

# 복합열병합발전소에 적용된 유기랭킨사이클의 성능 및 경제성 평가

김인섭\* · 김창민\* · 김동섭\*\* † · 이종준\*\*\*

## Evaluation of Performance and Economics of Organic Rankine Cycle Integrated into Combined Cycle Cogeneration Plant

In Seop Kim\*, Chang Min Kim\*, Tong Seop Kim\*\*, Jong Jun Lee\*\*\*

Key Words : Cogeneration(열병합발전), Combined Cycle(복합 사이클), Organic Rankine Cycle(유기랭킨사이클), Thermo-economic Analysis(열경제학적 분석)

### ABSTRACT

This study aimed to analyze organic Rankine cycle(ORC) which recovers discarded heat from a gas turbine based combined cycle cogeneration(CC-cogen) plant in terms of both performance and economics. The nominal electric power of the CC-cogen plant is around 120 MW<sub>e</sub>, and heat for district heating is 153 MW<sub>th</sub>. The major purpose of this study is to compare various options in selecting heat source of the ORC. Three heat sources were compared. Case 1 uses the exhaust gas from the HRSG, which is purely wasted to environment in normal plant operation without ORC. Case 2 also uses the exhaust gas from the HRSG. On the other hand, in this case, the DH economizer, which is located at the end of the HRSG, does not operate. Case 3 generates power using some of the district heating water which is supplied to consumers. The estimated ORC power generation ranges between 0.3 to 2.3% of the power generation capacity of the CC-cogen plant. Overall, Case 3 is evaluated to be better than other two options in terms of system design flexibility and power generation capacity.

### 1. 서 론

유기랭킨사이클(Organic Rankine cycle, ORC)은 물을 작동유체로 하는 일반적인 랭킨사이클(스팀터빈 시스템)이 적용되기 어려운 상대적으로 저온의 열원으로부터 전력을 생산 할 수 있는 시스템이다. 유기랭킨사이클의 작동유체들은 대체로 물에 비해 끓는점이 낮고 잠열도 적어 낮은 온도에서 보다 좋은 성능을 가질 수 있으며 물에 비해 비체적도 작아 시스템 제작 시 경제적으로도 우수하다. 이러한 특징들 때문에 1960년대 이후부터 유럽, 미국, 일본 등을 중심으로 다양한 연구와 개발이 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 유기랭킨사이클이 적용되는 열원들로는 태양열,<sup>(2)</sup> 바이오매스,<sup>(3)</sup> 지열<sup>(4)</sup> 등과 같은 친환경 에너지원들 혹은 복합열병합발전,<sup>(5)</sup> 마이크로 가스터빈<sup>(6)</sup>과 같은 발전시설들에서 버려지는 폐열 등이 있다.

열병합발전은 전력과 열을 하나의 에너지원으로부터 동시에 생산하는 시스템으로 전력만 생산하는 시스템보다 높은 열효율을 보이며 전기와 다르게 열은 장거리를 이동하기 어려워 주로 분산발전과 지역냉난방을 위해 쓰이고 있다. 열병합발전은 용량이 큰 가스터빈과 스팀터빈 외에도 내연기관,<sup>(7)</sup> 마이크로터빈,<sup>(7)</sup> 연료전지<sup>(7~8)</sup> 등의 다양한 전력생산시스템에 열 생산을 위한 설비를 추가하여 운용되고 있다. 이런 열병합발전플랜트의 효율을 더 높이기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. L. Melloni 등은 기존에 사용되던 플랜트의 효율향상과 이산화탄소배출 저감을 위한 다양한 방안을 제시하였다.<sup>(9)</sup> 또한 열병합발전소에서 나오는 폐열들을 활용하여 전체 시스템의 효율을 더욱 높이는 연구들도 진행 중이다. 폐열회수를 위해 Kalina cycle,<sup>(10)</sup> 흡수식 열펌프<sup>(11)</sup> 등을 이용하는 연구들이 진행 중이며 작은 용량의 열병합발전시

\* 인하대학교 대학원(Graduate School, Inha University)

\*\* 인하대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Inha University)

\*\*\* 지역난방공사 중앙연구원(R&D Institute, Korea District Heating Corporation)

