리눅스 디바이스 드라이버 기초

디바이스 드라이버의 역할

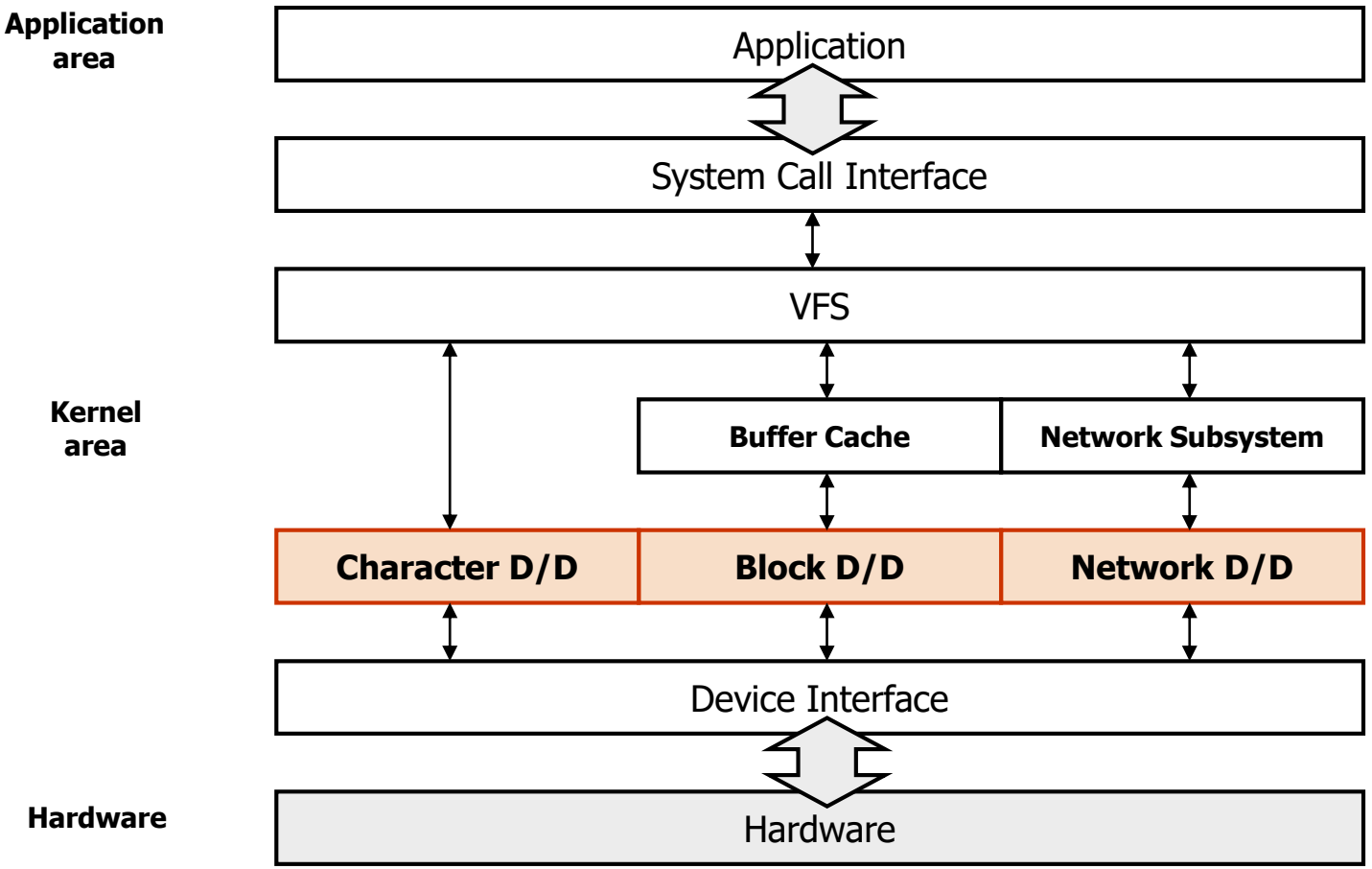
- 디바이스 드라이버의 역할
  - 디바이스 드라이버는 하드웨어를 사용 가능하게 만들어 줄 뿐 하드웨어를 어떻게 사용할지에 대한 결정은 응용 프로그램에게 넘겨야 한다.

- 디바이스 드라이버는 온갖 상황을 고려해 균형 있게 작성한다.
  - 최대한 유연하고 많을 기능을 사용자에게 제공하려고 할 수록 디바이스 드라이버 제작자는 많은 부분을 구현해야 한다.
  - 동기식 비동기식 모두 지원할 것인가?
  - 장치를 여러 번 열 것인가?
  - 정책 독립성을 제공할 것인가?

- 제공 되는 디바이스드라이버 유틸리티

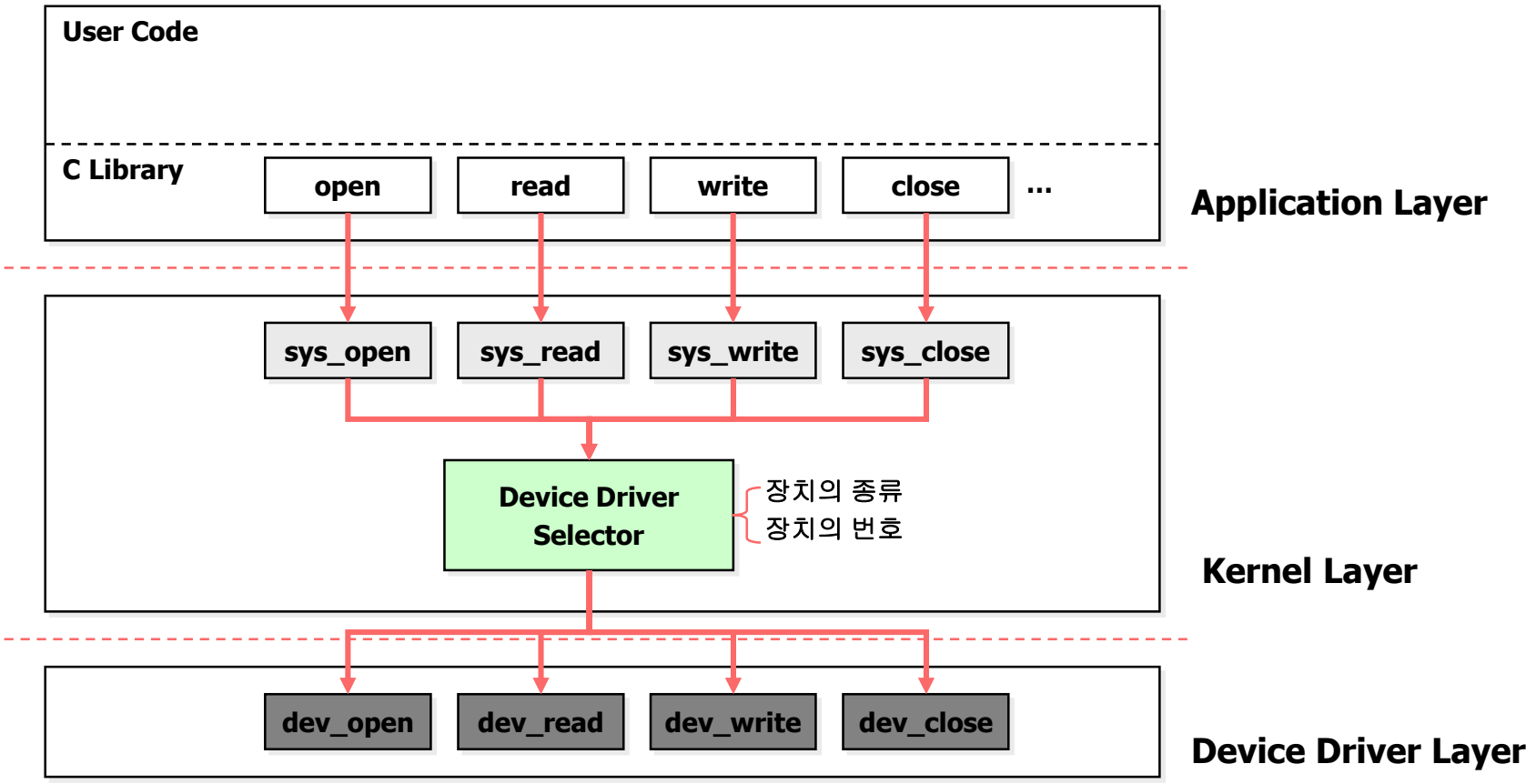
  디바이스 제어와 구성을 도울 목적으로 간단한 유틸리티와 디바이스 드라이버를 같이 출시 하는 경우가 있다.

디바이스 드라이버 관점에서 본 리눅스 구조



< 디바이스 드라이버 관점에서 본 리눅스 구조>

응용프로그램 관점에서 본 리눅스 구조



커널 메시지 출력 (1)

- printk()

  printf()와 유사하지만 커널의 메시지를 출력하고 관리할 수 있는 특성이 있다.

  - 메시지 기록 관리를 위한 로그 레벨의 지정
  - 원형 큐 구조의 관리
  - 출력 디바이스의 다중 지정
  - 콘솔에서 확인하거나 dmesg 명령을 이용해서 로그 파일을 확인

- 로그 레벨 지정

  로그 레벨은 printk() 함수에 전달되는 문자열의 선두 문자에 “〈1〉” 과 같이 숫자로 등급을 표현한다. linux/kernel.h 에 정의된 선언문을 이용이 바람직하다.

상수 선언문	의미
#define KERN_EMERG	<0> 시스템이 동작하지 않는다
#define KERN_ALERT	<1> 항상 출력된다.
#define KERN_CRIT	<2> 치명적인 정보
#define KERN_ERR	<3> 오류 정보
#define KERN_WARNING	<4> 경고 정보
#define KERN_NOTICE	<5> 정상적인 정보
#define KERN_INFO	<6> 시스템 정보
#define KERN_DEBUG	<7> 디버깅 정보

커널 메시지 출력 (3)

- /proc/kmsg
  - 커널 메시지가 발생할 때마다 관찰할 수 있다.
  - cat /proc/kmsg

- printk() 사용 시 주의점
  - printk를 과도하게 사용하지 않는다. ➔ 실행시간이 길다
  - 개행 문자가 있어야 출력을 시작한다. ➔ '\n'을 포함 하도록 한다.

