

선박용 흡수식 냉동기의 냉매적용 냉각 시스템 성능 분석

윤상국[†]

(Received April 7, 2016 ; Revised May 11, 2016 ; Accepted May 23, 2016)

Performance analysis of a cooling system with refrigerant in a marine absorption refrigerator

Sang-Kook Yun[†]

요약: 최근 조선사들은 선박이 운항되는 연안 환경의 개선과 보호를 위하여 CO₂를 절감할 수 있는 친환경 선박과 함께 선박 운항 중 소비하는 에너지의 절감을 위한 고효율화 선박 개발의 노력도 활발하게 수행하고 있다. 본 연구에서는 전기로 구동되는 선박의 증기압축식 냉동기 대신에 선박 엔진 자켓수의 폐열을 이용하여 냉방을 할 수 있는 흡수식 냉동기의 적용 가능성과 냉각시스템에 냉매를 적용하는 시스템의 성능을 분석하였다. 연구결과, 해수와 열교환하여 액화될 수 있는 냉매들 중 R236fa가 가장 적합한 냉매로 분석되었으며, 이를 적용한 흡수식 냉동기의 COP는 육상의 냉각탑을 이용한 수랭식보다 15% 그리고 해수 열교환기식 수랭식보다 5% 향상되었다. 냉동능력 1RT를 얻기 위한 LiBr 흡수용액 순환량은 0.013 kg/s로 수랭식 보다 25% 이상 감소하며, 냉각 매체 순환량도 수랭식의 15.7%에 불과한 매우 효과적인 냉동기가 되었다. 해수온도가 18℃ 이하로 낮으면 발생하게 되는 LiBr의 결정화는 재생기에서 배출되는 엔진 자켓수의 온도를 이용하여 해수 온도를 상승시킴으로써 방지할 수 있다.

주제어: 선박용 흡수식 냉동기, 엔진 자켓수, 냉각수, 냉매, 성적계수, LiBr 결정화

Abstract: Recently in order to protect the ocean environment and to reduce energy consumption, shipbuilders have been developing highly economized ships. This research analyzed the possibility of adopting the onshore absorption refrigerator to offshore ships having a cooling system with refrigerant by using the waste heat of the engine jacket cooling water instead of compression refrigerators. The results showed that R236fa could be a suitable medium for absorbing the heat of the absorber and condenser in an absorption refrigerator. The cooling system using R236fa achieved a high COP of 0.798, which is 15% and 5% higher than an air cooling system with a cooling tower and a water cooling system with a heat exchanger, respectively. The cooling system with R236fa achieved high efficiency with a 25% reduction in flow rate of LiBr solution and only 15.7% flow rate of cooling medium as compared to the water cooling system. The heating of sea water by the engine jacket water flowing out from the generator can prevent the crystallization of LiBr solution due to the low temperature of sea water.

Keywords: Marine absorption refrigerator, Engine jacket water, Cooling water, Refrigerant, COP, LiBr crystallization

1. 서론

최근 조선사들은 선박이 운항되는 연안 환경의 개선과 보호를 위하여 친환경 고효율 선박의 개발을 활발하게 추진하고 있다. 노르웨이 등 북유럽 국가들을 중심으로 선진국들은 선박의 연료를 현재의 경유나 중유 대신에 LNG를 채택하여 환경의 개선에 앞장서고 있으며, IMO는 2013년부터 이산화탄소 총량 규제제도인 선박제종 연비지수 규제를 도입하여 일정수준을 넘지 못하면 운항할 수 없도록 하고 있다. 즉, 선박연료의 청정연료로의 변환뿐 만 아니라, 선박 운항 중 소비하는 에너지의 절감 노력도 요구되고 있다.

현재 대부분 선박의 냉동공조 시스템은 증기압축식 냉동기가 사용되고 있다. 이는 선박의 연료를 소비하여 생산된 전력으로 냉동기를 구동하여 냉방을 하게 되므로 이로 인한 연료 소비와 연소가스의 대기 방출은 또 다른 지구 환경 오염과 온난화의 원인이 되고 있다. 일반적으로 선박의 냉동기 전기량은 전체 전기량의 5~15%가 소비되고 있다. 최근에는 냉방용 동력원으로 전력을 사용하지 않고 엔진의 폐열원을 사용하여 흡수식 냉동기(Absorption refrigerator, AR)을 구동하여 에너지절약 및 CO₂ 발생을 저감하고자 하는 노력이 이루어지고 있다[1][2].

