

LNG운반선의 BOG 처리설비

김만응* · 김유택**

The BOG Handling System for LNG Carrier

M. E. Kim*, and Y. T. Kim**

Key Words : Liquefied natural gas(LNG), Compressed natural gas(CNG), Natural gas(NG), Boil off gas(BOG), Dual fuel(DF) engine, Re-liquefaction system

ABSTRACT

In recent years, the LNGC fleet is expanded unprecedentedly. Ship's owners and shipbuilders are focusing on the idea how they choose the BOG handling system in economical, environmental and safety angles. This paper introduces general information for that and gives technical matters briefly.

1. 서론

LNG는 산지마다 약간은 조성이 상이하나 주성분이 액화천연가스로서 청정성, 경제성, 안전성 및 장기적인 수급 가능성 때문에 새로운 대체에너지로서 각광을 받기 시작하였고 1990년도 말부터 지구 온난화 현상에 의한 세계적인 환경문제의 대두, 아시아의 경제위기 탈출 등에 힘입어 천연가스의 수요가 급증하면서 2002년에 1억 2천톤의 LNG 수요량이 2020년에는 3억톤 이상을 상회할 것이라는 예측에 따라 이런 추세라면 2010년까지는 적어도 80여척의 LNG선이 추가로 필요하다는 논리가 성립된다.

일반적으로 선박으로 천연가스(Natural Gas)를 운반하는 방법은 세가지로 압축된다. 산지로부터 터미널까지 파이프라인을 통하여 운송하는 방법, 압축된 가스 형태로 운송하는 방법 및 액화상태로 운송하는 방법이다. 이는 이송거리와 이송하고자 하는 양에 따라 경제성을 고려하여 결정하게 된다.

예를 들면 동해가스 유전에서 국내의 가스저장시설로 운반하는 경우 벌크형태로 운송한다면 경제성이 없으므로 해저파이프라인 형태로 운송하게 되며 사우디아라비아에서 한국까지 많은 양의 가스를 운송하는데 CNG형태로 운송하게 된다면 역시 경제성이 없을 것이다. 최근 여러 평가보고서에 따르면 현재의 천연가스 소비국과 생산지의 분포로 미루어 볼 때 액화된 상태로의 운반이 필요할 것으로 예측된다.

천연가스의 최대 생산국이자 소비국인 미국은 2010년까지 현재의 약 4배 정도 천연가스의 소비가 증가할 것으로 예측하고 있다. 따라서 60여개의 LNG 터미널을 세울 계획에 있으며 엑손 등 미국선사의 발주량 60~70여척의 신조발주를 포함하여 2007년까지 320척 정도, 2030년까지 약 600척 정도까지 건조될 것으로 예상된다.

LNG선은 현재 최근 인도된 선박을 포함하여 184척, 2,180만 cbm을 기록하고 있으며 금년 신조선 발주물량 증가로 수주잔량은 총 126척, 1,960만cbm으로 증가했다. 현재 LNG선의 건조는 전세계 수주량의 4분의 3 이상을 확보하고 있는 우리나라가 세계적인 LNG 건조강국으로 단연 선두를 달리고 있다.

* 한국선급, 의장업무팀장

** 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부
E-mail : mekim@krs.co.kr

선박의 크기도 점차 대형화되는 추세로 현재 135k급에서 150k급으로 건조되고 있으나 조만간 200k급이 주류를 이루고 Q-max(26만 5천cbm급)의 계약이 금년 내에 완료될 예정이다.

2. LNG선의 BOG

LNG는 -161.5℃의 온도에서 액화된 채로 운송하게 된다. 그러나 항해중 화물탱크를 보호하고 있는 단열재를 통하여 외부의 열이 화물탱크로 침입되므로 탱크내의 LNG의 일부가 기화되게 된다. 이 기화된 NG는 화물탱크내의 압력상승을 초래하고 화물탱크의 설계압력 이상으로 상승되는 것을 방지하기 위하여 추기하게 되는데 이를 BOG라 한다. 완전냉각방식을 채택한 화물탱크의 설계압력은 0.025 MPa 정도로 화물탱크의 압력 및 온도를 조절하기 위한 설비를 IGC Code에서 요구하고 있으므로 발생하는 BOG를 선내에서 처리하기 위하여 연료로 사용하거나 액화설비를 갖추어야 한다.

