

## R32/R152a 혼합냉매를 적용한 해양온도차발전의 기초성능해석

차상원<sup>1</sup> · 이호생<sup>2</sup> · 문덕수<sup>3</sup> · 김현주<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2014년 2월 25일, 원고수정일 : 2014년 4월 23일, 심사완료일 : 2014년 5월 19일)

### Basic performance analysis of ocean thermal energy conversion using the refrigerant mixture R32/R152a

Sang Won Cha<sup>1</sup> · Ho Saeng Lee<sup>2</sup> · Deok Soo Moon<sup>3</sup> · Hyeon Ju Kim<sup>†</sup>

**요약:** 본 논문에서는 혼합작동유체를 해양온도차발전에 적용하였을 때에 그에 따른 사이클의 성능특성에 대해 연구를 수행하였다. 다양한 혼합작동유체 중 본 논문에서는 R32/R152a를 해양온도차발전에 적용하였다. 사이클로는 기존의 밀폐형사이클, 암모니아/물 혼합물에 적용하고 있는 칼리나 사이클에 대해 시뮬레이션 해석을 수행하였고, 온열원의 온도는 26℃, 냉열원의 온도는 5℃를 적용하였다. R32를 적용한 밀폐사이클의 출력은 22kW, 사이클의 효율은 2.02%를 보였다. 혼합작동유체를 적용하였을 때에 R32/R152a(90%:10%)의 출력은 29.93kW, 사이클 효율은 2.78%로 기존의 단일 냉매보다 36%, 사이클효율은 37% 상승함을 확인 하였다. 칼리나 사이클 또한 위와 같은 방법으로 연구를 수행하였다.

**주제어:** 칼리나사이클, 해양온도차발전, 혼합작동유체

**Abstract:** In this paper, performance characteristics of cycles were studied when mixed working fluid was used for ocean thermal energy conversion (OTEC). Among the various mixed refrigerants for industrial heat-pump, R32/R152a used in ocean thermal energy conversion system. For simulations, R32/R152a were used in existing closed cycle and Kalina cycle which is used only ammonia and water as mixed refrigerant. Temperature of the warm heat source was 26 and 29 celsius degree, temperature of the cold heat source was 5 celsius degree. In results of simulation, Gross power of the closed cycle on R32 was 22kW, and efficiency of the cycle was 2.02%. When the mixed refrigerant of R32/R152a, in the ratio of 90 to 10, gross power of the closed cycle was 29.93kW, and efficiency of the cycle was 2.78%. Gross power and cycle efficiency of R32/R152a increased by 36% and 37% than those of existing single refrigerant. Additionally, the same simulations were conducted in Kalina cycle with the same various composition ratio of mixed refrigerant.

**Keywords:** Kalina cycle, Mixed working fluids, Ocean Thermal Energy Conversion

## 1. 서론

현재 전 세계적으로 신재생에너지에 대한 관심

<sup>†</sup> Corresponding Author: Seawater Utilization Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 124-32 Simcheungsu-gil Oho-ri Jugwang-myeon Goseong-gun Gangwon-do, Korea, 219-822 E-mail: hyeunju@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5000

1 Seawater Utilization Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: swcha@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5026

2 Seawater Utilization Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: hslee@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5021

3 Seawater Utilization Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: dsmoon@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5030

이 날로 증대되고 있다. 특히 우리나라는 필요 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하기 때문에 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지의 개발이 절실히 필요하다[1]. 지구 표면의 약 71%에 달하는 해양으로 흡수되는 연간 태양에너지의 양은 현재 인간이 소비하고 있는 전체 에너지량의 약 4,000배에 해당하는 양이다[2].

