선박 폐열을 이용한 ORC 발전 시스템

선박에서 배출되는 배기가스와 냉각수의 열에너지를 이용하여 유기랭킨 사이클 발전장치를 구동함으로써 기존의 선박에서 운전 중인 디젤 발전기의 일부 용량을 대체하여 선박의 에너지 효율을 높이기 위하여 제안된 선박의 ORC 발전 시스템을 소개하고자 한다.

오 철
한국해양대학교
기관시스템 공학부 교수
ocheol@hhu.ac.kr

지구 온난화의 영향은 인류의 미래에 심각한 문제를 초래할 수 있으며, 해상에서의 물동량 증가로 인한 선박으로부터 배출되는 온실가스의 배출은 앞으로도 계속 증가할 것이 예상되며 지구 온난화에 상당한 영향을 미치고 있다. 이에 대한 노력으로 최근에 국제 사회는 선박으로부터 발생하는 온실가스 배출을 규제하고 이산화탄소 배출량을 감축하는 방안을 모색하는 논의가 활발히 진행 중이다.

유기 랭킨 사이클 발전 원리

일반적으로 증기 동력 사이클 시스템은 작동유체의 일부 또는 전부가 액상과 기상으로 상이 변하면서 열에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 열 동력 기관으로, 다른 열 동력 기관과 달리 열전달 특성이 이상적인 열기관인 카르노 사이클과 유사하다. 유기 랭킨 사이클 시스템은 중저온(70~400℃) 범위의 열원에서 높은 에너지 변환 효율을 얻기 위해 물보다 더 낮은 온도범위에서 증발이 일어나는 프레온이나 탄화수소 계통의 유기 매체를 작동유체로 사용하는 저온 증기 동력 사이클로 저온에서 고압의 증기가 얻어지므로 저온 열원을 이용하여 고효율의 동력을 발생시킬 수 있다.

그림 1은 이상적인 기본 랭킨 사이클 시스템의 구성도와 온도 엔트

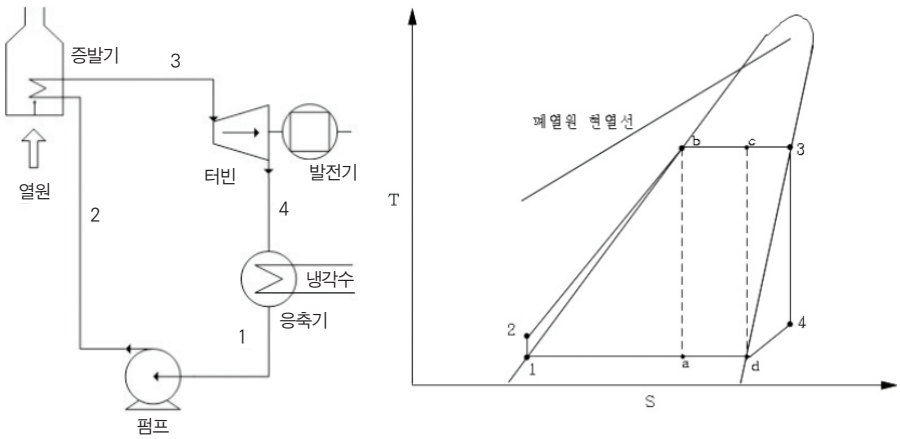
로피(*T-S*) 곡선을 나타낸 것이다. 작동 원리를 순서대로 살펴보면, 기본적으로 증발기에 유입되는 열원과 응축기에서 응축되는 온도 차이에 따른 그때의 증기압의 차이에 의하여 터빈을 구동하는 원리이다. 응축기에서 냉각수에 의해 액화된 작동유체는(1) 펌프에 의하여 가압되어 증발기로 들어가게 되고(2) 열원 의하여 가열되어 기화된 작동유체는(3) 터빈을 구동하고 배출되어(4) 다시 응축기에서 응축되어 순환되는 사이클을 형성하게 된다. 즉, 열원이 화석연료의 직접적인 연소로부터 얻어지지 않더라도 온도 차가 형성되고 작동유체가 고온 측의 온도에서 증발하고 저온 측의 열원에서 액화될 수 있다면 그때의 차압으로 터빈을 구동하여 발전기를 구동할 수 있게 된다. **그림 1**의 *T-S* 선도에서 카르노 사이클은 a-b-c-d 과정을 순환하는 반면에 랭킨 사이클의 경우 1-2-3-4 과정으로 열 교환 과정과 팽창 과정은 같으나 압축과정만은 현실적으로 가능한 액체 단일상의 압축과정으로 구성한 것이다.

