

기계공학실험: 열역학실험 B

Rankine cycle 실험

2023-04-21

2019-15838 주기영 5조

1. Introduction

열기관은 다양한 열역학적 과정으로 이루어져 작동유체가 원래의 상태로 돌아오면서 일을 하는 기관이다. 열역학적 과정을 여러 개 구성하여 원래의 상태로 돌아오는 과정을 열역학 cycle 이라고 하는데, 한 번의 과정에서 작동유체의 상태가 변하면 영속적으로 이러한 기관을 쓰는 것이 불가능하기 때문에 이러한 cycle 을 구성한다.

본 실험에서는 열역학적 cycle 중 Rankine cycle 에 대하여 중점적으로 살펴볼 것이다. Rankine cycle 이란 두 개의 등압과정과 두 개의 단열과정으로 이루어진 열역학적 cycle 로, 발전소와 같은 곳에서 가장 주요적으로 사용되는 열기관 중 하나이다. 본 실험에서는 Rankine cycle 을 재현해 봄으로써 각 과정(등압과정과 단열과정)을 마친 후에 실제 작동유체의 변화를 계산함으로써 cycle 의 작동 과정을 이해하고, 열기관의 효율을 직접 계산해봄으로써 열기관의 열효율에 대한 이해를 높일 수 있다. 이에 더하여 실제로 Rankine cycle 의 효율을 더 높이기 위해서 어떠한 방법이 있는지 생각해본다. 이러한 실험은 실제로 cycle 을 구성하고, 높은 효율을 얻기 위해서 어떠한 방법이 있는지 생각해볼 수 있으므로, 열역학 cycle 을 구성하기 전에 수행될 수 있는 좋은 실험이다.

2. Experiment

1) Theory

2.1.1 카르노 사이클(Carnot cycle)

열역학 제 2법칙에 따르면 열효율이 100%인 열기관(영구기관)은 절대 존재할 수 없다. 카르노 사이클은 고열원과 저열원의 온도가 정해졌을 때, 이론상으로 가장 큰 열효율을 갖는 열기관이다. 카르노 사이클은 두 개의 등온과정과 두 개의 단열과정으로 이루어진 열역학적 cycle로, 카르노 사이클의 각 과정을 P-V 선도와 T-s 선도에 나타낸 것이 Fig 1과 같다. T-s 선도의 아래의 넓이는 계의 출입한 열량으로, 카르노 기관에서 계의 들어온 열량은 1-2 과정의 T-s선도에서의 밑넓이이며, 계에서 나간 열량은 3-4 과정의 T-s선도의 밑넓이이다.

또한, 식(1)의 열역학 제 1법칙에 의해서 열역학적 과정에서 출입한 열량의 합은 계의 내부에너지 변화량과 계가 한 일의 합과 같다. 이를 cycle의 관점에서 바라보면 cycle은 항상 작동유체가 원래의 상태로 돌아오기 때문에 내부에너지 변화가 0이고, 따라서 식(2)를 얻을 수 있다. 따라서 카르노 사이클에서 계가 한 일 W 는 직사각형 1234의 넓이이다. 따라서 열효율의 정의에 따라서 식(3)과 같이 열효율을 계산할 수 있다. T_1 은 고열원의 온도이며, T_2 는 저열원의 온도이다.

$$Q = \Delta U + W \quad (1), \quad \oint \delta Q = \oint \delta W \quad (2)$$

$$\eta_{carnot} = \frac{W}{Q_L} = \frac{(T_1 - T_2)(S_2 - S_1)}{T_1(S_2 - S_1)} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3)$$

