

## 해양온도차 발전 플랜트 성능해석

엄지홍\* · 이재용\* · 김남진\* · 김중보\*\*

### Performance Analysis of OTEC Power Plant

Ji Hong Uhm, Jae Yong Lee, Nam Jin Kim and Chong Bo Kim

**Key Words:** OTEC(해양온도차 발전) , Plate type heat exchanger(판형 열교환기) , Gross Power(터빈출력) , Net Power(정미출력) , Objective Function(평가계수)

#### Abstract

The Energy is the basis for almost all industrial activities and domestic needs. But recently there are increasing concerns internationally over environmental problems and consequent climate changes caused by the excessive use of fossil fuels. Furthermore the price of crude oil is increasing steadily with unstable supplies. In order to solve these national energy problems, the utilization of Ocean Energy is introduced as one of the best alternative technologies for the future. OTEC Power Plant has been installed at the West Incheon Power Plant Site. Temperature differences of 20~25°C have been utilized for plant operations, where R22 is used as a working fluid. The system is composed of low pressure turbine, plate type heat exchanger, and pumps. In the present investigation the experimental results, such as gross power, net power and objective function, are analysed when temperature differences change from the reference design point.

#### 기호설명

$A_T$  : 열교환기 총면적

$Cp_{WS}$  : 고온수의 비열

$\dot{m}_{WF}$  : 작동유체 유량

$\dot{m}_{WS}$  : 고온수 유량

$P_G$  : 터빈출력

$P_N$  : 정미출력

$P_{WF}$  : 냉매펌프 출력

$P_{WS}$  : 고온수 펌프 출력

$P_{CS}$  : 저온수 펌프 출력

$Q_E$  : 증발기에 유입된 열량

$Q_C$  : 응축기로 버려진 열량

$\Delta T$  : 해수 온도차

$y$  : 발전단가

$y_t$  : 발전에 필요한 비용의 총계

$\gamma$  : 평가계수

$\eta_T$  : 터빈효율

$\eta_{cycle}$  : OTEC 사이클효율

#### 1. 서론

현재 인류는 급격한 산업화에 따른 엄청난 자원을 사용하고 있으며, 한정된 석유자원과 기타 천연자원은 점차 고갈되어가고 있다. 그로인해 심각한 에너지·환경 문제에 직면하게 되었고,

\* 인하대학교 대학원

\*\* 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : cbkim@inha.ac.kr

TEL:(032)860-7313 FAX:(032)862-7313

이에 환경에 무해하고 무한한 대체 에너지를 필요로 하게 되었으며, 이에 관련한 많은 연구가 수행되었다.

이러한 대체 에너지원 중 실제 이용 가능한 것으로 알려진 해양에너지를 이용하여 발전하는 시스템을 해양온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)이라 한다. OTEC과정의 핵심은 증기 발전 시스템을 가동시키기 위해 표층수와 심층수의 온도차를 이용한다는 것이다. 그리고 이러한 온도차가 20℃ 이상일 때 OTEC시스템이 동력을 생산할 수 있다는 사실은 잘 알려져 있다.

