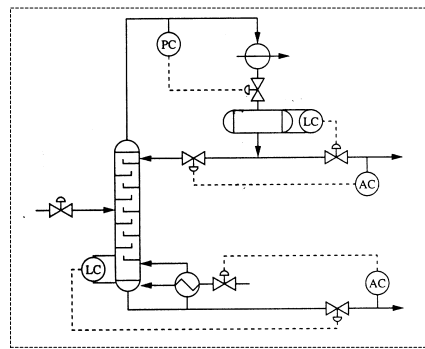


Basic Control System Design For Distillation Columns



Moonyong Lee

Process Automation & Systems Lab.
School of Chem. Eng. Tech.
Yeungnam Univ.

1. 증류탑 제어시스템 일반

- 시스템 설계 순서

(1) 제어목적 설정



(2) 조작변수 및 제어변수 설정, 주요 외란 및 공정 한계치 파악



(3) 제어구조 선정



(4) 센서 종류 및 위치 선정



(5) 주변장치 및 basic loop 상세 설계

- 증류탑 제어목적

(1) 증류탑의 안정운전 (inventory control)

(2) 생산물 규격조건 만족 (quality control)

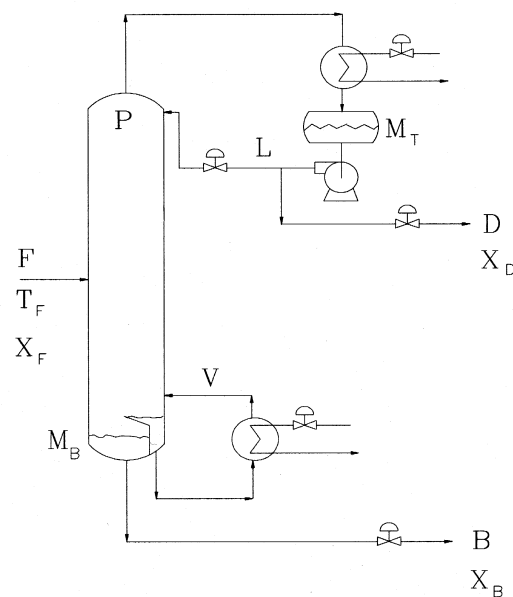
(3) 경제적 운전 (optimizing control)

● 제어관련 운전변수

조작변수 → 환류량, 탑정 생산량, 탑저 생산량, 응축량 조절변수, 재비량 조절변수

제어변수 → 탑 압력(주로 탑정), receiver 액위, 탑저 액위, 탑정 생산물 규격, 탑저 생산물 규격

주요외란 → 원료 유량, 원료 엔탈피, 원료 조성 변동, cooling medium 변동, heating medium 변동



2. One-Point Control 제어구조 선정

- 제어구조 선정

- 가능한 구조 수 $\rightarrow 5!(120)$
- 압력제어에 응축량 조절변수를 우선적으로 배정 $\rightarrow 4!(24)$
- mixed balance scheme 과 energy balance scheme 제외
탑저액위를 탑정생산물이나 환류량으로 제어하는 구조 제외
receiver액위를 탑저생산물이나 재비량으로 제어하는 구조 제외
- 최종 구조 $\rightarrow (5, 10, 11, 12)$

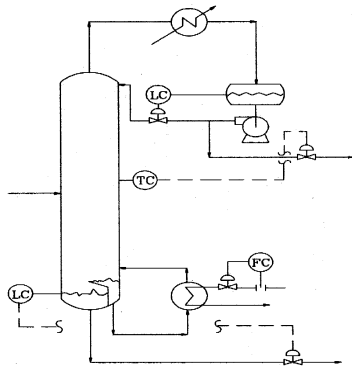
- 구조 선정 Rules

- (1) 제어변수와 조작변수는 가깝도록
- (2) 양이 작은 쪽의 생산물을 조성제어에
- (3) energy 보다 material scheme 을,
indirect 보다 direct scheme을 조성제어에
- (4) 액위는 유량이 큰 stream 을 우선적으로

