 설정한다.
04      delay(5000);     // 5초가 LED가 켜져 있다.
05      digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);     // LED가 소등된다.
06  }
07  void loop() { }
```

만약 아래 예제와 같이 2번 줄을 주석 처리하고 5번 줄에서 HIGH를 출력한다면 5초 후에 LED가 점등되는 모습을 보게 될 것이다.

```
01  void setup() {
02      //digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);     // 미리 출력 값을 대기시킨다.
03      pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);    // 출력 모드로 설정한다.
04      delay(5000);     // 5초가 LED가 켜져 있다.
05      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);     // LED가 소등된다.
06  }
07  void loop() { }
```

☺ 미션 2: 지금까지의 분석 결과를 바탕으로 예제 5.2a를 수정하여 내장 LED 만으로 인터럽트 실험이 성공하도록 하시오.

☺ 미션 3: 또한 CHANGE 모드에서도 성공하도록 예제 5.2a를 수정하시오.

단, 미션 2, 3은 모두 수정을 최소화하는 것에 높은 가점을 받는 것을 전제하기로 한다.

예제(5.3) - 푸시 버튼에 의한 인터럽트 발생 실험(메가 2560)

그림 14.5.3과 같이 LED 단자(2번)와 인터럽트 발생 단자(21번)를 분리시켜서 푸시 버튼에 의해 인터럽트를 발생시킬 수도 있다.

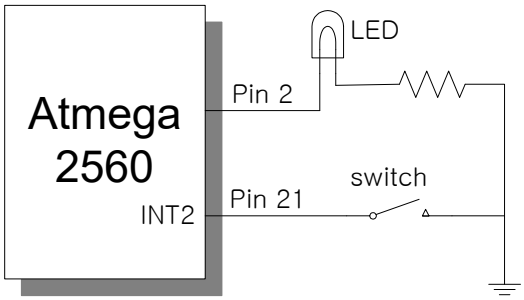


그림 14.5.3 인터럽트 실험 결선도

INT2(단자 21번)에 푸시 버튼을 연결해서 INT2 단자의 상태가 LOW로 바뀌는 경우 blink 함수를 수행하게 하여 LED를 점등 혹은 소등한다.

버튼을 누를 때마다 LED를 On/Off 하는 동작을 확인할 수 있는데 스위치의 회로 결성에 따라 항상 정확하게 토글하지는 않고 가끔 스위치의 변화를 무시할 수도 있다. 이는 스위치의 채터링 잡음 때문에 인터럽트가 짝수 번 발생하여 토글이 무시되는 것과 같은 효과를 낼 수도 있기 때문이다. 일반적으로 디지털 회로에서는 입력단자를 아무런 연결을 취하지 않는 floating 상태로 두면 H로 인식된다. 단자를 아무 곳에도 연결되지 않으면 그 단자는 H 값을 갖는다고 볼 수 있다. 따라서 단자 21을 접지에 살짝 접촉시키는 것만으로 접촉하는 순간 L가 되므로 FALLING 펄스 입력을 인가한 것과 같은 효과를 낼 수 있다.

☺ 미션 4: 본 실험은 메가 2560용으로 설계한 것이다. 여러분들이 그동안 배운 지식을 활용하여 아두이노 우노용으로 바꾸어 실험해 보기 바란다.

❒ 예제 5.3 : 메가 2560
21번(INT2) 단자를 푸시 버튼을 접지에 연결한다. LOW가 되는 순간 인터럽트 요구를 발생시켜 LED 점등을 제어한다.

INT_2.ino : 아두이노 표준 함수 – attachInterrupt()

```
01  #define LED_PIN 2     // connected to LED
02  #define INT_PIN 21    // connected to push button switch. =INT2.
