

열전달 강의개요

강의목표

- 강의개요 소개
- 열전달 정의
- 열전달 응용
- 에너지
- 에너지 법칙
- 기계
- 열전달을 배워야 하는 이유

열전달 강의개요

- 열전달
- 열 흐름 현상에 관한 학문
- 열 흐름 기구, 원리, 수식, 계산, 장치 설계
- 열에너지 관련 기기 설계, 제작, 운용할 능력 배양
- 교수명
- 강희찬, 군산대학교
- 063-469-4722 (연구실)
- hckang@kunsan.ac.kr

열전달 강의목표

- 열전달 기초 개념과 물리적 원리 학습
- 열 관련기기를 이해하고 해석할 수 있는 능력을 배양
- 응용과목의 기초이론 학습
- 내연기관, 공기조화 기기, 냉난방 설비, 환경설비

강의내용

- 열전달 기초
- 비정상열전달, 전도열전달
- 열저항, 접촉열저항, 흰
- 발열고체 정상열전도
- 비정상열전도
- 물체표면에 따른 강제대류

열전달이란?

- 열(熱, heat)의 전달(傳達, transfer)
- 에너지의 형태
- 일, 열
- 전기, 화학, 원자력, 자기, 내부, 운동, 위치, 압력, 풍력, 태양력 등

에너지의 정의

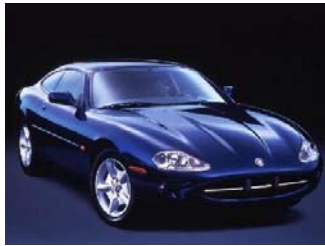
- 힘
- 거리
- 힘 x 거리
- 단위

기계와 에너지

- 기계란?
- 인간에게 유용한 일을 하는 장치
- 에너지를 사용
- 예: 자동차, 발전소, 냉장고, 세탁기, 컴퓨터, 계산기
- 기계는 열에너지와 반드시 관련

자동차

- 에너지의 변환
- 휘발유(화학)→연소→열→엔진→일→구동→마찰→열
- 에너지는 변환
- 양과 방향



롤러코스터

- 에너지 변환
- 동력→위치→운동→마찰→정지→열
- 모든 에너지는 열로 변환



열전달 과목 중요도

- 미국에서 성공한 기술자 4000명을 대상으로 조사
- 열전달 12위
- 임재춘, 2003, 한국의 이공계는 글쓰기가 두렵다, pp. 26, 마이넨, 서울

순위	학 과 목	순위	학 과 목
1	경영학	11	컴퓨터
2	Technical Writing	12	열전달
3	확률과 통계	13	기기사용 및 측정
4	발표	14	데이터 처리
5	창의	15	시스템 프로그래밍
6	개인간 인화	16	경제학
7	그룹간 인화	17	미분학
8	숙목	18	논리학
9	대화	19	경제분석
10	일업	20	응용프로그래밍

열역학 제1 법칙

- 열역학 제1법칙
- 에너지는 생성하거나 소멸되지 않음
- 에너지의 형태가 변화하는 과정에서 양은 동일함

열역학 제 2법칙

- 열역학 제 2법칙
- [일, 전기, 원자력, 화학, 빛 ...] → 열
- 순방향 에너지 변환효율 100%
 - [일, 전기 ...] → 열
- 역방향 에너지 변환효율 100% 불가능
 - 열 → [일, 전기, 빛...]
- 모든 에너지는 최종적으로 열 에너지로 변환
- 에너지 변환에서 방향성

학습점검

- 열전달 정의
- 열역학 제 1법칙
- 열역학 제 2법칙
- 열전달을 배우는 이유

전도열전달

강의목표

- 전도열전달의 정의
- 전도법칙
- 열전도율
- 기본 계산

전도열전달

- 전도(heat conduction)
- 대류가 없는 유체에서 분자의 불규칙한 운동에 의한 에너지 전달, 에너지의 확산(diffusion)
- 고체에서 격자파(lattice wave)에 의한 열에너지 전달
- 분자나 전자의 매체에 의한 열흐름
- 공(에너지)을 옆 사람(분자)에게 전달