실습2: 드라이버 정보 매크로 사용 (1)

- init_module() 와 cleanup_module() 함수 변경 매크로(linux/init.h 에 정의 되어 있음)

module_init()

module_exit()

```
/* hello-2.c – Demonstrating the module_init() and module_exit() macros.
This is preferred over using init_module() and cleanup_module(). */

#include <linux/module.h> /* Needed by all modules */
#include <linux/kernel.h> /* Needed for KERN_INFO */
#include <linux/init.h> /* Needed for the macros */

static int __init hello_2_init(void)
{
        printk(KERN_INFO "Hello, world 2\n");
        return 0;
}
static void __exit hello_2_exit(void)
{
        printk(KERN_INFO "Goodbye, world 2\n");
}
module_init(hello_2_init);
module_exit(hello_2_exit);
MODULE_LICENSE("GPL");
```

실습2: 드라이버 정보 매크로 사용 (2)

- MODULE_LICENSE()

  GPL, GPL v2, Dual BSD/GPL, Proprietary 등
- MODULE_DESCRIPTION()

  모듈의 하는 일을 설명
- MODULE_AUTHOR()

  모듈 제작자
- MODULE_SUPPORTED_DEVICE()

  모듈이 지원하는 장치의 타입

실습2: 드라이버 정보 매크로 사용 (3)

```
#include <linux/module.h> /* Needed by all modules */
#include <linux/kernel.h> /* Needed for KERN_INFO */
#include <linux/init.h> /* Needed for the macros */

#define DRIVER_AUTHOR "Peter Jay Salzman <p@dirac.org>"
#define DRIVER_DESC "A sample driver"

static int __init init_hello_3(void)
{
        printk(KERN_INFO "Hello, world 4\n");
        return 0;
}
static void __exit cleanup_hello_3(void)
{
        printk(KERN_INFO "Goodbye, world 4\n");
}
module_init(init_hello_4);
module_exit(cleanup_hello_4);
/* Get rid of taint message by declaring code as GPL.*/
MODULE_LICENSE("GPL");
MODULE_AUTHOR(DRIVER_AUTHOR); /* Who wrote this module? */
MODULE_DESCRIPTION(DRIVER_DESC); /* What does this module do */
MODULE_SUPPORTED_DEVICE("testdevice");
```

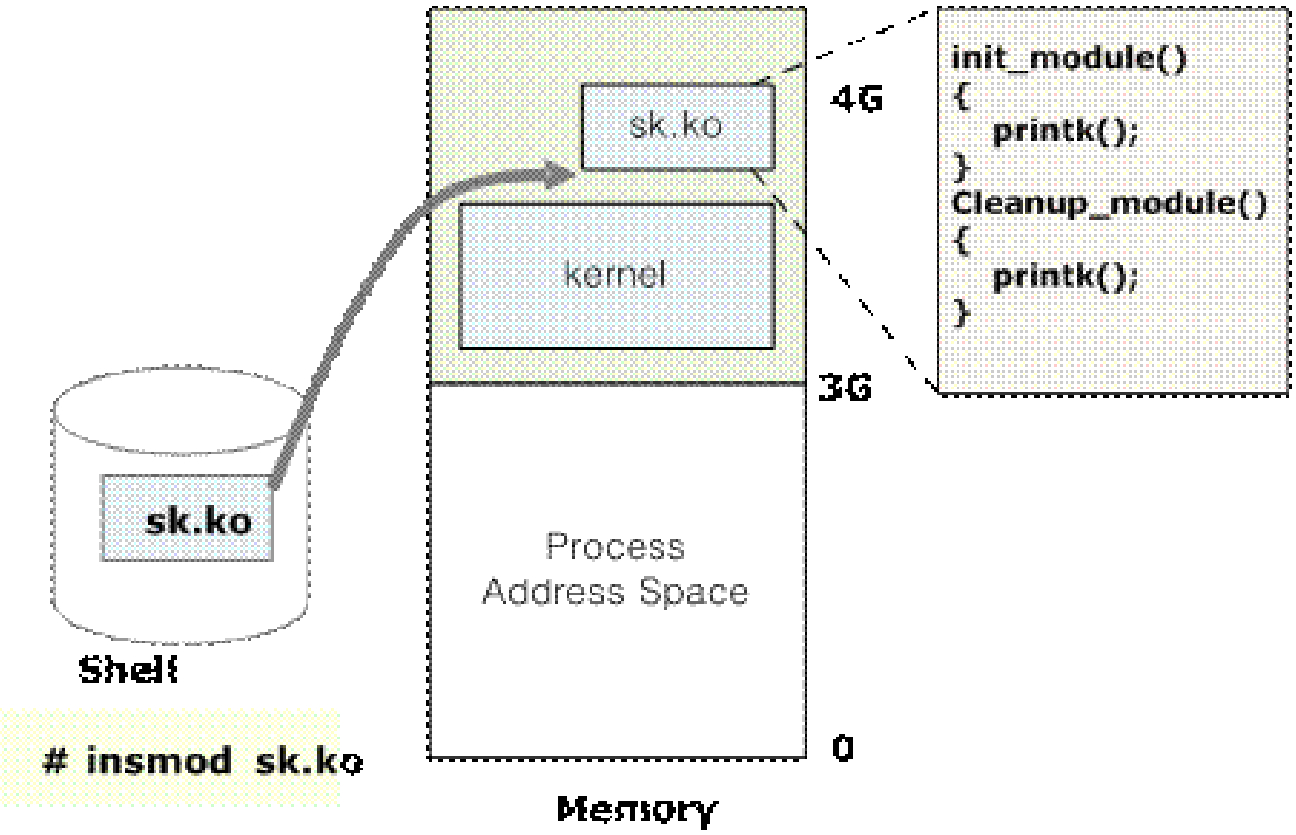
캐릭터 디바이스 드라이버

캐릭터 디바이스 드라이버의 구현

- 캐릭터 디바이스
  - 키보드 같은 디바이스는 바이트 단위로 처리되고 써넣은 데이터는 보존될 수도, 보존되지 않을 수도 있다.
  - 시간에 따라 연속적으로 발생할 수도 있고, 발생한 데이터의 끝을 알 수 없다.
  - fs/char_dev.c 에 정의

    struct char_device_struct chrdevs[CHRDEV_MAJOR_HASH_SIZE];

캐릭터 디바이스 드라이버의 구현



<Fig. sk.o의 메모리 로드>

실습1: 기본 뼈대 구성 – SK.C

```
/*************************************
 * Filename: sk.c
 * Title: Skeleton Device
 * Desc: module_init, module_exit
 *************************************/
#include <linux/module.h>
#include <linux/init.h>

MODULE_LICENSE("GPL");

static int sk_init(void)
{
    printk("SK Module is up... \n");
    return 0;
}

static void sk_exit(void)
{
    printk("The module is down...\n");
}

module_init(sk_init);
module_exit(sk_exit);
```

실습1: 기본 뼈대 구성 – MAKEFILE

```
obj-m   := sk.o
KDIR    := (커널 소스 디렉토리 또는 모듈 build 디렉토리)
PWD :=  $(shell pwd)

all:
	make ARCH=arm64 CROSS_COMPILE=aarch64-linux-gnu- -C $(KDIR) \
	M=$(PWD) modules

clean:
	make -C $(KDIR) M=$(PWD) clean
```

- 컴파일 및 모듈 적재와 해제

```
# sudo insmod sk.ko
SK Module is up...
# lsmod
# sudo rmmod sk
The module is down...
```

캐릭터 디바이스 등록

- 주요 구현 순서
  - file_operations의 레코드를 할당한다.
  - register_chrdev()함수를 init_module()함수에 삽입한다.
  - open file operation(함수포인터)인 sk_open() 함수를 만든다.

캐릭터 디바이스 드라이버 API

- 등록과 해제 관련 API
  - register_chrdev 문자 디바이스의 등록
  - unregister_chrdev 문자 디바이스를 해제
  - register_chrdev_region 디바이스 번호 요구 등록
  - unregister_chrdev_region 사용중인 디바이스 번호 해제

캐릭터 디바이스 등록

- register_chrdev()
  - 유일한 Major 번호 할당.

    int **register_chrdev**(unsigned int **major**, const char *name, struct file_operations *fops);

    major : 요청할 major 번호

    name : 디바이스 이름. /proc/devices에 나타난다.

    fops : file operation function pointer

  - Major 번호 : 기존 것과 겹치지 않는 번호 이용
  - 문자 디바이스 드라이버 테이블 chrdevs[]의 인덱스로 사용됨.

MAJOR 번호의 결정

- Manual allocation

  현재 사용 중이지 않은 major 번호를 알아낸 후 직접 하드 코딩 함.

- Dynamic allocation
  - major 값에 0을 넣으면 kernel이 빈 번호를 알아서 할당

```
result = register_chrdev(scull_major, "scull", &scull_fops);
if (result < 0) {
    printk(KERN_WARNING "scull: can't get major %d\n", scull_major);
    return result;
}
if (scull_major == 0) scull_major = result; /* dynamic */
```

  - 단점 : 미리 디바이스 파일을 만들어 둘 수 없음.
  - 해결책 : 장치번호 등록 후 /proc/devices를 읽어 major 번호를 얻고, 장치 파일을 만드는 스크립트를 활용한다.

스크립트를 이용한 MAJOR 번호의 동적 할당 예

```
#!/bin/sh
DEV_FILE=gpio
DEV_NAME=GPIO

/sbin/rmmod $DEV_FILE &> /dev/null
/sbin/insmod $DEV_FILE.o

set $(grep -r $DEV_NAME /proc/devices | cut -d ' ' -f1)
devmajor=$1

set $(grep -r $DEV_NAME /proc/devices | cut -d ' ' -f2)
devname=$1

/bin/rm /dev/$devname &> /dev/null
/bin/mknod /dev/$devname c $devmajor 0
```

<스크립트를 이용한 동적 할당의 예 - inst_device.sh >

캐릭터 디바이스 해제

- unregister_chrdev()
  - int **unregister_chrdev**(unsigned int major,
    const char *name);
  - 디바이스 파일도 삭제해야 한다.
  - Major 번호 삭제 없이 장치 드라이버를 삭제하면 문제 발생(Oops 메시지 출현)
- 스크립트를 이용한 드라이버 모듈 제거

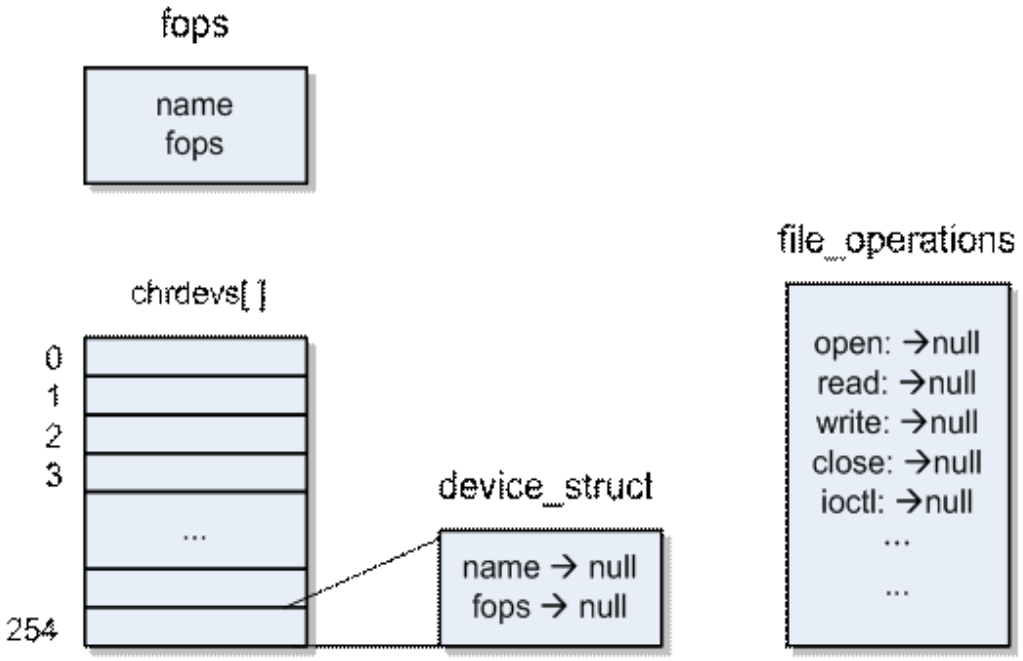
```
#!/bin/sh

DEV_NAME=gpio
DEV_FILE=GPIO

/sbin/rmmod $DEV_NAME
/bin/rm /dev/$DEV_FILE
/bin/rm /root/*
```