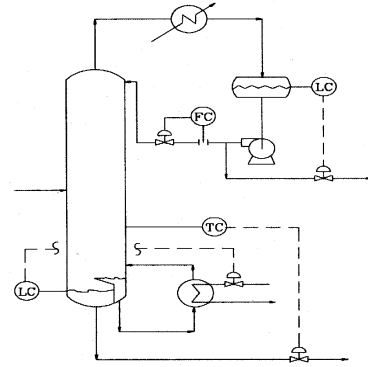
● 증류탑 제어구조 분류 (One-Point Control 기준)

구조 번호	receiver 액위 조작변수	탑저 액위 조작변수	생산물 조성 조작변수	자유 조작변수	구조 분류
1	L (환류량)	D (탑정생산물)	V (재비량)	B (탑저생산물)	energy bal.
2	L (환류량)	D (탑정생산물)	B (탑저생산물)	V (재비량)	direct mat
3	L (환류량)	V (재비량)	D (탑정생산물)	B (탑저생산물)	mixed bal.
4	L (환류량)	V (재비량)	B (탑저생산물)	D (탑정생산물)	mixed bal.
5	L (환류량)	B (탑저생산물)	D (탑정생산물)	V (재비량)	direct mat
6	L (환류량)	B (탑저생산물)	V (재비량)	D (탑정생산물)	energy bal.
7	D (탑정생산물)	L (환류량)	B (탑저생산물)	V (재비량)	direct mat
8	D (탑정생산물)	L (환류량)	V (재비량)	B (탑저생산물)	energy bal.
9	D (탑정생산물)	V (재비량)	L (환류량)	B (탑저생산물)	energy bal.
10	D (탑정생산물)	V (재비량)	B (탑저생산물)	L (환류량)	direct mat
11	D (탑정생산물)	B (탑저생산물)	V (재비량)	L (환류량)	indirect mat
12	D (탑정생산물)	B (탑저생산물)	L (환류량)	V (재비량)	indirect mat
13	V (재비량)	D (탑정생산물)	L (환류량)	B (탑저생산물)	energy bal.
14	V (재비량)	D (탑정생산물)	B (탑저생산물)	L (환류량)	direct mat
15	V (재비량)	L (환류량)	B (탑저생산물)	D (탑정생산물)	mixed bal.
16	V (재비량)	B (탑저생산물)	D (탑정생산물)	B (탑저생산물)	mixed bal.
17	V (재비량)	B (탑저생산물)	D (탑정생산물)	L (환류량)	direct mat
18	V (재비량)	B (탑저생산물)	L (환류량)	D (탑정생산물)	energy bal.
19	B (탑저생산물)	D (탑정생산물)	L (환류량)	V (재비량)	indirect mat
20	B (탑저생산물)	D (탑정생산물)	V (재비량)	L (환류량)	indirect mat
21	B (탑저생산물)	L (환류량)	D (탑정생산물)	V (재비량)	direct mat
22	B (탑저생산물)	L (환류량)	V (재비량)	D (탑정생산물)	energy bal.
23	B (탑저생산물)	V (재비량)	L (환류량)	D (탑정생산물)	energy bal.
24	B (탑저생산물)	V (재비량)	D (탑정생산물)	L (환류량)	direct mat