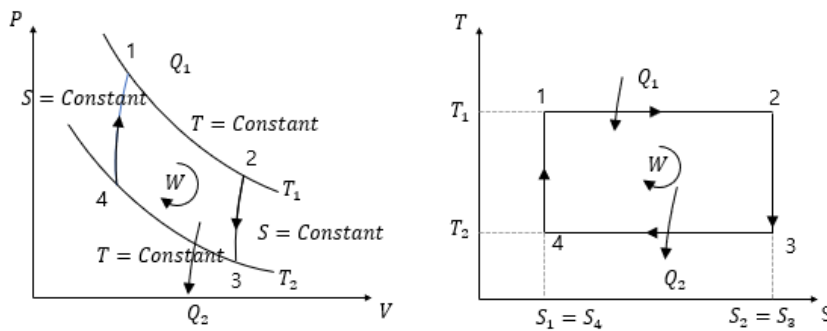


Fig 1. P-v diagram, T-s diagram for Caront Cycle

2.1.2 랭킨 사이클(Rankine cycle) [2]

2.1.1에서 언급했던 카르노 사이클은 고열원과 저열원의 온도가 정해졌을 때 열역학 cycle을 구성하였을 때, 가장 효율이 높은 사이클이다. 따라서 이를 이론적으로 생각해보면 이를 사용하여 같은 열량을 주었을 때, 최대한 일을 많이 할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 하지만 카르노 사이클의 등온과정과 가역 단열 과정은 실제로 구현하기 불가능한 과정이다.

따라서 구현이 가능한 열역학적 과정으로 이루어진 하나의 열역학적 cycle을 구성해야 하는데, 이것 중 하나가 본 실험에서 다룬 Rankine cycle이다. 이는 실제 산업 현장에서도 많이 사용되고 있다. Rankine cycle은 두 개의 등압과정과 두 개의 단열과정으로 이루어진 열역학적 cycle로, 이 cycle에서는 작동유체가 각 상태에서 액체와 기체 상태로 존재한다. 즉, 건도를 고려해야 한다. 이상적인 Rankine cycle(단열 과정이 가역적으로 발생하는 경우)의 T-s 선도는 Fig 2와 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 1-2 과정과 3-4 과정에서 엔트로피의 값이 변하지 않는다. 가역 단열과정은 실제로 구현하기 쉽지 않기 때문에 이는 이상적인 기관이라고 할 수 있으며, 실제의 Rankine cycle은 단열 과정에서 마찰과 기타 손실로 인해 1-2과

정과 3-4과정이 가역적으로 일어나지 않으므로, Fig 3과 같은 T-s 선도를 갖는다.

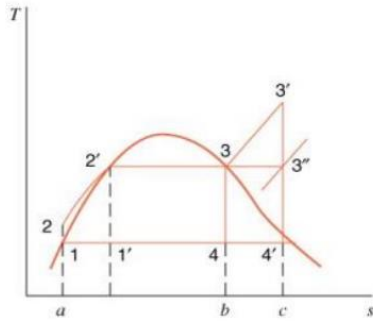


Fig 2. T-s diagram for ideal Rankine cycle

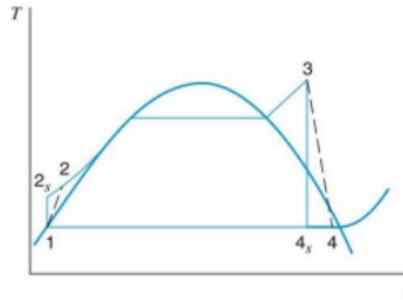


Fig 3. T-s diagram for real Rankine Cycle

2.1.3 Rankine cycle의 각 과정과 과정에서의 효율

Fig 2의 T-s 선도에서 각 과정을 1,2,3,4로 하면 1-2 과정은 펌프에서 발생한다. 펌프에서 단열압축을 하여 하여 작동유체를 포화액에서 압축수로 변화시키고, 2-3 과정에서 보일러에서 등압 가열을 하여 압축수에서 포화증기로 변화시킨다. 3-4과정에서는 터빈에서 단열팽창을 하여 작동유체를 포화증기에서 혼합 상태로 변화시키며, 4-1 과정은 응축기에서 등압방열을 하여 작동유체를 혼합 상태에서 포화액으로 변화시킨다.