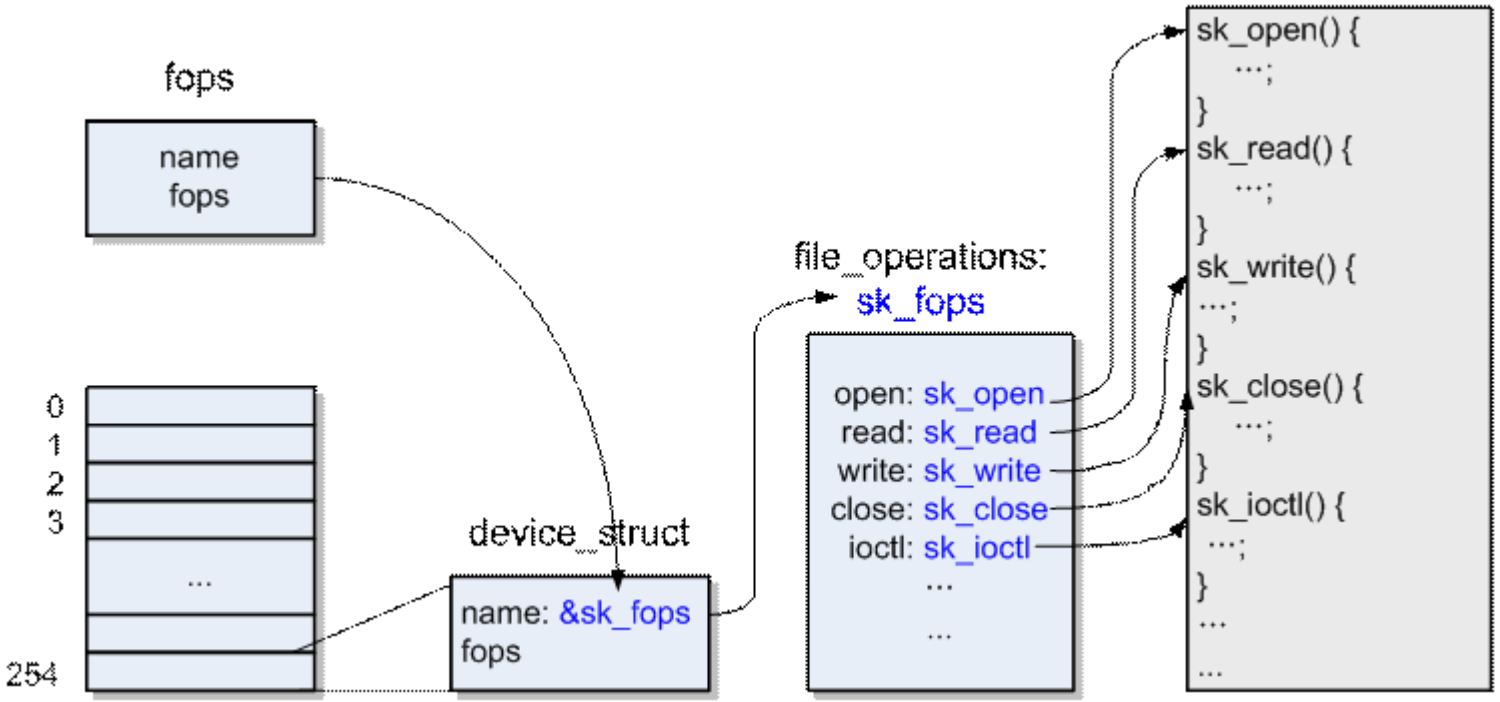
REGISTER_CHRDEV 구조

- register_chrdev() 실행 전 상태



REGISTER_CHRDEV 구조

- register_chrdev() 실행 후 상태



디바이스 타입 – DEV_T와 KDEV_T

- Major/Minor numbers가 조합된 수형

  major 번호와 쌍을 이뤄 하나의 장치 번호를 구성.

  Major(12bits), Minor(20bits)

  - macros(include/linux/kdev_t.h)

```
MAJOR(kdev_t dev);          /* 주 번호 추출 */
MINOR(kdev_t dev);          /* 부 번호 추출 */
MKDEV(int ma, int mi);              /* 번호 설정 */
kdev_t_to_nr(kdev_t dev); /* kdev_t->dev_t */
to_kdev_t(int dev);         /* dev_t->kdev_t */
```

실습2: 디바이스 등록 및 해제 – SK.C

```
#include <linux/module.h>
#include <linux/init.h>
#include <linux/fs.h>

MODULE_LICENSE("GPL");

int result;
/* file_operations의 레코드를 할당한다. */
struct file_operations sk_fops;

static int sk_init(void)
{
    printk("SK Module is up... \n");
    /* 문자 디바이스의 등록 */
    result = register_chrdev(0, "SK", &sk_fops);
    printk("major number=%d\n", result);
    return 0;
}
static void sk_exit(void)
{
    printk("The module is down...\n");
    unregister_chrdev(result, "SK");
}

module_init(sk_init);
module_exit(sk_exit);
```

실습2: 디바이스 등록 및 해제 – SK.C

- 컴파일 및 적재 실행

```
# make
# insmod sk.ko
# lsmod
# cat /proc/devices
# rmmod sk
```

초기화 및 해제 작업의 기본 형식

```
static xxx_info *info = NULL;

int xxx_init(void)
{
   xxx_probe( ...  // 하드웨어 검출 처리 및 에러처리
   xxx_setup( ...  // 하드웨어 초기화
   register_chrdev( ... // 디바이스 드라이버 등록
   info = kmalloc( ... // 디바이스 드라이버에 동작에 필요한 내부 구조체 메모리 할당

   xxx_setupinfo( ...  // 여러 프로세스가 디바이스 하나에 접근하는 경우에 필요한 사전 처리
   xxx_setupminor( ... // Major번호에 종속된 Minor번호를 관리하기 위한 사전 처리
}

void xxx_exit(void)
{
   kfree( ...  // 디바이스 드라이버에 할당된 모든 메모리 해제
   unregister_chrdev( ...  // 디바이스 드라이버의 해제
   xxx_shutdown( ...   // 하드웨어 제거에 따른 처리
}

module_init(xxx_init);
module_exit(xxx_exit);
```

장치 파일의 생성

- 목 적
  - Device Driver 로 사용할 장치 파일을 만든다.
  - 유저가 Device Driver File을 이용해 장치를 사용할 수 있다.
  - 장치 파일을 생성하기 위해서는 mknod를 통해서 장치 파일을 생성한다.

- 리눅스 커널에서 파일이란?
  - 절대경로 혹은 상대경로로 표시되는 path와 file명으로 구성되어 있다.
    (PATH: dentry, File: inode가 관리)
  - 커널은 항상 절대경로와 상대경로를 알고 있다.
  - 커널은 파일을 경로와 파일명으로 인식한다.

디바이스 이름 생성

- mknod의 사용
  - 일반적으로 /dev 경로에 생성 한다.
  - 장치파일은 user와 Device Driver를 연결해 주는 매개체이다.
  - devfs에서 관리된다.

```
# mknod  /dev/name  type  major  minor
```

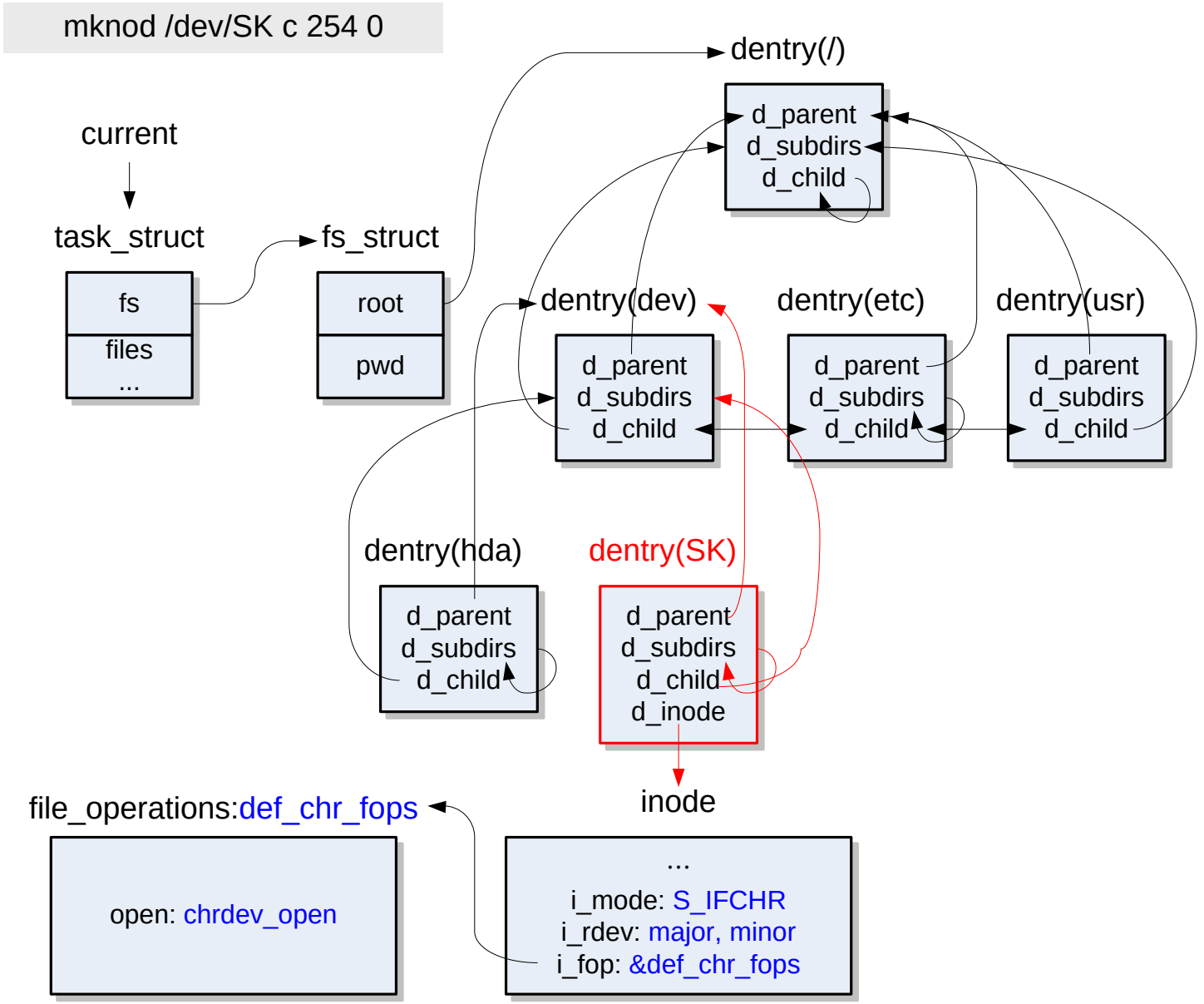
Minor number

Major number

b(block) or c(character)