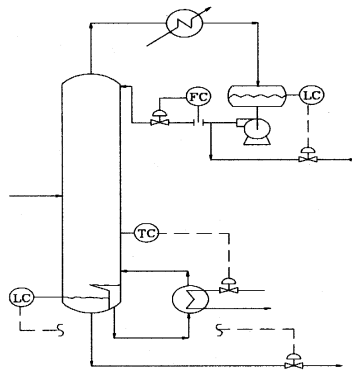
• One-Point Control의 대표적 제어구조



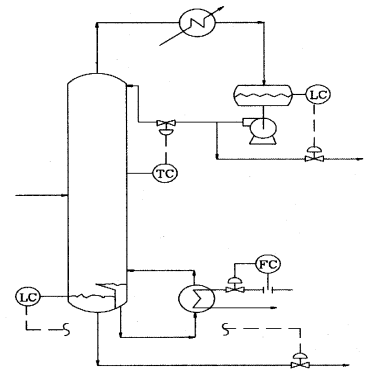
Structure 5



Structure 10



Structure 11



Structure 12

• 기타 고려사항 및 특성

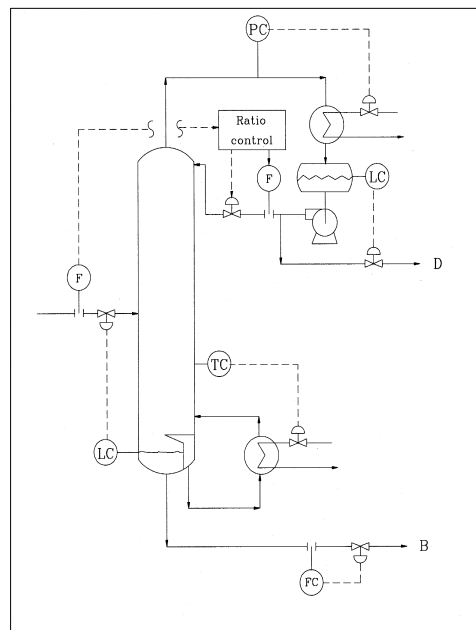
- (1) direct scheme의 경우 액위제어는 tight 하게
- (2) 재비량으로 탑저액위제어 지양 (액위 역응답)
- (3) 탑 내 vapor 전파속도는 liquid 보다 수십배 빠름
- (4) 응축이나 비등이 일어나는 액위는 측정잡음과 제어 변동폭 큼
- (5) 구조 (5) 는 cooling medium 변동에 강건, 구조 (10),(11) 취약
구조 (10) 는 heating medium 변동에 강건, 구조 (5),(12) 취약

● 대표적 one-point control 제어구조의 특성

구조 No.	5	10	11	12
탑정제품/rectifying section 에 대한 quality control 이 중요할때	○	×	×	○
탑저제품/stripping section 에 대한 quality control 이 중요할때	×	○	○	×
탑정 생산물 유량이 탑저 생산물 유량보다 작을때	○	×	×	○
탑정 생산물 유량이 탑저 생산물 유량보다 클때	×	○	○	×
환류비가 작을때, i.e. $L/D < 5$	×	○	○	△
환류비가 클때, i.e. $L/D > 5$	○	×	×	×
탑저 생산물 유량의 smoothness	×	○	×	×
탑정 생산물 유량의 smoothness	○	×	×	×
heating medium 변동에의 강건성	×	○	△	×
cooling medium 변동에의 강건성	○	×	×	△
탑저 액위 역응답 존재시의 강건성	○	×	○	○
대형 증류탑에서의 응답속도성	×	△	○	×

● 예외 사례

- (1) 구조 (7) → 환류량은 충분하나 탑저 생산물양이 매우 작고 탑저에서의 액위 역응답이 심했던 경우에 적용
- (2) 구조 (17) → 탑정 생산물양이 매우 작고 heating medium 변동이 심했던 경우
- (3) 구조 (6) → 환류비가 매우 크고 탑정 생산물이 규격제어도 못할 만큼 작았던 super-fractionator 에 적용
- (4) 구조 (4) → 증류탑이 매우 커서 환류량에 대한 조성변화 반응속도가 너무 느렸던 C₃-splitter 에 적용
- (5) 구조 (11) → 탑저 생산물이 매우 작은 반면 일정유지가 필수적이고 탑저 surge volume 이 매우 작은 경우 구조 (11) 을 아래 그림과 같이 변형하여 적용



3. Two-Point Control 제어구조 선정

- Two-point control 목적

(1) overpurification 에 의한 energy 소비 억제

(2) valuable product 의 손실 최소화

- 구조 선정시 고려사항

(0) One-point control 시의 선정기준 +

(1) 주요외란에 대한 구조적 제거성능

(2) 각 조성제어기 간의 상호간섭작용 정도

(3) manual 전환 시의 운전 안정성

→ (D,B), (D,V), (L,B), (L,V) 구조가 최종적으로 남게됨.

