

Chap. 11 유체 내 열흐름 원리 (Principles of Heat Flow in Fluids)

* 전달되는 열의 종류

- 잠열(latent heat): 상변화를 수반하는 열

예) 기체의 응축 또는 액체의 증발

- 현열(sensible heat): 상변화 없이 유체의 온도 변화만 유발하는 열

예) 열교환기에서 찬 유체의 가열, 냉각수를 통한 수증기의 응축,
수증기를 활용한 용액의 증발

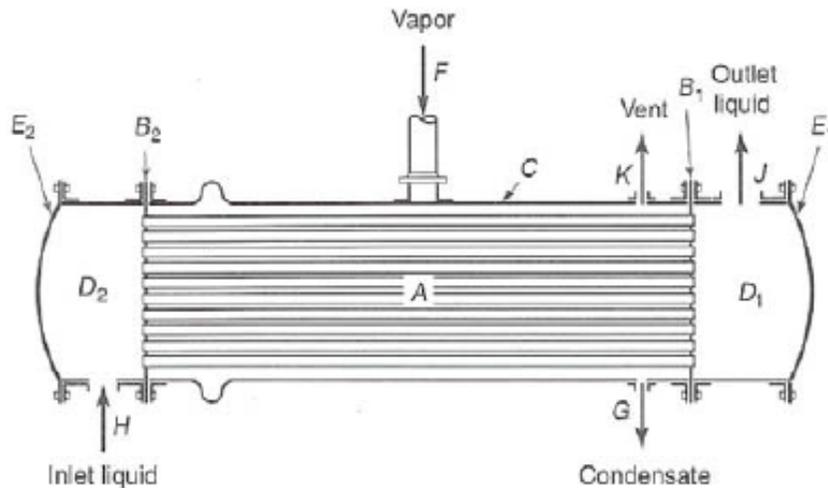
* 열전달 장치

- 형태: 뜨거운 유체와 차가운 유체가 고체 벽으로 분리된 경우

- 열전달의 메커니즘: 대류와 전도에 의해 전달됨

11.1 전형적인 열교환 장치 (heat exchange equipment)

* 관형 응축기 (tubular condenser)



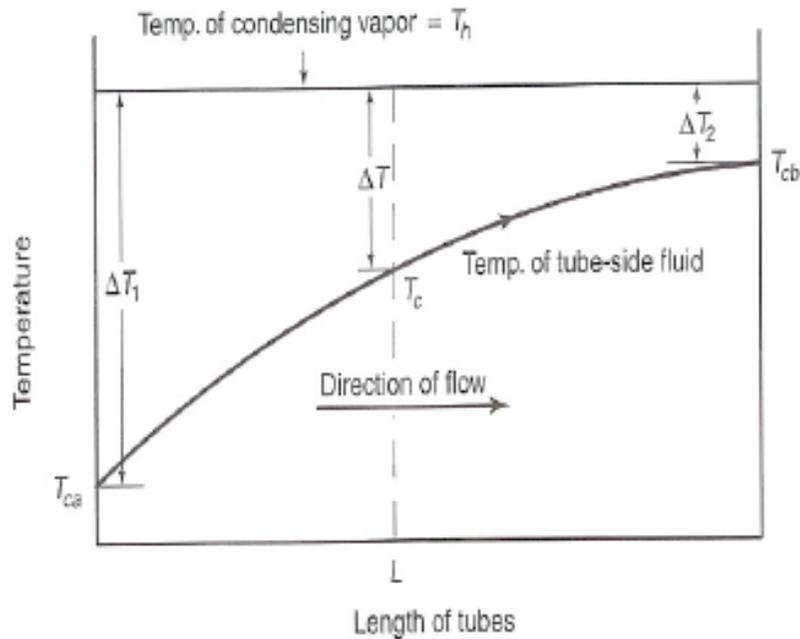
- A: 평행관의 다발
- B₁, B₂: 관다발을 연결하는 관판(tube sheet)
- C: 관다발을 포함하는 원통형 동체
- D₁, D₂: 양끝의 관로(channel)
- E₁, E₂: 관덮개
- F: 수증기가 공급되는 노즐(nozzle) → 관둘레의 동체 측(shell side) 공간으로 유입
- G: 액체 흐름만 허용하고 증기의 흐름을 차단하는 트랩(trap)
- H: 가열될 유체의 유입구
- J: 가열된 유체의 유출구

- 관형 응축기의 원리: 수증기의 열이 관벽을 통해 차가운 유체로 전달되어 응축되는 것

11.1 전형적인 열교환 장치

* 관형 응축기의 온도 분포

- 응축기의 동체측 온도: 아래의 전제 하에서 일정한 온도를 유지
 1. 노즐을 통해 공급되는 수증기가 단일 성분
 2. 증기가 과열되지 않음
 3. 응축액이 응축 온도 이하로 과냉각(subcool)되지 않음
- 관 내 유체의 온도: 관을 통과하면서 연속적으로 증가됨

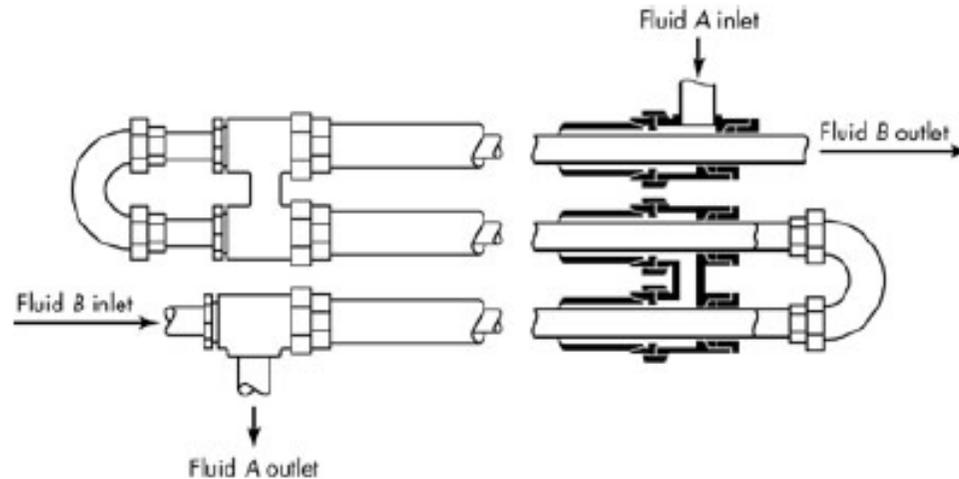


(응축기의 온도-길이 곡선)