LNG 운송 초기에는 선박의 안전을 위하여 소각하였으나 처리설비가 개발되면서 이를 선박의 에너지원으로 사용하게 되었다. 그러나 하주의 입장에서 보면 적재되어진 화물양 그대로를 양방향에 하역하는 것이 최대의 관심사일 것이다. 따라서 이러한 BOG로 인한 화물의 손실을 화물계약시 정해놓는 것이 보통이다.

이러한 BOG를 선내의 에너지원으로 사용하거나 또는 재액화하여 화물탱크에 되돌리거나 하는 문제는 경제적인 관점에서 초기투자비용 및 연료비, 유지보수비용, 선원고용 및 훈련 등을 포함한 운항비용을 고려하게 되며 환경적 관점에서는 대기오염에 대한 문제점을 검토하여 결정할 필요가 있다. 또한 신뢰성과 안전성 문제도 충분한 검토가 필요할 것이다.

2.1. LNG선의 BOG 발생량

BOG 발생량은 LNG 운송선박의 선장 및 기장부분 설계에 상당히 큰 영향을 미친다. 선박의 추진기의 출력 및 발전설비의 총 출력을 선박에서 요구되는 총 열량으로 하면 벨러스트 항해중에 또는 화물이 적재된 상태에서 각각 BOG 발생량을 예측하고 실적선의 경험을 토대로 최대발생 예상량을 결정하여 선박의 화물관장치 및 추진장치 등을 결정할 필요가 있다.

과거에는 단열재의 성능제한 등으로 LNG가 적재된

상태에서 화물탱크 용적의 0.25% 정도가 증발하였으나 단일기술의 발달과 더불어 현재는 0.15%이하로 줄어들게 되었다. 최근 건조된 실적선의 경우 0.10~0.12% 정도를 기록하고 있다.

2.2. BOG 처리방법의 경제적 요건

BOG를 dual fuel 보일러의 연료로 사용하여 스팀터빈을 구동하는 종래의 방법은 열효율이 낮음에도 불구하고 안전성이나 오랜 기간 동안에 사용해진 검증된 방법이었다. 그러나 경제성에 대한 문제는 LNG선이 대형화 될수록 기관의 열효율의 차이에 따른 경제적 손실은 점차 커지게 된다. 다음의 Fig.1은 MAN B&W사에서 제공한 LNG 선의 운송용량별 연간 연료유의 비용을 보이고 있다.

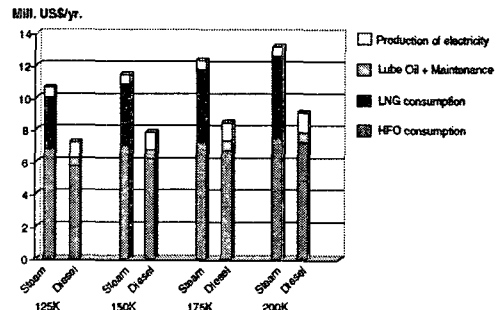


Fig.1 Annual cost comparison between two system

2.3. BOG 처리방법의 환경적 요건

BOG 처리와 관련하여 다른 하나의 관점은 환경적인 요건이다. 최근 계속되는 환경재해와 관련하여 지구 온난화에 대한 우려는 심각한 수준까지 대두되고 있으며 향후로는 이러한 환경규제에 대한 논의나 규제에 더욱 힘이 실리는 추세로 예상된다. 선박에서 발생하는 산화물중 NOx는 이미 규제되고 강화되고 있는 입장이며 SOx 또한 특별보호구역에서는 저유황 연료유의 사용을 강제화하고 있다. CO₂는 현재로는 대기환경보존에 대한 국가협약에 따라 그 배출량을 정해놓고 있으며 향후 보이지 않는 경제적 가치는 대단하리라 생각한다. 그러나 이러한 CO₂의 배출은 아직 화석연료를 사용하고 있는 선박의 경우에는 향후 규제의 대상이 될 것은 명확한 이야기이다.