앞서 언급했듯이 1-2과정과 3-4과정은 실제 과정에서는 이상적인 Rankine cycle과 다르게 진행된다. 이상적인 과정에서의 엔탈피 변화에 대한 실제 과정에서의 엔탈피 변화로 펌프와 터빈의 효율이 정의된다. 이는 각각 식(4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4), \quad \eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (5)$$

보일러에서는 작동유체에 열을 가하여 등압팽창시키며, 보일러에서 전달하는 열은 식(6)과 같다. 응축기에서는 Rankine cycle에서 등압압축을 진행하는 구성요소로 응축기의 이상적인 열효율은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{boiler} = h_3 - h_2 \quad (6)$$

$$\eta_c = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} \quad (7)$$

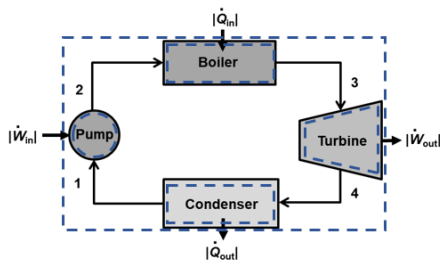


Fig 4. Components and procedures of Rankine cycle

모든 과정을 거치면서 사이클의 Rankine cycle의 전체 효율은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{Rankine} = \frac{W_{t,out} - W_{p,in}}{Q_{in}} \quad (8)$$

2.1.4 RankineCycler(실험에 사용되는 장비)와 실제 Rankine cycle의 비교

열역학 cycle이란 실제로 작동유체가 어떠한 과정들을 거쳐 원래대로 되돌아오며, 받은 열에너지 대비 일정량의 일을 하는 기관이라 할 수 있다. 작동유체가 원래 상태로 되돌아오는 이유는 한 번의 cycle 이후에도 같은 과정을 통해 cycle이 진행될 수 있도록 하여 산업적으로 사용하기를 의도한 것이다. 하지만 이 실험에서 사용되는 장비인 RankineCycler는 실험을 목적으로 만들어진 장비이므로, Fig 4와 같이 작용한다. Fig 4에서 볼 수 있듯이 이는 Rankine cycle의 펌프가 하는 과정인 단열팽창을 하지 않고, Fig 2의 지점 2부터 시작하여 지점 3, 지점 4를 거쳐서 작동유체가 버려진다. 따라서 이는 실제로 cycle이라고 할 수는 없다.

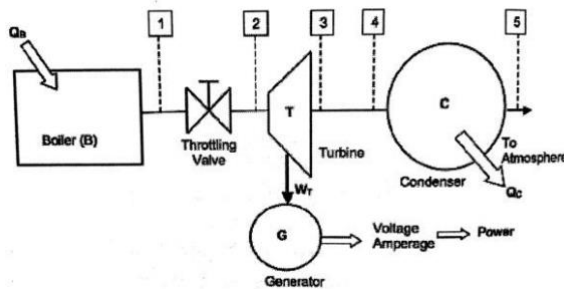


Fig 4. Components and procedures of RankineCycler

2) Equipment and method

2.2.1 실험 장비

본 실험에서는 Fig 4의 작동방식을 가지는 RankineCycler를 이용한다. 이는 Rankine cycle과 유사하게 구성하기 위한 보일러, 터빈, 콘덴서를 포함하고 있으며, 이에 더하여 전류계, 전압계, 공급 발전기, DAQ와 같은 장치도 존재한다. 또한 추가적으로 수위계, 증기밸브, 응축 탭 등의 보조장비를 갖추고 있다.

2.2.2 실험 방법

이 장비에서는 실제 cycle과 유사한 작동을 하도록 장비를 구성하였으므로, 실제 실험에 앞서서 안전 점검 및 준비가 필수적이다. 실험실에 인화성 물질, LP가스통을 모두 치우고, 실험 장비에는 이상이 없는지 확인한 후에 장비의 모든 스위치를 OFF 상태로 만든다. 또한, 가변 저항을 최소 상태에 위치시키고, 보일러를 완전히 비우고, 증기 밸브를 잠궈야 한다.