해양온도차발전은 따뜻한 해양표층수와 차가운 해양심층수의 온도차를 이용하여 암모니아 등의 작동유체로 터빈을 돌려 발전하는 방식이다. 이는 다른 해양에너지에 비해 변동성이 적기 때문에 안정적인 전력 생산이 가능하다는 장점이 있다. 1881년 프랑스에서 최초로 해양온도차발전에 대한 개념이 제안되었고, 1930년도에는 개방형 해양온도차발전 실험을 수행하였으며, 1979년 하와이에서 50kW급 실험용 폐쇄형 해양온도차발전 시스템을 최초로 실험에 성공하였고, 1993년도에는 약 213kW의 전기를 생산하는 등 해양온도차발전에 대한 주도적인 연구로 현재 세계적인 기술을 선도하고 있다. 일본의 경우 사가 대학에서 암모니아, R22 및 암모니아/물 혼합작동유체를 적용한 해양온도차발전실험을 꾸준히 진행하고 있으며, 특히 혼합작동유체를 사용한 Uehara 사이클에 대한 개발을 꾸준히 하여 사이클의 효율을 향상시켰다[3]. 국내에서는 해양온도차발전에 대한 시뮬레이션 및 20kW 해양온도차발전의 실용화를 위한 사이클 효율 향상에 대한 연구가 진행되고 있으나, 해양온도차발전의 실용화를 위한 사이클 연구가 필요한 실정이다[4]. 또한 몬트리올 의정서에 따라 기존에 사용하던 CFC, HCFC계열의 냉매들의 사용이 규제됨에 따라 해양온도차발전에 적용할 수 있는 새로운 냉매 또는 혼합작동유체에 대한 연구가 시급한 상황이다. 그리고 기존의 작동유체에 시스템의 큰 변경 없이 성능이 비슷하거나 우수한 성질의 작동유체에 대한 연구 또한 필요하다[5].

본 논문에서는 해양온도차발전에 적용할 수 있는 혼합작동유체에 대한 연구를 진행하였다. 혼합작동유체는 R32/R152a를 적용하였다. 작동사이클은 기존의 밀폐형사이클, 칼리나사이클에 대해 해석을 수행하였다. 온열원의 온도는 26℃, 냉열원의

온도는 5℃를 적용하여 그에 따른 결과를 비교분석하였다.

## 2. 시뮬레이션해석

### 2.1 R32/R152a

혼합작동유체란, 기존의 단일작동유체를 일정비율로 혼합하여 만든 작동유체를 말한다. 현재 산업용 혼합작동유체로는 R410A(R32/R125), R407C(R32/R125/R134a)등과 같은 종류가 있다. 이 혼합작동유체의 특징으로는 ODP가 0이기 때문에 오존층을 파괴시키지 않으며, 친환경적인 비공비 혼합냉매를 사용하면 열효율을 10%정도 향상시킬 수 있으며, 기존의 시스템에 큰 변화 없이 적용가능하다는 장점이 있다. 이 중에 본 논문에서는 R32/R152a를 적용한 해양온도차발전의 특성에 대해 연구를 진행하였다.

Table 1: Properties of the R32/R152a

R32: R152a	Boiling pressure (kPa), (at 25℃)	Boiling temperature (℃), (101kPa)
100:0	1710	-51.6
70:30	1329	-39.5
30:70	898	-29.6
0:100	595	-24.0

Table 1은 R32/R152a의 조성비에 따른 냉매의 특성을 나타낸다. R32의 조성비가 클수록 증발압력이 높아지고, 증발온도는 낮아진다. R32가 R152a보다 증발압력이 크고, 증발온도가 낮기 때문에 R152a의 성분이 커질수록 증발압력이 낮아지고 끓는점이 높아지는 경향을 나타낸다.

Figure 1은 R32의 T/S 선도를 나타내고 있다. 단일 작동유체는 유체가 상변화를 할 때에 온도가 일정하게 유지되며 잠열에 의해 상변화를 하게 된다.

Figure 2는 R32/R152a를 70:30으로 혼합했을 때의 T/S 선도를 나타낸다. 혼합작동유체는 상변화를 할 때에 온도가 변하며 상변화를 하게 되고, 이런 특성은 단일작동유체보다 열교환기의 열효율이 상

승할 수 있는 특성이 된다. 그리고 R32/R152a의 T/S선도는 R152a를 많이 섞을수록 Dew point곡선의 기울기가 커진다. 이런 특성은 터빈의 출구압력을 더 낮게 설정할 수 있기 때문에 터빈의 성능에 좋은 영향을 미칠 수 있다. 하지만 혼합작동유체의 경우 단점 중 하나가 배관의 누설이 생기면 냉매의 조성비가 변하기 때문에 시스템 전체의 성능이 변하게 된다. 따라서 위의 특성을 바탕으로 본 연구를 진행하였다.

