8장. 교착 상태(Deadlock)

순천향대학교 컴퓨터공학과
이 상 정

강의 목표 및 내용

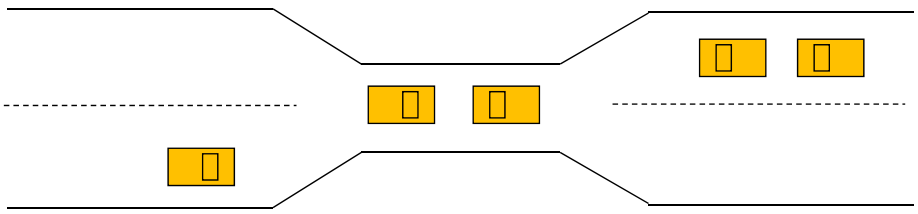
- 목표
  - 병행 프로세스의 집합이 작업을 완료할 수 없도록 하는 교착 상태의 표현과 기술 방법 소개
  - 컴퓨터 시스템에서의 교착 상태를 예방하거나 회피하는 여러 방법들 소개
- 내용
  - 시스템 모델
  - 교착 상태의 특징
  - 교착 상태 처리 방법
  - 교착 상태 예방
  - 교착 상태 회피
  - 교착 상태 탐지
  - 교착 상태로부터 회복

교착 상태 문제 (Deadlock Problem)

- 프로세스가 한 자원을 점유하고 봉쇄되고(blocking), 다른 프로세스가 이 자원을 획득하기 위해 요청 후 기다린다면 이 프로세스들은 교착 상태(deadlock)에 있고 함

- 예
  - 하나의 프린터와 하나의 DVD 드라이브가 있는 시스템
  - 프로세스 P_i 는 DVD 드라이브를 점유하고, 프로세스 P_j는 프린터를 점유한다고 가정
  - P_i가 프린터를 요청하고, P_j가 DVD 드라이브를 요청한다면 교착 상태가 발생
  - 각각은 프린터와 DVD를 방출(release)하는 사건을 기다리는데, 이 사건은 서로 대기 중인 프로세스들 중의 어느 하나에 의해서만 발생이 가능

교량 통과 예



- 교량에서는 한 방향으로만 운행
- 교량의 각 부분은 자원으로 간주
- 교착 상태 발생 시 한 자동차가 후진해야만 해결 (자원의 선점과 롤백(rolleback))
- 교착 상태 발생 시 여러 대의 차량이 후진할 수도 있음
- 기아 상태(starvation) 발생 가능성
- 대부분의 운영체제가 교착 상태를 방지하거나 다루지 못함

시스템 모델 (System Model)

- 시스템의 자원(resource)은 다수의 유형으로 분할
  - 메모리 공간, CPU 주기, 파일, 입/출력 장치(프린터, DVD 드라이브 등) 등이 자원 유형들의 예
- 각 자원의 유형은 동등한 다수의 인스턴스(instance)들로 구성
  - 한 시스템이 두 개의 CPU를 가진다면, 자원 유형 CPU는 두 개의 인스턴스를 가짐
- 프로세스는 다음 순서로만 자원을 사용
  - 요청(request): 요청이 즉시 허용되지 않으면(예를 들어, 자원이 다른 프로세스에 의해 사용될 경우), 요청 프로세스는 자원을 얻을 때까지 대기
  - 사용(use): 프로세스는 자원에 대해 작업을 수행
  - 방출(release): 프로세스가 자원을 방출

교착 상태의 특징

- 교착 상태는 한 시스템에 다음 네 가지 조건이 동시에 성립될 때 발생
  - 상호 배제 (mutual exclusion)
    - 한 번에 오직 한 프로세스만이 한 자원을 사용
  - 점유하며 대기(hold and wait)
    - 최소한 하나의 자원을 점유한 프로세스가 다른 프로세스에 의해 점유된 자원을 추가로 얻기 위해 대기해야 함
  - 비선점 (no preemption)
    - 자원이 강제적으로 방출될 수 없고, 점유하고 있는 프로세스가 태스크를 종료한 후 그 프로세스에 의해 자발적으로만 방출
  - 순환 대기 (circular wait)
    - 대기하고 있는 프로세스의 집합 $\{P_0, P_1, \cdots, P_n\}$ 에서 P_0는 P_1이 점유한 자원을 대기하고, P_1 은 P_2 가 점유한 자원을 대기하고, P_2, ..., P_{n-1} 은 P_n 이 점유한 자원을 대기하며, P_n 은 P_0 가 점유한 자원을 대기함

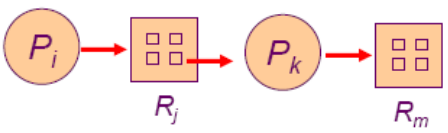
다중 스레드 응용에서의 교착 상태

- 교착 상태는 시스템 콜(자원 요청, 해제), 동기화를 위한 락킹 등에 의해서 발생
- 다중 스레드 응용에서 뮤텍스락, 세마포 등을 사용한 동기화 시에는 응용 개발자는 교착 상태의 가능성을 고려해야 함

P_0	P_1
wait(S);	wait(Q);
wait(Q);	wait(S);
.	.
.	.
.	.
signal(S);	signal(Q);
signal(Q);	signal(S);

자원 할당 그래프 (1) (Resource-Allocation Graph)

