

# 원자력발전소 온배수를 이용한 해양온도차발전에 대한 연구

서 향 민, 박 성 식, 신 상 호\*, 김 중 보\*\*, 김 남 진†

제주대학교 에너지공학과, 한국지역난방공사\*, 인하대학교 기계공학과\*\*

## Study on OTEC System using Condenser Effluent from Nuclear Power Plant

Hyang-Min Seo, Sung-Seek Park, Sang-Ho Shin\*, Chong-Bo Kim\*\*, Nam-Jin Kim†

Department of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

\*Korea District Heating Corporation, Il-San 411-815, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**ABSTRACT:** OTEC power plants are studied as a viable option for the supply of clean energy. In this paper, the thermodynamic performance of OTEC system was calculated. The results show that the working fluids such as R32 and R125 would be alternatives based upon cutting down the system size, environmental preservation, and conditions without having a severe penalty in efficiency. the initial cost significantly. The regeneration system increase in energy efficiency, and the system can generate electricity when the difference in warm and cold seawater inlet temperatures are greater than 15°C. Also, the system efficiency of OTEC power plant using the condenser effluent from nuclear power plant instead of the surface water increased about 2%.

**Key words:** OTEC(해양온도차발전), Condenser effluent(열수), Regeneration(재생), Surface seawater(표층수), Efficiency(효율)

### 1. 서 론

해양 온도차 발전(OTEC)의 기본 원리는 수심에 따른 바닷물의 온도차를 이용한 발전 방식이다. 열대해역에서 해면의 해수 온도는 20 °C를 넘으나 해면으로 부터 500~1000 m 정도 깊이의 심해에서는 4°C에서 거의 변하지 않는다. 이런 표층수와 심층수의 온도차로부터 프레온과 같은 저온 비등 매체(냉매)를 이용하여 발전하는 기술을 해양 온도차 발전, 줄여서 보통 'OTEC'이라 부른다. 미국은 80년대 초에 이미 160kW급의 해양 온도차 발전에 대한 실증 실험을 마친바 있으며, 하와이에는 50 kW급의 상용 발전소가 가동중

이고 10만 kW급의 대규모 발전소가 건설되고 있다. 일본에서는 일찍부터 Sun-Shine 계획의 일부로 해양 온도차 발전 기술의 개발을 추진하여 왔다. 그러나 OTEC 발전 시스템 설치에 소비되는 막대한 비용과 신뢰성 있는 데이터의 부족으로 인해서 OTEC 발전 시스템의 상업화가 이루어지지 못하고 있다. 더욱이 작동유체로 연구되고 있는 암모니아의 독성문제 등으로 인하여 R22가 제안되고 있지만 이는 몬트리올 의정서에 의해서 사용금지 될 것이기 때문에 이를 대체할 수 있는 새로운 작동유체에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 앞으로 해양 온도차 발전 시스템에 사용될 가장 적합한 작동유체를 찾고, 밀폐 시스템, 재생 시스템, 개방 시스템, 혼합 시스템, 칼리나 시스템의 효율을 같은 기준의 조건으로 비교 분석하여 각각의 시스템효율을 알아보고, 표층수 대신 사계절 일정하게 배출되는

† Corresponding author

Tel.: +82-64-754-3643; fax: +82-64-757-9276

E-mail address: jnkim@cheju.ac.kr

동해안 지역의 원자력 발전소 온배수를 이용하여 각 계절별로 OTEC 발전 시스템의 다양한 열역학적 해석을 수행하고자한다.

## 2. OTEC 시스템 시스템

### 2.1 밀폐 시스템

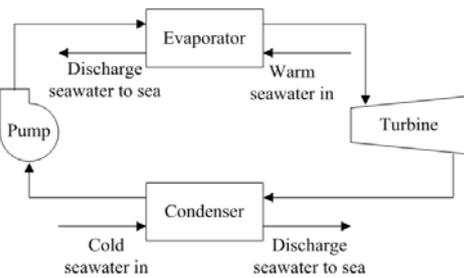


Fig. 1 Schematic diagram of a closed system.