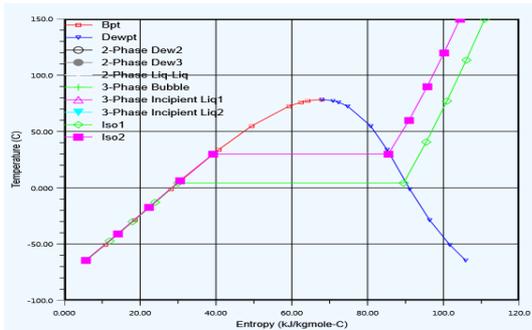


Figure 1: T/S curve of the R32

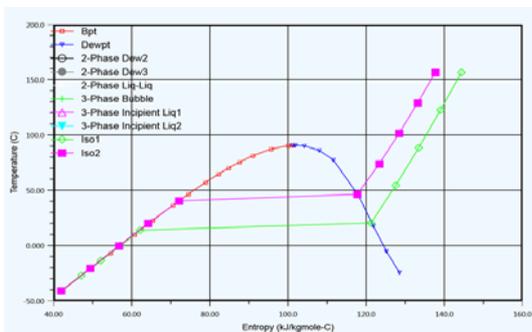


Figure 2: T/S curve of the R32/R152a(70:30)

## 2.2 시뮬레이션 해석조건

시뮬레이션 해석 방법으로는 유기랭킨사이클을 해석하기 위해 공정설계프로그램인 AspenTech HYSYS(V.8.0)프로그램을 이용하였다. HYSYS는 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태값을 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있기 때문에 이번 논문에서 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 상태방

정식으로는 Peng-Robinson방정식을 사용하였다. Peng-Robinson방정식은 열 해석에서 가장 널리 사용하는 상태 방정식이며 식 (1)과 같다.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b) + b(V-b)} \quad (1)$$

다음은 작동사이클에 대해 소개하고자 한다. Figure 3은 밀폐사이클을 보여주고 있다. 작동유체는 펌프를 통해 증발기로 보내어지게 되고, 증발기에서 작동유체가 증발하여 기체상태가 되며 터빈을 통과하여 전기를 생산한다. 그리고 터빈을 통과한 후 응축기를 통과하여 응축되고 다시 펌프로 공급하여 순환하는 밀폐사이클이다. 밀폐사이클은 해양온도차발전에서 구조가 간단하며 많이 사용되는 사이클 중 하나이다.

Figure 4는 칼리나 사이클을 나타내고 있다. 혼합작동유체 중 하나인 암모니아/물 혼합작동유체를 사용하기 위해 만들어진 사이클이다. 증발기를 통과한 작동유체는 기액분리기에 의해 액체는 열교환기로 전해지고 기체는 터빈을 통과하여 전력을 생산한다. 터빈을 지난 작동유체는 응축기에 의해 응축이 되고 증발기에 공급하기 전 기액분리에서 분리된 액체와 열교환을 하여 작동유체의 예열작용을 하여 증발기의 용량이 작아지게 된다. 하지만 예열을 많이 할수록 액체성분이 많이 분리되기 때문에 그만큼 터빈의 출력이 작아지는 단점이 있기 때문에 이에 따른 적절한 분배가 필요하다.

Table 2는 시뮬레이션 해석조건이다. R32를 적용하여 22kW의 전력을 생산할 때의 온열원과 냉열원의 유량을 기준으로 나머지 조성비에도 동일한 조건을 적용하여 해석을 진행하였다. 온열원 및 냉열원의 온도는 26℃, 5℃를 각각 적용하였으며, 냉매의 유량은 3.7 kg/s를 주었다. 사이클의 효율은 식 (2)와 같이 계산하여 결과를 도출하였으며 전체 출력(Wt)에 펌프동력을 사이클효율에는 포함시키지 않았다. R32와 R152a의 조성비는 100:0에서 0:100까지 R32 조성을 10%씩 감소시키며 단계적으로 해석을 진행하였다.