안전에 대한 준비가 모두 완료되면 실험을 시작한다.

(1) 맨 처음 보일러에 작동 유체(물)을 5.5L 채우고, 장비의 마스터 스위치를 채우고, 가스 밸브를 개방한다. DAQ도 작동시켜 실험 데이터 기록을 시작한다. 버너 스위치(빨간색 스위치)를 on으로 설정한다.

(2) (1)의 과정을 완료하면 45초 뒤에 연료 연소 과정이 진행된다. 이 과정이 끝난 후에는 7분 정도 소요되는 터빈 예열을 진행해야 한다. 이때, 보일러의 압력이 110psi가 되면 증기 밸브를 열어 압력이 40psi가 되도록 낮춘 후 밸브를 다시 닫는다. 이 과정을 두 번 반복한 후에 마지막으로, 압력이 110psi로 도달하면 전압계가 15V일 때까지 증기 밸브를 천천히 열어둔다. 마지막으로, 로드 스위치를 ON으로 설정하고 가변저항을 조절하여 0.2A, 6V, 110psi로 맞춰둔다. 이렇게 하면 터빈의 예열이 끝나고, steady state에 도달하게 된다.

(3) 증기 밸브와 가변 저항을 적절하게 조절하여서 steady state를 10분 이상 유지되도록 하고, 이때의 데이터를 정상상태에서 추출하였다고 간주하여 DAQ를 통해 데이터를 얻어 실험 분석에 사용한다. 실험 결과를 해석하기 위하여 필요한 작동유체의 유량을 초시계와 눈금을 이용하여 측정한다.

3) Results

Fig 1은 steady state에 도달한 Rankine cycler의 각 구성요소의 위치에서의 압력과 온도 값을 나타낸 것으로, 온도의 단위는 섭씨온도이며, 압력의 단위는 psis이다. 1psis는 6.895kPa 이므로, 이 관계를 이용하여 psis로 나타낸 압력을 kPa로 바꾼다. 또한, 계기압력으로 나타난 값이므로, 대기압을 더하여 절대압력으로 바꾸었다. 각 지점에서의 비체적, 내부에너지, 엔탈피, 엔트로피는 각 지점의 압력과 온도를 이용하여 웹페이지를 참고하여서 찾았다. 이는 참고문헌에서 찾아볼 수 있다.

Boiler는 엄밀히 말하면 등압과정에 속하므로, 입구에서의 압력과 온도 또한, Rankine cycler 내부에서 출구에서의 압력과 동일한 압력을 가진 부분에서의 압력과 온도를 측정하는 것이 엄밀하지만 그러한 지점을 찾고, 측정하는 것이 어려우므로, 처음 Rankine cycle에 물이 들어가는 그 순간을 boiler의 inlet이라고 정하였고, 이는 대기압과 상온의 온도를 갖는 상태의 물이다. Fig 1의 상태량들은 Rankine cycler가 steady state에 도달한 상태라고 간주한 3860sec~4040sec의 상태량들의 평균을 낸 것으로, 오랜시간동안 측정하여 정확도를 높인 data이다.

| Boiler pressure | Boiler Temper(out) | Turbin Pressure(in) | Turbin Pressure(out) | Turbin Temper(in) | Turbin Temper(out) | Voltage | Current |
|-----------------|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------|---------|---------|
| 110.375 | 176.28 | 19.753 | 5.873 | 126.48 | 109.86 | 6V | 0.367A |

