임베디드시스템설계 실습 (6)

Embedded System Design

Real-Time Computing and Communications Lab.
Hanyang University

HARDWARE INTERRUPT

VPOS 커널을 포팅하기 위한 준비

1. 커널 컴파일 + 커널 이미지를 **RAM**에 적재
2. **Startup code** 작성
3. **UART** 설정
4. **TIMER** 설정
5. **Hardware Interrupt Handler** 구현
   (1) UART Interrupt
6. **Software Interrupt Entering/Leaving Routine** 구현
7. **Timer Interrupt**

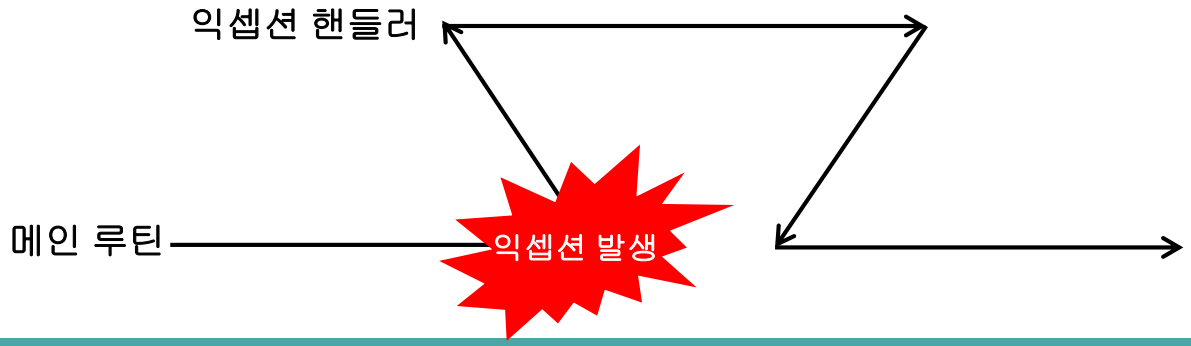
목차

EXCEPTION

Exception

❒ Exception?

- 명령어들의 순차적인 실행 과정을 중단시켜야 하는 상태
- 예외 상황이나 인터럽트가 발생한 상태
  - 정의되어 있지 않은 명령어
  - 메모리 액세스 실패
  - 소프트웨어 인터럽트
  - 외부 하드웨어 인터럽트
  - …
- 기존에 실행하고 있던 루틴에서 벗어나 익셉션 핸들러**(Exception Handler)**로 이동



Exception의 종류

Exception	Mode	Vector table offset
Reset	SVC	+0x00
Undefined Instruction	UND	+0x04
Software Interrupt(SWI)	SVC	+0x08
Prefetch Abort	ABT	+0x0c
Data Abort	ABT	+0x10
Not assigned	-	+0x14
IRQ	IRQ	+0x18
FIQ	FIQ	+0x1c

Entering Exception Handler

- 익셉션이 발생하면 **CPU**는 자동으로,
  1. **CPSR** 값을 익셉션 모드의 **SPSR**에 저장
  2. **PC** 값을 익셉션 모드의 **Link Register(lr)**에 저장
  3. **CPSR**의 모드 비트를 변경하여 해당 익셉션 모드로 진입
  4. **PC**에 익셉션 핸들러의 주소를 저장하여 익셉션 핸들러를 실행
     - Vector table base address + Vector table offset
     - Vector table base address는 ARM Coprocessor에 저장

```
vh_vector_start:
        b       vh_VPOS_reset
        b       vk_undef
        b       vh_software_interrupt
        b       vh_pabort
        b       vk_dabort
        b       vk_not_used_handler
        b       vh_irq
        b       vk_fiq_handler
```

Vector Table

```
// change vector table base address (0x20008044)
ldr     r0, =vh_vector_base
mcr     p15, 0, r0, c12, c0, 0
```

Vector base address 저장

Exception Handler

- 익셉션 핸들러(Exception Handler)
  - 익셉션의 원인을 찾아 해당 익셉션을 처리
  - 익셉션이 인터럽트라면, 인터럽트를 처리하고 메인 루틴으로 복귀해야 함

- 익셉션 처리를 끝내고 원래 루틴으로 돌아오려면,
  - **movs pc, lr**
    - Link Register의 값을 PC에 저장
      - ✓Link register의 값은 익셉션에 따라 추가 계산 필요
    - 익셉션 모드의 SPSR을 CPSR에 저장

INTERRUPT

Polling vs. Interrupt

❒ 지금 디바이스를 사용할 수 있는지 어떻게 알 수 있는가?

- **Polling & Interrupt**

❒ **Polling**

- **CPU**가 디바이스의 상태를 일정 주기마다 확인
- 상태 비트**(status bit)**의 값을 확인

❒ **Interrupt**

- 디바이스가 데이터를 보낼 수 있거나 외부로부터 데이터를 수신하면 **CPU**에게 알림
- **CPU**는 인터럽트가 발생할 때까지 다른 일을 할 수 있음

