



## 6. 병렬 알고리즘 - QUEUE

멀티쓰레드 프로그래밍  
정내훈

# 내용

---

- 풀
- 큐
- ABA

# 풀(Pool)

- 리스트는 Set객체
- Queue와 Stack은 Pool 객체
- Pool객체
  - 같은 아이템의 복수 존재를 허용
  - Contains()메소드를 항상 제공하지 않는다.
  - Get()과 Set()메소드를 제공한다.
  - 보통 생산자-소비자 문제의 버퍼로 사용된다.

# 풀(POOL)

- 풀의 종류

- 길이제한

- 있다 : 제한 큐
      - 구현하기 쉽다.
      - 생산자와 소비자의 간격을 제한한다.

- 없다 : 무제한 큐

- 메소드의 성질

- 완전 (total) : 특정 조건을 기다릴 필요가 없을 때
      - 비어있는 풀에서 get() 할 때 실패 코드를 반환
    - 부분적(partial) : 특정 조건의 만족을 기다릴 때
      - 비어있는 풀에서 get() 할 때 다른 누군가가 Set() 할 때 까지 기다림
    - 동기적(synchronous)
      - 다른 스레드의 메소드 호출의 종첩을 필요로 할 때
      - 랑데부(rendezvous) 라고도 한다..

# 큐 (QUEUE)

- 정의 Queue<T>
  - 타입 T인 아이템의 순서가 있는 수열
  - Enq(x) 메소드
    - 아이템 x를 큐의 끝 (tail)에 추가한다.
  - Deq() 메소드
    - 큐의 다른쪽 끝 (head)에서 아이템을 제거해서 반환한다.

# 큐 (QUEUE)

- 제한 큐 및 부분 큐

- Lock-Free의 구현성격과는 맞지 않으므로 생략

- ConditionVariable이라는 메소드가 필요

- Lock을 가진 채로 Block()이 필요

- Block()시 Lock을 해제, 다시 스케줄 될 때 Lock() 재 획득

- 운영체제 호출 필요.

- 스레드 스케줄링과 연동이 필수

- 무제한 완전 큐를 구현해보자.

# 무제한 완전 큐

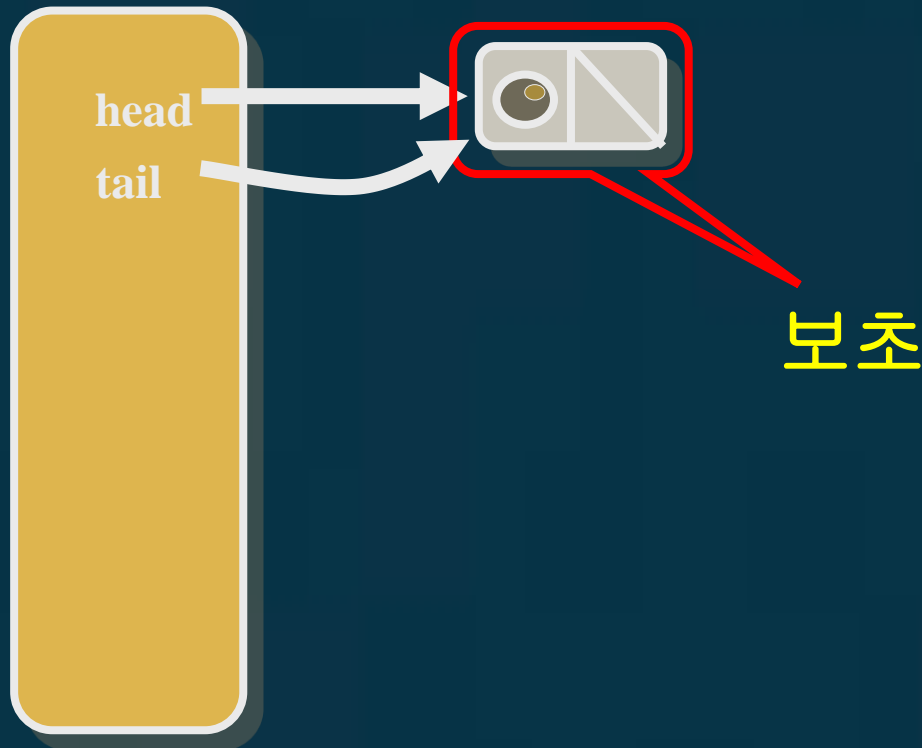
- Coarse Grain

- 모든 메소드를 Locking
  - enq용 Lock과 deq용 Lock을 따로 갖는다.
- 가장 간단한 구현
- 성능 비교의 시작
- enq(X)와 deq()메소드를 갖는다.
- Head pointer에서 deq를 하고
- Tail pointer에 enq를 한다.

