

「 **준해양사고(화재)** 」 **약식조사 보고서**

발생일시	비공개(준해양사고)	발생장소	출항 중(비공개)
피해현황	없음(준해양사고)	특별조사부장	김석훈
사고개요 (발생경위)	액화천연가스(LNG)운반선 A호가 oo항으로부터 출항해 이중연료(Dual fuel) 기관의 연료를 가스(LNG)연료로 전환하고 출력을 높이던 중 좌현측 주기관 가스연료주입밸브(Window valve)로부터 고압의 유압유(hydraulic oil)가 분출되었다. A호의 선원들이 해당 밸브의 유압유 공급배관을 즉시 차단하였고, 근접한 배기가스 배관 등 고온표면이 분출된 유압유에 직접 노출되지 않아 해당 상황은 기관실 내 화재로 이어지지는 않았다.		
사실정보	A호는 LNG 운반선으로, 선박용 경유와 LNG를 선택적으로 추진에 이용할 수 있는 이중연료 추진방식의 기관 2기(8,013kw, 좌현 및 우현 각 1기)를 장착하고 있다. 이 선박은 항 내 또는 저출력으로 기관을 운전할 때는 주로 경유를 연료로 사용하고, 항해 중 또는 고출력으로 기관을 운전할 때는 주로 LNG를 연료로 사용해 왔으나, 필요에 따라 2기의 기관에서 이중의 연료를 선택적으로 추진에 사용할 수 있다. A호는 oo항 입항 중 좌현측 이중연료기관을 가스연료로 운전하다 출력을 올릴 때 3번 실린더에서 가스연료 점화가 실패하는 현상을 확인하고, A호를 건조한 조선소의 정비인력을 수배해 준해양사고상황 발생 전 oo항 출항을 앞두고 점검 및 정비를 수행했다. A호는 이 준해양사고 발생 당시 조선소의 보증기간 내에 있었고, 이에 따라 이 준해양사고 발생 전 주기관에 대한 정비도 조선소측에서 보내온 정비인력들이 직접 수행했다. 입항 중 발생한 LNG 연료의 점화실패 원인이 불명확했으므로, A호에 승선한 정비인력들은 정확한 불량의 원인을 찾기 위해 3번 실린더 배기측 Window valve와 4번 실린더 배기측 Window valve를 서로 교환*하였다. * 가스연료 점화 실패문제가 3번 실린더에서 발생했으므로, 밸브 교환 후 4번 실린더에서 다시 문제가 발생하는지 확인하기 위한 목적 A호의 선원들은 선박안전관리절차서에 따라 조선소의 정비인력들과 작업 전 안전회의를 했고, 계속해서 작업과정을 모니터링했다. 또한, 정비인력들이 작업을 마친 후 유압유 펌프를 작동해 자체적으로 누설여부를 점검했으나, Window valve로부터의 누유 등은 발생하지 않았다.		