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5533-3986>): Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: skyun@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4363

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

육상의 흡수식 냉동기는 구동 열원으로 천연가스의 연소, 스팀 혹은 폐열원의 고온수가 사용된다. 선박에 흡수식 냉동기를 적용할 경우 가능한 열원으로는 90°C가 넘는 엔진 자켓수나 엔진 배기열을 이용할 수 있다. 즉, 연료를 추가로 사용할 필요가 없고 선박의 폐열원만을 사용하여 냉방을 할 수 있게 되는 것이다. 또한 지구온난화나 오존과 파괴 등의 냉매를 사용하지 않는 장점을 갖는다. 이러한 규제와 장점 때문에 선박에 AR을 적용하는 일부 제품이 H사에서 출시되고 있으나, 아직 이의 보급은 미흡하며 지속적인 기술개발이 필요한 것으로 보인다[3][4]. 흡수식 냉동기의 선박에 적용하기 위한 관련 연구나 특허로는 선박의 롤링 등에 증발기와 흡수기 하부의 공간을 충분히 확보하는 특허, 엔진의 폐열이용 특허 등 극히 일부가 있다[5].

흡수식 냉동기를 선박에 적용하기 위하여는 선박의 특성에 맞는 다양한 기술 개선이 필요하게 된다. 즉, 선박의 롤링 등 움직임에도 용액이 관외부에 적하되면서 성능 저하가 없이 기능이 수행되는 흡수기와 증발기의 적정 구조, 흡수기와 증발기의 냉각수의 냉각 시스템의 개선 등이 필요하게 된다. 흡수식 냉동기의 냉각 시스템은 흡수기의 흡수열과 응축기의 수증기 응축열을 흡수하여 냉각탑에서 공기에 의하여 냉각된다. 선박에 냉각탑을 적용할 경우, 냉각수가 대기과 직접 접촉하여 열교환하게 되므로 염분에 오염되어 시스템 냉각 배관의 부식 초래, 육상과 동일하게 냉각수인 담수의 정지적 충전, 적도지방의 경우 대기 온도의 상승으로 성능의 저하, 롤링 등에 의한 냉각수의 비산 등의 많은 문제들이 발생하게 된다.

본 연구에서는 육상용 흡수식 냉동기를 선박에 적용하기 위하여 필요한 다양한 기술 사항들 중 냉각수 시스템의 개선 연구를 수행하였다. 현재 H사의 제품은 해수를 직접 흡수기와 응축기의 관내부에 순환시켜 열을 흡수한 후 배출하는 시스템으로, 이는 해수로 인한 부식과 스케일 등의 문제가 야기되는 단점이 있다[3]. 본 연구에서는 냉각용 담수를 흡수기와 응축기로 순환시켜 열을 흡입한 후 해수 열교환기에서 해수로 냉각하는 방식과, 냉각 매체인 물 대신에 냉각용 냉매의 상변화 잠열을 사용하는 냉각시스템을 고안하여 적용 가능성을 분석하였다. 이는 상기한 냉각탑의 오염 문제와 비산 문제 등을 해결할 수 있으며, 냉각 매체의 순환유량이 감소하고 성능도 크게 향상 된다. 재생기의 열원으로 쓰이는 선박 엔진 자켓수의 온도가 낮은 점 그리고 설치공간의 제약 등을 고려할 때 선박에는 2중 효율 기기보다 1중 효율의 열펌프가 적절할 것이므로 이의 적용 가능성에 대하여 분석하였다.

본 연구인 냉각 시스템의 열해석에 필요한 냉매들의 열역학 물성 값은 상용 프로그램인 Refprop 9.0을 사용하였다.

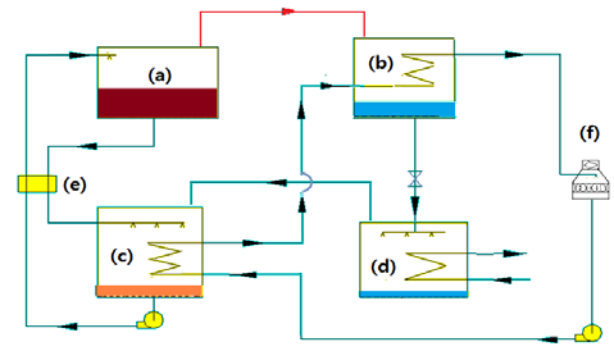
2. 흡수식 냉동기 공정 해석

2.1 현재 육상의 흡수식 냉동기 구조

현재 육상의 1중 효율 흡수식 냉동기의 구조는 Figure 1과 같이 재생기, 응축기, 흡수기, 증발기, 용액 열교환기와

냉각탑으로 구성된다[6].