● 대표적 two-point control 제어구조의 특성

구 조	장 단점	적용 조건 및 예
(D,V)	boil-up 이나 cooling medium 변동에 강건 D manual 전환 곤란	환류량이 탑정생산물보다 커야함 탑저가 탑정보다 고순도이어야 함 benzene-toluene column
(L,V)	boil-up 이나 cooling medium 변동에 민감 manual 전환시 운전 안정성 좋음 간섭작용이 상대적으로 큼	환류량이 탑정생산물보다 작아야 함,
(L/D,V/B)	boil-up 이나 cooling medium 변동에 강건 manual 전환시 운전 안정성 좋음 계장이 많이들고 계장 고장에 민감	액위제어를 tight하게 해주어야 함 superfractionator, C3-splitter,..
(L/D,V)	(L,V) 와 (L/D,V/B) 의 중간	
(D,B)	D 와 B 중 어느것도 manual 전환 곤란 override control 보완 필요	환류량이 탑정생산물보다 매우 크 고, 고순도이며 내부유량이 매우 큰 superfractionator C3-splitter

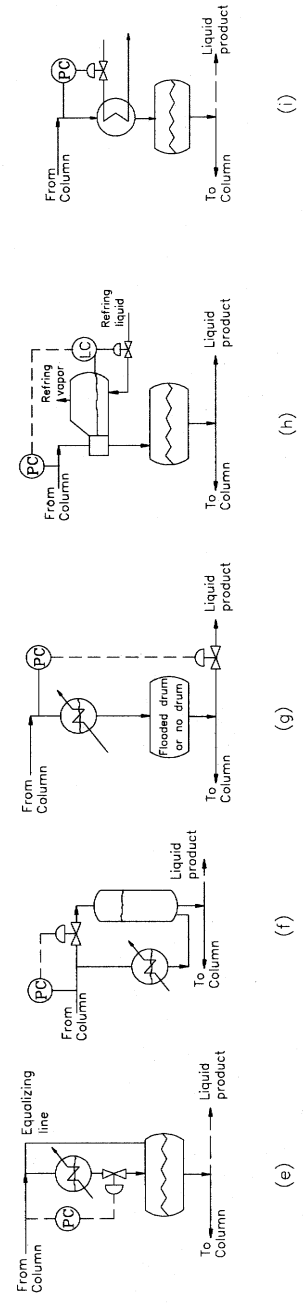
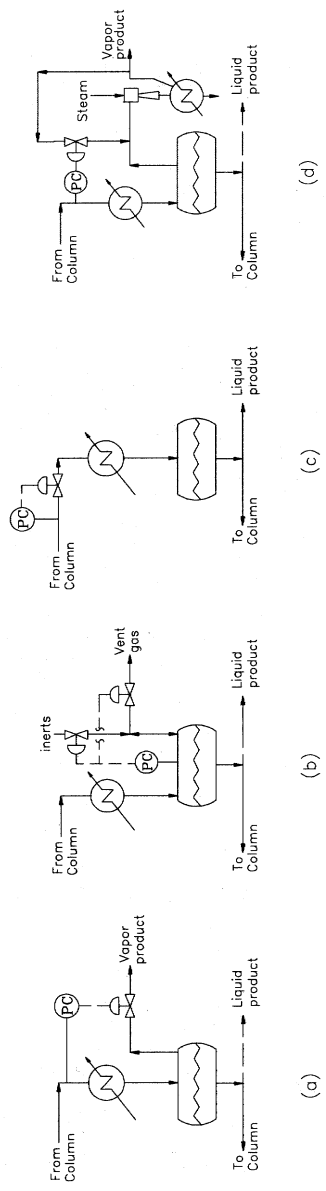
4. 주요장치 및 Basic Loop 제어방법

