

제 5장 공정열역학

학습목표

1. 적절한 표시방식을 이용하여 여러 장치에 대하여 질량 유속이 포함된 에너지와 엔트로피 수지식을 세울 수 있다.
2. 흐름이 동일한 성질(분배기) 혹은 동일 유량(열교환기의 입구와 출구)를 갖는 특성을 이용하여 에너지 수지식을 단순화할 수 있다.
3. 다중 재가열기와 공급수 전열기를 갖는 동력 순환공정을 통한 일에 대해 올바른 전략을 적용할 수 있다.
4. 일반적인 증기 압축 순환공정에 대하여 응축기/증발기의 P 혹은 T 중 하나가 주어지면 나머지 하나의 위치를 결정할 수 있으며 공정의 출과와 P-H도표를 도시할 수 있다.
5. E-수지식과 S-수지식을 간단히 한 뒤 미지수를 풀어 복잡한 공정에 대해 적절하게 접근할 수 있다.

5.1 Carnot 증기 순환과정

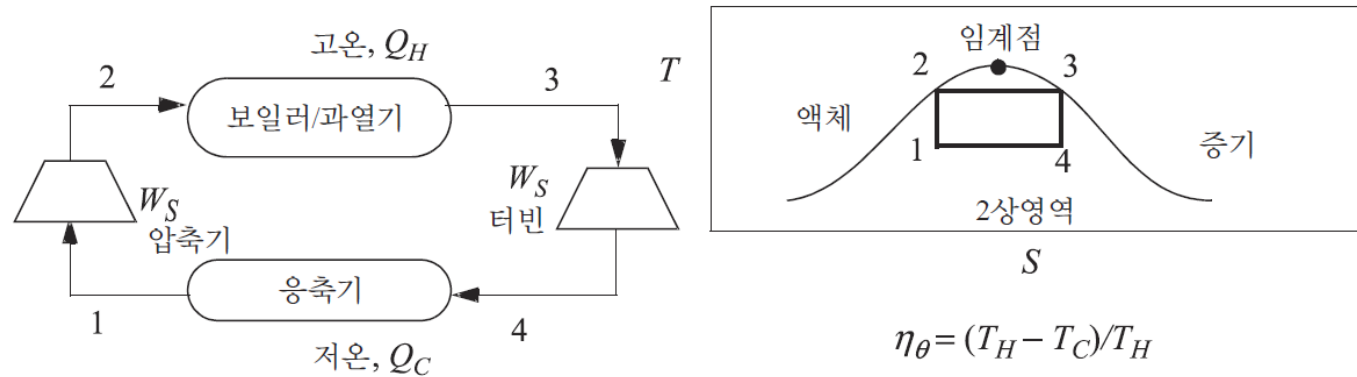


그림 5.1 • T-S 좌표에서 나타낸 수증기를 기반으로 하는 Carnot 순환과정

- (1) 온도가 높으면 포락선 안에 머물 수 없다.
- (2) 포화증기의 질이 낮으면 물방울로 터빈 날개가 손상된다.
- (3) 부분응축된 액체의 수송이 어렵다

5.2 Rankine 순환과정

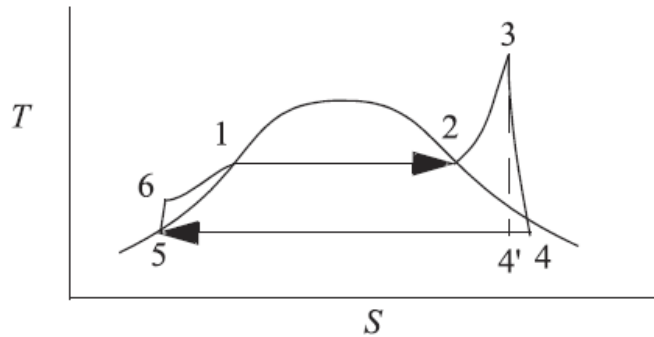
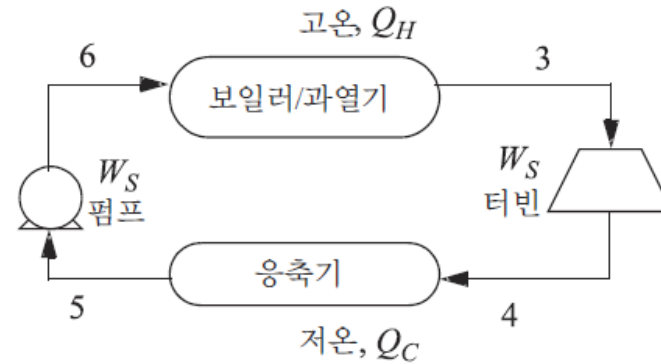