Fig.1은 밀폐 시스템을 이용한 OTEC 발전 시스템의 개략도이다. 과냉액체가 증발기에 들어가며 유체가 따뜻한 표층수와 열교환으로 증발이 일어나 과열증기상태로 나오게 된다. 이 증기는 터빈을 가동시킨 후 2상 상태가 되어 응축기로 유입된 후 심층수와 열 교환으로 대부분이 과냉된 상태로 나오게 되면 펌프에 의해 압력이 상승하여 증발기로 다시 들어가게 된다.

### 2.2 재생식 시스템

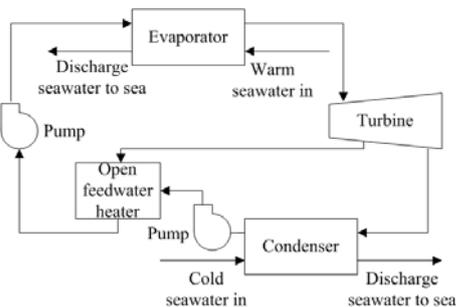


Fig. 2 Schematic diagram of a regenerative cycle.

재생식 시스템은 밀폐 시스템과 유사하지만, 터빈으로 들어간 증기의 일부분을 중간 단계에서 추출한 뒤 개방형 급수 가열기를 통과하여 증발기에 들어가는 작동유체를 미리 가열하는 것만 다르다. 따라서 밀폐 시스템에 비해 개방형 급수 가열기와 펌프가 한 개씩 추가적으로 필요하다.

### 2.3 개방형 시스템

개방형 시스템은 다른 시스템과는 달리 해수 자체를 작동유체를 사용한다. 유입유체가 증기압 이하(약 2.5kPa)로 유지되는 기화기에서 순간적으로 기화되어 터빈을 통해 팽창한 후 응축된다. 본 연구에서 고려한 응축기는 담수생산을 고려하기 위해 간접 접촉 열교환 방식을 채택하였다.

### 2.4 혼합형 시스템

혼합형 시스템은 개방형과 폐쇄형 시스템을 결합하여 만든 시스템으로써, 담수생산과 효율향상을 동시에 이루기 위해 만들어진 것이다. 따뜻한 표층수가 증발기내에서 작동유체와 열교환을 한 후 기화기에 유입되어 담수를 생산하는 시스템을 말한다. 이러한 혼합형 시스템은 기화기 위치에 따라 2가지 방식으로 나눌 수 있는데, 그 중의 하나인 Integrated 혼합형 시스템을 본 연구에서 사용하였다.

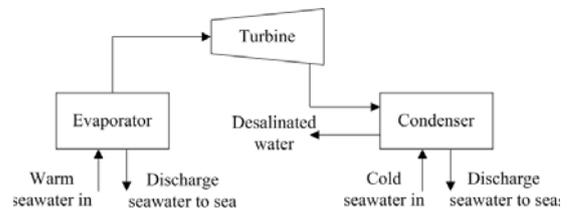


Fig. 3 Schematic diagram of an open system.

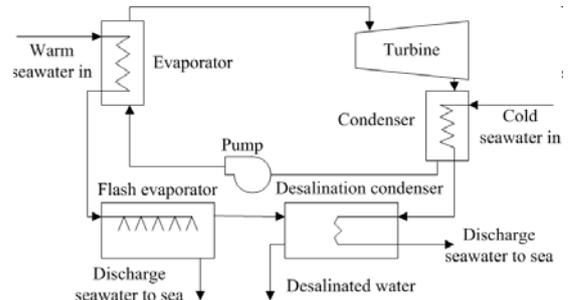


Fig. 4 Schematic diagram of a hybrid system.