† 교신저자, E-mail : kts@inha.ac.kr

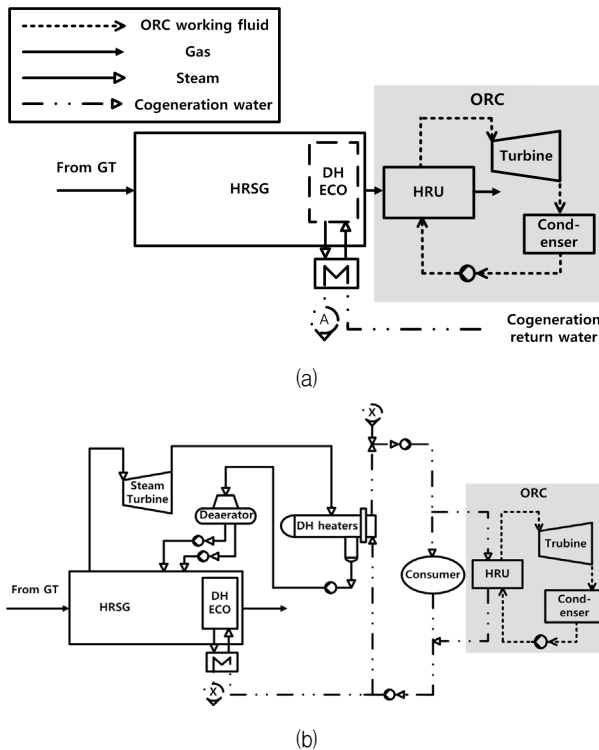


Fig. 1 Configurations of (a) Case 1 and 2 (b) Case 3

시스템에 유기랭킨사이클을 통해 추가전력을 생산하는 연구도 진행되었다.<sup>(12)</sup> 열병합발전플랜트의 효율향상을 위해 다양한 방안들이 제안되고 있지만 큰 용량의 가스터빈 기반의 복합 열병합발전플랜트의 폐열을 유기랭킨사이클로 추가전력을 생산하는 연구는 미비하다.

본 연구에서는 국내에서 운전 중인 복합열병합발전시스템에 유기랭킨사이클을 적용하여 추가적으로 생산할 수 있는 전력 규모를 도출하고 경제성 평가를 통하여 유기랭킨사이클의 적용가능성을 알아보았다. 다양한 유기랭킨사이클 열원 위치를 선정하여 비교 분석함이 연구의 주요 목적이다.

## 2. 모델링

### 2.1 유기랭킨사이클의 적용위치

유기랭킨사이클은 통상적으로 전력을 생산하기 어려운 낮은 온도의 열원으로부터 전력을 생산할 수 있기 때문에 복합 열병합발전플랜트의 다양한 위치에 적용할 수 있다. 대상 플랜트는 ISO 조건(15°C, 1atm)에서 120 MW<sub>e</sub>의 전력과 152.6 MW<sub>th</sub>의 열을 생산할 수 있는 시설이며 여기에 적용된 ORC의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서는 총 세 가지 Case들에 대하여 성능해석 및 경제성 평가를 진행하였다.

#### 2.1.1 Case 1

Case 1은 배열회수보일러에서 열교환을 마치고 배출되는

Table 1 Case explanations

| No. | Explanation   | Remark                            |
|-----|---|-----------------------------------|
| 1   | heat source is the exhaust gas from HRSG  | exploiting waste heat             |
| 2   | heat source is the exhaust gas from HRSG when the DH economizer does not operate. | 17.9% of DH heat is not available |
| 3   | heat source is some of the district heating water which goes to customers.        |                                   |

배기가스 즉 완전히 버려지는 열을 열원으로 하며 Fig. 1의 (a)와 같이 시스템이 구성된다.

#### 2.1.2 Case 2

복합열병합발전플랜트에서 생산 가능한 총열량이 항상 수요처에서 요구되는 것은 아니다. Case 2는 이러한 상황을 대비하여 배열회수보일러의 최하단에 위치한 지역난방용 이코노마이저 (Fig. 1의 DH ECO)를 가동하지 않고 그만큼의 배기가스열을 활용하여 ORC를 구동하는 경우이다. 이코노마이저가 회수하는 열량은 최대공급가능열량의 17.9%이다.

Case 1에 비해 높은 온도의 배가스로 ORC를 구동시키기 때문에 더 큰 출력을 얻을 수 있다. 그러나 최대공급가능열량의 17.9%를 담당하는 지역난방용 이코노마이저를 이용하지 않기 때문에 Case 1보다 더 적은 양의 지역난방수를 생산하게 된다. 즉 Case 2는 최대공급가능열량의 17.9%는 공급할 필요가 없다고 (수요가 없음) 가정하고 그 열을 이용하여 ORC 출력을 추가로 생산하는 경우이다.

#### 2.1.3 Case 3

Case 3는 지역난방을 위해 공급되는 고온수의 일부를 이용하는 경우이다. 전체 시스템에 영향을 주지 않기 위해 열원으로 사용된 고온수의 열교환기 출구온도를 열 사용자가 사용하고 돌아오는 환수온도와 같다고 가정하였다. 따라서 Fig. 1 (b)와 같이 ORC가 설치된다. 이 case의 열회수부는 열교환기를 병렬로 설치하여 ORC로 유입되는 유량을 수요와 공급량의 변화에 맞게 조절할 수 있도록 하였다. Remained heat ratio(RHR)은 최대공급가능열량과 열수요량의 차이와 최대공급가능열량의 비를 나타내며 식 (1)과 같이 정의하였다. 즉 RHR은 최대공급가능열량 중 수요되지 않고 남은 열량을 뜻하며 RHR이 작을수록 열수요량이 큼을 의미한다.

$$RHR[\%] = \frac{\text{Maximum heat supply} - \text{Heat demand}}{\text{Maximum heat supply}} \times 100 \quad (1)$$

Table 1에 각 case들을 정의하였고, Table 2에 case별 열원조건들을 정리하였다.

