주간 업무 사항 정리

작성자	제품팀 이민성 인턴
업무 일시	2024.02.26 – 2024.02.29

세부 사항

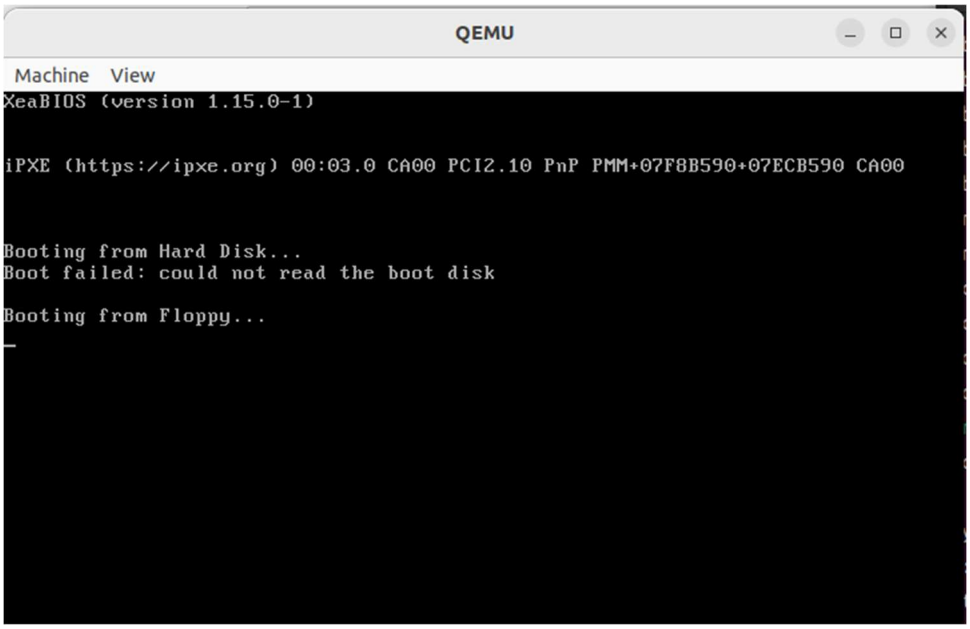
1. 업무 내역 요약 정리

Plan	To-do
1. 부트로더 개발 2. VGA 드라이버 개발 3. 키보드 드라이버 개발 4. 쉘 개발 5. 동적 메모리 관리 개발 6. 최종 결과물	1. 오류 수정 2. 쉘 개발 3. 동적 메모리 관리 개발 4. 최종 결과물

2. 내용 세부 (업무 세부 내역 정리 및 기타 사항 정리)

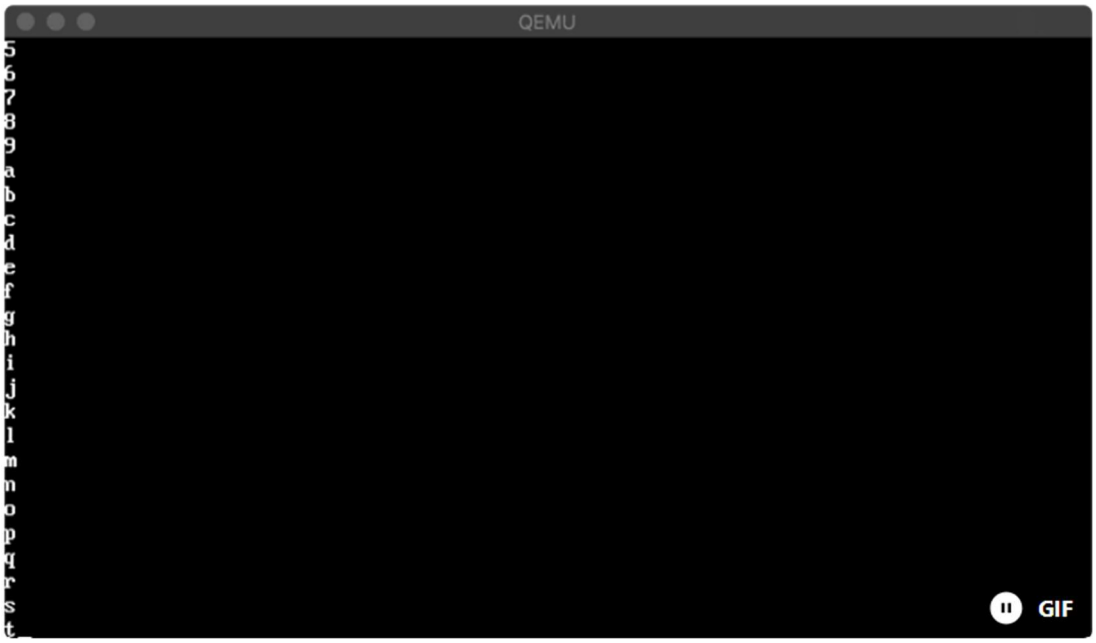
1. 오류 수정

부트로더 개발



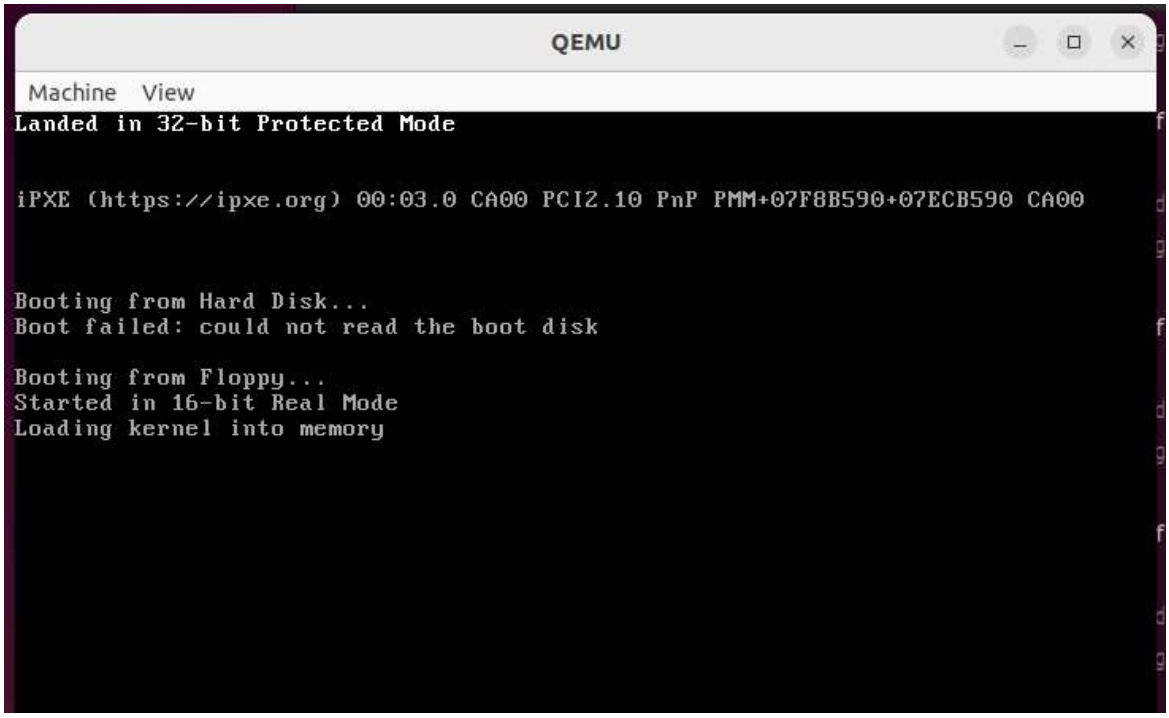
결과는 올바르게 출력되었지만 Boot failed가 발생합니다.

VGA 드라이버



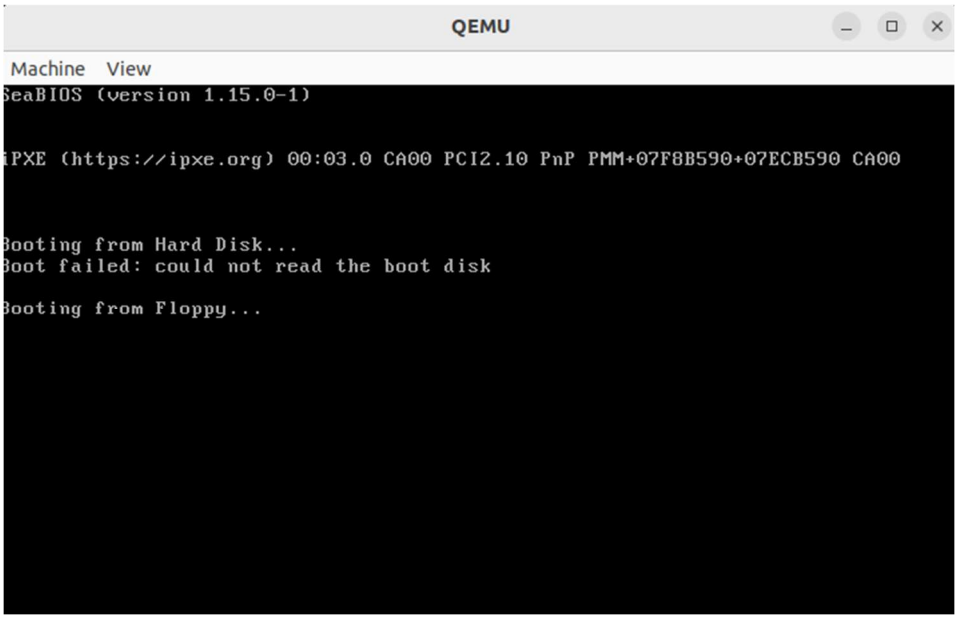
int_to_string 함수로 인해서 위와 같이 출력 되어야 하는데 아래와 같이 출력 결과도 다르게 나오고 Boot failed가 발생합니다.

```
void memory_copy(char *source, char *dest, int nbytes) {
    int i;
    for (i = 0; i < nbytes; i++) {
        *(dest + i) = *(source + i);
    }
}

// https://stackoverflow.com/questions/9994742/want-to-convert-integer-to-string-without-itoa-function
char *int_to_string(int v, char *buff, int radix_base) {
    static char table[] = "0123456789abcdefghijklmnopqrstuvwxyz";
    char *p = buff;
    unsigned int n = (v < 0 && radix_base == 10) ? -v : (unsigned int) v;
    while (n >= radix_base) {
        *p++ = table[n % radix_base];
        n /= radix_base;
    }
    *p++ = table[n];
    if (v < 0 && radix_base == 10) *p++ = '-';
    *p = '\0';
    return buff;
}
```



키보드 드라이버

위와 같이 키보드 입력을 인식한 뒤 출력 되어야하는데 아래와 같이 결과가 올바르지 않게 나오고 Boot failed가 발생합니다.



아무리 원인을 찾아보고 오류를 고치려고 노력하여도 고쳐지지가 않아서 해결을 할 수가 없습니다.
그래서 실행은 포기하고 주요한 개념만 공부하겠습니다.

2. 쉘 개발

개요

운영체제는 컴퓨터 하드웨어와 상호 작용할 수 있는 높은 수준의 기능을 제공합니다. 이 기능은 커널 주변의 레이어를 통해 간단한 명령을 노출하는 등 어떤 방식으로든 사용자가 사용할 수 있도록 해야 합니다. 이 외부 레이어를 일반적으로 "셸"이라고 합니다.