# 무제한 완전 큐

- Coarse Grain

- 구조 : 초기 형태, 비어 있는 큐



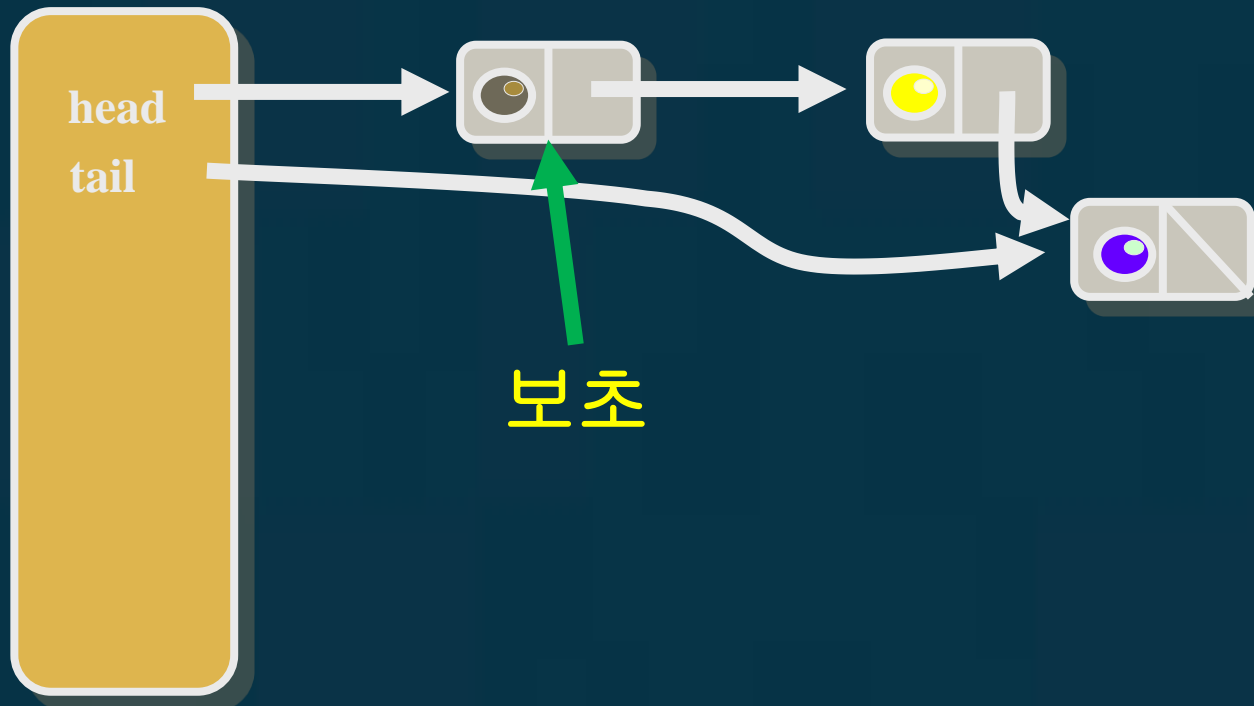


# 무제한 완전 큐

- Coarse Grain

- 구조 : 일반적 형태

- 노드가 2개 추가된 경우



# 무제한 완전 큐

## ● Coarse Grain

### — 구현

- C++ : dequeue시 delete 필요

```
1  public void enq(T x) {  
2      enqLock.lock();  
3      try {  
4          Node e = new Node(x);  
5          tail.next = e;  
6          tail = e;  
7      } finally {  
8          enqLock.unlock();  
9      }  
10 }
```

```
11 public T deq() throws EmptyException {  
12     T result;  
13     deqLock.lock();  
14     try {  
15         if (head.next == null) {  
16             throw new EmptyException();  
17         }  
18         result = head.next.value;  
19         head = head.next;  
20     } finally {  
21         deqLock.unlock();  
22     }  
23     return result;  
24 }
```