- T_{ca} , T_{cb} : 입구와 출구에서 유체의 온도
- T_h : 증기의 일정 온도
- T_c : 관 내 임의의 길이 L에서 유체의 온도
- $T_h - T_c$: 국부 온도차 (local temperature difference) → ΔT 로 표시
- ΔT_1 , ΔT_2 : 종단 국부 온도차 → 접근 단 (approach)라 정의
- $T_{cb} - T_{ca}$: 유체의 온도차 → 온도 범위, 범위라 정의 (temperature range, range)

11.1 전형적인 열교환 장치

* 2중관 교환기 (double pipe exchanger)



-구성

1. 표준 금속관
2. 리턴 밴드(return band)
3. 리턴 헤드(return head)
4. 스템핑 박스(stuffing box): 리턴 밴드와 리턴 헤드를 고정

- 작동: 금속관의 내관을 통해 한 유체가 흐름 → 외관과 내관 사이의 환형 공간(annular space)을 통해 흐르는 제 2 유체와 관벽을 사이에 두고 열교환이 이루어짐

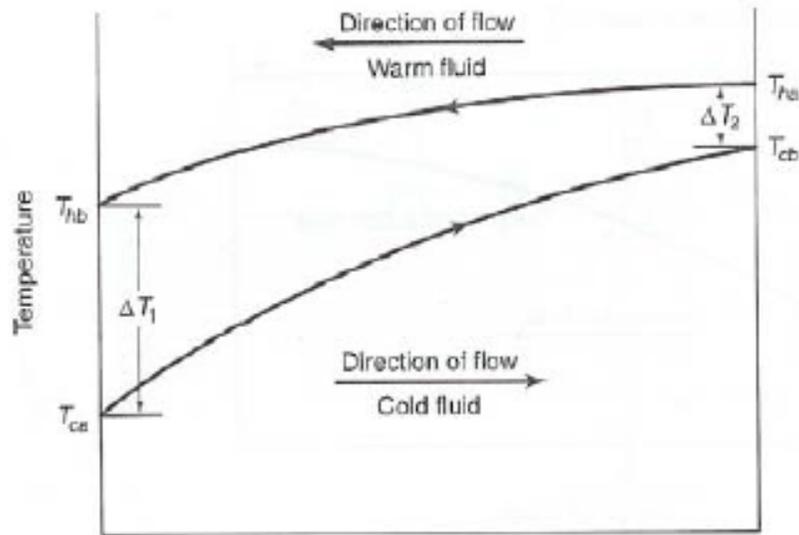
- 이중관 열교환기의 전형적인 규격: 내관 1.25 in, 외관 2.5 in (IPS 규격)

- 이중관 열교환기의 표면적

1. 보통 100 – 150 ft²
2. 다관 원통형 교환기(shell and tube exchanger): 수천 ft²

11.1 전형적인 열교환 장치

* 2중관 교환기의 향류 및 병류 흐름

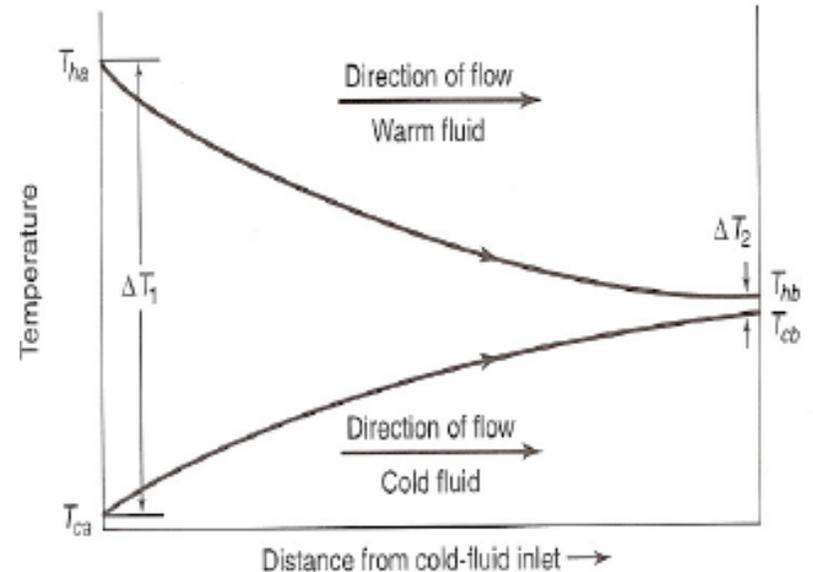


- 향류 흐름(counter-current flow)

$$\Delta T_1 = T_{hb} - T_{ca} \sim \text{접근단}$$

$$\Delta T_2 = T_{ha} - T_{cb}$$

$$\frac{T_{ha} - T_{hb}}{T_{cb} - T_{ca}} \sim \text{온도 범위}$$



- 병행류 흐름(parallel-current flow)