사실정보(계속)	Window valve는 LNG를 연료로 사용할 때 가스연료의 흐름을 제어하기 위한 것으로, 고압가스를 연소실로 분사할 준비가 된 시간범위(window) 동안 작동하도록 설계되어 연료분사 시점을 정밀하게 제어하고 안전을 확보하는 데 필요한 설비이다. 이 밸브는 주기관의 각 실린더에 2기씩 설치되어 있으며, A호의 좌현 주기관은 총 5개의 실린더로 구성되어 있다. * A호 주기관의 가스연료 분사체계 : ①LNG연료가 연료탱크로부터 가스 축압기(accumulator)로 이동 ②연료는 Window valve(WV)가 열릴 때까지 축압기에서 축압 ③제어장치에 의해 ELWI(Electronic window injection valve)가 작동되면 유압이 WV를 개방시키고 연료가 WV를 거쳐 분사기(Injector)로 이동 ④ELGI(Electronic gas injection valve)가 전기적 신호(Safety unit)에 의해 개방되면 ELWI가 분사기로 유압을 가함 ⑤유압이 가해지면 분사기가 연료분사 해당 작업을 완료한 후 출항을 위해 기관사용을 준비하던 A호의 선원들은 유사시에 대비해 정비부위와 근접한 과급기 및 고온 배기가스 배관을 차단하는 임시 가림막(합판)을 설치하고 현장상황을 확인할 인원을 배치하였다. oo항을 출항한 후 주기관 연료를 저유황 경유에서 LNG로 변경한 뒤 출력을 높이던 A호의 선원들은, 주기관 분당회전수(rpm) 약 60에서 3번 실린더 배기측 Window valve 블록의 상부커버로부터 약 260bar의 유압유가 분출되는 것을 발견했다. 유압유가 분사된 Window valve 블록 인근에 고온의 주기 배기가스 배관(manifold), 주기 실린더 라이너(Cylinder liner) 및 과급기(Turbocharger)가 위치해 있었다. A호 주기관 rpm 60에서 배기가스의 평균온도는 섭씨 307.8도, 과급기 흡입구(T/C inlet)의 온도는 섭씨 357.3도, 실린더 라이너의 온도는 섭씨 약 180도에 달한다. 이 준해양사고 발생 시 분사된 유압유의 물질안전보건자료(MSDS)에 따르면, 이 유압유의 인화점은 섭씨 227도이고, 섭씨 320도 이상일 경우 점화원 없이 자연발화(Auto-ignition)할 수 있다. 준해양사고가 발생한 해역은 LNG 터미널 및 산적화물부두가 밀집한 oo항의 주 출입항로로, 다수의 입출항 선박 및 대기정박 선박이 함께 이용하는 항로이다. A호가 차항인 □□항에 입항한 후 주기관 제조사 정비인력들이 A호에 승선하여, oo항에서 조선소 정비인력들이 해당 Window valve의 상부커버에 장착한 O-ring에 육안으로 확인하기 어려운 미세한 흠결이 있어 고압의 유압유가 밸브블록 틈새로 분출된 것을 확인하였다.
사실의 경과	액화천연가스(LNG)운반선 A호는 oo항에 입항하던 중 좌현측 이중연료기관을 가스연료로 운전하다 출력을 올릴 때 3번 실린더에서 가스연료 점화가 실패하는 현상을 확인했다. A호는 같은 날 18시 경 oo항에 접안했고, 이후 A호를 건조한 조선소의 정비인력들이 가스연료 점화 실패 현상의 원인을 찾기 위해 A호에 승선했다. 해당 정비인력들은 단계적으로 불량의 원인을 찾기 위해 다음 날 오후 16시

