시스템 설계(환경/설비분야)

Heat transfer

Architectural Engineering Program
Department of Architecture
Seoul National University

Conduction (전도)

- $q = k/d \cdot A \cdot \Delta T$

  $= C \cdot A \cdot \Delta T$

- k : thermal conductivity (열전도율)
- C : thermal conductance (컨덕턴스) = k/d
- A : 벽체의 면적
- ΔT : 온도차

종류	이름	밀도(kg/m^3)	열전도율(W/m°C)	콘덕턴스(W/m^2°C)	비열(kJ/kg°C)
건축판재	석면 시멘트 보드	1,900	0.58	-	1.00
	합판(더글라스전나무)	540	0.12	-	1.21
	하드보드, 중밀도	800	0.105	-	1.30
	파티클보드, 저밀도	590	0.102	-	1.30
	파티클보드, 중밀도	800	0.135	-	1.30
	파티클보드, 고밀도	1,000	0.170	-	1.30
바닥 마감재	카펫과 섬유질패드	-	-	2.73	1.42
	카펫과 고무패드	-	-	4.60	1.38
단열재	유리섬유	102	0.036	-	0.96
	발포고무(경질)	72	0.032	-	1.68
	폴리스티렌(압출)	42	0.029	-	1.21
	폴리스티렌(성형)	16	0.037	-	1.21
루핑	아스팔트 롤 루핑	1,100	-	36.9	1.51
	조립 루핑	1,100	-	17.0	1.46
플러스터링	시멘트 플러스터, 모래골재	1,860	0.72	-	0.84
조적재료	구운 벽돌	2,400	1.34	-	0.79
콘크리트 블록	콘크리트블록, 200㎜	-	-	5.40	-
	콘크리트블록, 300㎜	-	-	4.60	-
콘크리트	콘크리트, 일반골재	2,240	1.95	-	0.90
	콘크리트, 경량골재	1,600	0.785	-	0.84
목재	경질목재, 참나무	704	0.17	-	1.63
	경질목재, 자작나무	704	0.172	-	1.63
	경질목재, 단풍나무	670	0.164	-	1.63
	경질목재, 양물푸레나무	642	0.159	-	1.63
	연질목재, Douglas Fir-Larch	558	0.141	-	1.63

3

Convection (대류)

- $q = h \cdot A \cdot \Delta T$
- h : 대류열전달계수(convective heat transmission coefficient)

4

종류	이름	밀도(kg/m³)	열전도율(W/m°C)	콘덕턴스(W/m²°C)		비열(kJ/kg°C)
공기층	13㎜ 수직 공기층	-	-	6.25		-
	20㎜ 수직 공기층	-	-	5.56		-
	40㎜ 수직 공기층	-	-	5.56		-
	90㎜ 수직 공기층	-	-	5.56		-
	13㎜ 수평 공기층	-	-	상향열류	6.67	-
				하향열류	6.25	
	20㎜ 수평 공기층	-	-	상향열류	6.67	-
				하향열류	5.56	
	40㎜ 수평 공기층	-	-	상향열류	6.25	-
				하향열류	5.00	
	90㎜ 수평 공기층	-	-	상향열류	6.25	-
				하향열류	4.55	

5

Radiation (복사)

- $E = \varepsilon \sigma T^4$
- E : emissive power
- ε : emittance (방사율)
- $q = E \sigma (T_1^4 - T_2^4)$
- E : effective emittance = $\dfrac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}$

$$q = q_{conv} + q_{rad} = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur}) \qquad h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)$$

6

※ 열저항과 전기저항

❑ 열확산과 전기전항 사이의 유사성

- 전기저항이 전기의 전도에 관계
  → 열저항은 열의 전도에 관계
- 저항을 구동 퍼텐셜(driving potential)의 해당하는 전달률에 대한 비로 정의
  → 식 3.4로부터 전도에 대한 열저항

$$R_{t,\mathrm{cond}} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{1}{kA} \qquad (3.6)$$

- 전기전도에 대하여 Ohm의 법칙

$$R_e = \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{I} = \frac{L}{\sigma A} \qquad (3.7)$$

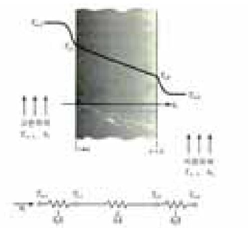
이택식 외2 공역, 열전달, 사이텍미디어, 1998, pp.71 ~ 75