03  volatile int state = HIGH;
04  void setup(){
05    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
06    pinMode(INT_PIN, INPUT_PULLUP);
07    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(INT_PIN), blink, FALLING);
08  }
09  void loop() {
10    digitalWrite(LED_PIN, state);
11  }
12  void blink() {
13     state = !state;
14  }
```

예제(5.4) - GPIO 출력에 의한 INT 단자의 인터럽트 요구 발생 - 인터럽트 기반의 부저 출력(1초간), INT_GPIObasedPulse.ino

터미널 에뮬레이터(혹은 시리얼 모니터)에서 입력한 문자, h 혹은 l를 이용하여 GPIO 출력단을 High, Low로 만들어 FALLING 에지 신호를 생성하게 하여 인터럽트를 발생하게 한다.

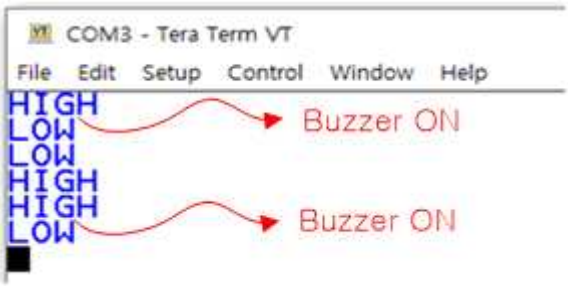


그림 14.5.4 부저 음향 발생 순간

본 실험에서는 소문자 h 혹은 l을 입력하면 테라텀의 출력창은 그림 14.5.4에 보인 바와 HIGH 혹은 LOW 문자열이 출력되고 해당 극성의 신호가 GPIO에 출력된다. 이 상태 변화가 FALLING이면 그림에 보인 바와 같이 HIGH→LOW의 상태 천이 순간에 부저가 1초 동안 울린다.

이때 부저 출력을 ISR에서 수행하는 것은 올바르게 수행되지 않는 것으로 판명되었다(소스 프로그램의 29번 줄). 이는 delay() 함수가 ISR 안에서 허용되지 않기 때문이다[25].

❒ Tinkercad 실험시 변경 사항
h->l를 시리얼 모니터에서 입력하는 순간 인터럽트 발생 Tinkercad 버저 없음. 대신 LED 사용. 단자 11번 사용 인터럽트 단자: GPIO Pin Number=2, int0

25) delay() 함수 자체가 인터럽트를 사용하기 때문에 두 인터럽트간의 충돌이 있기 때문인 것으로 추정된다. 원리적으로는 여러 개의 인터럽트를 혼재하여 동시에 충돌없이 사용할 수 있지만 아트메가 CPU는 인터럽트 수행 중에 우선 순위가 높은 다른 인터럽트를 처리하는 nested interrupt의 지원체계가 갖추어져 있지 않은 것으로 판단된다. 예제 6.5 nested interrupt 참조.

❒ 예제 5.4 : 아두이노 우노
인터럽트 기반의 1초간의 부저 및 LED 출력
시리얼 모니터의 입력을 기반으로 High, Low 펄스를 생성하여 인터럽트를 생성한다. 인터럽트가 발생하면 1초간 부저를 울리는 동작을 실현하였다.

INT_GPIObasedPulse.ino : attachInterrupt(), noInterrupts()

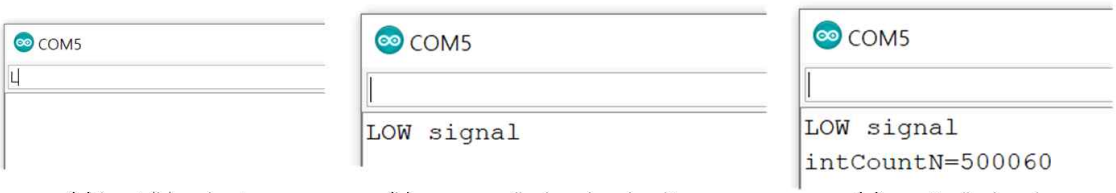
```
01 #define intPin 3 // connected to push button switch. =INT1.
02 #define BUZZER 11 // LED_BUILTIN=13
03 #define mode FALLING // RISING, CHANGE, 본 실험에 적합. LOW는 부적합.
04 #define ON LOW // 부저는 LOW일 때 소리를 내는 것으로 가정한다.