Table 2 Inlet and outlet conditions of each heat source

|        |            |                  |       |
|--------|------------|------------------|-------|
| Case 1 |            | Temperature (°C) | 82.0  |
|        |            | Mass flow (kg/s) | 300.0 |
| Case 2 |            | Temperature (°C) | 151.3 |
|        |            | Mass flow (kg/s) | 300.0 |
| Case 3 | HRU Inlet  | Temperature (°C) | 102.3 |
|        |            | Mass flow (kg/s) | 636.0 |
|        | HRU Outlet | Temperature (°C) | 57.5  |
|        |            | Mass flow (kg/s) | 636.0 |

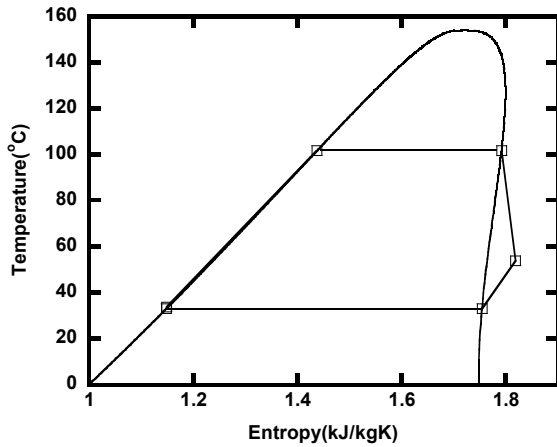


Fig. 2 T-s diagram of an ORC system

## 2.2 유기랭킨사이클

ORC는 열회수부(heat recovery unit, HRU), 터빈, 응축기, 펌프로 구성되어 있다. 열회수부는 열원으로부터 열을 받아 작동유체의 온도를 상승시키며 일반 화력발전의 보일러 역할을 한다. 열회수부에서 승온된 작동유체는 곧바로 터빈으로 들어가 전력을 생산하고 응축기에서 응축된 후 펌프로 들어간다.

ORC는 작동유체에 따라 성능의 차이가 크기 때문에 적절한 작동유체의 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 범용성과 친환경성 및 안전성<sup>(13)</sup>을 고려하여 R-245fa를 작동유체로 선정하였다. 다양한 재조사에서 80~150°C의 온도범위의 열원을 대상으로 하는 시스템에 주로 R-245fa를 작동유체로 사용하고 있다.<sup>(14)</sup>

Fig. 2는 R-245fa를 작동유체로 삼는 ORC의 일반적인 T-s 선도이다. 물을 작동유체로 하는 랭킨사이클의 경우 포화증기선도의 기울기가 음인 반면 ORC의 경우 양의 기울기를 가지는 것이 가장 큰 차이점이다. 이로 인해 터빈에서 팽창을 하면서 전력을 생산하고 배출되는 작동유체의 상태가 과포화상태가 된다. 터빈입구에서의 과포화도가 커지면 커질수록 터빈출구에서의 과포화도도 커지므로 응축기의 면적이 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 응축기의 면적을 최

Table 3 Design specifications of ORC system

| Parameters                            | Modeling |
|---------------------------------------|----------|
| ORC Turbine Isentropic Efficiency (%) | 80       |
| Pump Efficiency (%)                   | 75       |
| HRU Pinch Temperature(°C)             | 10       |
| Condensing temperature(°C)            | 30       |

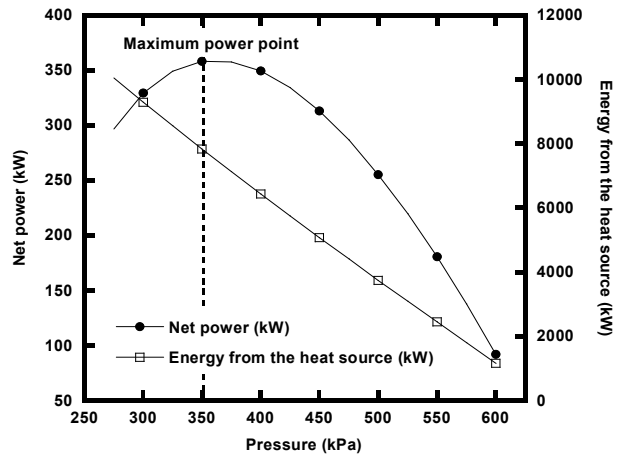


Fig. 3 Performance analysis result of case 1

소화 할 수 있도록 터빈입구에서의 작동유체의 상태를 포화증기로 가정하였다.

