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 중첩을 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)

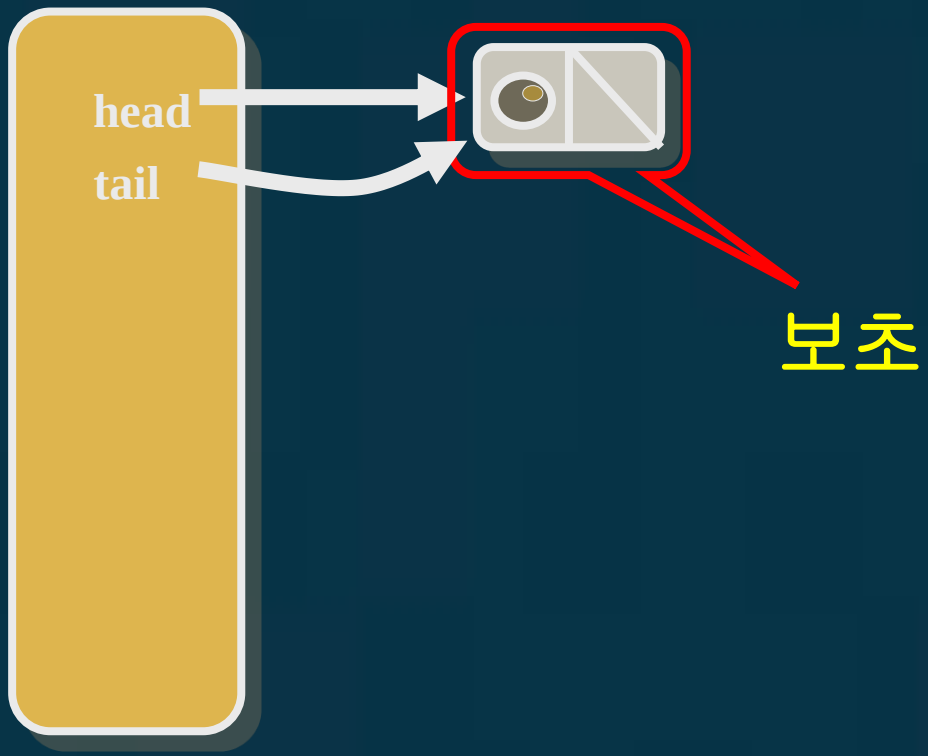
- 제한 큐 및 부분 큐
  - Lock-Free의 구현성격과는 맞지 않으므로 생략
  - ConditionVariable이라는 메소드가 필요
    - Lock을 가진 채로 Block()이 필요
    - Block()시 Lock을 해제, 다시 스케줄 될 때 Lock() 재 획득
    - 운영체제 호출 필요.
      - 쓰레드 스케줄링과 연동이 필수
- 무제한 완전 큐를 구현해보자.

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.