05 #define OFF HIGH
06 volatile bool event = OFF; // OFF: 인터럽트가 발생하지 않았음. ON: 인터럽트 발생함
07 volatile int count = 0;
08 void setup() {
09   pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // off
10   pinMode(BUZZER, OUTPUT); digitalWrite(BUZZER, OFF);
11   digitalWrite(intPin, HIGH); pinMode(intPin, OUTPUT); // 중요!! floating 방지.
12   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(intPin), buzz, mode);
13   Serial.begin(9600);
14 }
15 void loop() {
16 if(Serial.available() > 0) {
17   char a = Serial.read();
18   if (a == 'h') { Serial.print("HIGH: "); digitalWrite(intPin, HIGH);}
19   if (a == 'l') { Serial.println("LOW"); digitalWrite(intPin, LOW); }
20   if (a == 'c') { Serial.println(count);}
21   }
22 if ( event == ON ) { // 인터럽트가 발생하였다면 부저, LED로 알린다.
23   digitalWrite(BUZZER, ON); digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);    delay(1000);
24   digitalWrite(BUZZER, OFF); digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
25   event = OFF; // LOW=인터럽트 발생하지 않았음. 처리했음.
26   }
27 }
28 void buzz() {
29   // 아래와 같이 ISR안에 delay() 함수를 사용하면 안됨.
30   // digitalWrite(BUZZER, HIGH); delay(1000); digitalWrite(BUZZER, LOW);
31   event = ON; // HIGH=인터럽트가 발생하였음
32   //noInterrupts(); // 질문: 인터럽트 안 받는다고 하였는데 왜 이후 인터럽트는 계속 발생할까?
33   count ++;
     }
```

예제(5.5) - LOW 모드의 실험

실험 (1): LOW 인터럽트의 연속적 발생

본 실험은 인터럽트의 LOW 모드로 세팅하고 이렇게 발생한 인터럽트는 어떻게 처리되는지를 관찰하기 위한 것이다. LOW 모드 이외의 다른 모드들은 모두 상태 천이(Low→High 혹은 High→Low) 시점에서 발생한다. 반면 LOW 모드에서는 단자가 LOW이면 인터럽트가 발생한다. 그렇다면 LOW이면 서비스를 마치고 나서도 계속 인터럽트가 발생할까?

결론적으로 말하면 LOW 모드에서는 인터럽트를 종료하고 나왔는데 pinINT 단자가 계속 LOW 상태로 있으면 인터럽트가 또 발생한다. 이 인터럽트는 주어진 예제의 경우 다음과 같이 시리얼 모니터의 전송창에서 'L'을 입력하면 발생한다.



(a) input 'L' and enter (b) message displayed and waits (c) counts displayed

사용자가 'L'를 입력하면 소스의 16번 줄에서 'LOW signal'을 출력한 후 1초 동안의 지연시간을 가진 다음에 pinINT 단자를 LOW로 만든다. 이로 인해 이때부터 인터럽트가 발생하여 ISR에서는 전역변수 intCountN을 증가시킨다. 그 값이 특정회수가 될 때까지 메인 루틴에서 잠시 대기한다. 키보드 입력을 수행하지 않는다면 21번 줄의 전역변수 flag==HIGH 인지 비교를 행한 후 intCountM의 값을 출력한다. 예제에서는 50만번을 점검하게 하였는데 실제 그 출력하여 보면 출력 과정까지의 전 단계에서 다소 그 값이 증가된(60) 모습을 관찰할 수 있다. 22번 줄에서는 더 이상 인터럽트를 발생하지 못하도록 pinINT 단자를 HIGH로 출력하였다.

실험 (2): Serial.println() 함수의 non-blocking 처리

16번 줄을 주석문으로 처리하고, 17번 줄의 주석을 해제하면 어떻게 될까? 일단 'LOW signal' 메시지 전체는 출력하고 이후 인터럽트가 발생할 것으로 기대할 것이다. 그러나 사실 그렇지 않다. 17번 줄의 주석에서 밝혔듯이 메시지의 일부인 "LO"만 출력되고 정지하였다가 나머지 출력문들이 처리된다.

