

LNG운반(빙커링)선박의 BOG 처리기술 소개

김경화, 천강우, 김대현 ((사)한국선급)

1. 서론

국제해사기구(IMO)는 2020년 1월 1일부터 전 세계 모든 해역을 운항하는 선박을 대상으로, 연료유의 황산화물(SO_x) 함유량을 현행 3.5%에서 0.5%로 강화하는 규제를 시행하기로 결정했다. 이에 따라, 기존 선박연료(HFO)에서 벗어난 다양한 청정연료가 등장하기 시작하였다.

특히, 별도의 탈황장비(SO_x scrubber)를 설치하지 않더라도 강화된 황산화물 배출량 기준을 만족시킬 수 있는 액화천연가스(LNG) 연료가 주목받고 있다. LNG 연료를 사용하게 되면, 비단 황산화물뿐 아니라, 질소산화물, 미세먼지, 이산화탄소 등 각종 유해물질 배출량이 기존 디젤연료 추진선박 보다 상대적으로 낮아지게 된다.

현재 2019년 1월 기준으로 143척의 LNG 연료선박이 운항 중에 있으며, BOG(Boil-Off Gas)를 연료로 사용하는 LNG 운반선까지 합할 경우, 약 430척 이상인 것으로 추정된다(Clarksons Research), 그리고 최근 발표된 보고서(KOTRA & KDB)에서는, 2025년 세계 신조발주 선박 시장의 약 60.3%를 LNG연료 추진선박이 차지할 것으로 전망했다(표 1).

표 1 LNG연료 추진선박의 시장 전망

(단위: 억 달러, 출처: KOTRA & KDB(2019년 4월))

구분	2017년	2020년	2025년
세계 신조발주 선박	526	913	1,800
LNG연료 추진선박	40 (7.6%)	160 (17.5%)	1,085 (60.3%)

이러한 LNG연료 추진선박의 증가세는 LNG 빙커링선박의 수요도 견인하고 있으며, 2040년 기준으로 전 세계 LNG 빙커링 수요는 20~65백만톤 범위일 것으로 전망되고 있다(KEEI).

하지만 LNG를 선박의 화물로 선적한 선박에 있어 필연적으로 발생하는 BOG는 여전히 문제로 남아 있다. -162°C의 초저온 액체인 LNG를 저장하는 선박의 탱크들은 폴리우레탄폼(polyurethane foam)이나 펄라이트(perlite) 분말 등의 단열방식이 적용됨에도 불구하고, 외부로부터의 열유입을 100% 차

단할 수 없기 때문에 운송 중에 LNG가 증발하게 된다. 이렇게 BOG가 탱크 내부에 누적되면 압력이 증가해 폭발이 일어날 수 있으므로 적절한 처리가 요구된다. 또한, LNG가 기화되는 만큼, 화물량이 감소하므로 경제적인 손실도 가져오게 된다. 따라서 증발가스비율(BOR; Boil-Off Rate)을 더 낮추기 위해 단열성능을 높이거나, 새로운 타입의 격자형 압력탱크(LPV; Lattice Pressure Vessel)가 제시되고 있다.

특히, LNG 선적(loading) 및 하역(unloading / bunkering) 작업이 많은 LNG 빙커링선박의 경우, LNG 공급 및 BOG 회수과정에서 외부로부터의 열유입으로 인해 대량의 BOG가 발생된다(그림 1). 이는 사고의 위험성과도 직결되기 때문에, 비상정지장치(ESD; Emergency Shutdown)와 비상분리커플링(ERC; Emergency Release Coupling) 등을 통해 비상상황시 BOG를 대기 중으로 방출시킬 수 있도록 안전장치가 마련되어 있다.

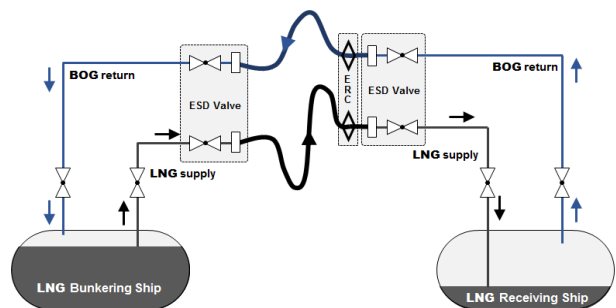


그림 1 LNG 빙커링시의 LNG 공급 및 BOG 회수 과정

이와 관련하여 본 기고에서는 LNG 운반선이나 빙커링선박에서 적용되어 온 기존의 BOG 처리기술들의 특징을 살펴본 후, BOG 문제를 해결하기 위한 새로운 대안 기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 기존 BOG 처리기술

