

열전달(Heat Transfer)

2012년도 1학기(제 13주)

기계자동차공학부
박승운





제8장 복사열전달(2) (Radiation)

◆ 학습목표

- 확산 회체 표면에서의 복사열전달 개념에 대한 이해
- 복사차폐막과 안정된 온도측정을 위한 복사영향에 대한 토의

◆ 학습성과

- 확산 회체 표면에서의 열전달 개념을 설명할 수 있어야 함.
- 안정된 온도측정을 위한 probe의 반사코팅 필요성에 대해 설명할 수 있어야 함.

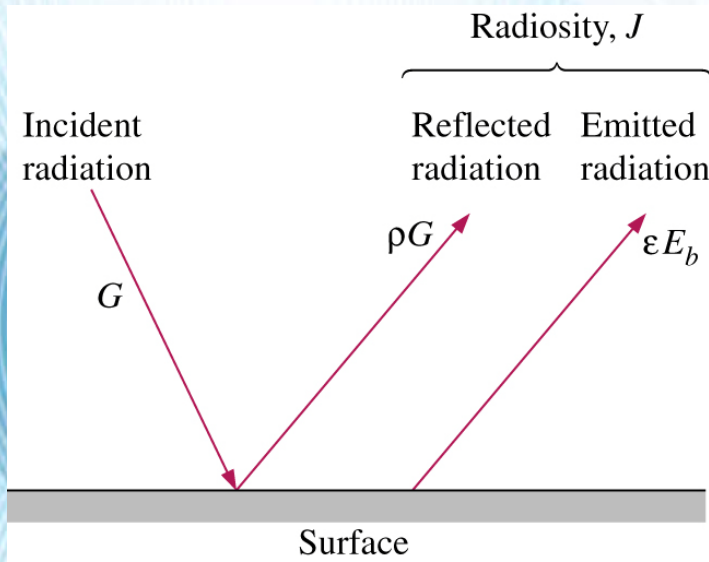
강의 내용 및 순서

- 복사열전달 : 확산 회체표면
- 복사차폐막과 복사효과
- 종합요약

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 복사도(radiosity)

$$\begin{aligned}
 J_i &= \left(\begin{array}{c} \text{Radiation emitted} \\ \text{by surface } i \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Radiation reflected} \\ \text{by surface } i \end{array} \right) \\
 &= \epsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i \\
 &= \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i) G_i
 \end{aligned}
 \tag{8-21}$$



for blackbody ($\epsilon_1 = 1$)

$$J_i = E_{bi} = \sigma T_i^4
 \tag{8-22}$$

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

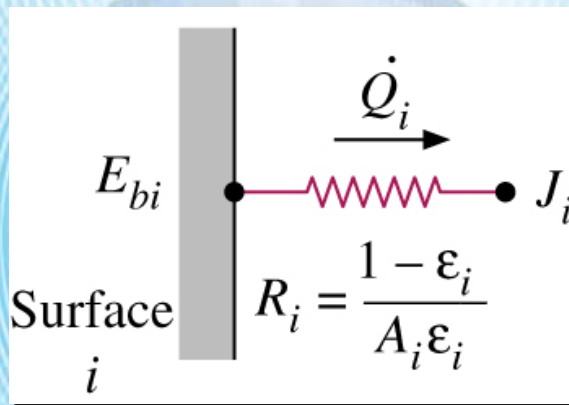
◆ 표면으로의(또는 부터) 순 복사열전달

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= \left(\begin{array}{c} \text{완전한 표면 } i \text{를} \\ \text{떠나는 복사} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{완전한 표면 } i \text{에} \\ \text{부딪치는 복사} \end{array} \right) \\ &= A_i (J_i - G_i) \end{aligned} \quad (8-23)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= A_i \left(J_i - \frac{J_i - \epsilon_i E_{bi}}{1 - \epsilon_i} \right) \\ &= \frac{A_i \epsilon_i}{1 - \epsilon_i} (E_{bi} - J_i) \end{aligned} \quad (8-24)$$