Interrupt

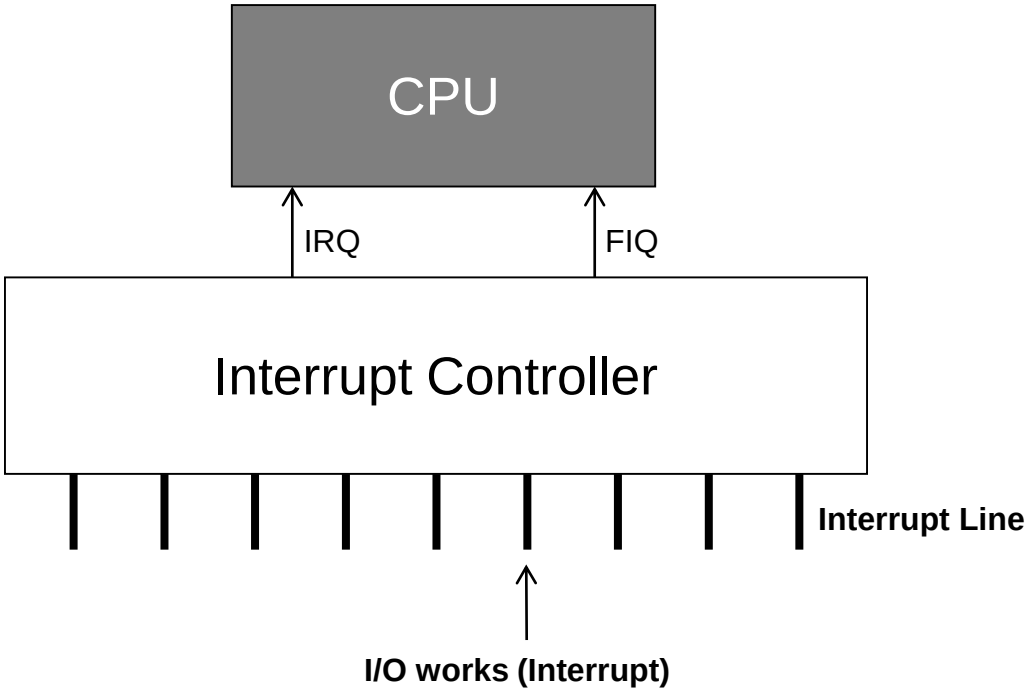
❒ ARM의 Interrupt

- **IRQ : Normal Interrupt**
  - 범용 인터럽트
  - FIQ보다 낮은 우선순위와 높은 우선순위 지연 시간
- **FIQ : Fast Interrupt**
  - 빠른 응답 시간을 요하는 인터럽트 소스에 사용
  - 특정 어플리케이션을 위해서만 사용
- **SWI : Software Interrupt**
  - 특권 모드로 진입하기 위한 소프트웨어 인터럽트
  - 커널 함수를 호출하기 위해 사용

Interrupt Controller

❒ 정의

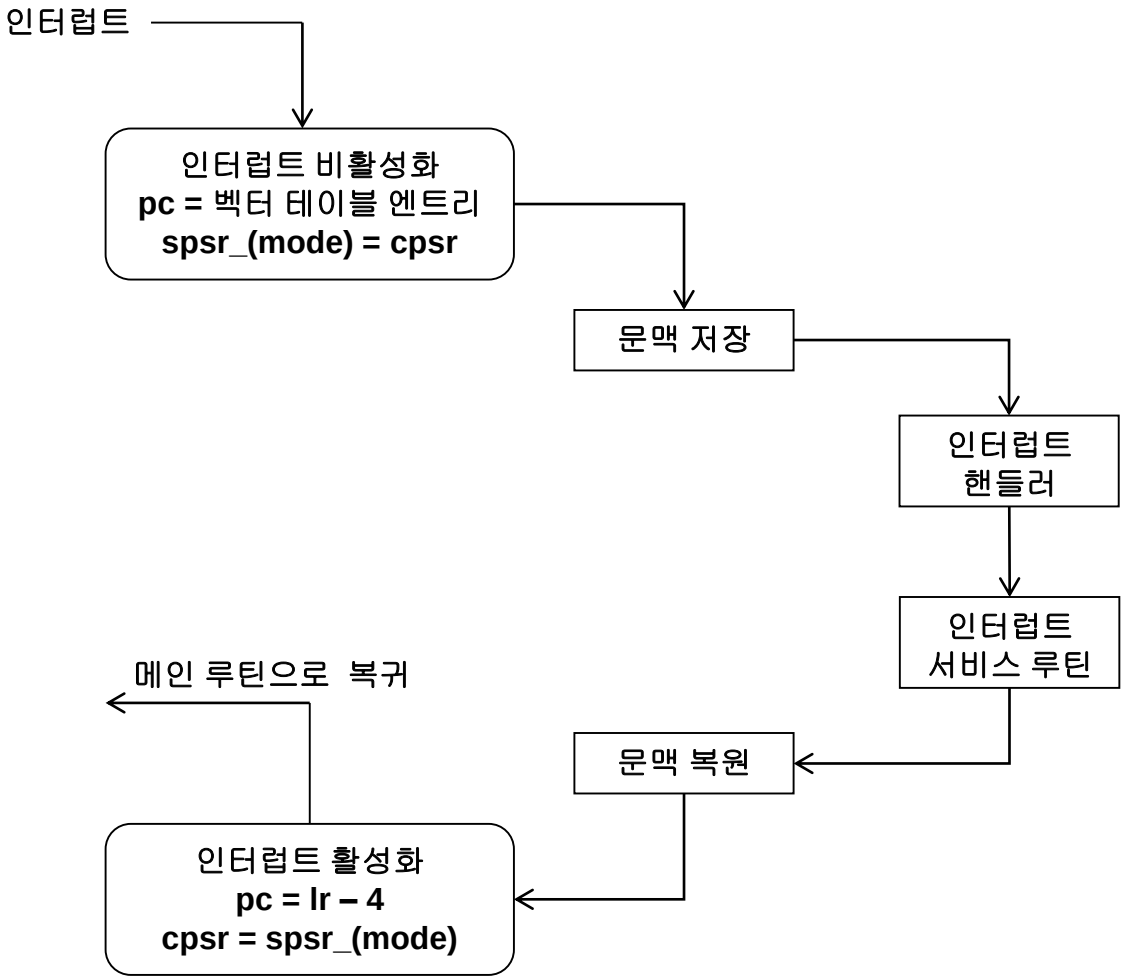
- **CPU**의 인터럽트 요청 포트 중 하나에 여러 외부 인터럽트를 연결하기 위한 제어장치



Interrupt Service Routine

- 정의
  - 인터럽트가 발생하였을 때 해당 인터럽트를 처리하는 루틴
    - 타이머 인터럽트 → 스케줄러 호출
    - UART 인터럽트 → 외부에서 전송된 데이터를 수신

Interrupt 처리 방법



Interrupt 처리 방법

1. 디바이스에서 인터럽트 발생

2. **ARM CPU는 IRQ 모드로 변경 (CPU가 자동으로 처리)**
   - 인터럽트 비활성화(disable)
   - CPSR 값을 SPSR에 저장
   - 벡터 테이블의 인터럽트 핸들러로 이동

3. 문맥 저장
   - 이전 모드(User 모드)의 r0-r12, sp, lr값을 스택에 저장 (stmfd)