BOG는 LNG의 조성물질, 적용되는 탱크의 단열방식, 주위 환경조건, 탱크 내부온도 등에 영향을 받는다. 대형 LNG 운반선의 경우, BOG 발생량은 탱크 저장량의 약 0.1~0.15%/day

이다. 하지만, 소형선박의 LNG 저장탱크는 상대적으로 부피 대비 표면적이 크며, 이로 인해 외부 온도의 열전달율이 높아 BOR이 보다 높은 것으로 알려져 있다.

따라서, 이렇게 발생된 BOG를 처리하기 위해 LNG를 저장하고 운송하는 선박에서는 주로 아래의 기술이 사용된다.

2.1 추진연료 사용 및 GCU

가장 먼저 고려되는 방법은 발생한 BOG를 추진연료로 소모시키는 방법이다. 기존에는 스팀터빈 엔진을 사용하여 BOG를 연료로 활용하였으나, 낮은 열효율과 고압 증기의 위험성 등의 문제로 이중연료 발전기 기반의 전기추진방식(DFDE, Dual Fuel Diesel Electric)이 2001년부터 적용되기 시작하였다. 그리고 2018년 기준으로, 총 LNG운반선박의 약 31%가 이러한 DFDE 시스템이 적용되었다(Clarksons Research). 특히, LNG 빙커링선박의 경우, 빙커링 작업시 높은 자세유지 성능이 요구되기 때문에 이러한 DFDE 전기추진시스템이 많이 적용되고 있다. 그 후, LNG 직접추진 엔진(ME-GI 엔진, X-DF 엔진)의 개발로 다시 주기관(main engine) 추진방식의 시장 점유율이 증가하기 시작하였다.

하지만, 선박의 추진력은 운항 모드에 따라 실시간 변동되므로, 저속구간이거나 정박시에는 발생한 BOG 전량을 연료로 사용할 수 없다. 또한, 하역 후 회선하는 경우(ballast voyage)에는 BOG가 부족하여 LNG를 추가 공급해야 하는 문제가 발생한다. 이렇게 운항모드에 따른 BOG 공급과 수요의 불일치로 인해, BOG 손실분은 여전히 남아있게 된다. 따라서 기본적으로 가스연소장치(GCU; Gas Combustion Unit)를 설치하여, BOG 잉여분을 소각시킨다. 또한, 부족한 BOG 양을 보충하기 위해서는 별도의 강제기화기(forced vaporizer)를 통해 기화시킨 강제증발가스(FBOG)를 연료로 공급하기도 한다.

2.2 재액화시스템

LNG 재액화시스템은 발생된 BOG를 다시 액화처리하여 저장하는 방법(그림 2)으로, 재액화 방식에 따라 다시 구분된다. 우선, 기화되는 BOG의 전량을 재액화시키는 방식과, BOG 일부를 재액화하는 방식으로 구분되며, 기본적으로 BOG Compressor, Cold Box, LNG Return Pump, N₂ Dryer, Pre-Cooler 등으로 구성된다. 그리고 최근에는 완전재액화를

위해 국내 조선소를 중심으로 혼합냉매 혹은 메탄냉매 등을 이용한 재액화 시스템을 개발하는 등 다양한 시도가 지속되고 있다.

그리고 이러한 재액화시스템은 운항조건에 따라 BOG양이 크게 변동되기 때문에 적절한 용량선정이 중요하다. 특히, BOG 발생량이 현저히 증가하는 적/하역 상태에서 BOG의 전량을 재액화하고자 할 경우에는 초기투자비가 크게 증가한다. 그리고 재액화를 위해 소모되는 전력량(0.7~0.8 kWh/kg)의 상승도 초래하게 된다. 반면, 평균적으로 발생하는 BOG 양을 기준으로 재액화 설비를 설계하는 경우에는 초기투자비는 줄어들지만 설계용량 이상의 BOG를 처리할 수 없기 때문에 경제적인 손실은 증가하게 된다.