여기서는 아주 간단한 텍스트 기반 VGA 드라이버만 있으므로 명령줄 셸을 작성하겠습니다.

먼저 사용자 입력을 저장하는 키 버퍼를 구현하고 화면에 인쇄하는 것 외에도 버퍼를 채우도록 키보드 콜백을 수정하겠습니다. 다음으로, 오타를 수정할 수 있도록 백스페이스 기능을 추가할 것입니다. 세 번째로, 엔터 키를 눌렀을 때 매우 간단한 명령 파싱을 구현하겠습니다. 마지막으로 모든 초기화 작업이 완료된 후 프롬프트를 표시하도록 커널 항목을 수정합니다.

키 버퍼

셸은 잠재적으로 하위 명령과 인수가 있는 복잡한 명령을 지원해야 합니다. 즉, 단일 키 명령만으로는 큰 도움이 되지 않고 사용자가 여러 문자로 구성된 명령을 입력하는 것이 좋습니다. 하지만 명령을 입력할 때 이를 저장할 공간이 필요합니다. 이때 키 버퍼가 필요합니다.

키 버퍼를 문자 배열로 구현할 수 있습니다. 0 바이트로 초기화되고 키 누름은 인덱스 0 부터 위쪽으로 기록됩니다. 이 데이터 구조를 조금 더 자세히 살펴보면 문자열을 인코딩하는 방식과 같다는 것을 알 수 있습니다. 0 바이트로 끝나는 일련의 문자들입니다.

키 버퍼를 효율적으로 사용하려면 두 개의 문자열 유틸리티 함수가 더 필요합니다: 문자열의 길이를 계산하는 함수와 주어진 문자열에 문자를 추가하는 함수입니다. 후자의 함수는 전자를 사용하려고 합니다.

```
int string_length(char s[]) {
    int i = 0;
    while (s[i] != '\0') {
        ++i;
    }
    return i;
}

void append(char s[], char n) {
    int len = string_length(s);
    s[len] = n;
    s[len + 1] = '\0';
}
```

다음으로, 작주에 작성한 키보드 콜백 함수를 몇 가지 조정할 수 있습니다. 먼저, 방대한 스위치 문을 없애고 스캔 코드에 기반한 배열 조회로 대체하겠습니다. 둘째, 모든 키 업 및 영숫자가 아닌 스캔 코드를 무시합니다. 마지막으로 각 키를 키 버퍼에 기록하여 화면에 출력합니다.

```
#define SC_MAX 57

static char key_buffer[256];

const char scancode_to_char[] = {
  '?', '?', '1', '2', '3', '4', '5',
  '6', '7', '8', '9', '0', '-', '=',
  '?', '?', 'Q', 'W', 'E', 'R', 'T',
  'Y', 'U', 'I', 'O', 'P', '[', ']',
  '?', '?', 'A', 'S', 'D', 'F', 'G',
  'H', 'J', 'K', 'L', ';', '\', '`',
  '?', '\\', 'Z', 'X', 'C', 'V', 'B',
  'N', 'M', ',', '.', '/', '?', '?',
  '?', ' '
};

static void keyboard_callback(registers_t *regs) {
    uint8_t scancode = port_byte_in(0x60);

    if (scancode > SC_MAX) return;

    char letter = scancode_to_char[(int) scancode];
    append(key_buffer, letter);
    char str[2] = {letter, '\0'};
    print_string(str);
}
```

이 방법은 작동하지만 두 가지 문제가 있습니다. 첫째, 추가하기 전에 키 버퍼의 경계를 확인하지 않아 버퍼 오버플로우의 위험이 있습니다. 둘째, 명령을 입력할 때 실수할 여지를 남기지 않습니다.

백스페이스

사용자는 백스페이스를 눌러 오타를 수정할 수 있어야 하며, 버퍼와 화면에서 마지막 문자를 효과적으로 삭제할 수 있어야 합니다.

버퍼 수정을 구현하는 방법은 추가 기능을 역으로 사용하면 됩니다. 버퍼의 마지막 0 이 아닌 바이트를 0 으로 설정하기만 하면 됩니다. 이 방법은 버퍼에서 요소를 성공적으로 제거하면 참을 반환하고 그렇지 않으면 거짓을 반환합니다. 참고: #include <stdbool.h>를 사용하여 bool에 대한 타입 정의를 가져와야 합니다.

```
bool backspace(char buffer[]) {
    int len = string_length(buffer);
    if (len > 0) {
        buffer[len - 1] = '\0';
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}
```

화면에 백스페이스 문자를 인쇄하는 것은 현재 커서 위치 바로 앞의 위치에 빈 문자를 인쇄하고 커서를 뒤로

이동하는 방식으로 구현할 수 있습니다. 여기서는 VGA 드라이버의 get_cursor, set_cursor, set_char_at_video_memory 함수를 활용하겠습니다.

```
void print_backspace() {
    int newCursor = get_cursor() - 2;
    set_char_at_video_memory(' ', newCursor);
    set_cursor(newCursor);
}
```

백스페이스 기능을 완성하기 위해 백스페이스 키 누름 전용 브랜치를 추가하여 키보드 콜백 기능을 수정합니다. 백스페이스가 눌리면 먼저 키 버퍼에서 마지막 문자를 삭제하려고 시도합니다. 이 작업이 성공하면 화면에 백스페이스도 표시됩니다. 그렇지 않으면 사용자가 프롬프트에 의해 중단되지 않고 화면 끝까지 백스페이스를 누를 수 있기 때문에 이 검사를 수행하는 것이 중요합니다.

```
#define BACKSPACE 0x0E

static void keyboard_callback(registers_t *regs) {
    uint8_t scancode = port_byte_in(0x60);
    if (scancode > SC_MAX) return;

    if (scancode == BACKSPACE) {
        if (backspace(key_buffer)) {
            print_backspace();
        }
    } else {
        char letter = scancode_to_char[(int) scancode];
        append(key_buffer, letter);
        char str[2] = {letter, '\0'};
        print_string(str);
    }
}
```

키 버퍼와 백스페이스 기능이 준비되었으므로 이제 마지막 단계인 명령 구문 분석 및 실행으로 넘어갈 수 있습니다.

명령 구문 분석 및 실행

사용자가 엔터 키를 누를 때마다 주어진 명령을 실행하고자 합니다. 이를 위해서는 일반적으로 먼저 명령을 구문 분석하여 여러 개의 하위 명령으로 분할하거나 인수를 구문 분석하거나 외부 기능을 호출하는 작업이 포함됩니다. 여기서는 간단하게 하기 위해 문자열이 알려진 명령어인지 확인하고 그렇지 않은 경우 오류를 표시하는 아주 기본적인 '구문 분석'만 구현하겠습니다.

먼저 두 문자열을 비교하는 함수를 작성해야 합니다. 이 함수는 두 문자열을 단계별로 살펴보면서 문자 값을 비교합니다. 다음은 코드입니다.

```
int compare_string(char s1[], char s2[]) {
    int i;
    for (i = 0; s1[i] == s2[i]; i++) {
        if (s1[i] == '\0') return 0;
    }
    return s1[i] - s2[i];
}
```

다음으로, 주어진 명령을 실행하는 함수 execute_command를 구현해야 합니다. 첫 번째 버전의 셸은 CPU를 중지하는 EXIT라는 명령어 하나만 인식합니다. 나중에 재부팅이나 파일 시스템과의 상호 작용과 같은 다른 명령을 구현할 수 있습니다. 명령을 알 수 없는 경우 오류 메시지를 출력합니다. 마지막으로 새 프롬프트를 인쇄합니다.

```
void execute_command(char *input) {
    if (compare_string(input, "EXIT") == 0) {
        print_string("Stopping the CPU. Bye!\n");
        asm volatile("hlt");
    }
    print_string("Unknown command: ");
    print_string(input);
    print_string("\n> ");
}
```

마지막으로 키보드 콜백을 조정하여 커서를 다음 줄로 이동하고 실행_명령을 호출한 다음 엔터 키를 누르면 키 버퍼를 재설정합니다.

```
#define ENTER 0x1C

static void keyboard_callback(registers_t *regs) {
    uint8_t scancode = port_byte_in(0x60);
    if (scancode > SC_MAX) return;

    if (scancode == BACKSPACE) {
        if (backspace(key_buffer) == true) {
            print_backspace();
        }
    } else if (scancode == ENTER) {
        print_nl();
        execute_command(key_buffer);
        key_buffer[0] = '\0';
    } else {
        char letter = scancode_to_char[(int) scancode];
        append(key_buffer, letter);
        char str[2] = {letter, '\0'};
        print_string(str);
    }
}
```

거의 다 끝났습니다. 이제 메인 커널 기능을 업데이트해 보겠습니다.

업데이트 된 커널 기능

사실, 할 일이 많지 않습니다. 모든 초기화 작업이 완료된 후 화면을 지우고 초기 프롬프트를 표시하면 끝입니다. 나머지는 업데이트된 키보드 핸들러가 알아서 처리합니다. 여기 코드와 데모가 있습니다!

```
void start_kernel() {
    clear_screen();
    print_string("Installing interrupt service routines (ISRs).\n");
    isr_install();

    print_string("Enabling external interrupts.\n");
    asm volatile("sti");

    print_string("Initializing keyboard (IRQ 1).\n");
    init_keyboard();

    clear_screen();
    print_string("> ");
}
```

3. 동적 메모리 관리 개발

개요

지금까지는 문자열을 저장하는 등 메모리가 필요할 때마다 다음과 같이 메모리를 할당했습니다: char my_string[10]. 이 문장은 문자를 저장하는 데 사용할 수 있는 10 개의 연속 바이트를 메모리에 할당하도록 C 컴파일러에 지시합니다.

하지만 컴파일 시점에 배열의 크기를 모른다면 어떻게 될까요? 사용자가 문자열의 길이를 지정하고 싶다고 가정해 봅시다. 물론 256 바이트와 같이 고정된 양의 메모리를 할당할 수 있습니다. 하지만 이 경우 너무 많은 양이 할당되어 메모리가 낭비될 가능성이 높습니다. 또 다른 결과는 정적으로 할당된 메모리가 충분하지 않아 프로그램이 충돌하는 것입니다.

동적 메모리 관리로 이 문제를 해결할 수 있습니다. OS는 런타임에 결정되는 유연한 메모리 양을 할당할 수 있는 방법을 제공해야 합니다. 메모리 부족의 위험을 줄이려면 더 이상 사용하지 않는 메모리를 다시 사용할 수 있도록 하는 기능도 필요합니다. 저는 동적 메모리 관리를 위한 간단한 알고리즘을 설계하고 구현하고자 합니다.

이 글의 나머지 부분은 다음과 같은 구조로 구성되어 있습니다. 먼저 동적 메모리를 관리하는 데 사용할 데이터 구조와 할당 및 할당 해제 알고리즘을 설계합니다. 그런 다음 이전 섹션의 이론을 기반으로 커널에 대한 동적 메모리 관리를 구현합니다.

디자인

- 데이터 구조

동적 메모리 관리를 구현하기 위해 프로그램의 일부에 개별 청크를 빌릴 수 있는 큰 메모리 영역을 정적으로 할당할 것입니다. 빌린 메모리가 더 이상 필요하지 않으면 풀로 반환할 수 있습니다.