4. 인터럽트 핸들러에서 인터럽트 소스를 찾아 해당 인터럽트 서비스 루틴**(ISR)** 실행

5. 인터럽트 서비스 루틴을 실행하여 인터럽트를 처리

Interrupt 처리 방법

6. 문맥 복원

- 스택에 저장한 r0-r12, sp, lr값을 이전 모드의 각 레지스터에 로드 (ldmfd)

7. 인터럽트 활성화

8. lr = lr - 4

- 파이프라인(pipeline)
- IRQ는 현재 명령어가 실행된 후에 발생하기 때문에 복귀할 주소는 다음 명령어, 즉 lr-4의 값을 복귀 주소로 사용해야 함

9. ‘movs pc, lr’ 명령어를 사용하여 원래 루틴으로 복귀

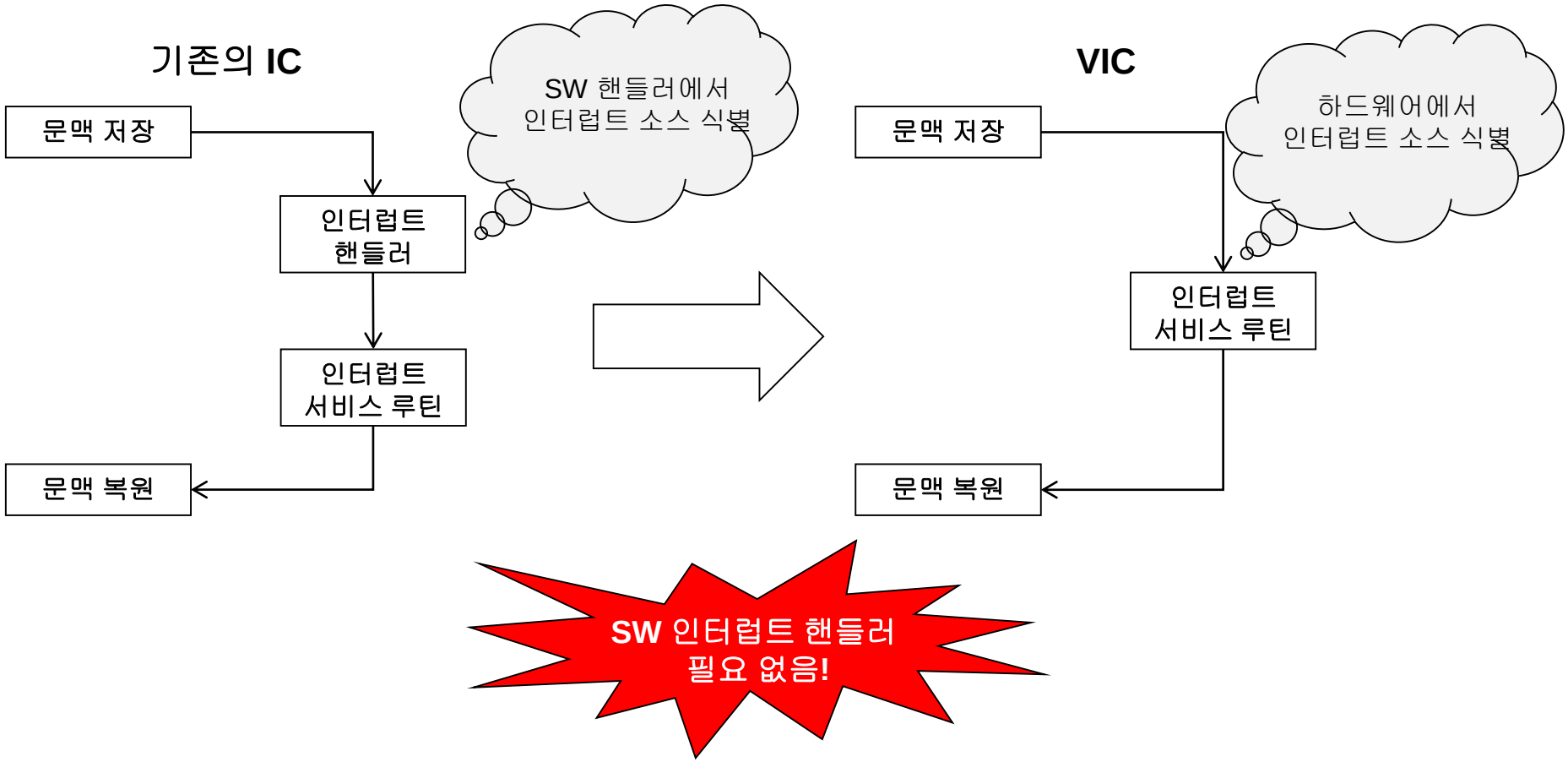
VECTORED INTERRUPT CONTROLLER

Vectored Interrupt Controller

❒ VIC (Vectored Interrupt Controller)

- **Vector방식의 interrupt 레지스터 세트를 지원**
  - Interrupt source마다 레지스터를 하나씩 할당
  - 각 레지스터에는 인터럽트 서비스 루틴의 주소를 저장
  - 인터럽트가 발생하면 controller는 해당 인터럽트의 서비스 루틴 주소를 VICADDRESS 레지스터에 자동으로 로드
  - CPU는 VICADDRESS 레지스터에 저장된 인터럽트 서비스 루틴으로 점프

Vectored Interrupt Controller



Vectored Interrupt Controller

- 장점
  - 인터럽트 지연시간을 줄일 수 있음
    - 다른 Interrupt Controller에서는 소프트웨어 인터럽트 핸들러에서 인터럽트 소스를 식별
    - VIC에서는 소프트웨어 인터럽트 핸들러가 필요 없음
      - ✓하드웨어 상에서 인터럽트 소스를 알 수 있음
      - ✓다른 IC보다 더 빠르게 ISR을 실행할 수 있음