$$\Delta T_1 = T_{ha} - T_{ca} \sim \text{접근단}$$

$$\Delta T_2 = T_{hb} - T_{cb}$$

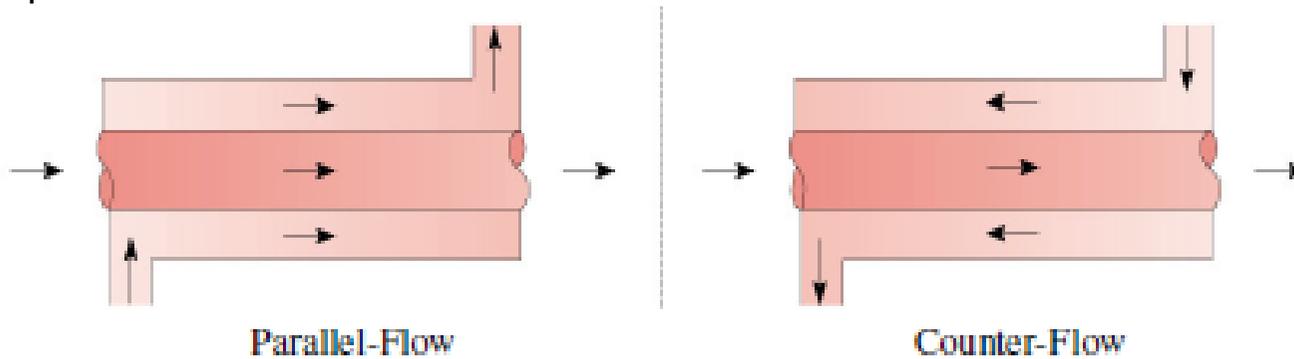
$$\frac{T_{ha} - T_{hb}}{T_{cb} - T_{ca}} \sim \text{온도 범위}$$

- 병행류의 특징

1. 단일 통과 교환기에서 거의 사용하지 않음: 두 유체의 유출 온도가 근사적으로 접근하기 힘들, 열교환 양이 향류에 비해 적음
2. 갑자기 온도 변화를 주어야 하는 경우에 사용
: 화학 반응기에서 뜨거운 유체의 급랭에 사용하는 경우가 있음

11.1 전형적인 열교환 장치

* 2중관 교환기

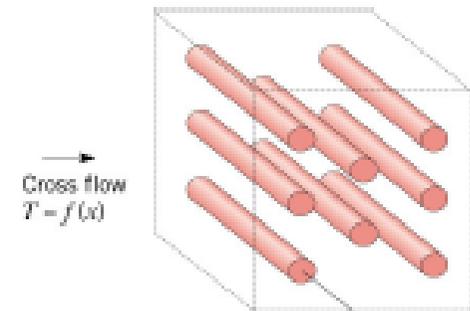


- 향류 흐름(countercurrent flow)

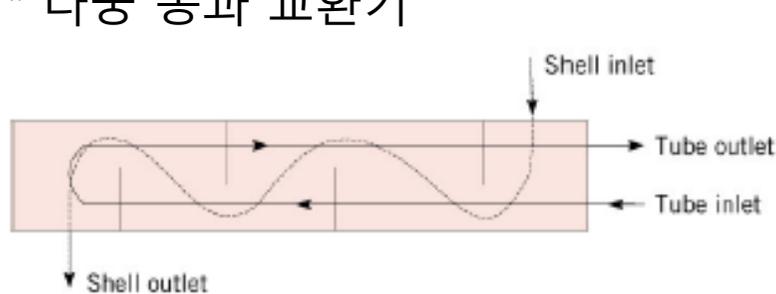
- 병행류 흐름(parallel-current flow)

* 교차 흐름(cross flow)

- 한 유체가 관다발에 직각으로 흐르는 경우를 지칭
- 예: 자동차 방열기, 가정용 냉동기 내 응축기 등

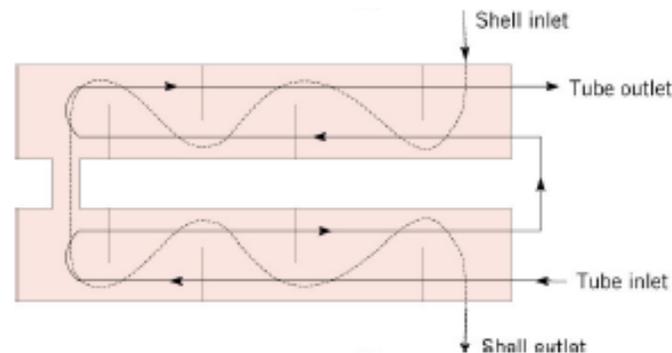


* 다중 통과 교환기



1-2 교환기

One Shell Pass,
Two Tube Passes



2-4 교환기

Two Shell Passes,
Four Tube Passes

11.2 에너지 수지(energy balance)

* 전제 조건

- 대부분의 열저달 장치는 정상 상태(steady state)에서 동작됨
- 비정상 상태 열전달의 예: 탱크 내 액체의 가열

* 열교환기 내 에너지 수지

- 축일(shaft work), 운동 에너지, 위치 에너지, 기계적 에너지 등의 변화량이 다른 항에 비해 무시할 수준으로 적음

$$\Delta H + \frac{\Delta u^2}{2} + g\Delta z = Q - W_s$$

~~운동E~~
~~위치E~~
~~축일~~

→ $\dot{m}(H_b - H_a) = q$

- $Q = Q/t$: 단위 시간 당 전달된 열량
- H_a, H_b : 유입, 유출되는 유체의 단위 질량 당 엔탈피

$$\dot{m}_h(H_{hb} - H_{ha}) = q_h < 0$$

(뜨거운 유체의 에너지 수지: 열을 잃음)

$$\dot{m}_c(H_{cb} - H_{ca}) = q_c$$

(차가운 유체의 에너지 수지: 열을 얻음)