- 정점(vertex) V의 집합과 간선(edge) E의 집합으로 구성된 그래프
- V는 두 가지 유형으로 구별
  - $P = \{P_1, P_2, \cdots, P_n\}$, 시스템 내의 모든 활성 프로세스의 집합
  - $R = \{R_1, R_2, \cdots, R_m\}$, 시스템 내의 모든 자원 유형의 집합
- 방향 간선(directed edge)은 $P_i \rightarrow R_j$
  - 프로세스 P_i가 자원 유형 R_j의 인스턴스를 하나 요청
- 방향 간선은 $R_j \rightarrow P_k$
  - 자원 유형 R_j의 한 인스턴스가 프로세스 P_k에 할당

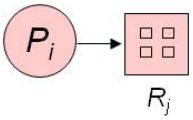


자원 할당 그래프 (2)

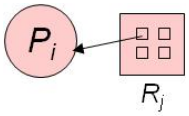
- 프로세스 P_i 또는 스레드 T_i

- 4개의 인스턴스들을 갖는 자원

- P_i가 R_j의 인스턴스를 요청

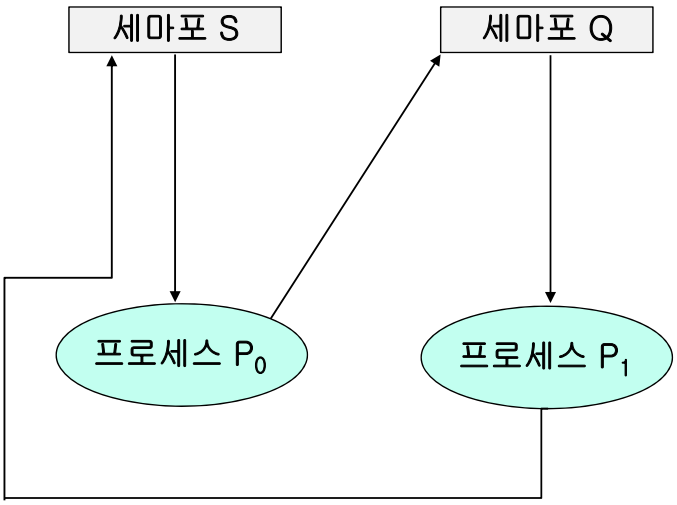


- P_i가 R_j의 인스턴스를 할당 받아 점유

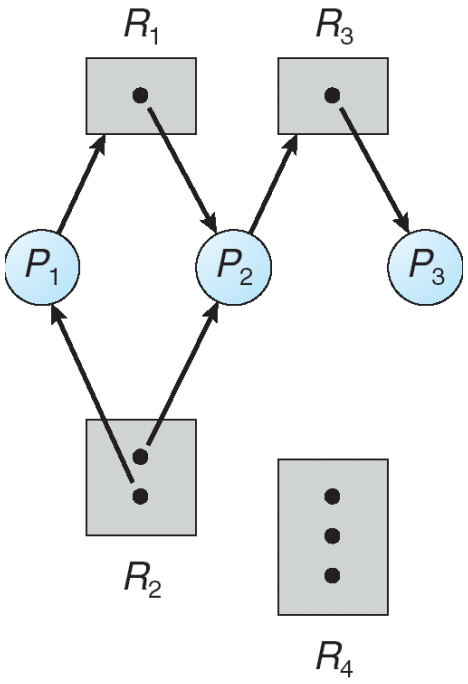


자원 할당 그래프 예

P_0	P_1
wait(S);	wait(Q);
wait(Q);	wait(S);
.	.
.	.
.	.
signal(S);	signal(Q);
signal(Q);	signal(S);



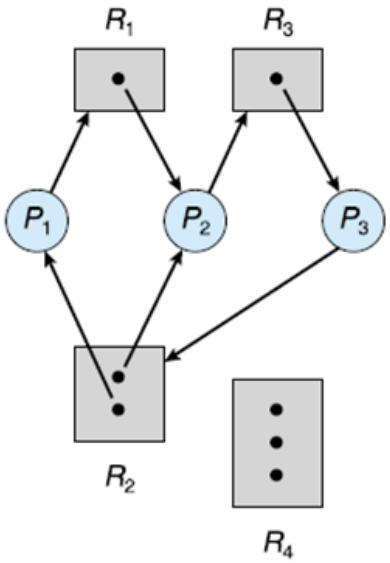
자원 할당 그래프 예



교착 상태를 갖는 자원 할당 그래프

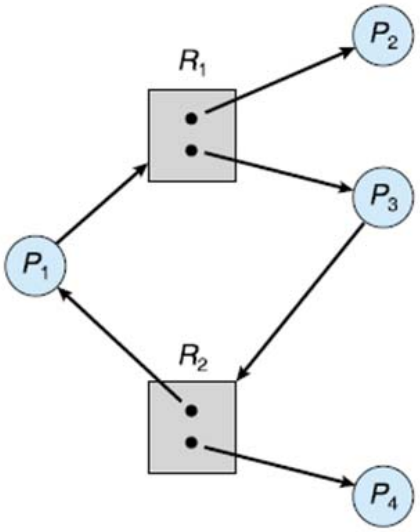
- 그래프가 사이클(cycle)을 포함하면 교착 상태
  - 각 자원 유형이 여러 개의 인스턴스를 가지면,
    사이클이 반드시 교착 상태가 발생했음을 의미하지는 않음