S5PC100의 VIC

❒ 3개의 VIC 존재

- 하나의 VIC마다 32개의 인터럽트 소스 지원

❒ 인터럽트 소스(Interrupt Source) 목록

- **Datasheet Page. 360~362 참고**

VIC1

ARM, power, memory, Connectivity, Storage

50	**IrDA**	IrDA Interrupt
49	**SPI2**	SPI2 Interrupt
48	**SPI1**	SPI1 Interrupt
47	**SPI0**	SPI0 Interrupt
46	**I2C0**	I2C0 Interrupt
45	**UART3**	UART3 Interrupt
44	**UART2**	UART2 Interrupt
43	**UART1**	UART1 Interrupt
42	**UART0**	UART0 Interrupt
41	**CFC**	CFCON Interrupt
40	**NFC**	NFCON Interrupt

VIC 전체에서 43번
VIC 1에서 11번

VIC의 레지스터

- 제어 레지스터
  - **VICINTSELECT**
  - **VICINTENABLE**
  - **VICINTENCLEAR**
  - **VICSWPRIORITYMASK**
- 상태 레지스터
  - **VICIRQSTATUS**
- **ISR** 주소 저장 레지스터
  - **VICVECTADDR[0-31]**
  - **VICADDRESS**

VICINTSELECT

❒ 레지스터 : VICINTSELECT

- **Interrupt Select Register**
  - Interrupt Source를 IRQ/FIQ로 설정하는 레지스터
  - 하나의 인터럽트 소스는 하나의 비트와 대응

    ex) 0번 인터럽트 소스는 0번 비트에 대응

VICINTSELECT	Bit	Description	Reset Value
IntSelect	[31:0]	Selects interrupt type for interrupt request: 0 = IRQ interrupt 1 = FIQ interrupt There is one bit of the register for each interrupt source.	0x00000000

VICINTENABLE

❒ 레지스터 : VICINTENABLE

- **Interrupt Enable Register**
  - Interrupt Source를 활성화(enable)시켜주는 레지스터
  - 비활성화(disable)하는 기능은 없음

VICINTENABLE	Bit	Description	Reset Value
IntEnable	[31:0]	Enables the interrupt request lines, which allows the interrupts to reach the processor. Read: 0 = Disables Interrupt 1 = Enables Interrupt Use this register to enable interrupt. The VICINTENCLEAR Register must be used to disable the interrupt enable. Write: 0 = No effect 1 = Enables Interrupt. On reset, all interrupts are disabled. There is one bit of the register for each interrupt source.	0x00000000

VICINTENCLEAR

❒ VICINTENCLEAR

- **Interrupt Enabler Clear Register**
  - Interrupt Source를 비활성화(disable)시켜주는 레지스터

VICINTENCLEAR	Bit	Description	Reset Value
IntEnable Clear	[31:0]	Clears corresponding bits in the VICINTENABLE Register: 0 = No effect 1 = Disables Interrupt in VICINTENABLE Register. There is one bit of the register for each interrupt source.	-

VICSWPRIORITYMASK

❒ VICSWPRIORITYMASK

- **Software Priority Mask Register**
  - 16개 우선순위 레벨의 인터럽트들을 mask하는 레지스터

VICSWPRIORITYMASK	Bit	Description	Reset Value
Reserved	[31:16]	Reserved, read as 0, do not modify	0x0
SWPriorityMask	[15:0]	Controls software masking of the 16 interrupt priority levels: 0 = Interrupt priority level is masked 1 = Interrupt priority level is not masked Each bit of the register is applied to each of the 16 interrupt priority levels.	0xFFFF

VICIRQSTATUS

❒ 레지스터 : VICIRQSTATUS

- **IRQ Status Register**
  - 어떤 Interrupt가 발생했는지 나타내는 레지스터
  - 특정 Interrupt가 발생하면 해당 interrupt를 가리키는 비트가 1로 set

VICIRQSTATUS	Bit	Description	Reset Value
IRQStatus	[31:0]	Shows the status of the interrupts after masking by the VICINTENABLE and VICINTSELECT Registers: 0 = Interrupt is inactive 1 = Interrupt is active. There is one bit of the register for each interrupt source.	0x00000000

VICVECTADDR[0-31]

❒ 레지스터 : VICVECTADDR[0-31]

- **Vector Address Register**
  - 각 Interrupt Source의 ISR 주소를 저장하는 레지스터
  - 32개의 Interrupt Source에 대응하는 32개의 VICVECTADDR 존재
    - ✓ S5PC100은 3개의 VIC가 있으므로 총 96개의 VICVECTADDR 존재

VICVECTADDR[0-31]	Bit	Description	Reset Value
VectorAddr 0-31	[31:0]	Contains ISR vector addresses.	0x00000000

VICADDRESS

❒ 레지스터 : VICADDRESS

- **Vector Address Register**
  - Interrupt가 발생했을 때 해당 Interrupt source의 ISR 주소를 로드
  - Controller가 자동으로 로드

ex) 12번 interrupt source에서 interrupt 발생

VICADDRESS ← VICVECTADDR[12]

VICADDRESS	Bit	Description	Reset Value
VectAddr	[31:0]	Contains the address of the currently active ISR, with reset value 0x00000000. A read of this register returns the address of the ISR and sets the current interrupt as being serviced. A read must be performed while there is an active interrupt. A write of any value to this register clears the current interrupt. A write must only be performed at the end of an interrupt service routine.	0x00000000

UART INTERRUPT CODE (C CODE)

VPOS_kernel_main()

❒ 소개

- **VPOS** 커널 데이터 구조체를 초기화
- 시리얼 장치와 타이머 등 하드웨어를 초기화
- 인터럽트 **enable**
- 부팅 메시지 출력
- 쉘 스레드 생성
- 스케줄러 호출하는 **VPOS_start** 루틴으로 진입

❒ 소스 코드 위치

- **vpos/kernel/kernel_start.c**

```
void VPOS_kernel_main( void )
{
        pthread_t p_thread, p_thread_0, p_thread_1, p_thread_2;

        /* static and global variable initialization */
        vk_scheduler_unlock();
        init_thread_id();
        init_thread_pointer();
        vh_user_mode = USER_MODE;
        vk_init_kdata_struct();

        vk_machine_init();
        set_interrupt();


        printk("%s₩n%s₩n%s₩n", top_line, version, bottom_line);

        /* initialization for thread */
        race_var = 0;
        pthread_create(&p_thread, NULL, VPOS_SHELL, (void *)NULL);
        //pthread_create(&p_thread_0, NULL, race_ex_1, (void *)NULL);
        //pthread_create(&p_thread_1, NULL, race_ex_0, (void *)NULL);
        //pthread_create(&p_thread_2, NULL, race_ex_2, (void *)NULL);

        VPOS_start();

        /* cannot reach here */
        printk("OS ERROR: VPOS_kernel_main( void )₩n");
        while(1){}
}
```

set_interrupt()