Device Name

- 파일의 구성
  - dentry 구조체 : 경로를 관리하는 구조체
  - inode 구조체 : 파일을 관리하는 구조체
  - 부모는 dentry.d_subdirs, 자식들은 dentry.d_child와 double linked list로 구성되어 있다.


mknod /dev/SK c 254 0
dentry(/)
current
d_parent
d_subdirs
d_child
task_struct
fs_struct
fs
files
...
root
pwd
dentry(dev)
dentry(etc)
dentry(usr)
d_parent
d_subdirs
d_child
dentry(hda)
dentry(SK)
d_parent
d_subdirs
d_child
d_inode
inode
file_operations:def_chr_fops
open: chrdev_open
...
i_mode: S_IFCHR
i_rdev: major, minor
i_fop: &def_chr_fops

실습3: 디바이스 파일 생성 – 실행

- 실습 실행 순서
  - sk.c 파일: 변동사항 없음

```
# insmod sk.ko
# mknod /dev/SK c 253 0
# ls /dev –al | grep SK
      crw–r––r––    1 root     root     253,   0 Jan  1 05:41 SK
# rm /dev/SK
# rmmod sk
```

FILE_OPERATIONS

- 개요
  - 문자 디바이스 드라이버와 응용 프로그램을 연결하는 고리.
  - linux/fs.h에서 정의하는 이 구조체는 **함수 포인터 집합**이다.
  - 특정 동작 함수를 구현하여 가리켜야 한다.
  - 지정하지 않으면 NULL로 남겨 두어야 한다.

FILE_OPERATIONS

```
struct file_operations {
    struct module *owner;
    loff_t (*llseek) (struct file *, loff_t, int);
    ssize_t (*read) (struct file *, char *, size_t, loff_t *);
    ssize_t (*write) (struct file *, const char *, size_t, loff_t *);
    int (*readdir) (struct file *, void *, filldir_t);
    unsigned int (*poll) (struct file *, struct poll_table_struct *);
    int (*ioctl) (struct inode *, struct file *, unsigned int, unsigned long);
    int (*mmap) (struct file *, struct vm_area_struct *);
    int (*open) (struct inode *, struct file *);
    int (*flush) (struct file *);
    int (*release) (struct inode *, struct file *);
    int (*fsync) (struct file *, struct dentry *, int datasync);
    int (*fasync) (int, struct file *, int);
    int (*lock) (struct file *, int, struct file_lock *);
    ssize_t (*readv) (struct file *, const struct iovec *, unsigned long, loff_t *);
    ssize_t (*writev) (struct file *, const struct iovec *, unsigned long, loff_t *);
    ssize_t (*sendpage) (struct file *, struct page *, int, size_t, loff_t *, int);
    unsigned long (*get_unmapped_area)(struct file *, unsigned long, unsigned long,
                                       unsigned long, unsigned long);
};
```

FILE_OPERATIONS 구조체 필드

- **struct module *owner;**

  파일 오퍼레이션의 소유자를 나타낸다. 보통 <linux/module.h>에 정의되어 있는 THIS_MODULE 매크로를 사용해 초기화 한다.

- **loff_t (*llseek) (struct file *, loff_t, int);**

  디바이스 드라이버의 파일 포인터 위치를 강제로 이동 시키는 함수를 지정한다.

- **ssize_t (*read) (struct file *, char *, size_t, loff_t *);**

  디바이스에서 자료를 읽는데 사용한다. NULL이면 –EINVAL 반환

- **ssize_t (*write) (struct file *, const char *, size_t, loff_t *);**

  자료를 디바이스로 보낸다. NULL이면 –EINVAL 반환

- **unsigned int (*poll) (struct file *, struct poll_table_struct *);**

  다중 입출력 처리를 가능하게 해주는 poll, epoll, select의 백엔드이다.

- **int (*ioctl) (struct inode *, struct file *, unsigned int, unsigned long);**

  디바이스 관련 명령들을 제어할 수 있다.

FILE_OPERATIONS 변수선언 스타일

- 선언 예

```
struct file_operations xxx_fops = {
    .owner  = THIS_MODULE,
    .llseek = xxx_llseek,
    .read   = xxx_read,
    .ioctl  = xxx_ioctl,
    .open   = xxx_open,
    .release = xxx_release,
};
```

실습4: OPEN과 RELEASE 기능 추가

- 실습
  - 디바이스 드라이버가 구동 가능하도록 시스템 콜을 구현한다.
  - 디바이스 드라이버 애플리케이션 작성
  - sk_app.c 응용프로그램을 작성해 사용해 본다.

OPEN, RELEASE의 역할

- open 메소드의 역할
  - 디바이스 관련 오류 확인(디바이스가 준비되지 않았거나 이와 유사한 하드웨어 문제)
  - 처음으로 디바이스를 열 경우 디바이스 초기화
  - 필요에 따라 f_op 포인터 갱신
  - 필요에 따라 자료구조를 할당하고 filp->private_data에 들어갈 값을 채움

- release 메소드의 역할
  - device_close로 부르는 경우도 있다
  - open이 filp->private_data에 할당한 데이터의 할당 삭제
  - 마지막 close 호출 시 디바이스 종료

OPEN, RELEASE 호출의 기본 처리

- open은 다음 항목을 처리해야 한다.
  - 디바이스 드라이버가 처음 열렸을 때 하드웨어 초기화
  - 디바이스 드라이버의 동작에 필요한 에러 체크

    -ENODEV 하드웨어가 존재하지 않는다.

    -ENOMEM 커널 메모리가 부족하다.

    -EBUSY 디바이스가 이미 사용 중이다.

  - Minor 번호에 대한 처리가 필요한 경우
    file_operation 구조체를 갱신

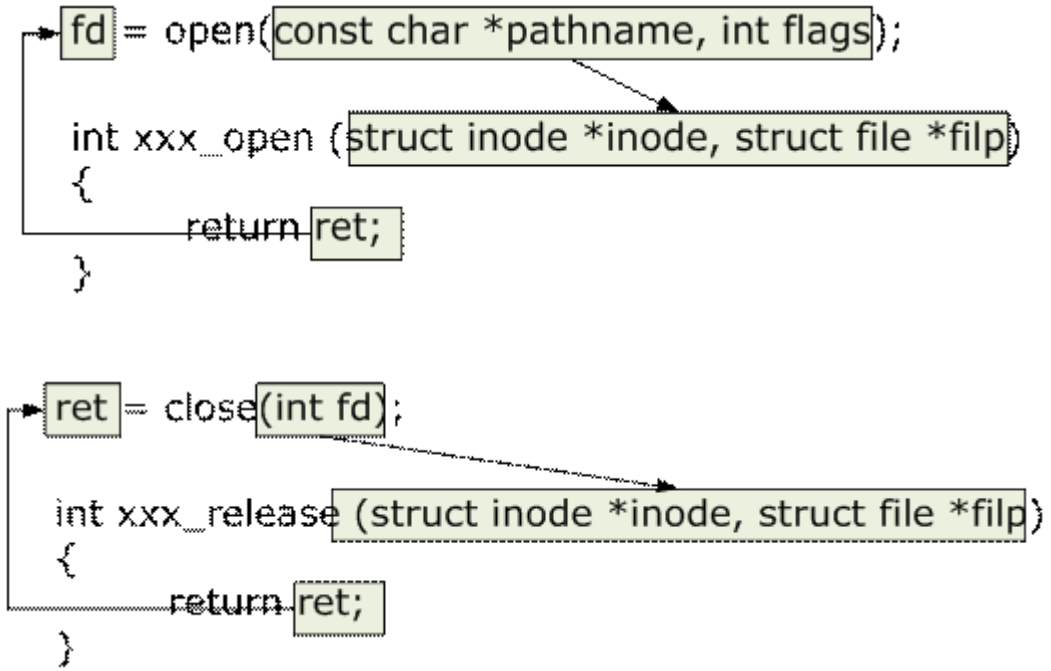
  - 프로세스 별 메모리 할당과 초기화

    보통 file 구조체 filp의 private_data에 등록하여 사용한다.

    Ex) filp->private_data = vmalloc(1024)

매개변수 반환 값 상관관계

- 호출되는 함수의 매개변수 반환 값 상관관계
  - open()함수의 pathname과 flags는 xxx_open()함수에 직접적으로 전달되지는 않는다.
    ➔ 사전 처리를 하기 때문
  - 적절히 inode와 filp변수에 배분되어 전달된다.