Table 1. Result of Rankine cycler in steady state

| | P [kPa] | T [°C] | v [m ³ /kg] | u [kJ/kg] | h [kJ/kg] | s [kJ/kgK] | phase |
|---------------------|------------|-----------|---------------------------|--------------|--------------|---------------|----------------------|
| Boiler Inlet (0) | 101.325 | 20 | 0.0010 | 83.93 | 84.03 | 0.2965 | compressed liquid |
| Boiler Exit (1) | 862.37 | 176.28 | 0.2261 | 2585.0 | 2779.9 | 6.655 | superheated vapor |
| Turbine Inlet(2) | 237.53 | 126.48 | 0.7564 | 2536.9 | 2716.6 | 7.076 | superheated vapor |
| Turbine Exit(3) | 141.82 | 109.86 | 0.0011 | 431.0 | 431.2 | 1.3391 | compressed liquid |

Table 2. Properties of Rankine cycler in steady state for each component[3]

Fig 5는 T-s diagram 위에 네 가지 상태를 나타낸 것으로, 포화증기 선은 matlab의 오픈 소스인 "X Steam, Thermodynamic properties of water and steam"에서 포화액와 포화증기의 선(saturation)을 따라 그린 것이다. Rankine cycler의 경우에는 boiler의 exit에서 turbine의 inlet까지 throttle이 발생하여 압력과 온도를 낮춘다. 이 과정에 대해서는 알 수 없으므로, 초록색 직선으로 표현했다.

Boiler와 condensor는 등압과정으로 일어나므로, T-s diagram에서의 등압선을 따라서 그렸다. 또한 ideal한 Rankine cycle의 경우에는 터빈이 단열 가역 과정으로 설계되어야 하므로, T-s 선도에서 등엔트로피선(엔트로피 축의 수직인 선)의 형태로 나타나야 한다. 하지만 Rankine cycler에서 펌프가 평형을 이루지 않고, 진행되기 때문에 정확한 과정을 파악할 수 없으므로, 시작점과 끝점을 직선으로 연결하였다.

Fig 3의 그림과 터빈의 exit을 비교해보면 실제 Rankine cycle의 경우에는 T-s diagram에 아래에 있는 혼합 용액인 것에 비해서 Rankine cycler에서는 압축수의 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한, 엔트로피의 값이 감소한 것을 확인할 수 있다. Rankine cycler와 Rankine cycle의 가장 큰 차이가 여기서 기인한다고 생각한다. 펌프의 경우에는 Rankine cycler가 포함하지 않는 구성요소이지만 이를 cycle로 해석한다면 pump의 exit는 boiler의 inlet으로 적당하게 이어보았다.