전도열전달의 응용

- 젓가락
- 건물 벽체
- 엔진 블록
- 지표

전도 법칙

- Fourier의 전도법칙
- Biot의 실험적 관찰에 근거

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}]$$

- 열전도율 k [W/m·K]
- 음의 부호: 온도구배는 열흐름과 반대방향

전도 법칙-단위계산

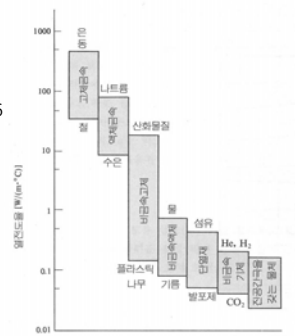
- Fourier의 전도법칙

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}]$$

- 열 에너지
- 열전달율
- 면적
- 온도
- 온도구배
- 열전도율

열전도율

- 기체 < 액체 < 고체
- 비금속 < 금속
- 합금 < 순금속
 - 청동 Cu75%Sn25% 26
 - 구리 Cu100% 386
 - 발포재 << 고체
 - 온도의 함수
 - 1:10,000



열전도율 찾는 법

- 교재의 표
- 식을 이용
- EES 프로그램
- 인터넷 검색

EES로 열전도율 찾기

- Property
- 물질
- 온도

자연에서 열 에너지의 전달

- 생명체
- 에너지 취득, 열 발생
- 방열
- 체온 > 외기 온도

자연에서 열 에너지의 전달

- 열발생량과 방열성능
- 열발생량: 몸무게에 비례
- 방열성능: 표면적에 비례
- 비교 예
 - 길이비 1: 3
 - 열발생량비 (체중비) 1:27
 - 방열비 (표면적비) 1:9
 - 표면적/체중 $(1/1):(9/27) = 1:(1/3)$
- 덩치가 클수록 상대적으로 방열할 수 있는 면적이 적음
- 덩치가 클수록 열전달에 불리

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

25

고양이와 호랑이

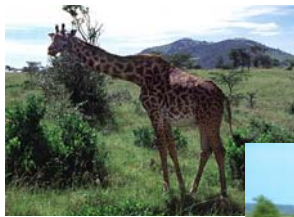


열전달

열전달 개요, 전도, 대류

26

기린과 코끼리



열전달

열전달 개요, 전도, 대류

27

고래를 땅 위에 있을 때 문제는?

- 고래가 체열을 발산하는데 문제는?
 - 물: 열전달에 아주 좋은 매체
 - 공기: 열전달이 매우 어려운 매체
- 고래가 코끼리보다 훨씬 커질 수 있는 이유는?



열전달

열전달 개요, 전도, 대류

28

전도열전달 계산 예

- 두께 0.4m 콘크리트벽
- 외부 50C, 내부 15C
- 열전달률

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

29

학습점검

- 전도열전달 정의
- 전도법칙
- 열전도율
- 자연에서 열전달

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

30

대류열전달

강의목표

- 대류열전달의 정의
- 대류법칙
- 열전달계수
- 기본 계산

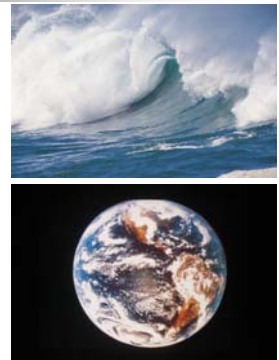
유체(Fluid)

- 유체: 흐르는 물체
- 작은 힘에도 변형하는 물체
- 기체, 액체



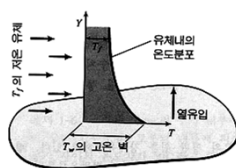
대류(convection)

- 유체 덩어리의 이동
- 태풍
- 파도
- 선풍기
- 자연대류, 강제대류



대류열전달

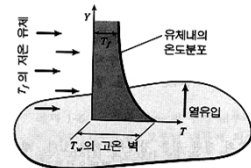
- 대류(heat convection)
- 대류열전달: 고체표면과 유체 덩어리 사이의 열전달 기구
- 표면적에 비례하는 현상
- 공(에너지)을 가지고 다른 사람(분자)에게 배달



대류의 기본 법칙

- Newton의 냉각법칙
- 표면과 유체 사이의 열전달률[W]의 관계
- 열전달계수 h [W/m²·K]
- Newton의 천재성

$$Q = Ah(T_w - T_f) \quad [W]$$



열전달계수의 의미는?

