시스템 프로그래밍 (2016)

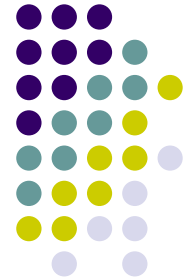
강의 11. 동적 메모리 할당 1

교재 9.9

강의 일정

주	날짜	강의실	날짜	실습실
1	9월 1일(목)	**소개 강의**	9월 6일(화)	**리눅스 개발환경 익히기 (VI, 쉘 기본명령어들)**
2	9월 8일(목)	**정수 표현 방법**	9월 13일(화)	GCC & Make, shell script
3	9월 15일(목)	**추석 휴강**	9월 20일(화)	**GDB 사용하기 1 (소스 수준 디버깅)**
4	9월 22일(목)	**실수 표현 방법**	9월 27일(화)	**Data lab**
5	9월 29일(목)	**어셈1 - 데이터이동**	10월 4일(화)	**어셈1 – move(실습),**
6	10월 6일(목)	**어셈2 – 제어문**	10월 11일(화)	**어셈2- 제어문 (실습)**
7	10월 13일(목)	**어셈3 – 프로시저**	10월 18일(화)	**어셈3-프로시저(실습)**
8	10월 20일(목)	**어셈보충/중간시험**	10월 25일(화)	**GDB 사용하기2 (어셈수준 디버깅)**
9	10월 27일(목)	**보안**(buffer overflow)	11월 1일(화)	Binary bomb 1
10	11월 3일(목)	**프로세스 1**	11월 8일(화)	Binary bomb 2
11	11월 10일(목)	**프로세스 2**	11월 15일(화)	Tiny shell 1
12	11월 17일(목)	**시그널**	11월 22일(화)	Tiny shell 2
13	11월 24일(목)	**동적메모리 1**	11월 29일(화)	Malloc lab1
14	12월 1일(목)	**동적메모리 2**	12월 6일(화)	Malloc lab2
15	12월 8일(목)	**기말시험**	12월 13일(화)	Malloc lab3

목차



1. 동적 메모리 할당 기초
2. malloc(), free() 구현 관련 사항, 제한사항, 성능지표
3. 간접리스트 방식: 할당하기
4. 간접리스트 방식: 프리블록 관리하기

1.동적 메모리 할당 기초

메모리에 관한 불편한 진실

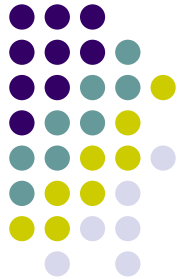
프로그래머에게 메모리에 대한 이해가 중요하다

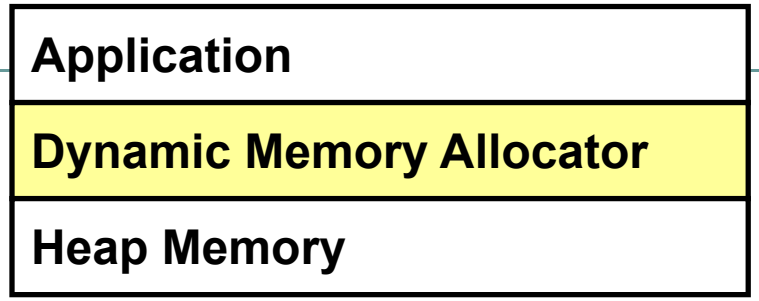
- 메모리는 무한의 자원이 아니다
  - 메모리는 할당되고 관리되는 자원이다
  - 많은 응용프로그램들은 메모리에 큰 영향을 받는다
    - 특히 복잡한 그래프 알고리즘을 사용하는 경우
- 메모리 참조 버그는 매우 치명적이다
  - 버그의 영향이 시공간 적으로 동떨어져서 발견된다
- 메모리 성능은 일정하지 않다
  - 캐시와 가상 메모리는 프로그램의 성능에 매우 영향을 줄 수 있다
  - 메모리 시스템의 특성을 반영하는 프로그램은 속도를 상당히 개선할 수 있다.

동적 메모리 할당 사용의 이유

- 프로그램이 실행되기 전에는 크기를 알 수 없는 자료 구조를 위해 사용
- 예 : n 개의 문자를 화면에서 읽어 들여서 배열에 저장하고자 할 때, n 과 문자를 차례로 받아 들여서 실행하는 경우
  - 고정 크기의 배열로도 구현 가능
  - int array[MAX_SIZE];
  - 이와 같이 배열의 크기를 알 수 없을 때, 최대값으로 배열을 구현하는 것은 나쁜 생각
    - 시스템의 가능한 메모리 사용량을 알 수 없다
    - MAX_SIZE 보다 많은 입력을 원한다면?
    - MAX_SIZE 값을 계속 바꿔서 다시 컴파일 해야 한다
  - 코드 관리 차원에서 안좋음
  - 이런 경우에 동적 메모리 할당이 효과적이고, 중요한 프로그래밍 기술임