냉방 공정을 보면, 재생기의 열원으로 태양열이나 공정 폐열을 이용할 때 열원인 온수의 온도는 95°C정도가 된다. 이 온수가 55%의 LiBr 수용액을 가열하여 수증기를 발생시키고 60%의 농용액이 된 후 80°C로 온도가 저하되어 열교환기로 유입된다. 이 때 증발한 수증기 냉매는 응축기에 흘러들어 35°C의 냉각수에 의하여 물로 응축된다. 열교환기에서는 재생기의 LiBr 농용액이 흡수기에서 재생기로 오는 묽은 LiBr 용액을 60°C로 가열하고, 자신은 80°C에서 45°C로 되어 흡수기에 주입된다. 응축기에서 응축된 물은 증발기에서 4°C에 증발하면서 12°C의 물을 7°C 냉수로 만든다. 증발기에서 증발한 수증기는 흡수기 상부에서 적하되는 LiBr농용액에 흡수되어 묽은 LiBr수용액이 되어 재생기로 재순환된다. 냉각수 시스템으로는 냉각탑에서 대기와 직접접촉 열교환하여 냉각된 32°C의 냉각수가 흡수기의 흡수열을 냉각시키면서 36°C가 되고 응축기에서 수증기를 응축시키면서 38°C로 상승된 후 냉각탑으로 유입된다. 이 조건에서의 COP는 0.68정도가 얻어진다.



(a) Generator, (b) Condenser, (c) Absorber, (d) Evaporator, (e) LiBr solution heat exchanger, (f) Cooling tower

Figure 1: System components of absorption heat pump

2.2 선박용 흡수식 냉동기 냉각시스템

2.2.1 선박 수랭식 냉각 공정

Figure 2는 선박 AR의 냉각시스템의 매체로 냉각수를 사용하고 이의 방열을 공기로 하는 냉각탑을 적용한 시스템을 보여준다. 육상용 수냉식 1중효율 AR은 적정 냉동능력을 얻기 위하여 재생기의 용액온도가 최소 85°C이상이고 LiBr 농도차가 4~5% 이상으로 설계되고 있다. 선박의 경우는 엔진 자켓수 온도가 90°C~93°C 이므로 재생기의 용액온도가 75°C정도로 낮게 되고, LiBr농도차가 2~3%정도로 적어 냉동능력이 현저히 감소하게 된다. 그러므로 Figure 2와 같이 엔진 자켓수 온도를 상승시키기 위한 용액 보조가열기가 필수적으로 필요하게 된다. Figure 2의 공정에서는 90°C의 엔진 자켓수를 98°C로 상승시켜 재생기 용액온도는 85°C로 하였으나 용액의 농도차는 2%에 불과하게 된다.

각 지점별 조건은 Table 1과 같고, 이의 COP는 아래의

식 (1)로 산정된다.

$$COP = Q_c / Q_g \quad (1)$$

여기서 Q_g 는 재생기의 열량이고 Q_c 는 증발기의 냉각열 원이다. 선박 엔진 자켓수 배열을 이용한 수랭식 AR의 이론적 COP는 0.597가 되며, 만약 보조열원을 고려하면 0.33으로 매우 값이 적게 된다. 그러므로 본 연구에서는 해수 냉각방식을 적용하여 COP의 향상과 함께 보조 열원이 필요 없는 시스템을 고안하고자 하였다.

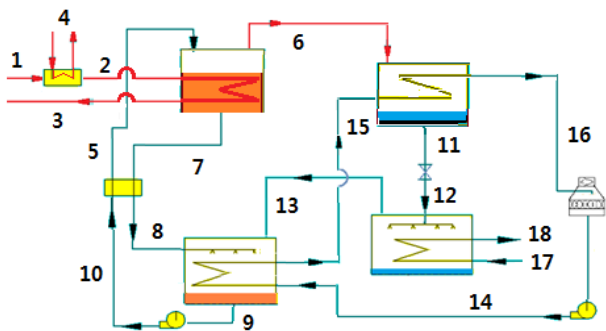


Figure 2: Marine absorption heat pump cooled with cooling tower

Table 1: System conditions of Figure 2

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|-------------------------|-------|------|-------------|---------------|
| Material | Engine jacket hot water | | | Aux. boiler | LiBr solution |
| T(°C) | 90 | 98 | 88 | . | 61 |
| P(kPa) | . | . | . | . | 8.5 |
| Flow rate(kg/s) | 0.141 | | | . | 0.042 |
| LiBr(%) | . | . | 60.5 | 58.4 | 58.4 |
| Heat(kW) | . | 5.826 | | 4.715 | . |

| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------|---------------|--------|-------|------|---------|------|
| Water vapor | LiBr solution | | | | Water | |
| 85 | 85 | 60 | 36 | 36 | 42 | 4 |
| 8.21 | 8.21 | | 0.81 | 8.5 | 8.21 | 0.81 |
| 0.00146 | 0.04054 | | 0.042 | | 0.00146 | |
| . | 60.5 | 60.5 | 58.4 | 58.4 | . | . |
| . | . | -5.631 | | . | . | . |

| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|-------------|---------------|-------------------|----|------------|----|
| Water vapor | Cooling water | | | Cold water | |
| 4 | 32 | 35.6 | 38 | 12 | 7 |
| 0.81 | . | . | . | . | . |
| 0.00146 | 0.3709 | | | 0.166 | |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | -3.671(Condenser) | | 3.476 | |

2.2.2 해수이용 냉각수 냉각 공정

Figure 3은 흡수기와 응축기열을 냉각하는 매체로 Figure 2의 공기를 이용하는 냉각탑 대신에, 해수를 이용한 수랭식을 적용하는 경우의 1중 효율 냉동기 공정도를 나타낸다. 공정의 구성을 보면 Figure 2와 동일하게 구성되며, 냉각탑 대신에 냉각수 냉각용 해수 열교환기가 가설된다.

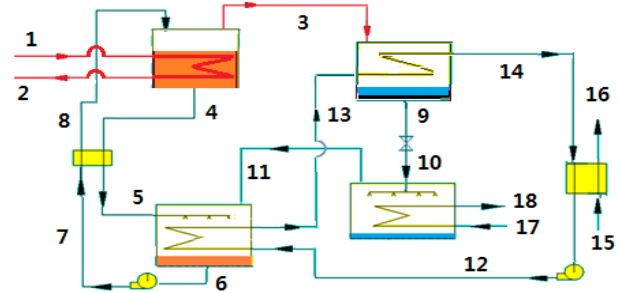


Figure 3: Marine absorption heat pump system cooled by sea water

해수 온도로 최저값인 20°C를 기준하여 AR의 냉각수 시스템을 해석하여 보면, 해수 열교환기에서 냉각수 온도는 25°C로 흡수기에 유입된다. 이 물은 흡수기에서 수증기 흡수열을 제거하면서 29°C가 되고, 응축기에서는 재생기의 수증기를 응축시키면서 31°C로 상승된다. 이는 해수 열교환기에서 20°C의 해수에 의하여 냉각되어 25°C로 흡수기에 다시 유입된다.

냉방 공정에서의 LiBr 농도는 Figure 4의 LiBr-water 듀링 선도로부터 얻어진다[7]. 선도에서 보면 재생기에서의 LiBr 농도는 응축기 온도인 35°C의 포화압력인 5.62 kPa선과 재생기의 용액온도 75°C가 만나는 지점(A)로부터 농도 59.3%, 그리고 흡수기에서 증발기 온도인 4°C의 포화압인 0.81kPa선과 흡수용액의 온도인 29°C가 만나는 지점(B)의 농도로 54.0%가 된다. 즉, 재생기에는 열원으로 90°C의 엔진 자켓수가 54.0%의 LiBr 수용액을 가열하여 물을 증발시키고 59.3%의 농용액을 만든 후 75°C로 온도가 저하되어 되돌아간다. 이 때 증발된 75°C의 수증기 냉매는 응축기에 흘러들어 냉각수에 의하여 열을 빼앗겨 냉매인 물이 된다. 응축기에서 응축된 냉매인 물은 증발기에서 4°C에 증발하면서 7°C의 냉수를 만든다.

재생기의 75°C, 59.3%의 농용액은 용액 열교환기에서 용액을 60°C로 가열하고, 자신은 45°C가 되어 흡수기에 주입된다. 증발된 수증기는 흡수기에서 적하되는 LiBr농용액에 의하여 흡수되어 54.0%의 묽은 LiBr수용액이 된 후, 용액펌프에 의하여 용액열교환기를 거쳐 재생기에 주입된다. Table 2의 조건에 의한 해수 냉각시스템의 재생기 열량은 4.9546kW, 증발기는 3.7788kW로 COP는 0.762가 된다.