유기 랭킨 사이클의 작동유체는 물과 비교하여 저온에서 증기압이 높은 유체가 되며 열역학적인 측면에서 주어진 열에너지를 최대한으로 이용할 수 있고 고효율로 동력을 회수할 수 있어야 한다. 따라서 일반 물을 끓여 스팀을 발생시키는 증기를 발생시키는 랭킨 사이클보다 효율이 높은 것이다.

작동유체는 환경규제 및 대체 냉매로서의 조건을 고려하였을 때 선박의 온도 차 발전에 적용 가능한 냉매로 혼합냉매를 제외하고 R717(암모니아)와 Rl34a, Rl52a,등의 적용이 가능하고 TFEA, SES36등의 다양한 유기 냉매에 대한 연구개발이 진행되고 있다.

선박의 폐열 및 열원

선박에서 발생하는 폐열은 크게 배기가스와 냉각수로 분류할 수 있다. **그림 2**에서 보는 바와 같이 선박에서 발생하는 주요 열원이 되는 장비를 보면 메인 엔진과 보일러, 냉각수 등이다. 상대적으로 고온인 배기가스는 약 200℃ 이상 고온이며, 상대적으로 저온인 메인 엔진 및 발전기 엔진 냉각수의 경우 자켓 냉각수는 약 80~90℃의 청수로 냉각되며, 해수 열교환기의 온도는 약 40~50℃ 정도로 운전된다. 이러한 주기관 및 보조기계들의 적용은 선박의 종류에 따라 약간의 차이가 있는데, 선종별로 보면 컨테이너선, 유조



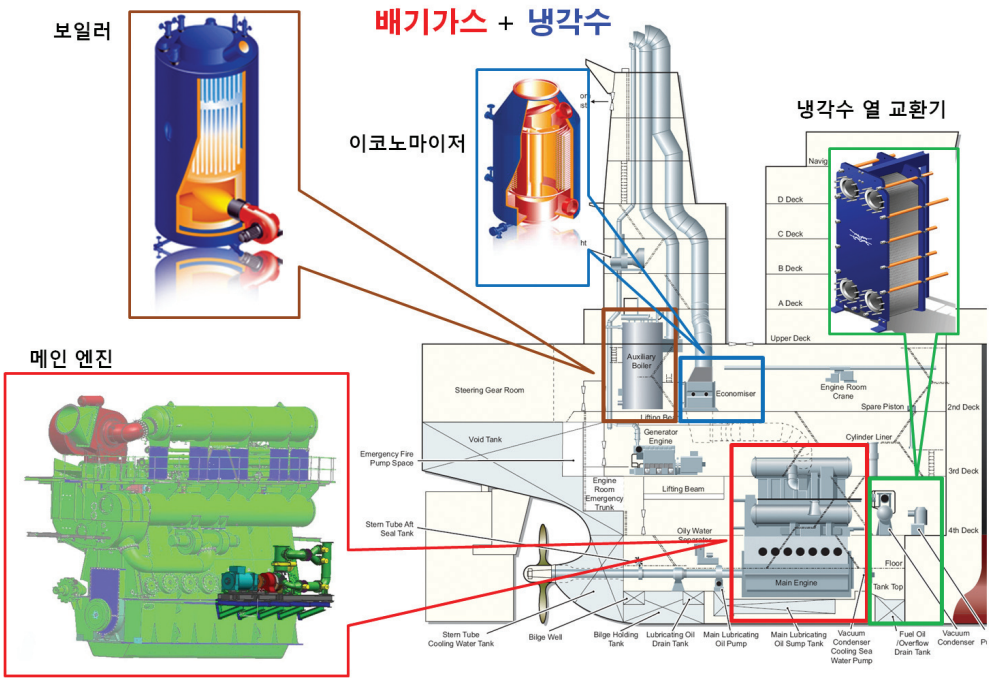
[그림 1] 랭킨 사이클 구성도와 T-S 선도

선, 벌크선, LNG선 등으로 크게 구분할 수 있다. 컨테이너선은 운항 속력이 높아 고출력의 추진기관이 요구되므로 상대적으로 대형 메인엔진이 적용되고, 냉동 컨테이너가 많은 경우 발전기 용량 또한 증가하게 된다. 유조선이나 벌크선의 경우는 운항 속력이 낮아 상대적으로 저출력의 메인엔진의 용량이 감소하게 된다. 그러나 유조선의 경우 화물을 가열하는데 스팀이 요구되므로 대용량의 보일러가 적용되고, 이러한 보일러는 화물을 선적하고 운항할 때와 화물의 양하를 위한 펌프를 구동할 때 가동된다. LNG선의 경우 주 추진 방식에 따라 차이가 있는데, 스팀터빈 추진 방식, 디젤 엔진 추진 방식, 전기 추진 방식이 적용되고 있다. 스팀 터빈 추진 방식에서는 대용량의 보일러가 적용되고, 디젤엔진 추진방식의 경우 저속 디젤엔진이 쌍축으로 적용된다. 전기추진 방식의 경우에는 주 추진 기관은 전기 모터가 되고 이 모터에 전력을 공급하기 위하여 대형 발전기가 4대 이상 적용된다.