여기서 알 수 있는 사실은 Serial.print() 동작이 block 처리되지 않는다는 것이다.

아두이노 스케치 개발 과정에서 초창기에는 이를 block 처리하여 모든 문자가 출력되어 나갈 때까지 loop를 돌면서 programmed IO 방식으로 처리하였으나 언제부터인가 이를 인터럽트 방식으로 처리하게 하여 모든 문자가 출력되지 않았더라도 이들 문자 출력은 인터럽트 처리방식으로 출력하도록 맡기고 다음 줄의 명령어를 수행하록 만든 것이다. 이러한 과정에 대한 토의는 링크에서 관찰할 수 있다.

(a) input 'L' and enter (b) part of message displayed and waits (c) message and counts displayed

❒ 예제 5.5 : 아두이노 우노
인터럽트 모드를 LOW로 설정하면 LOW의 어느 순간 인터럽트가 일어날까?

intModeLOW.ino : attachInterrupt()

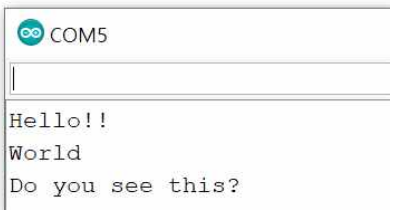
```
#define intPin 3     // 2번 아니면 3번 사용 가능.
#define mode LOW     //LOW mode를 실험한다.
volatile unsigned long intCountN = 0;    // New Count
volatile bool flag=LOW;
void setup() {
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // ON
  digitalWrite(intPin, HIGH); pinMode(intPin, OUTPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(intPin), buzz, mode);
  Serial.begin(9600); }
void loop() {
  if(Serial.available() > 0) {
    char a = Serial.read();
    if (a == 'H') {Serial.println("HIGH signal");
      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); digitalWrite(intPin, HIGH); }
    if (a == 'L') {
      Serial.println("LOW signal"); delay(3000); // test 1. 정상작동
      //Serial.println("LOW signal"); // "LO" 만 출력되고 대기. test2
      digitalWrite(intPin, LOW); digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
      while(intCountN < 500000);  // 인터럽트가 일정회수 발생하도록 대기.
    }
    if ( flag == HIGH ) { // LOW 인터럽트가 발생되었다면 그 인터럽트를 종료한다.
      digitalWrite(intPin, HIGH); // 인터럽트 요구를 해제.
      Serial.print("intCountN="); Serial.println(intCountN);
      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); intCountN = 0; flag = LOW;     }
  }
}
void buzz() { intCountN ++; flag = HIGH; }  // ISR
```

예제(5.6) - Serial.available()이 인터럽트 기반으로 운영?

❒ 예제 5.6 : 아두이노 우노
Serial 클래스의 함수가 인터럽트를 금지하면 수행되는지 확인한다.

intAvailable.ino : attachInterrupt(), noInterrupts()

```
01  void setup() {
02    Serial.begin(9600); Serial.println("Hello!!");
03    delay(1000); Serial.println("World"); noInterrupts();
04    Serial.println("Do you see this?");
05    // interrupts();
06  }
07  void loop() {
08    if(Serial.available() > 0) {
09      char a = Serial.read();
10      if (a == 'H')
11        Serial.println("HIGH");
12      if (a == 'L')
13        Serial.println("LOW");    }
14  }
```



위의 예제를 수행하면 위의 그림 좌측에 보인 바와 같이 delay()가 따라붙는 2번 줄의 "Hello!!"만 정상적으로 출력된다. 문자열 출력이 다른 인터럽트 기반의 쓰레드(thread) 혹은 프로세스에게 넘겨져 있는데 문자를 출력하는 도중에 다음 명령어인 noInterrupts()에 의해 인터럽트가 금지되어 "World" 메시지 중 일부만 출력하고 중지되는 것이다. 인터럽트가 모두 금지되기 때문에 이를 기반으로 한 직렬통신도 중지되어 키보드 입력도 작동하지 않는다.