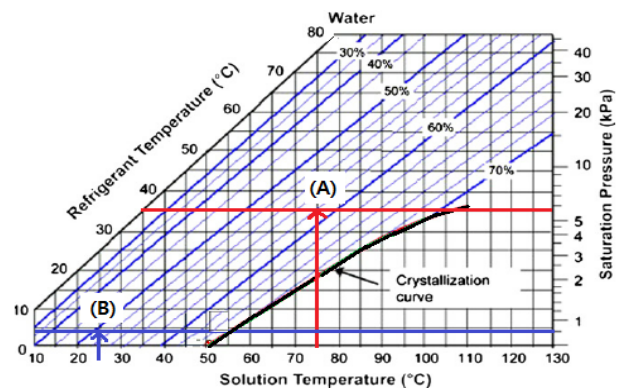


Figure 4: Temperature-pressure-concentration diagram of LiBr-water solutions

Table 2: System conditions of Figure 3

| | | | | | | |
|-----------------|------------------|----|-------------|---------------|--------|-------|
| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Material | Engine hot water | | Water vapor | LiBr solution | | |
| T(°C) | 90 | 80 | 75 | 75 | 47 | 29 |
| P(kPa) | | | 5.62 | 5.62 | | |
| Flow rate(kg/s) | 0.1185 | | 0.0016 | 0.0164 | | 0.018 |
| LiBr(%) | . | . | . | 59.3% | | 54% |
| Heat(W) | 4.9546 | | . | . | -4.743 | |

| | | | | | |
|---------------|-----|--------|------|-------------|---------------|
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| LiBr solution | | Water | | Water vapor | Cooling water |
| 29 | 54 | 35 | 4 | 4 | 25 |
| 8.5 | 8.5 | 5.62 | 0.81 | | . |
| 0.018 | | 0.0016 | | 0.3482 | |
| 54.0% | | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |

| | | | | | |
|---------------|----|-----------|----|------------|----|
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Cooling water | | Sea water | | Cold water | |
| 28.5 | 31 | 20 | 26 | 12 | 7 |
| . | . | . | . | . | . |
| 0.3482 | | 0.3482 | | 0.1808 | |
| . | . | . | . | . | . |
| -3.9904 | | 8.7334 | | 3.7788 | |

3. 냉각수 대체 가능 냉매

3.1 냉매별 압력에 따른 증발온도

흡수열과 응축열을 제거하는 냉각시스템에 물대신 상변화 냉매를 적용할 때는 냉매의 상변화 온도가 적합하여야 한다. 상변화 온도가 낮게 되면 흡수기의 흡수 성능은 향상되나 LiBr의 결정화를 초래하게 되고, 상변화 온도가 높게 되면 결정화는 없으나 흡수능이 저하되어 냉방 효율이 저하된다.

적정 냉매 조건으로는 냉매압력 2~3bar 내외에서 20°C의 해수에 의하여 응축되는 것으로, 적용 가능한 냉매로는 R123, R141b, R1233zd(19°C), R245fa 등이 있다. 냉각수 시스템에서 냉매기체의 응축온도는 냉각수 펌프의 압력에 의하여 결정되므로 냉매별 펌핑 압력에 따른 증발온도를 Figure 5에 나타내었다. 냉매 펌프의 토출압력은 절대압으로 2~3bar 내외가 적절하므로 Figure 5에서 보면 R236fa가 가장 적절한 냉매가 됨을 알 수 있다. 즉, 해수 열교환기의 해수 온도가 최저 20°C일 때 냉매의 액화온도 25°C가 되므로, 이 온도에서 R236fa의 포화압력은 2.724bar로 펌핑에 적절한 압력이 되는 반면, R123은 액체 포화압이 대기압 이하가 되고, R245fa는 1.47bar가 되어 적절하지 않게 된다. R236fa (CF3CH2CF3)는 R114의 대체 냉매로 지구 온난화 지수가 높은 문제는 있으나 오존 파괴와는 무관한 냉매이며 현재 소화제로 쓰이고 있는 물질이다.