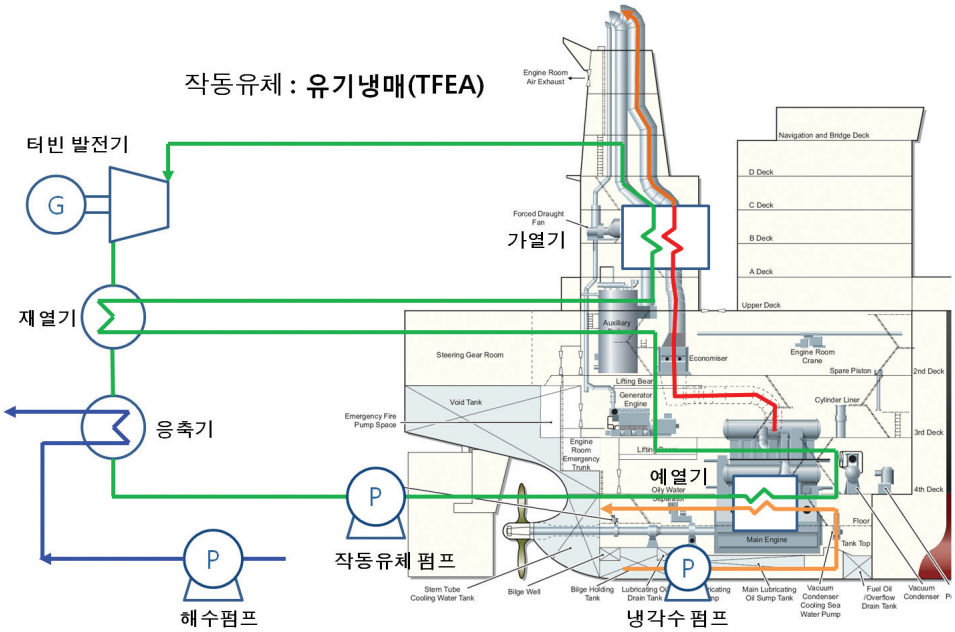
따라서 이러한 선박의 특성에 따라 발생하고 있는 다양한 폐열을 열원과 선박이 운항하는 해역의 해수 온도차를 이용하여 유기 랭킨 사이클을 구성하여 발전장치를 구동하게 되면 기존의 발전기를 대체하는 효과를 갖게 되므로 선박의 에너지 효율을 높이고, 배기가스 배출을 줄이게 되므로 궁극적으로 온실가스 배출을 줄일 수 있다.

선박의 ORC 발전 시스템의 구성

선박에서 최적화된 온도차 발전 시스템을 구성하기 위해서는 배기가스로부터 배출되는 열원과 냉각수로부터 배출되는 열원을 취합하여 하나의 시스템으로 구성하는 것이 과제가 된다. 하나의 시스템으로 구성하는 방법에는 두 가지가 있



[그림 2] 선박의 주요 열원이 되는 장비



[그림 3] 선박의 ORC 발전시스템의 최적화 구성

을 수 있는데, 첫 번째는 두 개의 독립된 ORC 시스템을 구성하여 기계적인 방법으로 감속장치와 커플링을 이용하여 하나의 출력을 얻는 방법이 있을 수 있겠으며, 두 번째는 하나의 시스템을 구성하여 두개의 열원으로 작동유체를 가열하고 재열기를 설치하는 방법이 고려될 수 있을 것이다. 두 개의 열원을 복합적으로 이용할 경우에는 배기가스가 고온측의 열원이 되므로 최종적으로 배기가스를 이용하여 작동유체를 증발시키는 열원은 활용하여야 하고, 저온 측의 열원은 예열기의 역할을 하도록 시스템을 구성하여야 한다(**그림 3** 참조).

시스템의 작동원리를 설명하면 작동유체는 해수에 의하여 냉각되어 응축기에서 액화된 작동유체는 엔진의 냉각시스템의 열교환기에서 예열되어지고 배기가스 가열기에서 증발된다. 고압으로 기화된 작동유체는 터빈 발전기를 구동하고 해수에 의하여 냉각되는 응축기에서 다시 액화되어 순환된다. 여기서 터빈 후단에서의 재열기는 작동유체가 가열기에 들어가는 온도를 높여주게 되므로 시스템 효율을 높이게 된다.