그러나 5번 줄의 interrupts() 함수를 주석문에서 해제하여 수행시키면 위 그림의 우측에 보인 바와 같이 모든 메시지가 정상 출력되고 문자 입력도 정상 처리된다.

14.6 주기적 인터럽트

본 절에서는 인터럽트 학습에서 중요한 위치를 차지하고 있는 주기적 인터럽트(periodic interrupt)를 활용한 사례들을 다루어 보고자 한다.

대부분의 마이크로콘트롤러 혹은 임베디드 프로세서에는 타이머(timer)가 내장되어 있다. 타이머는 프로그램으로 원하는 주파수와 듀티비를 가진 클록 펄스를 생성하는 기능을 담당한다. 이 타이머의 클록 펄스 출력은 외부로 출력하게 하여 다른 장치를 제어하는데 활용할 수도 있고, 필요시 이 클럭 펄스를 인터럽트 제어기에 입력하도록 설정하여 정해진 주파수에 따른 주기적인 인터럽트를 만들게 할 수 있다. AVR 프로세서에서도 내부의 타이머를 이용하여 주기적인 인터럽트를 발생시킬 수 있다[26].

타이머 인터럽트를 가동하는 함수는 아두이노 공식 사이트에서는 지원하지 않는다. 본 실험에서는 이중 Latest MsTimer2 on Github를 사용하여 실험을 진행하고자 한다.

> MsTimer2 is a small and very easy to use library to interface Timer2 with humans. It's called MsTimer2 because it "hardcodes" a resolution of 1 millisecond on timer2
>
> For Details see: http://www.arduino.cc/playground/Main/MsTimer2

이 라이브러리는 다음과 같이 주기적 인터럽트를 설정하기 위한 3가지 메소드를 제공한다[27].

26) 14.2절의 표 14.2.1에서 ATmega2560 프로세서는 타이머가 6개(0~5번)가 있고 각 타이머마다 3~6개의 인터럽트가 지원됨을 알 수 있다.
27) https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_MsTimer2.html

MsTimer2::set(unsigned long ms, void (*f)())

this function sets a time on ms for the overflow. Each overflow, "f" will be called. "f" has to be declared void with no parameters.

MsTimer2::start()

enables the interrupt.

MsTimer2::stop()

disables the interrupt.

Github에서 다운 받은 파일은 다음 2개의 폴더 중의 하위 폴더 중의 하나에 임의의 폴더(예:MsTimer2)을 생성하고 그 폴더 아래에 복사하면 된다.

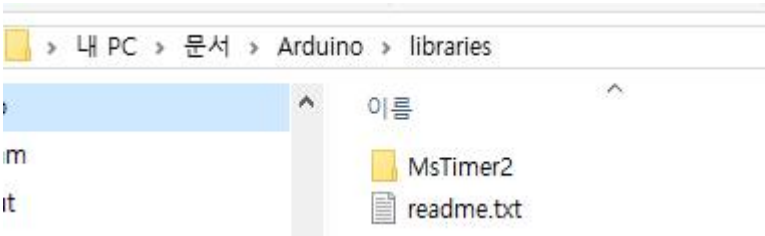
1) > 내 PC > 문서 폴더 아래의 arduino₩libraries 폴더 아래

2) 아두이노가 설치된 폴더의 "libraries" 폴더 아래

3) 혹은 간단히 라이브러리 매니저를 이용해 설치할 수도 있다.

메뉴->스케치->라이브러리 포함하기->라이브러리 관리->검색창에서 mstimer2 검색 -> 설치 메뉴 클릭

이렇게 설치하면 아래와 같이 1)번의 위치에 라이브러리가 설치된다.



복사를 마친 후에는 아두이노 스케치 IDE를 잠시 종료했다가 다시 수행해야 인식이 가능하다[28].