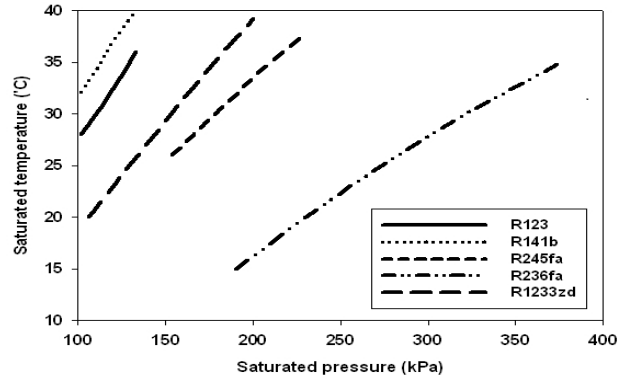


Figure 5: Saturated temperature with pressure of various refrigerants

3.2 냉각 냉매별 순환량

Figure 6은 냉각시스템의 각종 냉매에 따른 소요 냉각수량을 보여준다. 냉각 능력 1RT를 기준할 때 현재 냉각매체인 물은 질량유량이 1,165kg/h이고, 냉매인 R236fa의 순환량은 물의 15.7%에 불과하게 된다. 이와 같이 냉매 적용 냉각시스템은 냉각수량이 매우 적어 순환동력 소요가 적은 매우 효과적인 시스템이 되는 것을 알 수 있다.

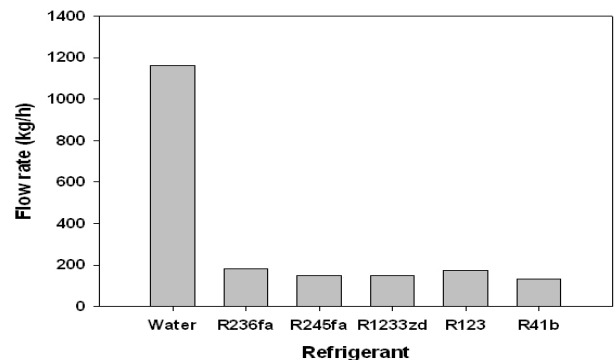


Figure 6: Flow-rates of refrigerants for the cooling of absorption heat pump

4. 냉매적용 냉각 시스템 및 성능변화

4.1 냉매적용 냉각 시스템

냉각 시스템의 냉각수 대신에 냉매를 적용한 공정은 Figure 3과 동일하나 냉각수 대신에 냉매가 순환된다. 냉매에 의한 응축열과 흡수열 냉각공정을 보면, R236fa 기체는 해수 열교환기에서 20°C의 해수에 의하여 25°C 액체가 된다. 이 액체 R236fa는 흡수기 배관에 유입되어 흡수열을 흡입하면서 일부가 증발하여 액기 혼합 포화상태로 응축기에 유입된다. 응축기에서는 재생기에서 발생한 수증기를 응축시키면서 전부 증발하여 25°C 포화기체가 되어 해수 열교환기로 유입되고 해수에 의하여 다시 재액화된 후 흡수기로 순환된다. R236fa 냉매의 25°C상변화 잠열에 의하여 냉

각되는 흡수용액과 응축액의 온도는 29℃가 된다.

이 해수 열교환기를 적용한 냉매적용 냉각시스템과 수랭식 시스템의 성능 비교 분석은 Table 2의 조건들을 기준하였다.

4.2 냉매적용 시스템의 용액농도 및 COP

냉매를 적용한 공정의 COP의 경우는 냉각 냉매의 종류에 무관하고 해수온도에 따라 바뀌게 된다. 해수 온도 20℃를 기준하면 흡수기와 응축기로 공급되는 냉각냉매 R236fa의 온도는 25℃가 된다. 이 때 재생기의 농도는 LiBr용액 온도 75℃와 응축온도 29℃의 평형농도인 61.8%가 되고, 흡수기의 묽은 용액 농도는 증발기 온도인 4℃의 포화압인 0.81kPa선과 흡수용액의 온도인 29℃가 만나는 점에서 농도 54.0%가 된다.

IRT 냉동능력을 위한 흡수용액 순환량은 0.013kg/s로 수랭식의 0.018kg/s보다 감소하며, COP는 0.798로 크게 향상된다.

