

일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

2. 열기관 사이클



장비 구성

EX-5530B Heat Engine Cycle

일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지	
Heat Engine/Gas Law Apparatus	TD-8572A
Large Rod Base	ME-8735
90cm Long Steel Rod	ME-8738
Mass & Hanger Set	ME-8979
Thread	
3-Liter Plastic Tub (2 Pack)	ME-7559
PASPORT Rotary Motion Sensor	PS-2120
PASPORT Quad Temperature Sensor	PS-2143
PASPORT Dual Pressure Sensor	PS-2181

Required :

850 Universal Interface

PASCO Capstone Software

냉수(얼음물 ~ 상온) 및 온수(약 80°C)



일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

목 표

1. 열기관 사이클의 개념 및 이해

열기관은 고온 열원에서 얻은 열에너지의 일부를 일로 전환하고, 나머지를 저온 열원으로 방출함으로써 반복적으로 일을 할 수 있는 장치이다. 본 실험에서는 뜨거운 물과 차가운 물을 이용하여 열기관 사이클이 어떻게 구체적으로 구현되는지를 관찰한다.

2. 사이클 과정에서의 상태 변화 측정

공기가 팽창 및 수축하는 동안 피스톤의 이동 거리, 질량체가 들어 올려진 높이, 각 단계에서의 온도 변화를 측정하여, 공기의 상태 변화(압력, 부피, 온도 등)에 따른 열역학적 관계를 이해한다.

3. 열기관 효율 개념 체득

열기관 사이클을 통해 실제로 얻을 수 있는 일(Work)과 고온 열원으로부터 흡수된 열(Q_H), 저온 열원으로 방출된 열(Q_C) 등의 관계를 실험적으로 파악함으로써, 열효율의 개념($e = W / Q_H$)을 체득한다.

기본 이론

1. 열기관의 최대 열효율과 실제 열효율

$$e_{\max} = \left(1 - \frac{T_c}{T_H}\right) \times 100\% \quad (1)$$

- T_H : 고열원(고온)에서의 온도(K)
- T_c : 저열원(저온)에서의 온도(K)

카르노(Carnot) 열기관에서는 고열원과 저열원 사이의 절대온도 차이만으로 최대 열효율이 결정됨을 알려준다. 실제 장치에서는 마찰, 비가역성, 열 손실 등이 존재하므로 이 이론적 최대 효율보다는 항상 낮은 효율이 나타난다.

$$e = \frac{W}{Q_H} \times 100\% \quad (2)$$

- W : 열기관이 외부에 해 줌 **일실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지**
- Q_H : 고온 열원으로부터 공급받은 열

실제 실험이나 엔진에서는, 측정 가능한 W 와 Q_H 값을 통해 열효율을 계산한다. 열기관 사용을 동안 공급받은 열에 비해 얼마만큼의 일이 유용하게 외부로 출력되었는가를 나타내므로, 열기관의 성능을 평가하는 핵심 지표이다.

2. 열역학 제1법칙

열역학 제1법칙은 ‘에너지가 생성되거나 소멸되지 않고 단지 한 형태에서 다른 형태로 전환될 뿐이다’라는 에너지 보존 법칙을 열역학적으로 표현한 것이다. 이 법칙은 계(system)의 내부에너지(Internal Energy, U)의 변화가 계에 가해진 열(heat, Q)과 계가 외부에 대해 한 일(work, W) 사이의 관계로 나타낸다.

$$\Delta U = Q - W \quad (3)$$

- ΔU : 계(기체)의 내부 에너지 변화량
- Q : 계가 흡수한 열($Q > 0$), 혹은 계에서 방출한 열($Q < 0$)
- W : 계가 외부에 한 일($W > 0$), 혹은 계가 외부로부터 받은 일($W < 0$)

※ 부호 약속은 책이나 강의마다 다를 수 있으나, 우리의 논의에선 기체가 일을 할 때 양의 일로 정의하기 때문에 음(-)의 부호를 넣어 표현했다.

일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

열역학 제1법칙을 식으로 표현하면 식(3)과 같다. 즉, 계(기체)의 내부 에너지 변화(ΔU)는 공급된 열(Q)에서 계가 한 일(W)을 뺀 값과 같다.