### 2.5 칼리나 시스템

칼리나 시스템 시스템은 다른 시스템과는 달리 NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O의 혼합매체를 사용한다는 특징을 가지고 있다. 따라서, 칼리나 시스템은 밀폐 시스템에 분류기, 재생기, 팽창밸브, 혼합기가 추가된 시스템

템이다. 그림에서 실선은 액체의 흐름을 나타내고 굵은 선은 증기 또는 2상 상태의 흐름을 나타낸다. 칼리나 시스템의 작동원리는 다음과 같다. 재생기내에서 열 교환을 마친 액상의 암모니아-물 혼합물은 증발기내로 유입되어 따뜻한 표층수와 열 교환하여 암모니아는 증발하게 된다. 이렇게 증발한 증기혼합물은 분류기내에서 포화증기와 포화 액으로 분리되어진다. 이때 분리된 포화증기는 터빈을 가동시킨 뒤 단열된 혼합기로 유입된다. 한편, 분류기로부터 분리되어진 고온의 포화액은 재생기내에서 증발기로 유입되는 과냉액 상태의 암모니아-물 혼합물과 열 교환을 한 후 흡수기로 유입되기 전에 팽창밸브를 거친다. 흡수기에서 합쳐진 2상 상태의 혼합물은 응축기내에서 심층수와 열 교환을 통하여 포화액 상태가 된 후, 펌프에 의해 재생기에 유입되어 시

스템을 완성하게 된다.

### 3. 시스템 해석 방법

여러 종류의 작동유체와 시스템간의 성능을 비교하기 위해서는 증발용량이 일정하다고 가정하는 것이 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 증발기의 용량을 150kW로 일정하다고 가정하였으며, 이는 증발기에서 물의 질량유량과 증발기로 들어가고 나오는 물의 온도를 고정시킴으로써 가능하다. 또한, 증발기의 UA, 증발기와 응축기에서 해수측 질량유량, 터빈과 작동유체 펌프의 효율, 표층수의 입·출구 온도, 심층수의 입구온도를 Table 1과 같은 조건하에서 모사하였다.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 작동유체의 효율과 터빈크기 비교

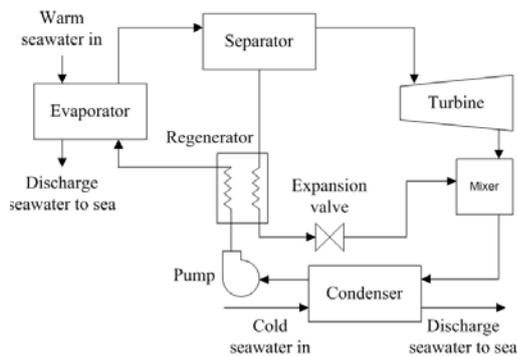


Fig. 5 Schematic diagram of a Kalina system.

Table 1 Cycle operating conditions

Warm seawater inlet temperature (°C)	28
Warm seawater outlet temperature (°C)	25
Cold seawater inlet temperature (°C)	4
LMTD in evaporator (°C)	2.5
LMTD in condenser (°C)	2.5
Isentropic turbine efficiency (%)	100
Isentropic pump efficiency (%)	100
Heat transfer rate in evaporator (kW)	150
Mass flow rate of warm seawater (kg/s)	11.96
Mass flow rate of cold seawater (kg/s)	11.72
Effectiveness of regenerator(Kalina system)	0.9
Mass fraction of NH <sub>3</sub> at evaporator outlet (kg/kg, Kalina system)	0.958
Effectiveness of regenerator(open system)	0.85
Mass flow rate of warm seawater (kg/s, open system)	6.16
Mass flow rate of cold seawater (kg/s, open system)	5.98