# 무제한 완전 큐

- 실습 #24 : Coarse Grain 무제한 완전 큐를 구현하시오.
  - 아래 벤치마크 프로그램을 사용하시오.
  - thread 개수 1, 2, 4, 8에서의 성능을 비교하시오.
    - 각각 실행 전 Queue 를 클리어 하시오

```
void ThreadFunc(int threadNum)
{
    for (int i=0; i<100000000 / threadNum; i++) {
        if ((rand() % 2) || i < 32 / threadNum) {
            UnboundedQ.Enqueue(i);
        } else {
            UnboundedQ.Dequeue();
        }
    }
    return 0;
}
```

# 비멈춤 동기화

- 속제 9 :

- 성긴 동기화 큐의 구현

- 제출물

- .cpp 파일
    - 쓰레드 개수 별 실행속도 비교표
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)

- 제출 : eclclass

- 수목반 : 11월 12일 오전 11시

# 비멈춤 동기화

- 성능 (수목)
  - Nomutex : 851
  - 1 : 1234
  - 2 : 1378
  - 4 : 1555
  - 8 : 1669

# 무제한 무잠금 큐

- 무잠금 (Lock Free)
  - CAS를 사용
  - 다른 스레드가 임의의 위치에 멈추어 있어도 진행 보장

# 무제한 무잠금 큐

- ENQUEUE의 기본 동작
  - Tail이 가리키는 Node에 CAS로 새 노드를 추가.
  - 실패하면 재시도
  - 성공하면 Tail을 이동
- 이 아이디어를 기반으로 무잠금 구현 시작

# 무제한 무잠금 큐

- ENQUEUE

— 직관적인 구현

```
void enq(int x) {  
    Node *e = new Node(x);  
    while (true) {  
        if (CAS(&tail->next, NULL, &e)) {  
            tail = &e;  
            return;  
        }  
    }  
}
```



# 무제한 무잠금 큐

- ENQUEUE
  - Non-blocking이 아니다.
  - CAS을 성공하고 tail을 업데이트 하지 않을 경우 모든 다른 스레드가 기다리게 된다.
- 해결책
  - Tail의 전진이 모든 스레드에서 가능하게 한다.

# 무제한 무잠금 큐

## ● ENQUEUE

### — 1차 수정

```
void enq(int x) {  
    Node *e = new Node(x);  
    while (true) {  
        if (CAS(&(tail->next), NULL, &e)) {  
            tail = e;  
            return;  
        }  
        if (nullptr != tail->next) tail = tail->next;  
    }  
}
```

# 무제한 무잠금 큐

## ● ENQUEUE

- 문제 : 쓰레드가 읽히면서 Tail을 과거의 값으로 덮어쓸 수 있다.
- 해결 : CAS사용
  - tail값을 last에 저장해서 비교
  - next값 저장 필요

```
void enq(int x) {
    Node *e = new Node(x);
    while (true) {
        Node *last = tail;
        Node *next = last->next;
        if (last != tail) continue;
        if (nullptr == next) {
            if (CAS(&(last->next), nullptr, e)) {
                CAS(&tail, last, e);
                return;
            }
        } else CAS(&tail, last, next);
    }
}
```

# 무제한 무잠금 큐

- DEQUEUE : 1차 구현
  - 비어 있는지 검사
  - Head를 전진 시키면 deque 끝

```
int deq(int x) {  
    while (true) {  
        Node *first = head;  
        if (first->next == nullptr) EMPTY_ERROR();  
        if (!CAS(&head, first, first->next))  
            continue;  
        int value = first->next->item;  
        delete first;  
        return value;  
    }  
}
```

# 무제한 무잠금 큐

## ● DEQUEUE

```
-int value = first->next->item;
```

- 다른 스레드에서 first->next가 가리키는 노드를 꺼내서 delete시키고 어떤 일이 벌어질지 알 수 없음!!!
- value값이 queue원래 있었던 값이라는 보장이 없다.