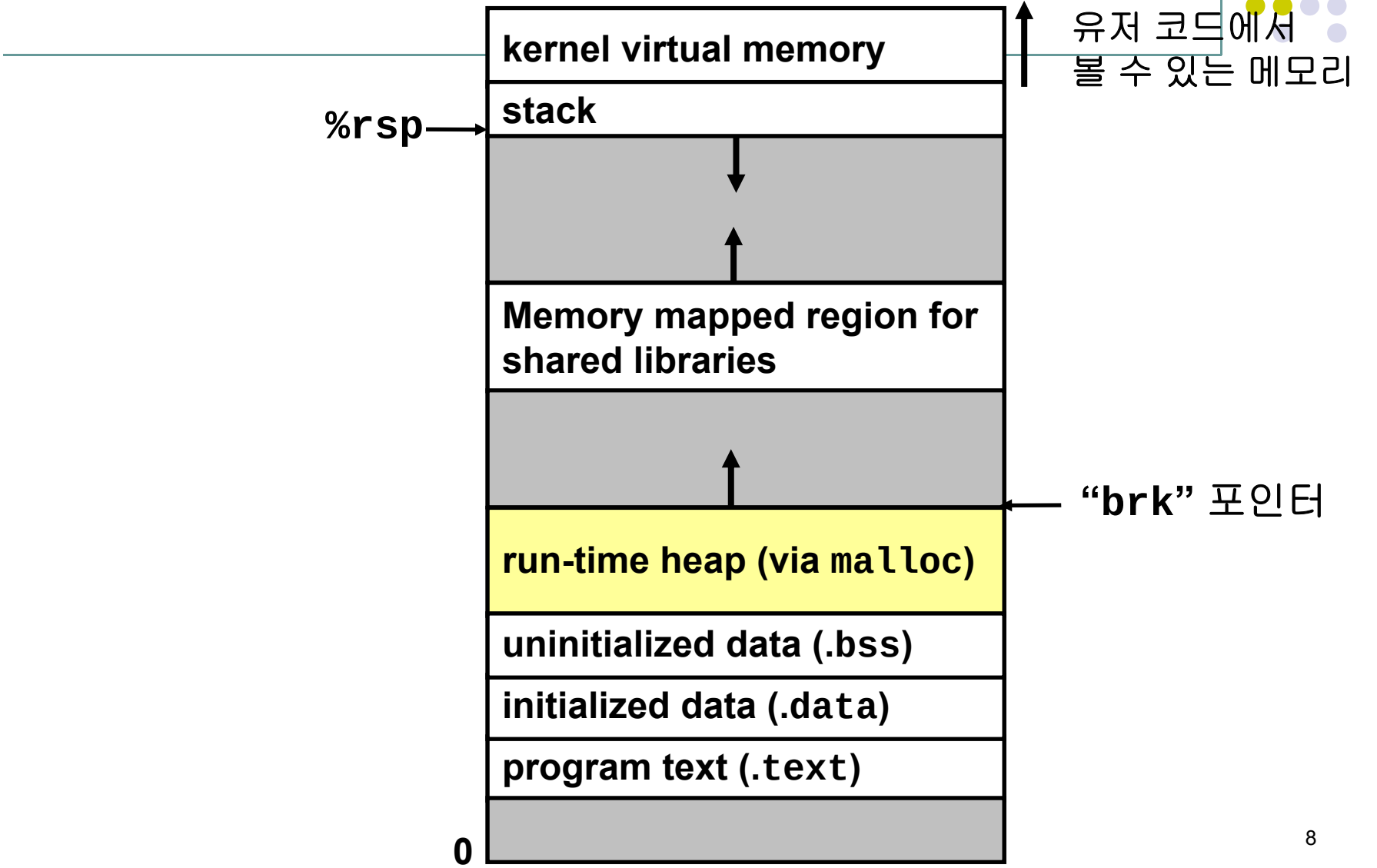
동적 메모리 할당





- 직접 vs 간접(Explicit vs. Implicit) 메모리 할당기
  - 직접 할당 : 응용프로그램이 할당하고, 반환한다
    - E.g., `malloc` 과 `free`
  - 간접 할당 : 응용프로그램이 할당하지만, 반환하지는 않는다
    - E.g. 자바에서의 가비지컬렉션
- 할당방법
  - 두가지 경우에 모두 메모리 할당기는 메모리를 블럭단위로 제공한다
  - 응용프로그램에 free 메모리 블럭을 나눠준다
- 여기서는 직접메모리 할당을 다룬다

프로세스의 메모리 이미지



Malloc 패키지, malloc(), free()

- `#include <stdlib.h>`
- `void *malloc(size_t size)`
  - 성공시 :
    - 최소 `size` 바이트의 메모리 블록의 포인터를 (대개 8 추어) 반환..초기화되지 않음.
    - 만일 `size == 0`, returns NULL
  - 실패시 : NULL (0)을 리턴하고 `errno`를 세팅, 언제??
- `void free(void *p)`
  - 가용 메모리 풀을 가리키는 블록 포인터 p를 리턴
  - `p`는 이전 `malloc` 이나 `realloc`에서 제공

calloc(), realloc()

```
void *calloc (size_t nmem, size_t size)
```

- 메모리 영역을 초기화해서 리턴함(0으로)
- 크기가 size인 nmemb 개 원소를 저장할 연속 공간에 대한 포인터를 리턴함

```
void *realloc(void *p, size_t size)
```

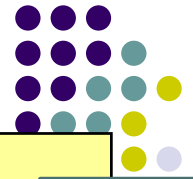
- p가 가리키는 영역의 크기를 size로 변경함. 내용은 변하지 않음.
- realloc()은 정해진 크기(allocated size)내에서 확장 가능하지 않으면 새로운 할당을 받고, p는 free()시키면, 새로운 영역으로 예전 내용 복사

realloc() 함수의 동작

```
void * realloc(void * ptr, size_t desired_size) {
  size_t allocated_size = _allocated_size_of(ptr);
  if (allocated_size < desired_size) {
        void * new_ptr = malloc(desired_size);
        memcpy(new_ptr, ptr, allocated_size);
        free(ptr);
        ptr = new_ptr;
  }
  return ptr;
}
```

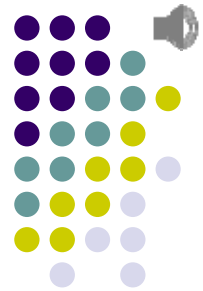
Malloc Example

foo(10,5)



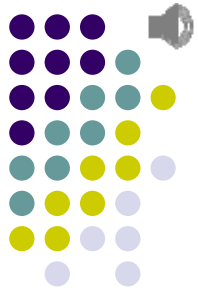
```
void foo(int n, int m) {
  int i, *p;

  /* allocate a block of n ints */
   p = (int *)malloc(n * sizeof(int));
   if (p == NULL) {
    perror("malloc");
    exit(0);
  }
  for (i=0; i<n; i++) p[i] = i;

  /* add m bytes to end of p block */
  if ((p = (int *) realloc(p, (n+m) * sizeof(int))) == NULL) {
    perror("realloc");
    exit(0);
  }
  for (i=n; i < n+m; i++) p[i] = i;

  /* print new array */
  for (i=0; i<n+m; i++)
    printf("%d\n", p[i]);

  free(p); /* return p to available memory pool */
}
```

```
$ ./foo
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
```