이러한 환경규제의 변화는 지금 당장은 아니라 하

더라도 LNG선의 향후 추진시스템의 설계에도 영향을 미칠 것은 명확하다. 다음 Fig.2는 DF 보일러와 스팀 터빈을 사용한 시스템, 재액화 설비를 갖춘 저속 2행정 디젤기관을 사용했을 경우 및 DFD와 전기추진장치를 채택한 경우의 차이를 보이고 있다. 표에서 보는 바와 같이 CO₂의 발생량은 전기추진장치를 장착한 경우가 낮은 값을 보이고 있고 NOx는 연소형태와 관련이 있으므로 당연히 주 추진기로 디젤기관을 채택할 장치가 높다. 따라서 저속 2행정 디젤기관을 채택할 경우 De-NOx 장치의 설치를 검토해볼 필요가 있다.

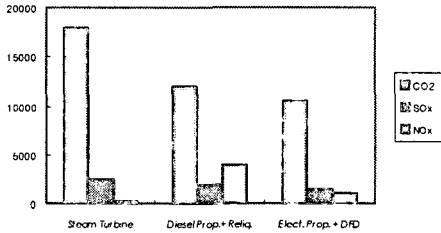


Fig.2 Comparison of emission

3. BOG 처리설비

BOG는 주성분이 methane gas이므로 자체가 인화성 가스이다. 이러한 인화성 가스를 처리하는 것은 선박의 안전과는 아주 밀접한 관계에 있으므로 IGC (International gas carrier) code에서는 연료로서 화물을 사용할 경우에 그 사용에 대하여 엄격하게 제한하고 있다. 이러한 연료는 기관실(engine room)에서 사용되게 되며 통상 기관실은 SOLAS에서 A류 기관구역으로 분류되며 발화원이 항상 존재하는 구역으로 취급된다. 따라서 IGC Code에서는 해당구역의 환기장치 및 가스탐지기의 설치를 요구하고 있다. 또한 Fig.3에서 보는 것과 같이 가스연료관 장치는 이중관으로 보호되어야 하고 이중관 사이의 공간은 가스연료의 압력보다 높은 불활성 가스로 가압하고 이러한 이중관내의 압력이 하강되어 가스가 누설할 우려가 있는 경우 경보장치의 설치를 요구하고 있다.

BOG를 기관실에 사용하는 경우는 DF 보일러에 사용되는 경우, DF 기관을 주기관으로 사용하는 경우, DF 기관을 발전기관으로 사용하는 경우 및 가스터빈의 연료로 사용하는 경우를 들 수 있겠다. 보일러에 사용하는 경우는 가스관의 이중관의 설치가 가능하므로 안전성이 높으나 DF기관의 경우에는 완벽한 보호

가 사실상은 불가능하다. 그러나 해당구역의 환기나 가스탐지장치의 설치의 안전성을 확보하고 폐위된 구역에 설치한다면 신뢰성은 확보될 수 있다.