그림 5.2 • Rankine 순환과정



- 상태 4는 효율을 적용하여 계산
- 열효율은

$$\eta_{\theta} = \frac{-W_{S,net}}{Q_H} = \frac{-(\Delta H_{3 \rightarrow 4} + W_P)}{\Delta H_{6 \rightarrow 3}}$$

$$\Delta H_{3 \rightarrow 4} = \eta_E \Delta H_{3 \rightarrow 4'} \quad H_4 = H_3 + \Delta H_{3 \rightarrow 4}$$

- 예제 5.1 Rankine 순환과정

예제 5.1 Rankine 순환공정

발전소에서는 Rankine 순환공정을 이용한다. 터빈의 입구는 500°C와 1.4 MPa이다. 출구는 0.01 MPa이다. 터빈의 효율은 85%이며 펌프의 효율은 80%이다. 다음을 계산하라.

- 터빈에 의해 행한 일(kJ/kg)
- 펌프에 의한 일, 소요 열, 그리고 열적 효율
- 1 MW의 순 출력을 위해 필요한 순환속도

풀이

상태	$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{MPa})$	q	$H(\text{kJ/kg})$	$S(\text{kJ/kgK})$	$V(\text{m}^3/\text{kg})$
3	500	1.4	supV	3474.8	7.6047	
4'	45.81	0.01	0.927	2409.2	7.6047	
4	45.81	0.01	0.972	2515.8	7.9388	
5, sat L	45.81	0.01	0.0	191.8		0.00101
6			compL	193.6		

$$\Delta H'_{pump} = W'_{S,pump} = \int V dP \approx V \Delta P$$

$$\Delta H'_{pump} = \frac{1010 \text{ cm}^3(1.4 - 0.01)}{\text{kg}} \left| \frac{1 \text{ J}}{\text{cm}^3 \text{ MPa}} \right| \frac{\text{kJ}}{10^3 \text{ J}} = 1.4 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{S,pump} = W'_{S,pump} / \eta_C = 1.4 / 0.8 = 1.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\theta} = \frac{-W_{S,net}}{Q_H} = \left(\frac{957.2}{3281.2} \right) = 0.2917$$