# 무제한 무잠금 큐

## ● DEQUEUE

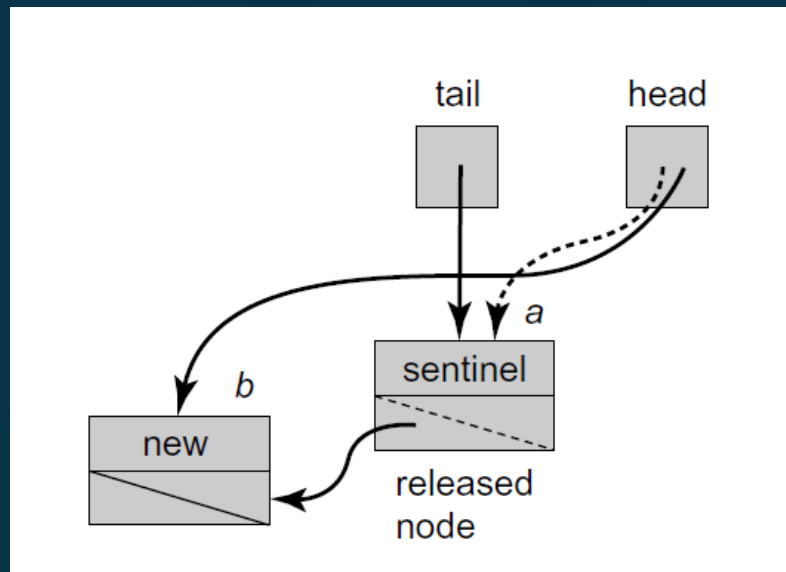
### —Next의 사용

```
int deq(int x) {
    while (true) {
        Node *first = head;
        Node *next = first->next;
        if (first != head) continue;
        if (next == nullptr) EMPTY_ERROR();
        int value = next->item;
        if (false == CAS(&head, first, next))
            continue;
        delete first;
        return value;
    }
}
```

# 무제한 무잠금 큐

## ● DEQUEUE

- Tail과 Head가 만나는 경우?
- Tail이 enq하는 도중에 deq가 일어나서 tail이 삭제된 보초노드를 가리키는 순간이 생긴다.



# 무제한 무잠금 큐

- DEQUEUE

- Enq에서의 tail의 전진을 보조해 준다.

```
int deq(int x) {
    while (true) {
        Node *first = head;
        Node *last = tail;
        Node *next = first->next;
        if (first != head) continue;
        if (nullptr == next) EMPTY_ERROR();
        if (first == last) {
            CAS(&tail, last, next);
            continue;
        }
        int value = next->item;
        if (false == CAS(&head, first, next)) continue;
        delete first;
        return value;
    }
}
```



# 무제한 무잠금 큐

- 주의

- 컴파일러 최적화 문제

```
Node * volatile tail;  
Node * volatile head;
```

# 무제한 무잠금 큐

- 실습 #25 : 무제한 무잠금 Lock-Free Queue를 구현하라.
  - 실습 #24의 벤치마크프로그램을 사용하여 실습 #24와 속도비교를 실시하라.

# 속제 10

– Lock-Free 무제한 Queue의 구현

– 제출물

- .cpp 파일
- 실행속도 비교표 (성긴동기화)
- CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
- 여러 번 실행 시 thread 개수가 많을 경우 드물게 크래시나 무한루프를 경험할 수 있다.
  - 가능하면 debugging해보고 완벽히 수정되지 않더라도 제출할 것

– 제출 : eclass

- 화목반 : 11월 12일 목요일 오전 11시
- 수목반 : 11월 12일 목요일 오전 11시

# 성능 (화목반-A조)

- Single thread : 762ms
- Coars Grain : single lock
  - 1 : 1309
  - 2 : 1337
  - 4 : 1707
  - 8 : 2064
- Coarse Grain : dual lock
  - 1 : 1253
  - 2 : 1386
  - 4 : 1591
  - 8 : 1681
- LockFree
  - 1 : 946
  - 2 : 1032
  - 4 : 893
  - 8 : 1264