  - $P_1 \rightarrow R_1 \rightarrow P_2 \rightarrow R_3 \rightarrow P_3 \rightarrow R_2 \rightarrow P_1$
  - $P_2 \rightarrow R_3 \rightarrow P_3 \rightarrow R_2 \rightarrow P_2$



사이클이 있으면서 교착 상태가 아닌 자원 할당 그래프

- $P_1 \rightarrow R_1 \rightarrow P_3 \rightarrow R_2 \rightarrow P_1$
  - 프로세스 P_4가 자원 유형 R_2의 인스턴스를 방출하면 그 자원이 P_3에 할당될 수 있고, 그 경우 사이클이 없어짐



자원 할당 그래프 요약

- 자원 할당 그래프에 사이클이 없다면, 시스템은 교착 상태가 아님

- 사이클이 있는 경우
  - 자원 유형 당 하나의 인스턴스만 있다면 교착상태
  - 자원 유형 당 여러 개의 인스턴스가 있다면 교착 상태의 가능성

교착 상태 처리 방법

- 원칙적으로 교착 상태 문제를 처리하는 세 가지 방법
  - 시스템이 결코 교착 상태가 되지 않도록 보장하기 위하여 교착 상태를 예방하거나 회피하는 프로토콜을 사용
  - 시스템이 교착 상태가 되도록 허용한 다음에 회복시키는 방법
  - 문제를 무시하고, 교착 상태가 시스템에서 결코 발생하지 않는 척 함
    - UNIX와 Windows를 포함해 대부분의 운영체제가 사용하는 방법

교착 상태 예방 (Deadlock Prevention) - 상호배제

- 교착 상태를 발생시키는 네 가지 조건 중에서 최소한 하나가 성립하지 않도록 보장

- 상호 배제 (Mutual Exclusion)
  - 공유 가능한 자원들은 배타적인 접근을 요구하지 않아서 교착상태 발생 시키지 않음
    - 읽기 전용 파일 등
  - 상호 배제 조건은 공유가 불가능한 자원에 대해서는 반드시 성립해야 함
    - 프린터 등
    - 일반적으로 상호 배제 조건을 거부함으로써 교착 상태를 예방하는 것은 불가능

교착 상태 예방 - 점유하며 대기

❑ 점유하며 대기(Hold and Wait)

- 프로세스가 자원을 요청할 때는, 다른 자원들을 점유하지 않을 것을 반드시 보장해야 함
- 각 프로세스가 실행되기 전에 사용되는 모든 자원을 요청하고 모두 할당 받을 것을 요구
- 다른 프로세스가 자원을 전혀 갖고 있지 않을 때만 자원을 요청할 수 있도록 허용
- 단점
  - 많은 자원들이 할당된 후 오랜 동안 사용되지 않기 때문에 자원의 이용도가 낮음
  - 기아 (starvation) 상태 유발 가능성

교착 상태 예방 - 비선점

❑ 비선점 (No Preemption)

- 이미 할당된 자원이 선점되지 않아야 한다는 조건이 성립되지 않도록 보장하는 프로토콜을 사용
- 만일 어떤 자원을 점유하고 있는 프로세스가 즉시 할당할 수 없는 다른 자원을 요청하면(즉, 프로세스가 반드시 대기해야 하면), 현재 점유하고 있는 모든 자원들이 선점
  - 즉, 현재 점유하고 있는 자원들을 방출 (release)
- 선점된 자원들은 기다리고 있는 프로세스 자원들의 리스트에 추가
- 자원이 선점된 프로세스는 자신이 요청하고 있는 새로운 자원은 물론 이미 점유하였던 옛 자원들을 다시 획득할 수 있을 때에만 다시 시작

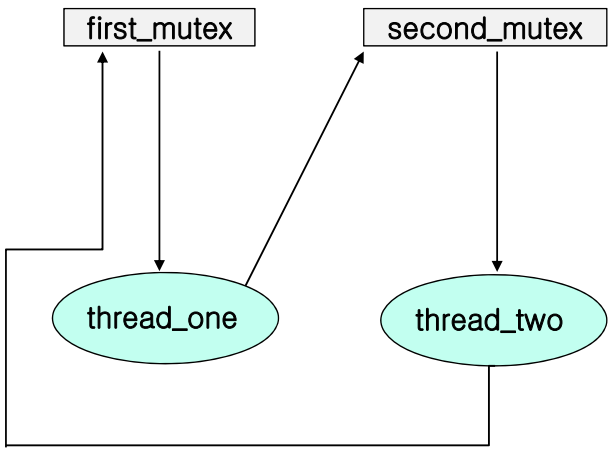
교착 상태 예방 - 순환 대기(Circular Wait)

- 순환 대기 (Circular Wait)
  - 순환 대기 조건이 성립되지 않도록 모든 자원 유형들에게 전체적인 순서를 부여
  - 각 프로세스가 열거된 순서대로 오름차순으로 자원을 요청하도록 요구

- 교착 상태 예방 알고리즘은 요청 방법을 제약하여 교착 상태를 예방
  - 이 제약은 교착 상태를 위해 필요한 조건 중 최소한 하나가 발생하지 않도록 보장
  - 이런 방식으로 교착 상태를 예방할 때 가능한 부수적인 문제는 장치의 이용률이 저하되고 시스템 처리율(throughput)이 감소