예제(6.1) 0.5초 간격의 주기적 인터럽트 발생

예제 flashLED.ino는 Github에서 제공하는 소스프로그램이다. 이 프로그램은 보드 상의 LED를 0.5초 간격으로 점멸하는 기능을 제공한다.

❒ 예제 6.1 : 아두이노 우노. 메가 2560
500ms에 한 번씩 발생하는 인터럽트에 의해 내장 LED가 점멸한다.

flashLED.ino : attachInterrupt() 사용 안함. MsTimer2 클래스 사용.

```
01  #include <MsTimer2.h>
02  const int led_pin = LED_BUILTIN;  // 1.0 built in LED pin var
03  void flash(){
04    static boolean output = HIGH;
05    digitalWrite(led_pin, output);
06    output = !output;
07  }
08  void setup(){
09    pinMode(led_pin, OUTPUT);
10    MsTimer2::set(500, flash); // 500ms period
11    MsTimer2::start();
12  }
13  void loop() { }
```

setup() 부분에서 함수를 이용해 주기적 인터럽트 설정한다. 주기는 500ms

28) 이제는 바로 수행되는 듯하다.

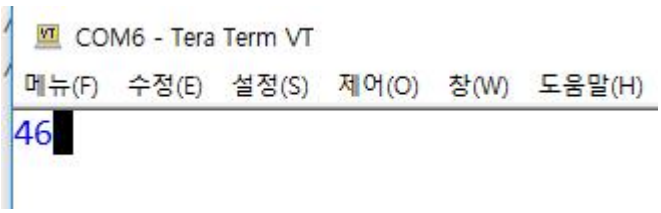
이며 이 시간 간격으로 인터럽트가 발생하여 ISR, flash() 함수를 호출한다. 이후로 loop()에서는 무한 loop를 수행한다.

무한 loop를 수행 중에 0.5초가 경과할 때마다 flash() 함수가 호출된다. 이 함수에서는 led_pin에 output의 값을 출력하고, 다시 이 변수의 값을 반전하고 함수를 종료한다. 무의미한 loop를 수행하다가 다시 0.5초가 경과하면 반전된 값을 출력해서 LED가 전의 상태와는 다른 상태가 된다.

이 프로그램은 보드에 내장된 LED_BUILTIN 단자를 사용한다. 이 심볼은 Arduino 보드 버전 100 이상이면 스케치 컴파일러에 내부에 선언된다. "Serial.println(LED_BUILTIN);" 함수를 출력해 보면 "13"을 출력하는 것을 알 수 있다.

예제(6.2) 1초 간격의 주기적 인터럽트 기반의 초시계

주기적 인터럽트를 이용해 1초에 1번씩 인터럽트를 발생하게 하였다. 인터럽트가 발생할 때마다 스피커 혹은 부저를 1ms 동안만 구동하여 시계 소리를 흉내내도록 하였다. 테라텀을 이용하면 print("₩r") 동작을 커저를 맨 앞으로 동작하게 하여 아래 화면과 같이 초 단위의 정보를 에뮬레이터 화면에 출력할 수 있다.



당초 실험에서는 18번, 19번 줄에 보인 바와 같이 5초마다 한 번씩 300Hz의 음정을 울리게 하려고 했으나, tone() 함수를 호출하고 나면 이후 MsTimer2의 주기적 인터럽트 동작에 영향을 주는 것으로 판명되었다. 홈페이지에는 다른 함수들과의 호환성에 대한 언급이 없었으나, 실험상으로는 영향을 받는 것이 명백한 듯하다.

❒ 예제 6.2 : 아두이노 우노, 메가 2560

1초에 1회 발생하는 인터럽트에 의해 스피커 혹은 부저가 1ms 동안만 소리를 낸다. 60회의 주기적 인터럽트만 발생시킨다.

clockTick.ino : attachInterrupt() 사용 안함. MsTimer2 클래스 사용.

```
01  #include <MsTimer2.h>
02  boolean status = LOW; // LOW=인터럽트 발생 안했음
03  int count =0;   // 인터럽트가 발생한 총 회수
04  #define SPK_PIN  13
05  void isr() {    // Interrupt Service Routine
06    status = HIGH;    // HIGH=인터럽트가 발생했음.