3. 물비열

물비열이란 1몰의 물질의 온도를 1K 높이는 데 필요한 열량을 말한다. 이때 부피(V)가 일정할 때의 물비열을 등적 물비열(C_V)이라고 하고, 압력(P)이 일정할 때의 물비열을 등압 물비열(C_P)이라고 한다.

등적 과정에서는 부피가 고정되어 있으므로 기체가 팽창하여 외부에 일을 할 수 없다($W=0$). 즉, 이 과정에서 기체가 흡수한 열(Q)은 전부 기체 내부 에너지(U)를 증가시키는데에만 사용된다.

$$\Delta U = Q_V, W=0 \Rightarrow Q_V = \Delta U \quad (4)$$

등압 과정에서는 압력이 일정하므로 온도가 올라가면 기체는 팽창($\Delta V > 0$)해서 외부에 일($W > 0$)을 하게 된다. 이 과정에서 기체가 흡수하는 열(Q)은 내부 에너지 증가(ΔU)뿐 아니라 팽창에 쓰이는 일(W)도 감당해야 한다.

$$Q_P = \Delta U + W \quad (5)$$

결국 등압 조건에서는 같은 온도 변화 ΔT 에 대해서도 외부에 한 일만큼 열이 추가로 필요하기 때문에 항상 $C_P > C_V$ 가 된다.

실제 기체(특히 상온의 이원자 기체 등)에서는 기체 분자의 자유도(병진, 회전, 진동) 개수에 따라 C_V 와 C_P 가 달라진다. 예를 들어 단원자(He, Ne, Ar 등)은 원자 하나가 점 입자처럼 움직인다고 볼 수 있으므로 병진 자유도가 3(3D 공간에서 이동), 회전 자유도 0(점 입자로 간주하므로 회전이 있어도 에너지가 거의 기여하지 않음), 진동 자유도 없음(진동하려면 최소 2개 이상의 원자가 결합된 구조가 필요)이므로 결과적으로 자유도 $f=3$ 으로 계산한다. 이원자 분자(N_2 , O_2 등)은 병진 자유도가 3, 회전 자유도가 2(상온 부근에서 분자가 긴 축을 기준으로 회전하는 2개 축만 유효) 진동 자유도 없음(상온 정도에서는 제대로 활성화 되지 않거나 부분적으로만 활성화)이므로 유효 자유도 $f \approx 5$ (병진3+회전2)로 계산한다. 그 외 다원자 기체는 회전·진동 모드가 더 많으므로 더 복잡하다. 온도에 따라 진동 자유도가 달라지면 C_V , C_P 도 달라질 수 있다.

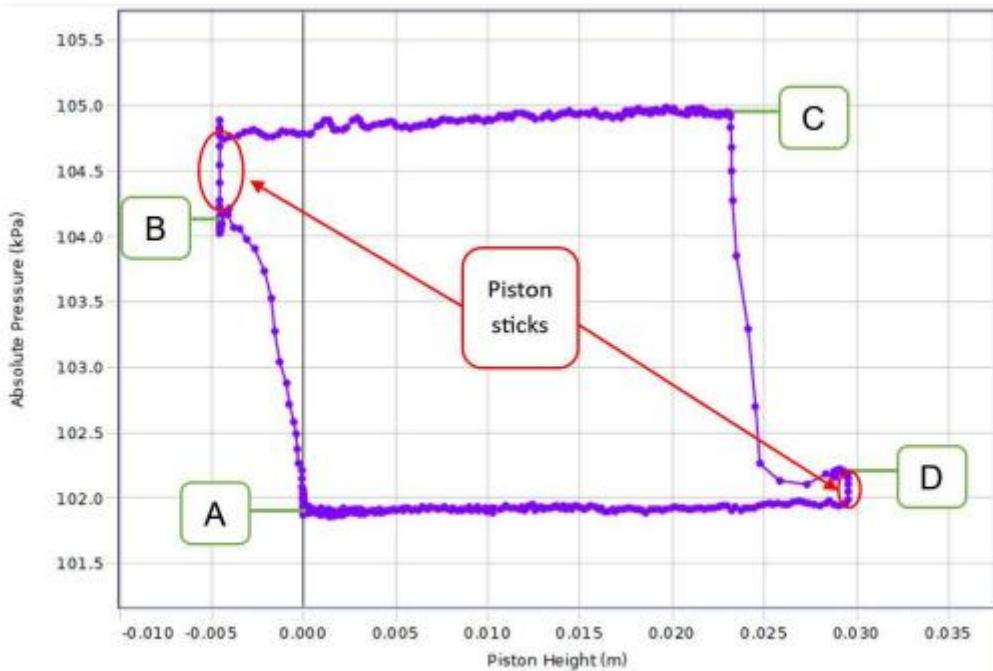
$$C_V = \frac{3}{2}R, C_P = C_V + R = \frac{5}{2}R \quad (6)$$