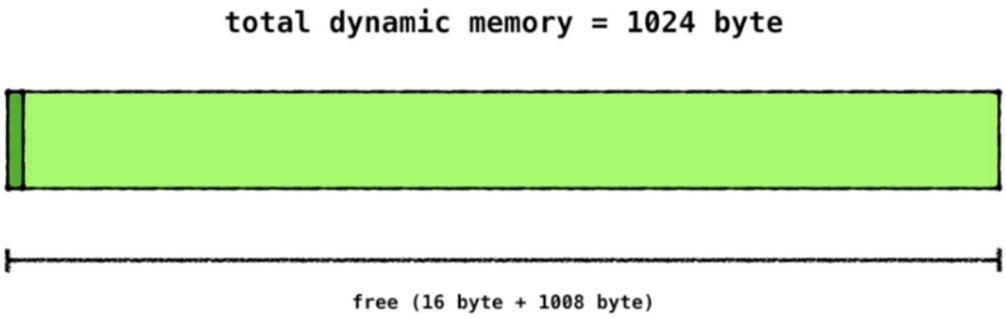
문제는 빌린 청크, 즉 동적으로 할당된 청크를 어떻게 추적할 수 있을까요? 최소한 요청된 크기의 사용 가능한

메모리를 찾을 수 있는 데이터 구조가 필요합니다. 또한 작은 메모리 조각이 많이 남는 것을 피하기 위해 가능한 한 가장 작은 사용 가능한 영역을 선택하려고 합니다.

간단한 구현을 위해 이중으로 연결된 리스트를 사용하겠습니다. 각 요소는 해당 청크에 대한 정보, 특히 주소와 크기, 현재 할당 여부, 이전 및 다음 요소에 대한 포인터를 보유합니다. 전체 목록을 O(n)으로 반복하면 최적의, 즉 가능한 가장 작은 영역을 찾을 수 있습니다. 여기서 n은 목록의 요소 수입니다. 물론 힙과 같은 더 효율적인 대안도 있지만 구현하기가 더 복잡하므로 여기서는 리스트를 사용하겠습니다.

이제 리스트 어디에 저장할까요? 얼마나 많은 청크가 요청될지, 따라서 목록에 얼마나 많은 요소가 포함될지 알 수 없으므로 메모리를 정적으로 할당할 수 없습니다. 하지만 지금은 동적 메모리 할당을 구축 중이기 때문에 동적으로 할당할 수도 없습니다.

동적 할당을 위해 예약한 큰 메모리 영역에 목록 요소를 포함하면 이 문제를 극복할 수 있습니다. 요청되는 각 청크에 대해 해당 청크 바로 앞에 해당 목록 요소를 저장합니다. 다음 그림은 1024 바이트 동적 메모리 영역의 초기 상태를 보여줍니다. 여기에는 16 바이트 목록 요소(처음에 있는 작은 짙은 녹색 부분)가 하나 포함되어 있으며 나머지 1008 바이트가 여유 공간임을 나타냅니다.

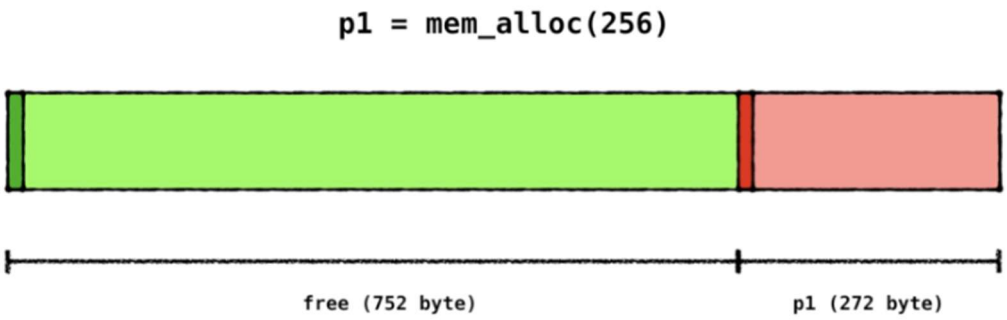


이제 할당 알고리즘에 대해 살펴보겠습니다.

- 할당 알고리즘
크기 sm의 새 메모리 m이 요청되면 사용 가능한 모든 메모리를 살펴보고 최적의 청크를 찾습니다. 메모리 청크 L의 목록이 주어지면, 자유롭고(free(o)), 충분히 크며(따라서 ≥ sm), 더 작은 항목이 없는(∀x ∈ L: free(x) → 따라서 ≤ sx) 최적의 항목 o를 찾으려고 시도합니다.

최적의 세그먼트 o가 주어지면 요청된 메모리 양을 잘라내어 새 목록 항목을 포함하는 새 세그먼트 p를 생성하여 효과적으로 o를 so - sm - sl 크기(여기서 sl은 목록 요소의 크기)로 축소합니다. 새 세그먼트의 크기는 sp = sm + sl이 됩니다. 그런 다음 리스트 요소 바로 뒤에 할당된 메모리의 시작 부분에 대한 포인터를 반환합니다. 최적의 청크가 존재하지 않으면 할당에 실패한 것입니다.

다음 그림은 알고리즘이 256 바이트의 메모리를 성공적으로 할당한 후 세그먼트 목록의 상태를 보여줍니다. 여기에는 두 가지 요소가 포함되어 있습니다. 첫 번째 요소는 752 바이트의 동적 메모리를 차지하는 여유 청크를 나타냅니다. 두 번째 요소는 p1 에 할당된 메모리를 나타내며 나머지 272 바이트를 차지합니다.

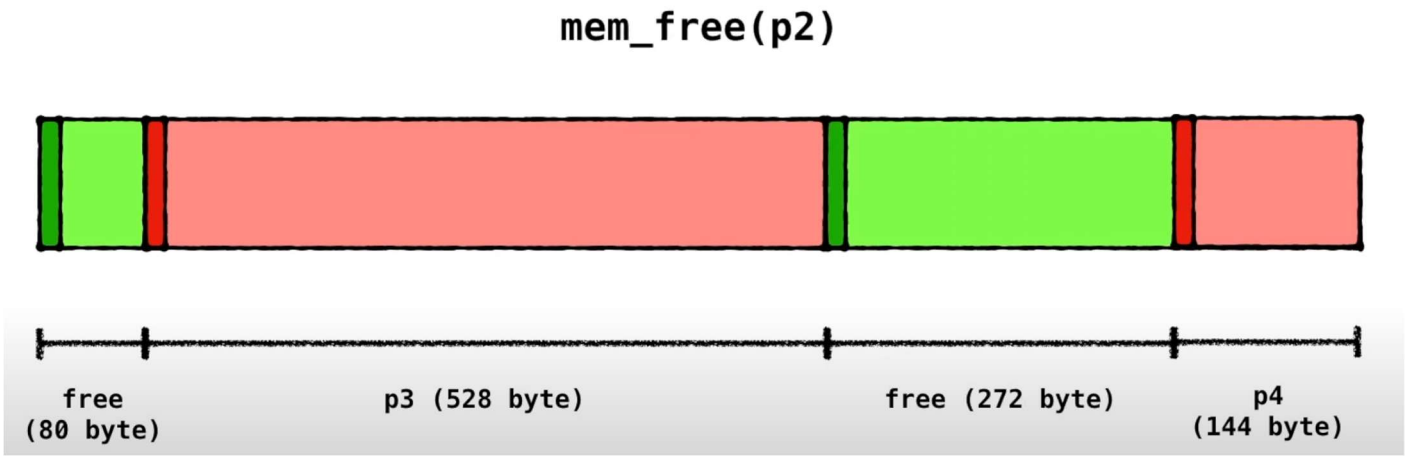


다음으로 할당된 메모리를 해제하는 알고리즘을 정의하겠습니다.

- 할당 해제 알고리즘
할당 해제 알고리즘의 기본 버전은 매우 간단합니다. 할당된 영역에 대한 포인터가 주어지면 바로 앞에 있는 메모리 영역을 보고 해당 목록 항목을 얻습니다. 그런 다음 해당 청크를 사용 가능으로 표시하여 다음에 새 메모리가 요청될 때 고려할 수 있도록 합니다.

이 버전의 알고리즘은 작동하는 것처럼 보이지만 큰 문제가 있습니다. 목록 항목이 점점 더 많이 생성된다는 점입니다. 이렇게 하면 동적 메모리가 파편화되어 더 많은 메모리를 할당하기가 점점 더 어려워집니다.

이 문제를 해결하기 위해 할당 해제된 청크를 인접한 모든 여유 청크와 병합합니다. 이때 포인터를 따라가면 이전 청크와 다음 청크를 쉽게 확인할 수 있으므로 이중으로 연결된 목록이 유용하게 사용됩니다.



이론을 익혔으니 이제 OS에서 사용할 수 있도록 C로 기능을 구현해 보겠습니다.

구현
- 이중 링크드 리스트
동적 메모리 청크를 크기(구조체 크기 제외)와 사용 여부(즉, 비어 있지 않은지)를 포함하는 구조체로 모델링합니다. 이중 링크된 리스트로 만들기 위해 이전 포인터와 다음 포인터를 추가합니다. 다음은 코드입니다.

```
typedef struct dynamic_mem_node {
    uint32_t size;
    bool used;
    struct dynamic_mem_node *next;
    struct dynamic_mem_node *prev;
} dynamic_mem_node_t;
```

다음으로 동적 메모리를 초기화할 수 있습니다.

- 초기화

동적 메모리를 할당하기 전에 먼저 초기화해야 합니다. 디자인 섹션에서 설명한 대로 사용 가능한 메모리 전체를 포함하는 단일 청크로 시작하겠습니다. 다음 코드는 4KB의 동적 메모리를 초기화합니다.

```
#define NULL_POINTER ((void*)0)
#define DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE 4*1024
#define DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE sizeof(dynamic_mem_node_t) // 16

static uint8_t dynamic_mem_area[DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE];
static dynamic_mem_node_t *dynamic_mem_start;

void init_dynamic_mem() {
    dynamic_mem_start = (dynamic_mem_node_t *) dynamic_mem_area;
    dynamic_mem_start->size = DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE - DYNAMIC_MEM_NODE_
    dynamic_mem_start->next = NULL_POINTER;
    dynamic_mem_start->prev = NULL_POINTER;
}
```

메모리 할당 함수의 구현으로 넘어가 보겠습니다.