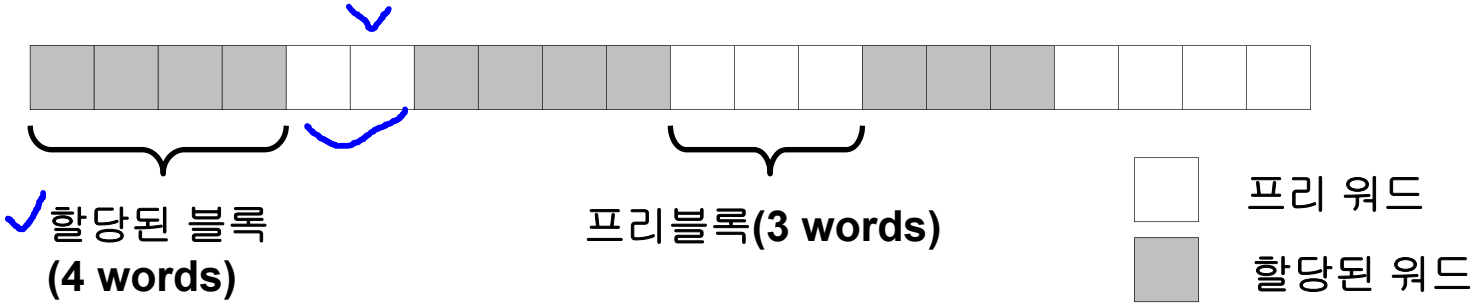


2. MALLOC(), FREE() 구현 관련 사항, 제한사항, 성능지표

가정

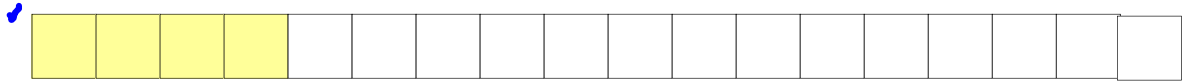


- 메모리는 워드 단위로 주소가 지정된다



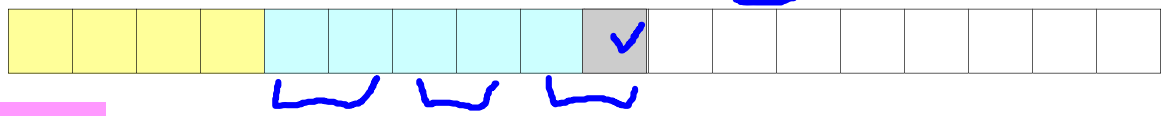
할당 예제

```
p1 = malloc(4)
```

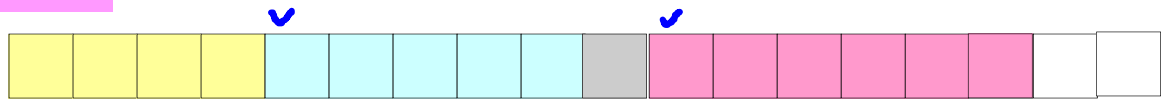


```
p2 = malloc(5)
```

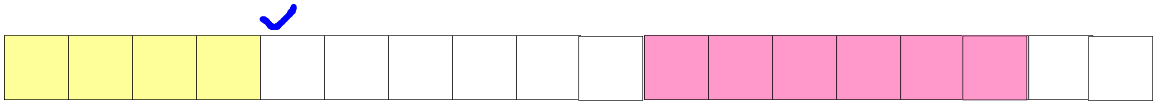
alignment 제약:더블워드 단위



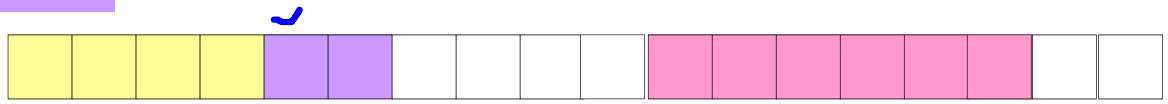
```
p3 = malloc(6)
```



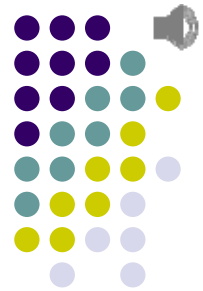
```
free(p2)
```



```
p4 = malloc(2)
```

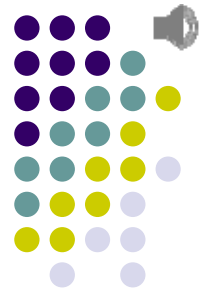


제한사항



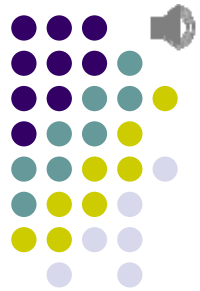
- 응용 프로그램
  - 무순의 할당과 반환 요청이 발생된다
  - 반환 요청은 할당된 블록에 대응되어야 한다
- 할당 프로그램이 만족해야 하는 요건들
  1. Handling arbitrary request sequences(무작위적인 어떤 할당/반환 요구에도 응답해야 함.)
  2. Making immediate responses to requests(모든 할당 요청에 즉시 반응해야 한다)
     - *즉, 요청 순서를 변경하거나 요청을 버퍼에 저장할 수 없다*
  3. Not modifying allocated blocks (프리 메모리만을 관리하고 수정할 수 있다), 변경, 이동, 압축 등 불가함.
  4. Using only the heap (모든 자료구조는 heap 공간에 저장됨)
  5. Aligning blocks(alignment requirement)
     - 블록은 주소맞춤 요건을 만족하도록 정렬해야 한다
       - 리눅스 컴퓨터의 GNU malloc에서는 8바이트 단위의 정렬사용

우수한 malloc/free 프로그램의 목표



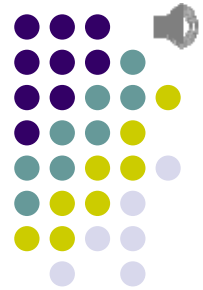
- 주요 목표
  - malloc 과 free 에서 우수한 시간성능을 얻는다(throughput)
    - 이상적으로는 상수시간이 걸려야 한다(언제나 가능한 것은 아니다)
    - 당연히 블록의 수에 비례하는 시간이 걸리면 안 된다
  - 우수한 공간 이용률을 가져야 한다(peak utilization)
    - 사용자에게 할당한 구조체는 heap의 많은 부분을 차지해야 한다
    - 단편화"fragmentation"를 최소화해야 한다
- 다른 목표
  - 우수한 지역성
    - 시간적으로 인접해서 할당된 구조체는 공간상으로 인접해야 한다
    - 유사한 객체들은 인접공간에 할당되어야 한다
  - 견고성
    - free(p1) 함수가 유효한 포인터 p1에 대해 수행하는지 체크할수 있다
    - 메모리 참조가 할당된 공간으로 이루어지는지 체크할 수 있다

성능 지표 1 : 처리량 Throughput

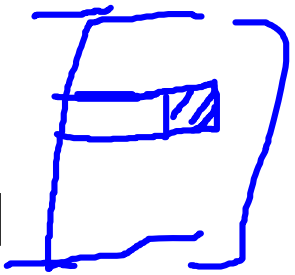


- `malloc` 과 `free` 요청이 다음과 같이 주어진다고 하자
  - $R_0, R_1, ..., R_k, ..., R_{n-1}$
- 처리량과 순간 최대 메모리 사용율을 극대화하고자 한다
  - 이 목표들은 종종 충돌한다
- 처리량 Throughput:
  - 단위 시간동안에 완료한 요청의 수
  - 예.
    - 5,000번의 `malloc` 과 5,000번의 `free` 를 10 초 동안에 수행하는 경우
    - 작업량 = 1,000 operations/second.
  - alloc과 free 함수의 평균 처리 시간을 최소화하면 throughput을 극대화 할 수 있다

성능지표 2 : 최대 메모리 이용율



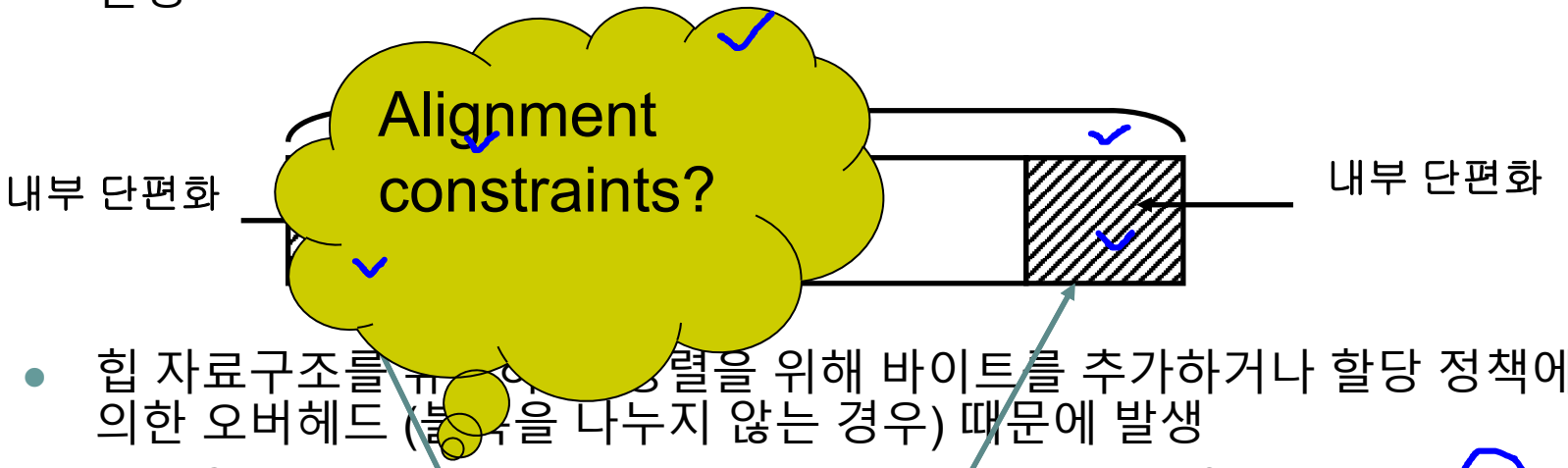
- 좋은 프로그래머는 가상메모리의 크기도 제한되어 있다는 것을 알고 작업한다 . 효율적 관리 필요
- 효율적인 heap 사용 지표 : peak heap utilization