07    count ++; }       // 인터럽트 발생 누적회수를 증가시킨다.
08  void setup() { Serial.begin(9000);
09    MsTimer2::set(1000, isr); // 1000ms 간격으로 isr() 함수를 호출한다.
10    MsTimer2::start();          // 인터럽트를 허가한다.
11    pinMode(SPK_PIN, OUTPUT); }
12  void loop() {
13    if(status == HIGH) {  // 인터럽트가 발생했다면,
14      digitalWrite(SPK_PIN, HIGH); delay(1);
15      digitalWrite(SPK_PIN, LOW);   // 1ms동안 부저를 울린다.
16      status = LOW;   // 인터럽트가 처리되었음을 알린다.
17      Serial.print("₩r"); Serial.print(count);
18      //if(count%5 == 0)     // 5초마다 한 번씩 tone()호출.-> 실패
19      //  tone(SPK_PIN, 300, 50); // MsTimer2와 충돌하는 듯하다.
20    }
21    if(count == 60) {   // 인터럽트가 60회 발생했으면 아래 둘 중의 하나 수행.
22      //noInterrupts(); // 모든 H/W 인터럽트를 금지한다.
23      MsTimer2::stop(); // 타이머 인터럽트만 금지한다.
24    }
25  }
```

14.7 nested interrupt에 대한 검토

예제(7.1) - nested interrupt 발생 실험(고급 과정, nested_Int.ino)

중간 순위의 인터럽트가 진행 중에 있을 때 이보다 더 높은 우선순위 혹은 더 낮은 우선순위의 인터럽트가 발생하면 어떻게 될 것인지 알아보는 예제를 제시한다.

실험 결과에 따르면 AVR 프로세서는 nested interrupt를 지원하기는 하지만 더 높은 인터럽트인지를 점검하는 기능은 없는 것으로 판단된다. 실험에서 인터럽트 처리 중에 다른 인터럽트가 발행하면 우선순위의 구분 없이 이를 모두 받아들이는 것으로 판명되었다.

```
int pinHighestInt = 2;  // digital pin of INT0.
int pinMiddleInt = 20;  // digital pin of INT3.
int pinLowestInt = 18;  // digital pin of INT5.
bool MiddleIsr_in_service = false;
bool HighestIsr_in_service = false;
volatile int state = HIGH;
void setup() {
   pinMode(pinLowestInt, OUTPUT);
   pinMode(pinMiddleInt, OUTPUT);
   pinMode(pinHighestInt, OUTPUT);
   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinMiddleInt), ISR_Middle, CHANGE); // Link INT3 to ISR, blink
   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinHighestInt), ISR_Highest, RISING); // Link INT0 to ISR, blink
   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinLowestInt), ISR_Lowest, RISING);  // Link INT0 to ISR, blink
   Serial.begin(9600);
   //noInterrupts();                          // This will not allow any interrupt if executed just once.
}
void loop() {
   digitalWrite(pinMiddleInt, state);         // Int occurs because of pin state change
   delay(1000);
}

//------------------- ISR 1 ----------------------------------------------------------------------------
```

```
void ISR_Middle() {                         // Interrupt Service Routine - Middle-level interrupt priority
    MiddleIsr_in_service = true;
    interrupts();                           // Interrupt Enable. set IE to 0. Originally IE is 0, when an ISR begins.
    state = !state;                         // Toggle the state
    digitalWrite(pinHighestInt, state);     // Generate an highest interrupt when state is HIGH.
    MiddleIsr_in_service = false;
}
//------------------- ISR 2 ---------------------------------------------------------------------------------
void ISR_Highest() {                        // Interrupt Service Routine - Highest interrupt priority
  HighestIsr_in_service = true;
  if (MiddleIsr_in_service == true ) {
    Serial.println("Highest interrupt was serviced when middle-level ISR was being executed.");
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinHighestInt));     // No interrupts after this.
    digitalWrite(pinLowestInt, state);      // Generate an lowest interrupt when state is HIGH.