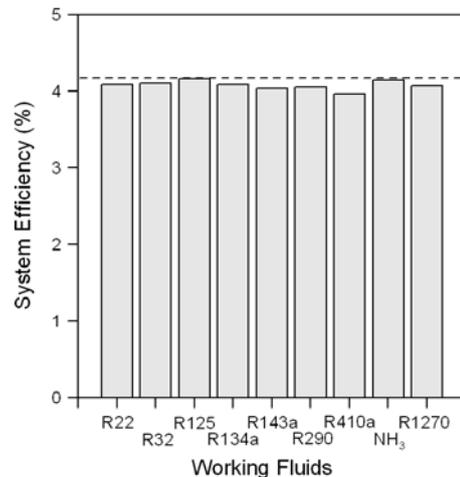


Fig. 6. Closed system efficiency of various working fluids

Fig. 6은 9개의 작동유체에 대한 시스템 효율을 보여준다. 그림으로부터 쉽게 알 수 있듯이 본 연구에서 고려한 작동유체들의 열효율 차이는 매우 작았다. 이 중 암모니아가 가장 높은 효율을 보이기는 하지만 암모니아와 가장 효율이 낮은 R125와의 차이는 암모니아를 기준으로 하였을 때 약 5%에 불과하다. 이 결과로부터 단순 랭킨 시스템의 작동유체를 결정할 때 작동유체 자체의 열효율은 그다지 중요하지 않음을 알 수 있다. Fig. 7은 R22를 기준으로 한 각 작동유체

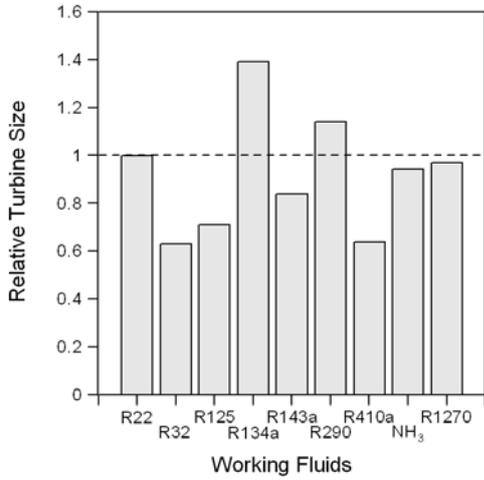


Fig. 7 Relative turbine size of various working fluids (Base fluid : R22)

의 상대적 터빈의 크기를 보여준다. 터빈의 크기는 터빈 입·출구의 엔탈피 차를 터빈입구의 비체적으로 나눈 값으로 정의할 수 있다. Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 R32, R125, R143a, R410a를 사용하게 되면 터빈의 크기가 작아지므로 초기 설치비용을 줄일 수 있게 된다.

#### 4.2 과열/과냉도와 압력비의 영향

OTEC 발전시스템의 증발기에서 발생된 증기는 과열되고, 응축기에서 응축된 액체는 냉매를 펌핑할 때 발생할 수 있는 공동현상을 방지하기 위해서 과냉을 시켜야 한다. Fig. 8은 과열도와