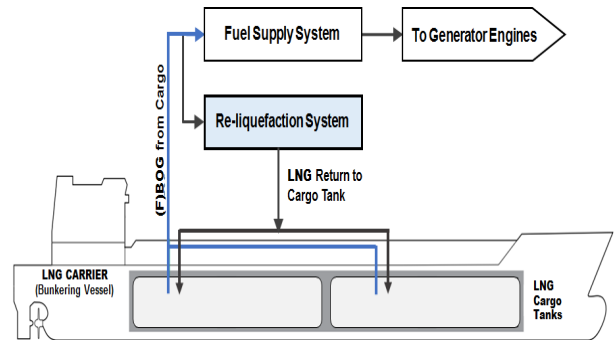


그림 2 LNG 운반/빙커링 선박의 재액화시스템

또한, 빙커링선박과 같은 소형선박에서는 재액화설비가 차지하는 공간 및 무게, 그리고 높은 초기투자비로 인해 재액화시스템이 선택적으로 적용되고 있다.

2.3 재압축시스템

LNG 재압축시스템은 LNG를 재액화시키지 않고 재압축하여 저장한 후 BOG 부족시 추진연료로 사용하는 방법으로, 일반적으로 그림 3과 같이 구성된다. 특히, 현대미포조선이 2018년 건조한 LNG 빙커링선박인 KAIROS호(7,500 m³)에는 이러한 CNG(Compressed Natural Gas)시스템이 세계 최초로 적용되었다. 이를 통해, LNG 화물창에서 하루 평균 6톤 가량 자연 기화돼 버려지는 BOG를 포집하여 추진연료로 재사용할 수 있게 되었다. 하지만 이러한 방식은 재액화시스템과 마찬가지로, BOG를 압축하기 위한 설비가 필요하다. 또한, 압축된 BOG를 저장하기 위한 CNG 탱크도 별도로 요구된다.

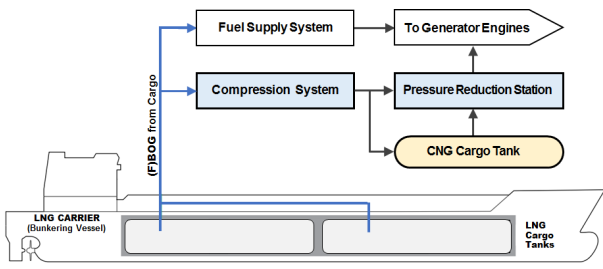


그림 3 LNG 운반/번커링 선박의 재압축시스템

3. 새로운 BOG 처리기술

앞에서 소개된 기존의 BOG 처리기술은 이미 높은 기술력을 바탕으로 BOG 처리 효과가 입증되고 있으며, 지속적으로 기술개발이 이루어지고 있다. 하지만, 높은 초기투자비와 설비 구동에 필요한 전력소모량 등은 여전히 중요한 검토사항이다. 특히, 소형 선박의 경우에는 설치 가능한 공간 및 무게가 제한적이다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 새로운 대안기술로, 에너지저장장치(ESS; Energy Storage System)로 대표되는 리튬배터리와 기존의 LNG 발전기가 결합된 Hybrid 발전시스템을 소개하고, 근거리를 운항하는 5,000 m³급 소형 LNG 번커링선박을 대상으로 BOG 감축 효과, 친환경성 및 경제성 효과를 분석하였다.

3.1 기존 시스템

대상 선박에서는 LNG를 주연료로 하는 전기추진 방식이 적용되었다(그림 4). 즉, 1.5MW급 발전기 3대로 전력을 공급받아 모터로 추진함으로써 BOG를 소모시킬 수 있다. 이때, 모든 운전조건에서 1~2대의 발전기만 사용되며, 나머지 1대는 예비용으로 비상시에만 사용된다. 그리고 LNG 탱크의 BOR은 만재항해(laden voyage)시에는 0.3%/day, 회물 하역 후의 공선항해(ballast voyage)시에는 0.08%/day로 가정하였으며, LNG 밀도는 446 kg/m³로 설정하였다.