- 제어구조 선정이 끝난 후 각 장치와 basic loop 들의 특성을 고려하여 상세 설계를 수행함.
- 주요 basic loop → 압력, 액위, 조성 loop
주요 주변장치 → 응축기, 재비기

4-1. 압력제어

- **원리 및 대표유형**
 - 압력은 재비기에 의해 생성되고 응축이나 venting 에 의해 소멸
 - 압력제어에 사용되는 대표적인 방법
 - (1) 탑정 vapor venting 량, inert gas 주입량 조절
 - (2) 응축기 유효 열전달 면적 조절
 - (3) cooling medium 조절

→ **탑정** vapor 특성과 응축기 시스템에 따라 선택
 - total condensor 경우 (2), partial condensor 경우 (1) 적용
- **대표적 압력제어방법**



● 대표적 압력제어방법

구조	원리	특성
a	1	partial condenser에 적용, 가장 간단하고 직접적임, 반응성 좋고 빠름 가장 많이 적용되는 구조임.
b	1	inert gas 포함시 적용, 주입 gas 에 의한 생산물 오염 소지 없어야 함 주입 gas 손실로 인한 비용. 반응성 좋음.
c	1	반응성은 좋으나 valve size 가 커지고, energy 효율이 낮고, condenser 크기가 증가하며. head 손실이 큰 이유로 거의 적용 안함.
d	1	감압 증류탑에 적용, spillback 대신 inert gas 양으로 조절하기도 함 반응성 좋음.
e	2	total condenser에 적용, 간단하고 선형성 좋음, 작은 valve size, 탑정과 receiver 간의 압력을 동일하게 된다는 장점있음., head를 최대로 하기위해 valve 위치를 receiver 에 되도록 가깝게 설치해야하고 equalizing line에서 압력차가 언드로 해야함
f	2	total condenser에 적용, 간단하고 반응성 좋음, 작은 valve size, 응축기의 지상설치가 가능하여 복수 응축기 경우에 많이 적용됨. 액위간섭현상, 역응답 가능성, 운전이 어려운 단점이 있음. bypass line piping이 중요하고 receiver의 단열이 필수적이며 valve 의 shut-off 특성이 높은 것이 좋아함
g	2	flooded total condenser에 적용, 반응성 좋음, 작은 valve size, 탑정제품 유량변동에 의한 하부공정 불안정화 소지가 있음.
h	2	cooling medium 기화열을 이용하는 total condenser에 적용 반응성 느림, cooling medium vapor 출구 유량으로 탑의 압력을 조절하고 입구 유량으로 응축기 shell-side 액위를 조절하는 구조로 개선하여 사용하기도 함
i	3	반응성이 느리고 비선형적임, coolant 유량이 작게 유지될때 fouling, boiling 혹은 freezing 소지가 크므로 override control 이나 splitt range control 등의 추가보완이 필요함. coolant 유량을 최대로 유지하기 위해 pump를 추가하여 coolant를 recycle 시키기도 함. 특수한 경우로 제외하고 거의 적용안함

4-2. 액위제어

- 제어특성

- 심한 측정잡음
- 작은 residence time (탑저)
- 불안정한 head (thermosiphon reboiler)
- 역응답 (valve tray, natural circulation type reboiler)
- tight control v.s. averaging control