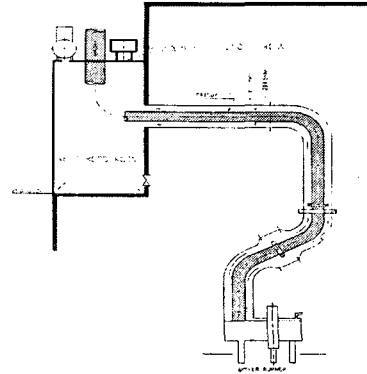


Fig.3 Gas piping protection

3.1. Dual Fuel Boiler를 이용한 Steam Turbine 추진

BOG 처리에 대한 최근까지의 경향은 보일러의 연료를 사용하는 것이었다. 이러한 시스템의 개요는 화물탱크에서 발생한 BOG를 압축기 및 가열기를 통하여 보일러의 연료로 사용하여 발생된 증기로서 스팀터빈을 구동하는 시스템이다. 스팀터빈은 정속하고 여러 가지 장점을 갖고는 있으나 열효율이 30%이하로서 추진용 원동기 중에 가장 낮지만 BOG의 처리가 가장 안전하였으므로 최근까지 주로 이 시스템을 채택하여 왔다. Fig.4는 최근까지 건조된 DF 보일러를 사용한 스팀터빈 구동방식의 추진방식을 보여주고 있다. BOG는 HFO와 함께 2대의 주보일러에 연료원으로 공급되며 보일러에서 공급되는 과열증기는 추진용 스팀터빈과 1~2대의 발전용 터빈에 공급된다.

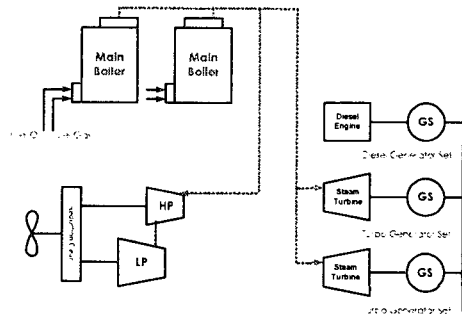


Fig.4 Conventional Steam Turbine Propulsion System

3.2. Dual Fuel Engine구동 발전기를 이용한 전기추진

전기추진설비의 사용이 LNG선에 최근들어 부각되는 주요한 이유는 효율이 스팀터빈 구동방식보다 높다는 것이다. LNG선에 전기추진장치가 최근 주요 관심 중의 하나이지만 그 사용은 상당한 역사를 갖고 있다. 전기추진방식은 연료전지 또는 가스터빈을 원동기로 하는 직결동기기를 추진원으로 하여 전동기를 이용하는 방법으로서 이미 정속성 또는 조종성 때문에 군함, 여객선 또는 특수한 목적을 갖는 선박 등에서 사용되어져 왔다. 그러나 대형선의 경우 추진을 위한 고마력 전동기를 설치하여야 하나 아직까지는 전동기의 크기 또는 무게로 인하여 제한을 받고 있는 실정이며 전동기의 경량화가 개발의 최우선 과제로 되어있다.⁽¹⁾

전기추진설비의 장점은 정속성이 뛰어나고 특히 디젤기관에 비해 저속시에 소음이 적으며 진동이 적다. 또한 주파수 변환장치의 의한 속도제어가 가능한 전동기는 제로에서 최대 토크까지 전후진 제어가 가능하므로 프로펠러의 급속한 방향전환이 쉬우며 응답성이 좋아서 조종성이 뛰어나다. 또한 감속기나 중간축, 경우에 따라서는 Rudder가 불필요하게 되므로 기관구역의 공간활용도가 높아지고 작업공수를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. LNGC 대형화 경향과 함께 BOG를 발전기 구동용 원동기의 연료로 사용하고 전기추진장치를 설치하게 되면 주기관의 축계장치가 차지하는 길이를 줄일 수 있으므로 기관실이 차지하는 전체길이가 줄어들어 화물구역을 확장할 수 있게 된다.

Fig.5는 DF 기관을 발전용 원동기로한 전기추진장치의 개략도이다. 전기적 신뢰도만 확보된다면 유지보수가 쉬우며 발전용 DF 기관은 선박에서 발생하는 BOG를 연료로 100%활용할 수 있다.