사실의 경과(계속)	경 3번 실린더 배기측 Window valve와 4번 실린더 배기측 Window valve를 서로 교환하였다. A호의 선원들은 정비인력들이 작업을 마친 후 유압유 펌프를 작동해 누설여부를 점검했으나, 선박이 접안 중인 상황이었으므로 기관 고출력 상태에서 실제 운항환경을 조성해 시험할 수는 없었다. 차제 누설여부 점검결과 Window valve로부터의 누유 등은 발생하지 않았다. A호 선원들은 같은 날 20시40분경 oo항 출항을 위해 주기사용을 준비하던 중, 유사시에 대비해 정비부위와 근접한 과급기 및 고온 배기가스 배관을 차단하는 임시 가림막(합판)을 설치하고 현장상황을 확인할 인원을 배치하였다. 이후 A호는 약 21시40분경 부두로부터 이안하였고, 다음날 새벽 00시06분경 도선사가 하선한 이후 주기관 연료를 저유황 경유에서 LNG로 변경한 뒤 출력을 높이던 중, 정비를 마친 3번 실린더 배기측 Window valve블록 상부커버로부터 고압의 유압유가 분출되었다. A호의 선원들이 해당 밸브의 유압유 공급배관을 즉시 차단하였고, 선원들이 사전에 설치한 가림막으로 인해 근접한 배기가스 배관 등 고온표면이 분출된 유압유에 직접 노출되지 않았다. 이후 A호 선원들은 좌현측 주기관의 연료를 경유로 교체해 항해를 계속했고, 기관실을 환기하고 분출된 유압유를 청소하는 등의 조치를 취했다. A호는 약 9일 후 차항인 □□항에 입항했고, 기관 제조사 정비인력들이 A호에 승선하여, oo항에서 조선소 정비인력들이 해당 Window valve의 상부커버에 장착한 O-ring에 미세한 흠결이 있어 고압의 유압유가 밸브블록 틈새로 분출된 것을 확인하였다.
분석	가. 준해양사고 발생의 원인 A호의 3번 실린더 배기측 Window valve 블록에서 고압의 유압유가 분출된 원인은, oo항 접안중 조선소 정비인력들이 해당 Window valve의 상부커버를 조립하며 장착한 O-ring에 미세한 흠결이 있었기 때문이다. A호의 선원들은 조선소 정비인력과의 작업 전 회의 및 작업 중 모니터링 등 선박안전관리 절차서에 정하는 사항들을 준수했고 자체적으로 누설시험도 실시했으나, 조선소에서 수배한 육상 정비인력들이 지참해 와 직접 작업한 O-ring에 흠결이 있을 것을 예상하기는 어려웠다. 또한, 해당 O-ring에서 발견된 흠결은 육안으로 확인하기 어려운 수준이었기 때문에, A호의 선원들이 이를 발견해 예방하는 데에도 한계가 있었다. 한편, A호를 건조한 조선소 정비인력들이 승선해 기관정비를 수행한 이유는 A호의 oo항 입항 중 고부하에서 가스연료 점화가 실패하는 현상을 확인하였기 때문이다. 조선소 정비인력들은 정확한 원인을 찾아내지 못한 채 Window valve를 교체하는 정비를 했고, 이후 A호는 oo항을 출항해 차항으로 항해했다. 정비인력들이 정확한 문제의 원인을 찾지 못한 채 임시로 정비를 수행한 후 그 결과를 면밀히 검증하지 않은 것은 이 준해양사고 발생의 간접적인 원인이 되었다고 판단한다. A호의 선원들은 자체적으로 누설시험을 했고, 유사시에 대비해 정비부위 주

분석(계속)

변에 임시 가림막을 설치하고 현장대기인력을 배치하는 등 조치를 취했으며, A호는 필요 시 주기관 2기 중 1기만으로 조선하거나, 연료유를 경유로 교체해 항해할 수 있는 설비를 갖추고 있었다. 다만, 선박이 접안된 상태에서 선원들이 자체적으로 실시한 누설시험은, 주기관 고부하 상태에서 선박의 운항상황과 차이가 있어 Window valve의 정상작동여부를 확인하는 데 충분하지는 않았던 것으로 판단된다. 또한, A호의 선원들은 통항량이 적은 해역 등을 선정해 좌현 주기관 고출력 시 가스연료 사용에 문제가 없는지 미리 시험한 후 차항으로 항해하는 것은 고려하지 않았다. 이에 따라 A호는 입·출항 및 대기 정박중인 선박이 많고 수심의 제한을 받는 해역에서 좌현 주기관의 운전에 문제가 발생하는 상황을 맞이하게 되었다. 좌현 주기관의 정상작동여부를 충분히 확인하지 않은 채 바로 가스연료로 전환해 출력을 높인 것은 이 준해양사고 사례 발생에 따른 잠재적인 위험성이 증가하는데 간접적으로 기여했다고 판단된다.