4-3 조성제어

- **간접측정 v.s. 직접측정**

- **간접측정 방법**

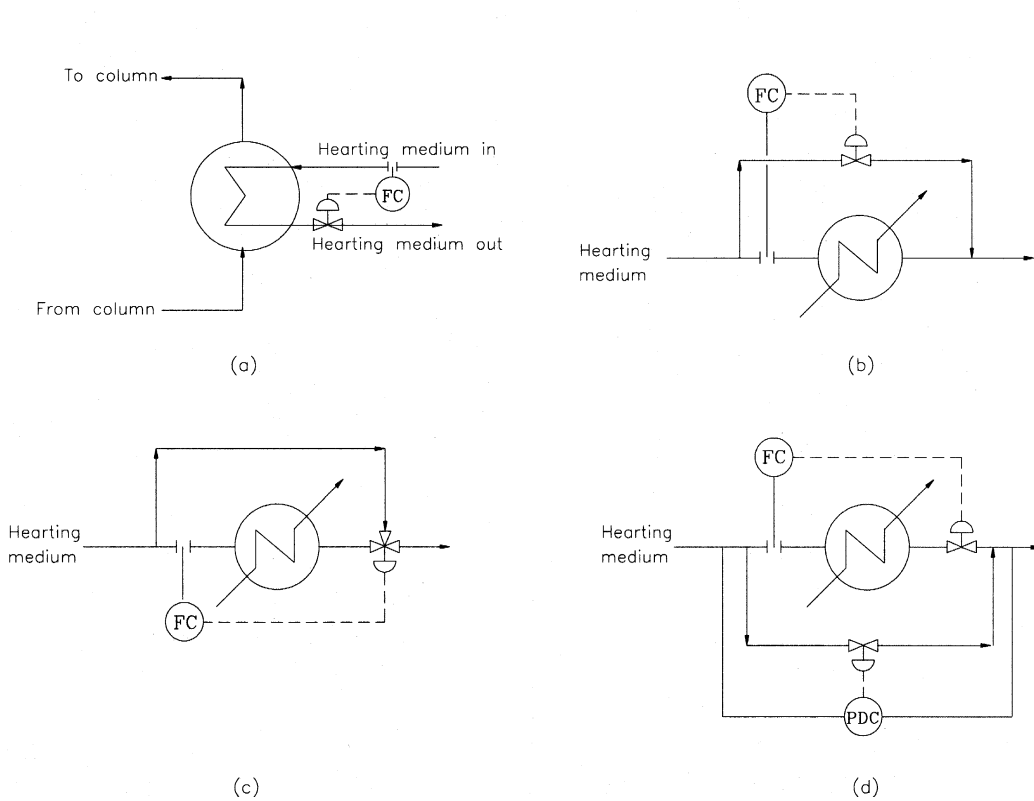
- Multiple Temperature v.s. Single Temperature
- **Optimal Sensor Location :**
 - (1) 연관성 정도, (2) 추정 민감도, (3) 동적 반응성
- 다성분계 증류탑의 경우 non-key component에 대한 보상 필요
- 감압증류탑과 압력변화가 잦은 증류탑의 경우 압력 보상 필요
- ΔT , Double ΔT , Average T 방법 → 압력 자동보상
추정 민감도 개선
- Advanced Soft Sensor Technology → 정교한 조성 추정
- 응축기에서의 외란 보상 → 내부환류량 추정 제어

$$L_{\text{internal}} = L_{\text{external}} [(1 + (C_p / \Delta H_{\text{vap}})(T_{\text{top}} - T_{\text{reflux}})]$$