이러한 OTEC의 개념은 1881년 프랑스의 공학자인 d'Arsonal가 처음으로 제안하였고,<sup>(1)</sup> 그 후 1930년에 Claude는 Cuba의 Matanzas만에서 플랜트를 설계하여 실지 실험을 수행하였다.<sup>(2)</sup> 이 실험장치는 22kW의 동력을 생산하였으며, 이것은 장치를 구동시키기 위해 소모되는 동력보다 더 적은 양이었다. 그러나 1970년대의 오일 파동으로 인해 많은 국가들이 대체 에너지를 찾기 시작했고, 이에 따라 OTEC의 잠재력에 대한 연구가 다시 시작되었다. 그 결과 1979년 하와이에서 소형의 폐쇄형 OTEC 사이클이 처음으로 18kW의 정미출력을 낼 수 있었다. 1980년 하와이 천연 에너지 연구소(NELHA)는 1MW급 OTEC용 열교환기에 대한 실험을 하와이에서 성공리에 수행하였다. 한편 1993년에는 NELHA에서 OTEC 플랜트의 성능시험을 수행한 결과, 213kW의 전기를 생산하였고 시스템 구동에 필요한 전기를 제외하면 정미출력은 60kW였다. 이처럼 정미출력이 낮은 이유는 양식업에 쓰기 위해 발전에 필요한 유량보다 더 많은 양의 심층수를 퍼 올리기 위해 펌프일이 부가적으로 많이 늘어났기 때문이다. 1994년에 Avery와 Wu는 OTEC시스템이 생산할 수 있는 동력이 해수가 흡수하는 평균 태양에너지의 약 0.07%에 정도인 약 0.19MW/km<sup>2</sup> 정도임을 보여주었다.<sup>(3)</sup> 1996년 Takahashi와 Trenka는 OTEC 발전 시스템이 특히 섬지방과 화석 연료 제품을 수입하는 많은 연안 국가들의 경우에 엄청난 잠재력을 가지고 있음을 강조했다.<sup>(4)</sup>

일본의 경우에는 구주의 사가대학이 자신들의 실험실에서 R22와 암모니아를 작동유체로 사용하는 75kW 출력의 OTEC 시스템을 갖추고 지난

20년간 연구를 진행하고 있다. Uehara와 그의 동료들은 OTEC용 열교환기와 새로운 사이클 개발 등 많은 연구를 수행하였다.<sup>(5)</sup>

한국의 경우, 1989년부터 1991년까지의 3년 동안 한국전력공사에서는 한반도에 적절한 OTEC 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 비록 한국이 열대지방에 위치해 있지는 않지만 포항근처의 동해안에서는 겨울을 제외하고는 거의 일년 내내 표층수와 수심이 약 200m인 곳의 해수의 온도차가 20℃인 것을 밝혀냈다.<sup>(6)</sup>

한국에서는 지난 20여 년간 많은 원자력발전소가 건설되었으나 발전소 응축기에서 방출되는 물이 발전소 주변의 해수 온도를 증가시켜 많은 어패류가 죽어가고 있고, 이로 인한 현지 주민들의 불만이 큰 상태이다. 이러한 원자력발전소의 응축기에서 방출된 물과 차가운 해수를 이용한 OTEC 시스템의 연구가 수행되어, 이러한 개념으로 일년 내내 가동이 가능한 육상 설치 폐쇄형 발전소를 건설한다면 환경 및 에너지 문제를 동시에 해결할 수 있을 것으로 전망된다.

따라서, 본 연구에서는 원자력 발전소의 온배수를 이용한 OTEC 시스템 설계를 위하여 파일럿 플랜트를 설치하고, 그 성능해석을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