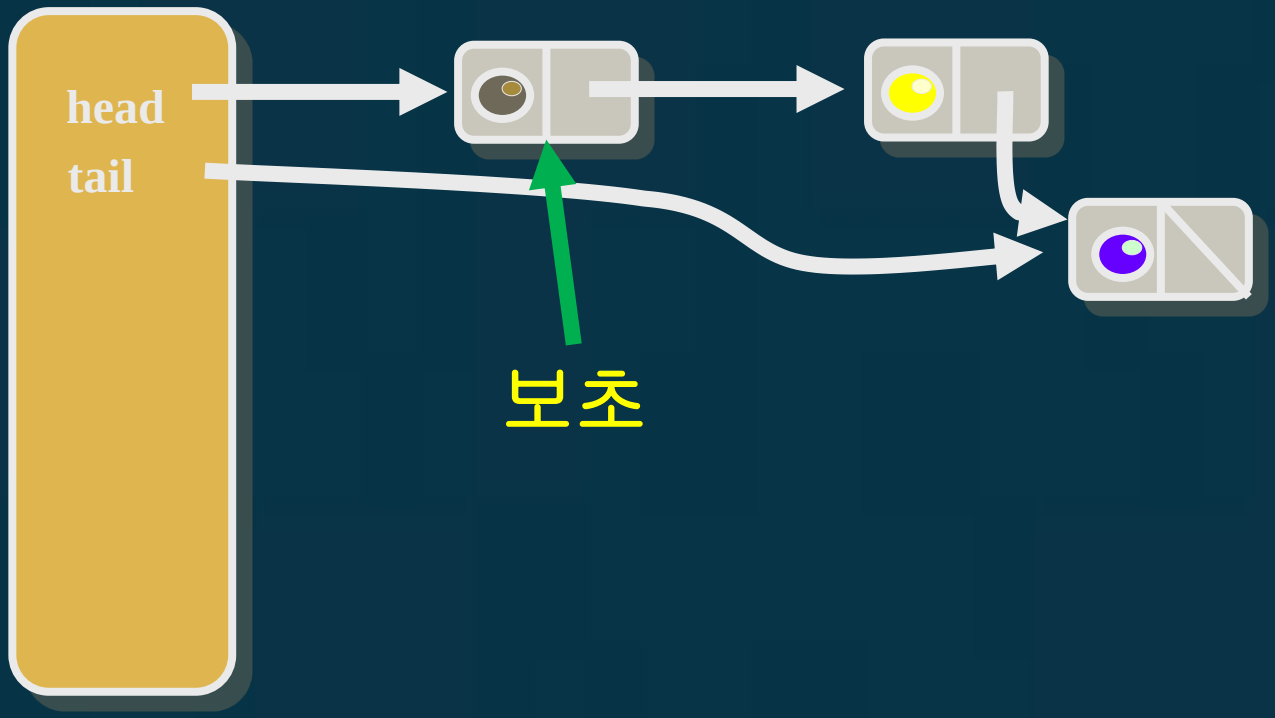
무제한 완전 큐

- 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<10000000 / threadNum; i++) {
      if ((rand() % 2) || i < 2 / threadNum) {
         UnboundedQ.Enq(i);
      } else {
         UnboundedQ.Deq();
      }
   }
   return 0;
}
```

비멈춤 동기화

- 숙제 9 :
  - 성긴 동기화 큐의 구현
  - 제출물
    - .cpp 파일
    - 쓰레드 개수 별 실행속도 비교표
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
  - 제출 : eclass

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 얽히면서 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);
}  }
```

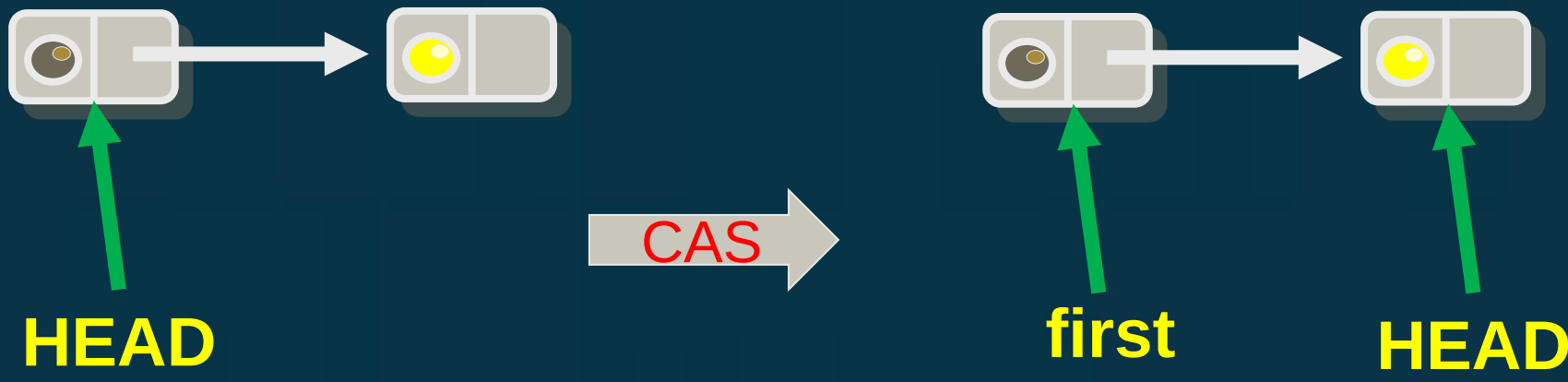
무제한 무잠금 큐

- 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.