- 열전달이 활발한 정도를 나타내는 계수
- 물성치: 밀도, 경도, 점성계수, 열확산계수, 탄성계수
- 영향을 주는 인자: 유체종류, 속도, 성질, 고체형상
- 영향을 주지 않는 인자: 고체 재료, 표면적, 온도, [온도차]

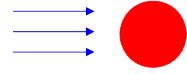
열전달

열전달 개요, 전도, 대류

37

열전달계수에 미치는 인자

- 가상실험
- 수[면적]의 변화
- 온도차 크기의 변화
- 온도차 방향 변화
- 유체 종류의 변화
- 재료변화



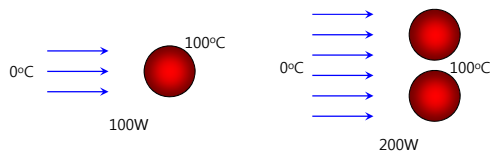
열전달

열전달 개요, 전도, 대류

38

열전달계수-면적 변화

- 수[면적]의 변화



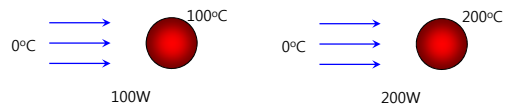
열전달

열전달 개요, 전도, 대류

39

열전달계수-온도차 변화

- 온도차 크기의 변화



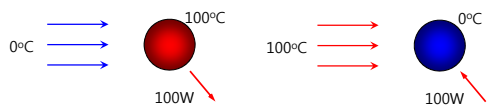
열전달

열전달 개요, 전도, 대류

40

열전달계수-온도차의 방향

- 온도차 방향의 변화



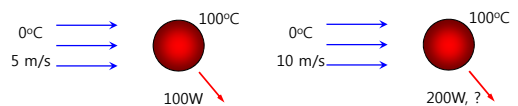
열전달

열전달 개요, 전도, 대류

41

열전달계수-유체의 속도변화

- 유체 속도의 변화: 저속 < 고속 (?)



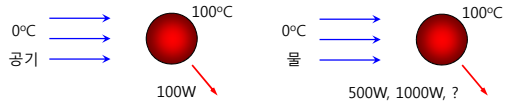
열전달

열전달 개요, 전도, 대류

42

열전달계수-유체의 종류

- 유체 종류의 영향: 공기 << 물



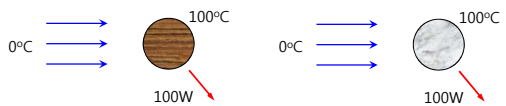
열전달

열전달 개요, 전도, 대류

43

열전달계수-고체의 재질

- 고체 재질의 변화



열전달

열전달 개요, 전도, 대류

44

열전달계수의 특징 정리

- 유체의 종류와 유동 특성에 따라 변화
- 고체의 형상에 관련
- 고체의 재료와는 무관
- 고체 내부에서의 열전달 현상 → 전도열전달 문제
- 온도차에 비례

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

45

열전달계수의 대표적인 값

- 물 > 공기
- 고속 > 저속
- 소형 > 대형

표 1-1 대류열전달계수 h의 대표적인 값

자연대류, $\Delta T = 25^\circ\text{C}$	$h, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
0.25m의 수직판	
대기	5.0
액진오일	37.0
물	440.0
바람지름 0.02m의 수평원통	
대기	8.0
액진오일	62.0
물	741.0
바람지름 0.02m의 구	
대기	9.0
액진오일	60.0
물	606.0
강제대류	
길이 $L = 0.5\text{m}$ 의 평판 위에	
속도 $v = 10\text{m/s}$ 로 흐르는	
25°C의 공기	17.0
바람지름 1cm의 원통을 가로	
지르는 $v = 5\text{m/s}$ 의 흐름	
대기	85.0
액진오일	1,800.0
안지름 2.5cm 관내의	
1kg/s의 물의 흐름	10,500.0

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

46

대류열전달 계산 예

- 길이 1m, 지름 0.02m 수평원통
- 원통 온도 50°C, 대기 15°C
- 열전달율

표 1-1 대류열전달계수 h의 대표적인 값

자연대류, $\Delta T = 25^\circ\text{C}$	$h, \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
0.25m의 수직판	
대기	5.0
액진오일	37.0
물	440.0
바람지름 0.02m의 수평원통	
대기	8.0
액진오일	62.0
물	741.0
바람지름 0.02m의 구	
대기	9.0
액진오일	60.0
물	606.0
강제대류	
길이 $L = 0.5\text{m}$ 의 평판 위에	
속도 $v = 10\text{m/s}$ 로 흐르는	
25°C의 공기	17.0
바람지름 1cm의 원통을 가로	
지르는 $v = 5\text{m/s}$ 의 흐름	
대기	85.0
액진오일	1,800.0
안지름 2.5cm 관내의	
1kg/s의 물의 흐름	10,500.0