$$C_V = \frac{5}{2}R, C_P = \frac{7}{2}R \quad (7)$$

※ 이상기체에서 $C_P - C_V = R$

에너지 등분배 정리에 따라 식(6)의 단원자 기체 몰비열, 식(7)의 이원자 기체 몰비열을 알 수 있다. 공기는 대부분 이원자 분자로 이루어져 있으므로 해당 실험에서는 식(7)을 사용한다.

4. 사이클 과정



(1) A→B : 질량체를 플랫폼 위에 올려놓는다(등온 압축 과정)

처음(A점)에서는 챔버가 저온 수조에 잠겨 있어서 기체 온도는 저온(T_0)을 유지하고 있다. 피스톤 위에 질량체가 없는 상태라 비교적 낮은 압력•부피를 가진 기체 상태에서 시작한다. 200g 질량체를 플랫폼 위에 천천히 올려 놓으면 외부 압력이 증가하여 기체가 서서히 압축된다. 저온 수조와 접촉 중이므로 기체 온도는 거의 일정하다.
등온(온도 변화 $\Delta T=0$)이므로

$$\text{일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지} \\ \text{내부 에너지 변화 } \Delta U = nC_V \Delta T = 0 \quad (8)$$

$$\text{열역학 제1법칙 } \Delta U = Q - W, \Delta U = 0 \Rightarrow Q = W \quad (9)$$

- n :용기 내부의 기체의 몰수

- C_p : 등압 물비열

- ΔT : 온도 변화

로 나타낼 수 있다.

(2) B→C : 공기 챔버를 저온 수조에서 고온 수조로 이동 (등압 팽창 과정)

B점에서 기체는 저온(T_C) 상태로 압축된 부피를 갖고 있다. 이때 공기 챔버를 고온 수조로 옮기면 내부 기체의 온도가 $T_C \rightarrow T_H$ 로 상승한다. 피스톤 위 질량체가 그대로이므로 외부 압력은 거의 일정하다고assumes. 있어, 기체는 등압 팽창을 하게 된다. 온도가 올라가면 부피가 늘어나면서 피스톤을 밀어 올려 기체가 일을하게 된다.

$$Q_P = nC_P\Delta T \quad (10)$$

$$W = Q - \Delta U \quad (11)$$

식(10)은 등압 과정에서 기체에 가해지는 열량이며 식(11)은 열역학 제1법칙에 따라 기체가 해준 일을 나타낸다.

(3) C→D : 200g 질량체를 플랫폼에서 제거한다(등온 팽창 과정)

챔버는 이미 고온 수조 속(T_H), 피스톤 위에는 질량체 200g이 올라가 있는 상태이다. 이때 질량체를 제거하면 피스톤을 누르는 외부 압력이 감소하게 된다. 고온 수조와 접촉중이므로 기체 온도가 거의 일정(T_H)하게 유지된다. 그리고 외부 압력이 낮아진 만큼 기체는 추가로 팽창한다. 즉 외부에 일을 하게 된다. 등온 과정이므로 식(8), 식(9)에 따라 $\Delta U=0$ 이고, $Q=W$ 이다.

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dV = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad (12)$$

- V_i : 등온 과정 시작 시점에서의 부피
- V_f : 등온 과정이 끝난 시점에서의 부피

일반물리학및실험1 실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

이상기체 방정식 $PV=nRT$ 를 이용하면 이 과정에서 기체가 하는 일은 식(12)와 같이 나타난다.