- `malloc`과 `free` 요청의 순서가 다음과 같이 주어질 때
  - $R_0, R_1, ..., R_k, ... , R_{n-1}$
- *Def: 총 데이터 P_k*: (sum of payloads of currently allocated blocks at k-th step)
  - `malloc(p)` 는 p 바이트의 데이터를 포함하는 메모리 블록을 리턴
  - 요청 R_k 가 처리된 후에, 전체 데이터 P_k 는 현재 할당된 데이터들의 합이다
- *Def: 현재 heap의 크기는 H_k*
  - H_k 는 단조 증가한다고 가정
- *Def: 최대 메모리 이용율: (peak utilization)*
  - k 개의 요청 후에, 최대 메모리 이용율은:
    - $U_k = (max_{i<=k} P_i) \ / \ H_k$
- 구현 목표 : U_{n-1} 극대화(over the entire sequence)

내부 메모리 단편화(Internal Fragmentation)

- 나쁜 메모리 사용률은 단편화로 인해 발생
  - 두 가지 형태로 발생 : 내부 및 외부 단편화
- 내부 단편화 Internal fragmentation
  - 일부 블록에서 내부 단편화는 블록 크기와 데이터 크기간의 차이로 인해 발생



  - 힙 자료구조를 위한 정렬을 위해 바이트를 추가하거나 할당 정책에 의한 오버헤드 (블록을 나누지 않는 경우) 때문에 발생
  - Two Causes : Alignment constraints, minimum size of allocation
  - 이전 요청 패턴에 의해서만 영향을 받으므로 측정이 용이.

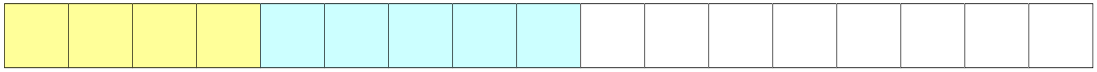
6 8 16 24 32.

외부 메모리 단편화(External Fragmentation)

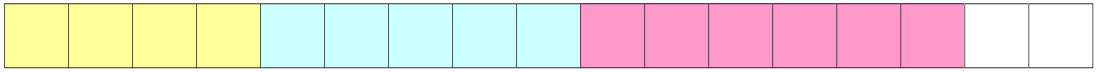
heap 전체 가용 메모리를 합쳐보면 수용이 가능하지만
가용**(free)** 블록 하나의 크기가 요구 블록 크기보다 작은 경우에 발생

```
p1 = malloc(4)
```

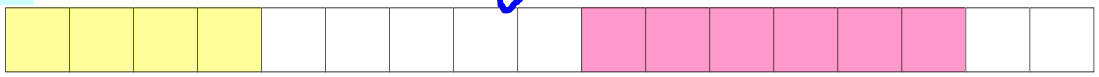
```
p2 = malloc(5)
```



```
p3 = malloc(6)
```



```
free(p2)
```

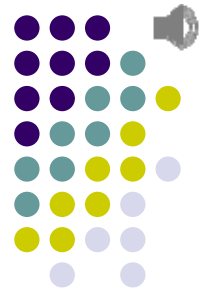



```
p4 = malloc(6)
```

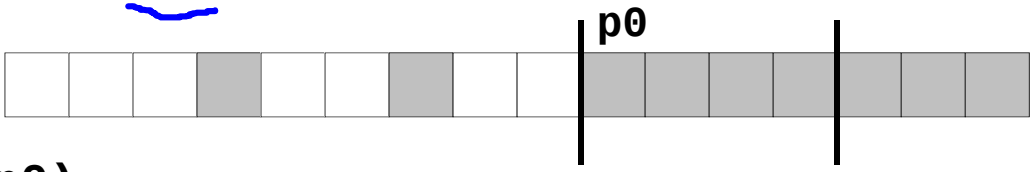
oops!

✓외부 단편화는 미래의 요청패턴에 의해 결정되므로, 측정이 어렵다

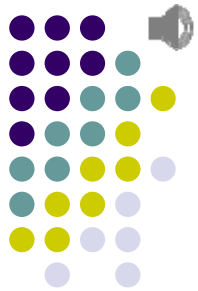
구현시 고려할 점



1. 포인터로부터 얼마 만큼의 메모리를 free할지 어떻게 알 수 있을까? (allocated size 저장필요) – 할당크기와 요구했던 크기는 다름.
2. 가용블록을 어떻게 관리할 것인가? (free blocks)
3. 가용블록보다 작은 크기의 구조체를 할당할 때, 남는 공간은 어떻게 할 것인가? (split or all?)
4. 할당을 위한 블록은 어떻게 선택하는가 – 여러 블록에 할당이 가능한 경우에?(policy?)
5. 반환된 블록을 다시 가용블록으로 어떻게 관리하는가? (coalesce or not ?)



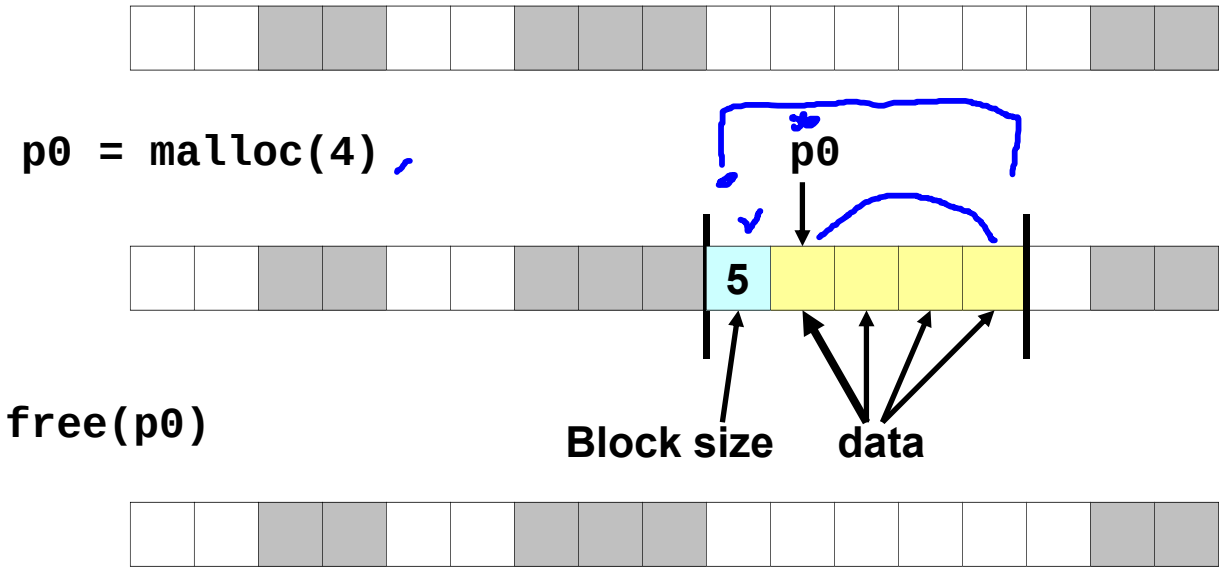

```
free(p0)
p1 = malloc(1)
```



3. 간접 리스트 방식(IMPLICIT LIST)