※ 열저항과 전기저항

❑ 열저항은 표면에서의 대류에 의한 열전달과 관계

- Newton의 냉각법칙으로부터

$$q = hA(T_s - T_\infty) \qquad (3.8)$$



❑ 대류에 대한 열저항

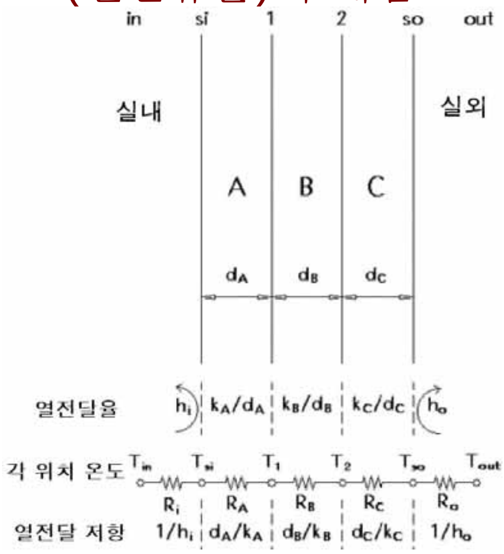
$$R_{t,\mathrm{conv}} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \qquad (3.9)$$

- 대류 표면조건을 가지는 평면벽에 대한 등가열회로(그림 3.2)
- 열전달률은 망상조직(network)에서의 각 요소를 개별적으로 생각함으로써 구함
  →

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{1/h_1 A} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L/kA} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{1/h_2 A} \qquad (3.10)$$

이택식 외2 공역, 열전달, 사이텍미디어, 1998, pp.71 ~ 75

K-value (열관류율)의 개념



9

❑ 단위

k : 열전도율(Thermal conductivity) [W/mK]

r : 열전도비저항(Resistivity) [mK/W] r=1/k

R : 열저항(Thermal resistance) [m²K/W] R=L/k, R=rL

C : 콘덕턴스(Conductance) [W/m²K] C=1/R

K or U : 열관류율(Overall thermal transmittance coefficient) [W/m²K]

$K = 1/(R_i + R_1 + R_2 \ldots R_o) = 1/R_T$

10

전도와 대류 및 복사

	전 도	대류 및 복사
열전달	$q = k/d \cdot A \cdot \Delta T$	$q = h \cdot A \cdot \Delta T$
열전달율	$k/d = C$	h
열전달 저항	$r = 1 / k$ $R = 1/C$ $= d/k = r\ d$	$R = 1 / h$

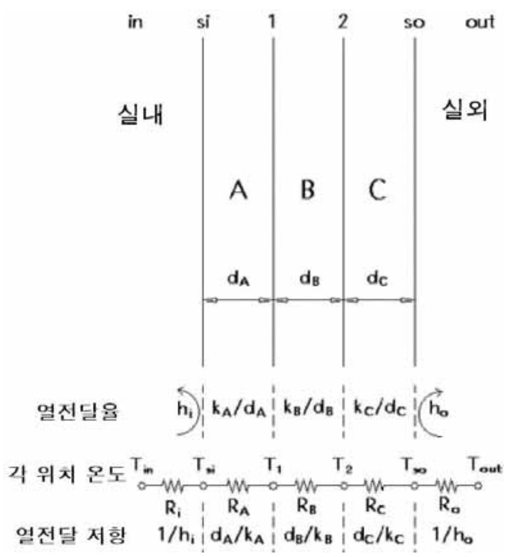
11

K-value (열관류율)

- $q = \mathbf{K} \cdot A \cdot \Delta T$
- $i = 1/R \cdot V$
- $\mathbf{K} = 1/R_T$
  $= 1/\Sigma R_i$

$q = C_i \cdot A \cdot \Delta T_i$

$= 1/R_i \cdot A \cdot \Delta T_i$



12

표면열전달계수

표면 위치	열류 방향	표면 방사율					
		무반사		반 사			
		ε = 0.90		ε = 0.20		ε = 0.05	
		h_i	R	h_i	R	h_i	R
정적 공기	수 평 상향	9.26	0.11	5.17	0.19	4.32	0.23
	45° 경사 상향	9.09	0.11	5.00	0.20	4.15	0.24
	수 직 수평	8.29	0.12	4.20	0.24	3.50	0.30
	45° 경사 하향	7.50	0.13	3.41	0.29	2.56	0.39
	수 평 하향	6.13	0.16	2.10	0.48	1.25	0.80
		h_o	R	h_o	R	h_o	R
동적 공기	겨울철 풍속(6.7m/s)	34.0	0.030	-		-	
	여름철 풍속(3.4m/s)	22.7	0.044	-		-	