열교환기의 핀치온도차를 10°C, 터빈의 효율을 80%, 펌프의 효율은 75%로 가정하였다. 해석에 사용한 가정들을 Table 3에 정리하였다. 사용된 소프트웨어는 Aspen HYSYS이다.<sup>(15)</sup> 전체 시스템의 출력은 아래 식 (2), (3)으로 구하였다.

$$\dot{W}_{CHP} = \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ST} + \dot{W}_{ORC} - \dot{W}_{Aux} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{Aux} = \dot{W}_p + \dot{W}_{loss} \quad (3)$$

## 3. 성능평가

### 3.1 Case 1

Fig. 3에 터빈입구 압력에 따른 ORC 출력변화를 나타내었으며 출력의 최대점이 존재한다. 터빈입구압력이 높아질수록 터빈의 엔탈피 차이는 커지지만 작동유체 유량이 감소하기 때문에 두 가지 상쇄효과에 의하여 중간 압력에서 최대 출력을 갖게 된다. 최대출력은 복합열병합발전 출력의 0.3%에 해당하는 359.0 kW이다. 이때 열원 출구온도는 58.1°C, 터빈입구온도는 51.0°C, 압력은 354.8 kPa, 유량은 37.1 kg/s 이다. ORC의 사이클 효율을 표시하지 않은 이유는 ORC는 대상 시설의 여열을 이용하여 전력을 생산하므로 사이클 효율보다는 출력이 더 중요하기 때문이다.

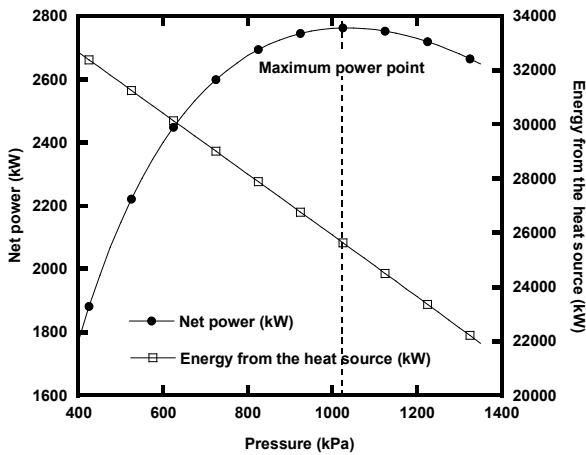


Fig. 4 Performance analysis result of Case 2

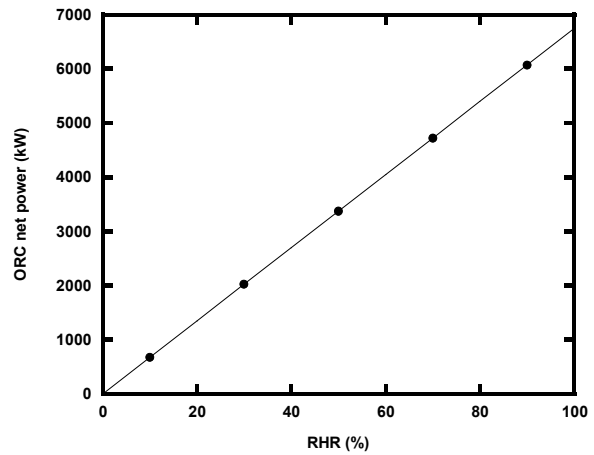


Fig. 5 Performance analysis result of Case 3

### 3.2 Case 2

Case 2는 HRSG의 최하단에 있는 지역난방용 이코노마이저(DH ECO)를 작동시키지 않은 경우이기 때문에 열원인 배가스의 온도가 Case 1보다 월등히 높다. Case 1에서는 82.0℃인 반면에 Case 2에서는 151.3℃이다. 열원의 온도가 더 높기 때문에 Case 1보다 더 높은 출력을 생산한다. Fig. 4에 ORC 터빈입구압력에 따른 출력 및 열회수량의 변화를 보였다. Case 1과 유사한 이유로 최대출력점을 가지며 그때의 출력은 전체 플랜트 출력의 2.3%에 해당하는 2762.9 kW이고 열원의 열교환기 출구온도는 70.4℃이다. 이때 작동유체의 터빈입구 온도는 90.3℃, 압력은 1012.0 kPa이며 유량은 111.8 kg/s이다.

### 3.3 Case 3

Case 3의 열원은 지역난방수이다. 지역난방을 위해 공급되는 물의 온도는 102.3℃, 환수온도는 57.5℃이며 유량은 636.0 kg/s이다. 본 연구에서는 전체 복합열병합발전플랜트에 영향을 주지 않기 위해 열원의 열회수부 출구온도를 환수온도와 같은 온도로 가정하였기 때문에 작동유체의 터빈입구 온도와 압력은 Case 1, 2와 다르게 미리 정해진 하나의 값으로 일정하다. 이때 ORC의 터빈입구 온도는 54.4℃, 압력은 392.7 kPa이다. 이 조건에서 앞의 2절에서 정의한 RHR값을 변화시키며 ORC의 성능해석을 하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