1.얼마나 Free 시킬지 결정하기

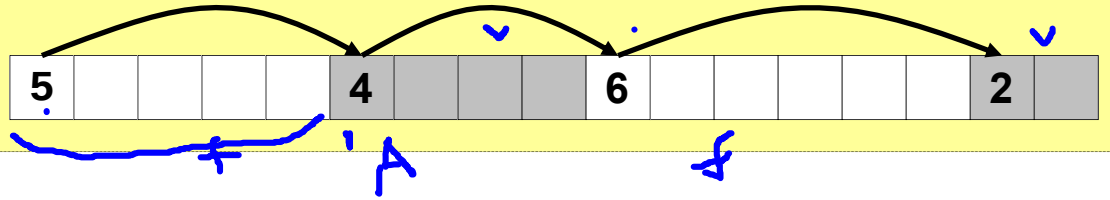
- 일반적인 방법
  - 블록 앞에 블록의 크기를 저장한다.
    - 이 워드를 **헤더**라고 한다
  - 매 할당 블록마다 추가적으로 1워드가 소요된다



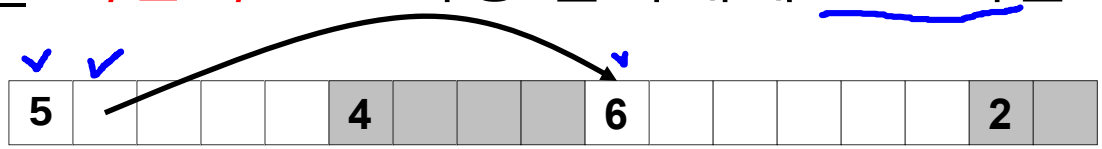
* 헤더가 있다.
* 헤더에는 할당/블록크기 정보가 있다.

2. Free 블럭 관리하기

- *방법 1*: *간접리스트* 크기 정보를 이용하여 모든 블록을 연결



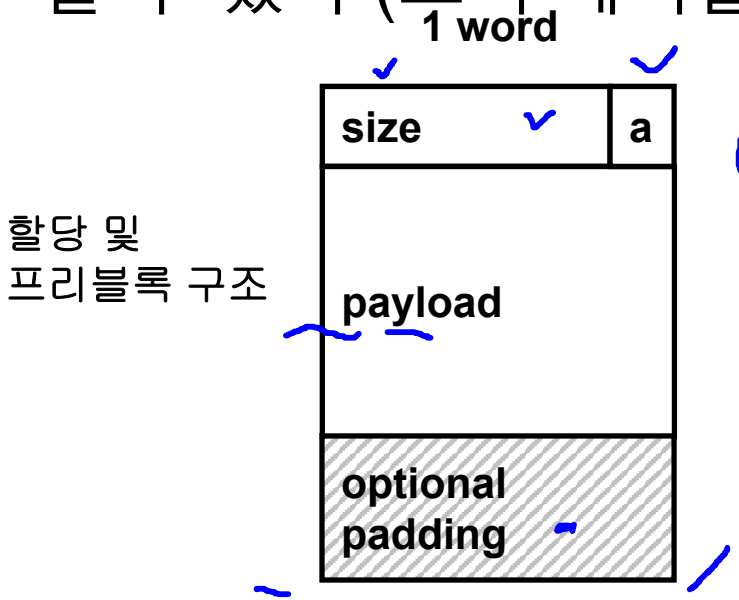
- *방법 2*: *직접리스트* 가용 블록내에 포인터를 이용



- *방법 3*: *구분 가용 리스트 segregated free list*
  - 크기 클래스마다 각각 별도의 가용 리스트를 유지
- *방법 4*: 크기로 정렬된 블록
  - 가용 블록내에 포인터를 이용하고, 크기를 키로 사용하여 균형 트리를 사용할 수 있다

간접 리스트 방식(Implicit List) 구조

- 각 블록이 비어있는지 할당상태인지 구분할 필요가 있다
  - 추가적인 비트를 사용
  - 블록 크기가 항상 2의 배수라면 헤더에 함께 이용할 수 있다 (크기 헤더를 읽을 때 비트를 제거).



할당 및
프리블록 구조

a = 1: 할당된 블록
a = 0: 프리 블록

size: 블록 크기

payload: 데이터
(할당된 블록에만 사용)

점검문제 1:

- 문제1: 다음과 같은 순서로 malloc 요청을 하는 경우에 블록의 크기와 header에 저장되는 값을 쓰시오. 헤더는 4바이트를 사용한다.
  - 단, 할당은 double-word alignment를 유지해야 하고, header만 사용하는 간접리스트 방식으로 메모리를 관리한다고 가정한다.
  - 할당되는 블록의 크기는 8의 배수로 해야 한다.

요청	블록크기(바이트)	블록 **header(hex)**
Malloc(1)		
Malloc(5)		
Malloc(12)		
Malloc(13)		

명심: 사용자의 요구 바이트수를 저장하는 게 아니고, 실제 할당된 크기를 저장함!!

문제2: Malloc(n), n를 가지고 8의 배수를 만들려면???

1. 가용 블록 찾기

- *최초할당 First fit:*
  - 처음부터 검색 시작해서 맨처음 크기가 맞는 블록을 할당

```
p = start;  // malloc(len) 의 경우
while ((p < end) &&      \\ not passed end
       ((*p & 1) ||      \\ already allocated
       (*p <= len)))     \\ too small ???
  p = p + (*p & -2);     \\ goto next block
```

  - 모든 블록(할당 및 가용블록 포함)의 수에 비례해서 시간이 소요
  - 실제로는 리스트 시작부분에 작은 조각들이 다수 발생할 수 있다
- *다음할당 Next fit: (Donald Knuth 에 의해 제안됨)*
  - first-fit과 유사하지만, 이전 검색이 종료된 위치에서 검색을 시작
  - 연구결과 단편화 성능은 더 나쁨
- *최적할당 Best fit:*
  - 리스트를 검색해서 가장 근접한 크기의 블록을 선택
  - 조각을 작게 해준다 – 대부분 단편화를 개선해준다
  - 대개 최초할당보다 느리게 동작한다
- 세가지 검색 방법을 비교할 수 있는가?