$$\dot{Q}_i = \frac{1}{R_i} (E_{bi} - J_i) \quad (8-25)$$

$$R_i = \frac{1 - \epsilon_i}{A_i \epsilon_i} \quad (8-26)$$



※ 재복사표면 (reradiating surface): $\dot{Q} = 0$

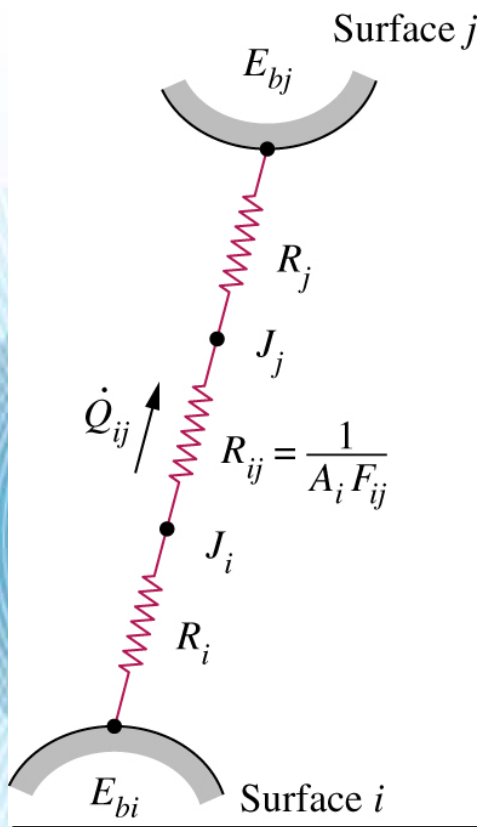
$$J_i = E_{bi} = \sigma T_i^4 \quad (8-22)$$

※ 순 복사열전달 방향

$E_{bi} > J_i$: 표면으로부터 (\rightarrow),
 $E_{bi} < J_i$: 표면으로 (\leftarrow)

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 두 표면 사이의 순 복사열전달



$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \left(\begin{array}{c} \text{표면 } j \text{에 부딪히는} \\ \text{완전한 표면 } i \text{를} \\ \text{떠나는 복사} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{표면 } i \text{를 부딪히는} \\ \text{완전한 표면 } j \text{를} \\ \text{떠나는 복사} \end{array} \right)$$

$$= A_i J_i F_{i \rightarrow j} - A_j J_j F_{j \rightarrow i} \quad (8-28)$$

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$$

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = A_i F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (8-29)$$

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{1}{R_{i \rightarrow j}} (J_i - J_j) \quad (8-30)$$

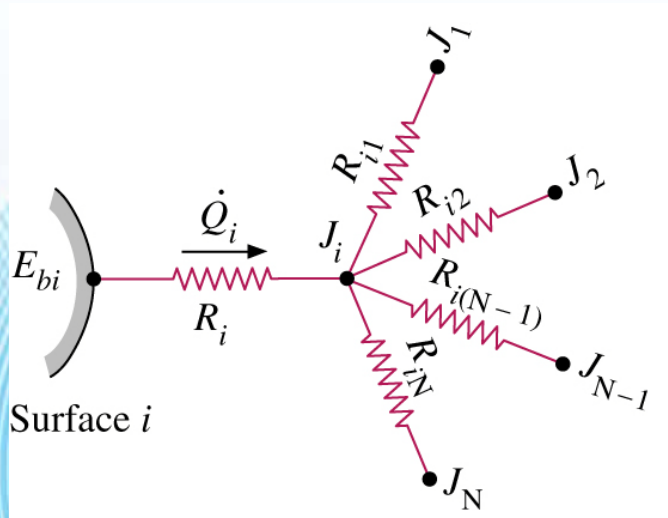
$$R_{i \rightarrow j} = \frac{1}{A_i F_{i \rightarrow j}} \quad (8-31)$$

※ $R_{i \rightarrow j}$: 복사의 공간저항

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 두 표면 사이의 순 복사열전달

○ N개의 표면을 가진 밀폐용기에서 표면 j 로부터의 순 열전달



$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{i \rightarrow j} = \sum_{j=1}^N A_i F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \\ &= \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}} \end{aligned} \quad (8-32)$$

$$\frac{E_{bi} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}} \quad (8-33)$$

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 복사문제를 풀기 위한 방법(2 가지)

1) 표면에서 \dot{Q}_i 또는 T_i 가 주어진 경우(직접방법)