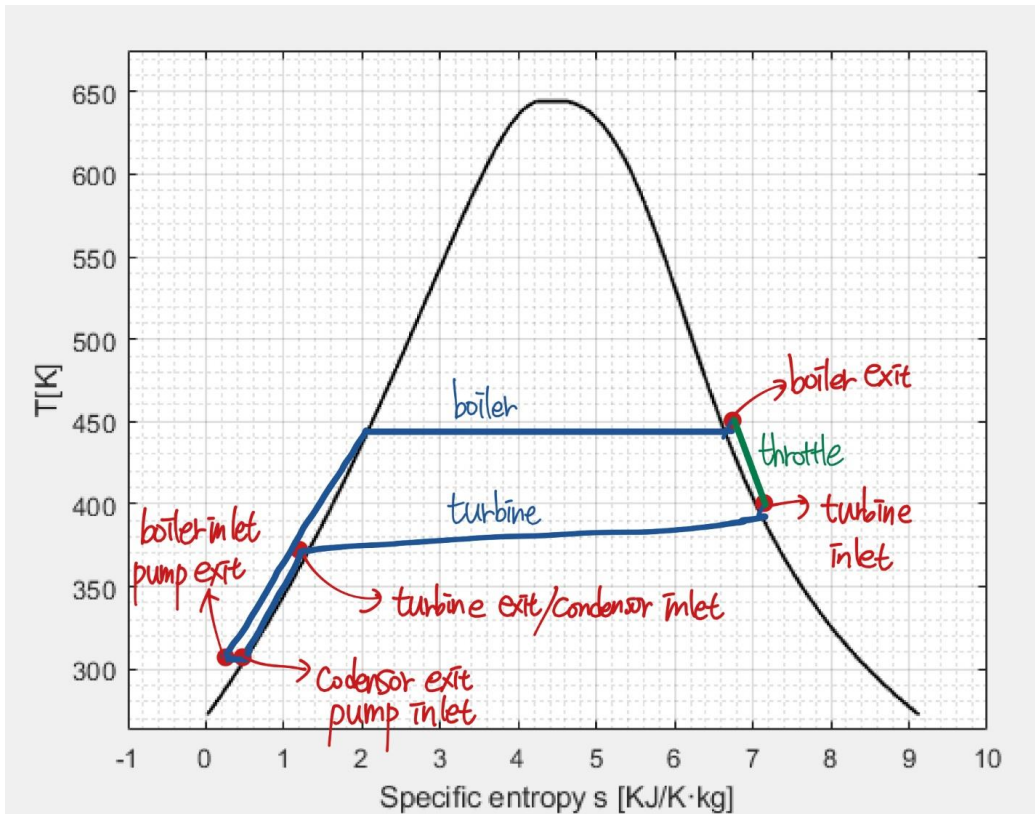


Fig 5. T-s diagram for rankine cycler in experiment[4]

3. Discussion

3.1 터빈의 효율과 발전기의 효율

터빈의 효율은 식(9)와 같이 표현할 수 있다. 이 식에서 h_2 와 h_3 는 각각 turbine inlet과 turbine exit의 엔탈피이다. 또한, h_{3s} 는 3-4과정이 등엔트로피 과정으로 발생했을 때의 엔탈피이므로, turbine의 inlet에서의 온도인 109.86도를 갖고, turbine의 outlet에서의 엔트로피인 7.076kJ/kg K을 갖는 상태에서의 엔탈피 값인 2601.3kJ/kg을 사용하였다.

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = 19.821 \quad (9)$$

$$h_3 = 2716.6\text{kJ/kg}, \quad h_4 = 431.2\text{kJ/kg}, \quad h_{4s} = 2601.3\text{kJ/kg} \quad (10)$$

터빈의 효율의 정의를 생각해보면 ideal한 상황에서의 한 일 대비 실제 상황에서 터빈이 한 일로 정의되어 있으므로, 터빈의 효율이 1을 넘어 심지어는 20에 가까운 숫자를 가지는 것은 매우 비현실적이다. 이는 Turbine의 exit에서의 상태량이 정확하게 측정되지 않은 것으로 추측하고 있으며, 이를 다시 정확하게 측정한다면 터빈의 효율을 더 정확하게 구할 수 있을 것이라고 생각된다.

Rankine cycler의 작동 유체의 질량 유량 \dot{m} 과 발전기의 전력 P_g 에 대하여 발전기의 효율은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다. 전력을 Table 1에서 계산한 voltage와 current 값을 이용하여 계산하면 발전기의 효율을 계산할 수 있다. 질량 유량 \dot{m} 은 3분 동안 0.54kg이 지나는 것을 확인했으므로, 0.003kg/s값을 이용하였다.

$$\eta_t = \frac{P_g}{\dot{W}_t} = \frac{I_g V_g}{\dot{m}(h_3 - h_4)} = 0.3212 * 10^{-3} \quad (11)$$

식(11)을 통한 계산에 따르면 발전기의 효율이 아주 낮은 것을 확인할 수 있다. 하지만 앞서 언급했듯이 turbin exit의 상태량이 정확하게 측정되지 않은 것으로 인해서 h_4 의 값 또한 왜곡되었다고 생각하며, 이에 의하여 이러한 낮은 값이 측정되었다고 생각한다. 이 또한 turbine의 exit의 상태량을 더욱 정밀하게 측정한다면 정확하게 알 수 있을 것이다.