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

47

학습점검

- 대류열전달
- 유체: 액체, 기체
- 분자의 이동에 의한 열 이동
- Newton의 냉각(대류)법칙
- (대류)열전달계수

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

48

복사열전달

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

1

강의목표

- 복사열전달
- 방사
- 흑체
- Stefan-Boltzmann 법칙
- 흡수
- 단위
- SI 단위와 공학단위
- 단위 계산

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

2

복사의 기본법칙

- 열복사(thermal radiation)
 - 물체가 온도에 따라 방출하는 에너지
 - 물통(에너지)을 다른 사람(분자)에게 던지는 것
 - 방사(emission)와 흡수

열전달(1)

2주, 복사 및 단위

3

복사의 기본법칙

- 복사에너지의 방사
 - 흑체의 방사도(흑체의 복사 열속)

$$E = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$
 - 실제물체의 방사 열전달률

$$Q = \epsilon A \sigma T^4 \quad [\text{W}]$$
 - Stefan-Boltzmann 상수

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$$

열전달(1)

2주, 복사 및 단위

4

복사의 흡수

- 복사의 흡수
 - 반사율
 - 흡수율
 - 투과율
 - 방사율
 - 표면물성

$$q_o = \alpha q_i \quad [\text{W/m}^2]$$

열전달(1)

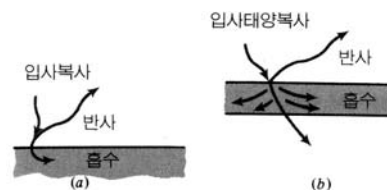
2주, 복사 및 단위

5

복사의 기본법칙

- 복사의 흡수
- 반사율, 흡수율, 투과율, 방사율: 표면물성

$$q_o = \alpha q_i \quad [\text{W/m}^2]$$



열전달(1)

2주, 복사 및 단위

6

단위

단위

- SI 단위계 (Système International d'Unités)
 - 국제표준단위계
- 영국공학단위계 (English Engineering Unit)
 - ft-lb 단위

물리량	SI 단위	영국공학단위
길이	m	ft
질량	kg	lb
시간	s	s
온도	K	R
힘	N	lb _f
에너지	J	Btu, ft·lb _f
동력	W	Btu/hr, HP

쉬어가기

- 펌프 한대 주세요
- 몇 톤짜리?
- 톤이요?
- 몇 m짜리?
- 펌프가 몇 m요?

SI 단위 특징

- 특징
 - 체계적: 길이, 시간, 힘 → 질량 → 일 → 동력 → 전기
 - 과학적: 일, 열, 운동, 위치에너지
 - 계산이 용이: 보정계수가 불필요
- 힘 = 질량 x 가속도

$$1\text{ N} = 1\text{ kg} \times 1\text{ m/s}^2$$
- 일 에너지 = 힘 x 거리

$$1\text{ J} = 1\text{ N} \cdot 1\text{ m}$$
- 동력 = 에너지 / 시간

$$1\text{ W} = 1\text{ J/s}$$

SI 단위

- 길이
 - 지구의 극점에서 적도까지의 길이: 10,000 km
 - 기본단위: m
 - 소문자 m
- 질량
 - 물의 밀도는 4°C에서 최대
 - 한 변의 길이가 0.1 m인 압방체 내의 4°C 물: 1 kg
 - 기본단위: kg, Kg(X), kG(X), KG(X)
- 힘
 - Newton의 제2법칙
 - 기본단위: N
- 압력
 - 단위 면적 당 힘, Pascal
 - 기본단위: Pa, PA(X)

SI 단위

- 에너지
 - 일 에너지 기준, 모든 종류의 에너지
 - Joule의 실험
 - 기본단위: J
- 동력
 - 단위 시간당 에너지, Watt
 - 기본단위: W
- 온도
 - 절대온도: Kelvin
 - 기본단위: K
 - $K = 273.15 + ^\circ\text{C}$
 - 온도차
 - $283.15\text{K} - 273.15\text{K} = 10^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$

온도

- 화씨
 - Mr. Gabriel Fahrenheit
 - 1700초, 독일 온도계 제작자
 - Why 96°F?
 - 최저온도: 얼음+소금, 0°F
 - 최고온도: 체온, 96°F
 - 96/48/24/12
- 섭씨
 - Mr. Anders Celsius
 - 1742년
 - 물의 끓는 점: 100°C
 - 물의 어는 점: 0°C
 - 1948년, 공식적으로 Celsius 온도계 지정
- Kelvin 온도
 - 1800년대 초, William Thomson (Lord Kelvin)
 - 이상기체 팽창계수에 근거
 - 체계적인 온도척도 제시