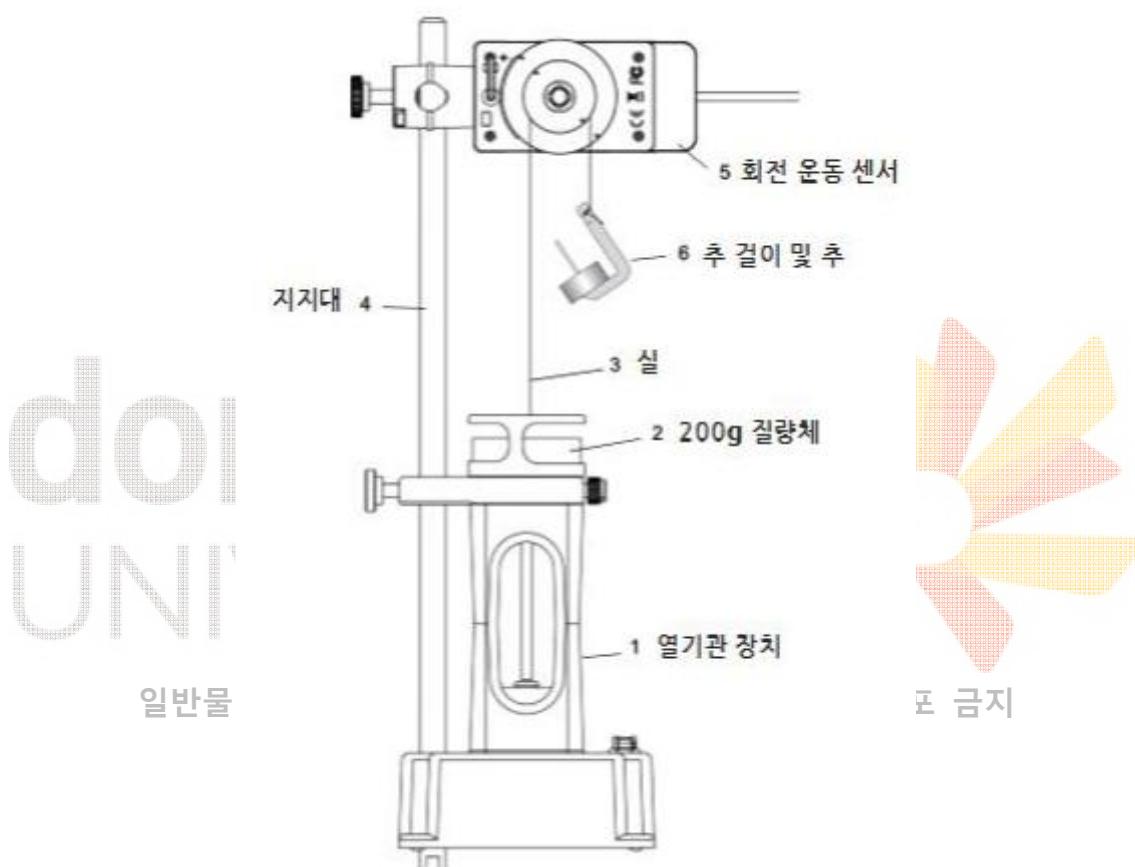
(4) D→A : 공기 챔버를 고온 수조에서 저온 수조로 이동(등압 압축 과정)

질량체가 제거된 상태(압력 작용)에서 기체 온도는 T_H , 부피가 크게 팽창된 상태에서 챔버를 다시 저온 수조로 옮기면 온도가 T_H 에서 T_C 로 떨어진다. 즉 기체가 등압상태에서 냉각·수축된다.

사이클의 마지막 과정에서는 기체로부터 저온의 수조로 열이 방출되어 피스톤이 원래의 위치로 돌아가게 된다. 이는 등압 과정에 해당하며 사이클의 두 번째 과정에서와 같은 공식, 식(10), 식(11)이 적용된다. 기체가 처음(A점)과 같은 상태로 복귀하며 사이클은 완성된다.