(정상 상태, 적당한 절연에 의해 주변 공기로의 열전달이 무시되는 경우)

$$q_c = -q_h$$

$$\dot{m}_h(H_{ha} - H_{hb}) = \dot{m}_c(H_{cb} - H_{ca}) = q$$

(현열만 전달되며, 유체의 열용량이 일정한 경우)

$$\dot{m}_h C_{ph}(T_{ha} - T_{hb}) = \dot{m}_c C_{pc}(T_{cb} - T_{ca}) = q$$

11.2 에너지 수지(energy balance)

* 전응축기(total condenser) 내 엔탈피 수지

- 응축기에서는 뜨거운 유체의 상변화가 수반되고, 차가운 유체의 온도 변화가 야기되므로 에너지 수지는 다음과 같다.

$$\dot{m}_h \lambda = \dot{m}_c C_{pc} (T_{cb} - T_{ca}) = q$$

- λ : 증기의 증발 잠열

- 응축액이 증기의 응축 온도 T_h 보다 저온인 T_{hb} 의 온도로 유입될 때

→ (증기의 온도 변화를 위한 현열 + 증기의 응축을 위한 잠열) = q

$$\dot{m}_h [\lambda + C_{ph} (T_h - T_{hb})] = \dot{m}_c C_{pc} (T_{cb} - T_{ca}) = q$$

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 열 플럭스

- 단위 시간 당 단위 면적당 전달되는 열의 양(W/m^2 , Btu/hft^2)으로 정의됨
- 관의 외부 또는 내부 면적의 기준에 따라 열 플럭스의 값이 변할 수 있으므로, 선정의 명확한 기준이 중요함



→ 열 플럭스는 관의 외부, 내부 면적에 따라 다른 값을 보임

* 유체 흐름의 평균 온도

- 유체가 가열 또는 냉각되는 경우 유체 온도는 벽 근처에서 최대 또는 최소가 되며 중심을 향하면서 점차 낮아지거나 높아짐
- 평균 흐름 온도(average stream flow), 혼합 용기 흐름 온도(mixing-cup stream temperature): 어떤 단면을 흐르는 전체 유체 흐름을 모아서 단열적으로 혼합시킨 온도

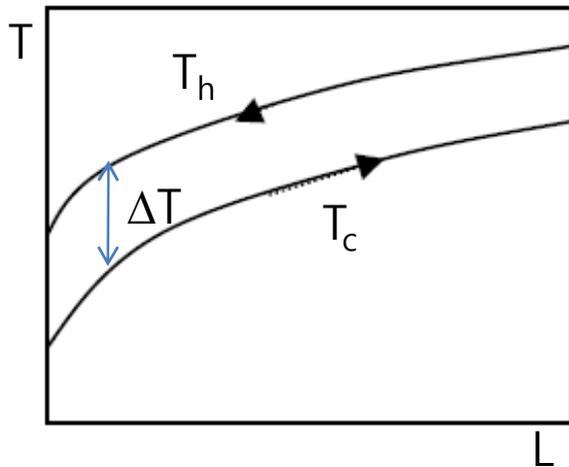
11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 총괄 열전달 계수(overall heat transfer coefficient)

- 전도 열전달의 예: 직렬 고체층을 통과하는 열 플럭스는 총괄 온도차 ΔT 에 비례함

$$\frac{q}{A} = \frac{\Delta T}{R}$$

- 열교환기의 경우: 뜨거운 유체와 찬 유체의 온도 차($\Delta T = T_h - T_c \rightarrow$ 국부 총괄 온도차)에 비례하여 열 플럭스가 전달됨



- 왼쪽 그림과 같이 ΔT 는 관의 길이 L 에 따라 변하므로, 열 플럭스도 함께 변함

\rightarrow 미분식의 표현이 요구됨

$$\frac{dq}{dA} = U\Delta T = U(T_h - T_c)$$

- U : 국부 총괄 열전달 계수(local overall heat transfer coefficient) $\rightarrow dq/dA$ 와 ΔT 사이의 비례 인자

if $A = A_o$ (외부면적), $U = U_o$

if $A = A_i$ (내부면적), $U = U_i$

$$\frac{dq}{dA_o} = U_o \Delta T, \quad \frac{dq}{dA_i} = U_i \Delta T$$

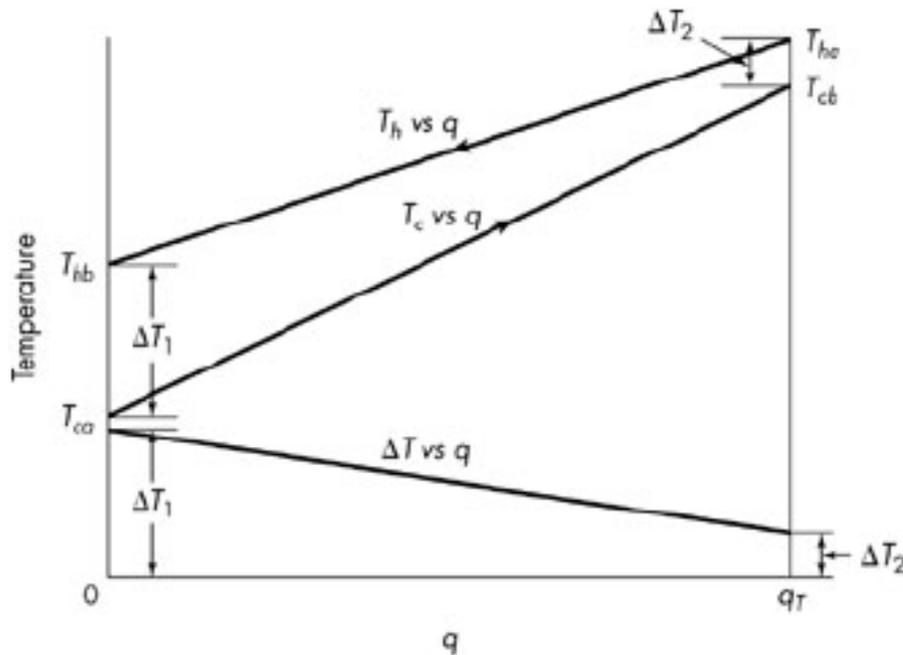
$$dA_o = \pi D_o dL, \quad dA_i = \pi D_i dL$$