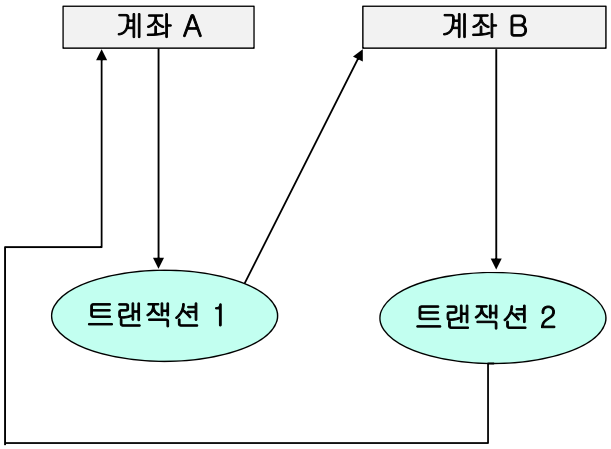
교착상태 예 (1)

```
/* thread one runs in this function */
void *do_work_one(void *param)
{
   pthread_mutex_lock(&first mutex);
   pthread_mutex_lock(&second mutex);
   /** * Do some work */
   pthread_mutex_unlock(&second mutex);
   pthread_mutex_unlock(&first mutex);
   pthread_exit(0);
}
/* thread two runs in this function */
void *do work two(void *param)
{
   pthread_mutex_lock(&second mutex);
   pthread_mutex_lock(&first mutex);
   /** * Do some work */
   pthread_mutex_unlock(&first mutex);
   pthread_mutex_unlock(&second mutex);
   pthread_exit(0);
}
```



교착상태 예 (2)

```
void transaction(Account from, Account to, double amount)
{
    mutex lock1, lock2;
    lock1 = get_lock(from);
    lock2 = get_lock(to);
    acquire(lock1);
        acquire(lock2);
            withdraw(from, amount);
            deposit(to, amount);
        release(lock2);
    release(lock1);
}
```



- 트랜잭션 1,2가 병행 실행
  - 트랜잭션 1은 계좌 A(from)에서 계좌 B(to)로 5만원 이체
  - 트랜잭션2는 계좌 B(from)에서 계좌 A(to)로 10만원 이체

교착 상태 회피 (Deadlock Avoidance)

- 교착 상태를 회피하는 다른 대안은 자원이 어떻게 요청될지에 대한 추가 정보를 제공하도록 요구
  - 가장 단순하고 제일 유용한 모델은 각 프로세스가 자신이 필요로 하는 각 유형의 자원마다 최대 수를 선언하도록 요구
  - 교착 상태 회피 알고리즘은 시스템에 순환 대기 상황이 발생하지 않도록 자원 할당 상태를 검사
  - 자원 할당 상태는 가용 자원의 수, 할당된 자원의 수 그리고 프로세스들의 최대 요구 수에 의해 정의

안전 상태 (Safe State)

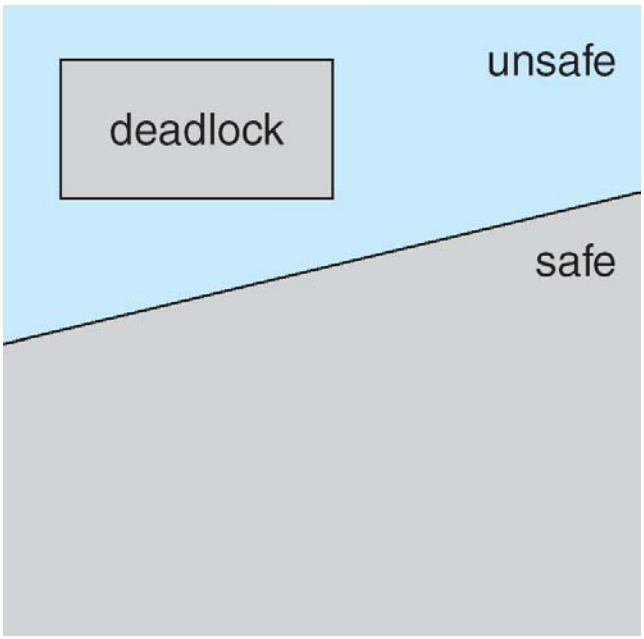
- 시스템이 모든 프로세스들의 안전 순서(safe sequence)를 찾을 수 있다면 시스템은 안전(safe)

- P_i가 요청하는 자원을 시스템에 현재 남아 있는 자원과 앞에서 수행을 마칠 모든 프로세스 P_j들이($j < i$) 반납하는 자원들로 만족된다면 $\langle P_1, P_2, \ldots, P_n \rangle$과 같은 프로세스 순서(process sequence)가 안전
  - P_i가 요청할 자원들을 즉시 만족시킬 수 없으면 모든 P_j들이 마친 후까지 P_i는 기다림
  - P_j가 끝나면 P_i는 반납한 자원들을 가지고 수행
  - P_i 가 끝났을 때 P_{i+1}은 필요한 모든 자원들을 얻게 되고 이와 같은 상황이 계속 반복