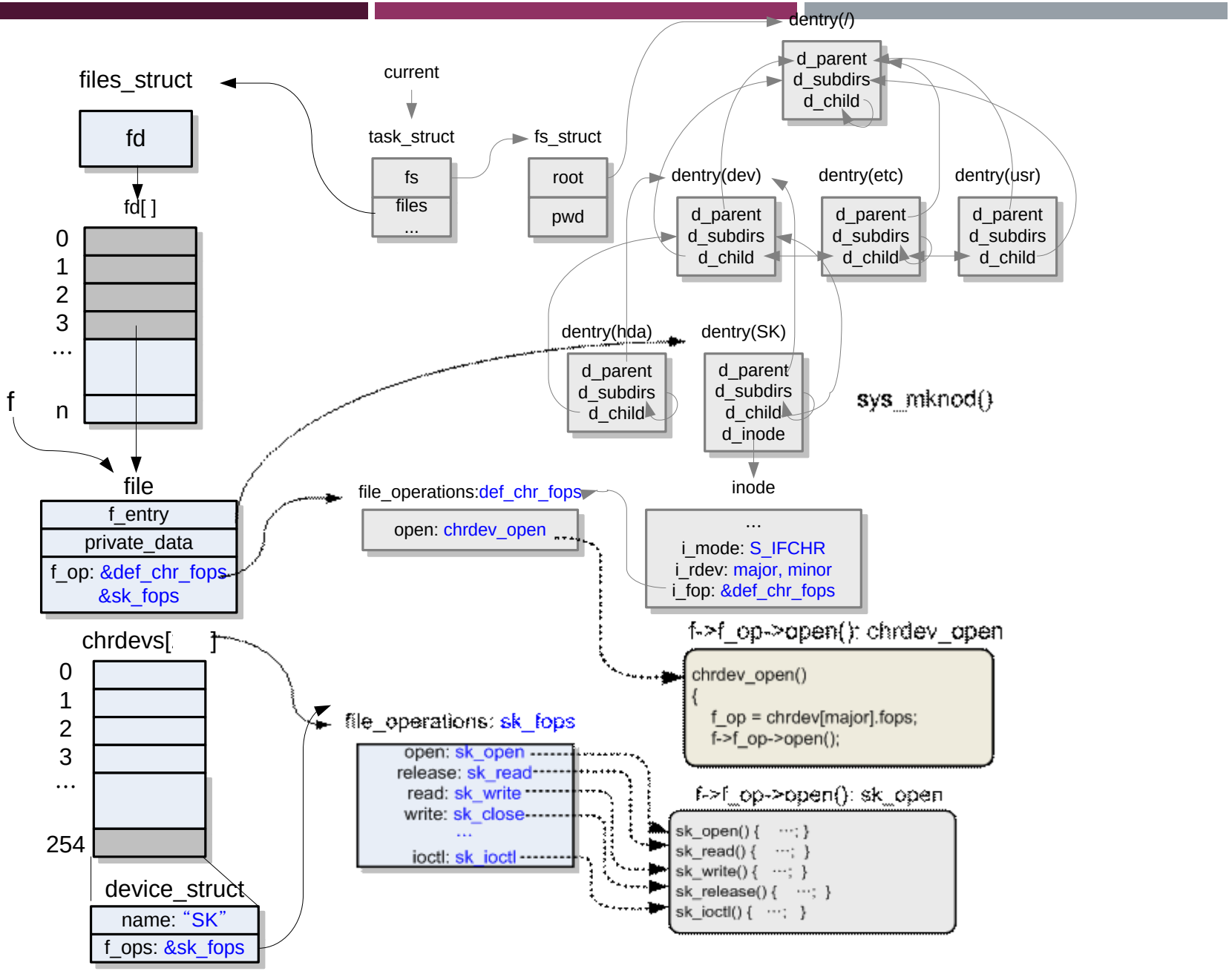
FIE STRUCTURE

- file structure in <linux/fs.h>
  - 디바이스 드라이버가 사용하는 중요 커널 자료구조
  - 오픈 파일에 하나씩 할당됨.

```
struct file {
        struct file *                   f_next, **f_pprev;
        struct dentry *                 f_dentry;
        struct file_operations          *f_op;
        mode_t                          f_mode;
        loff_t                          f_pos;
        unsigned int                    f_count, f_flags;
        unsigned long                   f_reada, f_ramax,f_raend,
                                        f_ralen, f_rawin;
        struct fown_struct              f_owner;
        unsigned int                    f_uid, f_gid;
        int                             f_error;
        unsigned long                   f_version;
           /* needed for tty drivers, and maybe others */
        void *                          private_data;
};
```

FIE STRUCTURE

- **mode_t f_mode**
  - FMODE_READ/FMODE_WRITE 비트로 결정
  - 파일 시스템 호출에서 R/W 권한이 미리 검사됨.
- **loff_t f_pos**
  - 현재의 읽기/쓰기 위치.
  - lseek / read / write 메소드에서 갱신해주어야 함.
- **unsigned int f_flags**
  - O_RDONLY, O_NONBLOCK, O_SYNC, …
  - 드라이버는 자신의 동작 제어를 위해 이 필드를 참조해야 함.
- **struct file_operations *f_op**
  - 드라이버 메소드 테이블을 가리키는 포인터
  - method overriding될 수도 있음
- **void *private_data**
  - 드라이버/모듈들의 내부 데이터 유지.
  - 커널이 file 구조체를 파괴하기 전에 미리 파괴해야 함.


files_struct
fd
fd[ ]
0
1
2
3
…
n
f
file
f_entry
private_data
f_op: &def_chr_fops
&sk_fops
current
task_struct
fs
files
...
fs_struct
root
pwd
dentry(/)
d_parent
d_subdirs
d_child
dentry(dev)
dentry(etc)
dentry(usr)
dentry(hda)
dentry(SK)
d_inode
sys_mknod()
inode
file_operations:def_chr_fops
open: chrdev_open
...
i_mode: S_IFCHR
i_rdev: major, minor
i_fop: &def_chr_fops
f->f_op->open(): chrdev_open
chrdev_open()
{
f_op = chrdev[major].fops;
f->f_op->open();
chrdevs[ ]
0
1
2
3
…
254
file_operations: sk_fops
open: sk_open
release: sk_read
read: sk_write
write: sk_close
...
ioctl: sk_ioctl
f->f_op->open(): sk_open
sk_open() { …; }
sk_read() { …; }
sk_write() { …; }
sk_release() { …; }
sk_ioctl() { …; }
device_struct
name: "SK"
f_ops: &sk_fops

실습4: OPEN과 RELEASE 추가 – SK.C

```
/*****************************************
 * Filename: sk.c
 * Title: Skeleton Device
 * Desc: Implementation of system call
 *****************************************/
#include <linux/module.h>
#include <linux/init.h>
#include <linux/major.h>
#include <linux/fs.h>

MODULE_LICENSE("GPL");

int result;

/* Define Prototype of functions */
int sk_open(struct inode *inode, struct file *filp);
int sk_release(struct inode *inode, struct file *filp);

/* Implementation of functions */
int sk_open(struct inode *inode, struct file *filp)
{
   printk("Device has been opened...\n");

   /* H/W Initialization */

   //MOD_INC_USE_COUNT;  /* for kernel 2.4 */

   return 0;
}
```

실습4: OPEN과 RELEASE 추가 – SK.C

```
int sk_release(struct inode *inode, struct file *filp)
{
    printk("Device has been closed...\n");

    return 0;
}

struct file_operations sk_fops = {
    .open       = sk_open,
    .release    = sk_release,
};

static int __init sk_init(void)
{
    printk("SK Module is up... \n");

    result = register_chrdev(0, "SK", &sk_fops);
    if (result < 0 ) {
        printk("Couldn't get a major number...\n");
    }
    printk("major number=%d\n", result);
    return 0;
}
static void __exit sk_exit(void)
{
    printk("The module is down...\n");
    unregister_chrdev(result, "SK");
}

module_init(sk_init);
module_exit(sk_exit);
```

실습4: OPEN과 RELEASE 추가 – SK_APP.C

```
/***************************************
 * Filename: sk_app.c
 * Title: Skeleton Device Application
 * Desc: Implementation of system call
 ***************************************/
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
#include <fcntl.h>

int main(void)
{
    int fd;

    fd = open("/dev/SK", O_RDWR);
    printf("fd = %d\n", fd);

    if (fd<0) {
        perror("/dev/SK error");
        exit(-1);
    }
    else
        printf("SK has been detected...\n");

    getchar();
    close(fd);

    return 0;
}
```

실습4: OPEN과 RELEASE 추가 – 실행

- 실행 순서
  - 모듈 적재 (make clean, make, insmod)
  - 장치파일 생성 (mknod)
  - sk_app 컴파일 (gcc sk_app.c –o sk_app)
  - 실습 후 장치 파일 제거 및 모듈 제거
- 실행결과 예시

```
# ./sk_app
Device has been opened...
fd = 3
SK has been detected...
Device has been opened...
```

- 작성 포인트

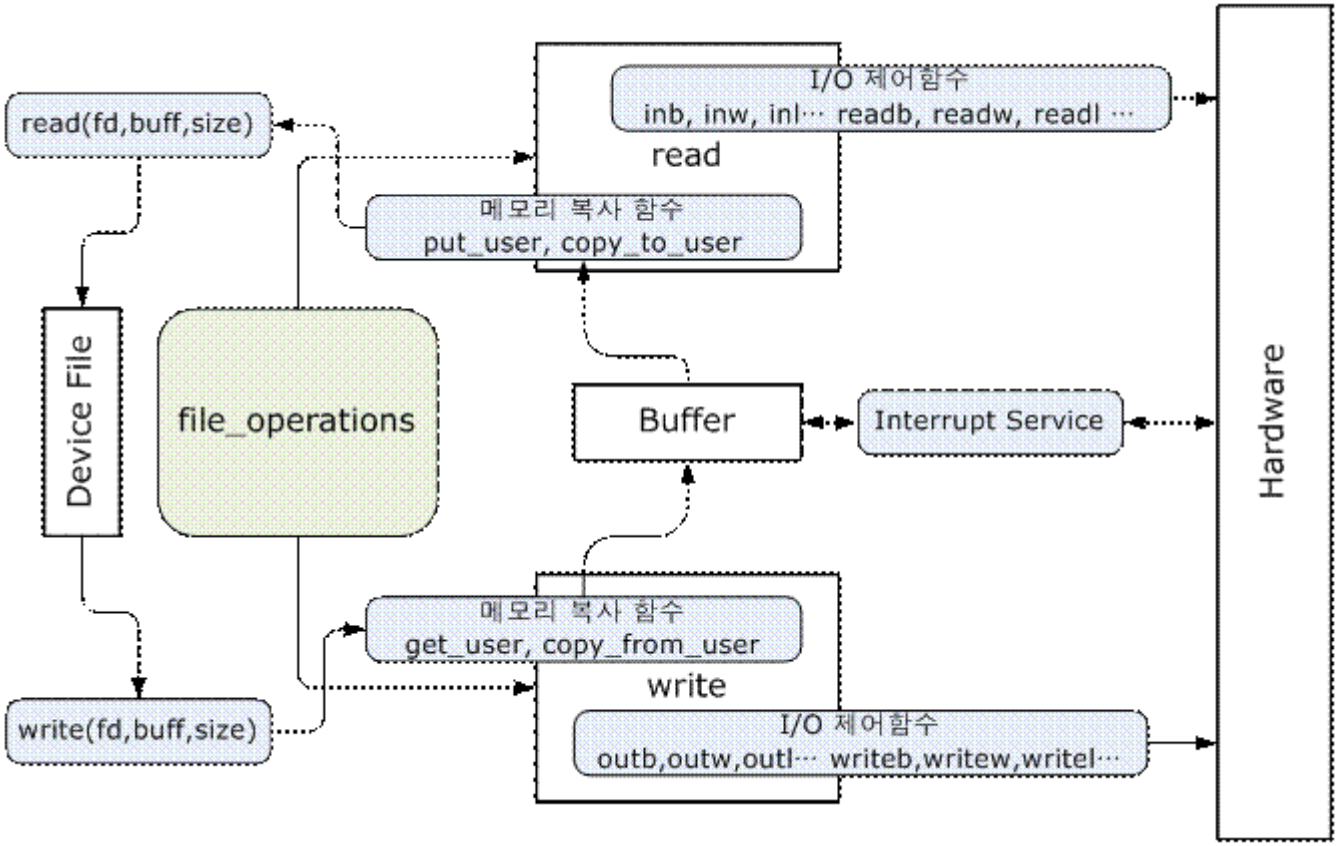
  open의 수행 순서는 다음과 같다.

  open ➔ library ➔ S/W Interrupt ➔ System call ➔ VFS ➔ CHR. Device File ➔ Device Driver

읽기와 쓰기의 구현

- read와 write를 구현하기 위해 알아야 할 사항.
  - 사용자 메모리 공간과 커널 메모리 공간 사이의 데이터 이동
  - 처리 조건이 되지 않을 때의 처리
  - 하드웨어 제어함수
  - 여러 프로세스가 동시에 접근했을 때의 경쟁 처리
  - 인터럽트 서비스 함수와의 경쟁 처리

디바이스 드라이버 읽기 쓰기 구조



< 디바이스 드라이버 읽기 쓰기의 구조>

실습5: WRITE() SYSTEM CALL 추가하기

- 구현 내용
  - write() 함수의 용도를 이해하고, write()를 구현한다.
  - 응용 프로그램에서 디바이스에 데이터를 전달하는 것이 목적이다.