- 할당

할당 알고리즘 정의를 복기해 봅시다: 먼저 최적의 메모리 블록을 찾습니다. 코드 가독성을 유지하기 위해 알고리즘의 해당 부분에 대해 주어진 목록을 살펴보고 가장 작은 여유 노드를 반환하는 별도의 함수 find_best_mem_block을 생성합니다.

```
void *find_best_mem_block(dynamic_mem_node_t *dynamic_mem, size_t size) {
    // initialize the result pointer with NULL and an invalid block size
    dynamic_mem_node_t *best_mem_block = (dynamic_mem_node_t *) NULL_POINTER;
    uint32_t best_mem_block_size = DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE + 1;

    // start looking for the best (smallest unused) block at the beginning
    dynamic_mem_node_t *current_mem_block = dynamic_mem;
    while (current_mem_block) {
        // check if block can be used and is smaller than current best
        if ((!current_mem_block->used) &&
            (current_mem_block->size >= (size + DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE)) &&
            (current_mem_block->size <= best_mem_block_size)) {
            // update best block
            best_mem_block = current_mem_block;
            best_mem_block_size = current_mem_block->size;
        }

        // move to next block
        current_mem_block = current_mem_block->next;
    }
    return best_mem_block;
}
```

그런 다음 이 함수를 사용하여 요청된 메모리 크기를 취하고 동적으로 할당된 메모리에 대한 포인터를 반환하는 mem_alloc 함수를 구현할 수 있습니다. 사용 가능한 청크가 충분히 크지 않은 경우 null 포인터를 반환합니다. 코드를 살펴본 다음 단계별로 살펴보겠습니다.

```
void *mem_alloc(size_t size) {
    dynamic_mem_node_t *best_mem_block =
            (dynamic_mem_node_t *) find_best_mem_block(dynamic_mem_start, size);

    // check if we actually found a matching (free, large enough) block
    if (best_mem_block != NULL_POINTER) {
        // subtract newly allocated memory (incl. size of the mem node) from selected block
        best_mem_block->size = best_mem_block->size - size - DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE;

        // create new mem node after selected node, effectively splitting the memory region
        dynamic_mem_node_t *mem_node_allocate = (dynamic_mem_node_t *) (((uint8_t *) best_mem_block) +
                                                                        DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE +
                                                                        best_mem_block->size);

        mem_node_allocate->size = size;
        mem_node_allocate->used = true;
        mem_node_allocate->next = best_mem_block->next;
        mem_node_allocate->prev = best_mem_block;

        // reconnect the doubly linked list
        if (best_mem_block->next != NULL_POINTER) {
            best_mem_block->next->prev = mem_node_allocate;
        }
        best_mem_block->next = mem_node_allocate;

        // return pointer to newly allocated memory (right after the new list node)
        return (void *) ((uint8_t *) mem_node_allocate + DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE);
    }

    return NULL_POINTER;
}
```

먼저 find_best_mem_block 함수를 호출하여 가장 작은 여유 블록을 찾습니다. 사용할 수 있는 블록이 있으면 크기를 줄여 분할하고, 새 청크의 시작 부분에 요청된 크기의 새 노드를 생성하여 리스트에 삽입합니다. 마지막으로 새로 생성된 리스트 노드 바로 뒤에 메모리 주소에 대한 포인터를 반환합니다.

그런 다음 mem_alloc을 사용해 n개의 정수 배열을 동적으로 할당하고 그 안에 1...n을 저장할 수 있습니다. C 컴파일러 덕분에 메모리 오프셋을 계산하는 대신 배열 구문을 사용해 메모리에 액세스할 수 있다는 점에 유의하세요. 그러면 올바른 오프셋으로 역참조됩니다.

```
int *ptr = (int *) mem_alloc(n * sizeof(int));
for (int i = 0; i < n; ++i) {
    ptr[i] = i+1; // shorthand for *(ptr + i)
}
```

이제 mem_free 구현을 살펴보겠습니다.

할당 해제

mem_free 함수는 동적으로 할당된 메모리 영역에 대한 포인터를 받습니다. 그런 다음 포인터 메모리 주소를 노드 구조체 크기만큼 감소시켜 각 리스트 노드를 로드하고 이를 해제된 것으로 표시합니다. 마지막으로 할당 해제된 메모리 노드를 다음 및 이전 목록 요소와 병합하려고 시도합니다.

```
void mem_free(void *p) {
    // move along, nothing to free here
    if (p == NULL_POINTER) {
        return;
    }

    // get mem node associated with pointer
    dynamic_mem_node_t *current_mem_node = (dynamic_mem_node_t *) ((uint8_t *) p - DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE);

    // pointer we're trying to free was not dynamically allocated it seems
    if (current_mem_node == NULL_POINTER) {
        return;
    }

    // mark block as unused
    current_mem_node->used = false;

    // merge unused blocks
    current_mem_node = merge_next_node_into_current(current_mem_node);
    merge_current_node_into_previous(current_mem_node);
}
```

가독성을 높이기 위해 병합을 별도의 기능으로 옮깁니다.

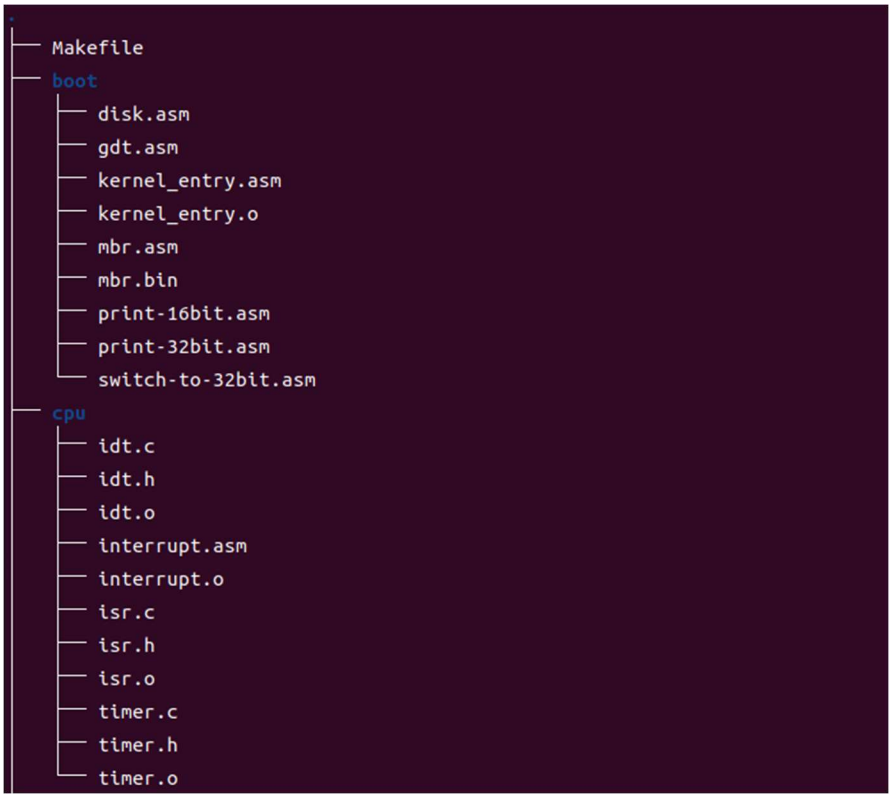
```
void *merge_next_node_into_current(dynamic_mem_node_t *current_mem_node) {
    dynamic_mem_node_t *next_mem_node = current_mem_node->next;
    if (next_mem_node != NULL_POINTER && !next_mem_node->used) {
        // add size of next block to current block
        current_mem_node->size += current_mem_node->next->size;
        current_mem_node->size += DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE;

        // remove next block from list
        current_mem_node->next = current_mem_node->next->next;
        if (current_mem_node->next != NULL_POINTER) {
            current_mem_node->next->prev = current_mem_node;
        }
    }
    return current_mem_node;
}

void *merge_current_node_into_previous(dynamic_mem_node_t *current_mem_node) {
    dynamic_mem_node_t *prev_mem_node = current_mem_node->prev;
    if (prev_mem_node != NULL_POINTER && !prev_mem_node->used) {
        // add size of previous block to current block
        prev_mem_node->size += current_mem_node->size;
        prev_mem_node->size += DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE;

        // remove current node from list
        prev_mem_node->next = current_mem_node->next;
        if (current_mem_node->next != NULL_POINTER) {
            current_mem_node->next->prev = prev_mem_node;
        }
    }
}
```

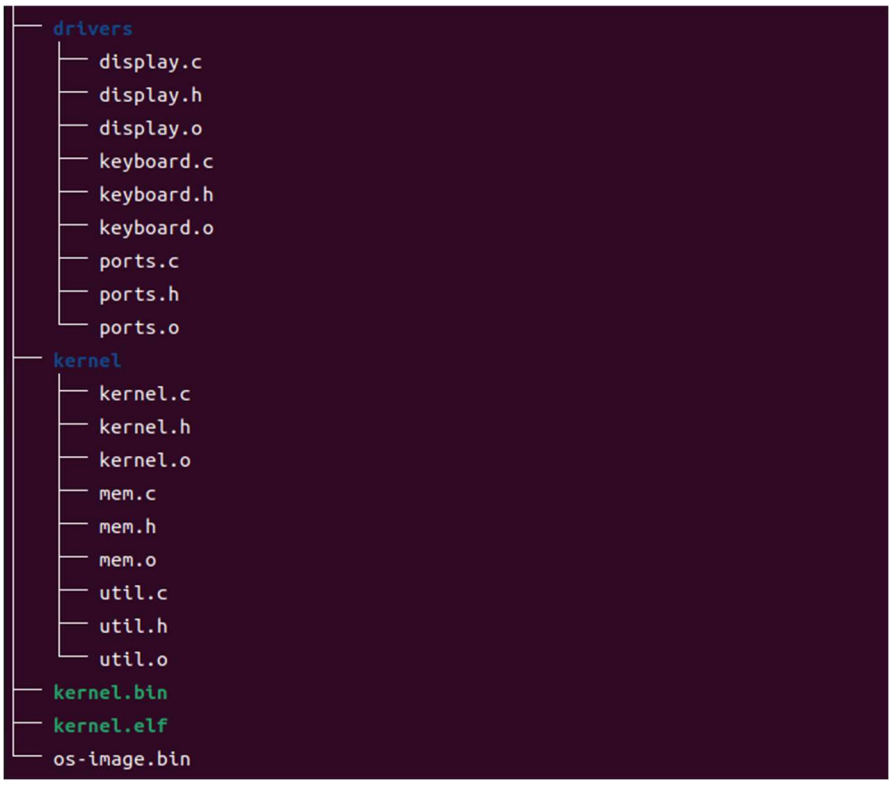
Calling free는 간단합니다.

```
int *ptr = (int *) mem_alloc(n * sizeof(int));
for (int i = 0; i < n; ++i) {
    ptr[i] = i+1; // shorthand for *(ptr + i)
}
mem_free(ptr);
```

4. 최종 결과물

부트로더, VGA 드라이버, 키보드 드라이버, 쉘, 동적 메모리 관리를 합친 간단한 운영체제를 개발하였습니다.
아쉽게도 시간 관계상 부가적인 여러 기능들은 구현하지 못하였지만 어셈블리어도 처음 접해보았고 컴퓨터 구조, 운영체제에 대한 기본적인 개념들을 쌓은 것 같습니다.
어려웠지만 정말 재미있었으며 컴퓨터에 대해 지식을 조금 더 쌓고 시간이 될 때 꼭 처음부터 다시 공부하며 부가적인 기능을 추가해서 개발해보고 싶습니다.