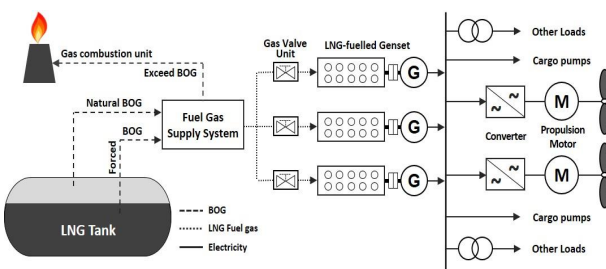


그림 4 기존의 발전 및 추진시스템 (S1 case)

3.2 제안 시스템

제안하는 시스템은 2가지로 구분된다. 우선 시나리오 2(S2)는 재액화설비를 위해 마련해 둔 여유 공간 및 무게만큼 ESS를 설치하여 기존의 발전기 3대와 같이 운영할 경우(그림 5)로서, 이때의 ESS 용량은 1,250 kWh이다. 그리고 시나리오 3(S3)은 발전기 1대를 제거함으로써 확보한 여유 공간 및 무게만큼 ESS를 추가로 설치할 경우(그림 6)로서, 총 ESS 설치 용량은 3,800 kWh이다.

이때, S3의 경우 발전기 1대를 제거하더라도, 발전기 2대 중 1대와 ESS 만으로 항해가 가능하므로 전력공급에 대한 예비력 확보가 가능하다. 그리고 두 경우 모두 ESS 용량은 방전심도(DoD; Depth of Discharge)를 80%로 가정하였으며, 리튬배터리의 퇴화율을 고려하여 20%의 여유 용량이 포함되었다.

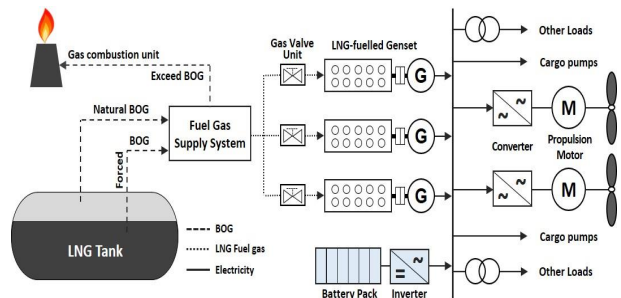


그림 5 제안하는 발전 및 추진시스템 (S2 case)

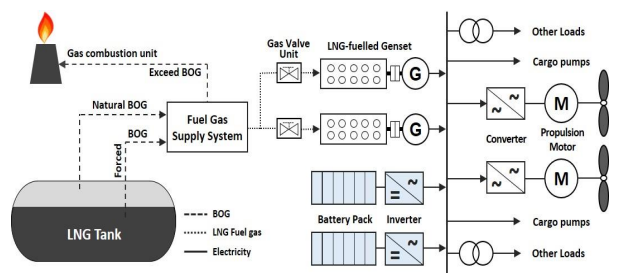


그림 6 제안하는 발전 및 추진시스템 (S3 case)

3.3 BOG 및 연료 감축량

ESS는 추진연료인 BOG의 공급과 소비의 불균형을 줄일 수 있는 완충재 역할을 수행할 수 있다. 즉, 그림 7~8에서와 같이, BOG가 가장 많이 발생하는 LNG 선적 및 하역시에는 LNG 발전기로 전력을 더 생산 후 ESS에 저장한다. 그리고 전력이 많이 소모되는 추진시에는 반대로 ESS에 저장된 전력을

사용하여 발전기의 운전시간 및 발전량을 감소시킴으로써, 추가적인 연료소모량을 줄일 수 있다.

즉, 제안시스템 S2의 경우, 기존시스템(S1)과 비교시, Loading시 발생하는 BOG(L_{BOG})는 약 117.7 kg/h를, 빙커링시 발생하는 BOG(B_{BOG})는 약 83.0 kg/h를 감축시킬 수 있다. 그리고 ESS가 보다 많이 설치된 S3의 경우에는 L_{BOG} 는 약 380.0 kg/h를, B_{BOG} 는 약 238.3 kg/h를 감축시킬 수 있다. 또한, 저장된 ESS의 전력을 사용함으로써 전체적으로 연료소모량이 S2는 약 15.2%, S3은 약 46.2% 감소된다.