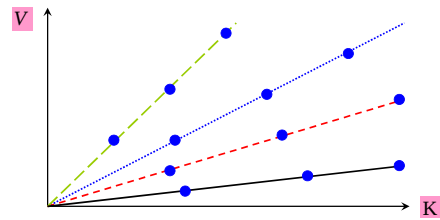
열전달(1)

2주, 복사 및 단위

13

Kelvin 온도

- 실제기체 → 이상기체 거동
- 기체 냉각



열전달(1)

2주, 복사 및 단위

14

단위표시 규칙

접두어

10^{-12}	pico (p)	10	deca (da)
10^{-9}	nano (n)	10^2	hecto (h)
10^{-6}	micro (μ)	10^3	kilo (k)
10^{-3}	milli (m)	10^6	mega (M)
10^{-2}	centi (c)	10^9	giga (G)
10^{-1}	deci (d)	10^{12}	tera (T)

표시규칙

- 사람이름 대문자: N, K, J, W, C, A, Pa
- 중복회피
 - M (접두어), m (길이)
 - G (접두어), g (질량)

열전달(1)

2주, 복사 및 단위

15

단위 환산

단위 묶기

$$10 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 20 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 20 \text{ N}$$

접두어 변환

$$4 \text{ kN} / 50 \text{ m}^2 = 4000/50 \text{ N/m}^2 = 80 \text{ Pa}$$

공학단위 변환

$$\frac{2200 \text{ kcal}}{1 \text{ day}} = \frac{2200 \text{ kcal}}{1 \text{ day}} \left[\frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} \right] \left[\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right] \left[\frac{4180 \text{ J}}{1 \text{ kcal}} \right] = 106 \text{ W}$$

단위의 일관성: 운동에너지

$$\frac{1}{2} \times 10 \text{ kg} \times (20 \text{ m/s})^2 = 2000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{m} = 2000 \text{ N} \cdot \text{m} = 2000 \text{ J}$$

열전달(1)

2주, 복사 및 단위

16

학습점검

- 복사
- 방사와 흡수
- Stefan-Boltzmann의 법칙
- 흑체(blackbody)
- 단위
- 단위환산
- 기본단위: m, kg, s, K
- 표기방법

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

17

집중계해석의 개요

강의목표

- 집중계란 무엇인가?
- 열용량
- 내부에너지
- 집중계 응용

밀도

- 밀도의 정의
- 자신의 몸무게
- 자신의 체적?

비열

- 비열의 정의
- 비열의 단위
- 자신의 비열?

열용량

- 열용량의 정의
- 열용량의 단위
- 자신의 열용량?

내부에너지

- 내부에너지의 정의
- 자신의 내부에너지
- 내부에너지의 기준

엔탈피

- 엔탈피(enthalpy)의 정의
- 자신의 엔탈피?
- 엔탈피의 기준

열전달

집중계해석

7

해석영역의 차원

- 질량 → 질점
- 다차원분포
- 0차원 문제
- 1차원, 2차원, 3차원 문제?

열전달

집중계해석

8

집중계 및 집중계해석

- 집중열용량계(lumped heat capacity system)
- 집중계 해석의 필요성과 중요성

열전달

집중계해석

9

비정상열전달의 응용

- 담금질



열전달

집중계해석

10

비정상 열전달의 개념

- 열에너지(내부에너지) 집중 → 열점
- 집중열용량계 (해석)
- Lumped heat capacity system (analysis)
- 열에너지(내부에너지)가 작은 점에 집중
- 열점(질점) 내의 온도가 균일
- 대장간에서 쇠를 담금질을 하는 과정

열전달

집중계해석

11

비정상열전달의 응용

- 주방기구



열전달

집중계해석

12

집중열용량계의 응용

- 담금질 시간-온도
- 커피 잔이 식는 시간
- 포도송이를 냉장고에서 냉각하는데 걸리는 시간
- 물통에서 물이 빠지는데 걸리는 시간
- 가스보일러 환기 시스템에서 열손실량

집중열용량계의 응용

- 온도 측정에서 온도계의 응답시간
- 습구온도계의 응답속도
- 라디에이터의 열전달계수
- 과학수사

쉬어가기: 과학수사

- 개가 사망한 시간은?