5.3 Rankine 순환공정의 수정

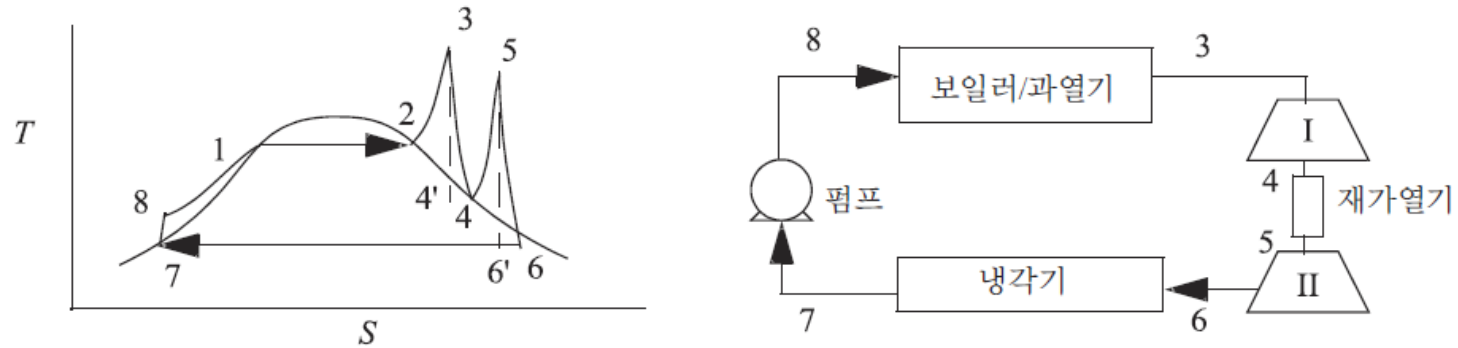


그림 5.3 • 재가열기가 장착된 Rankine 순환공정

- 재가열기를 이용한 다단 터빈을 사용
- 단수를 늘려 최대 온도를 가능한 길게 유지 \Rightarrow Carnot cycle의 효율에 접근
- 예제 5.2 재가열기가 장착된 Rankine 순환공정

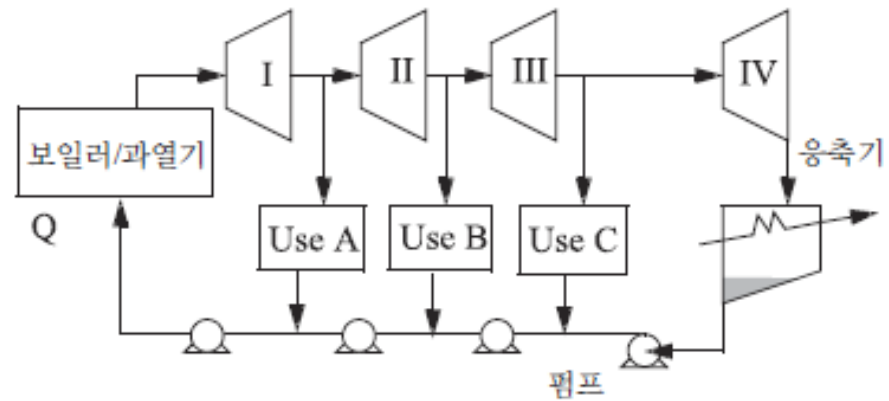


그림 5.4 • 공정수증기를 위한 측면 배출선을 갖는 Rankine 순환공정. 공정수증기를 보일러로 되돌리기 위해 펌프 혹은 조름밸브를 사용할 수도 있다.