아래의 Fig. 1은 본 실험장치의 개략도를 나타내고 있으며, Fig. 2는 OTEC 사이클의 T-s 선

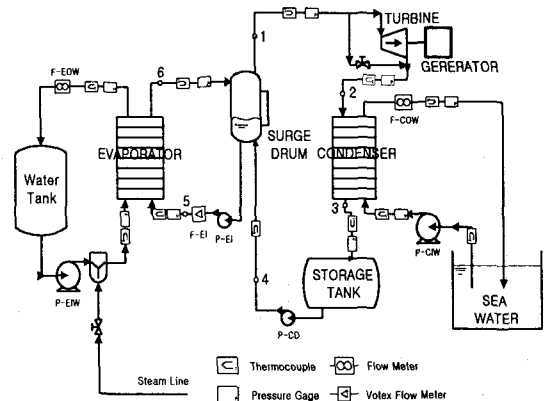


Fig. 1 Schematic diagram of OTEC cycle

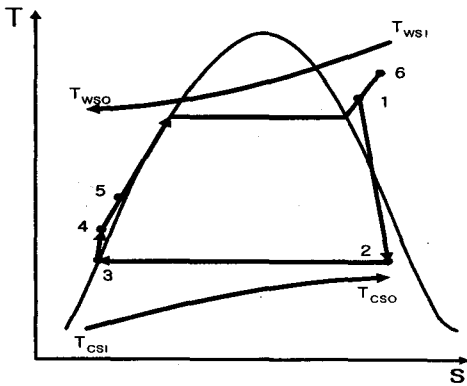


Fig. 2 T-s diagram of OTEC cycle

도를 나타내고 있다. 실제의 원자력발전소의 온배수를 이용한 실험은 부지선정과 설치의 어려움으로 인하여 서인천 복합화력 발전처내에 파일럿 플랜트를 설치하고, 발전처에서 생산되는 steam을 사용함으로써 고온표층수의 온도를 24 ~ 29°C 정도로 임의적으로 제어하는 방법을 취하였다.

OTEC 플랜트를 제작하는데 있어서 가장 중요한 부분을 차지하는 것이 증발기와 응축기를 구성하는 열교환기이다. OTEC 플랜트의 낮은 열효율 특성상 열교환기의 크기가 커지게 되는데, 가능한 작은 크기로 높은 열용량을 가지며 적은 온도차에서도 원활한 열교환능력을 발휘하고, 열교환기내 압력강하가 적어 펌프동력을 절감할 수 있으며, 바닷물에 의한 부식을 방지할 수 있는 재질을 가진 열교환기를 선정하는 것이 필수적이다. 그리하여 OTEC 플랜트에는 티타늄재질의 Alfa-Laval사의 판형 열교환기 15-BWFG를 채택하였다.

또다른 주요 구성품의 하나가 저압터빈이라 할 수 있다. 터빈의 종류로는 Radial 터빈을 선정하였으며, 이러한 Radial 터빈은 Axial 터빈에 비하여 길이를 작게 할 수 있고 구조가 간단하여 제작비용이 적게 드는 장점이 있으며, 구조적인 측면에서는 Disk와 Rotor가 일체형이므로 강도 면에서 Axial 터빈보다 유리한 면이 있다. 따라서 본 플랜트에 Radial 터빈을 제작하여 장착하였다. 본 실험장치의 열교환기와 터빈은 21°C의 해수 온도차에서 최적의 성능을 나타내도록 설계되었다.

냉매유량계는 증발기로 유입되는 냉매의 유량

을 정확히 측정하기 위하여 KROHNE사의 Vortex Flowmeter VFM 1091 K+F모델을 사용하였다.

증발기로 유입되는 물의 유량을 측정하기 위해서 정확도가 ±0.5%인 KROHNE사의 Electromagnetic Flowmeter AQUAFLUX 080K를 사용하였으며, 응축기로 유입되는 물의 유량을 측정하기 위하여 정확도가 ±2%인 오리피스 차압유량계를 사용하였다.

본 실험장치의 경우 전체 플랜트의 펌프 및 밸브제어를 위하여 PLC(Programmable Logic Controller)를 이용한 시스템 제어 방식을 채택하였다. PLC 컨트롤러로는 Simens사의 SIMATIC7-300 PLC controller를 사용하였으며, 본 PLC 컨트롤러에 의하여 각각의 펌프의 On/Off 제어 및 P-CO에 의한 Surge Drum의 작동유체 수위조절 및 유량계, Thermocouple 및 Pressure Transmitter의 데이터 획득에 이용되었다. 또한 플랜트 공정감시, 데이터 수집 및 데이터의 관리를 위하여 Intellution사의 Fix32 프로그램을 이용하였다.

각 지점에서의 온도, 압력값을 얻기 위해서 온도센서와 압력계를 사용하였다. 압력계는 정확도 ±0.3%의 Konics사의 PT-3300형 전자식 압력계를 이용하였으며, 온도센서로는 총 18곳에 J-Type 온도센서를 사용하였다. 각 온도센서는 항온조에서 ±0.2°C의 정확도를 가지고 측정되도록 보장하였다. 또한 온도측정에 있어서 중요한 부분에서는 배관의 동일한 위치에 깊이가 다르게 두 개씩 설치하여 온도를 평균하여 사용하였다.

본 실험에서는 고온표층수의 온도조건을 충족시킬 수 있도록 별도의 물탱크와 스팀믹서를 장착하였으며, 각각의 펌프들은 냉매 및 물의 유량과 양정을 계산하여 적절한 펌프들을 선정하였다.