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (8-34)$$

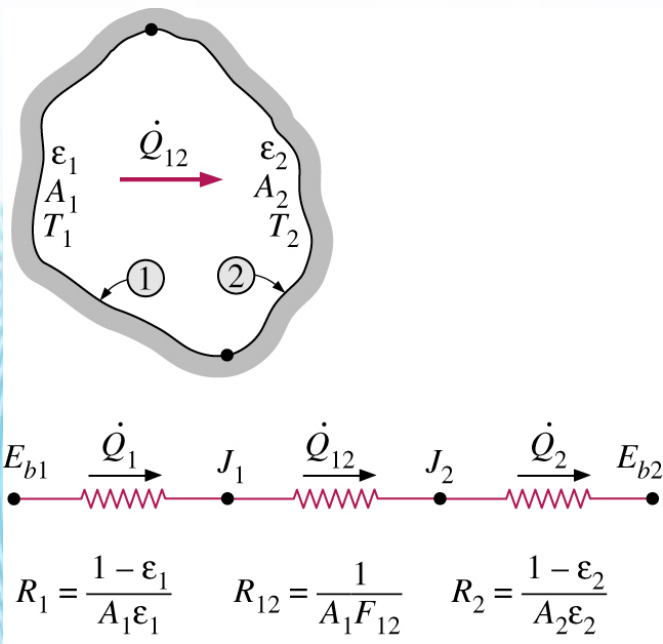
$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad (8-35)$$

2) 전기회로의 유사성을 이용하는 방법(회로방법)

- 1950년대 A.K. Oppenheim에 의해 소개
- 간단하고 물리적 개념에 근거하기 때문에 널리 사용
- 열전달률 \rightarrow 전류, 복사도 \rightarrow 전압, 표면적과 형태계수 \rightarrow 저항

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 두 개의 표면을 가진 밀폐용기 내의 복사열전달



$$\dot{Q}_{12} = \dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_{12} + R_2} = \dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}} \quad (8-36)$$

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 두 개의 표면을 가진 밀폐용기 내의 복사열전달

※ 식(8-36)의 간단한 형태

for *small object* \in *a large cavity*
 ($A_1 \ll A_2, F_{12}=1$)

$$\dot{Q}_{12} = A_1 \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (8-37)$$

for *two large* \parallel *plates*
 ($A_1 = A_2, F_{12}=1$)

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (8-38)$$

for *two long concentric cylinders*
 ($A_1/A_2 = r_1/r_2, F_{12}=1$)

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \quad (8-39)$$

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 두 개의 표면을 가진 밀폐용기 내의 복사열전달

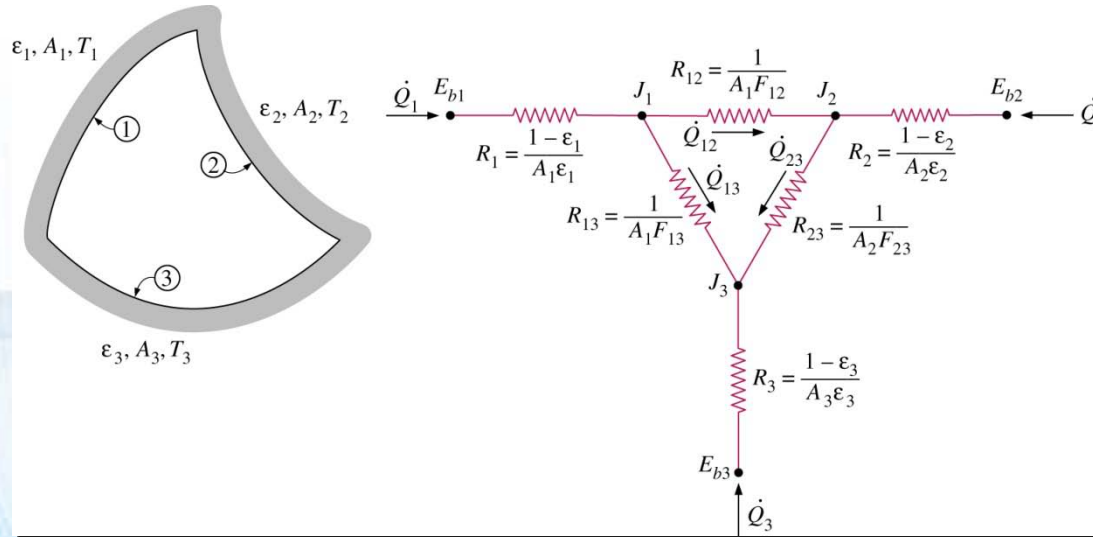
※식(8-36)의 간단한 형태

for concentric spheres
($A_1/A_2 = (r_1/r_2)^2$, $F_{12}=1$)