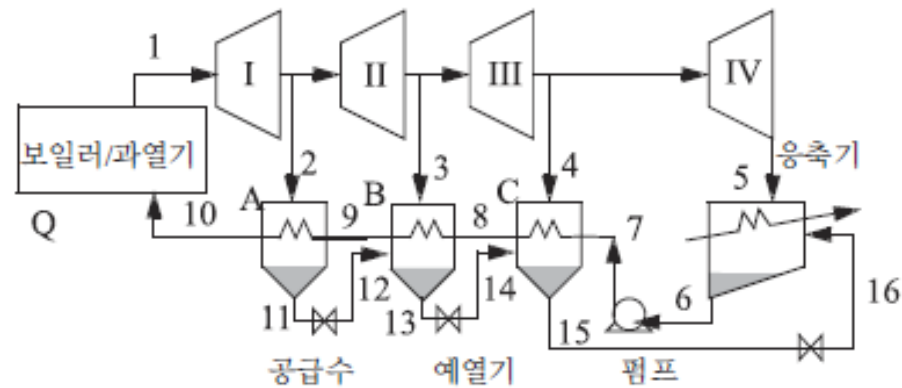


그림 5.5 • 폐쇄 공급수 예열기를 사용하는 재생 Rankine 순환공정

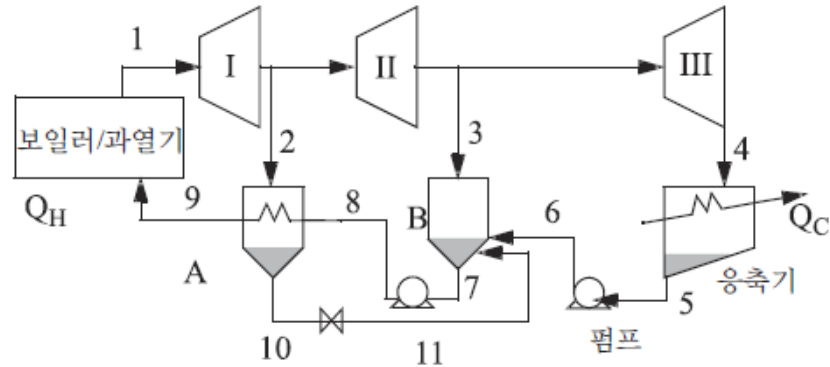


그림 5.6 • 폐쇄 공급수 예열기 A와 개방 공급수 예열기 B를 사용하는 계의 개략도

예제 5.3 재생 Rankine 순환공정

수증기(1)가 보일러/과열기로부터 500°C 와 5 MPa 로 배출된다. 공정의 개략도가 그림 5.7에 나타나 있다. 첫 번째 터빈에서는 1 MPa 로 배출되고(2, 3) 두 번째 터빈의 출구(4)는 0.1 MPa 이다. 공급수 예열기를 이용하여 흐름 7과 8 사이에 5°C 의 접근온도를 유지하면서 열교환이 이루어진다. 흐름 1의 단위 질량당의 흐름에 대한 순 출력을 구하라.

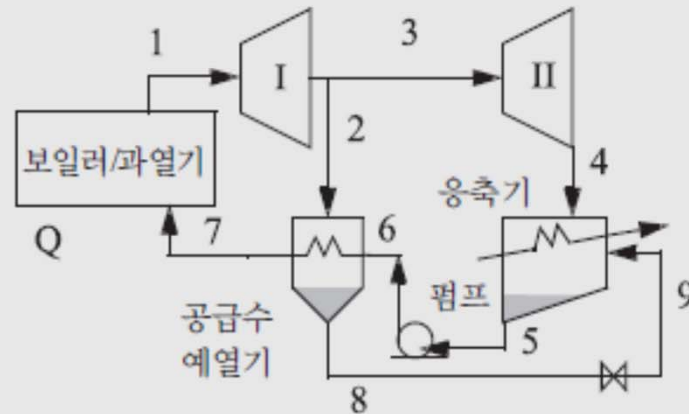


그림 5.7 • 예제 5.3을 위한 재생 Rankine 순환공정

5.4 냉동

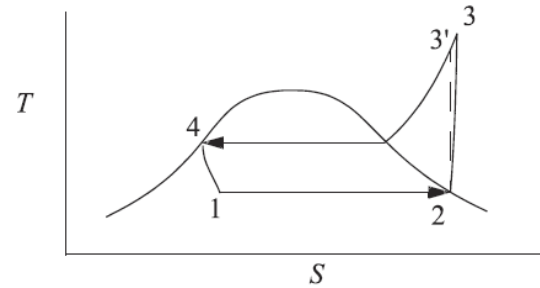
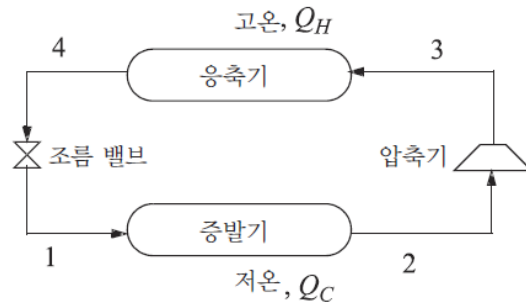
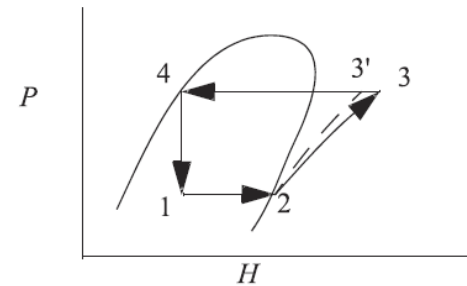