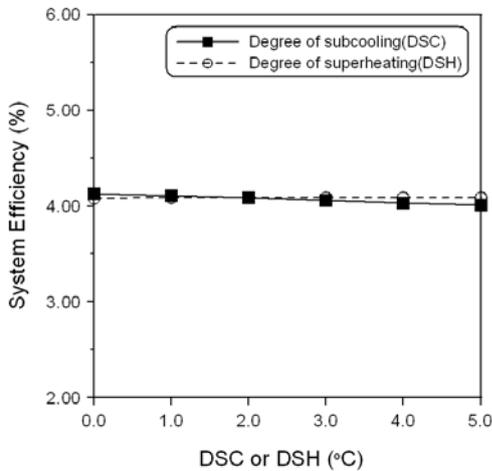


Fig. 8 Effects of superheating and subcooling on simple Rankine cycle efficiency

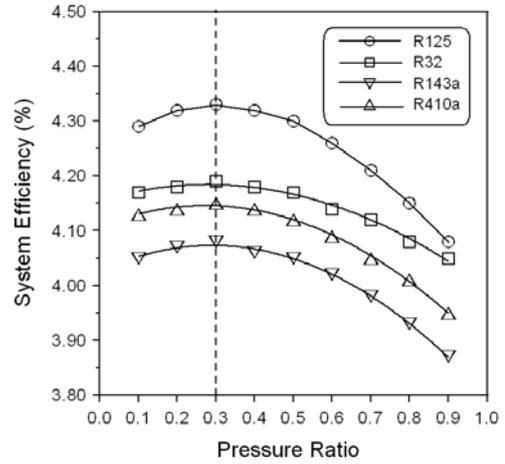


Fig. 9 Efficiency of the regenerative Rankine cycle as a function of pressure ratio

과냉도가 효율에 미치는 영향을 나타낸 것으로 과열도와 과냉도는 시스템 효율에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 재생식 시스템의 모사조건은 Table 1과 동일하지만, 밀폐 시스템과 달리 3개의 압력이 존재하게 된다. 고압과 저압은 각각 표층수와 심층수의 온도에 따라서 정해지고, 중간압력은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$P_{mid} = P_{low} + f_p(P_{high} - P_{low})$$

여기서  $f_p$ 는 압력비이다.  $f_p$ 의 값이 0인 경우 중간압은  $P_{low}$ ,  $f_p$ 의 값이 1인 경우  $P_{high}$ 와 같게 된다. 따라서 본 연구에서는  $f_p$ 의 값을 0.1부터 0.9 까지 변화시켜가며 최적화 작업을 수행하였다. Fig. 9는  $f_p$  값에 따른 재생식 랭킨 시스템의 효율을 나타내고 있으며, 압력비가 0.3인 경우 최고의 성능을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

#### 4.3 시스템 효율비교

Fig. 10은 여러 가지 시스템의 효율을 비교한 그림이다. 그림에서와 같이 재생식 시스템의 효율이 가장 좋은 것을 알 수 있었고, 개방형 시스템은 담수 자체를 사용하기 때문에 기화시 담수에 녹아 있던 가스가 나온다. 그 가스를 제거하기 위한 추가 동력이 필요하므로 시스템의 효율이 가장 낮았다.