Table 3: System conditions of Figure 3 with R236fa as cooling medium

| | | | | | | |
|-----------------|------------------|-------------|---------------|-------|---------|-----|
| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Material | Engine hot water | Water vapor | LiBr solution | | | |
| T(℃) | 90 | 80 | 75 | 75 | 42 | 29 |
| P(kPa) | . | . | 5.62 | 5.62 | | |
| Flow rate(kg/s) | 0.1174 | | 0.001136 | | 0.013 | |
| LiBr(%) | . | . | . | 61.8% | | 54% |
| Heat(W) | 4.9055 | | . | . | -4.6953 | |

| | | | | | |
|---------------|-----|---------|------|-------------|--------|
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| LiBr solution | | Water | | Water vapor | R236fa |
| 29 | 54 | 35 | 4 | 4 | 25 |
| 8.5 | 8.5 | 5.62 | 0.81 | | 2.7 |
| 0.013 | | 0.00164 | | 0.05497 | |
| 54.0% | | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |

| | | | | | |
|---------|-----|-----------|----|------------|----|
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| R236fa | | Sea water | | Cold water | |
| 25 | 25 | 20 | 26 | 12 | 7 |
| 2.7 | 2.7 | . | . | . | . |
| 0.05497 | | 0.2109 | | 0.187 | |
| . | . | . | . | . | . |
| -4.1214 | | 8.8167 | | 3.9114 | |

4.3 해수 온도변화에 따른 성능변화

4.3.1 해수 온도변화에 따른 냉매 생성량

Figure 7은 냉각냉매를 적용하여 흡수열과 응축열을 냉각시키는 시스템에서 냉각용 해수의 온도가 18℃부터 26℃까지 변화될 때, 재생기에서 생성되는 냉매인 수증기의 양을 나타낸다. 흡수식 냉동기에서 수증기 생성량이 증가할수록 냉각능력이 향상된다. 해수온도 26℃의 경우를 보면, 해수 열교환기에서 냉각용 냉매기체인 R236fa는 31℃에 응축

되고, 이 액체에 의하여 냉각되는 흡수용액과 응축 수증기는 36℃가 된다. 분석 기준으로 재생기 용액의 온도를 75℃, 용액의 순환량은 0.013kg/s로 일정하였다.

해석결과, 해수 온도가 증가함에 따라 냉매인 수증기의 생성량이 급격하게 감소하는 것을 보여준다. 이는 냉각냉매인 R236fa의 온도가 높음으로 인하여 응축기와 흡수기의 온도가 높게 되어 재생기와 흡수기의 LiBr 농도차가 적어지고, 재생기의 열원 주입열량이 냉매 생성량 감소량만큼 감소하게 되기 때문이다. 이를 해소하는 방법으로는 보조 열원으로 재생기의 주입열량을 증가시키으로써 수증기의 생성량을 증가시키는 방법이 있다.

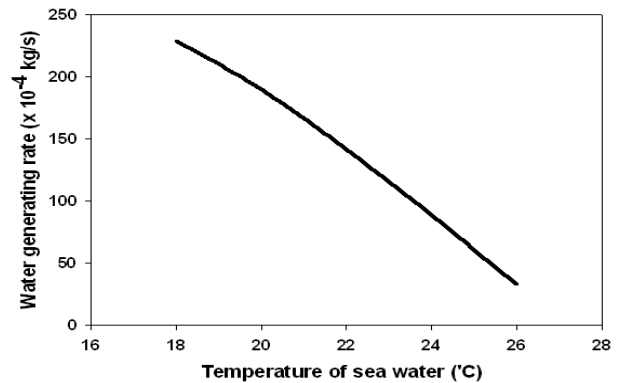


Figure 7: Water(refrigerant) generating rate in marine absorption heat pump with temperature of sea water

4.3.2 해수 온도변화에 따른 COP 변화

Figure 8은 냉각용 해수의 온도가 18℃부터 26℃까지 변화될 때의 COP 변화를 나타낸다. 해수 온도가 상승함에 따라 COP가 감소하게 되나, 해수 온도 21℃~24℃ 범위에서 감소율이 적은 이유는 Figure 7의 냉매 생성량의 감소와 함께 재생기 주입열량도 따라서 같이 감소되기 때문이다.

