

## 자동차 엔진용 폐열 회수 시스템의 효율 향상방안에 관한 연구

차 원 심<sup>1)</sup> · 최 경 옥<sup>1)</sup> · 김 기 범<sup>2)</sup> · 이 기 형<sup>3)</sup>

한양대학교 대학원 기계공학과<sup>1)</sup> · 충북대학교 기계공학과<sup>2)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>3)</sup>

### A Study on the Way to Improve Efficiency of a Waste Heat Recovery System for an Automotive Engine

Wonsim Cha<sup>1)</sup> · Kyungwook Choi<sup>1)</sup> · Kibum Kim<sup>2)</sup> · Kihyung Lee<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Mechanical Engineering Department, Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

<sup>2)</sup>Mechanical Engineering Department, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

<sup>3)</sup>Mechanical Engineering Department, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

(Received 24 August 2011 / Revised 25 November 2011 / Accepted 30 November 2011)

**Abstract** : In recent, there are tremendous efforts to apply co-generation concept in automobile to improve its thermal efficiency. The co-generation is basically a simple Rankine Cycle that uses the waste heat from the engine exhaust and coolant for heat source. In spite of developed nano technology and advance material science, the bulky co-generation system is still a big concern in automotive application. Therefore, the system should be effectively designed not to add much weight on the vehicle, but the capacity of the waste heat recovery should be still large. With such a goal in mind, the system thermal efficiency was investigated in terms of the system operation condition and working fluid. This paper provides a direction for the optimal design of the automotive co-generation system.

**Key words** : Waste heat recovery(폐열 회수), Rankine cycle(랭킨 사이클), Working fluid(작동 유체), Cycle analysis(사이클 해석), Latent heat(증발 잠열)

#### Nomenclature

h : latent heat, kJ/kg

P : Pressure, bar

T : Temperature, K

W : Work, kJ/kg

$\eta$  : Rankine cycle efficiency

f : freezing

i : inlet

o : outlet

#### Subscripts

b : boiling

c : critical

cond : Condensation

evap : Evaporation

### 1. 서론

현재 자동차에 쓰이는 내연기관의 열효율은 최대 35%를 넘지 못하는데, 이는 연료의 약 1/3만이 동력 에너지로 변환되고 나머지는 엔진의 냉각수와 배기 가스 및 기타 손실로 버려지기 때문이다. 그 동안 내연기관 분야의 연구 동향은 연비 향상 및 배출가스 저감을 위한 연료 혼합이나 연소 과정 최적화에 중점을 두고 진행해왔으나, 최근에는 엄격해진 CO<sub>2</sub> 규제에 대응하기 위해서 효율적인 열관리 시스템 적용 방안이 대두되고 있다.<sup>1,2)</sup>

\*Corresponding author, E-mail: hylee@hanyang.ac.kr

본 연구에서는 효율적인 열관리 시스템 적용 방법 중 발전소에서 엔진이나 터빈으로 구동하는 발전기에서 방출된 열을 추가적인 동력생산을 위한 에너지원으로 재사용하여 에너지 효율을 높이기 위해서 도입한 열병합 시스템을 자동차 내연기관에 적용하여 배기 및 냉각수로부터 열에너지를 회수하는 방법을 적용하였다.

자동차 엔진으로부터 버려지는 배기 폐열을 랭킨 사이클의 원리를 이용하여 회수하는 방법을 사용할 시에 자동차의 경우 시스템 장착을 위한 공간이 협소하므로 시스템의 크기를 줄이고 효율은 높일 수 있는 최적 설계 기술이 필요하다.<sup>3)</sup> 또한 랭킨 사이클의 효율은 작동유체에 영향을 받으므로 적절한 작동유체를 선정하는 기술 또한 중요하다.<sup>4,5)</sup>

따라서 본 논문에서는 자동차용 폐열 회수 시스템의 최적설계를 위하여 작동유체와 시스템의 조건(압력, 온도)이 랭킨 사이클의 효율에 미치는 영향을 상용 프로그램인 Cycle Tempo를 사용하여 해석을 수행하였으며, 폐열 회수 시스템 최적화에 필요한 정량적인 효율 향상 효과를 제시하였다.