그림 5.8 • OVC 냉동 사이클 공정 개요도와 T-S 선도

그림 5.9 • 보다 일반적으로 사용되는 P-H선도상에서 도식된 OVC 냉동 사이클. 상태 번호는 그림 5.8을 참조



$$COP = Q_C / W_{S,net}, Q_C = (H_2 - H_1)$$

$$\text{에너지 수지식: } W_{S,net} = \Delta H_{2 \rightarrow 3} = (H_3 - H_2)$$

$$\Rightarrow COP = (H_2 - H_1) / (H_3 - H_2) = (H_2 - H_4) / (H_3 - H_2)$$

냉매선택에서 고려할 사항

1. 환경적 영향(프레온 R-12는 오존을 고갈시키기 때문에 더 이상 사용할 수 없으며, 프레온 R-22 역시 점차 사라지고 있다.)HFO1234yf가 R134a를 대체하기 시작했다.
2. 증기압 $\sim T_{evap}$ 에서 대기압. 결과적으로 냉매 유출에 대한 구동력이 손실이 작아지겠지만, 공기가 사이클에 유입되는 것을 방지하기 위해서 대기압보다 약간 높은 증발기의 압력이 바람직하다.
3. 증기압이 $\sim T_H$ 에서 지나치게 높지 않아 조작압력이 너무 높지 않도록 한다.
4. 단위 질량당 높은 증발열
5. 압축기의 온도상승과 일을 최소화할 위;한 증기의 낮은 C_p / C_p 값
6. 증기와 액체에서의 높은 열전달 계수