최종 결과물 (OS)를 위해 작성한 코드인
boot의 disk.asm, gdt.asm, kernel_entry.asm, mbr.asm, print-16bit.asm, print-32bit.asm, switch-to-32bit.asm,
cpu의 idt.c idt.h, interrupt.asm, isr.c, isr.h, timer.c, timer.h,
drivers의 display.c, display.h, keyboard.c, keyboard.h, ports.c, ports.h,
kernel의 kernel.c, kernel.h, mem.c, mem.h, util.c, util.h,
Makefile에 대해 살펴보겠습니다.

disk.asm

```
; load 'dh' sectors from drive 'dl' into ES:BX
disk_load:
    pusha
    ; reading from disk requires setting specific values in all registers
    ; so we will overwrite our input parameters from 'dx'. Let's save it
    ; to the stack for later use.
    push dx

    mov ah, 0x02 ; ah <- int 0x13 function. 0x02 = 'read'
    mov al, dh   ; al <- number of sectors to read (0x01 .. 0x80)
    mov cl, 0x02 ; cl <- sector (0x01 .. 0x11)
                 ; 0x01 is our boot sector, 0x02 is the first 'available' sector
    mov ch, 0x00 ; ch <- cylinder (0x0 .. 0x3FF, upper 2 bits in 'cl')
    ; dl <- drive number. Our caller sets it as a parameter and gets it from BIOS
    ; (0 = floppy, 1 = floppy2, 0x80 = hdd, 0x81 = hdd2)
    mov dh, 0x00 ; dh <- head number (0x0 .. 0xF)

    ; [es:bx] <- pointer to buffer where the data will be stored
    ; caller sets it up for us, and it is actually the standard location for int
13h
    int 0x13      ; BIOS interrupt
    jc disk_error ; if error (stored in the carry bit)

    pop dx
    cmp al, dh    ; BIOS also sets 'al' to the # of sectors read. Compare it.
    jne sectors_error
    popa
    ret


disk_error:
    mov bx, DISK_ERROR
    call print16
    call print16_nl
    mov dh, ah ; ah = error code, dl = disk drive that dropped the error
```

```
    call print16_hex ; check out the code at http://stanislavs.org/helppc/int_13-1.html
    jmp disk_loop

sectors_error:
    mov bx, SECTORS_ERROR
    call print16

disk_loop:
    jmp $

DISK_ERROR: db "Disk read error", 0
SECTORS_ERROR: db "Incorrect number of sectors read", 0
```

gdt.asm

```
gdt_start: ; don't remove the labels, they're needed to compute sizes and jumps
    ; the GDT starts with a null 8-byte
    dd 0x0 ; 4 byte
    dd 0x0 ; 4 byte

; GDT for code segment. base = 0x00000000, length = 0xfffff
; for flags, refer to os-dev.pdf document, page 36
gdt_code:
    dw 0xffff    ; segment length, bits 0-15
    dw 0x0       ; segment base, bits 0-15
    db 0x0       ; segment base, bits 16-23
    db 10011010b ; flags (8 bits)
    db 11001111b ; flags (4 bits) + segment length, bits 16-19
    db 0x0       ; segment base, bits 24-31

; GDT for data segment. base and length identical to code segment
; some flags changed, again, refer to os-dev.pdf
gdt_data:
    dw 0xffff
    dw 0x0
    db 0x0
    db 10010010b
    db 11001111b
    db 0x0

gdt_end:
```

```
; GDT descriptor
gdt_descriptor:
    dw gdt_end - gdt_start - 1 ; size (16 bit), always one less of its true size
    dd gdt_start ; address (32 bit)

; define some constants for later use
CODE_SEG equ gdt_code - gdt_start
DATA_SEG equ gdt_data - gdt_start
```

kernel_entry.asm

```
global _start;
[bits 32]

_start:
    [extern start_kernel] ; Define calling point. Must have same name as kernel.c
'main' function
    call start_kernel ; Calls the C function. The linker will know where it is
placed in memory
    jmp $
```

mbr.asm

```
[org 0x7c00]
KERNEL_OFFSET equ 0x1000 ; The same one we used when linking the kernel

mov [BOOT_DRIVE], dl ; Remember that the BIOS sets us the boot drive in 'dl' on
boot
mov bp, 0x9000
mov sp, bp

mov bx, MSG_16BIT_MODE
call print16
call print16_nl

call load_kernel ; read the kernel from disk
call switch_to_32bit ; disable interrupts, load GDT,  etc. Finally jumps to
'BEGIN_PM'
jmp $ ; Never executed

%include "boot/print-16bit.asm"
%include "boot/print-32bit.asm"
```

```
%include "boot/disk.asm"
%include "boot/gdt.asm"
%include "boot/switch-to-32bit.asm"

[bits 16]
load_kernel:
    mov bx, MSG_LOAD_KERNEL
    call print16
    call print16_nl

    mov bx, KERNEL_OFFSET ; Read from disk and store in 0x1000
    mov dh, 31
    mov dl, [BOOT_DRIVE]
    call disk_load
    ret

[bits 32]
BEGIN_32BIT:
    mov ebx, MSG_32BIT_MODE
    call print32
    call KERNEL_OFFSET ; Give control to the kernel
    jmp $ ; Stay here when the kernel returns control to us (if ever)


BOOT_DRIVE db 0 ; It is a good idea to store it in memory because 'dl' may get
overwritten
MSG_16BIT_MODE db "Started in 16-bit Real Mode", 0
MSG_32BIT_MODE db "Landed in 32-bit Protected Mode", 0
MSG_LOAD_KERNEL db "Loading kernel into memory", 0

; padding
times 510 - ($-$$) db 0
dw 0xaa55
```

print-16bit.asm

```
print16:
    pusha

; strings will be terminated by 0 byte in memory
print16_loop:
    mov al, [bx] ; 'bx' is the base address for the string
    cmp al, 0
```

```
    je print16_done

    mov ah, 0x0e ; tty
    int 0x10 ; 'al' already contains the char

    ; increment pointer and do next loop
    add bx, 1
    jmp print16_loop

print16_done:
    popa
    ret

print16_nl:
    pusha

    mov ah, 0x0e
    mov al, 0x0a ; newline char
    int 0x10
    mov al, 0x0d ; carriage return
    int 0x10

    popa
    ret

print16_cls:
    pusha

    mov ah, 0x00
    mov al, 0x03  ; text mode 80x25 16 colours
    int 0x10

    popa
    ret

; receiving the data in 'dx'
; For the examples we'll assume that we're called with dx=0x1234
print16_hex:
    pusha

    mov cx, 0 ; our index variable
```

```
; Strategy: get the last char of 'dx', then convert to ASCII
; Numeric ASCII values: '0' (ASCII 0x30) to '9' (0x39), so just add 0x30 to byte
N.
; For alphabetic characters A-F: 'A' (ASCII 0x41) to 'F' (0x46) we'll add 0x40
; Then, move the ASCII byte to the correct position on the resulting string
print16_hex_loop:
    cmp cx, 4 ; loop 4 times
    je print16_hex_end

    ; 1. convert last char of 'dx' to ascii
    mov ax, dx ; we will use 'ax' as our working register
    and ax, 0x000f ; 0x1234 -> 0x0004 by masking first three to zeros
    add al, 0x30 ; add 0x30 to N to convert it to ASCII "N"
    cmp al, 0x39 ; if > 9, add extra 8 to represent 'A' to 'F'
    jle print16_hex_step2
    add al, 7 ; 'A' is ASCII 65 instead of 58, so 65-58=7

print16_hex_step2:
    ; 2. get the correct position of the string to place our ASCII char
    ; bx <- base address + string length - index of char
    mov bx, PRINT16_HEX_OUT + 5 ; base + length
    sub bx, cx  ; our index variable
    mov [bx], al ; copy the ASCII char on 'al' to the position pointed by 'bx'
    ror dx, 4 ; 0x1234 -> 0x4123 -> 0x3412 -> 0x2341 -> 0x1234

    ; increment index and loop
    add cx, 1
    jmp print16_hex_loop

print16_hex_end:
    ; prepare the parameter and call the function
    ; remember that print receives parameters in 'bx'
    mov bx, PRINT16_HEX_OUT
    call print16

    popa
    ret

PRINT16_HEX_OUT:
    db '0x0000',0 ; reserve memory for our new string
```

print-32bit.asm

```
[bits 32] ; using 32-bit protected mode

; this is how constants are defined
VIDEO_MEMORY equ 0xb8000
WHITE_ON_BLACK equ 0x0f ; the color byte for each character

print32:
    pusha
    mov edx, VIDEO_MEMORY

print32_loop:
    mov al, [ebx] ; [ebx] is the address of our character
    mov ah, WHITE_ON_BLACK

    cmp al, 0 ; check if end of string
    je print32_done

    mov [edx], ax ; store character + attribute in video memory
    add ebx, 1 ; next char
    add edx, 2 ; next video memory position

    jmp print32_loop

print32_done:
    popa
    ret
```

switch-to-32bit.asm

```
[bits 16]
switch_to_32bit:
    cli ; 1. disable interrupts
    lgdt [gdt_descriptor] ; 2. load the GDT descriptor
    mov eax, cr0
    or eax, 0x1 ; 3. set 32-bit mode bit in cr0
    mov cr0, eax
    jmp CODE_SEG:init_32bit ; 4. far jump by using a different segment

[bits 32]
init_32bit: ; we are now using 32-bit instructions
    mov ax, DATA_SEG ; 5. update the segment registers
```

```
    mov ds, ax
    mov ss, ax
    mov es, ax
    mov fs, ax
    mov gs, ax

    mov ebp, 0x90000 ; 6. update the stack right at the top of the free space
    mov esp, ebp

    call BEGIN_32BIT ; 7. Call a well-known label with useful code
```

idt.c

```
#include "idt.h"
#include "../kernel/util.h"

idt_gate_t idt[IDT_ENTRIES];
idt_register_t idt_reg;

void set_idt_gate(int n, uint32_t handler) {
    idt[n].low_offset = low_16(handler);
    idt[n].sel = KERNEL_CS;
    idt[n].always0 = 0;
    idt[n].flags = 0x8E;
    idt[n].high_offset = high_16(handler);
}

void load_idt() {
    idt_reg.base = (uint32_t) &idt;
    idt_reg.limit = IDT_ENTRIES * sizeof(idt_gate_t) - 1;
    /* Don't make the mistake of loading &idt -- always load &idt_reg */
    asm volatile("lidt (%0)" : : "r" (&idt_reg));
}
```

idt.h

```
#pragma once

#include <stdint.h>

/* Segment selectors */
#define KERNEL_CS 0x08
```

```
/* How every interrupt gate (handler) is defined */
typedef struct {
    uint16_t low_offset; /* Lower 16 bits of handler function address */
    uint16_t sel; /* Kernel segment selector */
    uint8_t always0;
    /* First byte
     * Bit 7: "Interrupt is present"
     * Bits 6-5: Privilege level of caller (0=kernel..3=user)
     * Bit 4: Set to 0 for interrupt gates
     * Bits 3-0: bits 1110 = decimal 14 = "32 bit interrupt gate" */
    uint8_t flags;
    uint16_t high_offset; /* Higher 16 bits of handler function address */
} __attribute__((packed)) idt_gate_t;

/* A pointer to the array of interrupt handlers.
     * Assembly instruction 'lidt' will read it */
typedef struct {
    uint16_t limit;
    uint32_t base;
} __attribute__((packed)) idt_register_t;

#define IDT_ENTRIES 256

void set_idt_gate(int n, uint32_t handler);

void load_idt();
```