$$\eta_{cycle} = \frac{W_t}{Q} \quad (2)$$

$W_t$  = 터빈출력,  $Q$  = 사이클내에 투입된 총열량

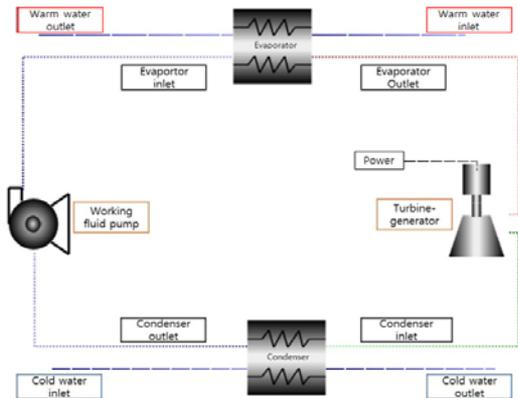


Figure 3: Schematic of the Closed cycle

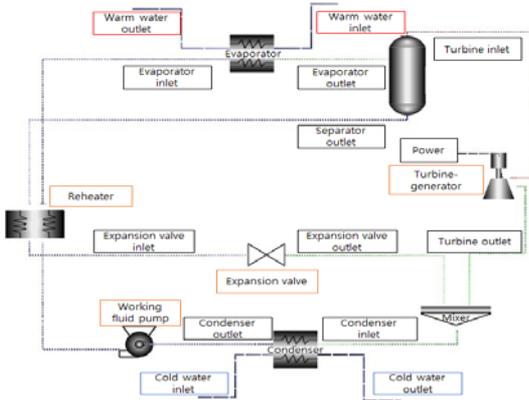


Figure 4: Schematic of the Kalina cycle

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 밀폐사이클

첫 번째로 기존의 밀폐사이클에서 혼합작동유체의 특성에 대해 연구를 진행하였다. Figure 5는 R32/R152a의 조성비에 따른 사이클의 출력과 효율은 보여준다. R32/R152a의 조성비가 90:10일 경우에 가장 높은 출력과 효율값을 보여준다. 이는 터빈의 팽창비(터빈입출구 압력비)가 높을수록 출력

이 높은 값을 나타내는데, 90:10의 조성비에서 가장 높은 1.34를 나타냈고, 이때의 출력 및 효율은 29.93kW, 2.78%를 나타내고 있다. 이는 기존의 R32 단일작동유체의 출력에 비해 36%, 효율은 37%상승한 결과를 확인 할 수 있었다. 그리고 조성비가 60:40일 때 까지 R32 단일작동유체보다 더 높은 성능을 보이는 것을 확인하였다.

Table 2: Simulation condition

Parameter	Value
Power(kW)	22kW, open
Cycle type	closed, Kalina
Vapor production (%)	90, 70, 50, 30
Warm water source(°C)	26
Warm water ΔT(°C)	3
Cold water source(°C)	5
Warm water mass flow	86.68kg/s
Cold water mass flow	43.88kg/s
Turbine efficiency (%)	80
Pump efficiency(%)	80
Working fluid (R32:R152a)	100:0, 90:10, ~10:90, 0:100

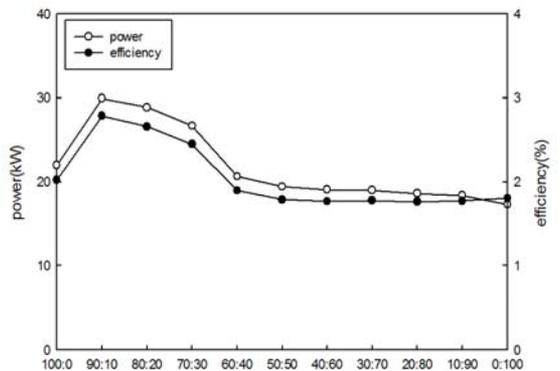


Figure 5: The characteristics of the gross power and efficiency according to composition ratio

#### 3.2 칼리나사이클

R32/R152a를 칼리나사이클에 적용하여 사이클 성능특성에 대해 비교해보았다. 칼리나사이클은 Figure 4에서보면 알 수 있듯이 펌프에서 토출되는

펌프의 압력에 따라 증기를 생성할 수 있는 양이 결정되게 된다. 증기를 많이 만들수록 작동유체의 유량이 많아지고, 터빈 입구의 압력은 감소하게 된다. 그리고 재열기로 들어가는 냉매의 양이 작아지게 됨으로써 증발기의 용량은 커지게 되는 단점이 있다. 따라서 최적의 출력 및 효율 점을 구하기 위해 작동유체 증기생성량을 90%, 70%, 50%, 30%임으로 정하여 시뮬레이션 해석을 수행하였다.