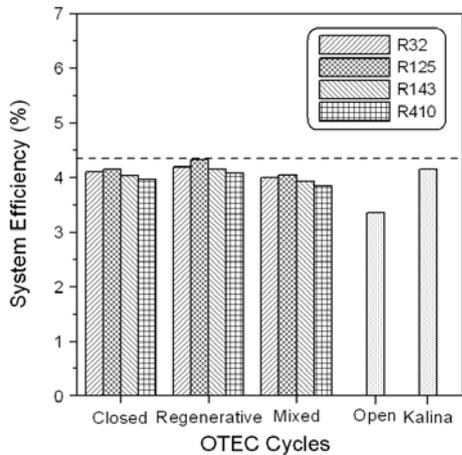


Fig. 10. Comparison of each cycle efficiency

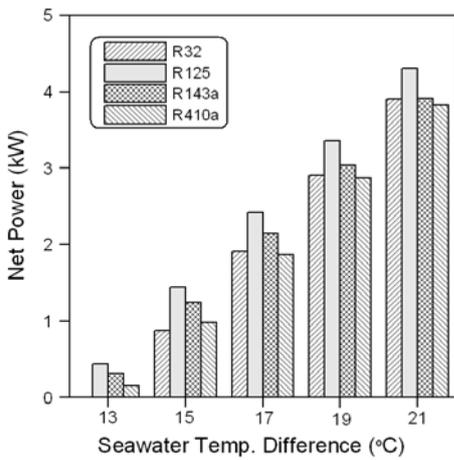


Fig. 11 Effect of seawater temperature difference

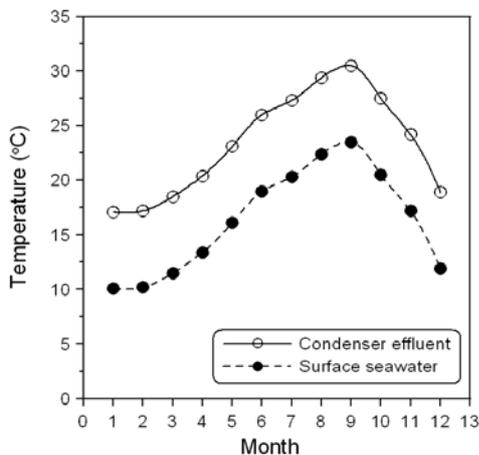


Fig. 12. Temperature

#### 4.4 해수온도차 비교

Fig. 11은 심층수의 온도를 4°C로 고정시켰을 경우 표층수의 온도에 따른 총 출력의 변화를 나타낸다. 해수층 펌프일을 계산하기 위해 심층수 및 표층수 측의 압력강하를 모두 50kPa로 가정하였다. 그림에서 R32의 경우 표층수와 심층수사이의 온도차가 13°C 이하일 경우 해수를 펌핑하는데 소요되는 동력이 시스템의 총 출력을 초과하기 때문에 OTEC 발전시스템의 효율은 0이 된다. 그 외의 작동유체는 재생시스템에서 전기를 생산하기 위해서는 해수사이의 온도차가 최소 15°C 이상 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

#### 4.5 원자력 온배수를 이용한 계절별 재생 시스템의 효율과 출력

Fig. 12는 월성 원자력발전소 주변 해역의 평균 온도를 나타낸 그림이다. 원자력 발전소의 온

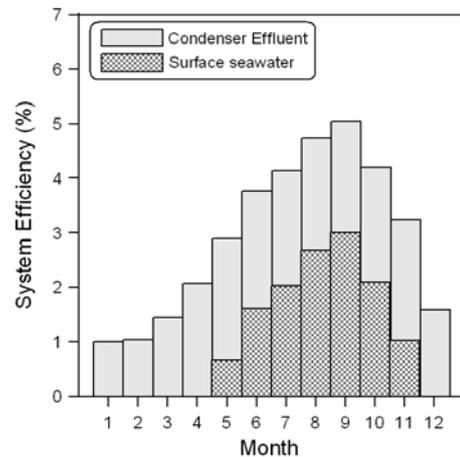


Fig. 13. Comparison of the efficiency(R125)

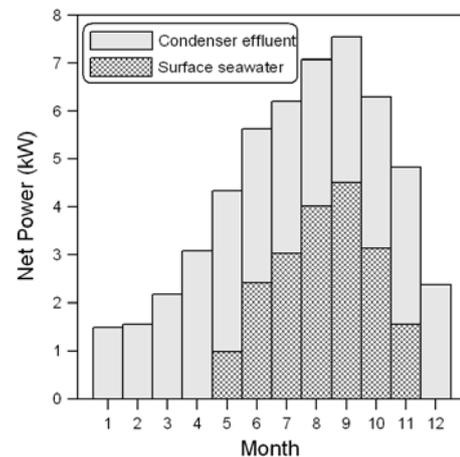


Fig. 14. Comparison of the net power(R125)

배수의 정확한 데이터 측정의 불가능으로 인하여, 일반적으로 많이 알려진 해수와 온배수의 온도차 7°C를 해수의 온도에 더하여 원자력 온배수를 모사하였다. Fig. 13과 Fig. 14는 모사된 원자력 발전소 온배수의 온도를 표층수의 온도로 하고 작동유체를 R125로 하였을 때의 재생시스템의 효율과 출력을 나타낸 그림이다. 원자력 온배수를 표층수 대신 사용하면 효율이 2%이상 증가하였다. Fig. 15과 Fig. 16은 온난화지수가 낮은 R32를 작동유체로 하였을 때의 효율과 출력을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 원자력 온배수를 표층수 대신 사용하면 효율이 2%이상 증가하였다. 하지만 겨울철에는 효율이 2% ~ 3% 미만이라 우리나라 동해안 지역에 설치하기에는 보다 많은 연구 및 효율을 증가 시키기 위한 많은 연구가 필요하다고 할 수 있다.