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (8-40)$$

■ 복사열전달 ; 확산 회체표면

◆ 세 개의 표면을 가진 밀폐용기 내의 복사열전달



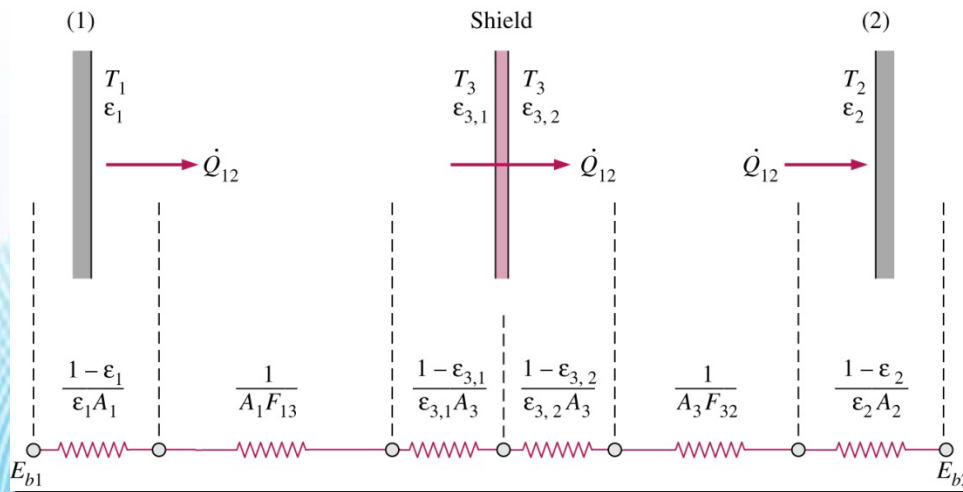
$$\frac{E_{b1} - J_1}{R_1} + \frac{J_2 - J_1}{R_{12}} + \frac{J_3 - J_1}{R_{13}} = 0 \quad (8-41a)$$

$$\frac{J_1 - J_2}{R_{12}} + \frac{E_{b2} - J_2}{R_2} + \frac{J_3 - J_2}{R_{23}} = 0 \quad (8-41b)$$

$$\frac{J_1 - J_3}{R_{13}} + \frac{J_2 - J_3}{R_{23}} + \frac{E_{b3} - J_3}{R_3} = 0 \quad (8-41c)$$

■ 복사차폐막과 복사효과

※ 복사차폐막(radiation shields) : 반사율이 큰 얇은 판이나 껍질



$$\dot{Q}_{12, no\ shield} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

$$\dot{Q}_{12, one\ shield} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \quad (8-42)$$

$$R_1 = \frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1}$$

$$R_2 = \frac{1}{A_1 F_{12}}$$

$$R_3 = \frac{1 - \epsilon_{3,1}}{A_3 \epsilon_{3,1}}$$

$$R_4 = \frac{1 - \epsilon_{3,2}}{A_3 \epsilon_{3,2}}$$

$$R_5 = \frac{1}{A_3 F_{32}}$$

$$R_6 = \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}$$

■ 복사차폐막과 복사효과

※ 복사차폐막(radiation shields) : 반사율이 큰 얇은 판이나 껍질

for $F_{13} = F_{23} = 1, A_1 = A_2 = A_3 = A$

$$\dot{Q}_{12, one\ shield} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{3,1}} + \frac{1}{\epsilon_{3,2}} - 1\right)} \quad (8-43)$$

for N 개의 복사차폐막으로 분리된 큰 평행판을 통한 복사열전달

$$\dot{Q}_{12, Nshield} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{3,1}} + \frac{1}{\epsilon_{3,2}} - 1\right) + \dots + \left(\frac{1}{\epsilon_{N,1}} + \frac{1}{\epsilon_{N,2}} - 1\right)} \quad (8-44)$$

모든 표면의 방사율이 같을 경우

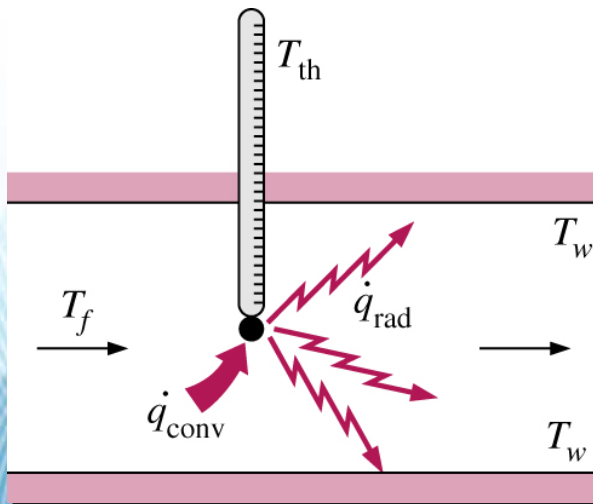
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{12, Nshield} &= \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(N+1)\left(\frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{\epsilon} - 1\right)} \\ &= \frac{1}{N+1} \dot{Q}_{12, no\ shield} \end{aligned} \quad (8-45)$$