interrupt.asm

```
; Defined in isr.c
[extern isr_handler]
[extern irq_handler]

; Common ISR code
isr_common_stub:
    ; 1. Save CPU state
    pusha ; Pushes edi,esi,ebp,esp,ebx,edx,ecx,eax
    mov ax, ds ; Lower 16-bits of eax = ds.
    push eax ; save the data segment descriptor
    mov ax, 0x10  ; kernel data segment descriptor
    mov ds, ax
```

```
    mov es, ax
    mov fs, ax
    mov gs, ax

    ; 2. Call C handler
    push esp ; push registers_t *r pointer
    call isr_handler
    pop eax ; clear pointer afterwards

    ; 3. Restore state
    pop eax
    mov ds, ax
    mov es, ax
    mov fs, ax
    mov gs, ax
    popa
    add esp, 8 ; Cleans up the pushed error code and pushed ISR number
    iret ; pops 5 things at once: CS, EIP, EFLAGS, SS, and ESP

; Common IRQ code. Identical to ISR code except for the 'call'
; and the 'pop ebx'
irq_common_stub:
    ; 1. Save CPU state
    pusha
    mov ax, ds
    push eax
    mov ax, 0x10
    mov ds, ax
    mov es, ax
    mov fs, ax
    mov gs, ax

    ; 2. Call C handler
    push esp
    call irq_handler ; Different than the ISR code
    pop ebx  ; Different than the ISR code

    ; 3. Restore state
    pop ebx
    mov ds, bx
    mov es, bx
    mov fs, bx
```

```
    mov gs, bx
    popa
    add esp, 8
    iret

; We don't get information about which interrupt was caller
; when the handler is run, so we will need to have a different handler
; for every interrupt.
; Furthermore, some interrupts push an error code onto the stack but others
; don't, so we will push a dummy error code for those which don't, so that
; we have a consistent stack for all of them.

; First make the ISRs global
global isr0
global isr1
global isr2
global isr3
global isr4
global isr5
global isr6
global isr7
global isr8
global isr9
global isr10
global isr11
global isr12
global isr13
global isr14
global isr15
global isr16
global isr17
global isr18
global isr19
global isr20
global isr21
global isr22
global isr23
global isr24
global isr25
global isr26
global isr27
global isr28
```

```
global isr29
global isr30
global isr31

; 0: Divide By Zero Exception
isr0:
    push byte 0
    push byte 0
    jmp isr_common_stub

; 1: Debug Exception
isr1:
    push byte 0
    push byte 1
    jmp isr_common_stub

; 2: Non Maskable Interrupt Exception
isr2:
    push byte 0
    push byte 2
    jmp isr_common_stub

; 3: Int 3 Exception
isr3:
    push byte 0
    push byte 3
    jmp isr_common_stub

; 4: INTO Exception
isr4:
    push byte 0
    push byte 4
    jmp isr_common_stub

; 5: Out of Bounds Exception
isr5:
    push byte 0
    push byte 5
    jmp isr_common_stub

; 6: Invalid Opcode Exception
isr6:
```

```
    push byte 0
    push byte 6
    jmp isr_common_stub

; 7: Coprocessor Not Available Exception
isr7:
    push byte 0
    push byte 7
    jmp isr_common_stub

; 8: Double Fault Exception (With Error Code!)
isr8:
    push byte 8
    jmp isr_common_stub

; 9: Coprocessor Segment Overrun Exception
isr9:
    push byte 0
    push byte 9
    jmp isr_common_stub

; 10: Bad TSS Exception (With Error Code!)
isr10:
    push byte 10
    jmp isr_common_stub

; 11: Segment Not Present Exception (With Error Code!)
isr11:
    push byte 11
    jmp isr_common_stub

; 12: Stack Fault Exception (With Error Code!)
isr12:
    push byte 12
    jmp isr_common_stub

; 13: General Protection Fault Exception (With Error Code!)
isr13:
    push byte 13
    jmp isr_common_stub

; 14: Page Fault Exception (With Error Code!)
```

```
isr14:
    push byte 14
    jmp isr_common_stub

; 15: Reserved Exception
isr15:
    push byte 0
    push byte 15
    jmp isr_common_stub

; 16: Floating Point Exception
isr16:
    push byte 0
    push byte 16
    jmp isr_common_stub

; 17: Alignment Check Exception
isr17:
    push byte 0
    push byte 17
    jmp isr_common_stub

; 18: Machine Check Exception
isr18:
    push byte 0
    push byte 18
    jmp isr_common_stub

; 19: Reserved
isr19:
    push byte 0
    push byte 19
    jmp isr_common_stub

; 20: Reserved
isr20:
    push byte 0
    push byte 20
    jmp isr_common_stub

; 21: Reserved
isr21:
```

```
    push byte 0
    push byte 21
    jmp isr_common_stub

; 22: Reserved
isr22:
    push byte 0
    push byte 22
    jmp isr_common_stub

; 23: Reserved
isr23:
    push byte 0
    push byte 23
    jmp isr_common_stub

; 24: Reserved
isr24:
    push byte 0
    push byte 24
    jmp isr_common_stub

; 25: Reserved
isr25:
    push byte 0
    push byte 25
    jmp isr_common_stub

; 26: Reserved
isr26:
    push byte 0
    push byte 26
    jmp isr_common_stub

; 27: Reserved
isr27:
    push byte 0
    push byte 27
    jmp isr_common_stub

; 28: Reserved
isr28:
```

```
    push byte 0
    push byte 28
    jmp isr_common_stub

; 29: Reserved
isr29:
    push byte 0
    push byte 29
    jmp isr_common_stub

; 30: Reserved
isr30:
    push byte 0
    push byte 30
    jmp isr_common_stub

; 31: Reserved
isr31:
    push byte 0
    push byte 31
    jmp isr_common_stub

; IRQs
global irq0
global irq1
global irq2
global irq3
global irq4
global irq5
global irq6
global irq7
global irq8
global irq9
global irq10
global irq11
global irq12
global irq13
global irq14
global irq15

; IRQ handlers
irq0:
```

```
    push byte 0
    push byte 32
    jmp irq_common_stub

irq1:
    push byte 1
    push byte 33
    jmp irq_common_stub

irq2:
    push byte 2
    push byte 34
    jmp irq_common_stub

irq3:
    push byte 3
    push byte 35
    jmp irq_common_stub

irq4:
    push byte 4
    push byte 36
    jmp irq_common_stub

irq5:
    push byte 5
    push byte 37
    jmp irq_common_stub

irq6:
    push byte 6
    push byte 38
    jmp irq_common_stub

irq7:
    push byte 7
    push byte 39
    jmp irq_common_stub

irq8:
    push byte 8
    push byte 40
```

```
    jmp irq_common_stub

irq9:
    push byte 9
    push byte 41
    jmp irq_common_stub

irq10:
    push byte 10
    push byte 42
    jmp irq_common_stub

irq11:
    push byte 11
    push byte 43
    jmp irq_common_stub

irq12:
    push byte 12
    push byte 44
    jmp irq_common_stub

irq13:
    push byte 13
    push byte 45
    jmp irq_common_stub

irq14:
    push byte 14
    push byte 46
    jmp irq_common_stub

irq15:
    push byte 15
    push byte 47
    jmp irq_common_stub
```

isr.c

```
#include "isr.h"
#include "idt.h"
#include "../drivers/display.h"
```

```
#include "../drivers/ports.h"
#include "../kernel/util.h"

isr_t interrupt_handlers[256];

/* Can't do this with a loop because we need the address
 * of the function names */
void isr_install() {
    set_idt_gate(0, (uint32_t) isr0);
    set_idt_gate(1, (uint32_t) isr1);
    set_idt_gate(2, (uint32_t) isr2);
    set_idt_gate(3, (uint32_t) isr3);
    set_idt_gate(4, (uint32_t) isr4);
    set_idt_gate(5, (uint32_t) isr5);
    set_idt_gate(6, (uint32_t) isr6);
    set_idt_gate(7, (uint32_t) isr7);
    set_idt_gate(8, (uint32_t) isr8);
    set_idt_gate(9, (uint32_t) isr9);
    set_idt_gate(10, (uint32_t) isr10);
    set_idt_gate(11, (uint32_t) isr11);
    set_idt_gate(12, (uint32_t) isr12);
    set_idt_gate(13, (uint32_t) isr13);
    set_idt_gate(14, (uint32_t) isr14);
    set_idt_gate(15, (uint32_t) isr15);
    set_idt_gate(16, (uint32_t) isr16);
    set_idt_gate(17, (uint32_t) isr17);
    set_idt_gate(18, (uint32_t) isr18);
    set_idt_gate(19, (uint32_t) isr19);
    set_idt_gate(20, (uint32_t) isr20);
    set_idt_gate(21, (uint32_t) isr21);
    set_idt_gate(22, (uint32_t) isr22);
    set_idt_gate(23, (uint32_t) isr23);
    set_idt_gate(24, (uint32_t) isr24);
    set_idt_gate(25, (uint32_t) isr25);
    set_idt_gate(26, (uint32_t) isr26);
    set_idt_gate(27, (uint32_t) isr27);
    set_idt_gate(28, (uint32_t) isr28);
    set_idt_gate(29, (uint32_t) isr29);
    set_idt_gate(30, (uint32_t) isr30);
    set_idt_gate(31, (uint32_t) isr31);

    // Remap the PIC
```

```
    port_byte_out(0x20, 0x11);
    port_byte_out(0xA0, 0x11);
    port_byte_out(0x21, 0x20);
    port_byte_out(0xA1, 0x28);
    port_byte_out(0x21, 0x04);
    port_byte_out(0xA1, 0x02);
    port_byte_out(0x21, 0x01);
    port_byte_out(0xA1, 0x01);
    port_byte_out(0x21, 0x0);
    port_byte_out(0xA1, 0x0);

    // Install the IRQs
    set_idt_gate(32, (uint32_t)irq0);
    set_idt_gate(33, (uint32_t)irq1);
    set_idt_gate(34, (uint32_t)irq2);
    set_idt_gate(35, (uint32_t)irq3);
    set_idt_gate(36, (uint32_t)irq4);
    set_idt_gate(37, (uint32_t)irq5);
    set_idt_gate(38, (uint32_t)irq6);
    set_idt_gate(39, (uint32_t)irq7);
    set_idt_gate(40, (uint32_t)irq8);
    set_idt_gate(41, (uint32_t)irq9);
    set_idt_gate(42, (uint32_t)irq10);
    set_idt_gate(43, (uint32_t)irq11);
    set_idt_gate(44, (uint32_t)irq12);
    set_idt_gate(45, (uint32_t)irq13);
    set_idt_gate(46, (uint32_t)irq14);
    set_idt_gate(47, (uint32_t)irq15);

    load_idt(); // Load with ASM
}

/* To print the message which defines every exception */
char *exception_messages[] = {
        "Division By Zero",
        "Debug",
        "Non Maskable Interrupt",
        "Breakpoint",
        "Into Detected Overflow",
        "Out of Bounds",
        "Invalid Opcode",
        "No Coprocessor",
```

```
        "Double Fault",
        "Coprocessor Segment Overrun",
        "Bad TSS",
        "Segment Not Present",
        "Stack Fault",
        "General Protection Fault",
        "Page Fault",
        "Unknown Interrupt",

        "Coprocessor Fault",
        "Alignment Check",
        "Machine Check",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",

        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved",
        "Reserved"
};

void isr_handler(registers_t *r) {
    print_string("received interrupt: ");
    char s[3];
    int_to_string(r->int_no, s);
    print_string(s);
    print_nl();
    print_string(exception_messages[r->int_no]);
    print_nl();
}

void register_interrupt_handler(uint8_t n, isr_t handler) {
    interrupt_handlers[n] = handler;
}
```

```
void irq_handler(registers_t *r) {
    /* Handle the interrupt in a more modular way */
    if (interrupt_handlers[r->int_no] != 0) {
        isr_t handler = interrupt_handlers[r->int_no];
        handler(r);
    }

    // EOI
    if (r->int_no >= 40) {
        port_byte_out(0xA0, 0x20); /* follower */
    }
    port_byte_out(0x20, 0x20); /* leader */
}
```