# 성능 (화목반-B조)

- Single thread : 841ms
- Coarse Grain : dual lock
  - 1 : 1522
  - 2 : 1545
  - 4 : 1657
  - 8 : 1693
- LockFree
  - 1 : 987
  - 2 : 1013
  - 4 : 840
  - 8 : 1229

# 성능 (수목반)

– Nomutex : 851

– 1 : 1234

– 2 : 1378

– 4 : 1555

– 8 : 1669

– LockFree

• 1 : 1015

• 2 : 979

• 4 : 829

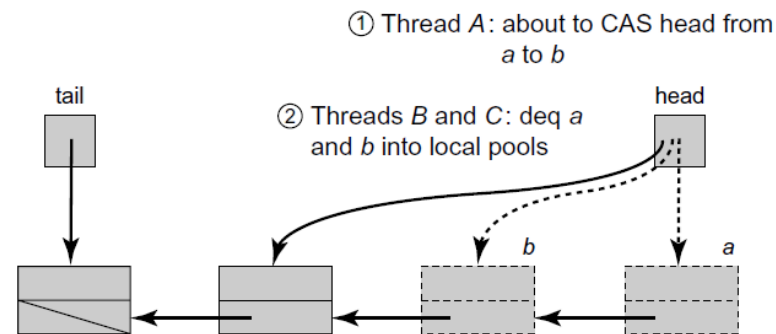
• 8 : 1073

# ABA

- 노드의 재사용시 생기는 문제
  - new(), free()는 메모리를 재사용한다.
  - CAS사용시 다른 스레드에서 그 주소를 재사용했을 가능성이 있다.

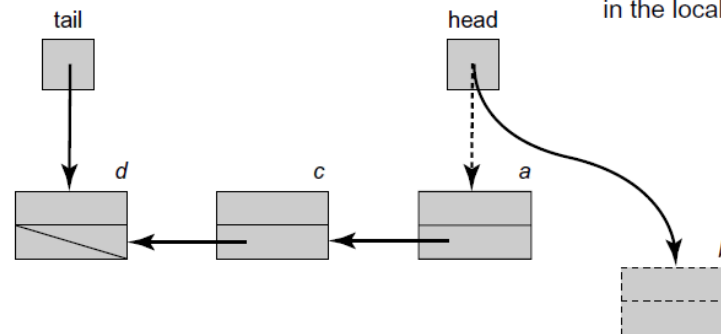
# ABA

(a)



(b)

③ Threads B and C: enq <sup>c</sup>~~a, b~~, and *d*      ④ Thread A: CAS succeeds, incorrectly pointing to *b* which is still in the local pool





# ABA

- 해결책 (1/3)

- 포인터를 포인터 + 스탬프로 확장하고 포인터 값을 변경할 때마다 스탬프 값을 변경시킨다.

- 구현

- 64비트인 경우 몇 개의 비트를 스탬프에 할당.
      - 32비트인 경우 복잡...

- LL, SC명령의 사용 (ARM, Alpha, PowerPC)

- 값을 검사하는 것이 아니라 변경 여부를 검사
    - LL, SC 구조는 CAS보다 우월하다.
      - 그러나. LL,SC는 Wait-free가 불가능 하다.

# ABA

- 해결책 (2/3) : 스마트 메모리 관리자
  - Reference Counter를 사용한다.
    - `shared_ptr<>`
    - ‘first’가 첫번째 노드를 가리키고 있는 동안에는 그 노드는 free-list에 들어갈 수 없다.
    - `shared_ptr`에 대한 `atomic_compare_exchange`가 가능하다.
  - Java는 garbage collection을 사용하므로 이러한 문제가 없다.