안전, 불안전, 교착상태

- 시스템이 안전 상태
  => 교착 상태 아님
- 시스템이 불안전 상태
  => 교착 상태 가능성

- 교착 상태 회피
  - 시스템이 불안전 상태로 진입하지 않도록 보장



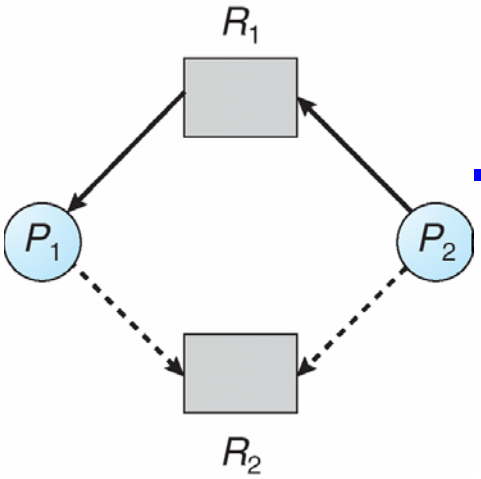
교착 상태 회피 알고리즘

- 2가지 유형의 교착 상태 알고리즘
- 단일 인스턴스의 자원 유형
  => 자원 할당 그래프 알고리즘 적용
- 다수의 인스턴스를 갖는 자언 유형
  => 은행원 알고리즘 적용

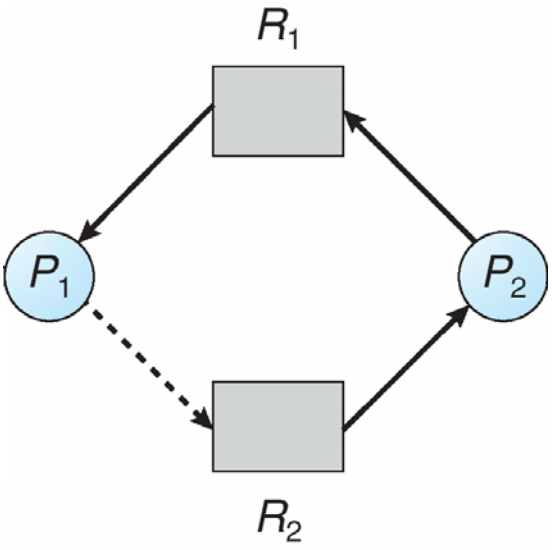
자원 할당 그래프 알고리즘 (1)
(Resource-Allocation Graph Algorithm)

- 교착 상태 회피를 위해 자원 할당 그래프를 변형
- 요청 간선(request edge)과 할당 간선(assignment edge)에 추가하여 예약 간선(claim edge)을 도입
  - 예약 간선 $P_i \rightarrow R_j$는 P_i가 미래에 자원 R_j를 요청할 것이라는 의미
  - 점선(dashed line)으로 표시
  - 프로세스 P_i가 자원 R_j를 요청하면, 예약 간선 $P_i \rightarrow R_j$는 요청 간선으로 변환
  - P_i가 자원 R_j를 방출할 때, 할당 간선 $R_j \rightarrow P_i$는 예약 간선 $P_i \rightarrow R_j$로 다시 변환
- 시스템에서 자원이 반드시 미리 예약되어야 함
  - 프로세스 P_i가 실행되기 전에 프로세스의 모든 예약 간선들이 자원 할당 그래프에 표시되어야 함

자원 할당 그래프 예



- P_2가 R_2를 요청하면?
  - R_2 를 할당할 수 없음
  - 할당하면 사이클이 발생하여 교착 상태



불안전한 상태의 자원 할당 그래프

자원 할당 그래프 알고리즘 (2)

- P_i 가 자원 R_j를 요청하는 경우 가정
- 요청 간선을 할당 간선으로 변환해도 자원 할당 그래프에서 사이클이 발생하지 않으면 요청을 수락

은행원 알고리즘 (Banker's Algorithm)

- 은행원 알고리즘은 자원 종류(유형) 당 여러 개의 인스턴스를 갖는 경우에도 적용
- 각 프로세스는 필요한 자원의 최대 개수를 자원 종류마다 미리 신고
- 프로세스가 자원들을 요청 시 요청을 수락하면 시스템이 계속 안전 상태에 머무르게 되는지 여부를 판단
  - 계속 안전하게 된다면 그 요청을 수락
  - 안전하지 않으면 프로세스의 요청은 수락되지 않고 다른 프로세스가 끝나기까지 기다림

은행원 알고리즘의 자료 구조 (1)

- n은 프로세스의 수이고, m이 자원 종류의 수
- Available
  - 각 종류의 자원이 현재 몇 개가 사용 가능한지를 나타내는 벡터로 크기가 m
  - Available[j] = k 라면 현재 R_j를 k 개 사용할 수 있다는 의미
- Max
  - 각 프로세스가 최대로 필요로 하는 자원의 개수를 나타내는 행렬로 크기가 n × m
  - Max[i,j] = k라면 P_i가 R_j를 최대 k 개까지 요청할 수 있음을 의미
- Allocation
  - 각 프로세스에 현재 할당된 자원의 개수를 나타내는 행렬로 크기가 n ×m
  - Allocation[i,j] = k라면 현재 P_i가 R_j를 k 개 사용중임을 의미

은행원 알고리즘의 자료 구조 (2)