    하드웨어에서 전달될 데이터일 수도 있고, 디바이스 드라이버 동작에 영향을 미치는 데이터일 수도 있다

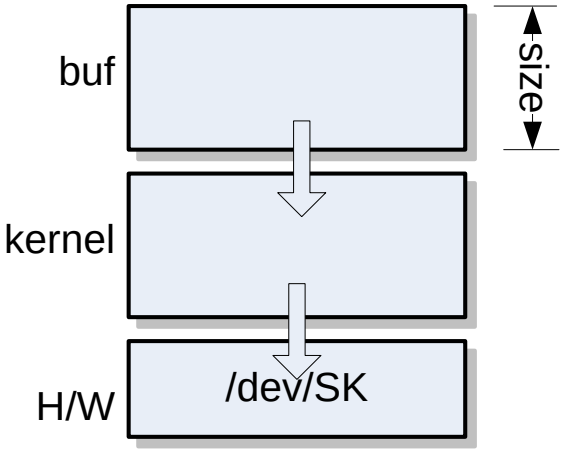
- 기본 구현 개념
  - 응용 프로그램은 디바이스 파일에 write( ) 함수를 이용해 하드웨어에 데이터 쓰기를 시도하고, 커널은 file_operations 구조체 write 필드에 지정된 xxx_write( ) 함수가 수행되도록 호출한다.
  - 이때 디바이스 파일은 쓰기를 허가하는 모드로 열려있어야 한다. 그렇지 않으면 응용 프로그램에서 디바이스 파일에 write( ) 함수를 수행해도 호출되지 않는다.

실습5: WRITE() SYSTEM CALL 구현 개념

- 매개변수 사용

  char *buf: 응용 프로그램에서 전달한 버퍼의 주소

  size_t count: 응용 프로그램에서 요청한 데이터의 크기



n = write(fd, buf, size);

```
sk_write(file, buf, count, f_ops) {
    copy_from_user(data, buf, count);
    // H/W access
}
```

```
outb(), writeb() (8bit 단위)
outw(), writew() (16bit 단위)
outl(), writel() (32bit 단위)
```

```
*addr = data;
        ▼
ldr r0,  =data
ldr r1, =addr
str r1, [r0]
```

WRITE 함수의 구현

- write()함수의 매개변수의 의미

  응용 프로그램에서 디바이스에 데이터를 전달하는 것이 목적.

- 주요 메서드
  - ssize_t **xxx_write**(struct file *filp, char *buff, size_t count, loff_t *offp)

    사용자 영역인 buff에서 count 바이트 만큼 읽은 후 디바이스의 offp 위치로 저장
  - unsigned long **copy_from_user**(void *to, const void *from, unsigned long count);

    사용자 메모리 from을 커널 메모리 to로 count만큼 복사한다.
  - **get_user**(x, ptr)

    x 변수에 ptr의 사용자 메모리값을 대입한다.

WRITE 함수의 구현

- 주요 에러

  EAGAIN: O_NONBLOCK로 열렸지만 write()호출 시 즉시 처리할 수 있는 상황이 아니다.

  EIO: I/O 에러가 발생했다.

  EFAULT: buf가 접근할 수 없는 주소 공간을 가리키고 있다.

  ENOSPC: 데이터를 위한 공간이 없다.

WRITE 함수의 구현

- struct file *filp
  - 읽기와 쓰기에 전달되는 file 구조체 변수의 선두 주소를 담은 filp는 디바이스 파일이 어떤 형식으로 열렸는가에 대한 정보를 담고 있다.
  - 자주 사용되는 필드는 다음과 같다.
  - unsigned int f_flags;
  - 가장 많이 참조되는 것으로 O_RDONLY, O_NONBLOCK 또는O_NDELAY, O_SYNC가 있다.
  - O_RDONLY는 읽기 모드로 열리는 조건이O_RDWR과 관련이 있기 때문에 참조되며, O_NONBLOCK 또는O_NDELAY, O_SYNC는 블록모드 처리에 관련되어 참조된다.
- loff_t f_pos;

  f_pos 필드 변수에는 현재의 읽기/쓰기 위치를 담는데, read( ), write( ), llseek( )과 같이 읽기/쓰기의 위치를 변경할 수 있는 함수에 의해 변경된다.

WRITE() 구현 시 일반적인 구조

```
ssize_t xxx_write (struct file *filp, const char *buf, size_t count, loff_t *f_pos)
{
        if(!(데이터가 처리 가능한가?)) {
                if(!(filp->f_flags & O_NONBLOCK) ) {
                        // 블록 모드로 열렸다면 프로세스를 재운다.
                }
        }
        // 사용자 공간에 데이터를 가져온다.
        // copy_from_user, get_user

        // 하드웨어에서 데이터를 쓴다.
        // outb( ),..., writeb( ) 함수 사용
        // 또는 버퍼를 읽는다.

        return 처리된 데이터 개수;
}
```

실습5: WRITE() 추가 – SK.C

```
#include <linux/module.h>
#include <linux/init.h>
#include <linux/major.h>
#include <linux/fs.h>
#include <asm/uaccess.h>

MODULE_LICENSE("GPL");

int result;

/* Define Prototype of functions */
int sk_open(struct inode *inode, struct file *filp);
int sk_release(struct inode *inode, struct file *filp);
ssize_t sk_write(struct file *filp, const char *buf, size_t count, loff_t *f_pos);

/* Implementation of functions */
int sk_open(struct inode *inode, struct file *filp)
{
    printk("Device has been opened...\n");

    /* H/W Initialization */

    return 0;
}
```

실습5: WRITE() 추가 – SK.C

```
int sk_release(struct inode *inode, struct file *filp)
{
    printk("Device has been closed...\n");

    return 0;
}

ssize_t sk_write(struct file *filp, const char *buf, size_t count, loff_t *f_pos)
{
    char data[11];

    copy_from_user(data, buf, count);
    printk("data >>>>> = %s\n", data);

    return count;
}

struct file_operations sk_fops = {
    .open       = sk_open,
    .release    = sk_release,
    .write      = sk_write,
};
```

실습5: WRITE() 추가 – SK.C

```
static int __init sk_init(void)
{
    printk("SK Module is up... \n");
    result = register_chrdev(0, "SK", &sk_fops);
    if (result < 0 ) {
        printk("Couldn't get a major number...\n");
    }
    printk("major number=%d\n", result);
    return 0;
}

static void __exit sk_exit(void)
{
    printk("The module is down...\n");
    unregister_chrdev(result, "SK");
}

module_init(sk_init);
module_exit(sk_exit);
```

실습5: WRITE() 추가 – SK_APP.C

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
#include <fcntl.h>

int main(void)
{
    int retn;
    int fd;
    /* write에서 사용할 버퍼 */
    char buf[100] = "write...\n";

    fd = open("/dev/SK", O_RDWR);
    printf("fd = %d\n", fd);

    if (fd<0) {
        perror("/dev/SK error");
        exit(-1);
    }
    else
        printf("SK has been detected...\n");
    /* fd가 가르키는 파일에 buf에 있는 10바이트를 쓰라는 의미 */
    retn = write(fd, buf, 10);
    printf("\nSize of written data : %d\n", retn);

    close(fd);
    return 0;
}
```

실습5: WRITE() 추가 – 실행

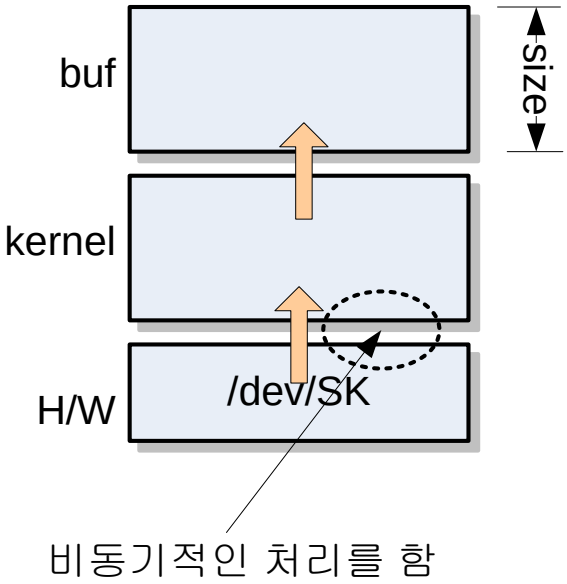
- 실행 절차
  - 모듈 적재
  - 장치파일 만들기
  - 애플리케이션 실행

```
# ./sk_app
Device has been opened...
fd = 3
SK has been detected...
data 〉〉〉〉〉 = write...

Size of written data : 10
Device has been opened...
```

실습6: READ() 함수 추가

- read 함수 매개변수
  - char *buf ➔ 응용프로그램에서 전달할 버퍼의 주소
  - size_t size: 응용 프로그램에서 요청한 데이터의 크기



n = read(fd, buf, size);

```
sk_read(file, buf, count, f_ops) {
    // H/W access code here!
    copy_to_user(buf, data_read, count);
}
```

```
request_irq(service_number, irq_service)
{
    irq_service();
}
```

```
irq_service()
{
    H/W access;
    조건;
    Wakeup interruptable;
}
```

READ 함수의 구현

- 개 요

  디바이스 드라이버가 동작하는 메모리 공간은 커널 메모리 공간이고, 응용 프로그램이 동작하는 메모리 공간은 사용자 메모리 공간이기 때문에 다른 공간 사이에 메모리를 전송하기 위해 커널에서는 다음과 같은 함수를 사용해야 한다.

- 주요 매서드

  ssize_t **xxx_read**(struct file *filp, char *buff,
  size_t count, loff_t *offp)

  - 디바이스의 offp 위치에서 count 바이트 만큼을 읽어서 사용자 영역인 buff로 저장해주는 기능

  - unsigned long **copy_to_user**(void *to,
  const void *from, unsigned long count);

    - 커널 메모리 from을 사용자 메모리 to로 count만큼 복사한다.

  - **put_user**(x, ptr)

    - x변수 값을 ptr의 사용자 메모리값에 대입한다.

READ 함수의 구현

- 디바이스를 열 때 옵션 사항
  - 이 값은 read( ) 함수의 매개변수 중에서 struct file *filp를 참조하여 판단한다.
  - 응용 프로그램이 O_NONBLOCK이나 O_NDELAY를 지정하지 않은 상태로 디바이스 파일을 열었다면 count 값이 만족될 때까지 기다려야 한다.
  - 그렇지 않으면 현재 발생된 데이터만 버퍼에 써넣고 함수를 종료해야 한다. 반환 값은 버퍼에 써넣은 데이터 개수다.