- 위치
  - vpos/kernel/kernel_start.c

- 코드 추가
  - vh_serial_irq_enable() 함수 호출

```
void set_interrupt(void)
{
        // interrupt setting
        vh_serial_irq_enable();
}
```

vh_serial_irq_enable()

- 역할
  - **UART1 Interrupt를 활성화(enable)시키는 함수**

- 위치
  - **vpos/hal/io/serial.c**

vh_serial_irq_enable()

❒ 실행 순서

1. **VIC1VECTADDR11** 레지스터에 **ISR** 주소 저장
   - vh_serial_interrupt_handler() 함수 주소 저장

2. **VIC1INTENABLE** 레지스터에서 **UART1** 인터럽트를 활성화
   - 11번 비트를 1로 set

3. **VIC1INTSELECT** 레지스터에서 **UART1** 인터럽트를 **IRQ**로 설정
   - 11번 비트를 0으로 clear

4. **VIC1SWPRIORITYMASK** 레지스터를 모두 **mask**
   - 모든 비트를 1로 set

vh_serial_irq_enable()

❒ 코드 추가

```
void vh_serial_irq_enable(void)
{
        /* enable UART1 Interrupt */
        vh_VIC1VECTADDR11 = (unsigned int)&vh_serial_interrupt_handler;
        vh_VIC1INTENABLE |= vh_VIC_UART1_bit;
        vh_VIC1INTSELECT &= ~vh_VIC_UART1_bit;
        vh_VIC1SWPRIORITYMASK = 0xffff;
}
```

```
/*************************************************************************
        VIC - S5PC100
*************************************************************************/

#define vh_VIC_UART1    11
#define vh_VIC_UART1_bit (1 << vh_VIC_UART1)

#define vh_VIC_TIMER4   25
#define vh_VIC_TIMER4_bit (1 << vh_VIC_TIMER4)
```

vpos/hal/include/vh_io_hal.h

vh_serial_interrupt_handler()

❒ 설명

- **UART1 Interrupt Handler**
- 키보드 입력을 받아 버퍼에 저장

❒ 위치

- **vpos/hal/io/serial.c**

vh_serial_interrupt_handler()

❒ 실행 순서

1. **URXH 레지스터에 수신된 키보드 문자 데이터를 버퍼에 저장**
   - vk_serial_push() 함수 호출

2. **UART1 인터럽트를 pending clear**
   - VICINTENCLEAR 레지스터에서 UART1 인터럽트를 비활성화
     - ✓11번 비트를 1로 set
   - VIC1INTENABLE 레지스터에서 UART1 인터럽트를 활성화
     - ✓11번 비트를 1로 set
   - UINTP1 레지스터에서 UART1 인터럽트를 다시 설정
     - ✓모든 비트를 1로 set
     - ✓UINTP1 레지스터를 1로 set해서 인터럽트를 clear

vh_serial_interrupt_handler()

❒ 코드 추가

```
void vh_serial_interrupt_handler(void)
{
        vk_serial_push();
        vh_VIC1INTENCLEAR |= vh_VIC_UART1_bit;
        vh_VIC1INTENABLE |= vh_VIC_UART1_bit;
        vh_VINTP1 = 0xf;
}
```

URXH 레지스터에 수신된
키보드 문자 데이터를 버퍼에 저장

UART1 인터럽트를 **Pending Clear**

getc() 수정

❒ 코드 수정

- **vpos/hal/io/serial.c**

```
char getc(void)
{
        char c;
/*      unsigned long rxstat;

        while(!vh_SERIAL_CHAR_READY());

        c = vh_SERIAL_READ_CHAR();
        rxstat = vh_SERIAL_READ_STATUS();
*/
        while(pop_idx == push_idx){
        }
        c = serial_buff[pop_idx++];

        return c;
}
```

주석 처리

주석 해제

UART INTERRUPT CODE (ASSEMBLY)

Interrupt 진입 루틴

❒ 루틴 흐름

1. **Link register** 보정

2. 이전 모드의 레지스터들과 **SPSR**을 스택에 저장

3. **VICIRQSTATUS**를 확인하여 **3**개의 **Controller** 중 어디에서 인터럽트가 발생하였는지 확인
   - 본 실습에서는 VIC 0과 VIC 1만 사용

4. **pc**에 **VICADDRESS**의 값을 저장

Interrupt 복귀 루틴

❒ 루틴 흐름

1. **CPSR**을 수정하여 **IRQ** 모드로 바꾸고 **IRQ Mask bit**를 **1**로 **set**

2. 이전 모드의 레지스터와 **SPSR**을 스택에서 복원

3. **movs pc, lr** 명령어를 사용하여 원래의 루틴으로 복귀

Interrupt 진입 루틴 : vh_irq

❒ 코드

- **vpos/hal/cpu/HAL_arch_startup.S**

```
vh_irq:
        sub     lr,lr,#4
        str     sp, vk_save_irq_mode_stack_ptr
        stmfd   sp,{r14}^
        sub     sp, sp, #4
        stmfd   sp,{r13}^
        sub     sp, sp, #4
        stmfd   sp!,{r0-r12}
        mrs     r0, spsr_all
        stmfd   sp!,{r0, lr}
        str     sp, vk_save_irq_current_tcb_bottom
        ldr     r0, =0xe4000000
        ldr     r1, [r0]
        cmp     r1, #0x0
        bne     vh_irq_VIC0
        ldr     r0, =0xe4100000
        ldr     r1, [r0]
        cmp     r1, #0x0
        bne     vh_irq_VIC1
```

문맥 저장

^ : 이전 모드의 레지스터

SPSR과 Link Register 저장

VIC0IRQSTATUS

VIC1IRQSTATUS

Interrupt 진입 & 복귀 루틴 : vh_irq_VIC1

❒ 코드

- **vpos/hal/cpu/HAL_arch_startup.S**

```
vh_irq_VIC1:
        ldr     r0, =0xe4100f00
        ldr     r1, [r0]

        mov     r14, pc
        mov     pc, r1
```