RHR이 1인 경우, 즉 소비자로부터 열수요가 전혀 없는 경우 출력은 6745.0 kW으로 대상열원시설 설계출력의 5.7%를 추가할 수 있다. 그러나 열수요가 전혀 없다는 것은 사실상 비현실적인 가정이기 때문에 보다 현실적인 비교를 위해 Case 2가 이용하는 최대공급가능열량의 17.9%와 같은 열량을 받는 경우, 즉 RHR이 17.9%일 때 Case 3의 출력은 대상

열원시설 설계출력의 1.0%에 해당하는 1207.0 kW였다. 같은 열량을 열원으로 사용하여도 ORC 출력이 차이를 보이는 이유는 열원의 조건차이이다. Case 2의 열원이 더 온도가 높아 같은 열량이라도 ORC가 이용할 수 있는 열량이 더 크기 때문이다.

## 4. 경제성 평가

### 4.1 경제성 평가 방법

어떤 시스템의 적용여부를 결정하기 위해서는 성능적인 요소뿐만 아니라 경제적인 요소도 고려해야한다. 따라서 본 연구에서는 ORC의 추가로 인해 발생하는 경제적 영향을 분석하였다. ORC를 설치하여 추가로 생산되는 전력량과 전력 생산을 위해 투입된 열량으로 인해 발생하는 열 판매량 감소로 인한 손실을 고려하여 경제성 평가를 진행하였다. 다만, 대상 복합열병합발전플랜트의 실제 운전조건에 대한 광범위한 운전 데이터가 가용하지 않아 가동 조건에 대하여 가정을 사용할 수 밖에 없었다. 플랜트의 가동률은 70%로 가정하고 운전기간 동안 최대부하조건으로 가동된다고 가정하였다. 따라서 본 논문에서 제시하는 경제성 결과의 분석에 있어서 절대값 자체보다는 각 case간 상대적 비교에 중점을 두어서 이해하는 것이 바람직하다. 각 case별 구체적인 경제성은 시간별 부하변동이 반영된 장기간에 걸친 플랜트 운전자료의 분석과 함께 이루어지는 것이 바람직하다.

경제성 평가를 위해 회수기간법(payback period method)와 순현재가치(net present value, NPV)법이 사용되었다.<sup>(16)</sup> 순현재가치는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{GM}{(1+I)^t} \quad (4)$$

$C_0$ 는 초기투자비용,  $I$ 는 할인율,  $n$ 은 총 프로젝트 기간

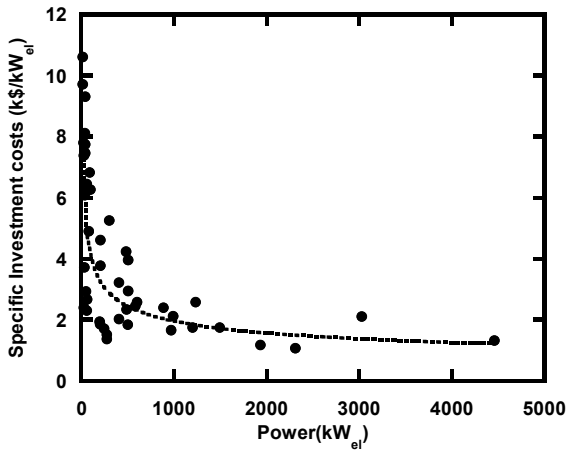


Fig. 6 Specific cost variation of ORC system

로 본 연구에서  $I$ 는 8%,  $n$ 은 20으로 정하였다. 회수기간 (PB)은 순현재가치가 0원이 되는 시간, 즉 초기투자비용과 전력생산을 통한 수익이 같아지는 시간을 의미하며 식 (5)로 정의된다.

$$PB = \frac{\log\left(\frac{GM}{GM - I \times C_0}\right)}{\log(1 + I)} \quad (5)$$

매출총이익(gross margin, GM)은 일 년 동안 해당 플랜트의 총 수익을 의미하며 식 (6)으로 정의된다.

$$GM = R_{el} - E_{heat} - C_{O\&M} \quad (6)$$

$R_{el}$ 은 전력생산으로 인한 수익이며  $E_{heat}$ 는 전력생산으로 인해 열 판매를 하지 못해 생기는 경제적 손실이며 식 (7)로 정의된다.  $C_{O\&M}$ 은 ORC의 운전 및 관리비용이다.

$$E_{heat} = \dot{L}_{heat} \times P_{heat} \quad (7)$$

$\dot{L}_{heat}$ 는 회수열로 ORC를 구동함으로 인하여 발생하는 열 판매 손실이며  $P_{heat}$ 는 열의 가격을 의미한다.

Case 1의 열원은 대상 플랜트에서 모든 과정을 마치고 완전히 버려지는 열을 사용하기 때문에 열판매 손실이 없다. 그러나 Case 2는 최대공급가능열량의 17.9%를 담당하는 지역난방용 이코노마이저를 가동하지 않는 경우이므로 열수요량이 최대공급가능열량의 82.1% 이상이라면 초과분의 열은 외부에서 구매해야하기 때문에 경제적 손해가 발생한다.