```
ssize_t xxx_read (struct file *filp, const char *buf, size_t count, loff_t *f_pos)
{
    ...
    if(filp->f_flags & O_NONBLOCK) {
        // 즉시 처리한다.
    } else {
        // 블록 처리한다.
    }
}
```

READ 함수의 구현

- read함수에서 하드웨어를 다루려면 다음 함수를 이용해야 한다.
  - port-map I/O

    inb, inw, inl, insb, insw, insl,
  - memory-mapped I/O

    readb, readw, readl,
  - I/O memory block

    memset_io, memcpy_fromio, memcpy_toio

READ함수 구현의 일반적인 형태

```
ssize_t xxx_read(struct file *filp, const char *buf,
                 size_t count, loff_t *f_pos)
{
   if(!(준비된 데이터가 있는가?))
   {
      if(!(filp->f_flags & O_NONBLOCK))
      {
         //블록 모드로 열렸다면 프로세스를 재운다.
      }
   }
   // 하드웨어에서 데이터를 읽는다.
   // inb(), ... readb(), … 등 함수 사용
   // 또는 버퍼를 읽는다.

   // 사용자 공간에 데이터를 전달한다.
   // copy_to_user, put_user

   return 0;
}
```

실습6: READ() 추가 – SK.C

```
…
ssize_t sk_read(struct file *filp, char *buf, size_t count, loff_t *f_pos);
…

ssize_t sk_read(struct file *filp, char *buf, size_t count, loff_t *f_pos)
{
    /* App. 에 전달할 문자열을 담은공간 */
    char data[20] = "this is read func...";
    /* App. 으로 전달 받은 주소로부터 count까지의 내용을 buf로 옮긴다 */
    copy_to_user(buf, data, count);

    return count;
}
…
struct file_operations sk_fops = {
    .open     = sk_open,
    .release  = sk_release,
    .write    = sk_write,
    .read     = sk_read,
};
```

실습6: READ() 추가 – SK_APP.C

```
. . .
int main(void)
{
    int retn;
    int fd;

    // char buf[100] = "write...\n";
    char buf[100] = {0};

    fd = open("/dev/SK", O_RDWR);
    printf("fd = %d\n", fd);

    if (fd<0) {
        perror("/dev/SK error");
        exit(-1);
    }
    else
        printf("SK has been detected...\n");
    //retn = write(fd, buf, 10);
    retn = read(fd, buf, 20); // fd가 가르키는 파일에 buf에서 20byte 읽음
    printf("\ndata : %s\n", buf);

    close(fd);
    return 0;
}
```

실습6: READ() 추가 – 실행

- 주요 코드 설명
  - read 가 호출되면 sk_read가 호출된다. VFS에서 다음과 같이 호출된다.
    f->f_op->read(); // 함수포인터 호출
  - buf는 user 영역에 있는 buffer의 위치를 의미한다.

- 실행 절차
  - 모듈 적재
  - 장치파일 만들기
  - 애플리케이션 실행

```
[root@2440REBIS dd]$ ./sk_app
Device has been opened...
fd = 3
SK has been detected...
Read Data : this is read func...
Device has been opened...
```

실습7: IOCTL 함수 추가

- 목적
  - 일반적으로 I/O Control에 관련한 작업을 수행하는 함수 이다.
  - 대부분의 ioctl 메쏘드 구현은 cmd 인수 값에 따라 올바른 동작을 선택하는 switch 문으로 구성한다.
- 사용자 영역에서 iotcl 함수 시스템 콜

  int ioctl(int fd, int cmd, ...);
- 커널 영역에서의 ioctl 함수
  - int (*ioctl) (struct inode *inode, struct file *filp, unsigned int cmd, unsigned long arg);
  - inode와 filp 포인터는 응용 프로그램의 파일 디스크립터 fd와 일치하는 인수
  - cmd 인수는 명령을 나타내는 응용 프로그램의 인수 전달
  - arg 인수는 명령 실행의 결과 데이터가 전달되는 unsigned long 형의 정수 또는 포인터

CMD의 구성

- cmd 명령의 해석 매크로 함수

  _IOC_NR 구분 번호 필드값을 읽는 매크로

  _IOC_TYPE 매직 넘버 필드값을 읽는 매크로

  _IOC_SIZE 데이터의 크기 필드값을 읽는 매크로

  _IOC_DIR 읽기와 쓰기 속성 필드값을 읽는 매크로

  Ex) if (_IOC_TYPE(cmd) != MY_MAGIC) return –EINVAL

- cmd 명령의 작성 매크로 함수

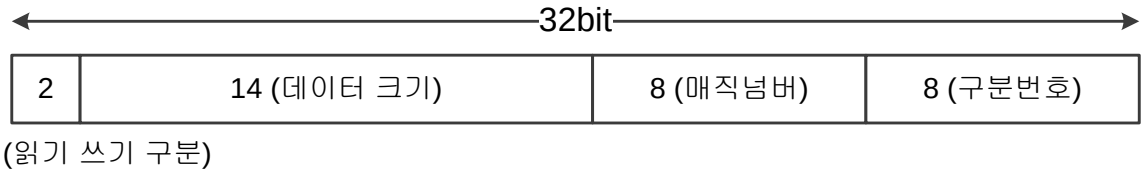
  _IO 부가적인 데이터가 없는 명령을 만드는 매크로

  _IOR 데이터를 읽어오기 위한 명령을 작성

  _IOW 데이터를 써 넣기 위한 명령을 작성

  _IOWR 디바이스 드라이버에서 읽고 쓰기위한 명령을 작성하는 매크로

  Ex) _IOW(매직넘버, 구분번호, 변수형)



명령 CMD 상수 값

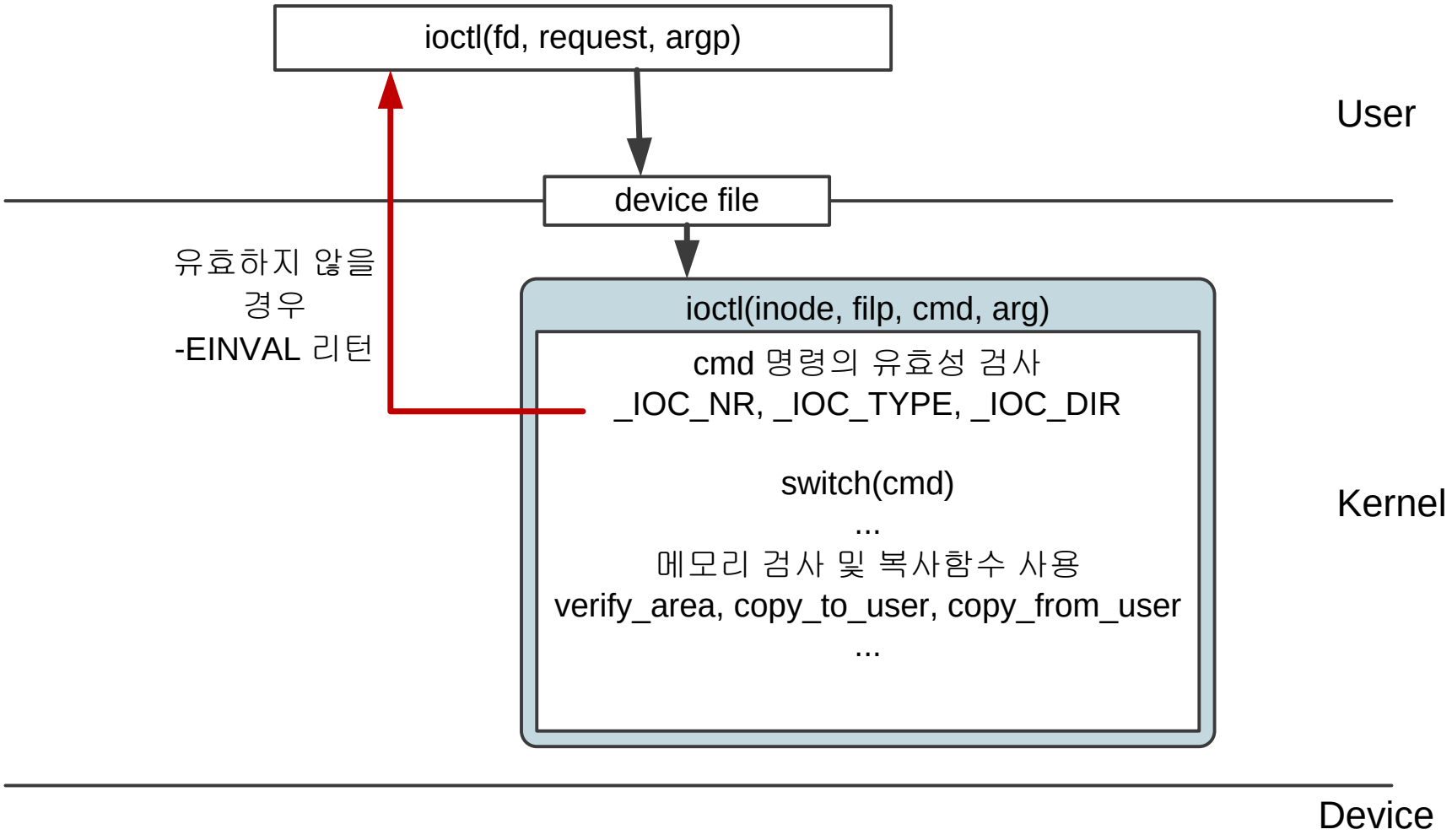
- ioctl 구현 시 해당 디바이스의 명령들에 대한 고유의 상수 값을 지정
  - 타입, 시퀀스 번호, 전송방향, 인수의 크기 등을 표시하는 비트필드로 표현
  - include/asm/ioctl.h와 Documentation/ioctl-number.txt를 체크해서 중복되지 않도록 드라이버의 ioctl 번호를 선정

- 타입(type)
  - 서로 중복되지 않는 8비트의 고유 번호(매직 넘버)
  - Documentation/ioctl-number.txt를 참조하여 선정 (_IOC_TYPEBITS)

- 시퀀스 번호(sequence number)
  - 8비트 크기의 시퀀스 번호 (_IOC_NRBITS)

- 방향(direction)
  - 명령의 데이터의 전송 방향을 표시
  - _IOC_NONE(데이터 전송이 없음), _IOC_READ, _IOC_WRITE, _IOC_READ | _IOC_WRITE (양방향 전송) 등의 값을 가짐

응용프로그램과의 관계



< ioctl의 동작 개념도>

IOCTL 설계 시 일반적인 형식 (1)