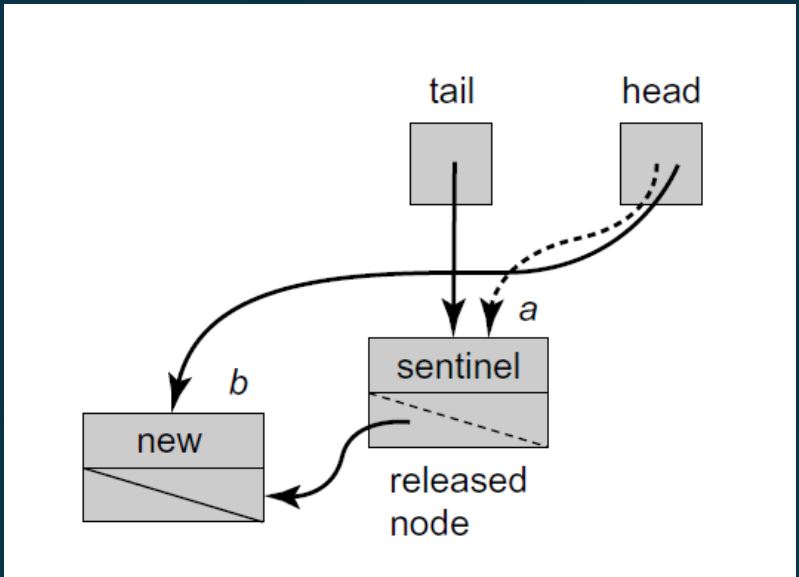
무제한 무잠금 큐

- 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.