학습점검

- 밀도, 제척
- 내부에너지, 엔탈피
- 열용량
- 내부에너지
- 집중열용량계 해석의 응용

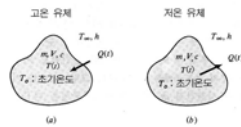
집중계해석 지배방정식

강의목표

- 에너지 보존식
- 지배방정식
- 일반해

집중계해석의 가정

- 고체가 온도가 다른 유체에 갑자기 놓이게 된 경우
- 일의 유출입?
- 열의 유출입?
- 유체온도 일정
- 물성치 일정
- 열전달계수 일정
- 열전달계수 균일



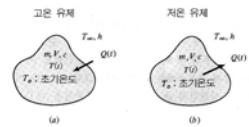
열전달

집중계해석

19

에너지보존식

- 해결하고자 하는 문제
- 열역학 제1법칙



열전달

집중계해석

20

지배방정식

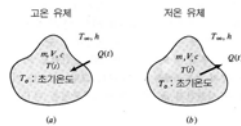
- 미소시간 dt 동안 에너지균형, $t > 0$
 - 내부에너지 변화량 = 대류에 의한 열 유입량

$$\rho V c dT = Ah(T_\infty - T)dt \quad [J]$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{Ah}{\rho V c}(T - T_\infty) = 0$$

- 초기조건, $t = 0$

$$T = T_o$$



열전달

집중계해석

21

지배방정식: 매개변수

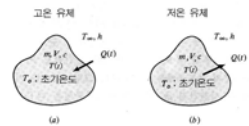
- 미소시간 dt 동안 에너지균형, $t > 0$

$$\rho V c dT = Ah(T_\infty - T)dt \quad [J]$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{Ah}{\rho V c}(T - T_\infty) = 0$$

$$T = T_o$$

- 매개변수 정리



열전달

집중계해석

22

집중계의 온도변화

- 단순화

$$\frac{d\theta}{dt} + m\theta = 0, t > 0$$

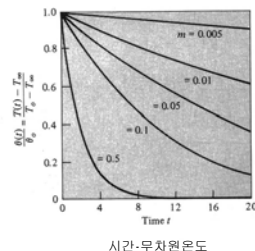
$$\theta = \theta_o, t = 0$$

$$m = \frac{Ah}{\rho V c}, \theta = T - T_\infty$$

- 집중계의 해

$$\theta/\theta_o = e^{-mt}$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty} = e^{-\frac{Ah}{\rho V c}t}$$



시간·무차원온도

열전달

집중계해석

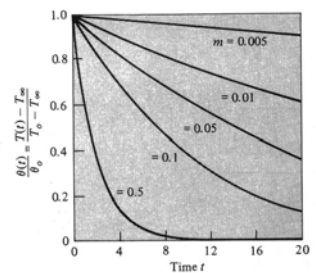
23

응답시간

- 응답시간

$$m = \frac{Ah}{\rho V c} \quad [1/s]$$

$$\tau = \frac{\rho V c}{Ah} \quad [s]$$



시간·무차원온도

열전달

집중계해석

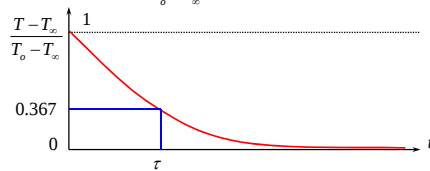
24

응답시간

- 오차율이 36.8%가 되는 시간
- 총변화량의 63.2%가 진행되는 시간
- 대부분의 변화가 일어나는 시간

$$\theta/\theta_o = e^{-t/\tau}$$

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = e^{-1} = 0.367 \quad @ t = \tau$$



열전달

집중계해석

25

쉬어가기: 응답시간

- 형광등이 켜지는데 걸리는 시간?
- 자동차가 정지하는 데 걸리는 시간?
- 커피 잔이 식는데 걸리는 시간?

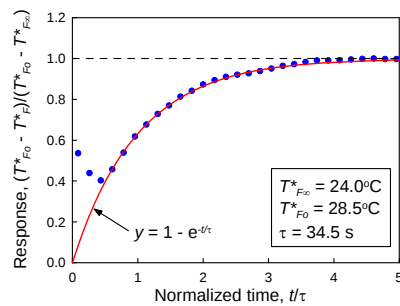
열전달

집중계해석

26

응답시간 예

- 계단입력에 대한 온도변화의 예



열전달

집중계해석

27

집중계해석의 판별

열전달

집중계해석

28

강의목표

- 집중계 해석 판별조건
- Biot수
- 무차원수
- 예제

열전달

집중계해석

29

Biot 수

- Biot 수
- '고체 내부의 열전도 능력'에 대한 '고체표면과 유체 사이의 대류열전달 능력'의 비율

$$Bi = \frac{hL_s}{k_s}, \quad \text{cf) } Nu = \frac{hL_{\text{surface}}}{k_{\text{fluid}}}$$