# ABA

---

- 해결책 (3/3)
  - 별도의 메모리 관리 기법을 사용한다.
  - EBR (Epoch Based Memory Reclamation)
  - Hazard Pointer

# ABA

- Time Stamp Version

```
1  public T deq() throws EmptyException {
2      int[] lastStamp = new int[1];
3      int[] firstStamp = new int[1];
4      int[] nextStamp = new int[1];
5      int[] stamp = new int[1];
6      while (true) {
7          Node first = head.get(firstStamp);
8          Node last = tail.get(lastStamp);
9          Node next = first.next.get(nextStamp);
10         if (first == last) {
11             if (next == null) {
12                 throw new EmptyException();
13             }
14             tail.compareAndSet(last, next,
15                 lastStamp[0], lastStamp[0]+1);
16         } else {
17             T value = next.value;
18             if (head.compareAndSet(first, next, firstStamp[0],
19                 firstStamp[0]+1)) {
20                 free(first);
21                 return value;
22             }
23         }
24     }
```

# 무제한 무잠금 큐

- 실습 #26 : 실습 #25의 Lock-Free Queue에서 ABA문제를 64bit CAS를 사용하여 해결하라.
  - visual studio에서 64비트 data type은 LONGLONG, 혹은 “long long”이다.

```
bool CAS(STPTR *next, NODE* old_p, NODE* new_p, int old_st, int new_st)
{
    STPTR old_v{ old_p, old_st };
    STPTR new_v{ new_p, new_st };
    return atomic_compare_exchange_strong(
        reinterpret_cast<volatile atomic_llong*>(next->ptr),
        reinterpret_cast<long long*>(&old_v.ptr),
        reinterpret_cast<long long*>(new_v.ptr));
}
```

# LF Stamped Queue

- 속제 11 :

- Lock free stamped QUEUE의 구현

- 제출물

- .cpp 파일

- 실행속도 비교표 (Lock버전, Lock free, Lock free stamped)

- CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)

- 제출 : eclass

- 화목 A 조 : 11월 12일 목요일 오전 11시

- 화목 B, 수목 : 11월 17일 화요일 오전 11시

# 성능 (수목반)

- Nomutex : 851

- 1 : 1234

- 2 : 1378

- 4 : 1555

- 8 : 1669

- LockFree

- 1 : 1015

- 2 : 979

- 4 : 829

- 8 : 1073

- LFSTAMPEDQUEUE

- 507

- 650

- 856

- 928

- 946

# ABA

## ● Lock-Free Stamp Queue 문제해결

### – 중간 값 문제

- STAMPED NODE는 64비트 자료구조이고 캐시경계선에 놓일 수 있다.

- 해결

- atomic\_llong으로 선언

```
struct stamped_pointer {  
    long long ptr;  
};
```

- alignas사용

```
struct alignas(8) stamped_pointer {  
    NODE *ptr;  
    int stamp;  
};
```



# ABA

- Lock-Free Stamp Queue 문제해결
  - 128bit CAS
  - LINUX는 `_int128`사용
    - 또는 `__asm__`
  - Windows는 `InterlockedCompareExchange128`사용

```
BOOLEAN InterlockedCompareExchange128(  
    LONG64 volatile *Destination,  
    LONG64           ExchangeHigh,  
    LONG64           ExchangeLow,  
    LONG64           *ComparandResult  
);
```

# ABA

## ● Lock-Free Stamp Queue 문제 해결

### – 메모리 재사용 시 안정성 문제

- head->next->value 접근 시 head가 가리키는 NODE가 재사용 되면서 head->next가 오염될 수 있다.
- 해결
  - free\_list를 사용하여 오염을 막는다.
  - 이 free\_list는 lock\_free 이거나, thread 별로 따로 존재해도 된다.
    - thread\_local 사용.
  - head->next의 nullptr검사 필요.

# ABA

- EBR 샘플

- eClass 실습자료 : ebr\_if\_queue.cpp

- Oversubscription Pattern 문제

# ABA

- 성능

- Intel® Core™ i7-7700@ 3.60Hz, 4Core, Hyperthread, 64GB Memory
- Single Thread : 756ms

Thread	Coarse QUEUE	Lock-Free QUEUE	STAMPED LF QUEUE	EBR LF QUEUE
1	1151	725	1135	473
2	1197	632	1027	534
4	1352	604	1158	652
8	1526	724	1269	774
16	1517	730	1280	790

# 정리

---

- Lock-Free Queue의 구현
- ABA문제
- ABA문제의 해결법