※ 방사율이 모두 같을 경우, 차폐막이 없을 때에 비교한 열전달을

- 1개 차폐막 : 50%(50% 차폐효과)
- 9개 차폐막 : 10%(90% 차폐효과)
- 19개 차폐막 : 5%(95% 차폐효과)

■ 복사차폐막과 복사효과

◆ 온도측정에서 복사효과



$$\dot{q}_{cv, \rightarrow sensor} = \dot{q}_{rd, sensor \rightarrow}$$

$$h(T_f - T_{th}) = \epsilon_{th}\sigma(T_{th}^4 - T_w^4)$$

$$T_f = T_{th} + \frac{\epsilon_{th}\sigma(T_{th}^4 - T_w^4)}{h} \quad (8-46)$$

T_f : 유체의 실제 온도, [K]

T_{th} : 온도계에 의해 측정된 온도값, [K]

T_w : 주위표면 온도, [K]

ϵ : 온도계 센서의 방사율

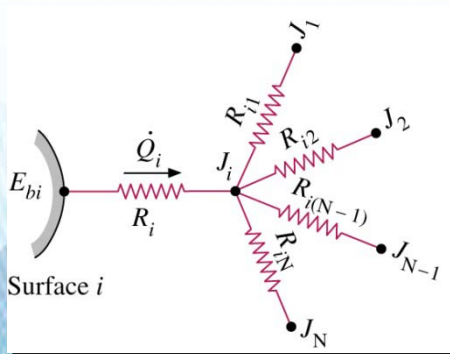
※ 센서는 복사효과를 줄이기 위해 방사율이 큰(방사율이 낮은) 재료로 코팅(차폐)되어야 함.

END

□ 종합요약

◆ 복사열전달(회체)

○ 두 표면 사이의 복사열전달



$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{i \to j} = \sum_{j=1}^N A_i F_{i \to j} (J_i - J_j) \\ &= \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{i \to j}} \end{aligned} \quad (8-32)$$

$$\frac{E_{bi} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{i \to j}} \quad (8-33)$$

○ 복사문제의 해석방법

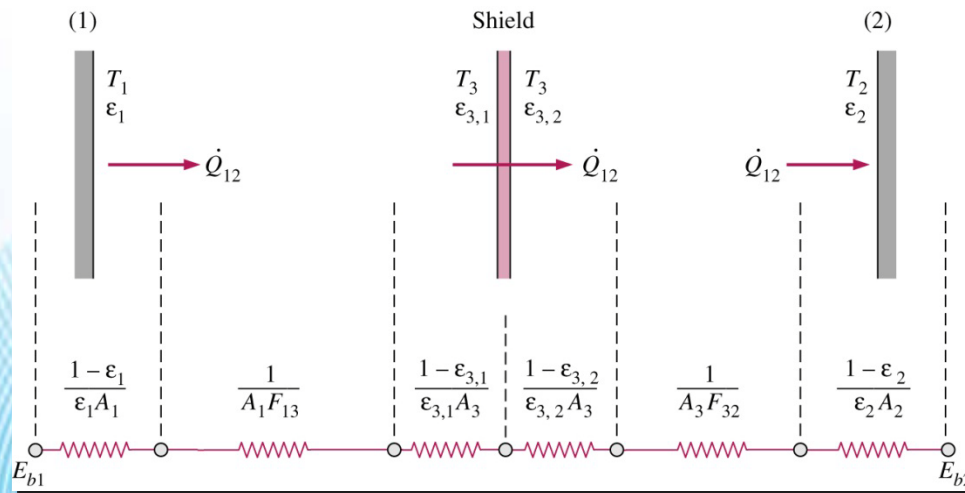
- \dot{Q}_i 또는 T_i 가 주어진 경우

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{i \to j} (J_i - J_j) \quad (8-34)$$

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{i \to j} (J_i - J_j) \quad (8-35)$$

▣ 종합요약

◆ 복사 차폐막과 복사효과



$$\dot{Q}_{12, \text{one shield}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{3,1}} + \frac{1}{\epsilon_{3,2}} - 1\right)} \quad (8-43)$$



◆ 다음강의(예고)

- 열교환기(1)

- * 열교환기의 원리와 구조에 대해 알아본다.
- * 열관류율이란 무엇인가?에 대해 토론한다.



감사합니다.