열전달

집중계해석

30

특성길이

- 체적/표면적
- 철사의 특성길이
- 구의 특성길이

$$L_s = \frac{V}{A}$$

열전달

집중개념서

31

특성길이 (characteristics length)

- 반지름이 R인 구

$$L_s = \frac{V}{A} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{4\pi R^2} = \frac{R}{3}$$

- 반지름이 R, 길이 L 인 원통

$$L_s = \frac{V}{A} = \frac{\pi R^2 L}{2\pi R(L+R)} = \frac{RL}{2(L+R)}$$

열전달

집중개념서

32

특성길이

- 긴 원통 $L \gg R$

$$L_s = \frac{V}{A} = \frac{\pi R^2 L}{2\pi R(L+R)} = \frac{RL}{2(L+R)} \approx \frac{R}{2}$$

- 모서리 L 정육면체

$$L_s = \frac{V}{A} = \frac{L^3}{6L^2} = \frac{L}{6}$$

열전달

집중개념서

33

특성길이

- 면적 A^* 이고, 두께 L 인 큰 평판

$$L_s = \frac{V}{A} = \frac{LA^*}{2A^*} = \frac{L}{2}$$

열전달

집중개념서

34

쉬어가기: 무차원수

- A4용지의 규격

열전달

집중개념서

35

Biot 수의 물리적 의미

- 유체-고체간 대류 열전달 용이성 / 고체 내부 전도 열전달 용이성
- 고체 내부 열전달 저항 / 유체-고체간 열전달 저항

$$Bi = \frac{hL_s}{k_s} = \frac{h}{k_s/L_s}$$

$$Bi = \frac{Ah}{Ak_s} \approx \frac{T_s - T_f}{T_s - T_f} \frac{L_s}{L_s}$$

열전달

집중개념서

36

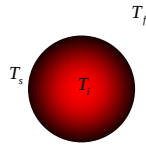
집중열용량계의 판정

- 집중계(열용량계) 판별기준
 - $Bi < 0.1$ 이면 고체 내부의 온도차는 유체-고체 간의 최대 온도차의 5% 이내
 - 고체의 온도는 시간만의 함수로 가정이 가능함

$$Bi = \frac{hL_s}{k_s} < 0.1$$

$$Bi = \frac{Ah}{Ak_s} \approx \frac{T_s - T_i}{T_s - T_f} < 0.1$$

$$T_s - T_i < 0.1(T_s - T_f)$$



예제 2-1 (pp. 24)

- 반지름 $R = 2.5$ cm, $k = 54$ W/m·°C, $\rho = 7833$ kg/m³, $c = 0.465$ kJ/kg·°C의 강구가 공기흐름에 의하여 냉각되고 있다. 공기온도 50°C, 대류열전달계수 $h = 100$ W/m²·°C 일 때, 강구의 온도가 850°C에서 250°C까지 냉각되는데 걸리는 시간을 집중계 해석으로 구하여라.
- 풀이: 집중열용량계 해석

예제 2-2 (pp. 25)

- 반지름 $R = 2.5$ cm, $k = 50$ W/m·°C, $\rho = 7800$ kg/m³, $c = 0.5$ kJ/kg·°C인 강봉을 50°C의 주위유체 내에서 800°C에서 100°C까지 서서히 냉각시킴으로써 풀림처리를 하려고 한다. 주위유체와 강봉 사이의 열전달계수 $h = 45$ W/m²·°C 일 때 집중계 해석을 이용하여 풀림 처리과정에 필요한 시간을 구하여라.
- 풀이: 집중열용량계 해석

예제 2-3 (pp. 26)

- 초기에 균일한 온도 250°C를 갖는 두께 $\ell = 0.1$ m의 알루미늄 평판 [$k = 204$ W/m·°C, $\rho = 2707$ kg/m³, $c = 0.896$ kJ/kg·°C]이 온도 50°C의 공기 흐름에 노출되어 냉각되고 있다. 공기흐름과 알루미늄 평판 사이의 열전달계수 $h = 80$ W/m²·°C 일 때, 이 평판을 100 °C까지 냉각하는데 소요되는 시간을 집중계 해석을 이용하여 구하여라.
- 풀이: 집중열용량계 해석