나. 화재발생의 위험

고압의 유압유가 분출된 A호의 3번 실린더 배기측 Window valve 블록 인근에는 고온의 주기 배기가스 배관(manifold), 주기 실린더 라이너(Cylinder liner) 및 과급기(Turbocharger)가 위치해 있었다. 해당 장소의 고온 표면은 육안상 적절히 방열처리 된 것으로 보이나, 방열처리된 틈새로 유압유가 분출돼 고온표면과 접촉하거나, 고온표면과 직접 접촉하지 않더라도 방열재에 스며들어 화재가 발생할 위험성은 충분했다. 또한, 과급기 인근의 기계식 통풍장치를 통한 산소의 공급이 원활했기 때문에 발화와 화재 확산에 유리한 환경이었다.

분출 또는 비산된 유류가 기관실 내 제대로 방열처리되지 않은 고온표면에 직접 접촉하거나, 방열재에 스며들어 고온의 배관과 접촉하면서 화재가 발생한 사례는 아래와 같이 반복적으로 보고되고 있다.

- (목재2000-024) 어선 B호의 기관실 내에서 누유된 윤활유가 주기관 배기관 등 고온부에 접촉해 화재 발생
- (인재2001-023) 여객선 S호 우현 과급기측 윤활유 배관이 파손, 고온의 터빈쪽으로 분출·접촉해 화재 발생
- (2020년 독일) 여객 페리선 B호의 유압관 파손, 유압유가 분사되어 제대로 방열처리되지 않은 기관배관 고온표면에 접촉해 화재 발생
- (2021년 벨기에) 준설선 T호의 기관배관 방열재에 유압유 등이 스며들어 고온의 배관과 접촉하면서 화재 발생

다. 주기관 운용에 대한 선원의 숙련도

A호의 주기관은 선박용 경유와 LNG를 선택적으로 추진에 이용할 수 있는 이중연료 추진방식을 갖추고 있다. 경유·LNG 이중연료 선박은 물리·화학적 특성이 다른 두 개의 연료를 동시에 사용하기 위해 기관의 구조·설비가 복잡하다는 점, 인화점이 매우 낮고 가연성이 높은 가스를 연료로 사용하는 점 등의 특성을 가지므로, 이와 같은 기관을 운용하는 선박의 선원들에게는

분석(계속)

기관의 정비·점검 및 유사시 대응 방법 등에 대해 높은 수준의 숙련도와 안전의식이 요구된다고 판단된다.

A호의 선원들은 조선소 정비인력들이 정비를 마친 후 oo항을 출항하기 전, 좌현 주기관 사용 시 발생할 수 있는 상황에 대비해 기관실 내 고온표면과의 사이에 임시가림막을 설치하고 현장감시인력을 배치하는 등의 안전조치를 취했다. 이와 같은 조치들은 고압의 유압유를 사용하는 LNG 연료 분사체계 및 Window valve의 작동방식에 대한 이해에 기반한 것으로, 결과적으로 이 사례 발생이 해양사고로까지 이어지는 것을 방지하는 데 기여했다.

추가적으로, 정확한 문제의 원인을 파악하지 못한 좌현 주기관을 곧바로 항해에 사용하기보다는, 통항량이 적은 해역 등을 선정해 가스연료 고부하 시 정상작동여부를 미리 시험하는 등의 조치를 항해계획에 반영했더라면 선박의 통항이 많고 수심의 제약이 있는 해역에서 좌현 주기관의 운전에 문제가 발생했을 때 위험성을 경감할 수 있었을 것이라고 판단된다.

선박 주기관 운용에 대한 선원의 숙련도 또는 안전의식 부족으로 인해 발생하는 사고사례는 아래와 같이 반복적으로 보고되고 있다.