isr.h

```
#pragma once

#include <stdint.h>

/* ISRs reserved for CPU exceptions */
extern void isr0();

extern void isr1();

extern void isr2();

extern void isr3();

extern void isr4();

extern void isr5();

extern void isr6();

extern void isr7();

extern void isr8();

extern void isr9();
```

```
extern void isr10();

extern void isr11();

extern void isr12();

extern void isr13();

extern void isr14();

extern void isr15();

extern void isr16();

extern void isr17();

extern void isr18();

extern void isr19();

extern void isr20();

extern void isr21();

extern void isr22();

extern void isr23();

extern void isr24();

extern void isr25();

extern void isr26();

extern void isr27();

extern void isr28();

extern void isr29();

extern void isr30();
```

```
extern void isr31();

/* IRQ definitions */
extern void irq0();

extern void irq1();

extern void irq2();

extern void irq3();

extern void irq4();

extern void irq5();

extern void irq6();

extern void irq7();

extern void irq8();

extern void irq9();

extern void irq10();

extern void irq11();

extern void irq12();

extern void irq13();

extern void irq14();

extern void irq15();

#define IRQ0 32
#define IRQ1 33
#define IRQ2 34
#define IRQ3 35
#define IRQ4 36
#define IRQ5 37
#define IRQ6 38
```

```
#define IRQ7 39
#define IRQ8 40
#define IRQ9 41
#define IRQ10 42
#define IRQ11 43
#define IRQ12 44
#define IRQ13 45
#define IRQ14 46
#define IRQ15 47

/* Struct which aggregates many registers.
 * It matches exactly the pushes on interrupt.asm. From the bottom:
 * - Pushed by the processor automatically
 * - `push byte`s on the isr-specific code: error code, then int number
 * - All the registers by pusha
 * - `push eax` whose lower 16-bits contain DS
 */
typedef struct {
    uint32_t ds; /* Data segment selector */
    uint32_t edi, esi, ebp, esp, ebx, edx, ecx, eax; /* Pushed by pusha. */
    uint32_t int_no, err_code; /* Interrupt number and error code (if applicable)
*/
    uint32_t eip, cs, eflags, useresp, ss; /* Pushed by the processor automatically
*/
} registers_t;

void isr_install();

void isr_handler(registers_t *r);

typedef void (*isr_t)(registers_t *);

void register_interrupt_handler(uint8_t n, isr_t handler);
```

timer.c

```
#include "timer.h"
#include "../drivers/display.h"
#include "../drivers/ports.h"
#include "../kernel/util.h"
#include "isr.h"
```

```
uint32_t tick = 0;

static void timer_callback(registers_t *regs) {
    tick++;
    print_string("Tick: ");

    char tick_ascii[256];
    int_to_string(tick, tick_ascii);
    print_string(tick_ascii);
    print_nl();
}

void init_timer(uint32_t freq) {
    /* Install the function we just wrote */
    register_interrupt_handler(IRQ0, timer_callback);

    /* Get the PIT value: hardware clock at 1193180 Hz */
    uint32_t divisor = 1193180 / freq;
    uint8_t low  = (uint8_t)(divisor & 0xFF);
    uint8_t high = (uint8_t)( (divisor >> 8) & 0xFF);
    /* Send the command */
    port_byte_out(0x43, 0x36); /* Command port */
    port_byte_out(0x40, low);
    port_byte_out(0x40, high);
}
```

timer.h,

```
#pragma once

#include "../kernel/util.h"

void init_timer(uint32_t freq);
```

display.c

```
#include "display.h"
#include "ports.h"
#include <stdint.h>
#include "../kernel/mem.h"
#include "../kernel/util.h"

void set_cursor(int offset) {
```

```
    offset /= 2;
    port_byte_out(REG_SCREEN_CTRL, 14);
    port_byte_out(REG_SCREEN_DATA, (unsigned char) (offset >> 8));
    port_byte_out(REG_SCREEN_CTRL, 15);
    port_byte_out(REG_SCREEN_DATA, (unsigned char) (offset & 0xff));
}

int get_cursor() {
    port_byte_out(REG_SCREEN_CTRL, 14);
    int offset = port_byte_in(REG_SCREEN_DATA) << 8; /* High byte: << 8 */
    port_byte_out(REG_SCREEN_CTRL, 15);
    offset += port_byte_in(REG_SCREEN_DATA);
    return offset * 2;
}

int get_offset(int col, int row) {
    return 2 * (row * MAX_COLS + col);
}

int get_row_from_offset(int offset) {
    return offset / (2 * MAX_COLS);
}

int move_offset_to_new_line(int offset) {
    return get_offset(0, get_row_from_offset(offset) + 1);
}

void set_char_at_video_memory(char character, int offset) {
    uint8_t *vidmem = (uint8_t *) VIDEO_ADDRESS;
    vidmem[offset] = character;
    vidmem[offset + 1] = WHITE_ON_BLACK;
}

int scroll_ln(int offset) {
    memory_copy(
            (uint8_t * )(get_offset(0, 1) + VIDEO_ADDRESS),
            (uint8_t * )(get_offset(0, 0) + VIDEO_ADDRESS),
            MAX_COLS * (MAX_ROWS - 1) * 2
    );

    for (int col = 0; col < MAX_COLS; col++) {
        set_char_at_video_memory(' ', get_offset(col, MAX_ROWS - 1));
```

```
    }

    return offset - 2 * MAX_COLS;
}

/*
 * TODO:
 * - handle illegal offset (print error message somewhere)
 */
void print_string(char *string) {
    int offset = get_cursor();
    int i = 0;
    while (string[i] != 0) {
        if (offset >= MAX_ROWS * MAX_COLS * 2) {
            offset = scroll_ln(offset);
        }
        if (string[i] == '\n') {
            offset = move_offset_to_new_line(offset);
        } else {
            set_char_at_video_memory(string[i], offset);
            offset += 2;
        }
        i++;
    }
    set_cursor(offset);
}

void print_nl() {
    int newOffset = move_offset_to_new_line(get_cursor());
    if (newOffset >= MAX_ROWS * MAX_COLS * 2) {
        newOffset = scroll_ln(newOffset);
    }
    set_cursor(newOffset);
}

void clear_screen() {
    int screen_size = MAX_COLS * MAX_ROWS;
    for (int i = 0; i < screen_size; ++i) {
        set_char_at_video_memory(' ', i * 2);
    }
    set_cursor(get_offset(0, 0));
}
```

```
void print_backspace() {
    int newCursor = get_cursor() - 2;
    set_char_at_video_memory(' ', newCursor);
    set_cursor(newCursor);
}
```

display.h

```
#pragma once

#define VIDEO_ADDRESS 0xb8000
#define MAX_ROWS 25
#define MAX_COLS 80
#define WHITE_ON_BLACK 0x0f

/* Screen i/o ports */
#define REG_SCREEN_CTRL 0x3d4
#define REG_SCREEN_DATA 0x3d5

/* Public kernel API */
void print_string(char *string);

void print_nl();

void clear_screen();

int scroll_ln(int offset);

void print_backspace();
```

keyboard.c

```
#include <stdbool.h>
#include "keyboard.h"
#include "ports.h"
#include "../cpu/isr.h"
#include "display.h"
#include "../kernel/util.h"
#include "../kernel/kernel.h"

#define BACKSPACE 0x0E
#define ENTER 0x1C
```

```
static char key_buffer[256];

#define SC_MAX 57

const char *sc_name[] = {"ERROR", "Esc", "1", "2", "3", "4", "5", "6",
                         "7", "8", "9", "0", "-", "=", "Backspace", "Tab", "Q", "W",
"E",
                         "R", "T", "Y", "U", "I", "O", "P", "[", "]", "Enter",
"Lctrl",
                         "A", "S", "D", "F", "G", "H", "J", "K", "L", ";", "'", "`",
                         "LShift", "\\", "Z", "X", "C", "V", "B", "N", "M", ",",
".",
                         "/", "RShift", "Keypad *", "LAlt", "Spacebar"};
const char sc_ascii[] = {'?', '?', '1', '2', '3', '4', '5', '6',
                         '7', '8', '9', '0', '-', '=', '?', '?', 'Q', 'W', 'E', 'R',
'T', 'Y',
                         'U', 'I', 'O', 'P', '[', ']', '?', '?', 'A', 'S', 'D', 'F',
'G',
                         'H', 'J', 'K', 'L', ';', '\'', '`', '?', '\\', 'Z', 'X',
'C', 'V',
                         'B', 'N', 'M', ',', '.', '/', '?', '?', '?', ' '};

static void keyboard_callback(registers_t *regs) {
    uint8_t scancode = port_byte_in(0x60);
    if (scancode > SC_MAX) return;
    if (scancode == BACKSPACE) {
        if (backspace(key_buffer)) {
            print_backspace();
        }
    } else if (scancode == ENTER) {
        print_nl();
        execute_command(key_buffer);
        key_buffer[0] = '\0';
    } else {
        char letter = sc_ascii[(int) scancode];
        append(key_buffer, letter);
        char str[2] = {letter, '\0'};
        print_string(str);
    }
}
```

```
void init_keyboard() {
    register_interrupt_handler(IRQ1, keyboard_callback);
}
```

keyboard.h

```
#pragma once

void init_keyboard();
```

ports.c

```
#include <stdint.h>

/**
 * Read a byte from the specified port
 */
unsigned char port_byte_in(uint16_t port) {
    unsigned char result;
    /* Inline assembler syntax
     * !! Notice how the source and destination registers are switched from NASM !!
     *
     * '"=a" (result)'; set '=' the C variable '(result)' to the value of register
e'a'x
     * '"d" (port)': map the C variable '(port)' into e'd'x register
     *
     * Inputs and outputs are separated by colons
     */
    asm("in %%dx, %%al" : "=a" (result) : "d" (port));
    return result;
}

void port_byte_out(uint16_t port, uint8_t data) {
    /* Notice how here both registers are mapped to C variables and
     * nothing is returned, thus, no equals '=' in the asm syntax
     * However we see a comma since there are two variables in the input area
     * and none in the 'return' area
     */
    asm("out %%al, %%dx" : : "a" (data), "d" (port));
}

unsigned short port_word_in(uint16_t port) {
```

```
    unsigned short result;
    asm("in %%dx, %%ax" : "=a" (result) : "d" (port));
    return result;
}

void port_word_out(uint16_t port, uint16_t data) {
    asm("out %%ax, %%dx" : : "a" (data), "d" (port));
}
```

ports.h

```
#pragma once

#include <stdint.h>

unsigned char port_byte_in(uint16_t port);

void port_byte_out(uint16_t port, uint8_t data);

unsigned short port_word_in(uint16_t port);

void port_word_out(uint16_t port, uint16_t data);
```