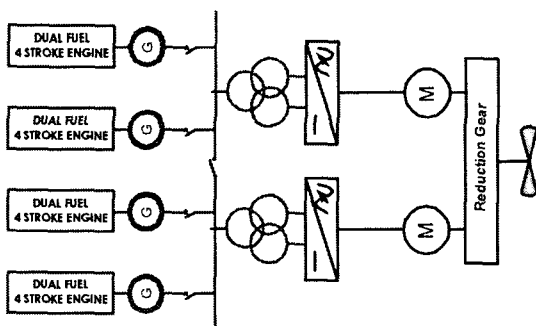


Fig.5 Electric propulsion system with DF generator engine

3.3. 재액화설비를 갖춘 저속 디젤기관 추진

LNG선에서 재액화설비를 채택하게 된 것은 극히 최근의 일이다. 그러나 Butane이나 Ethylene을 운송하는 선박에서는 이미 재액화 설비를 사용하고 있었으며 이는 화물탱크에서 발생하는 화물증기로 인한 압력상승을 쉽게 제어가 가능할 뿐더러 하주에게 화물의 손실없이 양하항까지의 운송을 가능하게 한다.

LNG 운송선박의 경우 재액화 설비가 최근들어 각광을 받기 시작한 이유는 여러 가지가 있다. 선주가 다양한 축계장치를 선택할 수 있으며 현재 구성할 수 있는 축계방식 중에서 열효율이 가장 높다는 것이다.

부가적으로는 밸러스트 항해시 적하시 화물탱크의 cool down을 위한 heeling cargo를 최소화할 수 있으며 재액화시에 N₂와 같은 화물내의 불순물이 자연적으로 배출되므로 화물의 순도가 증가한다는 것이다.

이러한 재액화설비는 제조자마다 약간의 차이는 있으나 그 소요동력이 3~5MW의 큰 동력이 필요하다. 175k급 LNG선이 19 knots의 속력을 얻기 위하여 약 3만 kW의 주기관 출력이 요구된다. 이 경우 발전용량이 약 1,600 kW정도 필요하다면 재액화 설비를 설치할 경우 5,000 kW이상의 동력이 필요하다는 결론이 된다. 따라서 발전기 구동원동기의 선택이 6,000 kW급 3대를 설치하거나 3,000 kW급 5~6대를 설치하는 것을 검토할 수 있다. 밸러스트 항해시에는 약 3,500 kW 정도로 소요동력이 적어지므로 이 경우 병렬을 할 것인지 단독운전이 가능할 것인지를 면밀히 검토하여 발전기 구동 원동기의 마력과 설치갯수를 결정하게 된다.

Fig.6은 재액화설비와 저속 디젤기관을 설치한 시스템의 개략도이다.

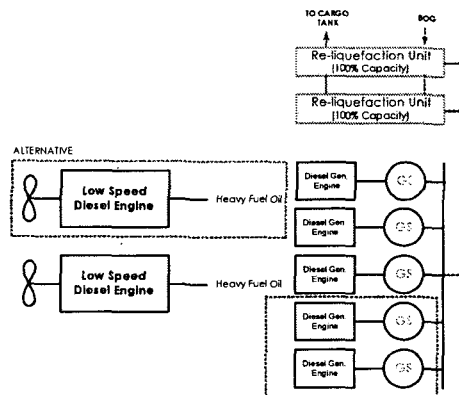


Fig.6 Diesel engine propulsion system with re-liquefaction units

재액화 설비의 요건은 IGC Code에 따라 back-up 설비를 갖추어야 한다. 예상되는 최대 BOG 발생량을 100% 수용할 수 있는 용량의 2기분을 요구하고 있으나 그 구성부품의 완벽한 100%를 요구하는 것이 아니라 신뢰성이 떨어지는 중요부품의 이중장치를 요구하게 된다. 또 다른 방법은 고장시에 BOG를 처리하기 위한 thermal oxidizer나 연소장치를 설치하면 된다.