선박 ORC 발전 시스템의 열해석

배기가스 온도가 150℃ 이상에서 유기랭킨 사이클의 작동유체로 사용하기 위하여서는 끓는점과 임계점이 높아야 하므로 주로 알코올 계통의 유기냉매를 적용할 수 있다. **그림 4**는 TFEA(Trifluoroethanol)를 작동유체로 하여 시스템을 모델링하고 시뮬레이션한 결과이다. 작동유체인 TFEA의 분자식은 $C_2H_3F_3O$이고 분자량은 100.04, 끓는점은 77.8℃, 임계온도는 227℃이다.

8,700 TEU급의 대형선박을 기준으로 하여, 선박으로부터 배출되는 냉각수의 온도와 유량은 50℃, 2,100 m^3/h로 정의하고, 배기가스의 온도

와 유량와 유량은 220℃, 755,900 kg/h로 정의하였고 냉각수의 기준이 되는 해수 온도는 30℃의 조건으로 하였다.

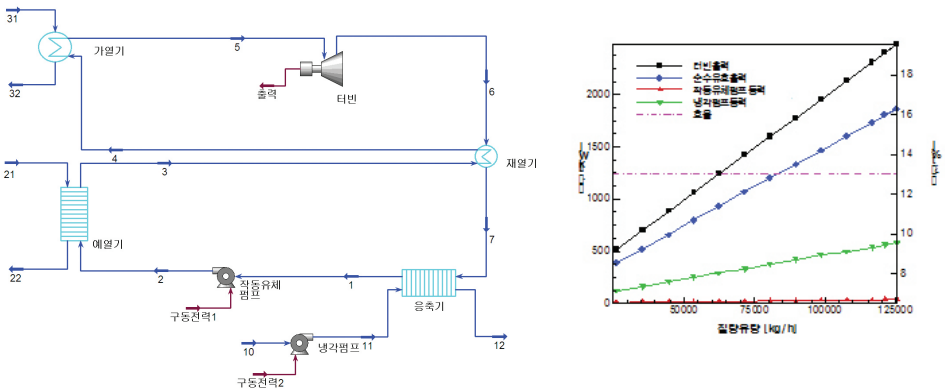
배출되는 해수를 열원으로 하는 예열기 출구 측의 온도를 47℃로 하고, 재열기를 통과한 온도는 52℃로 설정하였다. 이러한 설정 조건에서 가열기 출구 측의 온도를 150℃로 정의하였을 때, 가열기에서 열교환되어 배출되는 배기가스 온도는 176℃가 되고, 작동유체 121,160 kg/h(87.67 m^3/h)의 유량에서 2.400 kW(2.4 MW)의 터빈 출력을 얻을 수 있다. 이때 응축기에 소요되는 냉각수의 유량은 6,119 m^3/h에 563.4 kW의 펌프 동력이 소요되고, 작동유체의 펌프동력은 35.23 kW가 된다. 여기서 발전 시스템에서의 순수 유효 발전 출력은 터빈의 출력에서 작동유체 펌프와 냉각수펌프의 동력을 뺀 나머지가 되므로 순수유효출력은 1,801 kW가 된다. 이때 랭킨시스템의 열효율은 순수열량과 입력열량의 비로 계산되므로 13.06%가 된다.

그림 4에서 선박의 ORC발전 시스템의 시뮬레이션 해석결과를 보면 작동유체의 질량 유량의 변화에 따른 시스템의 출력 변화량을 확인할 수 있다. 질량 유량의 증가에 따라 터빈에서 출력이 증가하는 것을 알 수 있는데 그 이유는 작동유체의 질량이 많을수록 더 많은 힘이 터빈을 구동에 전달하기 때문이다. 그리고 작동유체의 질량유량이 증가할수록 냉각펌프의 구동 전력이 상승하여 순수 유효 출력이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 응축기에서보다 많은 작동유체를 액화하는 데 많은 냉각수가 필요하기 때문이다.

이와 같이 선박에서 배출되는 배기가스와 냉각수로부터 열을 회수하고 선박이 운항하는 해역의 해수와 온도 차이를 이용하여 ORC 발전시스템을 구성하면 기존의 선박에서 운전 중인 디젤 발전기의 일부 용량을 대체하므로, 선박의 에너지 효율을 높이고 선박으로부터 배출되는 배기가스와 온실가스인 CO_2 배출을 절감하는 효과가 있을 것이다.