3.2 실험에서 사용된 Rankine cycle의 효율과 같은 열원을 갖는 Carnot cycle과의 비교

Rankine cycle의 효율은 식(8)과 같이 계산할 수 있음을 언급하였다. 하지만 이 실험에서 사용한 Rankine cycler의 경우에는 펌프가 존재하지 않으므로, $W_{p,in}$ 가 존재하지 않으므로, 식(12)와 같이 계산할 것이다. 실제 Rankine cycle에서도 펌프가 받은 일은 터빈이 한 일보다 훨씬 작아서 Rankine cycle의 효율을 계산할 때, 펌프의 일을 제외하고 계산하는 경우도 빈번하다. Q_{in} 은 boiler에서 작동유체에 전달하는 열량이므로, boiler의 inlet과 exit에서의 엔탈피 차이로 계산할 수 있으며, $W_{t,out}$ 는 turbine의 inlet과 exit에서의 엔탈피 차이로 계산할 수 있다. 질량유량은 일정하므로, 무시하고 계산하였다.

이를 실제로 같은 열원을 사용하는 카르노 사이클에서의 열효율과 비교하자. Carnot cycle의 열효율은 식(3)을 이용하여 계산하였다. Rankine cycler에서의 고열원의 온도 T_1 은 boiler의 exit에서의 온도를 사용하였고, 저열원의 온도 T_2 는 boiler의 inlet에서의 온도를 사용하였다. 각각 절대온도로 나타내면 450K, 290K이다.

$$\eta_{Rankine} = \frac{W_{t,out}}{Q_{in}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} = 0.8479 \quad (12)$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 0.356 \quad (13)$$

앞서 언급했듯이 이론적으로 같은 열원을 사용하는 열기관들 중 가장 효율이 높은 열기관이 카르노 기관이다. 따라서 측정이 제대로 이루어졌다면 카르노 기관 가정을 통한 열효율이 실제 측정된 Rankine cycle의 열효율보다 높은 값을 가져야 한다. 하지만 실제로 계산된 값은 측정된 Rankine cycle의 값이 카르노 기관을 가정한 열효율보다 2배 높게 계산되었다. 이는 실험 상에 오차가 크게 발생하였음을 알 수 있다.

가장 큰 이유는 계속 언급하였던 turbine의 exit의 상태이다. Fig 2를 보면 turbine의 exit은 inlet보다 엔트로피가 높아야 하며, 비가역적이라고 하더라도 크게 차이가 나지 않아야 하며, 또한 혼합용액에 위치해야 한다. 하지만 이는 압축수 상태에 있다. 이 때문에 turbine의 출구에서의 엔탈피가 매우 작아진다. 터빈이 한 일은 turbine의 inlet과 exit에서의 엔탈피 차이에 비례하기 때문에, 이러한 효과는 터빈이 일을 실제보다 훨씬 많이 한 것으로 측정되었을 것이며, 이에 따라서 식(12)의 분자가 매우 커져서 효율이 매우 크게 계산된 것이다. 또한, 근본적으로 Rankine cycler가 기존에 사용되는 Rankine cycle과 차이점(펌프가 존재하지 않아 실제로는 cycle이 아닌 점, throttle 과정이 있다는 점 등)이 많으므로, 식(12)를 통해서 효율을 계산해보려는 것은 실험적으로는 의미가 있을 수 있으나, 큰 신뢰성을 주지는 않는다. 하지만 더 정밀하게 실험을 진행해보는 방법으로는 Rankine cycler의 더 많은 지점에서 측정이 가능하도록 만들어볼 수 있을 것이다. 더욱 정확하게 Rankine cycler의 효율에 대해서 설명하기 위하여 터빈이 실제로 가역적인 과정을 거친다고 가정하고, $h_{4s} = 2601.3\text{kJ/kg}$ 를 이용하여 효율을 계산해보면 식(14)와 같이 계산할 수 있다. 심지어는 실제로는 터빈이 가역과정을 거치지 않기 때문에 식(14)보다 낮은 효율을 갖는다고 생각할 수 있다. 이러한 낮은 효율을 갖는 이유는 Rankine cycler에서는 throttle에 의한 손실이 매우 크기 때문이다. 이는 boiler의 exit부터 turbine의 inlet까지의 압력강하 값으로 실제로 체감할 수 있는 부분이다.