- 플래시(절약기) 중간냉각

- 압축비(P^{out} / P^{in}) 가 너무 큰 경우
- 절약기에서 배출되는 품질은 \dot{m}_7 / \dot{m}_6

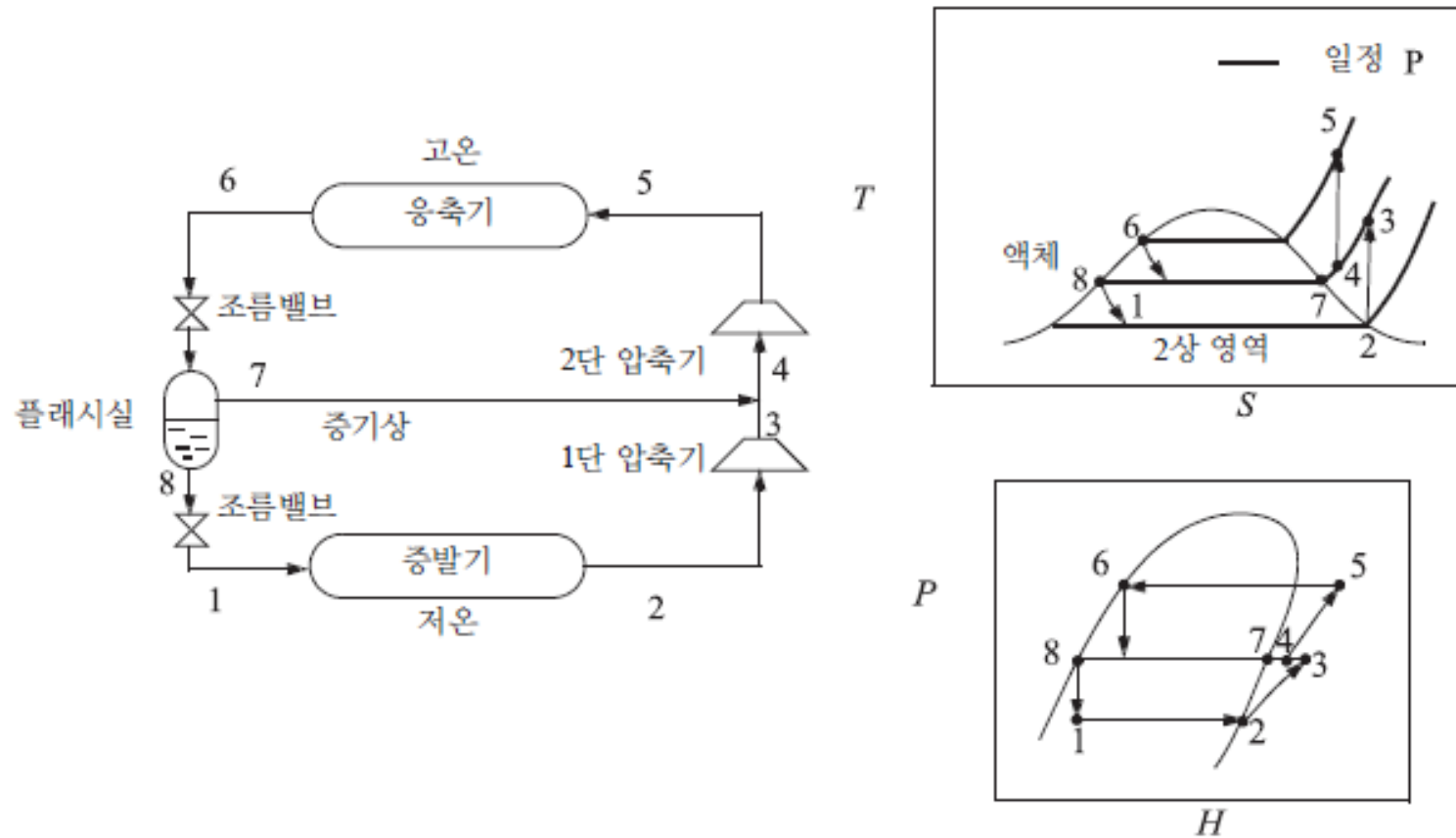


그림 5.10 • 플래시실 단 사이 냉각

- 다단(cascade) 냉동

- 압축비(P^{out} / P^{in}) 가 매우 큰 경우 COP가 감소

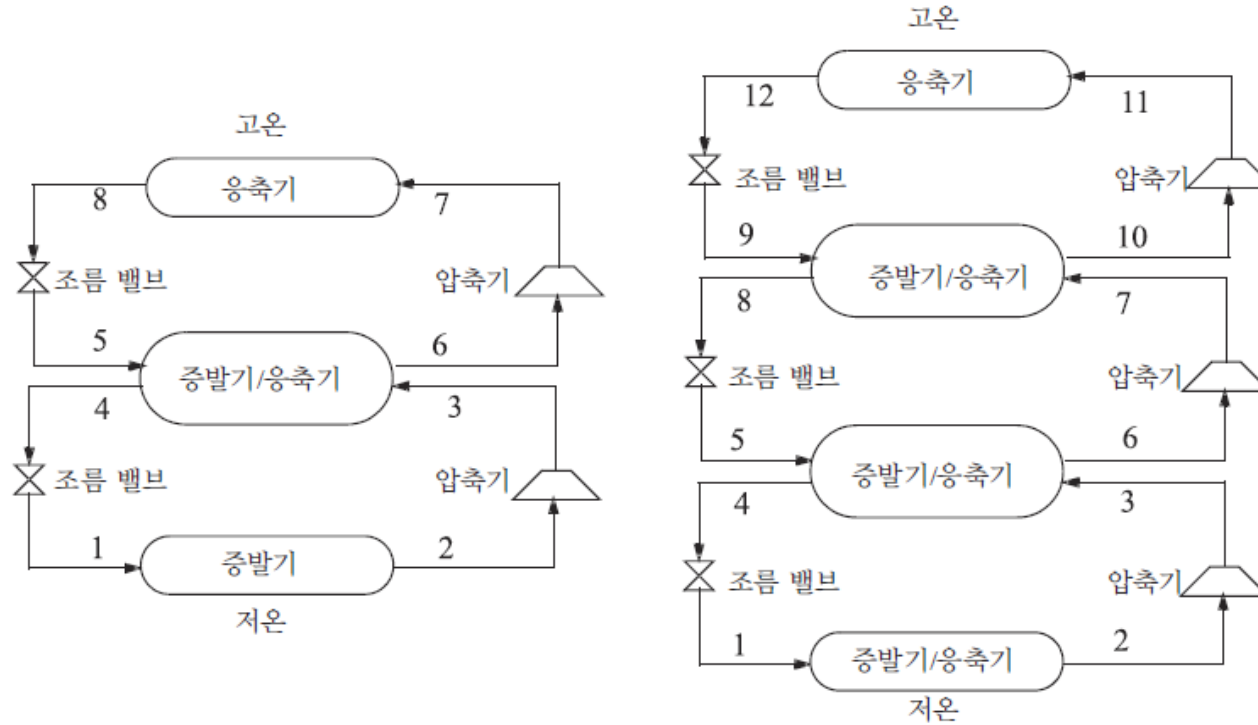


그림 5.11 • 2중 사이클(왼쪽)과 3단 사이클(오른쪽)의 냉동 사이클. 냉매는 증발기/응축기에서 온 혼합 되지 않는다.