## 2. 랭킨 사이클의 효율

폐열 회수 시스템으로 사용하고자 하는 랭킨 사이클은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 보일러, 터빈, 응축기 및 펌프로 구성되어 있다.

- 펌프(1→2) : 유체의 가역 단열 압축 과정
- 보일러(2→3) : 유체의 정압 가열 과정
- 터빈(3→4) : 유체의 가역 단열 팽창 과정
- 응축기(4→1) : 유체의 정압 냉각 과정

### 2.1 랭킨 사이클에 사용되는 효율의 정의

랭킨 사이클의 효율은 식 (1)로부터 식 (5)로 정의되어진다.

$$W_i = h_2 - h_1 \quad (1)$$

$$W_o = h_3 - h_4 \quad (2)$$

$$Q_i = h_3 - h_2 \quad (3)$$

$$Q_o = h_4 - h_1 \quad (4)$$

$$\eta_{ideal} = \frac{W_o - W_i}{Q_i} \quad (5)$$

일반적으로 랭킨사이클의 열효율을 향상시키기 위해서는 보일러에서의 증기 온도를 높여서 사이클 최고 온도 또는 사이클 평균 온도를 상승시키는 경우와 응축기의 방열 온도를 저하시키는 방법을 생각할 수 있다.

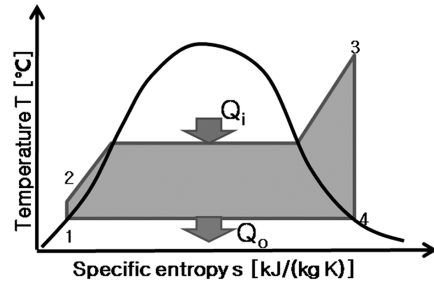


Fig. 1 Schematic of a rankine cycle

### 2.2 사이클 해석의 검증

Cycle-Tempo는 전체 시스템의 질량과 에너지의 흐름을 계산할 수 있고, 이론적으로 접근하기가 쉬운 프로그램이다. 프로그램을 사용하기에 앞서 기본 랭킨 사이클의 검증을 수행하였다.

터빈 입구의 증기 상태가 4MPa, 400°C이고, 출구의 상태가 75kPa인 랭킨 사이클을 모델링 한 결과 Table 1의 결과와 같이 프로그램 오차율이 1% 미만으로 상당히 정확한 수치가 나타나는 것을 알 수 있었다.

Table 1 Rankine-cycle test results

| Process | Component | Analytical | Computational |
|---------|-----------|------------|---------------|
|         |           | h [kJ/kg]  |               |
| 1→2     | Pump      | 384.39     | 384.37        |
| 2→3     | Boiler    | 388.46     | 388.43        |
| 3→4     | Turbine   | 3213.6     | 3214.37       |
| 4→1     | Condenser | 2412.12    | 2425.05       |

## 3. 시스템설계

폐열 회수 시스템은 아래와 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

System A : 배출가스의 폐열 회수

System B : 냉각수의 폐열 회수

System C : 냉각수+배출가스 폐열 회수

### 3.1 작동 유체 선정

랭킨사이클에서 작동 유체의 증발 온도가 높으면 사이클의 전체 효율이 상승하므로 작동유체의 온도를 높이기 위해서는 작동유체의 폐열 회수량이 커야 하며, 자동차에서의 적용 시 공간의 제한으로 인해 시스템 구성 부품들의 크기와 무게를 고려하고, 안정성을 생각하여 선정해야 한다. 본 연구에서의 작동 유체 선정은 선행 연구 결과를 토대로 물과 에탄올을 선정하였다.<sup>6)</sup>

폐열 회수 시스템 적용 시 정격 출력은 항속 주행 시 가솔린 엔진의 배출가스 온도인 500~600°C 로 설정하였고, 증발 잠열이 높아 적은 유량으로도 많은 양의 배출가스에 대한 폐열을 회수 할 수 있는 물이 시스템의 작동 유체로 적합하다고 판단되어 적용해 보았다. 반면, 에탄올의 경우 물질 특성상 배출가스에서 물보다 많은 열의 회수가 가능하지만 낮은 발화점으로 인해 배출가스를 이용한 폐열 시스템의 작동유체로는 부적절하여 배제하였다.