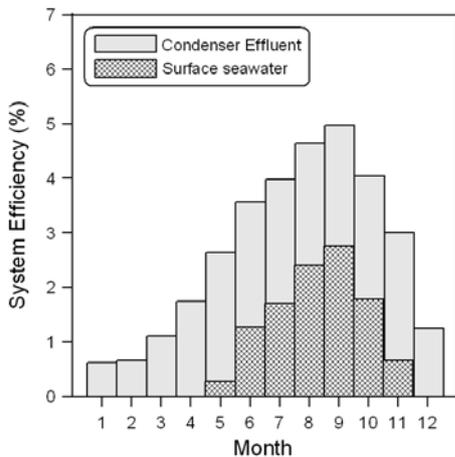


Fig. 15. Comparison of the efficiency(R32)

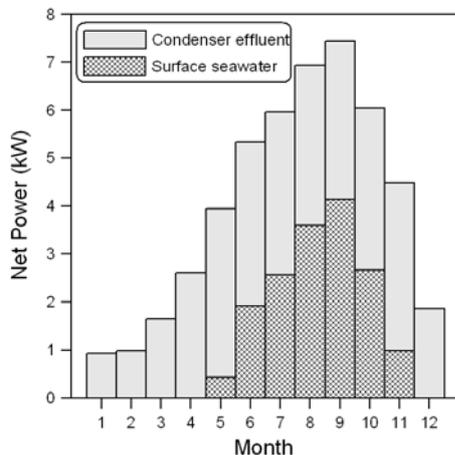


Fig. 16. Comparison of the net power(R32)

## 5. 결 론

OTEC 시스템의 작동유체로 효율이 좋은 R125와 초기투자비용을 줄이고 지구온난화지수가 지수가 낮은 R32가 적합하고, 재생시스템의 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 또한 따뜻한 표층수와 차가운 심층수와의 온도차가 최소 15°C 이상 일 때 전기를 생산할 수 있음을 알 수 있었고, 원자력 온배수를 이용하였을 때 약 2%의 효율이 향상됨을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Luis A. Vega, 1995, Ocean Thermal Energy Conversion, John Wiley & Sons.
2. Uehara, H, and Ikegami, Y., 1990, Optimization of a Closed-Cycle OTEC system, J. of Solar Energy Engineering, 112, pp. 247-256.
3. Vadus, J., 1997, A Strategy for OTEC Commercialization, Processing of the 1997 International OTEC/DOWA Association, pp. 235-247.
4. Korea Power Company, A Study on the Development of ocean Thermal Energy Conversion and Wave Power Generation System, Technical report, KRC-89G-T10.
5. Jung, D.S., and Radermacher, R., 1991, Performance Simulation of Single-Evaporator Domestic Refrigerators Charged With Pure and Mixed Refrigerators, Int, J. Refrigeration, Vol. 14, pp. 223-232.
6. Uehara H., and Ikegami Y., 1993, Parametric Performance Analysis of OTEC using Kalina Cycle, Joint Solar Engineering Conference, ASME, pp. 203-207.
7. Uehara H. and Ikegami Y., 1995, Parametric Performance Analysis of OTEC System using HFC32/HFC134a Mixtures, ASME Solar Engineering, Vol. 2, pp. 1005-1010.
8. Panchal C.B. and Bell K.J., 1987, Simultaneous Production of Desalinated Water and Power using a Hybrid-cycle OTEC Plant, Transaction of the ASME, Vol.109, pp. 156-160.