## 2.2 실험 방법

본 실험은 다음과 같은 방법으로 수행되었다. 우선 증발기에 공급할 물을 물탱크에 채운 후, P-EIW 펌프를 가동시킨다. 이때 P-EIW 펌프를 가동시킨 후, 스팀믹서를 통하여 물과 스팀을 섞어 주어 전체시스템이 적절한 온도차를 가지도록 무부하상태로 운전한다. 이때 작동유체는 인버터에 의하여 유량이 조절되는 냉매펌프에 의해서

증발기로 공급되고, 여기서 고온수와 열교환을 통해 과열증기가 되어 Surge Drum으로 유입된다. Surge Drum은 증발기에 냉매를 공급하기 위한 액체상태의 작동유체를 저장하는 역할을 하는 동시에 증발기로부터 나온 증기만 저압터빈 쪽으로 넘어가도록 하는 기수 분리 역할을 수행하게 된다.

일정시간 무부하 운전으로 설정 온도차에 도달하게 되면, Surge Drum 위쪽의 터빈으로 작동유체 증기가 유입되는 밸브를 서서히 개방하여 터빈이 점차 rpm을 높여가도록 만들어 우선 부하시험기의 히터를 켜지 않은 상태에서 정상상태를 유지하도록 만든다. 시스템이 정상상태에 도달할 때까지 Surge Drum의 수위를 일정하게 유지시키면서 P-EI 펌프의 rpm을 서서히 올리면서 냉매 유량을 증가시키게 되면 터빈의 rpm이 증가하게 된다. 이때 터빈이 10,000rpm에 도달하게 되면 발전기는 1,800rpm을 지시하게 되며 이 순간 부하시험기의 히터 하나를 가동시켜 발전되는 전기를 소모하게 된다.

전체 시스템이 전기를 생산하게 되면서 더 많은 열량을 소비하게 되면 고온수측 물온도는 떨어지게 되는데, 이때 온도센서로 제어되는 스팀 컨트롤 밸브가 PID제어에 의하여 최적의 스팀양을 공급하여 항상 고온수측 온도가 일정하게 유지되도록 조정하게 된다. 또한 Surge Drum의 수위가 급변하게 되면 터빈으로 들어가는 작동유체의 공급량이 일정하게 유지되지 않아 터빈에 무리가 갈 수 있으므로 PLC가 Surge Drum에 부착되어 있는 고수위·저수위 센서에서 신호를 받아 Surge Drum의 수위가 일정하게 유지될 수 있도록 P-CO를 간헐적으로 가동시켜주게 된다.

저온심해수는 서인천복합발전처에서 냉각수로 사용하는 바닷물을 펌프로 끌어올려 사용된다. 이러한 바닷물과 터빈을 통과한 냉매증기와 열교환함으로써 냉매를 응축시킨다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 각 부품별 성능해석 결과

##### 3.2.1 증발기

증발기는 실제 설계상 923.71kW의 열량을 전달하도록 되어있다. 실험에서 증발기가 설계와 맞는 열량을 전달하는가는 고온수측 입·출구의 물온도차와 유량을 가지고 확인할 수 있으며, 또한 냉매의 유량과 엔탈피 차에 의해서도 확인할 수 있다.

##### 3.2.2 응축기

응축기는 증발기와 마찬가지로 실제 설계상 923.71kW의 열량을 전달하도록 되어있다. 실험에서 응축기가 설계와 맞는 열량을 전달하는가는 증발기와 같은 방법으로 확인할 수 있다. 다음의 Table 1은 증발기와 응축기의 데이터를 정리한 것이다.