냉각수의 폐열 또한 자동차용 내연기관에 적용할 수 있는 시스템의 열원이다. 본 연구에서는 가솔린 엔진의 냉각수 온도를 약 70~120°C 로 설정하였으며, 냉각수를 이용한 폐열 회수 시스템의 작동유체로 물과 에탄올을 검토하였다.

### 3.2 배출 가스 폐열 회수 시스템 적용 시의 효율

일반적으로 랭킨 사이클의 팽창비는 10 이므로 Table 2와 같이 증발 압력과 응축 압력을 선정하였다. 그리고 보일러에서 열을 회수한 후 유체의 최대 온도를 200~360°C 에서 20°C 간격으로 설정하여 폐열 회수량에 따른 사이클의 효율을 구했으며 결과를 Fig. 2와 같이 나타냈다.

Fig. 2에 나타난 결과를 보면 보일러 압력과 폐열 회수 후의 작동 유체의 온도가 증가 할수록 사이클의 효율이 증가함을 확인할 수 있었다.

사이클 효율은 증발 압력이 증가함에 따라 상승 하지만 260°C 이상에서는 압력에 따른 효율 증가율이 적음을 알 수 있었다. 작동 유체의 증발 압력과

Table 2 System parameters for a simulation

| P <sub>eva</sub> [bar] | P <sub>cond</sub> [bar] | T <sub>cond</sub> [°C] | T <sub>max</sub> [°C] |
|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 20                     | 2                       | 120.21                 | 200<br>~<br>360       |
| 30                     | 3                       | 133.53                 |                       |
| 40                     | 4                       | 143.61                 |                       |

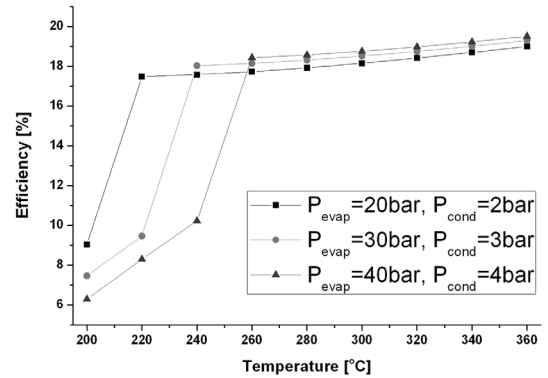


Fig. 2 Rankine cycle efficiency of high temperature loop with water

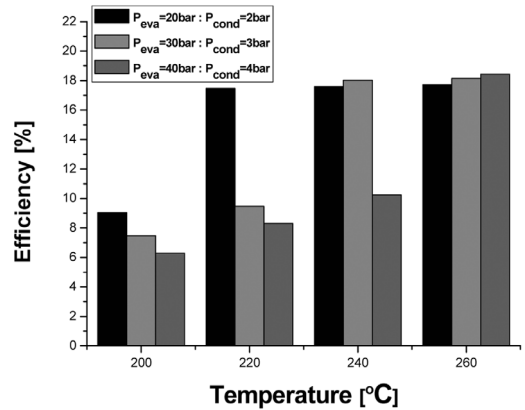


Fig. 3 Rankine cycle efficiency according to evaporation pressures

보일러에서의 회수 후 온도가 증가할수록 시스템 효율은 상승하지만 비용과 시스템 무게 및 크기를 고려하여 적절한 압력과 회수 온도를 선택해야 한다.

Fig. 3에서 증발압력과 폐열 회수 후 온도가 높은 경우, System A(배출 가스)의 효율이 가장 좋지만 압력과 회수율 상승을 위해서는 시스템 구성부품의 크기가 커지기 때문에 시스템의 무게와 크기를 고려할 때 비효율적이다. 그러므로 증발 잠열이 큰 물은 500°C 이상의 배출가스 열원에서 폐열 회수량을

고려했을 때 증발 압력이 30bar인 경우가 이상적이며 이 경우 효율이 약 18.14%이다.