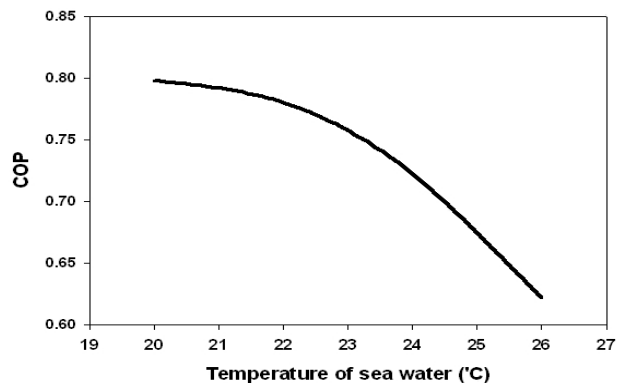


Figure 8: COP of marine absorption heat pump with temperature of sea water

4.4 해수 온도와 LiBr 결정화

LiBr의 결정화는 재생기의 열원과 냉각시스템의 온도를 분석하여야 한다. 먼저 재생기를 보면 선박의 흡수식 냉동

기의 열원은 엔진 자켓수를 이용하므로 재생기 LiBr용액 온도가 75℃ 정도로 낮아져 재생기의 과열로 인한 결정화는 발생하지 않게 된다. 그러나 냉각시스템을 보면, 냉각냉매인 R236fa가 해수에 의하여 냉각되므로 하절기 해수 수온이 18℃ 이하로 낮은 경우에는 용액열교환기 출구부에서 LiBr의 결정화가 발생하게 된다.

Figure 7의 경우, 해수 온도가 18℃가 되면 냉매 생성량은 증가하게 되나 용액 열교환기에서 LiBr의 결정이 발생하게 된다. 그러므로 이를 방지하기 위한 방안으로는 Figure 9와 같이 재생기 출구의 80℃ 엔진 자켓수 열을 이용하여 R236fa를 냉각하는 해수 온도를 20℃ 정도로 예열함으로써 결정화를 방지할 수 있게 된다.

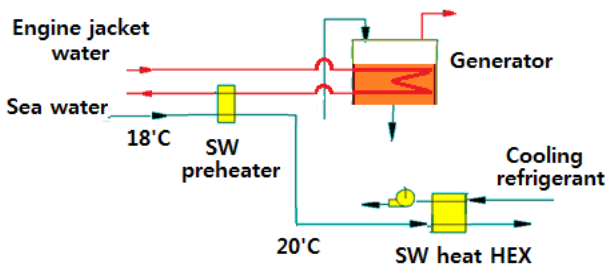


Figure 9: Sea water preheating system to prevent crystallization of LiBr solution

5. 결 론

본 연구에서는 선박용 흡수식 냉동기의 흡수열과 응축열을 제거하는 냉각시스템에 있어서 육상의 냉각탑 냉각방식 대신에 냉매를 적용하는 냉각시스템을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 해수와 열교환하여 액화될 수 있는 냉매들을 비교한 결과 R236fa가 가장 적합한 냉매로 분석되었다.
- (2) 냉매 R236fa를 적용한 흡수식 냉동기의 COP는 0.798로 육상의 냉각방식보다 15% 그리고 수랭식보다 5% 정도 향상된 매우 효율이 좋은 흡수식 시스템이 되었다.
- (3) 냉동능력 1RT를 얻기 위한 흡수용액 순환량은 0.013 kg/s로 수랭식 보다 25% 이상 감소하며, 냉각 매체 순환량도 수랭식의 15.7%에 불과하였다.
- (4) 해수온도가 18℃ 이하가 되면 LiBr용액 중 LiBr의 결정화가 발생하게 된다. 이는 재생기에서 배출되는 엔진 자켓수의 온도를 이용하여 해수 온도를 상승시킴으로써 방지할 수 있게 된다.

References

- [1] C. W. Park, "Prediction of domestic and foreign research and development for absorption refrigerator," Magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigeration Engineering of Korea, vol. 43, pp. 18-26, 2014.
- [2] M. Safarik, L. Richter, G. Weidner, Y. Wild, and P. Albring, "Application of absorption chillers on vessels," International Sorption Heat Pump Conference, Italy, part. 2, pp. 75-84, 2011.
- [3] <http://heinenhopman.com/heinen-and-hopman/pdfs-gecomprimeerd/hh-maritime-absorption-chiller.pdf>, Accessed April 3, 2016.
- [4] <http://www.worldenergyeuropa.eu/maritime-chillers.php>, Accessed April 3, 2016.
- [5] Samsung Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., "Absorption Refrigerator for Ship," Korea, Patent 1020120075632, 2012 (in Korean).
- [6] B. J. Kim, "Dynamic analysis of single-effect/double-lift LiBr-water absorption system using low-temperature hot water," Journal of the Society of Air-conditioning and Refrigeration Engineering of Korea, vol. 21, no. 12, pp. 695-702, 2009.
- [7] W. F. Stoecker and J. W. Jones, Refrigeration and Air Conditioning, 2nd ed., London, UK, McGraw-Hill, 1982.