[실험 1] 열기관 사이클

이 실험은 열기관 사이클을 간단한 장치를 통해 직접 경험하고, 각 단계에서 기체의 팽창·수축과 열·일의 교환 관계를 관찰함으로써 열역학 법칙과 열효율의 개념을 이해하는데 목적이 있다.

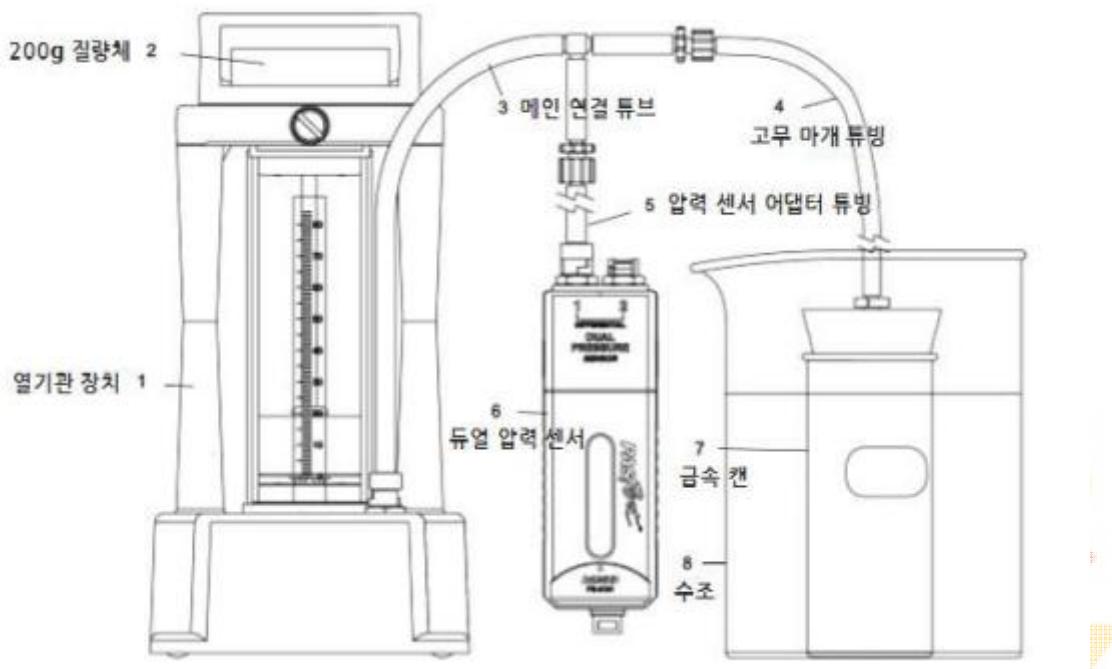
실험 방법

1. 베이스와 지지대를 조립한다. 열기관에 부착된 로드 클램프를 이용하여 열기관을 지지대의 하단에 장착한다.
2. 회전운동센서를 지지대의 상단에 장착한다. 열기관의 질량체 플랫폼의 중앙에 실의 한쪽 끝을 연결한 다음, 반대쪽 끝을 회전 운동 센서의 중간 도르래(3단 도르래 중 가운데)에 걸어준다. (위 그림 참고) 아직 200g 추는 얹지 않는다.

3. 도르래에 걸린 실의 끝에 추 걸이를 매달고, 총질량이 48.5g이 되도록 추를 걸어준다. 이는 피스톤에 대한 평형추 역할을 한다. 평형이 맞지 않다면 추 걸이의 질량을 조금씩 수정해도 무방하다. 피스톤의 초기 위치를 약 2cm 눈금에 오도록 맞춘다.

4. 회전 운동 센서를 인터페이스에 연결한다.용 / 무단 전재 및 재배포 금지

5. 다음 그림과 같이 열기관과 듀얼 압력 센서, 금속 캔을 연결한다.



6. 듀얼 압력 센서를 인터페이스에 연결한다.용 / 무단 전재 및 재배포 금지

7. 2개의 수조에 찬물(얼음물 또는 실온의 물)과 뜨거운 물(약 80°C)을 반쯤 채워 준비한다.

8. 큐드 온도 센서를 인터페이스에 연결한 다음, 2개의 온도 프로브를 꽂는다. 1번 프로브를 뜨거운 물에, 2번 프로브를 찬물에 넣는다.