$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{dA_i}{dA_o} = \frac{D_i}{D_o}$$

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 전체 표면에 대한 적분: 로그 평균 온도차(LMTD)



- 아래와 같은 가정 하에 왼쪽과 같이 q와 ΔT 가 선형 비례하는 경향이 발생

1. 총괄 계수 U는 일정
2. 뜨거운 유체와 찬 유체의 비열은 일정
3. 대기와의 열교환량은 무시됨
4. 정상 상태 흐름 (질량 유속 일정)

$$q = \dot{m}C_p\Delta T$$

(비열이 일정하고 정상 상태에서 q는 T와 선형 비례 → q는 ΔT와도 선형 비례)

- 선형성에 기인하여 다음과 같이 미분식을 차분식으로 변환할 수 있다.

$$\frac{d(\Delta T)}{dq} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{q_T}$$

- ΔT₁, ΔT₂: 접근단(approach)

- q_T: 전체 교환기 내에서 열전달 속도

$$dq = U\Delta T dA$$

$$\frac{d(\Delta T)}{U\Delta T dA} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{q_T}$$

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T_2} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{U(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{q_T} \int_0^{A_T} dA$$

(B.C.) at ΔT = ΔT₁, A = 0
at ΔT = ΔT₂, A = A_T

$$\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{U(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{q_T} A_T$$

$$q_T = UA_T \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = UA_T \overline{\Delta T_L}$$

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 전체 표면에 대한 적분: 로그 평균 온도차(LMTD)

- 로그 평균 온도차는 다음과 같이 정의됨

$$\overline{\Delta T_L} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

$$q_T = UA_T \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = UA_T \overline{\Delta T_L}$$

1. 열교환기의 성능 예측에 중요한 식
2. 흐름과 온도 접근단이 알려진 새 열교환기의 소요 면적 계산에 중요한 식
3. 측정된 q_T 와 LMTD를 활용하여 총괄 계수 U 를 결정 가능

$$U = \frac{q_T}{A_T \overline{\Delta T_L}}$$

* 가변 총괄 계수

- 총괄 계수가 온도차에 선형 비례하는 경우 총 열전달 속도는 다음과 같음

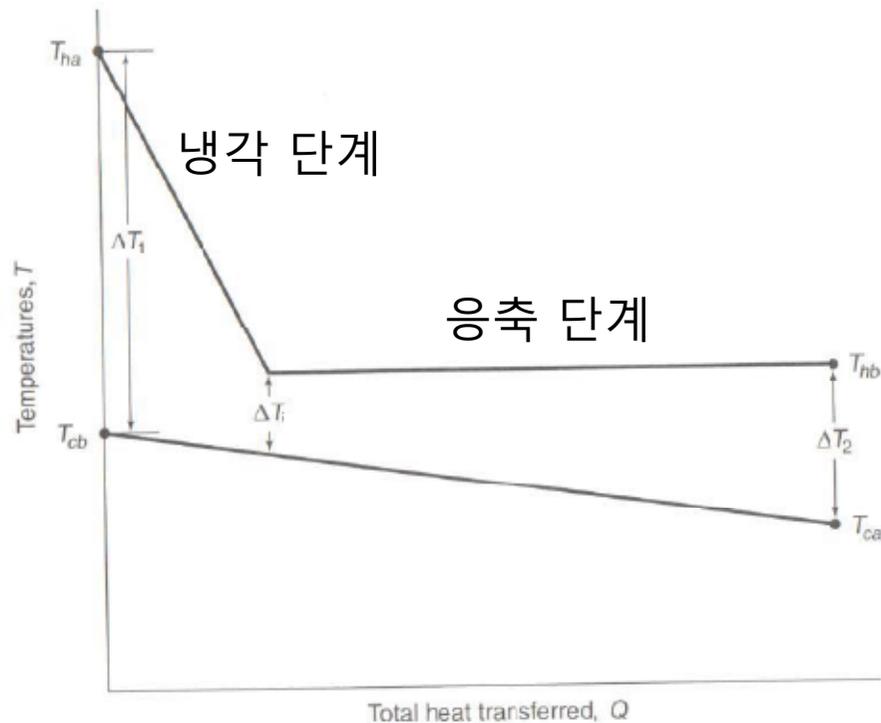
$$q_T = A_T \frac{U_2 \Delta T_1 - U_1 \Delta T_2}{\ln(U_2 \Delta T_1 / U_1 \Delta T_2)}$$

(U_1, U_2 : 교환기 양 끝에서 국부 총괄 계수)

- $U\Delta T$ 의 교차곱에 대한 로그 평균이 사용됨

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

- * LMTD 적용의 한계: 다음의 경우 LMTD 근사를 사용할 수 없음
 - 총괄 계수 U 가 일정하지 않은 경우
 - ΔT 가 q 의 선형 함수가 아닌 경우
- * 과열 수증기를 냉각하고 응축시키는 열교환기의 예
 - 증기가 응축되는 영역에서 ΔT 는 Q 의 선형 함수
 - 열교환기의 응축부에서 ΔT 는 Q 의 다른 선형 함수
 - 냉각부와 응축부를 분리하여 적당한 q , U , LMTD를 사용해야 함