- (2018년 영국) 컨테이너선 S호의 기관선원들은 주기관 유압펌프 흡입압력이 표시되지 않으면 엔진제어시스템(ECS)이 펌프 보호를 위해 주기를 자동으로 정지시킨다는 사실 등을 알지 못해 주기 제어에 실패하면서 부두에 접촉
- (2024년 미국) 화물선 S호의 선원들이 잘못된 밸브를 설치한 채 연료유 수급 중 연료유가 통풍관으로 유입, 기관실 전체로 쏟아지면서 작동 중이던 기관 및 전기설비 등에 접촉해 화재 발생

라. 외부 정비인력의 정비

A호는 이 준해양사고 발생 당시 조선소의 보증기간 내에 있었고, 이에 따라 이 준해양사고 발생 전 주기관에 대한 정비도 조선소측에서 보내온 정비인력들이 직접 수행하였다. A호의 선원들은 선박안전관리절차서에 따라 조선소의 정비인력들과 작업 전 안전회의를 했고, 작업이 완료될 때까지 작업과정을 모니터링했으나, 육상 정비인력들이 지참해 와 직접 작업한 O-ring에 흠결이 있을 것을 예상하기는 어려웠다. 또한, 해당 정비과정에서의 흠결은 육안으로 확인하기 어려운 수준이었기 때문에, A호의 선원들이 이를 발견해 예방하는 데에도 한계가 있었다.

oo항에서 A호에 승선한 조선소 정비인력들은 정확한 문제의 원인을 파악하지 못한 채, 단계적으로 불량부를 찾기 위한 목적으로 3번 실린더 배기측 Window valve와 4번 실린더 배기측 Window valve를 서로 교환하는 작업을 수행했다. 해당 작업의 목적이 불량의 원인을 찾기 위한 것이었고, 선박의 출항 일정으로 인해 작업 시간이 충분하지 않았던 점을 고려하더라도, 정비인력들이 정비부위를 면밀히 검증했더라면 이 준해양사고 발생을 예방할 수 있었을 것이라고 판단된다.

A호의 선원들이 조선소 정비인력들의 정비를 막연히 신뢰하지 않고, 좌현 주기관 사용 시 발생할 수 있는 상황에 대비해 기관실 내 고온표면과의 사이에 임시가림막을 설치하고 현장감시인력을 배치하는 등의 안전조치를

분석(계속)	취한 것은 이 준해양사고가 해양사고로 이어지는 것을 방지하는 데 기여했다고 판단된다. 다만, A호 선원들이 자체적으로 실시한 누설시험은 선박의 실제 운항환경과 차이가 있어 정비부위의 정상작동여부를 확인하는 데 한계가 있었고, 안전한 해역을 선정해 가스연료 고부하 상태에서 미리 시험하는 등 확인·점검을 고려하지 않은 것은 이 사례 발생에 따른 잠재적인 위험성을 증가시킨 측면이 있다. 선박기관의 구조·설비가 복잡해지고 정비를 위한 시간적인 여유가 부족해 많은 선박들이 제조사 또는 전문 계약업체를 활용해 기관을 정비하는 것으로 알려져 있다. 다만, 제조사 또는 전문 계약업체가 정비를 수행하는 경우에도 기관운항의 주체인 선박의 기관사는 반드시 자체적인 확인과 점검을 통해 사고 발생 가능성을 차단하기 위해 노력해야 한다. 제조사 등의 정비만을 믿고 사고예방을 위해 선박 자체적으로 수행해야 할 확인·점검을 도외시해 발생한 사고사례는 아래와 같이 반복적으로 보고되고 있다. - (2018년 영국) 컨테이너선 S호는 제조사 서비스엔지니어의 조언을 믿고 주기 관 유압펌프 4기 중 1기의 흡입압력 센서만 정상적으로 작동하는 상태에서 입항하던 중 주기관 후진 추진력 상실로 선석에 접촉 - (2021년 미국) 여객선 W호 기관 제조사 정비인력의 주기관 분해·조립(overhaul) 시 오류로 연결봉(Con-rod)·피스톤 쌍이 크랭크축과 정렬이 어긋나면서 파열 및 화재 발생 - (2015년 미국) 크루즈선 C호의 발전기 1기의 연료공급 입구 플랜지 볼트가 부적절하게 조여져(외주 정비업체가 정비한 것으로 추정됨) 풀리면서 연료가 누출돼 발전기 표면에 닿아 화재발생
결론	가. 준해양사고 발생의 원인 A호의 3번 실린더 배기측 Window valve 블록에서 고압의 유압유가 분출된 원인은, oo항에서 조선소 정비인력들이 해당 Window valve의 상부커버 조립 중 장착한 O-ring에 미세한 흠결이 있었기 때문이다. 또한, 정비인력들이 A호 좌현 주기관 불량 of 정확한 원인을 찾지 못한 채 임시로 정비를 수행한 후 그 결과를 면밀히 검증하지 않은 것은 이 준해양 사고 발생 of 간접적인 원인이 되었다고 판단한다. A호 of 선원들이 좌현 주기관의 정상작동여부를 충분히 확인하지 않은 채 바로 가스연료로 전환해 출력을 높인 것은 이 준해양사고 사례 발생에 따른 잠재적인 위험성이 증가하는 데 기여했다고 판단된다. 나. 화재발생 of 위험 누출, 분출 또는 비산된 유류가 기관실 내 제대로 방열처리되지 않은 고온 표면에 직접 접촉하거나, 방열재에 스며들어 고온 of 배관과 접촉하면서 화재가 발생한 사례들은 반복적으로 발생하고 있다. 기관실 화재 발생 시 선박 of 조종능력을 상실하는 것은 물론, 자체진화에 실패할 경우 폭발로 이어지는 등 매우 심각한 피해를 야기할 수 있다.