Case 3에서도 공급되는 지역난방수의 일부는 사용되지만 전력생산을 위한 고온수의 유량을 조절함으로써 열공급량을 맞출 수 있기 때문에 열판매 측면에서의 손실은 고려하지 않았다. 하지만 Case 3이 최대출력을 내기 위해서는 회수된 모

Table 4 Parameters for economic analysis

|                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| CHP Plant availability       | 0.7                        |
| Total project period (years) | 20                         |
| Discount rate (%)            | 8                          |
| Power unit cost (won/kWh)    | 125.09                     |
| Heat unit cost (won/Mcal)    | 83.5                       |
| Exchange rate (won/\$)       | 1050                       |
| ORC system O&M cost          | 2% of the ORC initial cost |

든 열이 ORC의 열원으로 사용되어야 하는데 이는 현실적이지 않다. 따라서 연간 평균 열수요량을 미리 알고 있다고 가정하여 ORC의 설계출력을 최대공급가능열량과 수요량의 차이로 정하고 각 설계 출력별 경제성을 분석하였다.

#### 4.2 가격 정보

ORC의 초기투자비용은 각 제조사와 열원의 종류에 따라 상이하다. S. Quoilin<sup>(17)</sup>와 A. Retting<sup>(18)</sup>등은 각종 ORC 산업을 조사하여 kW당 투자비용에 대한 정보를 정리하였다. 이 두 논문을 바탕으로 ORC의 초기투자비용을 산정하였고, Fig. 6에 용량 당 단가를 그래프로 나타내었다. 출력이 커질수록 단가는 작아지는 경향을 보였으며 출력이 약 500 kW 이하 범위에서 급격하게 변하는 것을 알 수 있었다. Fig. 6의 정보를 식으로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$P_{pp} = 17.599 \times \dot{W}^{-0.31739} \times 1000 \quad (8)$$

$\dot{W}$ 는 2절에서 계산한 각 case별 출력을 의미한다. 위 식에는 설치비와 같은 금액도 포함되어 있으며 매년 추가로 투자되는 유지보수비용은 초기비용의 2%로 가정하였다.<sup>(19)</sup> 전기 가격정보는 한국 전력거래소로부터 도출하였고<sup>(20)</sup> 열가격은 한국 지역난방공사를 참고하였다.<sup>(21)</sup> 경제성 평가를 위한 가정들과 가격정보를 Table 4에 정리하였다.

#### 4.3 결과

##### 4.3.1 Case 1

Fig. 7은 Case 1의 순현재가치 변화를 나타낸 그래프이다. 이 경우는 ORC의 출력이 작기 때문에 용량 당 단가가 크다. 하지만 해당 플랜트의 모든 과정을 마치고 버려지는 배기가스를 이용하여 전력을 생산하기 때문에 경제적 손실로는 유지보수비용만 고려되었다. 경제성 평가 결과 회수기간은 5.18년, 20년 후의 순현재가치는 14.5억원이다.