Figure 6은 조성비에 따른 사이클의 출력을 나타낸다. 사이클 출력은 전체적으로 70%의 증기생성량이 높은 출력을 보였다. 일반적으로 터빈으로 유입되는 증기의 양이 많은 90%가 터빈의 출력이 가장 높다고 할 수 있다. 하지만 R32/R152a를 적용한 Kalina cycle에서는 90%가 터빈에 유입되는 유량은 많으나, 터빈의 입구측의 압력이 낮아지고, 팽창비가 작아지기 때문에 유량은 작지만 터빈의 팽창비가 큰 70%의 증기생성량이 가장 높은 출력을 나타냈다. 조성비는 90:10의 조성비가 가장 큰 출력을 나타냈으며, 이때의 출력은 26.04kW이다.

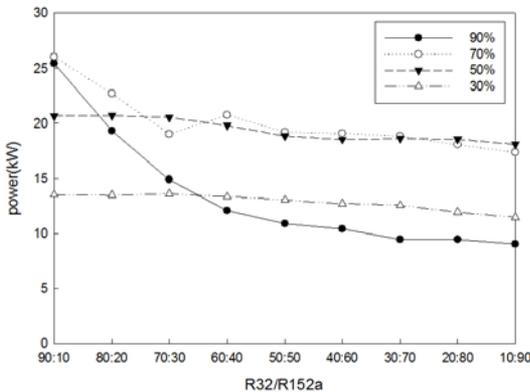


Figure 6: The characteristics of the gross power according to composition ratio

Figure 7은 조성비에 따른 사이클의 효율을 나타낸다. 증기생성량이 30%일 때에 가장 높은 사이클 효율을 나타내고 있다. 이는 터빈의 출력에 비해 증발기의 용량이 상대적으로 작아져 사이클의 효율이 높게 나타났다. 증발기의 용량이 작아지는 이유는, 기액분리기를 통해 기체 및 액체로 분리된 작동유체는 각 각 터빈, 예열기(열교환기)로 공급

되는데, 터빈에 유입되는 유량이 작아지게 되면, 예열기로 공급되는 유량이 많아져 전체적인 증발기의 용량이 작아진다. 조성비의 경우 90:10에서 가장 높은 효율을 나타내며 3.42%를 보였다.

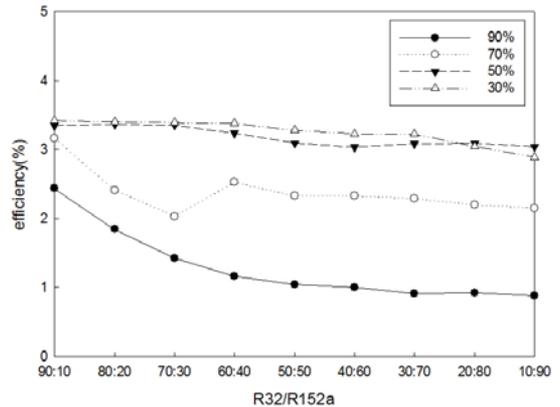


Figure 7: The characteristics of the cycle efficiency according to composition ratio

### 3.3 밀페사이클 및 칼리나사이클의 성능비교

밀페사이클 및 칼리나사이클의 성능을 비교했다. 칼리나사이클의 효율은 성능이 가장 높은 증기생성량인 30%를 적용하였으며, 출력은 70%를 적용하여 그래프에 나타냈다. 또한 기존의 칼리나사이클의 경우 암모니아/물 혼합작동유체를 사용하기 위해 고안된 사이클인 암모니아/물 혼합물을 적용한 사이클을 해석하여 비교분석하였다.

Figure 8은 조성비에 따른 사이클 출력을 나타낸다. 사이클 출력에서는 밀페사이클의 출력이 모든 조성비에서 높은 출력을 나타내었고, 사이클 조성비가 90:10일 때 가장 높은 출력 결과를 나타낸다. 이 또한 사이클 종류에 상관없이 터빈의 팽창비가 90:10일 때 가장 높은 팽창비를 나타냈다. 칼리나사이클 내에서 비교해보면 R32/R152a가 암모니아/물보다는 다소 낮은 출력을 나타냈으나, 90:10이하의 조성비에서는 R32/R152a가 높은 출력을 나타내는 것을 확인하였다. 90:10에서 밀페사이클이 칼리나사이클보다 14.8% 높은 성능을 보였다.