##### 3.2.3 터빈

저압 Turbine의 설계에 따른 효율의 변화는 전체 system의 효율에 큰 영향을 미친다. 따라서 system에 알맞는 최적의 터빈설계가 매우 중요하다고 할 수 있다. 현재 OTEC 플랜트에 설치된 저압 터빈은 입구 압력 930kPa과 출구 압력 640kPa일 때 효율이 90%가 되도록 설계되었으며 효율이 상당히 좋은 터빈이라고 할 수 있다. 실험에서 터빈의 효율을 검증하기 위하여 터빈 입·출구의 온도, 압력 값을 이용하여 터빈에서 발생할 수 있는 이상적인 일과 비교하였다. 우선 터빈의 실험값을 정리하면 Table 2와 같다.

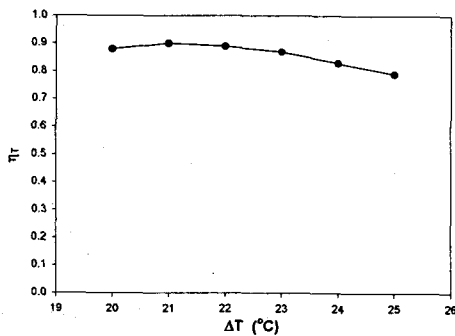
위의 data에서 이론적인 등엔트로피 과정에서 터빈 일을 계산하면 36.7kW가 나올 수 있으나 실제로는 여러 손실들에 의하여 효율이 90% 정도인 33kW의 출력이 생산됨을 알 수 있었으며

Table 1 Experimental data of evaporator and condenser ( $\Delta T=21^\circ\text{C}$ )

	증발기	응축기
물유량	61.4kg/s	61.4kg/s
냉매유량	4.22kg/s	4.22kg/s
물측 온도차	3.4°C	3.3°C
냉매측 온도차	16.5°C	2.9°C
용량	870kW	838.3kW
LMTD	2.0	1.93

**Table 2** Experimental data of the turbine ( $\Delta T = 21^\circ\text{C}$ )

turbine 입구온도	21.6°C
turbine 입구압력	931 kPa
turbine 출구온도	8.2°C
turbine 출구압력	643 kPa
turbine 출력	33 kW
turbine 효율	0.9



**Fig. 3** Turbine efficiency versus various temperature difference

이는 설계조건과 같은 결과를 나타내고 있다.

터빈의 경우에는 물층의 온도차가 변화하면 위의 설계조건이 변화하게 되므로 이에따른 효율의 변화가 생기게 된다. 다음의 Fig. 3은 물층 온도차의 변화에 따른 터빈의 효율변화에 대해 나타낸 것이다.

### 3.2.4 펌프

P-EIW펌프는 증발기에 고온수를 공급하는 기능을 수행하며, 최고 75kg/s의 유량을 공급할 수 있으나 본 실험장치에서는 61.39kg/s의 유량을 증발기에 공급한다.

P-CIW펌프는 응축기에 저온해수를 공급하는 기능을 수행하며, P-EIW 펌프와 마찬가지로 최고 75kg/s의 유량을 공급할 수 있으며, 본 실험장치에서는 61.39kg/s의 유량을 공급하였다.

P-EI펌프는 증발기에 작동유체를 공급하는 기

능을 수행하며, 최대 5.25kg/s의 유량을 증발기에 공급할 수 있도록 설계되어 있다. 이는 열교환기가 요구하는 유량 5.19kg/s보다 많은 양으로 작동유체를 공급할 수 있어 큰 문제는 없다.

## 3.3 OTEC 플랜트의 성능해석 결과

### 3.3.1 전력생산량

고온수와 저온수의 온도차이에 대한 실험을 수행하였다. 고온수의 온도를 조정하는 방법을 사용하여 원하는 온도차를 만들었으며, 각각의 온도차이에서 여러 번의 실험을 수행하여 그 값을 평균하여 표시하였다.

온도차의 변화에 따른 플랜트의 Power의 변화량에 대해 아래의 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 물층의 온도차가 20°C 이상에서는 펌프동력을 제외한 전력생산이 20kW이상이 됨을 알 수 있다. 그러나 20°C 이하가 되면 Net Power가 급격히 줄어들어 17°C의 온도차만 되도 Net Power의 생산이 되지 않는다. 그러나 이를 원자력 발전소등의 온배수등을 이용한 우리나라 실정에 맞는 발전형태를 취한다면 온도차를 20°C 이상으로 유지하는 것은 그다지 어려운 문제는 아니라고 생각되며, 따라서 앞으로의 유가상승과 환경문제 고려한다면 이러한 OTEC 발전 시스템의 활용이 기대되어진다.