VIC0ADDRESS에 저장된 인터럽트 핸들러 주소로 점프

```
        msr     cpsr_c, #vh_IRQMODE | 0x80

        ldr     r14, =0xe4100f00
        str     r14, [r14]
```

VIC 인터럽트 서비스 완료

문맥 복원

```
        ldmfd   sp!, {r0, lr}
        msr     spsr_cxsf, r0
        ldmfd   sp!, {r0-r12}
        ldmfd   sp, {r13}^
        add     sp, sp, #4
        ldmfd   sp, {r14}^
        add     sp, sp, #4
        movs    pc,lr
```

HOMEWORK

실습 및 과제

❒ UART1 Interrupt 관련 코드 추가

- **vpos/hal/io/serial.c**
  - UART1 Interrupt Enable
    - ✓vh_serial_irq_enable()
  - UART1 Interrupt Handler
    - ✓vh_serial_interrupt_handler()
  - getc() 함수 주석 처리 수정

- **vpos/hal/cpu/HAL_arch_startup.S**
  - vh_irq와 vh_irq_VIC1

실습 및 과제

- **VIC** 관련 레지스터 주소 정의
  - **vpos/hal/include/vh_io_hal.h**
    - VIC1INTSELECT
    - VIC1INTENABLE
    - VIC1INTENCLEAR
    - VIC1SWPRIORITYMASK
    - VIC1VECTADDR11

보고서 제출

- 보고서
  - 학과, 학번, 이름
  - 코드를 캡쳐해서 보고서에 첨부
    - serial.c에서 수정한 부분 (함수 3개)
      - ✓vh_serial_irq_enable()
      - ✓vh_serial_interrupt_handler()
      - ✓getc()
    - HAL_arch_startup.S에서 수정한 부분(레이블 2개)
      - ✓vh_irq
      - ✓vh_irq_VIC1
    - vh_io_hal.h의 VIC 관련 레지스터 주소 정의 부분

SOFTWARE INTERRUPT

VPOS 커널을 포팅하기 위한 준비

1. 커널 컴파일 + 커널 이미지를 **RAM**에 적재
2. **Startup code** 작성
3. **UART** 설정
4. **TIMER** 설정
5. **Hardware Interrupt Handler** 구현
   (1) UART Interrupt
6. **Software Interrupt Entering/Leaving Routine** 구현
7. **Timer Interrupt**

목차

1. Software Interrupt
2. Scheduler of VPOS
3. SWI Entering Routine & Leaving Routine
4. Homework

SOFTWARE INTERRUPT

Software Interrupt

❒ 정의

- 프로그램의 실행을 그 프로그램에 포함시킨 명령어로 중단시키고, 다른 프로그램의 실행으로 제어를 옮기는 것
- 하드웨어적으로 인터럽트를 거는 방식이 아님
- **SWI** 명령어를 사용해 인터럽트를 발생시킴

❒ 목적

- 커널 함수를 호출하기 위해 특권모드에 진입하고자 할 때 사용
  - User Mode → Privileged Mode(Supervisor Mode)

Hardware Interrupt vs. Software Interrupt

❒ 비교

	하드웨어 인터럽트(IRQ/FIQ)	소프트웨어 인터럽트(SWI)
목적	일반 인터럽트 처리	운영체제 보호모드
벡터 테이블 오프셋	0x18	0x08
익셉션 우선순위	4	6
인터럽트 활성화 여부	비활성화	비활성화 하지 않음
링크 레지스터 보정	lr = lr - 4	불필요

Hardware Interrupt vs. Software Interrupt

- 링크 레지스터 보정
  - 하드웨어 인터럽트
    - 현재 실행 중인 명령어를 실행한 뒤 인터럽트를 처리
    - 다음에 실행할 명령어는 pc – 4에 위치
    - lr = lr -4를 통해 링크 레지스터의 값을 수정해야 함
  - 소프트웨어 인터럽트
    - 파이프라인의 3단계 중 decode 단계에서 swi 명령어를 인식하고 소프트웨어 인터럽트를 발생시킴
    - PC가 가리키는 명령어는 swi 다음 명령어
    - 링크 레지스터 값을 수정할 필요 없음

SWI

❒ SWI 명령어

- 소프트웨어 인터럽트를 발생시키는 명령어
- 프로세스 모드를 **Supervisor mode**로 변경시켜 운영체제 루틴이 특권 모드에서 호출될 수 있도록 해줌
- 표기법 : **SWI {<조건>} SWI_number**
  - SWI_number : 특별한 함수 호출이나 특징을 나타내는 데 사용

SCHEDULER OF VPOS

VPOS에서의 스케줄러

❒ vk_scheduler()

- **VPOS의 스케줄러 함수**
  - 32단계의 정적 우선순위 Ready 큐 구조
  - 같은 우선순위 내에서는 Round-Robin 스케줄링 방식
  - 타이머 인터럽트로 일정 주기마다 vk_scheduler()를 호출하여 스레드는 정해진 time slice동안만 실행
- **커널 함수**
  - User Mode가 아닌 Privileged Mode나 System Mode에서 호출해야 함
  - 커널 함수를 사용하기 위해서는 User Mode에서 Privileged Mode로 전환해야 함

    ➔ **Software Interrupt 사용**

스케줄러 호출 순서 (VPOS)

1. 현재 실행 중인 스레드의 구조체 변수 중 **‘swi_number’** 변수에 **‘CS’** 저장

2. **“swi 0x00”** 명령어로 소프트웨어 인터럽트를 발생시킴

3. **SWI** 진입 루틴에서 **vk_swi_classifier()** 함수로 점프

4. **‘swi_number’** 변수 값을 확인하여 커널 함수 호출
   - **CS**인 경우 **vk_scheduler()** 호출

5. 스케줄링 시작

vk_swi_scheduler() & vh_swi()