##### 4.3.2 Case 2

Case 2의 경제성 평가 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 지역

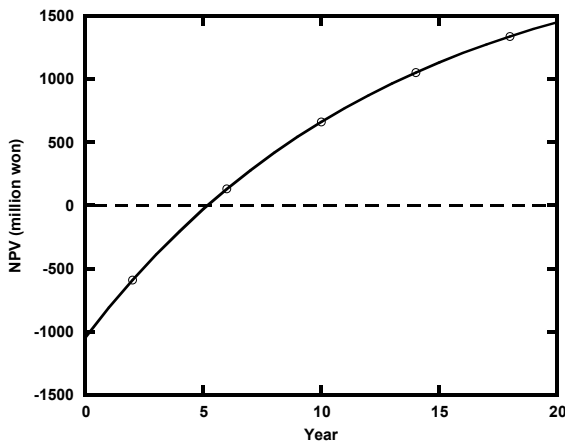


Fig. 7 Economic analysis result of Case 1

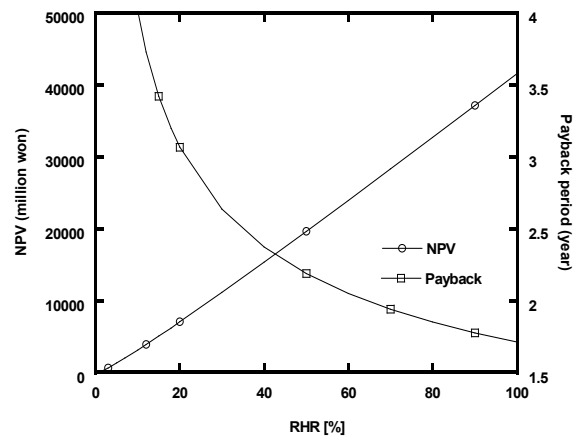


Fig. 9 Economic analysis result of Case 3

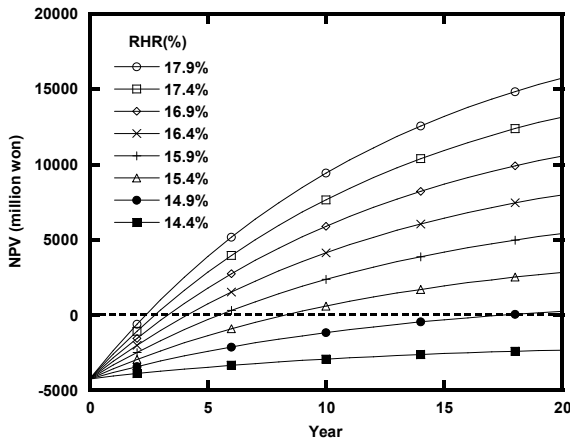


Fig. 8 Economic analysis result of Case 2

Table 5 Results of performance and economic analysis

|          | Net power [kW] | ORC power compared to CHP [%] | Payback period [year] | NPV after 20 years [thousand ₩] | RHR [%] |
|----------|----------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------|
| Case 1   | 359.0          | 0.3                           | 5.2                   | 1,454,250                       |         |
| Case 2-1 | 2762.9         | 2.3                           | 2.4                   | 15,751,050                      | 17.9    |
| Case 2-2 | 2762.9         | 2.3                           | 14.1                  | 787,500                         | 15      |
| Case 3-1 | 1207.4         | 1.0                           | 3.2                   | 6,229,650                       | 17.9    |
| Case 3-2 | 1011.7         | 0.9                           | 3.4                   | 5,082,000                       | 15      |

난방용 이코노마이저를 가동하지 않기 때문에 항상 최대 공급가능열량 대비 17.9%를 적게 생산하게 된다. 따라서 RHR이 17.9%보다 작은 경우 그 차이만큼의 열량은 공급할 수 없게 되므로 경제적으로 손실이 발생한다. 예를 들어 RHR이 15.0%라면 17.9%와의 차이인 2.9%의 열량은 공급하지 못하게 되어 경제적으로 손실이 발생하는 것이다. 하지만 RHR이 17.9% 이상이라면 지역난방용 이코노마이저를 가동하지 않아도 모든 열량을 공급할 수 있기 때문에 경제적 손실이 발생하지 않는다. 따라서 RHR을 17.9%를 기준으로 삼은 후 이로부터 감소시키면서 경제성 분석을 하였다. 그 결과 RHR이 17.9% 이상일 경우 회수기간은 약 2.4년이고 20년 후의 순현재가치는 157억원이다. 반면에 ORC로 동일한 출력을 생산하지만 RHR이 15%라면 즉, 총 열수요의 2.9%를 공급하지 못한다면 회수기간은 14.1년, 20년 후 순현재가치는 7.9억원으로서 경제성이 현격히 줄어든다.

#### 4.3.3 Case 3

Fig. 9에 Case 3의 경제성 평가 결과를 나타내었다. Fig. 9의 횡축은 RHR로서 열 생산량과 수요량의 차이와 최대 열

생산량과의 비를 나타내며 이는 곧 최대 열생산량 중 ORC로 유입되는 열의 비율을 뜻한다. RHR이 커지는 것에 비례하여 ORC의 출력도 증가하기 때문에 20년 후의 순현재가치도 RHR에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. RHR이 15%라면 회수기간은 3.4년, 20년 후의 순현재가치는 5.1억원이다. 만약 Case 2가 활용하는 17.9% 만큼의 열량을 Case 3에서 ORC 열원으로 사용한다면 회수기간은 3.2년, 20년 후의 순현재가치는 6.2억원이 되는 것으로 나타났다. 두 case의 경제적인 차이는 ORC의 출력차이에서 비롯된다.

Table 5에 각 case들의 성능분석 및 경제성 평가 결과를 정리하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 유기랭킨사이클을 복합열병합발전소에 적용할 수 있는 세 가지 case들을 제시하고 각각의 성능분석 및 경제성 평가를 하였다. 유기랭킨사이클을 적용함으로써 대상 플랜트의 정격출력대비 0.3~2.3%의 출력을 추가로 생산할 수 있다. 본 연구에서는 플랜트의 가동률과 부하를 일정하게 가정하여 경제성을 분석하였으므로 경제성 결과의 절대적인 수치 보다는 여러 case들의 상대적 비교에 중점을 두었다.

Case 2가 가장 작은 회수기간을 보이나 지역난방용 이코

노마이저의 가동을 중지하기 때문에 소비자의 열수요가 증가할 경우 대응이 어렵다는 단점이 있다. 반면 Case 1은 버려지는 열을 활용하며 Case 3은 ORC를 수요자로 공급되는 열원과 병렬로 설치되어 운전하기 때문에 좀 더 유연하게 열 수요 변동에 대처할 수 있는 장점이 있다. 특히 Case 3이 열 수요량에 대처해서 넓은 출력범위에서 시스템 설계가 가능하기 때문에 가장 적합한 선택이 될 것으로 보인다.