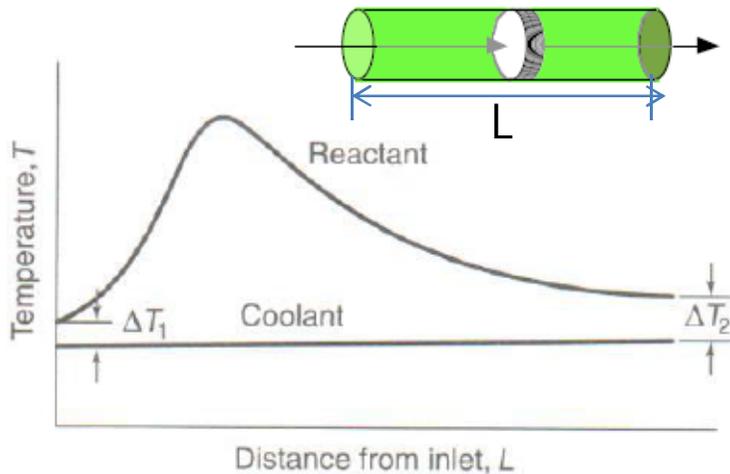


(과열 증기 냉각 및 응축 과정에서의 온도 이력)

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 재킷형 반응기의 예

- 반응기의 유입구 부근에서 반응열에 의해 반응 혼합물의 온도가 급격히 상승
- 반응물의 온도는 반응기 출구 부근에서 급격히 하강
- 반응기 입구와 출구에서 ΔT 는 작은 값이지만, ΔT 의 평균값은 접근단에 비해 훨씬 큼.



* 해결 방안

- 열교환기 내의 여러 지점에서 U , ΔT , q 의 국소값을 구한다.
- q vs $1/U\Delta T$ 의 그래프를 적분하여 소요 열전달 면적 A_T 를 구한다.

(재킷형 관형 반응기의 온도 형태)

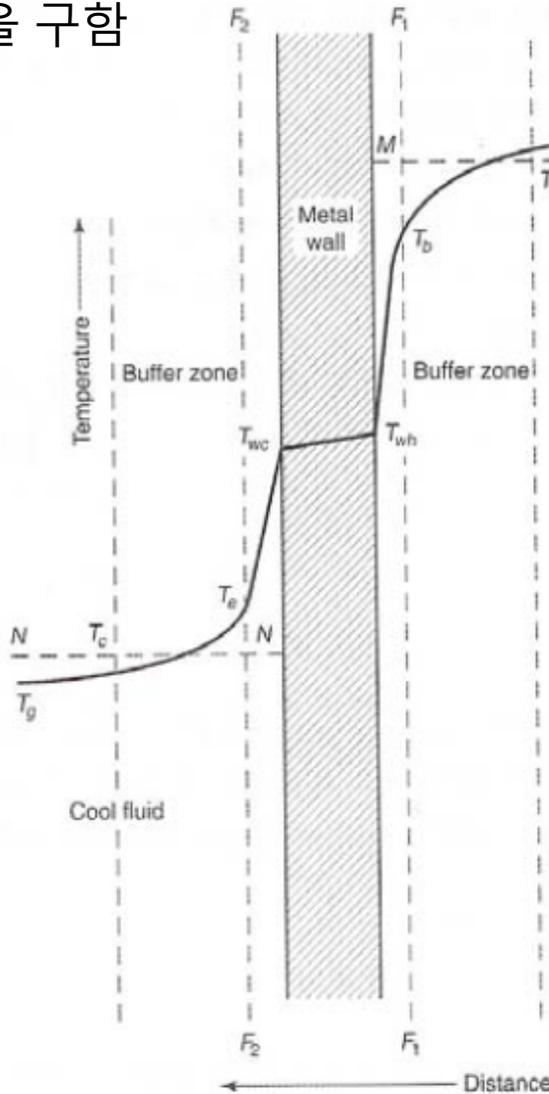
* 다중 통과 교환기

- 유체의 흐름 형태는 병류, 향류, 교차 흐름 등이 복합적으로 존재
- 총괄 계수 U 의 값이 일정하더라도 LMTD 가정이 사용될 수 없음

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 총괄 계수

- 유체 물성, 고체 벽 특성, 유속 및 열교환기 치수 등 여러 변수에 의존
- 계산 방법: 고체와 유체 층에 대한 개별 저항을 구함 → 개별 저항의 합을 통해 총괄 저항을 구함



* 세 가지 온도 구배

- 우측 뜨거운 유체에서의 온도 구배
- 관벽 안에서의 온도 구배
- 좌측 차가운 유체에서의 온도 구배

금속
관벽

* 각 유체 층의 구성

- 관벽 근처의 얇은 부층(thin sublayer): 온도 구배가 큼
- 난류 중심(turbulent core): 흐름의 대부분을 차지
→ 에디(eddy)에 의해 온도가 거의 균일
- 완충 영역(buffer zone): 부층과 난류 중심 사이에 존재

- MM: 뜨거운 유체의 평균 온도
- NN: 차가운 유체의 평균 온도

관벽을 사이에 둔 열전달
: 강제 대류에서 3 가지 온도 구배

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 총괄 저항(overall resistance)

- 직렬로 연결된 3 개의 저항으로 구성
- 각각의 유체로부터 주어지는 저항, 관벽으로부터 주어지는 저항

$$R(\text{총괄저항}) = R(\text{더운 유체}) + R(\text{금속 벽}) + R(\text{찬 유체})$$

* 유체 저항

- 뜨거운 유체와 차가운 유체의 개별 열전달 계수 h_h , h_c 를 다음과 같이 정의 가능

$$h_h = \frac{dq/dA}{T_h - T_w} \quad h_c = \frac{dq/dA}{T_w - T_c} \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{h_h}, \frac{1}{h_c} \sim \text{열저항}$$

- dq/dA : 유체와 접촉된 면적을 기준으로 한 국부 열 플럭스
- T_h : 뜨거운 유체의 국부 평균 온도
- T_c : 찬 유체의 국부 평균 온도
- T_w : 유체와 접촉된 관벽의 온도 (T_{wh} , T_{wc})

* 총괄 저항의 계산

- 두께 x_w , 열전도도 k 인 관벽에서의 열저항 = x_w/k
- 면적에 대해 보정한 뒤, $1/h_h$, $1/h_c$ 와 더함 \rightarrow 총괄 저항($1/U$)가 얻어짐