- 현재 스레드의 구조체 변수 중 **‘swi_number’** 변수에 **‘CS’** 저장
  1. **VPOS_start()** 실행
  2. **vk_swi_scheduler()** 실행
  3. 현재 실행중인 스레드의 구조체 변수 중 **‘swi_number’** 변수에 **‘CS’** 저장
  4. **vh_swi()** 실행
- **“swi 0x00”** 명령어로 소프트웨어 인터럽트를 발생시킴

vk_swi_scheduler() & vh_swi()

- 현재 스레드의 구조체 변수 중 ‘swi_number’ 변수에 ‘CS’ 저장

```
//pthread_create(&p_thread_1, NULL, race_ex_0,
//pthread_create(&p_thread_2, NULL, race_ex_2,

VPOS_start();

/* cannot reach here */
printk("OS ERROR: VPOS_kernel_main( void )Wn");
while(1){}
```

```
void VPOS_start(void)
{
        vk_swi_scheduler();

}
```

```
void vk_swi_scheduler(void)
{
        unsigned temp;

        vk_current_thread->swi_number = CS;
        temp = (unsigned)vk_current_thread;
        vh_swi(temp);
}
```

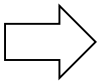
```
void vh_swi(unsigned thread)
{
        asm volatile("swi 0x00");
}
```

vk_swi_classifier()

❒ SWI 진입 루틴을 통해 vk_swi_classifier() 함수로 점프

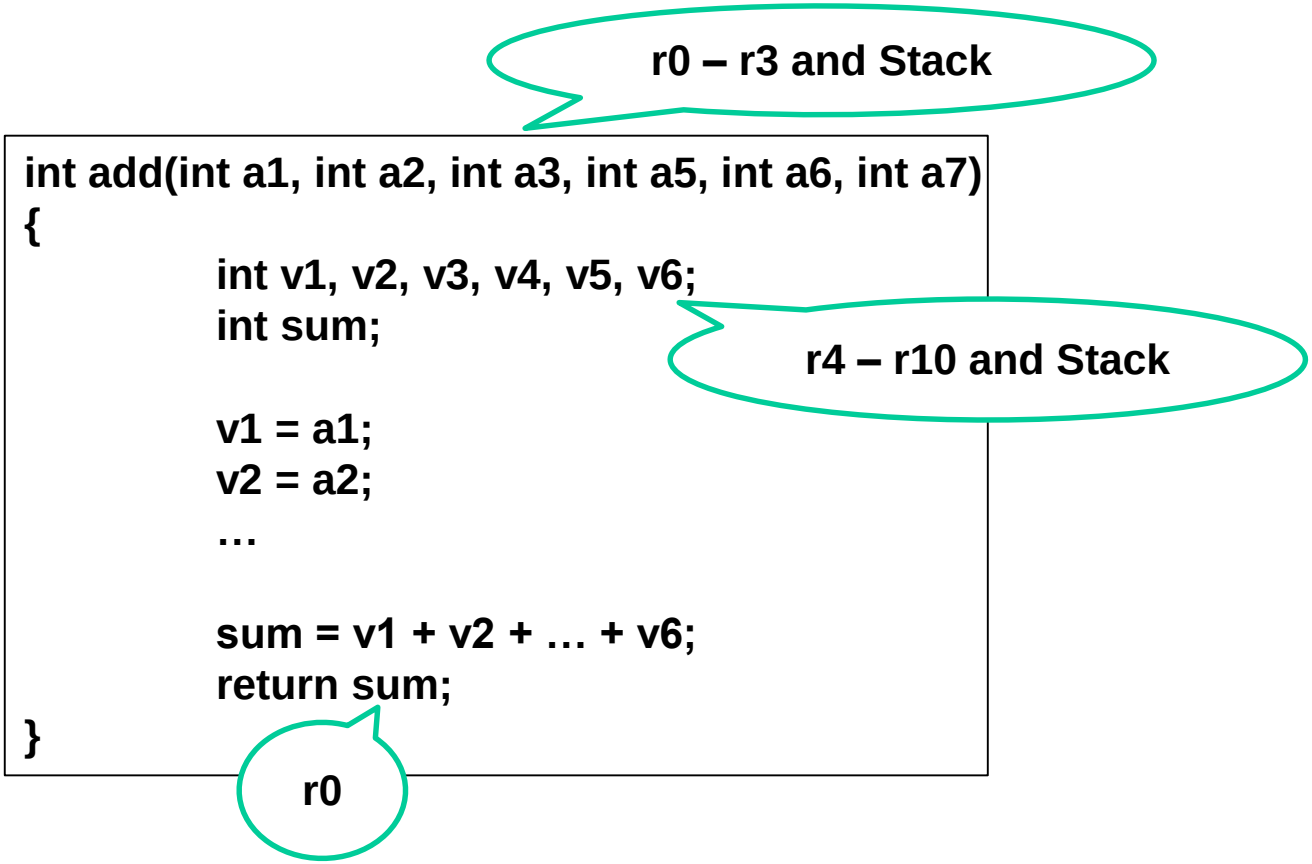
SWI 벡터 엔트리

```
vh_software_interrupt:
vh_entering_swi:
        bl      vk_swi_classifier
vh_leaving_swi:
```



```
void vk_swi_classifier(unsigned thread)
{
        unsigned number;
        vk_thread_t *vector;
        unsigned temp;
        int i;
        unsigned int *k=vk_save_swi_mode_stack_ptr;
        unsigned int *kk=vk_save_swi_current_tcb_bottom;
        printk("vk_swi_classifier switch up\n");
        vector=(vk_thread_t *)thread;
        number=vector->swi_number;
        switch(number)
        {
                case EI:
                        vector->interrupt_state = FALSE;
                        vh_enable_interrupt(vector);
                        break;
                case DI:
                        vector->interrupt_state = TRUE;
                        vh_disable_interrupt(vector);
                        break;
                case SC:
                        vh_save_thread_ctx((unsigned)vector->tcb_bottom);
                        break;
                case RC:
                        temp = (unsigned)vector->func;
                        vh_restore_thread_ctx((unsigned)vector->tcb_bottom);
                        break;
                case CS:
                        vk_scheduler();
                        break;
        }
}
```