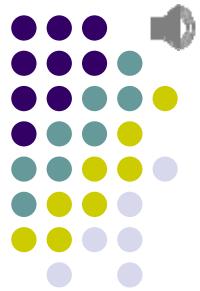
비트 필드 사용법

- Header 표시방법 :
- 마스크와 비트 연산자

```
#define SIZEMASK            (~0x7)
#define PACK(size, alloc)   ((size) | (alloc))
#define getSize(x)           ((x)->size & SIZEMASK)
```

- 비트 필드 bitfields

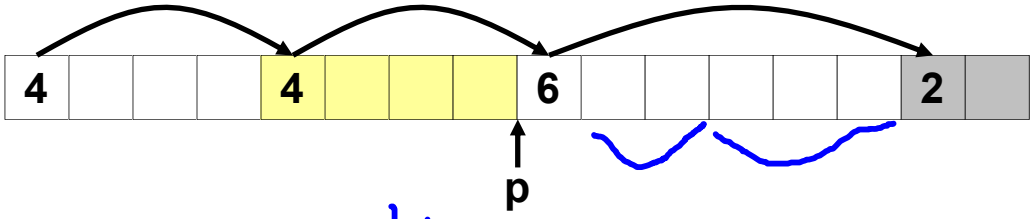
```
struct
{
   unsigned allocated:1;
   unsigned size:31;
} Header;
```



4. 간접리스트 : 프리 블록 관리

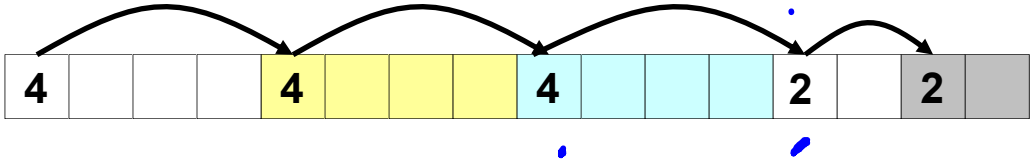
간접 리스트 : 4. Free 블록 관리(split?)

- 가용블록에서 할당하기 – *쪼개기(split)*
  - 할당된 공간이 가용한 공간보다 크기가 더 작을 수 있으므로, 이 블록을 쪼갠다

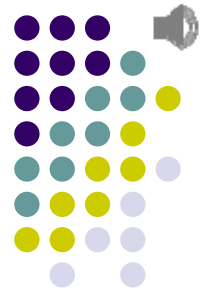



```
void addblock(ptr p, int len) {
  int newsize = ((len + 1) >> 1) << 1;  // add 1 and round up
  int oldsize = *p & -2;                // mask out low bit
  *p = newsize | 1;                     // set new length
  if (newsize < oldsize)
    *(p+newsize) = oldsize - newsize;   // set length in remaining
}                                       //   part of block
```

addblock(p, 4)



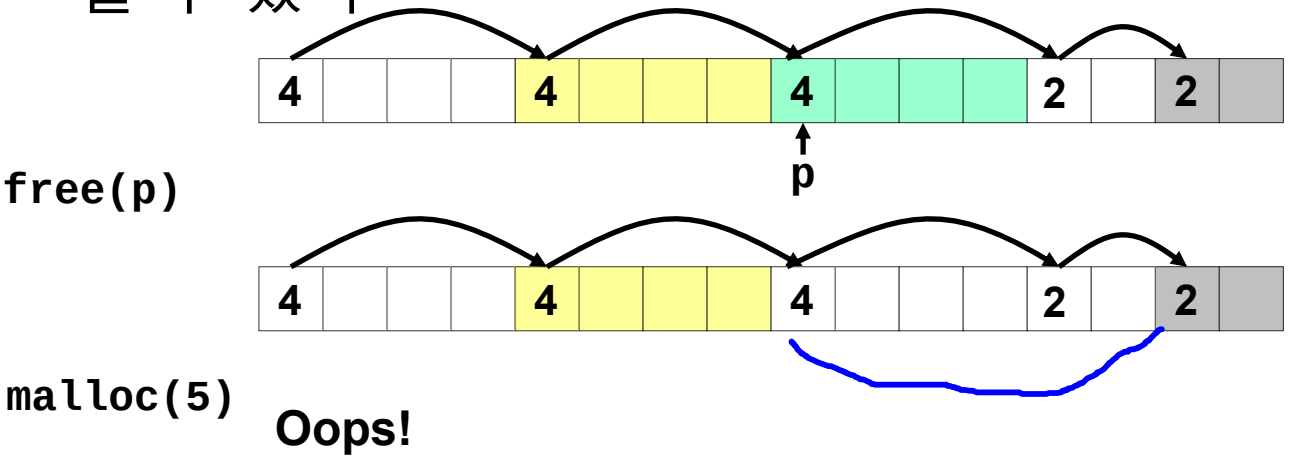
간접 리스트 : 블록 free 관리(coalesce?)



- 가장 간단한 구현:
  - 할당 플래그만 0으로 세팅

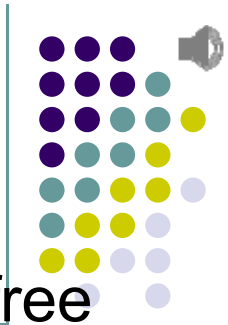
```
void free_block(ptr p) { *p = *p & -2}
```

  - 하지만, 잘못된 단편화(false fragementation)가 발생할 수 있다



가용공간이 있음에도 불구하고, 할당기는 할당할 블록을 찾지 못한다

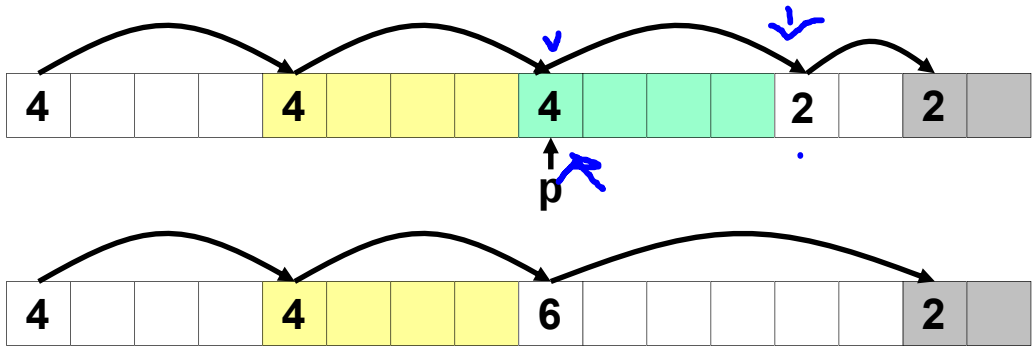
간접 리스트 : 결합(Coalescing)



- 다음 또는 이전 블록이 free 하면 함께 연결해서 더 큰 free 블럭을 만든다
  - 다음 블록과 결합하기

```
void free_block(ptr p) {
    *p = *p & -2;          // clear allocated flag
    next = p + *p;         // find next block
    if ((*next & 1) == 0)
      *p = *p + *next;     // add to this block if
}                          //    not allocated
```