※ 미리 설정된 Capstone 실험 파일에는 1번과 2번 온도 데이터의 각 이름이 '더운물', '찬물'로 되어 있다. 이를 잘 확인하고 온도 프로브를 설치하도록 한다.

9. Capstone 소프트웨어를 실행하여, "EX-5530B Heat Engine Cycle.cap" 파일을 불러온다.

10. Capstone 실험 파일의 'Procedure' 페이지로 이동한다. 각 단계에서 지연이 없도록 아래 사이클을 진행한다. 데이터를 기록하기 전에 몇 차례 연습해도 좋다. 공기 챔버를 얼음물에 담근 상태로 시작하며, 이 시작점을 A점이라 한다.

피스톤의 초기 높이: 실험 1 실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지

A → B : 200g 질량체를 플랫폼 위에 올려놓는다.

B → C : 공기 챔버를 저온 수조에서 고온 수조로 이동시킨다.

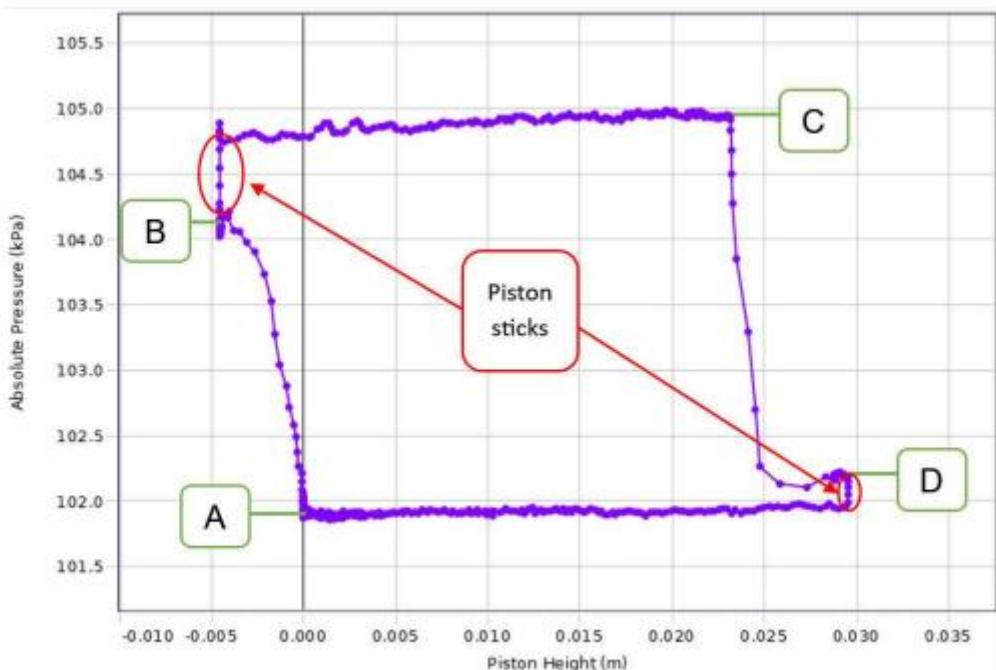
C → D : 200g 질량체를 플랫폼에서 제거한다.

D → A : 공기 챔버를 고온 수조에서 저온 수조로 이동시킨다.

11. 데이터 기록을 시작하기 전에, 공기 챔버를 얼음물에 담그고 평형에 도달할 때까지 기다린 다음, 피스톤 바닥의 초기 높이를 기록한다. Capstone 실험 파일의 'Data Collection' 페이지로 이동하여 RECORD 버튼을 클릭하여 데이터 기록을 시작한다. 데이터를 기록한 후, STOP을 클릭하여 기록을 중지한다.

※ 실험 도중, 피스톤이 실린더 바닥 또는 천장에 닿을 수가 있다. (아래 그림의 빨간 원) 다시 말해, 이때는 B점과 D점처럼 피스톤의 높이가 변하지 않게 된다. 이는 물의 온도 차이가 너무 커서 피스톤 실린더의 부피가 압력 차이를 감당하지 못할 때 나타난다.