```
1 #ifndef _SK_H_
 2 #define _SK_H_
 3
 4 #define SK_MAGIC    'k'
 5 #define SK_MAXNR    6
 6
 7 typedef struct {
 8     unsigned long size;
 9     unsigned char buff[128];
10 } __attribute__((packed)) sk_info;
11
12 #define SK_LED_OFF      _IO(SK_MAGIC, 0)
13 #define SK_LED_ON       _IO(SK_MAGIC, 1)
14 #define SK_GETSTATE     _IO(SK_MAGIC, 3)
15
16 #define SK_READ         _IOR(SK_MAGIC, 3, sk_info)
17 #define SK_WRITE        _IOW(SK_MAGIC, 4, sk_info)
18 #define SK_RW           _IOWR(SK_MAGIC, 5, sk_info)
19
20 #endif /* _SK_H_ */
```

<디바이스 드라이버 헤더 설계 시 예 **sk.h >**

IOCTL 설계 시 일반적인 형식 (2)

```
 65 int sk_ioctl(struct inode *inode, struct file *filp, unsigned int cmd, unsigned long arg)
 66 {
 67     sk_info     ctrl_info;
...
 71     /* Check on cmd */
 72     if(_IOC_TYPE(cmd) != SK_MAGIC) return -EINVAL;
 73     if(_IOC_NR(cmd) != SK_MAXNR) return -EINVAL;
 74     size = _IOC_SIZE(cmd);
 75     if (size) {
 76         err = 0;
 77         if(_IOC_DIR(cmd) & _IOC_READ)
 78             err = verify_area(VERIFY_WRITE, (void *)arg, size);
 79         else if(_IOC_DIR(cmd) & _IOC_WRITE)
 80             err = verify_area(VERIFY_READ, (void *)arg, size);
 81         if(err) return err;
 82     }
...
 85     switch(cmd) {
 86         case SK_LED_OFF: {
 87             …
 88         }
```

<디바이스 드라이버 구현 설계 시 예 sk.c >

실습7: IOCTL 함수 추가 – SK.C

```
…
long sk_ioctl(struct file *filp, unsigned int cmd, unsigned long arg);
…

long sk_ioctl(struct file *filp, unsigned int cmd, unsigned long arg)
{
    switch(cmd) {
        case SPEED_UP: {
            printk("\n"); printk("UP\n"); break;
        }
        case SPEED_DOWN: {
            printk("\n"); printk("DOWN\n"); break;
        }
        default:
            return 0;

    }
    return 0;
}

struct file_operations sk_fops = {
    .open       = sk_open,
    .release    = sk_release,
    .read       = sk_read,
    .write      = sk_write,
    .unlocked_ioctl     = sk_ioctl,
};
```

실습7: IOCTL 함수 추가 – SK_IOCTL.H

```
#ifndef SK_IOCTL_H
#define SK_IOCTL_H

#define IOCTL_MAGIC        'A'
#define SPEED_UP     _IO( IOCTL_MAGIC, 1 )
#define SPEED_DOWN     _IO( IOCTL_MAGIC, 2 )
#endif
```

실습7: IOCTL 함수 추가 – SK_APP.C

```
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>
#include <fcntl.h>
#include <termio.h>
#include  "sk_ioctl.h"

int main(void)
{
    int retn;
    int fd;

    int flag = 0;

    fd = open("/dev/SK", O_RDWR);
    printf("fd = %d\n", fd);

    if (fd<0) {
        perror("/dev/SK error");
        exit(-1);
    }
    else
        printf("SK has been detected...\n");

    // getchar();
```

```
    int choice;
    printf("1. UP   2. DOWN ");
    scanf("%d", &choice);
    if(choice==1) {
        ioctl(fd, SPEED_UP, 0);
    } else {
        ioctl(fd, SPEED_DOWN, 0);
    }
    close(fd);

    return 0;
}
```

INTERRUPT 핸들러 등록

- request_irq( )

  gpio function in kernel

  커널 소스/Documentation/driver-api/gpio/legacy.rst
  gpio_to_irq() : GPIO_PIN에 IRQ mapping

SIGNAL TO USER PROCESS

- 커널에서 user 공간의 프로세스로 signal 전송

send_sig(SIGUSR1, my_task, 0);
send_sig(SIGUSR2, my_task, 0);
관련 링크

인터럽트 핸들러에 구현하면 user 프로세스에게 바로 인터럽트 이벤트를 신호로 알려줄 수 있음!!

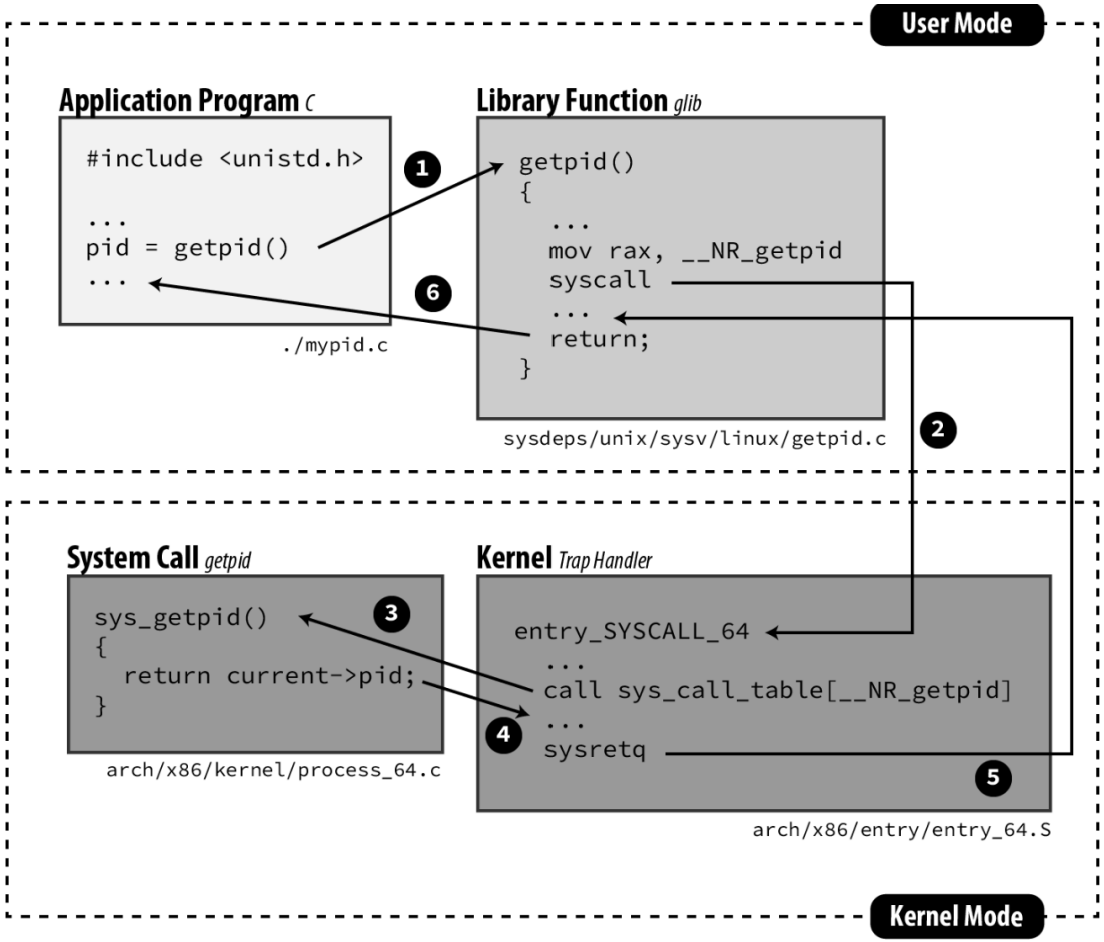
my_task 부분에는 signal을 전달할 task struct를 넣어주면되는데, pid를 알고 있다면

```
struct task_struct *my_task;
my_task = pid_task(find_vpid(process_pid), PIDTYPE_PID);
```

by ioctl() 로 process_pid 인자로 전달

https://qna.programmers.co.kr/questions/1786/%EB%A6%AC%EB%88%85%EC%8A%A4-%EC%BB%A4%EB%84%90-%EC%A7%88%EB%AC%B8%EC%9E%85%EB%8B%88%EB%8B%A4

시스템 콜


User Mode
Application Program C
#include <unistd.h>
...
pid = getpid()
...
./mypid.c
Library Function glib
getpid()
{
...
mov rax, __NR_getpid
syscall
...
return;
}
sysdeps/unix/sysv/linux/getpid.c
1
2
3
4
5
6
System Call getpid
sys_getpid()
{
return current->pid;
}
arch/x86/kernel/process_64.c
Kernel Trap Handler
entry_SYSCALL_64
...
call sys_call_table[__NR_getpid]
...
sysretq
arch/x86/entry/entry_64.S
Kernel Mode

시스템 콜

- 리눅스 시스템 콜

  https://www.chromium.org/chromium-os/developer-library/reference/linux-constants/syscalls/

- ARM64 아키텍처의 리눅스 시스템콜

  https://www.linuxbnb.net/home/adding-a-system-call-to-linux-arm-architecture/

  https://eastrivervillage.com/Anatomy-of-Linux-system-call-in-ARM64/

ARM64 리눅스 시스템 콜 추가

- include/uapi/asm-generic/unistd.h

```
// add new system call
#define __NR_#######   451
__SYSCALL(__NR_ ####### ,  sys_ #######)    // 시스템콜 번호 정의

// add a 'plus one' at total number...
#define __NR_syscalls 452
```

- include/linux/syscalls.h

```
asmlinkage long sys_ ####### (.....);    // 시스템 콜 함수 선언
                                          // 매개변수 없는 경우 반드시 void 선언
```

- arch/arm64/kernel/sys.c (또는 별도의 소스 파일을 이용하여 구현)

```
SYSCALL_DEFINE#(#######)                  // 시스템 콜 구현
{
    .  .  .  .
   return 0;
}
```

시스템 콜 실습

- **GPIO 제어 시스템 콜**: 라즈베리파이의 GPIO 핀을 제어하는 시스템 콜(출력)

- 시스템 콜 호출 방법(on 응용 프로그램)

```
long res = syscall(SYS_GPIO_CONTROL, pin, value);
```

MINI PROJECT

다음과 같이 센서들을 제어하는 프로그램을 작성해 봅시다.

- 조도 센서에 빛이 감지 되면, LED 켜기/알람 연주 – 디바이스 드라이버 이용
- 스위치를 누르면 LED 끄고, 알람도 끄기 – 디바이스 드라이버 이용
- LED ON/OFF(웹 기반) – 시스템 콜 기반