kernel.c

```
#include "../cpu/idt.h"
#include "../cpu/isr.h"
#include "../cpu/timer.h"
#include "../drivers/display.h"
#include "../drivers/keyboard.h"

#include "util.h"
#include "mem.h"

void* alloc(int n) {
    int *ptr = (int *) mem_alloc(n * sizeof(int));
    if (ptr == NULL_POINTER) {
        print_string("Memory not allocated.\n");
    } else {
        // Get the elements of the array
        for (int i = 0; i < n; ++i) {
//            ptr[i] = i + 1; // shorthand for *(ptr + i)
```

```
        }

        for (int i = 0; i < n; ++i) {
//            char str[256];
//            int_to_string(ptr[i], str);
//            print_string(str);
        }
//        print_nl();
    }
    return ptr;
}

void start_kernel() {
    clear_screen();
    print_string("Installing interrupt service routines (ISRs).\n");
    isr_install();

    print_string("Enabling external interrupts.\n");
    asm volatile("sti");

    print_string("Initializing keyboard (IRQ 1).\n");
    init_keyboard();

    print_string("Initializing dynamic memory.\n");
    init_dynamic_mem();

    clear_screen();

    print_string("init_dynamic_mem()\n");
    print_dynamic_node_size();
    print_dynamic_mem();
    print_nl();

    int *ptr1 = alloc(5);
    print_string("int *ptr1 = alloc(5)\n");
    print_dynamic_mem();
    print_nl();

    int *ptr2 = alloc(10);
    print_string("int *ptr2 = alloc(10)\n");
    print_dynamic_mem();
    print_nl();
```

```
    mem_free(ptr1);
    print_string("mem_free(ptr1)\n");
    print_dynamic_mem();
    print_nl();

    int *ptr3 = alloc(2);
    print_string("int *ptr3 = alloc(2)\n");
    print_dynamic_mem();
    print_nl();

    mem_free(ptr2);
    print_string("mem_free(ptr2)\n");
    print_dynamic_mem();
    print_nl();

    mem_free(ptr3);
    print_string("mem_free(ptr3)\n");
    print_dynamic_mem();
    print_nl();

    print_string("> ");
}

void execute_command(char *input) {
    if (compare_string(input, "EXIT") == 0) {
        print_string("Stopping the CPU. Bye!\n");
        asm volatile("hlt");
    }
    else if (compare_string(input, "") == 0) {
        print_string("\n> ");
    }
    else {
        print_string("Unknown command: ");
        print_string(input);
        print_string("\n> ");
    }
}
```

kernel.h

```
#pragma once
```

```
void execute_command(char *input);
```

mem.c

```
#include <stdbool.h>
#include <stdint.h>
#include "mem.h"
#include "../drivers/display.h"
#include "util.h"

// http://www.sunshine2k.de/articles/coding/cmemalloc/cmemory.html#ch33

void memory_copy(uint8_t *source, uint8_t *dest, uint32_t nbytes) {
    int i;
    for (i = 0; i < nbytes; i++) {
        *(dest + i) = *(source + i);
    }
}

/*
 * The following code is based on code licensed under MIT licence
 * and thus also licensed under MIT license I guess?
 * For further details, see http://www.sunshine2k.de/license.html.
 */
#define DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE 4*1024
#define DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE sizeof(dynamic_mem_node_t)

typedef struct dynamic_mem_node {
    uint32_t size;
    bool used;
    struct dynamic_mem_node *next;
    struct dynamic_mem_node *prev;
} dynamic_mem_node_t;

static uint8_t dynamic_mem_area[DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE];
static dynamic_mem_node_t *dynamic_mem_start;

void init_dynamic_mem() {
    dynamic_mem_start = (dynamic_mem_node_t *) dynamic_mem_area;
    dynamic_mem_start->size = DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE - DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE;
    dynamic_mem_start->next = NULL_POINTER;
    dynamic_mem_start->prev = NULL_POINTER;
```

```
}

void print_dynamic_node_size() {
    char node_size_string[256];
    int_to_string(DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE, node_size_string);
    print_string("DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE = ");
    print_string(node_size_string);
    print_nl();
}

void print_dynamic_mem_node(dynamic_mem_node_t *node) {
    char size_string[256];
    int_to_string(node->size, size_string);
    print_string("{size = ");
    print_string(size_string);
    char used_string[256];
    int_to_string(node->used, used_string);
    print_string("; used = ");
    print_string(used_string);
    print_string("}; ");
}

void print_dynamic_mem() {
    dynamic_mem_node_t *current = dynamic_mem_start;
    print_string("[");
    while (current != NULL_POINTER) {
        print_dynamic_mem_node(current);
        current = current->next;
    }
    print_string("]\n");
}

void *find_best_mem_block(dynamic_mem_node_t *dynamic_mem, size_t size) {
    // initialize the result pointer with NULL and an invalid block size
    dynamic_mem_node_t *best_mem_block = (dynamic_mem_node_t *) NULL_POINTER;
    uint32_t best_mem_block_size = DYNAMIC_MEM_TOTAL_SIZE + 1;

    // start looking for the best (smallest unused) block at the beginning
    dynamic_mem_node_t *current_mem_block = dynamic_mem;
    while (current_mem_block) {
        // check if block can be used and is smaller than current best
        if ((!current_mem_block->used) &&
```

```
            (current_mem_block->size >= (size + DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE)) &&
            (current_mem_block->size <= best_mem_block_size)) {
            // update best block
            best_mem_block = current_mem_block;
            best_mem_block_size = current_mem_block->size;
        }

        // move to next block
        current_mem_block = current_mem_block->next;
    }
    return best_mem_block;
}

void *mem_alloc(size_t size) {
    dynamic_mem_node_t *best_mem_block =
            (dynamic_mem_node_t *) find_best_mem_block(dynamic_mem_start, size);

    // check if we actually found a matching (free, large enough) block
    if (best_mem_block != NULL_POINTER) {
        // subtract newly allocated memory (incl. size of the mem node) from
selected block
        best_mem_block->size = best_mem_block->size - size - DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE;

        // create new mem node after selected node, effectively splitting the
memory region
        dynamic_mem_node_t *mem_node_allocate = (dynamic_mem_node_t *) (((uint8_t
*) best_mem_block) +
                                                                        DYNAMIC_MEM_NO
DE_SIZE +
                                                                        best_mem_block
->size);
        mem_node_allocate->size = size;
        mem_node_allocate->used = true;
        mem_node_allocate->next = best_mem_block->next;
        mem_node_allocate->prev = best_mem_block;

        // reconnect the doubly linked list
        if (best_mem_block->next != NULL_POINTER) {
            best_mem_block->next->prev = mem_node_allocate;
        }
        best_mem_block->next = mem_node_allocate;
```

```
        // return pointer to newly allocated memory (right after the new list node)
        return (void *) ((uint8_t *) mem_node_allocate + DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE);
    }

    return NULL_POINTER;
}

void *merge_next_node_into_current(dynamic_mem_node_t *current_mem_node) {
    dynamic_mem_node_t *next_mem_node = current_mem_node->next;
    if (next_mem_node != NULL_POINTER && !next_mem_node->used) {
        // add size of next block to current block
        current_mem_node->size += current_mem_node->next->size;
        current_mem_node->size += DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE;

        // remove next block from list
        current_mem_node->next = current_mem_node->next->next;
        if (current_mem_node->next != NULL_POINTER) {
            current_mem_node->next->prev = current_mem_node;
        }
    }
    return current_mem_node;
}

void *merge_current_node_into_previous(dynamic_mem_node_t *current_mem_node) {
    dynamic_mem_node_t *prev_mem_node = current_mem_node->prev;
    if (prev_mem_node != NULL_POINTER && !prev_mem_node->used) {
        // add size of previous block to current block
        prev_mem_node->size += current_mem_node->size;
        prev_mem_node->size += DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE;

        // remove current node from list
        prev_mem_node->next = current_mem_node->next;
        if (current_mem_node->next != NULL_POINTER) {
            current_mem_node->next->prev = prev_mem_node;
        }
    }
}

void mem_free(void *p) {
    // move along, nothing to free here
    if (p == NULL_POINTER) {
        return;
```

```
    }

    // get mem node associated with pointer
    dynamic_mem_node_t *current_mem_node = (dynamic_mem_node_t *) ((uint8_t *) p -
DYNAMIC_MEM_NODE_SIZE);

    // pointer we're trying to free was not dynamically allocated it seems
    if (current_mem_node == NULL_POINTER) {
        return;
    }

    // mark block as unused
    current_mem_node->used = false;

    // merge unused blocks
    current_mem_node = merge_next_node_into_current(current_mem_node);
    merge_current_node_into_previous(current_mem_node);
}
```

mem.h

```
#pragma once

#include <stdint.h>
#include <stddef.h>

#define NULL_POINTER ((void*)0)

void memory_copy(uint8_t *source, uint8_t *dest, uint32_t nbytes);

void init_dynamic_mem();

void print_dynamic_node_size();

void print_dynamic_mem();

void *mem_alloc(size_t size);

void mem_free(void *p);
```

util.c

```
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>
```

```
int string_length(char s[]) {
    int i = 0;
    while (s[i] != '\0') ++i;
    return i;
}

void reverse(char s[]) {
    int c, i, j;
    for (i = 0, j = string_length(s)-1; i < j; i++, j--) {
        c = s[i];
        s[i] = s[j];
        s[j] = c;
    }
}

void int_to_string(int n, char str[]) {
    int i, sign;
    if ((sign = n) < 0) n = -n;
    i = 0;
    do {
        str[i++] = n % 10 + '0';
    } while ((n /= 10) > 0);

    if (sign < 0) str[i++] = '-';
    str[i] = '\0';

    reverse(str);
}

void append(char s[], char n) {
    int len = string_length(s);
    s[len] = n;
    s[len+1] = '\0';
}

bool backspace(char s[]) {
    int len = string_length(s);
    if (len > 0) {
        s[len - 1] = '\0';
        return true;
    } else {
```

```
        return false;
    }
}

/* K&R
 * Returns <0 if s1<s2, 0 if s1==s2, >0 if s1>s2 */
int compare_string(char s1[], char s2[]) {
    int i;
    for (i = 0; s1[i] == s2[i]; i++) {
        if (s1[i] == '\0') return 0;
    }
    return s1[i] - s2[i];
}
```

util.h

```
#pragma once

#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>

#define low_16(address) (uint16_t)((address) & 0xFFFF)
#define high_16(address) (uint16_t)(((address) >> 16) & 0xFFFF)

int string_length(char s[]);

void reverse(char s[]);

void int_to_string(int n, char str[]);

bool backspace(char s[]);

void append(char s[], char n);

int compare_string(char s1[], char s2[]);
```

Makefile

```
# $@ = target file
# $< = first dependency
# $^ = all dependencies

# detect all .o files based on their .c source
```

```
C_SOURCES = $(wildcard kernel/*.c drivers/*.c cpu/*.c)
HEADERS = $(wildcard kernel/*.h  drivers/*.h cpu/*.h)
OBJ_FILES = ${C_SOURCES:.c=.o cpu/interrupt.o}

CC ?= x86_64-elf-gcc
LD ?= x86_64-elf-ld

# First rule is the one executed when no parameters are fed to the Makefile
all: run

# Notice how dependencies are built as needed
kernel.bin: boot/kernel_entry.o ${OBJ_FILES}
    $(LD) -m elf_i386 -o $@ -Ttext 0x1000 $^ --oformat binary

os-image.bin: boot/mbr.bin kernel.bin
    cat $^ > $@

run: os-image.bin
    qemu-system-i386 -fda $<

echo: os-image.bin
    xxd $<

# only for debug
kernel.elf: boot/kernel_entry.o ${OBJ_FILES}
    $(LD) -m elf_i386 -o $@ -Ttext 0x1000 $^

debug: os-image.bin kernel.elf
    qemu-system-i386 -s -S -fda os-image.bin -d guest_errors,int &
    i386-elf-gdb -ex "target remote localhost:1234" -ex "symbol-file kernel.elf"

%.o: %.c ${HEADERS}
    $(CC) -g -m32 -ffreestanding -fno-pie -fno-stack-protector -c $< -o $@ # -g for
debugging

%.o: %.asm
    nasm $< -f elf -o $@

%.bin: %.asm
    nasm $< -f bin -o $@

%.dis: %.bin
```

```
    ndisasm -b 32 $< > $@

clean:
    $(RM) *.bin *.o *.dis *.elf
    $(RM) kernel/*.o
    $(RM) boot/*.o boot/*.bin
    $(RM) drivers/*.o
    $(RM) cpu/*.o
```

아래는 최종 결과물입니다.