  }
  else
    Serial.println("A");  // Highest ISR was serviced when main routine was being executed.
  HighestIsr_in_service == false;
}
//------------------- ISR 3 ---------------------------------------------------------------------------------
void ISR_Lowest() {                         // Interrupt Service Routine - Lowest interrupt priority
    if (MiddleIsr_in_service == true ) {
      if(HighestIsr_in_service == true )
          Serial.println("Lowest interrupt was serviced when middle-level & highest ISR was being executed.");
     else
          Serial.println("Lowest interrupt was serviced when middle-level ISR was being executed.");
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinLowestInt));     // No interrupts after this.
  }
  else
    Serial.println("B");  // Lowset-level ISR was serviced when main routine was being executed.
```

14.8 고찰

다음 문제 혹은 미션에 대해 적절한 답안을 제시할 수 있는지 검토해 보면서 그동안 습득한 지식을 정리해 보자.

1. 인터럽트란 무엇인가?

2. ISR이란? IVT란?

3. 메인 루틴에서 명령어 수행을 마치지 못했는데 인터럽트가 발생하면 어떤 일이 일어나는가?

5. detatchInterrupt() 함수와 noInterrupt()의 차이점은 무엇인가?

6. attachInterrupt() 함수의 역할을 기술하시오. digitalPinToInterrupt() 함수의 역할은 무엇인가?

7. 인터럽트를 1회만 허용하고 그 이후로는 더 이상 인터럽트를 처리 하지 않고자 한다. 방법을 제시하시오.

8. 예제(2)에서 INT2 대신 INT1단자로 인터럽트를 발생시키는 실험으로 변경하고자 한다. 몇 번 단자를 인터럽트 발생 스위치로 사용해야 하는가?

9. INT0가 INT1보다 우선순위가 더 높은 것으로 문서에 정리되어 있다. 이를 증명하는 실험 방법을 제시하고 프로그램을 작성하시오.

10. 인터럽트가 발생하면 RS-232를 통해 메시지를 출력하고자 한다. 그런데 ISR에서는 직렬통신 동작을 금지하고 있다. 이를 실현하는 방안이 없을까?

11. analogWrite() 함수는 390Hz의 PWM 펄스를 발생시키는 것으로 알려져있다. 1) 이를 이용해 390Hz의 periodic interrupt를 발생시키는 방안을 기술하라. 2) 이 주기적 인터럽트를 이용하면 시계를 만들 수 있다. PWM 펄스를 이용하여 타이머를 설계하고 실험한 결과를 제시하시오. (시간이 되면 벨을 울린다던가...)

12. 클럭 소스(MsTimer2)를 이용하여 1,000Hz 인터럽트를 발생시킨다. 이를 이용하여 지정한 주파수의 음정을 생성하는 myTone(pin, frequency) 과myNoTone() 함수를 제작한다. 이 함수를 기반으로 직렬 통신(시리얼 모니터)으로 입력받은 주파수를 2초간 출력하는 프로그램을 설계하시오. 생성할수 없는 주파수를 입력하면 범위 밖이라고 거절하여야 하고, 입력한 주파수를 시리얼 모니터에 알려주어야 한다. 지정하지 않은 여타의 조건에 대해서는 개인의 판단과 창의력에 따라 자신이 설정한 조건으로 수행한다.

13. 20KHz의 클럭 소스를 이용하여 인터럽트를 발생시키고자 한다. 이를 기반으로 tone() 함수를 설계하고 한 옥타브의 음정을 연주하고자 한다. 위와 상에 대한 타당성 및 실행 방안을 다음 관점에서 기술하시오.

1. 20KHz의 클럭 소스를 타이머로부터 생성하는 방법의 가능성 탐진
2. 20KHz의 주파수를 가진 외부 OSC 소자 혹은 H/W 회로를 이용하여 클럭소스를 확보하는 방법
3. 1혹은 2의 방법으로 클럭소스가 확보되었다고 하고 자체 tone() 함수를 제작하시오.