### 3.3 냉각수 폐열 회수 시스템 적용 시의 효율

물질의 특성이 다른 물과 에탄올을 비교하기 위하여 사이클의 응축압력을 0.6143bar로 설정하고, 작동 유체가 폐열 회수 후 온도가 95~130°C라고 가정하여 증발 압력의 변화에 따른 효율을 구하였다.

Fig. 4는 물을 작동유체로 하고, 냉각수를 열원으로 하는 랭킨 사이클의 온도와 압력에 따른 효율을 나타낸다. 이 결과는 Fig. 2에 나타난 고온, 고압의 배출가스를 열원으로 한 시스템에 비해 현저히 낮은 효율을 보인다. 이 결과로부터 물은 보일러가 저압이고 증발 온도가 낮으면 효율이 낮음을 알 수 있다. 응축기의 압력을 0.6143bar보다 더 낮춘다면 사이클의 효율은 증가시킬 수 있지만 응축기의 방열 온도가 작아지고, 작동 유체가 포함하는 수분의 양이 상대적으로 많으므로 터빈 날개에 부식 등을 발생시키는 결과를 가져올 수 있어 응축기 압력을 더 낮출 수 없었다. 따라서 냉각수를 열원으로 이용하는 낮은 온도 범위에서는 작동유체를 물로 사용할 경우 시스템의 효율이 10% 이하인 것을 확인할 수 있다.

작동유체를 에탄올로 하는 사이클의 효율은 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 에탄올의 효율은 증발압력과 증발온도가 높을수록 상승한다.