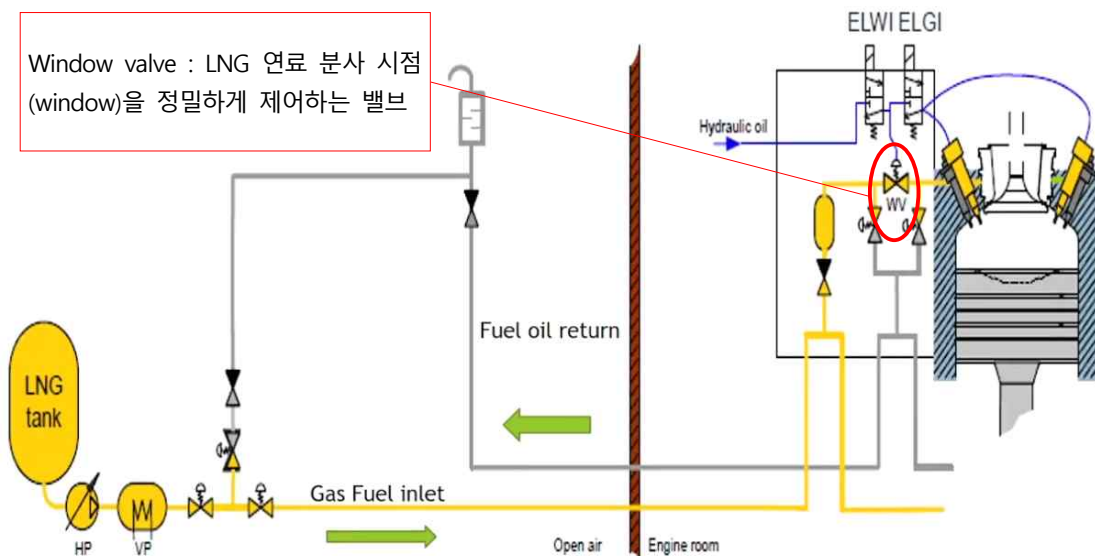
결론(계속)	다. 주기관 운용에 대한 선원의 숙련도 2025년 기준 전세계 약 600여척의 경유·LNG 이중연료 추진방식을 갖춘 선박이 운항 중인 것으로 알려져 있다. 이중연료 추진방식을 갖춘 선박의 특성을 고려할 때, 선원들에게는 기관의 정비·점검 및 유사시 대응 방법 등에 대해 높은 수준의 숙련도와 안전의식이 요구된다. A호의 선원들이 LNG 연료분사 체계 및 Window valve 작동방식에 대한 이해를 바탕으로 실행한 임시가림막 설치 및 현장감시인력 배치 등 자체적인 안전조치는 이 준해양사고가 해양사고로 이어지는 것을 방지하는 데 기여했다고 판단된다. 다만, 좌현 주기관의 정비결과 및 정상작동 여부를 사전에 시험·확인하는 조치를 취했다라면, 이 사례 발생에 따른 위험성을 더욱 경감할 수 있었을 것이라고 판단된다. 라. 외부 정비인력의 정비 A호의 선원들이 조선소 정비인력들의 정비를 막연히 신뢰하지 않고, oo항 출항 전에 취한 안전조치들은 이 준해양사고가 해양사고로 이어지는 것을 방지하는 데 기여했다고 판단된다. 다만, 좌현 주기관의 사용 전 정상 작동 여부를 미리 시험하는 등 선박 자체적으로 수행할 수 있는 확인·점검을 고려하지 않은 것은 사례 발생에 따른 잠재적인 위험성을 증가시킨 측면이 있다.
안전권고	가. 외부 정비인력이 기관정비를 수행한다고 하더라도 기관운항의 주체는 선박의 기관선원들이다. 선원들은 제조사 또는 제조사의 승인을 받은 외부 정비인력이 직접 정비를 수행했다 하더라도 반드시 자체적인 확인과 점검을 통해 사고 발생 가능성을 차단하기 위해 노력해야 한다. 또한, 선사는 외부 정비인력이 선박설비를 정비할 경우 위험성을 평가할 수 있는 안전절차를 선박에 제공하고, 사고 발생 가능성을 유효하게 차단할 수 있도록 절차를 개선할 필요성이 있는지 검토해야 한다. 