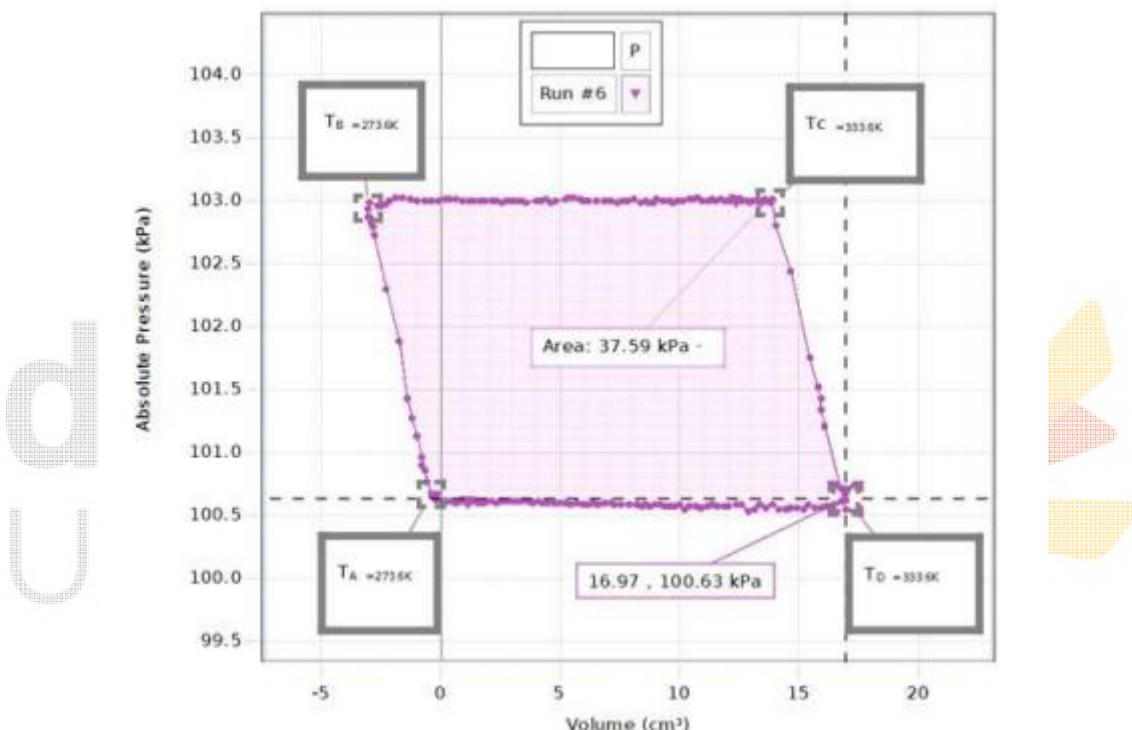
이런 데이터가 나왔을 경우, 분석을 진행하면서 B 점과 D 점은 P-V 다이어그램의 꼭짓점에 있지 않다는 것에 주의하여 분석을 진행하거나, 두 물의 온도 차이를 약간 줄인 후, 다시 실험을 시도하도록 한다. 또는 피스톤의 초기 높이를 조금 달리하여 실험을 다시 시도한다



12. Capstone 실험 파일에서 'Analysis' 페이지로 이동한다.
13. 'Analysis' 페이지의 그래프 X축과 'Data Collection' 페이지의 그래프의 X축이 다르단 것에 주의한다. 'Analysis' 페이지의 그래프 X축 데이터는 'Volume (cm^3)'으로, 계산기를 통해 원기둥 부피를 계산한 값이다. **실험실습용 / 무단 전재 및 재배포 금지**
14. 만약 그래프에 수집한 데이터가 나타나지 않는다면, 그래프 툴바의 'Select visible data' 도구를 사용하여 데이터를 선택한다.



◎ 열기관 사이클의 P-V 다이어그램(예시)



15. 열기관 사이클의 P-V 다이어그램이 그려지면, A, B, C, D 지점에 해당하는 꼭짓점을 구별하고, 그래프 툴바의 "Area" 도구를 이용하여 닫힌곡선 내부의 면적을 구한다.