열원인 냉각수의 온도를 고려하고 열교환기의 효율을 0.8로 가정했을 때 100°C를 임계점으로 설정하

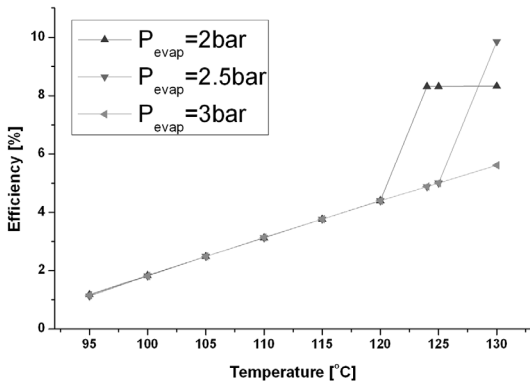


Fig. 4 Rankine cycle efficiency of low temperature loop with water

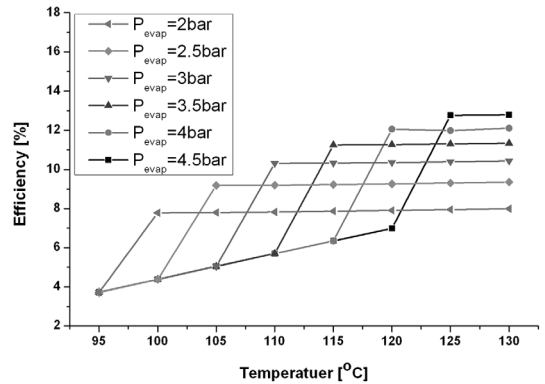


Fig. 5 Rankine cycle efficiency of low temperature loop with ethanol

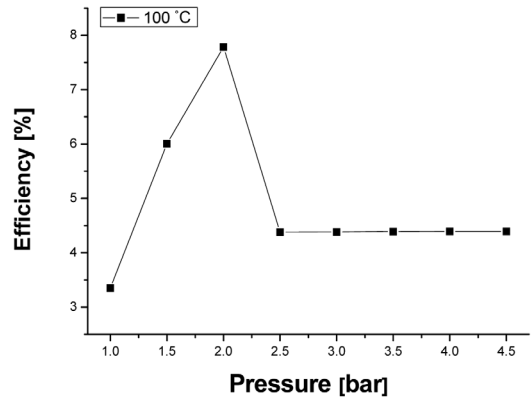


Fig. 6 Rankine cycle efficiency at 100°C with ethanol

였을 때의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우에 효율이 가장 높을 때의 증발 압력은 2bar이고 이 때 효율은 7.78%이다. 이 결과는 Fig. 4의 작동유체가 물인 경우에 비하면 월등히 높은 효율을 나타내고 이는 열원의 온도가 낮은 경우의 랭킨사이클에서는 작동 유체를 에탄올로 사용하는 것이 적합하다는 것을 보여준다.

### 3.4 배출가스 + 냉각수 폐열 회수 시스템 적용 시의 효율

랭킨사이클의 효율 상승을 위해 저온의 냉각수에서 열을 회수하고, 다시 고온의 배출가스에서 열을 회수하는 시스템을 구성하였다. 앞에서 언급했듯이 에탄올은 고온 고압에서 작동 유체로 사용하기 부적절하기 때문에 물과 에탄올에 따른 시스템 효율을 비교하기 위하여 에탄올의 초기 온도를 63°C로

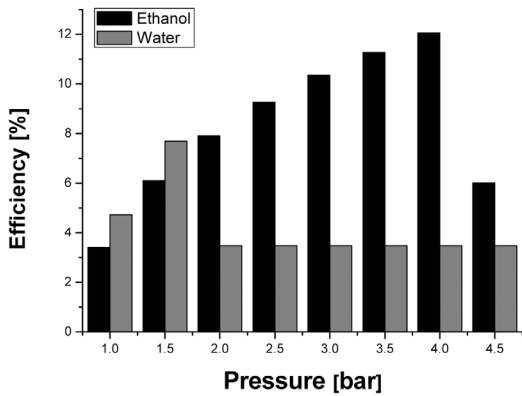


Fig. 7 Cycle efficiency of system C with ethanol and water

설정하였고, 냉각수로부터의 폐열 회수 후 온도를 100°C, 배출가스로부터의 폐열 회수 후 온도를 최대 온도인 120°C 로 설정하였다. 또한 응축기의 최소 압력을 0.6143bar로 설정하여 비교하였다.

작동 유체의 증발 압력을 1bar에서 4.5bar까지 변화하였을 때의 System C(냉각수+배출가스)의 전체 효율을 Fig. 7에 나타내었다.

System C(냉각수+배출가스)에서는 작동유체가 물 보다는 에탄올 일 때 효율이 더 높게 나타남을 확인 할 수 있다.

이는 냉각수의 온도 범위가 낮아 작동 유체로서 물은 효율이 낮고 배출가스의 열원에서 너무 적은 양의 폐열을 회수하였기 때문이다. 만일 배출가스에서 더 많은 폐열을 회수하는 시스템을 구성한다면 고온과 고압에서 사용하기 위험한 에탄올보다는 물을 작동유체로 사용하는 것이 적절하다.

작동 유체를 물로 하는 배출가스 폐열 회수 시스템의 열원인 배출 가스는 물의 응축온도인 120.21°C 에서 증발 온도 260°C로 가열되는 System A(배출 가스)를 지나도 열원의 온도는 200°C 이상이 되기 때문에 작동유체를 에탄올로 하는 System C(배출 가스 + 냉각수)에서도 열원으로 사용이 가능하다. 이 시스템의 구성은 Fig. 8에 나타내었고, 설정 조건은 Table 3과 같다.

물을 작동 유체로 하는 System A(배출 가스)와 에탄올을 작동 유체로 하는 System C(냉각수+배출가스)를 동시에 적용하여 16.36%의 효율을 얻을 수 있었다.