### 3.3.2 효율

전체 사이클의 효율은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{cycle} = \frac{P_N}{Q_E} \quad (1)$$

여기서  $Q_E$ 는 증발기로 들어온 총 열량을 나타내고,  $P_N$ 은 단위 시간당 정미출력을 나타내는 값으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} Q_E &= \dot{m}_{WS} \cdot (h_6 - h_5) \\ &= \dot{m}_{WS} \cdot C_{p_{WS}} \cdot (T_{WSI} - T_{WSO}) \end{aligned} \quad (2)$$

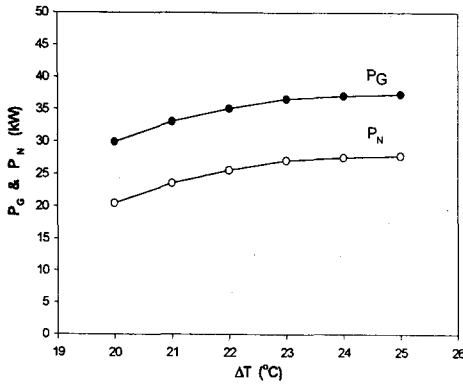


Fig. 4 Effect of temperature difference on cycle power

$$P_N = P_G - (P_{WF} + P_{WS} + P_{CS}) \quad (3)$$

위의 식을 이용하여 해수의 온도차에 대한 전체 시스템의 효율의 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

온도차가 감소할수록 효율은 점차 감소하였으며, 추후 열역학 사이클의 최적화 및 마찰저항 감소 등에 의한 열효율 향상을 위한 연구에 의하여 좀더 개선될 수 있으리라 생각된다.

### 3.3.3 평가계수

OTEC에서의 발전단가  $y$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

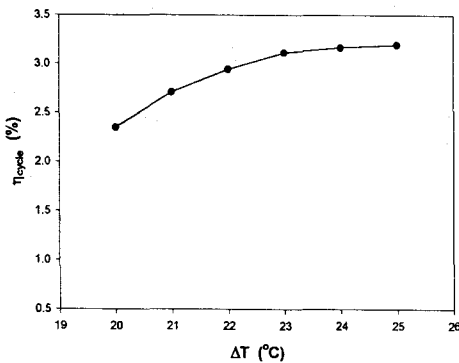


Fig. 5 Effect of temperature difference on cycle efficiency

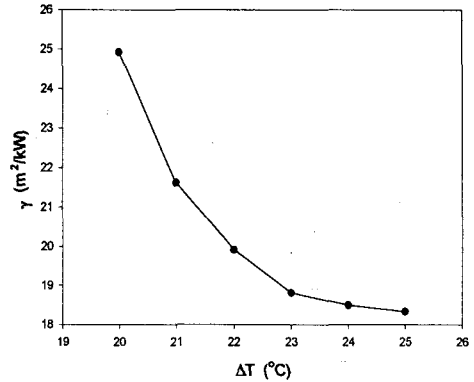


Fig. 6 Effect of temperature difference on objective function

$$y = \frac{y_t}{P_N} \quad (4)$$

전체 발전시스템의 최적화는 발전단가  $y$ 가 최소가 되도록 각종 지배인자를 결정할 필요가 있다. 특히 OTEC 플랜트의 경우 발전에 필요한 배용의 총계 중에서 응축기나 기화기의 제작에 드는 비용이 전체의 30~50%가 된다. 따라서 기화기나 응축기의 표면적을 최소화하는 것이  $y$ 값을 가장 최소로 하는 중요한 인자가 된다. 그러므로 증발기 전열면적과 응축기 전열면적의 합을 정미 출력으로 나눈 값  $\gamma$ 를 최적화하는 것이  $y$ 값을 이용하는 것보다 타당하다. 평가계수는 Uehara에 의하여 제안된 지수로서, 해양온도차발전 플랜트를 최적화하는데 필요한 계수이다.<sup>(5)</sup> 즉 평가계수  $\gamma$ 가 최소가 되는 경우가 OTEC 플랜트가 최적화된 경우라 할 수 있다.

$$\gamma = \frac{A_t}{P_N} \quad (5)$$

해수의 온도차에 대한 평가계수의 관계를 Fig. 6에 나타내었다.