- Need
  - 각 프로세스가 향후 요청할 수 있는 자원의 개수를 나타내는 행렬로 크기가 n ×m
  - Need[i,j] = k라면 P_i가 향후 R_j를 k 개까지 더 요청할 수 있음을 의미
  - Need[i,j] = Max[i,j] - Allocation[i,j]

안전성 알고리즘 (Safety Algorithm)

1. Work = Available로 초기화. i =0, 1, ..., n - 1에 대해서 Finish[i] = false로 초기화
   (Work와 Finish는 크기가 m과 n인 벡터)
2. 아래 두 조건을 만족시키는 i 값을 탐색
   - Finish[i] == false
   - $Need_i \leq Work$

   위 조건을 만족하는 i 값을 찾을 수 없다면 step 4로 이동
3. $Work = Work + Allocation_i$
   Finish[i] = true
   Go to step 2.
4. 모든 i 값에 대해 Finish[i] == true이면 이 시스템은 안전 상태에 있음

자원 요청 알고리즘 (Resource-Request Algorithm)

- $Request_i$는 프로세스 P_i의 요청 벡터
  - $Request_i[j] == k$ 라면 P_i가 R_j를 k 개 요청하고 있음을 의미

1. 만일 $Request_i \le Need_i$이면 step 2로 이동하고, 아니면 시스템에 있는 개수보다 더 많이 요청했으므로 오류로 처리
2. 만일 $Request_i \le Available$이면 step 3으로 간다. 아니면 요청한 자원이 당장은 없으므로 P_i는 기다림
3. 마치 시스템이 P_i에게 자원을 할당해준 것처럼 시스템 상태 정보를 아래처럼 변경 조사

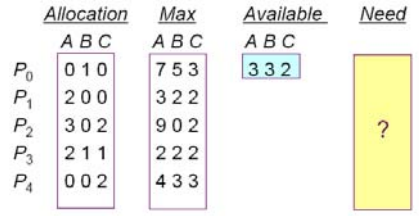
$$Available = Available - Request_i;$$
$$Allocation_i = Allocation_i + Request_i;$$
$$Need_i = Need_i - Request_i;$$

만일 이렇게 바뀐 상태가 안전하다면 Pi에게 자원을 할당
새로운 상태가 불안전 하다면, 위의 자원 할당 상태는 원상태로 복원 되고 P_i는 $Request_i$가 만족되기까지 기다림

은행원 알고리즘 적용 예 (1)

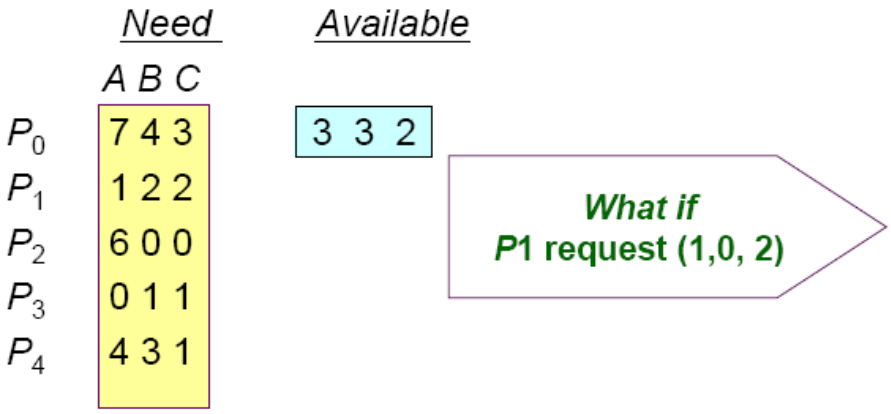
- P_0부터 P_4의 5개 프로세스
- A, B, C 세 가지 종류의 자원
  - A 자원이 10개, B 자원이 5개, C 자원이 7개
- 임의의 시간 T_0에 시스템은 아래와 같은 상태

	Allocation	*Max*	*Available*	*Need*
	A B C	*A B C*	*A B C*	
P_0	0 1 0	7 5 3	3 3 2	?
P_1	2 0 0	3 2 2		
P_2	3 0 2	9 0 2		
P_3	2 1 1	2 2 2		
P_4	0 0 2	4 3 3		



은행원 알고리즘 적용 예 (2)

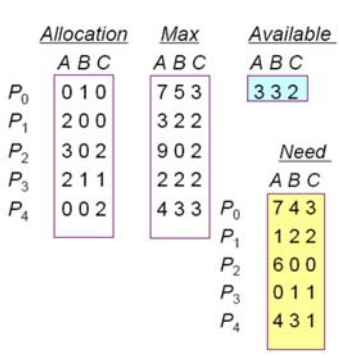
- Need 행렬의 값은 (Max - Allocation)로 계산

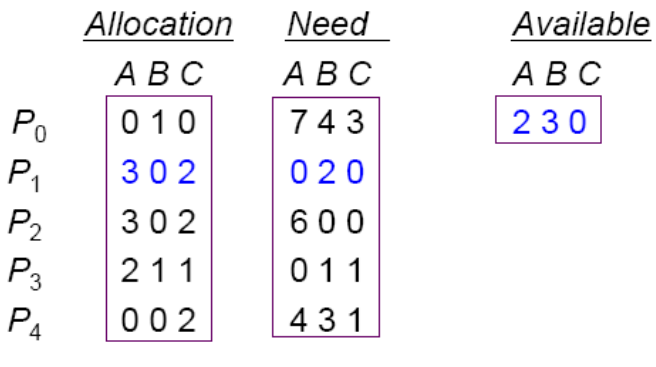


- $\langle P_1, P_3, P_4, P_2, P_0 \rangle$ 순서가 안전성 기준을 만족하기 때문에 안전

은행원 알고리즘 적용 예 - P_1 이 (1,0,2) 요청

- P_1이 A 자원 한 개와 C 자원 두 개를 추가로 요청하는 경우
  - $Request_1 = (1, 0, 2)$, $Request_1 \leq Available$ $(1, 0, 2) \leq (3, 3, 2)$