본 연구를 통해서 상대적 경제성을 평가하였으므로 후속 연구에서 운전 순위가 높은 방법을 대상으로 하여 장기간에 걸친 플랜트 운전자료의 분석을 통해서 구체적 경제성 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 한국지역난방공사의 연구개발 과제인 “열병합 시스템 배열을 이용한 유기랭킨사이클(ORC)발전시스템 도입 타당성 연구”의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

## References

- (1) Beith, R., 2011, Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems: Advanced Design, Performance, Materials and Applications, Woodhead Publishing.
- (2) Wang, M., Wang, J., Zhao, Y., Zhao, P., and Dai, Y., 2013, “Thermodynamic Analysis and Optimization of a Solar-driven Regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) based on Flat-plate Solar Collectors,” Applied Thermal Engineering, Vol. 50, No. 1, pp. 816~825.
- (3) Borsukiewicz-Gozdur, A., Wiśniewski, S., MocarSKI, S., and Bańkowski, M., 2014, “ORC Power Plant for Electricity Production from Forest and Agriculture Biomass,” Energy Conversion and Management, Vol. 87, pp. 1180~1185.
- (4) Fiaschi, D., Lifshitz, A., Manfrida, G., and Tempesti, D., 2014, “An Innovative ORC Power Plant Layout for Heat and Power Generation from Medium - to Low - Temperature Geothermal Resources,” Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp. 883~893.
- (5) Prando, D., Renzi, M., Gasparella, A., and Baratieri, M., 2015, “Monitoring of the Energy Performance of a District Heating CHP Plant based on Biomass Boiler and ORC Generator,” Applied Thermal Engineering, Vol. 79, pp. 98~107.
- (6) Lee, J. H. and Kim, T. S., 2006, “Analysis of Design and Part Load Performance of Micro Gas Turbine/Organic Rankine Cycle Combined systems,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 9, pp. 1502~1513.
- (7) Onovwiona, H. I. and Ugursal, V. I., 2006, “Residential Cogeneration Systems: Review of the Current Technology,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 10, No. 5, pp. 389~431.
- (8) Qiu, G., Shao, Y., Li, J., Liu, H., and Riffat, S. B., 2012, “Experimental Investigation of a Biomass-fired ORC-based Micro-CHP for Domestic Applications,” Fuel, Vol. 96, pp. 374~382.
- (9) Melloni, L. and Altobelli, C., 2015, “CHP Plant Revamping Project. A Promising Energy Efficiency Story in the Industry Sector,” Energy Procedia, Vol. 82, pp. 599~606.
- (10) Ogriseck, S., 2009, “Integration of Kalina Cycle in a Combined Heat and Power Plant, a Case Study,” Applied Thermal Engineering, Vol. 29, No. 14~15 pp. 2843~2848.
- (11) Zhang, H. S., Zhao, H. B., and Li, Z. L., 2016, “Performance Analysis of the Coal-fired Power Plant with Combined Heat and Power (CHP) based on Absorption Heat Pumps,” Journal of the Energy Institute, Vol. 89, No. 1, pp. 70~80.
- (12) Mago, P. J., Hueffed, A., and Chamra, L. M., 2010, “Analysis and Optimization of the use of CHP-ORC Systems for Small Commercial Buildings,” Energy and Buildings, Vol. 42, No. 9, pp. 1491~1498.
- (13) Calm, J. M. and Hourahan, G. C., 2007, “Refrigerant Data Update,” Heating/Piping/Air Conditioning Engineering, Vol. 79, No. 1, pp. 50~64.
- (14) ElectraTherm, Inc. Reno, United States. Available from: [www.electratherm.com](http://www.electratherm.com) [accessed 15.10.10].
- (15) Aspen Technology, HYSYS, ver. 7.3, 1995.
- (16) Kang, J. Y., Kang, D. W., Kim, T. S., and Hur, K. B., 2014, “Economic Evaluation of Biogas and Natural Gas Co-firing in Gas Turbine Combined Heat and Power Systems,” Applied Thermal Engineering, Vol. 70, No. 1, pp. 723~731.
- (17) Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., and Lemort, V., 2013, “Techno-economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 22, pp. 168~186.
- (18) Retting, A., Lagler, M., Lamare, T., Li, S., Mahadea, V., McCallion, S., and Chernushevich, J., 2011, “Application of Organic Rankine Cycles (ORC),” World Engineer’s Convention, Geneva, Switzerland, pp. 4~8.
- (19) Itron, Inc., 2011, “CPUC Self-Generation Incentive Program: Cost-Effectiveness of Distributed Generation Technologies: Final Report,” California Public Utilities Commission.
- (20) Korea Power Exchange, 2013, <http://epsis.kpx.or.kr/> [accessed 15.11.10].
- (21) Korea District Heating Corp, 2014, <http://www.kdhc.co.kr/> [accessed 15.11.10].