h_i, h_o의 단위 : W/m² °C

R의 단위 : m² °C/W

13

공기층의 열전달저항 - 2

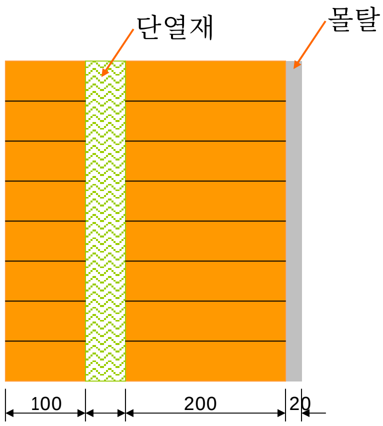
공기층 위치	열류	방향	평균 온도 (°C)	온도 차이 (°C)	13mm 공기층					20mm 공기층					40mm 공기층					90mm 공기층				
					유효 방사율 E					유효 방사율 E					유효 방사율 E					유효 방사율 E				
					0.03	0.05	0.20	0.50	0.82	0.03	0.05	0.20	0.50	0.82	0.03	0.05	0.20	0.50	0.82	0.03	0.05	0.20	0.50	0.82
수 평	상향	↑	32.2	5.6	0.37	0.36	0.27	0.17	0.13	0.41	0.39	0.28	0.18	0.13	0.45	0.42	0.30	0.19	0.14	0.50	0.47	0.32	0.20	0.14
			10.0	16.7	0.29	0.28	0.23	0.17	0.13	0.30	0.29	0.24	0.17	0.14	0.33	0.32	0.26	0.18	0.14	0.27	0.35	0.28	0.19	0.15
			10.0	5.6	0.37	0.36	0.28	0.20	0.15	0.60	0.39	0.30	0.20	0.15	0.44	0.42	0.32	0.21	0.16	0.49	0.47	0.34	0.23	0.16
45° 경사	상향	↗	32.2	5.6	0.43	0.41	0.29	0.19	0.13	0.52	0.49	0.33	0.20	0.14	0.51	0.48	0.33	0.20	0.14	0.56	0.52	0.35	0.21	0.14
			10.0	16.7	0.36	0.35	0.27	0.19	0.15	0.35	0.34	0.27	0.19	0.14	0.38	0.36	0.28	0.20	0.15	0.40	0.38	0.29	0.20	0.15
			10.0	5.6	0.45	0.43	0.32	0.21	0.16	0.51	0.48	0.35	0.23	0.17	0.51	0.48	0.35	0.23	0.17	0.55	0.52	0.37	0.24	0.17
			32.2	5.6	0.43	0.41	0.29	0.19	0.14	0.52	0.57	0.37	0.21	0.15	0.70	0.64	0.40	0.22	0.15	0.65	0.60	0.38	0.22	0.15
수 직	수평	→	10.0	16.7	0.45	0.43	0.32	0.22	0.16	0.51	0.49	0.35	0.23	0.17	0.45	0.43	0.32	0.22	0.16	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16
			10.0	5.6	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.65	0.61	0.41	0.25	0.18	0.67	0.62	0.42	0.26	0.18	0.64	0.60	0.41	0.25	0.18
45° 경사	하향	↘	32.2	5.6	0.44	0.41	0.29	0.18	0.14	0.62	0.58	0.37	0.21	0.15	0.89	0.80	0.45	0.24	0.16	0.85	0.76	0.44	0.24	0.16
			10.0	16.7	0.46	0.44	0.33	0.22	0.16	0.60	0.57	0.39	0.24	0.17	0.63	0.59	0.41	0.25	0.18	0.62	0.58	0.40	0.25	0.18
			10.0	5.6	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.67	0.63	0.42	0.26	0.18	0.90	0.82	0.50	0.28	0.19	0.83	0.77	0.48	0.26	0.19
수평	하향	↓	32.2	5.6	0.44	0.41	0.29	0.19	0.14	0.62	0.58	0.37	0.21	0.15	1.07	0.94	0.49	0.25	0.17	1.77	1.44	0.60	0.28	0.18
			10.0	16.7	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.66	0.62	0.42	0.25	0.18	1.10	0.99	0.56	0.30	0.20	1.69	1.44	0.68	0.33	0.21
			10.0	5.6	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.68	0.63	0.42	0.26	0.18	1.16	1.04	0.58	0.30	0.20	1.96	1.63	0.72	0.34	0.22

- 유효방사율 $E = \dfrac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}$

14

열관류율 계산 (예제 4.5)

- 다음 벽체의 열관류율을 계산하라



열관류율 계산 (예제 4.5)

재료	열전도율 : k (W/m °C)	두께 : d (m)	콘덕턴스: C (W/m^2°C)	열저항: R_i (m^2°C/W)	온도강하 (°C)	경계면온도 (°C)
외부표면			34.0	0.03		
벽돌	0.55	0.1	5.5	0.18		
단열재	0.029	0.03	0.97	1.03		
벽돌	0.55	0.2	2.75	0.36		
몰탈	0.72	0.02	36.0	0.03		
내부표면			8.29	0.12		

열관류저항 R_T : 1.75

열관류율 = 1/열관류저항 = 1 / 1.75 = 0.57 (W/m^2°C)