재액화 시스템을 간략히 설명하자면, Fig.7에서 보는 바와 같이 BOG는 설치된 LD(low duty) compressor에 의하여 압축되고 cold box라는 주 열교환기에 통과하게 된다. Cold box는 폐쇄냉동 사이클(Brayton cycle)에 의하여 BOG를 액화하게 되고 질소가 냉매로서 사용된다. BOG는 통상 4~5bar 정도로 압축되어 cold box를 통과하며 -160℃ 정도로 냉각되어 액화한다. 이때 BOG내에 포함되어 있는 질소가스는 액화되지 않고 기체상태로 남아있게 되며 분리기(separator)에서 벤트관을 통하여 oxidizer를 통하여 대기중으로 방출된다.

냉매로서 사용되는 질소가스는 약 60bar까지 다단의 centrifugal compressor에 의하여 압축되고 이때 각 단에 설치되어 있는 냉각기를 통하여 극저온 열교환기를 통하여 -110℃정도로 냉각되어 15bar 정도로 팽창시켜 cold box내의 저온상태를 유지한다.⁽²⁾

Fig.8은 이러한 재액화설비가 화물구역의 후단에 설치된 경우이다.

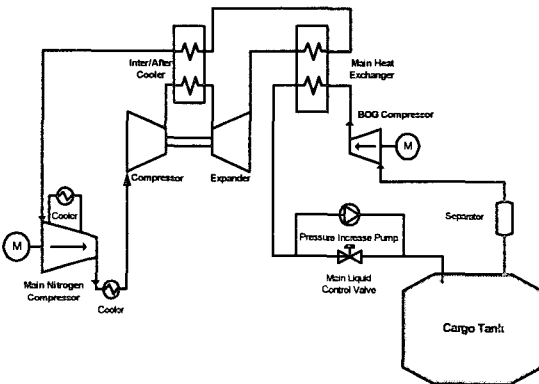


Fig.7 Schematic diagram of re-liquefaction plant

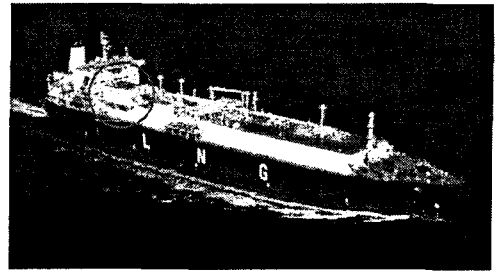


Fig.8 Onboard re-liquefaction plant

4. 결론

현재까지 건조된 또는 건조중인 LNG선의 추진시스템은 스팀터빈 구동방식이 주류를 이루고 있는 것은 오랫동안 사용되어 왔으며 현재까지 대체 설계되어 완벽하게 검증된 방법이 없다는 것이다. 그럼에도 불구하고 최근 LNG 운송선의 추진체계가 다양해지는 이유는 전술한 바와 같이 경제적인 이유가 주를 이룬다. 현재로는 환경적인 이유로 DFD 기관을 채택하기보다는 경제적인 이유로 재액화 설비를 장착한 저속 2행정 디젤기관을 선호할 가능성이 많으며 이미 수주받은 LNG선의 13척이 국내 대형조선소에서 건조될 예정이다. 또한 재액화 설비를 갖춘 전기 추진설비를 갖춘 선박의 선택도 증가하고 있는데 효율적으로는 약간 떨어지나 조종성이나 주기관의 기진력으로 인한 화물탱크의 영향 등의 장점 때문이다.

결론적으로 이러한 재액화설비를 갖춘 디젤기관 추진방식이 인도되어 신뢰성이 확보될 경우에는 좀더 많은 선주들이 이 방법을 선호할 것으로 예측된다.

참고문헌

- (1) Masaru Oka, "Development of Next-Generation LNGC Propulsion Plant and HYBRID System", MHI Technical Review Vol.41 No.6, 2004
- (2) Tore Lunde & Erik Melaen, "LNG Reliquefaction Systems for LNG Carriers", MAN B&W Diesel course, 2004