### 3.3.4 냉매유량

고온수와 저온수의 유량을 고정한 상태에서 냉

매의 질량유량의 변화가 전체 시스템의 정미출력

어 가능하며, 이를 이용한 양식사업에 활용 가능하다고 생각되어진다.

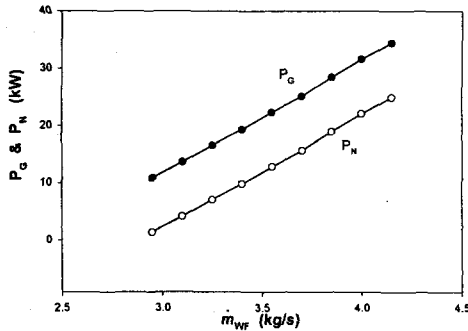


Fig. 7 Cycle power versus various working fluid mass flow rate

에 미치는 영향에 대해서 실험하였다.

Fig. 7은 주어진 고온수의 온도에서 냉매유량의 변화에 대한 정미출력의 변화에 대해서 나타낸 그래프이다.

#### 4. 결론

본 연구는 R22를 작동유체로 하는 폐쇄형 해양 온도차 발전 플랜트를 직접 제작, 실험하여 그 성능해석을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 해양 온도차가 20°C 이상일 경우 펌프동력을 제외한 정미출력의 생산이 가능하며, 21°C 정도의 온도차에서 약 23.43kW의 정미출력이 25°C 온도차에서 최고 28kW의 정미출력이 생산되었다.

(2) 해양 온도차가 21°C 정도일 때의 전체 시스템의 효율은 약 2.7%정도, 25°C 온도차에서 최고 3.2%의 효율이 나타났다.

(3) 현재 설치된 원자력 발전소의 온배수를 이용하여 해양 온도차가 20°C 이상인 지역에서의 전력생산이 가능할 뿐 아니라, 발전소 온배수의 온도를 낮추어 좁과 동시에 다른 지역의 해수와 섞어줌으로써 해양 열공해 문제를 해결할 수 있다.

(4) 발전소 주변의 해양온도를 적정온도로 제

#### 후기

본 실험은 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 일환으로 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) D'Arsonal, A., 1881, "Utilisation de forces naturelles", Revue Scientifique, 2, 370.
- (2) Claude, G., 1930, "Power from the Tropical Seas", Mechanical Engineering, 52, 1039.
- (3) Avery, W.H, and Wu, C., 1994, "Renewable Energy From the Ocean: A Guide to OTEC", Oxford University press, Oxford, England.
- (4) Takahashi, P, and Trenka, A., 1996, "Ocean Thermal Energy Conversion", John and Wiley & Sons, Chichester, England.
- (5) Uehara, H, and Ikegami, Y., 1990, "Optimization of a Closed-Cycle OTEC System", J. of solar energy Engineering, 112, 247~256.
- (6) Korea Power Company, 1989, "A Study on the Development of Ocean Thermal Energy Conversion and Wave Power Generation System", Technical report, KRC-89G-T10.
- (7) ASHRAE, 1997, "ASHRAE Handbook of Fundamentals", American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA
- (8) Gallagher, J., McLinden, M., Morrison, G., and Huber, M., 1989, "REFPROP - NIST Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures, Versions 6", NIST Standard Reference Database 23, NIST, Gaithersburg, MD 20899.
- (9) Michael J. Moran and Howard N. Shapiro, 1995, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", John Wiley & Sons, Inc., New York
- (10) Owens W. L. and Trimble L. C., 1981, "Mini-OTEC Operational Results", ASME J. of Solar Energy Engineering, Vol. 103, pp.233~240