(예제 4.5) – 단열재 두께 증가

재료	열전도율 : k (W/m °C)	두께 : d (m)	콘덕턴스: C (W/m²°C)	열저항: R_i (m²°C/W)	온도강하 (°C)	경계면온도 (°C)
외부표면			34.0	0.03		
벽돌	0.55	0.1	5.5	0.18		
단열재	0.029	0.03 0.05	0.97 0.58	1.03 1.72		
벽돌	0.55	0.2	2.75	0.36		
몰탈	0.72	0.02	36.0	0.03		
내부표면			8.29	0.12		

열관류저항 R_T : 2.44

열관류율 = 1/열관류저항 = 1 / 2.44 = 0.41 (W/m²°C)

Temperature Gradient (온도 구배)

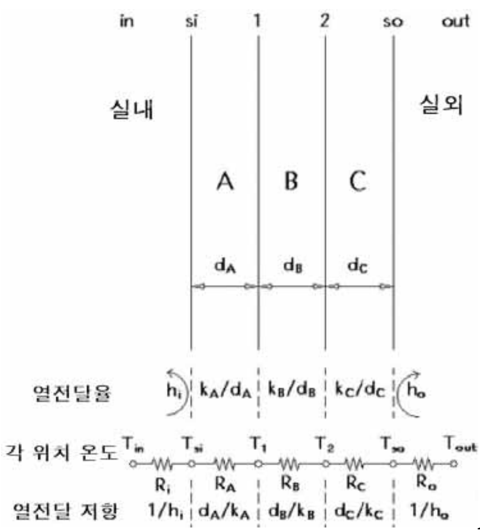
- $q = \mathbf{K} \cdot A \cdot \Delta T$

  $= C_i \cdot A \cdot \Delta T_i$

- $\Delta T_i = \mathbf{K} / C_i \cdot \Delta T$

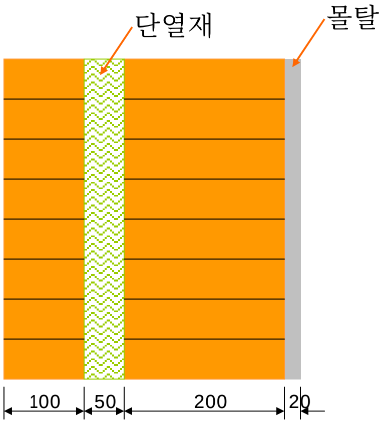
  $= R_i / R_T \cdot \Delta T$

  $= R_i \cdot \Delta T / R_T$



온도구배 계산 (예제 4.6)

- 다음 벽체의 온도구배를 계산, 도시하라
  - 실내온도 : 22°C
  - 외기온도 : -10°C



온도구배 계산 (예제 4.6)

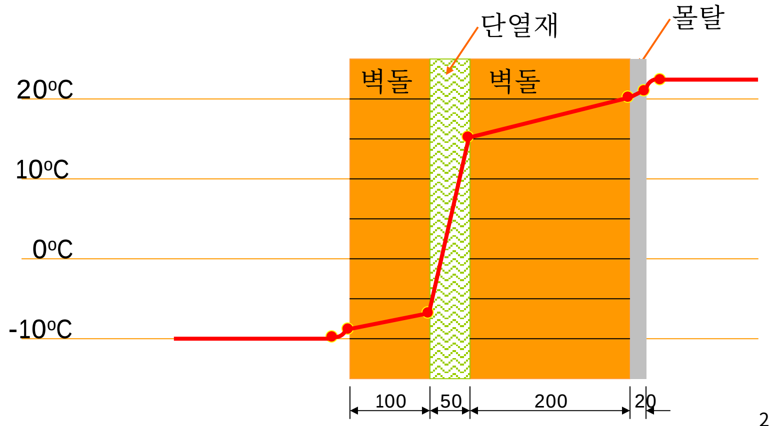
재료	열전도율 : k (W/m °C)	두께 : d (m)	콘덕턴스: C (W/m²°C)	열저항: R_i (m²°C/W)	온도강하 (°C)	경계면온도 (°C)
외부표면			34.0	0.03	0.4	-10 -9.6
벽돌	0.55	0.1	5.5	0.18	2.4	-7.2
단열재	0.029	0.03 0.05	0.97 0.58	1.03 1.72	22.6	15.4
벽돌	0.55	0.2	2.75	0.36	4.7	20.1
몰탈	0.72	0.02	36.0	0.03	0.4	20.5
내부표면			8.29	0.12	1.6	22.1

32.1

$\Delta T = 22 - (-10) = 32$, R_T : 2.44, $\Delta T / R_T = 32/2.44 = 13.12$

온도강하 $= R_i * \Delta T / R_T = R_i * 13.12$

온도구배 도시 (예제 4.6)



21