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 벽 표면에서의 저항

-벽 인접 표면에서의 열전달이 전도에 의해서만 일어난다고 가정

$$h = \frac{dq/dA}{T - T_w} \xrightarrow{\quad} h = -k \frac{(dT/dy)_w}{T - T_w}$$

↓ 양변 $\times \frac{D}{k}$

$$Nu \equiv \frac{hD}{k} = -D \frac{(dT/dy)_w}{T - T_w}$$

* Nusselt 수의 물리적 의미

1. Nu의 물리적 의미는 '관 전체에 걸친 평균 온도 구배에 대한 벽에서의 온도 구배'를 의미

$$Nu = \frac{\text{전도열저항}}{\text{대류열저항}} = \frac{\text{표면에서의 온도구배}}{\text{총 온도구배}}$$

2. Nu의 또 다른 물리적 의미는 '층류층의 상당 두께에 대한 관지름의 비'이다.

→ 층류층의 구께 x에서 모든 열전달 저항이 발생한다고 가정

$$\frac{dq}{dA} = \frac{k(T - T_w)}{x} \xrightarrow{\quad} h = \frac{k}{x} \xrightarrow{\quad} Nu = \frac{hD}{k} = \frac{kD}{xk} = \frac{D}{x}$$

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 개별 계수로부터 총괄 계수의 계산

- 원통형 관벽을 통한 열전달 속도는 로그 평균 표면적에 대해 미분형을 취하여 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$\boxed{q = k \frac{\bar{A}_L (T_i - T_o)}{r_o - r_i}} \xrightarrow{\text{미분형}} \frac{dq}{dA_L} = \frac{k_m (T_{wh} - T_{wc})}{x_w}$$

$T_{wh} - T_{wc}$: 관벽 안에서의 온도차
 k_m : 관벽의 열전도도
 x_w : 관벽의 두께 ($r_o - r_i$)

$$\bar{A}_L = \frac{2\pi L(r_o - r_i)}{\ln(r_o/r_i)} = 2\pi L \bar{r}_L$$

- 뜨거운 유체, 관벽, 차가운 유체 간의 온도차를 활용하여 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$(T_h - T_{wh}) + (T_{wh} - T_{wc}) + (T_{wc} - T_c) = T_h - T_c = \Delta T$$

$$= dq \left(\frac{1}{dA_i h_i} + \frac{x_w}{dA_L k_m} + \frac{1}{dA_o h_o} \right)$$

- 미소 외부 면적 dA_o 를 기준으로 열 플럭스를 나타내면 다음과 같음

$$\frac{dq}{dA_o} = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_i} \left(\frac{dA_o}{dA_i} \right) + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{dA_o}{dA_L} \right) + \frac{1}{h_o}} \xrightarrow{\quad} \frac{dq}{dA_o} = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_i} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{D_o}{D_L} \right) + \frac{1}{h_o}}$$

$\frac{dA_o}{dA_i} = \frac{D_o}{D_i}, \quad \frac{dA_o}{dA_L} = \frac{D_o}{D_L}$

- 외부 면적을 기준으로 한 총괄 열전달계수 U_o 의 정의로부터 다음을 유도 가능

$$\frac{dq}{dA_o} = U_o \Delta T \xrightarrow{\quad} U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{D_o}{D_L} \right) + \frac{1}{h_o}}$$

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 개별 계수로부터 총괄 계수의 계산

- 유사한 방식으로 내부 면적 A_i 를 기준으로 한 총괄 열전달계수 U_i 를 구하면 다음과 같다.

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{D_i}{D_L} \right) + \frac{1}{h_o} \left(\frac{D_i}{D_o} \right)}$$

* 총괄 계수의 저항 형태

- 도관의 외부 면적을 기준으로 한 총괄 계수의 저항 형태는 다음과 같다.

$$R_o = \frac{1}{U_o} = \frac{D_o}{D_i h_i} + \frac{x_w}{k_m} \frac{D_o}{D_L} + \frac{1}{h_o}$$

- 총괄 온도 강하는 $1/U_o$ 에 비례, 개별 유체와 관벽 안에서의 온도 강하는 개별 저항에 비례

$$\frac{\Delta T}{1/U_o} = \frac{\Delta T_i}{D_o / D_i h_i} = \frac{\Delta T_w}{(x_w / k_m)(D_o / D_L)} = \frac{\Delta T_o}{1/h_o}$$

T drop through inside fluid
 T drop through metal wall
 T drop through outside fluid

ΔT : 총괄 온도 강하

ΔT_i : 내부 유체에 걸친 온도 강하

ΔT_w : 금속 벽에 걸친 온도 강하

ΔT_o : 외부 유체에 걸친 온도 강하

→ 직렬로 연결된 벽에서의 열전도와 저항의 관계와 유사

$$\frac{\Delta T}{R} = \frac{\Delta T_A}{R_A} = \frac{\Delta T_B}{R_B} = \frac{\Delta T_C}{R_C}$$

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 오염 계수 (fouling factor)

- 실제 조업 중 열전달 표면이 청결하지 않음
→ 침적물, 먼지, 기타 고체 부착물 등에 의한 추가적인 열 전달 저항이 발생
- 침적물에 의한 열전달 계수를 h_d 라 표기하며, 오염계수라 부름
- 관 내부와 외부가 부착물로 오염되는 경우 보정항을 포함시키면 다음과 같다 (침적물의 두께를 무시함).

$$\Delta T = dq \left(\frac{1}{dA_i h_{di}} + \frac{1}{dA_i h_i} + \frac{x_w}{dA_L k_m} + \frac{1}{dA_o h_o} + \frac{1}{dA_o h_{do}} \right)$$