5.5 액화

- Linde 액화

- Joule-Thomson 계수 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$ 가 음이 되어 온도가 낮아져 두 상영역으로 이동해야 함

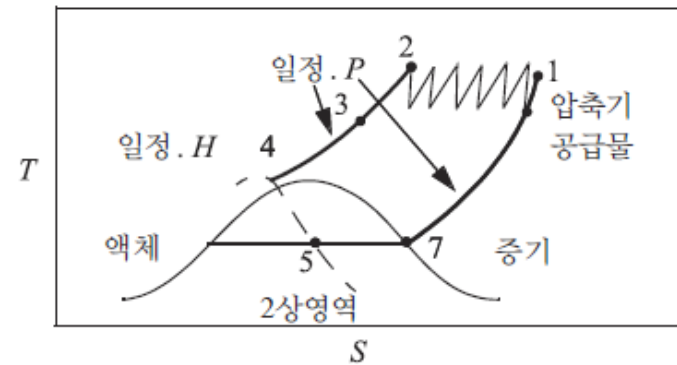
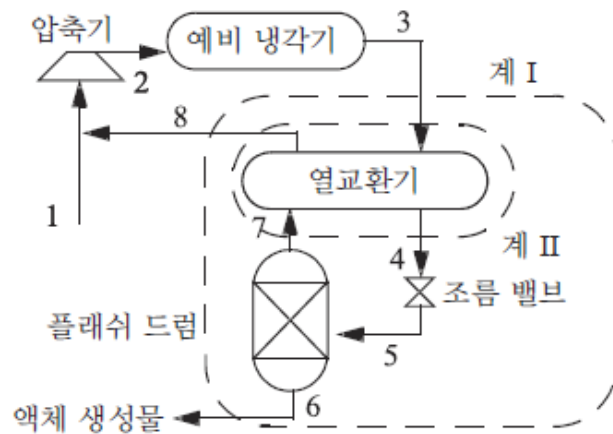


그림 5.12 • Linde 액화과정 개요도. 예제 5.5에서는 왼쪽에 보이는 계의 경계들을 사용한다.

- Claude 액화공정
 - 비가역적 조름공정 대신 팽창기를 사용

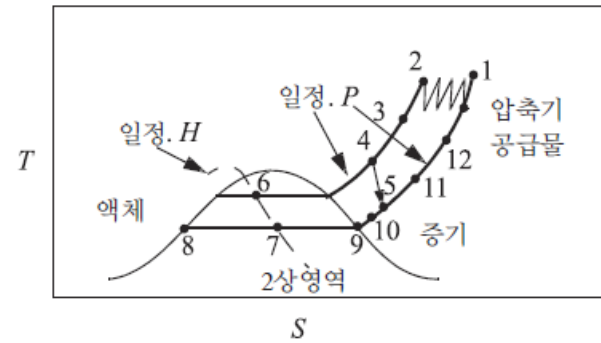
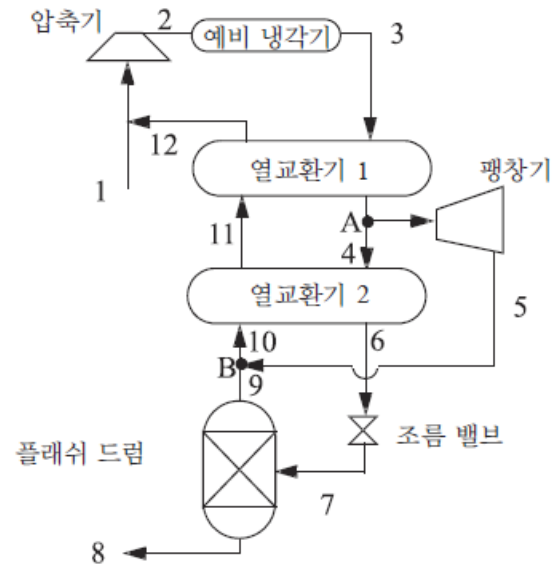


그림 5.13 • Claude 액화공정