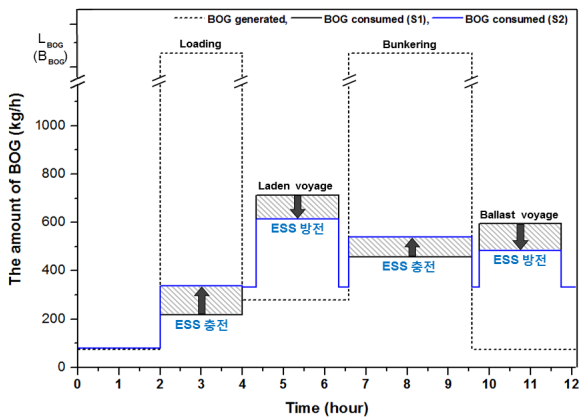


그림 7 BOG 발생량 및 소비량의 비교 (S1 VS S2)

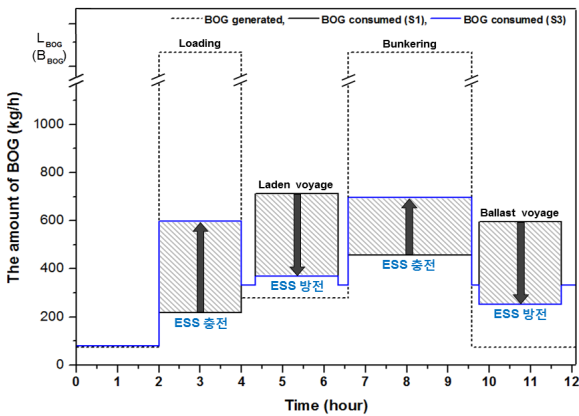


그림 8 BOG 발생량 및 소비량의 비교 (S1 VS S3)

3.4 친환경성 및 경제적 효과

LNG는 기본적으로 황산화물을 배출하지 않으며, 4행정 LNG 발전기 엔진의 경우 질소산화물 Tier 3 규제도 대부분 만족시킨다. 따라서, 제안시스템의 친환경성을 검증하기 위해 온실가스(GHG; Greenhouse Gas) 발생량을 비교하였다. 이

때, GHG는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4) 및 아산화질소(N_2O)로 구성되며, IPCC 5차 Assessment Report (AR5)의 최근 100년 지구 온난화 지수 값을 사용하였다. 분석결과, 제안시스템 S2의 경우에는 약 5.2%의 GHG가, S3의 경우에는 약 16.8%의 GHG가 감소되었다.

그리고 경제적인 효과를 기존시스템과 비교하면, ESS가 설치되는 제안시스템은 초기 투자비용이 높으나, 선박의 25년 생애주기를 고려하게 되면, S2는 약 24.6년(그림 9), S3은 약 7.6년(그림 10)의 투자회수기간(payload period)을 갖는 것으로 확인되었다. 이때의 조건은, LNG 연료가격은 \$450/t, 빙커링 횟수는 1회/일, 배터리 가격은 \$500/kWh이며, 이자율은 5%로 가정하였다. 그리고 LNG 연료가격이 높을수록, 빙커링 운항 횟수가 증가할수록, 리튬배터리의 가격 하락률이 클수록 투자회수기간은 더 짧아질 수 있다.

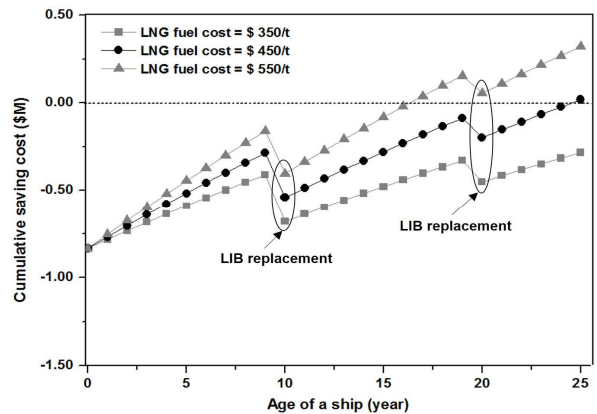


그림 9 선박의 생애주기 동안의 누적 수익 (S2)

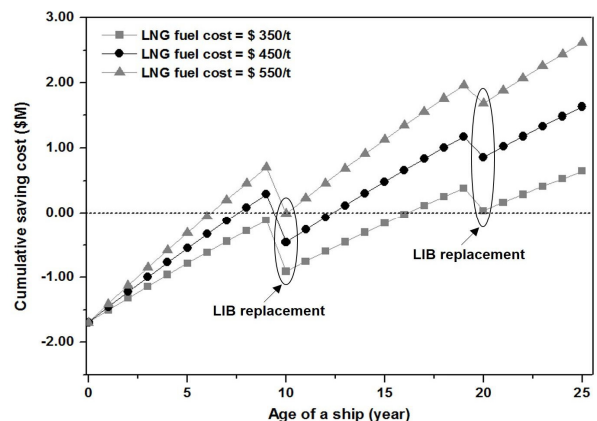


그림 10 선박의 생애주기 동안의 누적 수익 (S3)