Table 3 Water & Ethanol rankine cycle input properties

| Heat source  | Exhaust gas | Coolant + Exhaust gas |     |
|--|-------------|-----------------------|-----|
| Working fluid                                      | Water       | Ethanol               |     |
| Condensation temperature [°C]                      | 133.53      | 63                    |     |
| Temperature after the recovery of heat source [°C] | 260         | Coolant               | 100 |
|  |             | Exhaust gas           | 100 |
| Condensation pressure [bar]                        | 3           | 0.6143                |     |
| Evaporation pressure [bar]                         | 30          | 4                     |     |

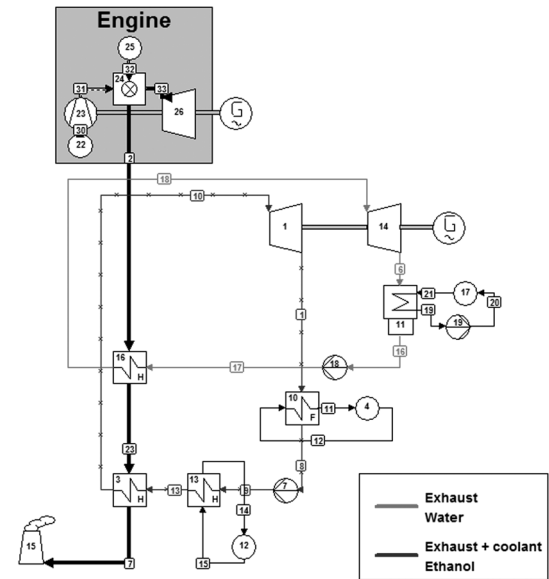


Fig. 8 Schematic of co-generation system used for simulation

#### 4. 결론

본 연구에서는 폐열 회수 시스템의 구성에 따른 효율 향상 효과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같다.

- 1) 열원의 온도 범위가 높은 배출가스 폐열 회수 시스템에서는 작동 유체를 증발 잠열이 큰 물로 하는 것이 효율이 높았다.
- 2) 냉각수 폐열 회수 시스템에서는 물보다 에탄올이 효율이 좋게 나타났다. 따라서 열원의 온도 범위가 낮은 폐열 회수 사이클에서의 작동유체로 물보다는 에탄올이 적합하다.

- 3) 냉각수와 배출가스로 폐열을 회수하는 시스템에서 응축압력 0.6143bar, 응축온도 63°C인 경우, 증발압력이 4bar일 때 효율이 12.06%로 가장 높았다.
- 4) 자동차의 폐열원인 배출가스와 냉각수를 모두 이용하는 경우, 배출가스의 폐열 회수를 위해서는 작동 유체를 물로 선정하였고, 냉각수의 폐열 회수에는 낮은 온도 범위에서 물보다 유리한 에탄올을 작동 유체로 선정 하였던 것이 시스템의 열효율을 16.36%까지 높게 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업원천기술개발사업의 연구비에 의해 수행된 연구 결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

## References

- 1) R. Stobart and R. Weerasinghe, "Heat Recovery and Bottoming Cycles for SI and CI Engines - A Perspective," SAE 2006-01-0662, 2006.
- 2) T. Endo, S. Kawajiri, Y. Kojima, K. Takahashi, T. Bada, S. Ibaraki, T. Takahashi and M. Shinohara, "Study on Maximizing Exergy in Automotive Engines," SAE 2007-01-0257, 2007.
- 3) H. Teng, G. Regner and C. Cowland, "Waste Heat Recovery of Heavy-Duty Diesel Engines by Organic Rankine Cycle Part I: Hybrid Energy System of Diesel and Rankine Engines," SAE 2007-01-0537, 2007.
- 4) H. Teng, G. Regner and C. Cowland, "Waste Heat Recovery of Heavy-duty Diesel Engines by Organic Rankine Cycle Part II: Working Fluids for WHR-ORC," SAE 2007-01-0543, 2007.
- 5) S. J. Bae, H. S. Heo, H. K. Lee, Y. D. Choung, J. S. Hwang and C. B. Lee, "An Investigation on Working Fluids for an Exhaust Waste Heat Recovery System of a Gasoline Engine," KSAE 09-A0027, 2009.
- 6) J. Ringler, M. Seifert, V. Guyotot and W. Hübner, "Rankine Cycle for Waste Heat Recovery of IC Engines," SAE 2009-01-0174, 2009.