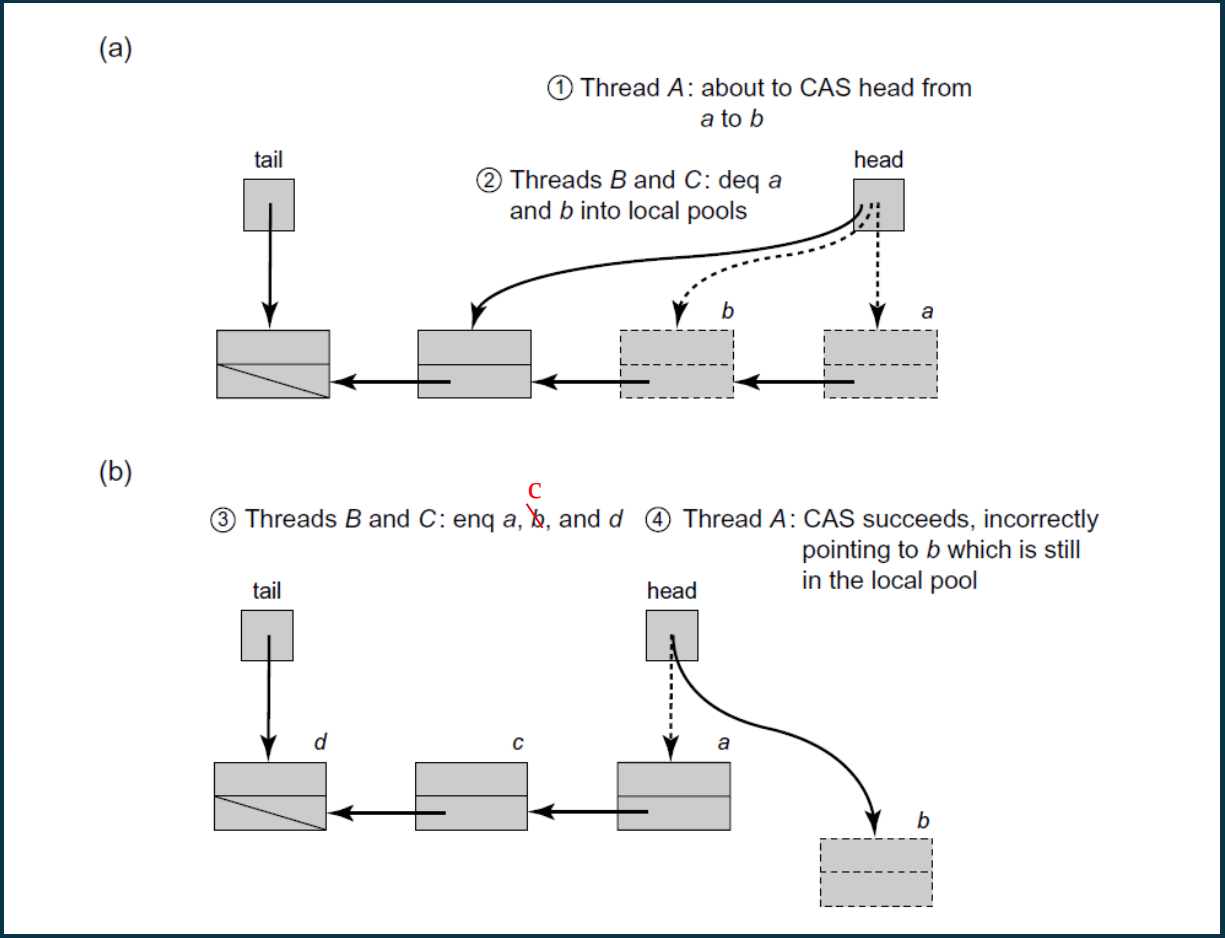
숙제 10

- 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
  - 11월 12일 목요일 오전 11시

ABA

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

ABA


(a)
① Thread A: about to CAS head from a to b
tail
② Threads B and C: deq a and b into local pools
head
b
a
(b)
③ Threads B and C: enq a, b, and d
C
④ Thread A: CAS succeeds, incorrectly pointing to b which is still in the local pool
tail
head
d
c
a
b

ABA

- 해결책 (1/2)
  - 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 (2/2)
  - Reference Counter를 사용한다.
    - shared_ptr<>
    - ‘first’가 첫번째 노드를 가리키고 있는 동안에는 그 노드는 free-list에 들어갈 수 없다.
    - shared_ptr에 대한 atomic_compare_exchange가 가능하다.
  - Java는 garbage collection을 사용하므로 이러한 문제가 없다.

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],
                firstStamp[0]+1)) {
19            free(first);
20            return value;
21          }
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 STAMP_CAS(SPN *addr, SPN old_v, SPN new_v)
{
    new_v.stamp = old_v.stamp + 1;
    return atomic_compare_exchange_strong(
        reinterpret_cast<atomic_llong *>(addr),
        reinterpret_cast<long long *>(&old_v),
        *reinterpret_cast<long long *>(&new_v));
}
```

성긴 동기화

- 숙제 10 :
  - Lock free stamped QUEUE의 구현
  - 제출물
    - .cpp 파일
    - 실행속도 비교표 (Lock버전, Lock free, Lock free stamped)
    - CPU의 종류 (모델명, 코어 개수, 클럭)
  - 제출 : nhjung@kpu.ac.kr
    - 제목 : [2019 멀티코어 프로그래밍 숙제 10] 학번, 이름
    - 11월 12일 화요일 오후 1시까지 제출

성긴 동기화

- Lock-Free Stamp Queue 문제해결
  - 중간 값 문제
    - STAMPED NODE는 64비트 자료구조이고 캐시경계선에 놓일 수 있다.
    - 해결
      - `atomic_llong`으로 선언
  - 메모리 재사용 시 안정성 문제
    - head->next->value 접근 시 head가 가리키는 NODE가 재사용되면서 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.

정리

- Lock-Free Queue의 구현
- ABA문제
- ABA문제의 해결법