  - $\langle P_1, P_3, P_4, P_0, P_2 \rangle$ 순서가 안전성 기준을 만족하기 때문에 안전
- P_1이 요청 후 P4 의 (3,3,0) 요청이 수락 가능?
  - 자원 부족으로 요청 수락 못함
- P_1이 요청 후 P0 의 (0,2,0) 요청이 수락 가능?
  - 시스템이 불완전 상태로 요청 수락 못함

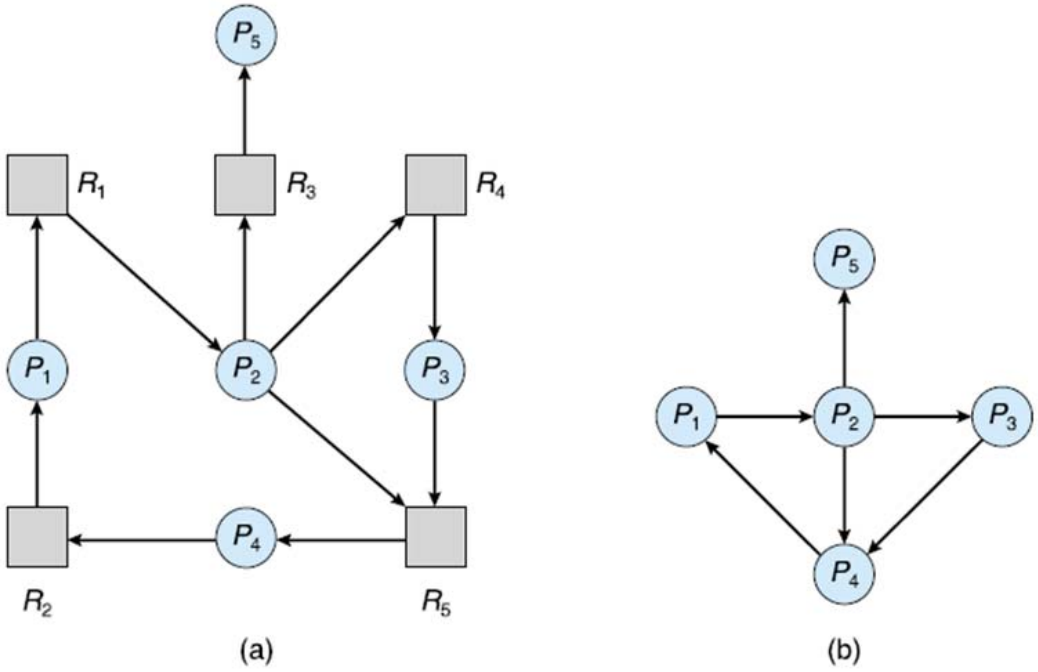
교착 상태 탐지(Deadlock Detection)

- 교착 상태 발생이 가능한 시스템에서는 다음들을 지원해야 함
  - 교착 상태가 발생했는지 결정하기 위해 시스템의 상태를 검사하는 알고리즘 (detection algorithm)
  - 교착 상태로부터 회복하는 방식 (recovery scheme)
- 2가지 유형 논의
  - 각 자원 유형마다 하나의 인스턴스를 갖는 시스템
  - 자원 유형마다 다수의 인스턴스를 갖는 시스템

각 자원 유형이 한 개씩 있는 경우 (Single Instance of Each Resource Type)

- 대기 그래프(wait-for graph) 사용
  - 자원 할당 그래프로부터 자원 유형의 노드를 제거
  - $P_i \rightarrow P_j$
    - 프로세스 P_j가 가지고 있는 자원을 프로세스 P_i가 요청하여 기다림
- 주기적으로 그래프에서 사이클을 조사하여 교착상태 탐지
- 그래프에서 사이클을 탐지하는 알고리즘은 $O(n^2)$의 연산을 요구
  - n은 그래프에 있는 정점들(vertices)의 수이다.