APCS


r0 – r3 and Stack
int add(int a1, int a2, int a3, int a5, int a6, int a7)
{
int v1, v2, v3, v4, v5, v6;
int sum;
r4 – r10 and Stack
v1 = a1;
v2 = a2;
…
sum = v1 + v2 + … + v6;
return sum;
}
r0

SWI ENTERING ROUTINE & LEAVING ROUTINE

Software Interrupt 진입 루틴

❒ 루틴 흐름

1. 이전 모드의 레지스터들과 **SPSR, lr**을 스택에 저장

2. **r0~r3** 레지스터에 커널 함수가 사용할 매개 변수 저장**(APCS)**
   - 함수를 호출하면서 r0~r3 레지스터에 자동으로 매개 변수 저장
   - 진입 루틴에서 r0~r3 레지스터를 수정하였다면 커널 함수를 실행하기 전에 다시 원래 값으로 되돌려야 함

3. **SWI** 핸들러로 점프
   - vk_swi_classifier()로 점프

Software Interrupt 복귀 루틴

❒ 루틴 흐름

1. 이전 모드의 레지스터와 **SPSR**을 스택에서 복원

2. **movs pc, lr** 명령어를 사용하여 원래의 루틴으로 복귀

HOMEWORK

VPOS_kernel_main()

❒ 소개

- **VPOS** 커널 데이터 구조체를 초기화
- 시리얼 장치와 타이머 등 하드웨어를 초기화
- 인터럽트 **Enable**
- 부팅 메시지 출력
- 쉘 스레드 생성
- 스케줄러 호출하는 **VPOS_start** 루틴으로 진입

❒ 소스 코드 위치

- **vpos/kernel/kernel_start.c**

```
void VPOS_kernel_main( void )
{
        pthread_t p_thread, p_thread_0, p_thread_1, p_thread_2;

        /* static and global variable initialization */
        vk_scheduler_unlock();
        init_thread_id();
        init_thread_pointer();
        vh_user_mode = USER_MODE;
        vk_init_kdata_struct();

        vk_machine_init();
        set_interrupt();

        printk("%s\n%s\n%s\n", top_line, version, bottom_line);

        /* initialization for thread */
        race_var = 0;
        pthread_create(&p_thread, NULL, VPOS_SHELL, (void *)NULL);
        pthread_create(&p_thread_0, NULL, race_ex_1, (void *)NULL);
        pthread_create(&p_thread_1, NULL, race_ex_0, (void *)NULL);
        pthread_create(&p_thread_2, NULL, race_ex_2, (void *)NULL);

        VPOS_start();

        /* cannot reach here */
        printk("OS ERROR: VPOS_kernel_main( void )\n");
        while(1){}
}
```

주석 처리 해제

실습 및 과제

❒ SWI 관련 코드 추가

- **vpos/hal/cpu/HAL_arch_startup.S**
  - SWI Entering Routine
    - ✓vh_entering_swi (레이블)
  - SWI Leaving Routine
    - ✓vh_leaving_swi (레이블)

```
vh_software_interrupt:
vh_entering_swi:

        bl      vk_swi_classifier

vh_leaving_swi:
```

vh_entering_swi

❒ SWI 진입 루틴 구현 1

1. **'vk_save_swi_mode_stack_ptr' 변수에 현재 sp 값을 저장 (str)**

2. 이전 모드의 **pc, lr** 레지스터와 범용 레지스터들을 스택에 저장
   - 이전 모드 : ^ 사용

3. **SPSR과 lr을 스택에 저장**
   - mrs 명령어로 SPSR을 r0에 저장한 뒤 r0를 스택에 저장

4. **IRQ 익셉션을 비활성화**
   - r0 레지스터에 cpsr 값을 저장하고 인터럽트 마스크 비트 수정

5. **'vk_save_swi_current_tcb_bottom' 변수에 현재 sp 값을 저장**

vh_entering_swi

❒ SWI 진입 루틴 구현 2

6. **r0 레지스터에 커널함수가 사용할 매개 변수를 다시 저장**
   - ldr 명령어를 사용. sp에 오프셋을 더해 2.에서 저장한 r0값을 스택에서 로드
     - ✓ ldr r0, [sp, #offset]

7. **SWI 핸들러로 점프**
   - “bl vk_swi_classifier”

vh_leaving_swi

❒ **SWI 복귀 루틴 구현**

1. 스택에 저장했던 모든 레지스터들을 복원
   - msr 명령어로 SPSR에 저장해야 함

2. **movs pc, lr** 명령어를 사용하여 원래의 루틴으로 복귀

보고서 제출

- 보고서
  - 학과, 학번, 이름
  - 코드를 캡쳐해서 보고서에 첨부
    - HAL_arch_startup.S에서 추가한 부분(레이블 2개)
      - ✓vh_entering_swi
      - ✓vh_leaving_swi
  - **kernel_start.c의 주석을 수정한 후 화면 캡쳐**
    - 익셉션이 발생하지 않고 쉘까지 출력되어야 함
    - 쉘에 'ls' 입력 후 캡쳐

보고서 제출

```
Starting kernel ...


*******************************************************************************
*  QURIX version 3.0    xx/10/2012                                            *
*******************************************************************************
timbuffer[0] - 16113
timbuffer[1] - 16082
timbuffer[2] - 16051
timbuffer[3] - 16020
timbuffer[4] - 15989
timbuffer[5] - 15957
timbuffer[6] - 15926
timbuffer[7] - 15895
timbuffer[8] - 15863
timbuffer[9] - 15832
vk_swi_classifier switch up
vk_swi_classifier switch up
vk_swi_classifier switch up
vk_swi_classifier switch up

Race condition value = 1200000

Shell>ls
vk_swi_classifier switch up

******************Command_List******************
- help
- ls
- debug
- thread
- temp
************************************************
vk_swi_classifier switch up

Shell>
```

제출 방법

- 제출 방법
  - 워드나 한글로 작성하여 메일에 첨부
  - 문서 제목에 학번과 이름을 적을 것

- **E-mail (반드시 아래 2개의 메일 계정으로 모두 전송)**
  - **jypark@rtcc.hanyang.ac.kr**

- 메일 제목
  - **[임베디드 시스템 실습 과제5]학번_이름**

- 마감일
  - 다음 실습 수업시간 전까지

수고하셨습니다.