이를 통해, 제안시스템 S2는 GHG 감소 효과는 있으나, 투자회수기간이 길어 경제성은 낮은 것으로 확인된다. 그리고

제안시스템 S3은 ESS를 10년을 주기로 교체하더라도 경제성 확보가 가능한 것으로 분석된다. 이는 제안시스템에서는 생애 주기 동안 기존 방식보다 발전기 운전시간이 감소하여, 연료 소모량 및 유지보수 비용이 감소하기 때문이다. 특히, 리튬배터리 및 전력변환장치(배터리의 직류를 교류로 변환시키는 인버터)는 회전기계인 발전기보다 고정 유지보수비용(fixed O&M cost)이 현저히 낮은 것으로 알려져 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 LNG를 운반하거나 벙커링하는 선박에서 필연적으로 발생하는 BOG를 처리하기 위한 기존의 기술들을 소개한 후, ESS를 이용한 새로운 BOG 처리방식을 제시하였다. 그리고 이러한 새로운 BOG 처리기술을 검증하기 위해 소형 LNG 벙커링선박을 대상으로 BOG 감축량 및 연료절감 효과를 분석하였다. 이를 통해, BOG가 많이 발생할 경우에는 ESS에 전력을 저장하고, BOG 부족할 경우에는 ESS에 저장된 전력을 재사용함으로써, 결론적으로 친환경성과 경제성이 확보 가능한 것으로 확인되었다.

하지만, BOG 처리기술별로 보유한 특화된 장점이 있기 때문에 경제성, 친환경성 그리고 설치 공간 및 무게 등을 종합적으로 고려한 후, 선박의 크기, 선종 및 운항조건에 적합한 BOG 처리기술이 적용되어야 한다.

이렇게 BOG 손실을 줄이고 100% 활용시키는 기술은 곧 LNG 운반선 및 벙커링선의 수주 경쟁력과 연관된다. 따라서 보다 진보된 다양한 BOG 해결책을 통해 우리나라 조선산업이 정체기를 벗어나 새로운 활력을 맞이할 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

- Kim, Kyunghwa, et al., "Case Study on Boil-Off Gas (BOG) Minimization for LNG Bunkering Vessel Using Energy Storage System (ESS)" *Journal of Marine Science and Engineering* 7(5) (2019).
- Pai, L., "LNG REPORT: 143 LNG-Powered Vessels in Operation, 270 to Come" MarineLink, Available online: <https://www.marinelink.com/news/lng-report-lngpowered-vessels-operation461876>.
- 대한무역투자진흥공사(KOTRA) & KDB산업은행, "글로벌 친환경 선박기자재 시장동향 및 해외시장 진출전략" (2019).

- 에너지경제연구원(KEEI), "세계 천연가스시장 구조변화에 대응한 천연가스 산업경쟁력 강화방안 연구(2/3)" (2018).
- 유지현, "Concept for protection against overpressure caused by BOG generated during ship-to-ship LNG bunkering" KAIST (2012).
- Clarksons Research, "Shipbuilding Forecast Club Tables" (2018).
- Babcock International website, "LNG bunkering vessels - FGSV0™ Available online: <https://www.babcockinternational.com/Case-Studies/What-We-Do/Marine/Equipment-and-Systems/Liquefied-Gas-Systems>.



김 경 화

- 1986년생
- 2016년 인하대학교 전기공학과 석사 졸업
- 현 재 : (사)한국선급 미래기술연구팀 책임
- 관심분야 : 전기추진선박, Hybrid 시스템
- 연 락 처 : 070-8799-8759
- E - mail : kimkh@krs.co.kr



천 강 우

- 1975년생
- 2008년 서울대학교 기계공학과 박사 졸업
- 현 재 : (사)한국선급 미래기술연구팀 팀장
- 관심분야 : 친환경선박, 디지털선박
- 연 락 처 : 070-8799-8745
- E - mail : kwchun@krs.co.kr



김 대 현

- 1965년생
- 1991년 인하대학교 조선해양공학과 석사 졸업
- 현 재 : (사)한국선급 디지털기술원 원장
- 관심분야 : 디지털선박, 친환경선박
- 연 락 처 : 070-8799-8590
- E - mail : dhkim@krs.co.kr