자원 할당 그래프와 대기 그래프



각 유형의 자원을 여러 개 가진 경우 (Several Instances of a Resource Type)

- 은행원 알고리즘과 같이 시시각각 그 내용이 달라지는 자료 구조를 사용, $O(m \times n^2)$
- 가용(Available)
  - 각 종류의 자원이 현재 몇 개가 가용한지를 나타내는 벡터로 크기가 m
- 할당(Allocation)
  - 각 프로세스에게 현재 할당되어 있는 자원의 개수를 나타내는 행렬로 크기가 n × m
- 요청(Request)
  - 각 프로세스가 현재 요청중인 자원의 개수를 나타내는 행렬로 크기가 n ×m
  - Request[i, j] == k라면 현재 P_i가 R_j를 k 개 요청중임을 의미

탐지 알고리즘 (Detection Algorithm)

1. Work = Available로 초기화. i =0, 1, ..., n - 1에 대해서 $Allocation_i \neq 0$이면 Finish[i] = false, 아니면 Finish[i] = true (Work와 Finish는 크기가 m과 n인 벡터)
2. 아래 두 조건을 만족시키는 i 값을 탐색
   - Finish[i] == false
   - $Request_i \leq Work$

   위 조건을 만족하는 i 값을 찾을 수 없다면 step 4로 이동
3. $Work = Work + Allocation_i$
   Finish[i] = true
   step 2로 이동
4. 어떠한 i 값에 대해 ($0 \leq i \leq n$) Finish[i] == false이면 P_i가 교착 상태 (즉, 시스템이 교착 상태)

탐지 알고리즘 예 (1)

- P_0부터 P_4의 5개 프로세스
- 자원 A (7개 인스턴스), B (2), C (6)
- 임의의 시간 T_0에 시스템은 아래와 같은 상태

	Allocation	*Request*	*Available*
	A B C	*A B C*	*A B C*
P_0	0 1 0	0 0 0	0 0 0
P_1	2 0 0	2 0 2	
P_2	3 0 3	0 0 0	
P_3	2 1 1	1 0 0	
P_4	0 0 2	0 0 2	

- $\langle P_0, P_2, P_3, P_1, P_4 \rangle$ 순서와 같이 작업들을 다 끝낼 수 있고, 모든 i에 대해서 Finish[i] == true

탐지 알고리즘 예 (2)

- P_2 가 C 자원을 한 개 더 요청

	Allocation	Available
	A B C	A B C
P_0	0 1 0	0 0 0
P_1	2 0 0	
P_2	3 0 3	
P_3	2 1 1	
P_4	0 0 2	

	Request	
	A B C	
P_0	0 0 0	0 0 0
P_1	2 0 2	
P_2	0 0 1	
P_3	1 0 0	
P_4	0 0 2	

- P_0의 자원을 회수해도 다른 프로세스들이 요구 자원을 충족시켜 줄 방법이 없기 때문에 P_1, P_2, P_3과 P_4가 교착 상태에 연루

탐지 알고리즘 사용 (Detection-Algorithm Usage)

- 탐지 알고리즘의 수행 빈도는 다음을 고려
  - 교착 상태가 얼마나 자주 일어나는가?
  - 교착 상태가 일어나면 통상 몇 개의 프로세스가 거기에 연루되는가?
- 프로세스의 요청이 즉시 만족되지 않을 때마다 탐지 알고리즘을 수행하면 교착 상태에 연루된 프로세스들 뿐 아니라 교착 상태를 야기한 장본인 프로세스도 탐지
  - 자원을 요청할 때마다 탐지 알고리즘을 돌리면 너무 오버헤드가 큼
- 탐지 알고리즘을 가끔씩만 돌리면 한꺼번에 여러 개의 사이클이 탐지가 되어 어느 프로세스가 최종적으로 교착 상태를 야기한 장본인인지 알아내기 어려움

교착 상태로부터 회복 - 프로세스 종료

- 프로세스를 중지시킴으로써 교착 상태를 제거
  - 교착 상태 프로세스를 모두 중지
  - 교착 상태가 제거될 때까지 한 프로세스씩 중지
- 부분 종료 방식의 경우 다음을 고려하여 중지될 프로세스의 선택
  - 프로세스의 우선순위
  - 지금까지 프로세스가 수행된 시간과 지정된 일을 종료하는 데 더 필요한 시간
  - 프로세스가 사용한 자원 유형과 수(예를 들어, 자원들을 선점하기가 단순한지 여부)
  - 프로세스가 종료하기 위해 더 필요한 자원의 수
  - 얼마나 많은 수의 프로세스가 종료되어야 하는지,
  - 프로세스가 대화형(interactive)인지 일괄 처리(batch)인지 여부

교착 상태로부터 회복 - 자원 선점

- 자원 선점을 이용해 교착 상태를 제거하려면 다음을 고려
  - 희생자 선택 (selecting a victim)
    - 어느 자원과 어느 프로세스들이 선점될 것인가를 결정
    - 비용을 최소화하기 위해 선점의 순서를 결정
  - 후퇴 (rollback)
    - 중지될 프로세스를 안전한 상태로 후퇴시키고, 그 상태로부터 다시 시작
    - 안전 상태가 어떤 것인지를 결정하기 어렵기 때문에, 가장 단순한 해결안은 프로세스를 중지(abort)시키고 재시작
  - 기아 상태(Starvation)
    - 동일한 프로세스가 항상 희생자로 선택되어 자신의 태스크를 결코 완료하지 못하는 기아 상태 발생하는 것을 방지
    - 일반적인 해결 방법은 비용 요소에 후퇴의 횟수를 포함

연습문제

- 연습문제 8.3
- 연습문제 8.9

특별 실습과제

- 다음 은행원 알고리즘을 프로그램으로 구현하여라.
  - 안전성 알고리즘 , 자원 요청 알고리즘
  - 연습문제 8.3, 8.9 적용 테스트
  - 구현 언어는 자유 선택 (C, C++, Java, C#, Python, ...)