배기가스 폐열회수와 저온부식

배기가스의 폐열을 회수하여 에너지를 재활용하는 장치의 실용화에 가장 문제점으로 제기될 수 있는 것은 저온부식의 문제이다. 일반적으로 배기가스의 폐열을 회수하고 열효율을 높이기 위하여 이코노마이저를 설치하게 되는데, 이때 폐



[그림 4] 선박의 ORC 발전시스템의 시뮬레이션 해석결과

열 회수율을 높여 배기가스의 온도가 낮아지게 되면 배기가스 중에 포함되어 배출되는 황산에 의한 저온부식의 위험이 증가하게 되는 딜레마에 빠지게 된다.

연료 중의 유황성분이 연소에 산화하여 아황산가스(SO_2)로 되고 그 일부가 다시 산화하여 무수황산(SO_3)으로 된다. 이 SO_3의 노점(露点)은 150℃ 이하인데, 열교환기의 저온 전열 면에서 자칫하면 150℃ 이하로 되기 쉬우며 이 저온부에서 SO_3가 연소 가스 속의 수증기(H_2O)와 화합, 응축하여 황산(H_2SO_4)을 생성하고, 저온 전열면에 부착하여 이 부분을 부식시키게 된다.

일반적으로 저온부식을 방지하기 위한 예방대책으로는 유황 성분을 포함하지 않거나 유황분이 극히 적은 저유황 연료를 사용하는 방법, 배출하는 배기가스 온도를 200℃ 이상으로 하고, SO_3의 노점보다 높게 하여 SO_3가 수증기와 화합하여 황산으로 되지 않도록 하는 방법, 연료에 암모니아 등의 저온부식 방지제를 첨가하여 SO_3의 노점을 저하시키는 방법과 저온부식에 안정성을 갖는 소재를 이용한 열교환기를 적용 등이 고려될 수 있다.

현재 선박 엔진의 연료는 벙커-C유가 주로 사용되고 있으나 최근 질산화물(NOx),황산화물(SOx)의 배출규제가 강화됨에 따라 저유황중유(LSBC), 저유황경유(LSDO)등의 사용이 증가하고 있다. 또한, 대형 조선사를 중심으로 친환경 연료를 사용하는 엔진 및 선박의 개발과 함께 다양한 NOx, SOx 배출저감기술 개발이 시도되고 있다. LNG(Liquefied Natural Gas)를 연료로 하는 Fuel Gas 추진 선박이 유럽의 소형 화객선 및 정기 컨테이너 선박을 중심으로 운항하는 사례가 증가하고 있고, 국내에서도 경인운하의 홍보용 선박에 LNG연료 추진엔진이 채택되어 건조 중에 있다. LNG에는 주성분인 메탄 및 탄화수소 이외에 불순물이 거의 없으므로 배기가스 저온부식 문제가 없으며 일반적으로 LNG를 연료로 하는 육상 공장에서는 100℃ 이하로 아무 문제없이 배기가스 열을 회수하고 있다.

이러한 도전적인 배기가스 폐열의 회수를 통한 선박의 에너지 효율 향상을 위한 노력은 기존의 저온부식에 대한 대응 방안을 넘어서 유황 회수장치의 추가설치나 신 도료의 개발 등 새로운 개념의 저온부식에 대한 신개념 방식 기술들의 개발을 유도하고 촉진할 것이다.

참고문헌

1. 이윤철, 두현욱., 2011, 선박기인 온실가스 배출에 대한 IMO의 규제와 이행방향, 항해항만학회지 제35권 5호, pp.371-372.
2. 김태국., 2004, 열시스템 설계 및 시뮬레이션, 인터비젼, pp.25-28.
3. 이규현,원승호., 1989, 폐열회수 활용을 위한 유기랭킨 사이클 개발 및 실용화 연구(I)),한국동력자원 연구소.
4. Marcello Riva, Felix Flohr, Andreas Froba., 2006, New Fluid for High Temperature Applications, International Refrigeration and Air Conditioning Conference. p. 353
5. M.Aslam sidiqi. and Burak Atakan., 2011, Investigation of the Criteria for Fluid Selection in Rankine Cycles for Waste Heat Recovery, International Journal of Thermodynamics(IJoT) Vol.14 No.3, pp.117-123.
6. 이장호., 1998, 연료의 유황함량에 따른 배가스 노점온도 변화, 에너지관리 통권 제263호, pp.104-106
7. 삼성에버랜드., 2001, 보일러 저온 폐열회수 시스템, 에너지관리 통권 제 307호, pp.142-147