Figure 9는 조성비에 따른 사이클 효율을 나타내고 있다. 사이클 효율은 R32/R152a를 적용한 칼리

나사이클이 모든 조성비에서 높은 성능을 나타내고 있다. 기존의 암모니아/물보다 높은 성능을 확인하였기 때문에 R32/R152a를 적용하는 것이 높은 성능을 낼 수 있다. 그 이유로는 R32/R152a가 낮은 출력에 비해 필요한 열교환기 용량이 작기 때문에 사이클효율이 상승하는 특성을 보였다. R32/R152a, 암모니아/물 각각의 증발기 용량은 870kW, 1130kW로 R32/R152a가 암모니아/물에 비해 23% 낮게 나타났다. 따라서, R32/R152a는 암모니아/물 보다 8%의 성능향상을 보였다.

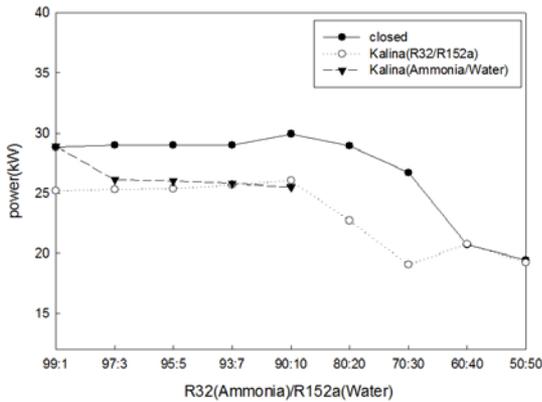


Figure 8: Comparing the gross power of the closed and Kalina cycle

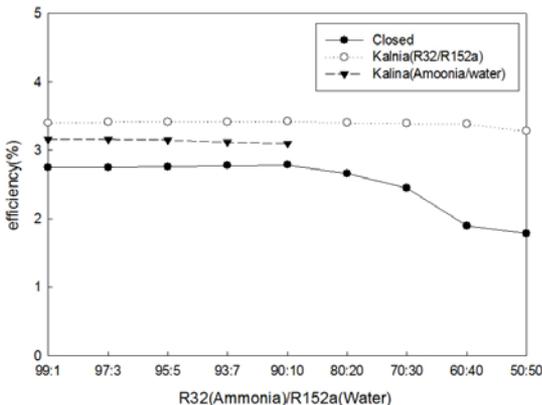


Figure 9: Comparing the cycle efficiency of the closed and Kalina cycle

#### 4. 결론

본 연구에서는 R32/R152a를 해양온도차발전

적용하였을 때에 사이클의 성능 및 특성에 대해 연구를 하였으며, 그에 따른 결과는 다음과 같다.

(1) 밀폐사이클에서 R32/R152a를 적용하였을 때에 90:10의 조성비에서 가장 높은 출력과 효율을 나타냈으며, 각각 29.93kW, 2.78%를 나타냈다.

(2) 칼리나사이클에 혼합작동유체를 적용하였을 때 R32/R152a가 기존의 암모니아/물 혼합작동유체보다 높은 효율을 나타냈으며 8%성능이 향상되었다.

(3) R32/R152a를 적용한 해양온도차발전에서 밀폐사이클은 출력이 높은 성능을 나타냈으며, 사이클 효율은 칼리나사이클이 우수했다.

#### 후 기

본 연구결과는 해양수산부가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발”성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] T. B. Seo, “Introduce of the OTEC”, Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, vol. 30, no. 1, pp. 18-24, 2011 (in Korean)
- [2] L. A. Vega, “Ocean thermal energy conversion primer”, Journal of Marine Technology Society, vol. 6, no. 4, pp. 25-35, 2003.
- [3] G. Motoshima, S. Yasunaga, and I. Nakamura, “Consturction of simulation model for OTEC plant using uehara cycle”, Electrical Engineering in Japan, vol. 176, no. 2, pp. 1-13, 2011.
- [4] H. J. Kim, H. S. Lee, D. H. Jung, and D. S. Moon, “Analysis of 1MW closed OTEC cycle using thermal effluent and waste heat”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 4, pp. 470-476, 2010 (in Korean).
- [5] J. I. Yoon, S. M. Baek, C. H. Son, J. H. Heo, B. H. Ye, H. S. Lee, and H. J. Kim “Efficiency characteristics of OTEC power cycle applying to single and multi component refrigerants”, Conference of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 259-260, 2012 (in Korean).