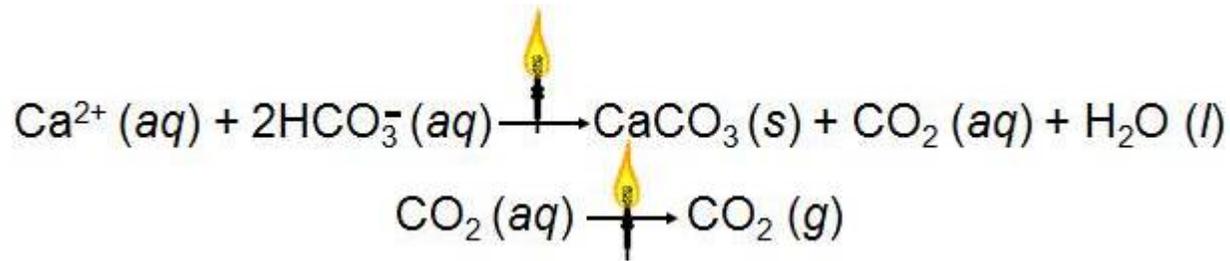
$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_{di}} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{1}{h_i} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{D_o}{D_L} \right) + \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{do}}} \quad U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_{di}} + \frac{1}{h_i} + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{D_i}{D_L} \right) + \frac{1}{h_o} \left(\frac{D_i}{D_o} \right) + \frac{1}{h_{do}} \left(\frac{D_i}{D_o} \right)}$$

* 오염 계수의 수치

- 관벽의 청소 후 다음 청소까지 정상적인 조업이 가능한 오염 계수의 범위
: 600 - 11,000 W/m²·K
- 오염 계수는 설계상의 안전 인자(safety factor)로 규정됨

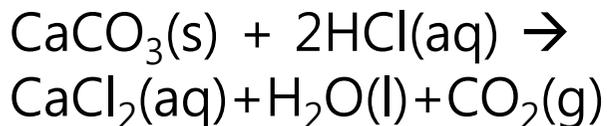
참고: Fouling의 발생

- 바람직하지 않은 침전 반응의 예
- 경수(hard water): Ca^{2+} , Mg^{2+} 등의 이온을 함유하는 물.
→ 공업용수나 가정용수로 사용하기에 부적합
- 연수(soft water): Ca^{2+} , Mg^{2+} 등의 이온을 함유하지 않는 물



- 고체 탄산 칼슘은 보일러, 파이프 등의 배관에 쌓이는 scale의 주성분으로, 열전달 효율을 떨어뜨리며 배관의 내구성을 악화시킴

- Scale의 제거 방법: 염산을 첨가하여 불용성의 탄산칼슘을 가용성의 염화칼슘으로 변환시킴.

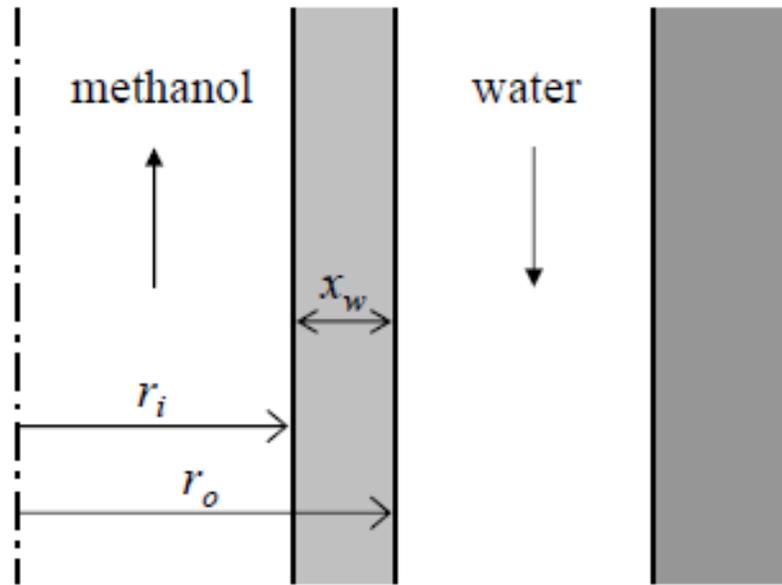


Boiler Scale Deposits



11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

Ex. 11.1) MeOH flowing in the inner pipe of a double-pipe exchanger is cooled with water.



steel pipe wall
 $(k_m = 26 \text{ Btu/ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$

. 1 inch Schedule 40 steel pipe:

(from Appendix 3)

$$D_i = 0.0874 \text{ ft}$$

$$D_o = 0.1096 \text{ ft}$$

$$x_w = 0.0111 \text{ ft}$$

$$\leftarrow (D_o - D_i)/2$$

. h & h_d : Table 11.1

What is the overall coefficient, based on the outside area of the inner pipe ? ($\bar{\alpha}$, $U_o = ?$)

(Ans.)

$$\bar{D}_L = \frac{D_o - D_i}{\ln(D_o / D_i)} = \dots = 0.0983 \text{ ft}$$

$$\underline{U_o} = \leftarrow \text{from Eq. (11.37)}$$

$$= \underline{80.9 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}}$$

11.3 열 플럭스 및 열전달 계수 (heat flux and heat transfer coefficient)

* 총괄 계수의 특수한 경우

- 오염 효과를 무시할 수 있는 경우
- D_o 와 D_i 가 거의 비슷한 값을 갖는 경우

$$A_i \cong \overline{A_L} \cong A_o \Rightarrow D_i \cong \overline{D_L} \cong D_o$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_{di}} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{1}{h_i} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{D_o}{D_x} \right) + \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{do}}} \longrightarrow U_o = U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_w}{k_m} + \frac{1}{h_o}}$$

* 율속 저항(controlling resistance)

- h_o 와 값이 다른 계수들에 비해 아주 작은 경우 $1/h_o$ 는 가장 큰 열저항으로 작용
→ $h_o = U_o$ 로 근사화 가능