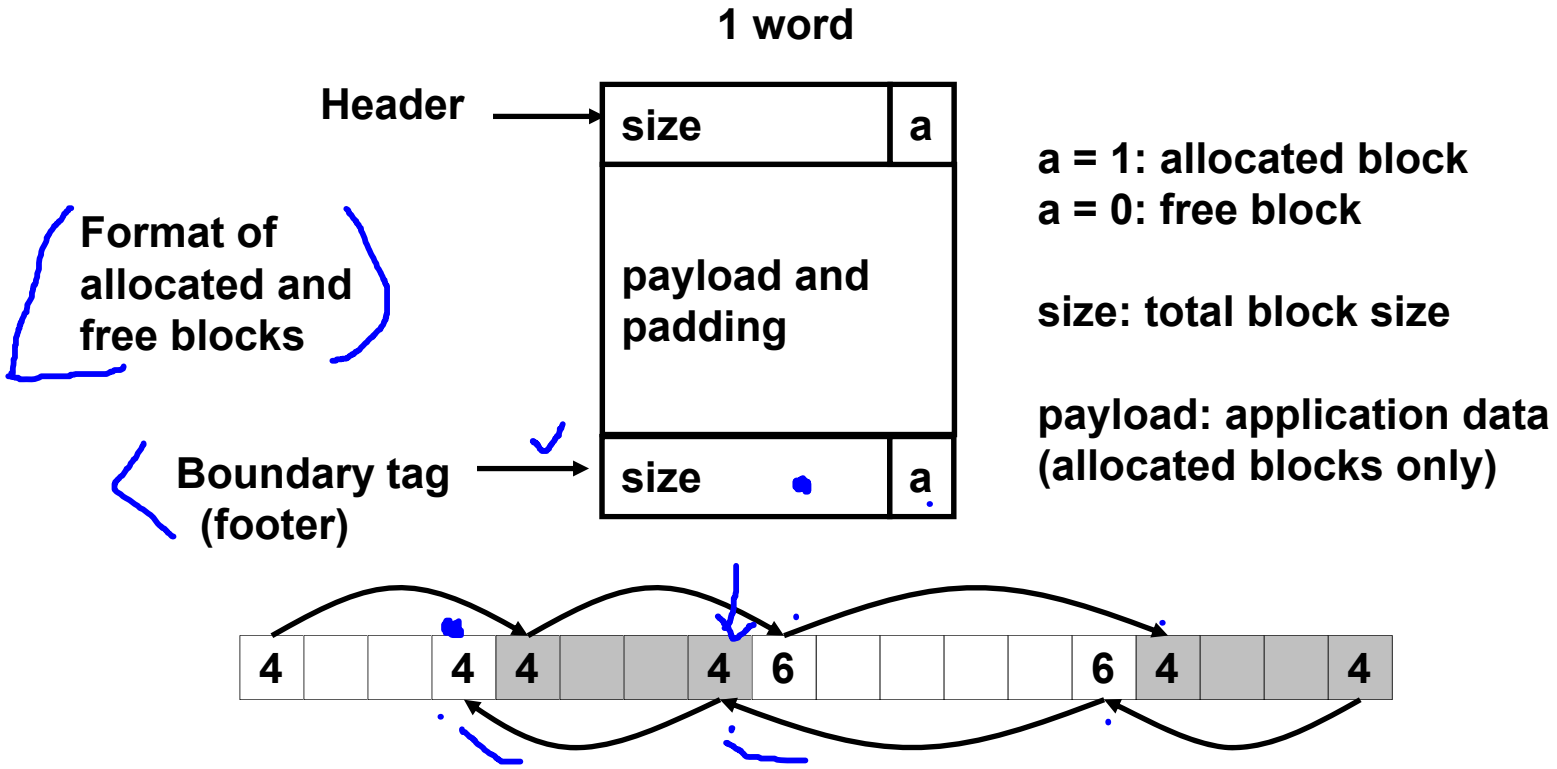
free(p)



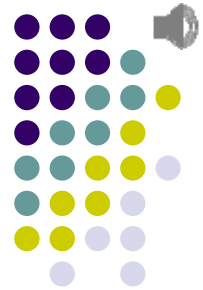
- 하지만 앞 블록과는 어떻게 결합할 수 있는가?

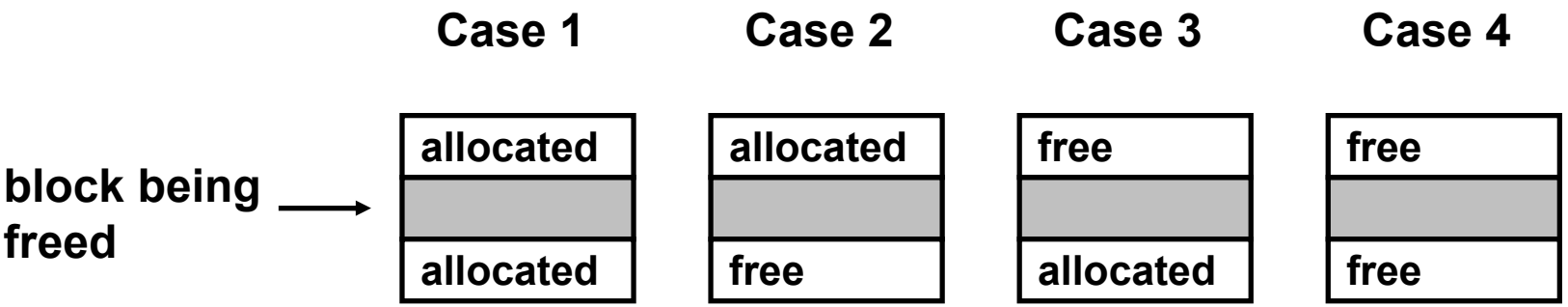
간접 리스트 : 양방향 연결

- *경계 태그 Boundary tags* [Knuth73]
  - 프리한 블록의 마지막에 헤더를 복사해서 사용
  - 리스트를 거꾸로 따라갈 수 있게 해준다. 그러나, 추가적인 공간이 소요된다
  - 중요하고 일반적인 기법!

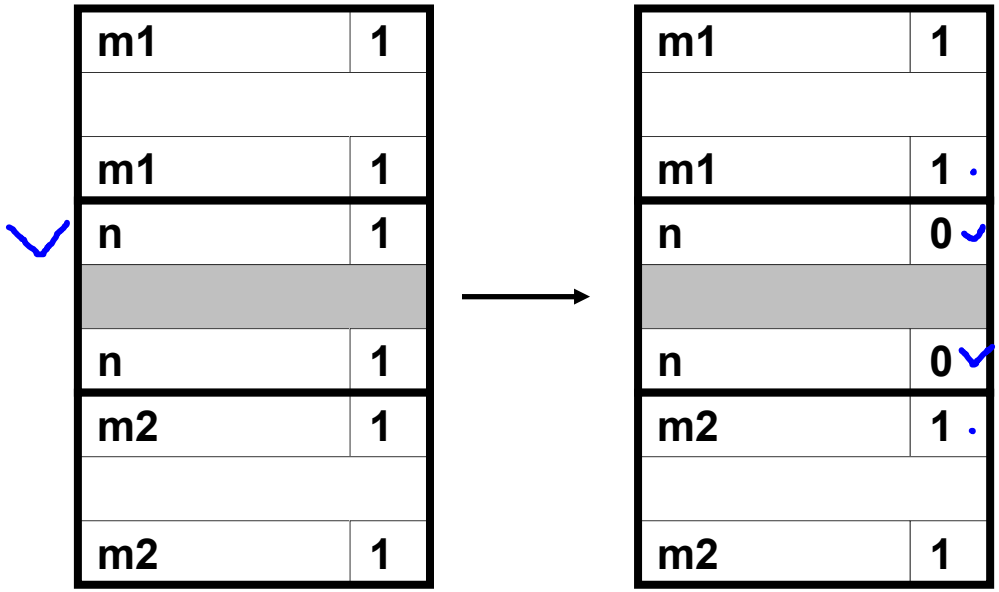


상수 소요시간 인접 합병법 (Coalesce방법)