4-4. 재비기 제어 방법

- (1) 잠열이용 (2) 비열이용 (3) 연소열 이용 → 제어방식 달라짐

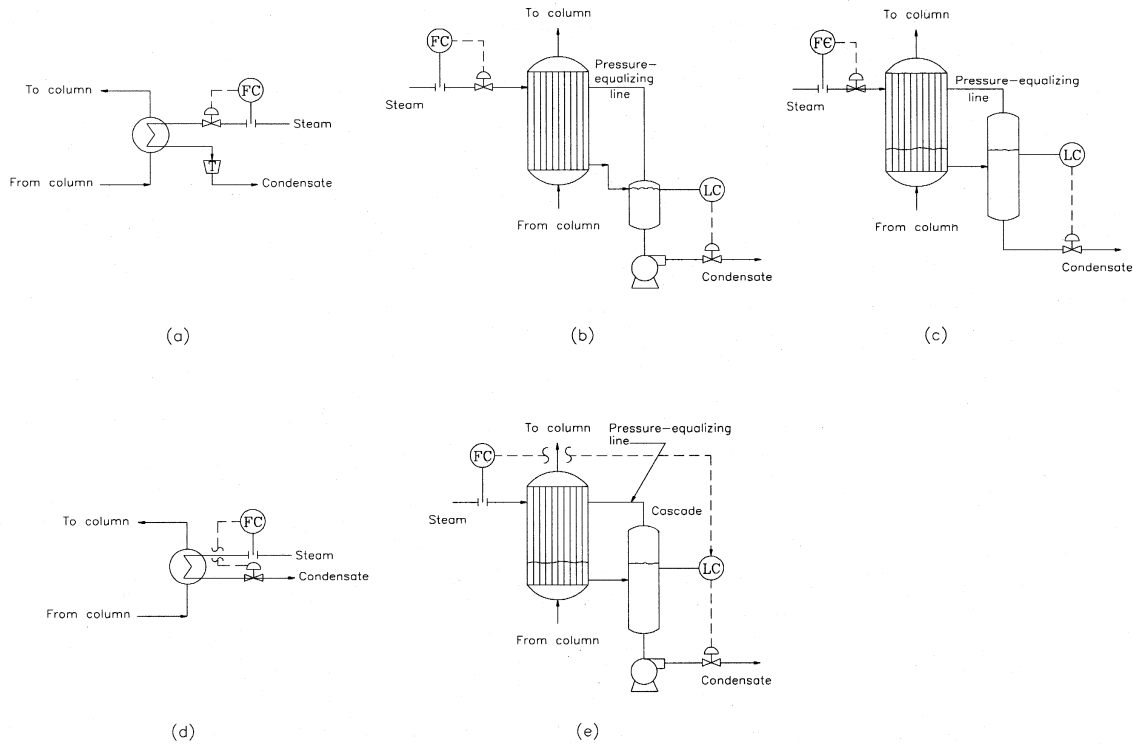
● 비열이용 재비기의 대표적 제어방법



● **잠열이용 방법의 대표유형**

- (1) heating medium 양 조절에 의한 응축온도 변화
- (2) 응축 액위 조절에 의한 유효 열전달 면적 변화
- (3) 다른 stream 비열 이용

● **잠열이용 재비기의 대표적 제어방법**



● 잠열이용 재비기의 제어방법 특성

구조	a, b, c	d, e
원리	스팀유량조절 → 응축압력 변화 → 응축온도 변화 → 열전달량 변화	응축액위조절 → 유효 열전달 면적변화 → 열전달량 변화
특성	<ul style="list-style-type: none"> - 반응이 빠르고 직접적임. - 큰 valve size 요구 되므로 비용이 증가되며 작은 재비기에 적합함. - 스팀 header 쪽 변동에 강건하여 steam reboiler 에 적합함. - 재비기 관측온도를 최소화할 수 있어 fouling, thermal stress가 감소됨. - (a) 구조는 steam trap plugging 과 sticking 소지가 크며 (b) 와 (c) 구조를 적용, 개선할 수 있음. - low flow operation 시의 과도한 압력 강하 나 스팀과 condensate head 간의 압력차가 적을 경우도 (b) 나 (c) 구조를 적용, 개선할 수 있음. - (b) 구조는 특히 fouling 억제를 위 해 관측온도를 최소화해야 할때나 액위면에서의 corrosion이 심할때 효과적임. - (c) 구조는 액위조절에 의해 재비기 압력의 광범위한 조절이 가능함. 	<ul style="list-style-type: none"> - 반응이 느리고 간접적임 - valve size 가 작아 비용이 감소 하고 큰 재비기에 적합함. - 보다 높은 압력에서 운전가능하여 refrigerated reboiler 에 적합함. - thermosiphon 재비기의 경우는 재비기와 탑저 액위간의 간섭현상 소지가 큼 - 응축액위 면에서의 corrosion 경향이 큰 경우는 곤란함. - (d) 구조에서 재비기와 condensate head 간의 압력차가 불충분 한 경우는 (e) 방법을 적용하거나 혹은 drum을 설치하고 override control을 적용하여 개선.