$$\eta_{Rankine} = \frac{W_{t,out}}{Q_{in}} = \frac{h_3 - h_{4s}}{h_3 - h_2} = 0.0427 \quad (14)$$

3.3 실험에 사용된 장비의 효율 개선 방안

이상적인 카르노 기관의 효율은 식(3)과 같이 고열원과 저열원의 온도만의 함수로 나타난다. 이번 실험에서 사용된 Rankine cycle의 효율의 경우에는 고열원, 저열원의 온도에만 의존하는 함수는 아니지만, 고열원과 저열원에서의 엔탈피 차이가 클수록 효율이 커지므로, 이는 고열원과 저열원의 온도가차 클수록 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 장비의 효율을 높이기 위해서 고열원의 온도를 더 높이는 방법을 생각해 볼 수 있다. 고열원은 boiler의 exit이며, 저열원은 boiler의 inlet이고, boiler의 inlet의 온도는 작동유체를 넣는 부분이므로, 상온에 해당하므로, 고열원의 온도를 높이는 것이 상대적으로 용이하다.

또한, 각각의 구성요소의 성능을 개선시킬 수 있다. 먼저 터빈을 개선시키는 방법으로, 터빈은 작동하면서 기계적인 마찰에 의해서 효율 저하가 발생하므로, 터빈을 코팅하고, 장비 관리 시 지속적으로 윤활제를 발라주면 이러한 마찰에 의한 손실을 줄일 수 있다. 또한, boiler에서 증기가 물방울 형태로 맺히는 것을 피해야 한다. 따라서 이를 위해 지속적으로 물방울을 제거하는 과정을 거치면 좋다.

마지막으로, 본 실험이 실질적으로 cycle을 이루지 않는 것이 효율이 낮게 측정되는 가장 큰 원인이다. Fig 5에서는 cycle로 표시하였지만, 실제로는 pump가 존재하지 않고, boiler 또한 등압과정을 거쳐서 가지 않으므로, 처음 boiler에 들어간 상태와 마지막에 condensor를 거쳐서 나온 상태가 같지 않아 이 과정에서 에너지의 출입이 발생할 수 있다. 이는 작동 유체가 Rankine cycler의 입구와 출구에서의 비가역성이 증가한다는 의미이고, 이에 따라 Rankine cycler 내부에서 에너지 손실이 발생한다. 즉, 장비에서는 pump를 사용하지 않아 원래의 Rankine cycle보다 높은 에너지를 가진 증기를 내보내어 에너지 손실을 발생시킨다. 따라서 펌프를 추가시켜서 순환적으로 cycle을 구성하게 되면 이러한 현상을 감경시킬 수 있고, 이는 곧 효율의 증가로 이어질 것이다. 또한, 이러한 비가역적 과정을 통한 에너지 손실을 막고, Rankine cycler 자체의 효율을 높이기 위해서는 Rankine cycler 자체에 단열재를 사용하여 계와 외부의 에너지 출입을 최소화시키는 것 또한 필요하다.

4. Reference

[1] Seoul National University Mechanical Engineering, "Mechanical Engineering Experiment", Westsea planning, pp.99~107.

[2] Wikipedia, "Rankine cycle", March 28, 2023, accessed on May 4. https://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle

[3] KNOVEL ONLINE, 'COMPRESSED WATER AND SUPERHEATED STEAM Calculator', accessed on May 4. https://app.knovel.com/sc/?Compressed_Water_and_Superheated_Steam

[4] MathWorks ONLINE, 'X Steam, Thermodynamic properties of water and steam.', accessed on May 4. <https://kr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam-thermodynamic-properties-of-water-and-steam>