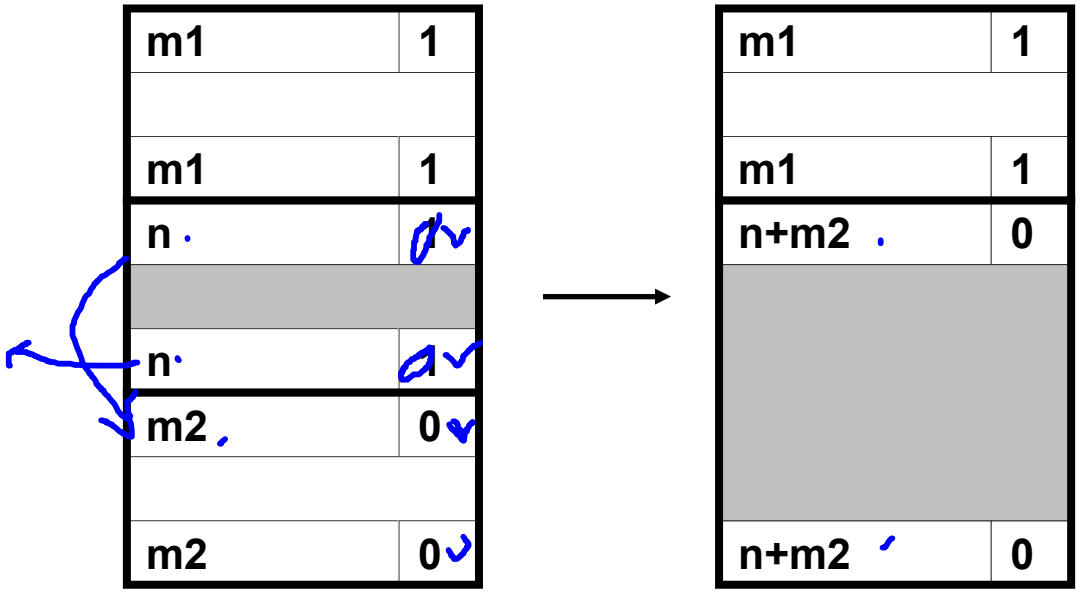




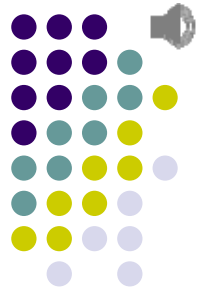
상수시간 연결법 (Case 1)

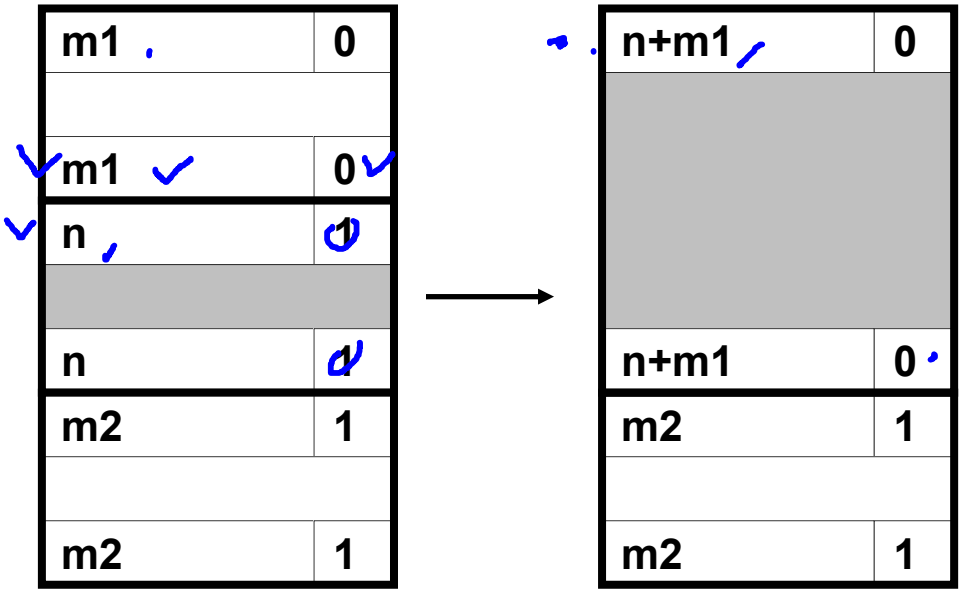


상수시간 연결법 (Case 2)

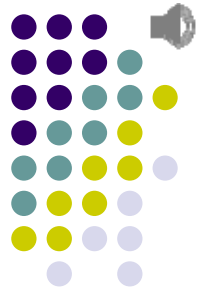


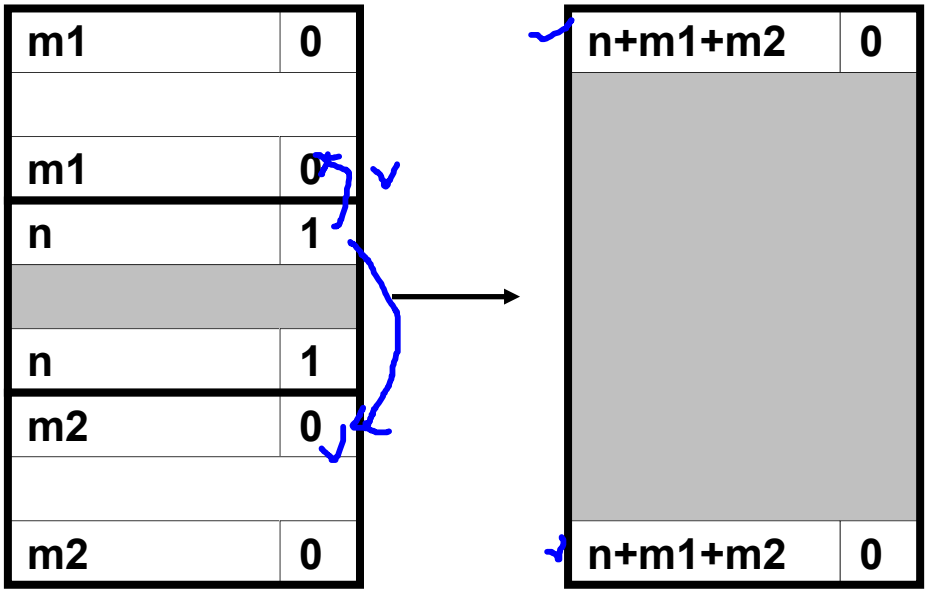
상수시간 연결법 (Case 3)



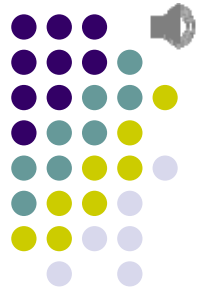


상수시간 연결법 (Case 4)





실습과 다음 주 준비



- 실습: Malloc Lab 1

- 다음주 강의 동영상: 동적메모리 2
- 예습 질문은 개인과제로 올림.