나. LNG 연료를 사용하는 기관은 분사체계 내의 각종 valve를 유압으로 제어하는 경우가 많으며, 이와 같은 valve를 정비한 경우 실제 선박의 운항 환경과 동일한 환경을 가상으로 조성해 물리적으로 정상작동 여부를 확인할 수 있는 모사시험(Simulator) 설비가 널리 사용되고 있다. 기관의 제조사 또는 지정 정비업체는 이와 같은 설비들의 활용을 포함, 면밀한 정비결과 검증이 정비인력들의 업무절차에 실질적으로 반영되도록 보장할 필요가 있다. 다. 국제적인 환경규제 강화와 선박관련 기술의 발달로 기관설비의 구조적 복잡성이 지속적으로 증가하고 있다. 선사는 기관선원들이 자선의 기관 운용에 대한 지식과 함께, 문제가 발생했을 때 자체적으로 대응할 수 있는 역량을 갖추도록 충분한 교육·훈련을 제공해야 한다.

안전권고(계속)	라. 연료유·윤활유·유압유 등 가연물이 상존하고, 고온 표면부, 고속 구동부 및 전기설비 등이 밀집한 기관실은 일반적으로 화재발생에 취약하며, 화재 시 큰 피해를 야기할 수 있다. 배관의 정비부족이나 손상으로 인한 누유·누출은 물론, 일상적인 기관운용 과정에서 발생하는 유성 혼합물 또는 기름걸레 등도 화재의 원인이 될 수 있다. 유류배관의 손상을 사전에 예방하기 위한 점검과 기관실 내 청결을 생활화해야 한다.
추가 조사 (특별조사) 필요성	2025년 준해양사고사례 공모전 수상사례를 기반으로 작성한 것으로, 추가적인 조사의 필요성은 없음
국제협력 필요사항 등 그 밖의 사항	2025년 준해양사고사례 공모전 수상사례를 기반으로 작성한 것으로, 국제협력 기타 필요사항 등 없음

210mm×297mm[백상지 80g/㎡]

참고

일반적인 LNG 이중연료선박의 연료분사 계통



* 상황의 이해를 위해 인용(출처: marine Engineering Hub)한 것으로, 이 사례의 발생과 무관