실습과제

- 대상 선정
- 실험 수행
- 비교인자 선정
- 해석
- 보고서 작성

학습점검

- 집중열용량계
- 집중열용량계의 해
- 집중계 판정
- Biot 수
- $Bi < 0.1$: 집중계 간주 가능

전도방정식의 개요

강의목표

- 에너지보존식
- 전도방정식의 유도
- 전도방정식의 이해
- 단위 및 물리적 의미

에너지 보존식

- 사건 또는 시간에 따라 에너지는 형태가 변화
- 사건 전후 에너지의 총합은 일정
- 에너지 보존
- 에너지는 생성 또는 소멸하지 않음

열용량

- 밀도
- 비열
- 열용량

내부에너지

- 내부에너지
- 물질의 온도(뜨거운 정도)의 형태로 보유한 에너지
- 질량 x 비열 x 온도
- 내부에너지가 크려면?
- 질량
- 비열
- 온도

Fourier Law

- 전도법칙
- 경험식
- 모든 확산(diffuse)은 유사
- 고밀도 → 저밀도
- 열전달률
- 온도차/길이
- 면적
- 열전도율

$$Q = -kA \frac{dT}{dX}$$

내부열발생

- 내부에서 열발생
- 연탄
- 인체
- 내부열생성율
- 열발생율/체적
- 단위 W/m^3

쉬어가기: 인체 열발생률

- 2200 kcal /일 소모
- 체중 65 kg
- 모든 에너지 → 열에너지

$$Q_g = \frac{2200 \text{ kcal}}{1 \text{ day}} = \frac{2200 \text{ kcal}}{1 \text{ day}} \left[\frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} \right] \left[\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right] \left[\frac{4180 \text{ J}}{1 \text{ kcal}} \right] = 106 \text{ W}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{65}{970} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg/m}^3} \right] = 0.0670 \text{ m}^3$$

$$g = \frac{Q_g}{V} = \frac{106}{0.0670} = 1580 \text{ W/m}^3$$

열 이득과 온도변화

- 댐에서 수위 문제
- 급수량 > 배수량 → 수위 상승
- 급수량 = 배수량 → 수위 고정
- 물체의 온도
- 흡열 > 방열 → 온도 상승
- 흡열 = 방열 → 온도 고정

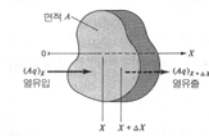
1차원 전도

- Net 질량이란?
- 총질량 - 병의 질량
- 좌우 측의 에너지 균형
- 유입과 유출의 차
- 책의 중간 한장에서 net 전도 열량



1차원 전도방정식 유도

- 내부에너지 = 열전도 이득 + 내부 열 생성

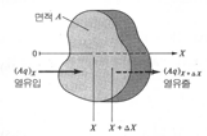


1차원 전도방정식

- 1차원 전도 일반식
- 내부에너지 = 열전도 이득 + 내부 열 생성

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{X^n} \frac{d}{dX} \left[X^n k \frac{dT}{dX} \right] + g \quad [W/m^3]$$

- n 곡률의 수, X 열전도 방향 좌표



학습점검

- 전도에 대한 에너지 균형식
- 내부에너지 증가 = 전도 이득 + 내부 열발생
- 정미의 열전도

전도방정식의 의미

강의목표

- 전도방정식의 확장
- 열확산계수
- 물리적 의미

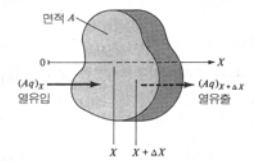
직교좌표계, 원통좌표계, 구좌표계

- 직교, 원통, 구

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + g$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + g$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + g$$



$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{X^n} \frac{d}{dX} \left[X^n k \frac{dT}{dX} \right] + g \quad [\text{W/m}^3]$$

전도방정식 확장 및 적용

- 3차원 전도 (직교좌표계)

- 비열 일정

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + g = k \nabla^2 T + g$$

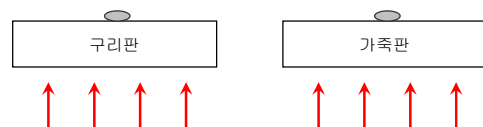
- 1차원 열전도, 직교좌표, 비열일정, 내부열 발생 없음

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

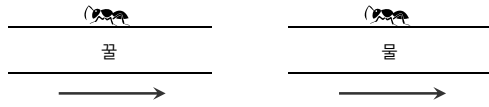
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

- 열확산율 (m^2/s)

열확산계수



동점성계수



확산계수(diffusion coefficient)

- 동점성계수, ν
- 마찰력 전달
- 운동량방정식
- 열확산계수, α
- 열 전달
- 에너지방정식
- 물질확산계수, D
- 물질 전달
- 물질농도방정식

확산계수(diffusion coefficient)

- 공통사항
- 단위: m^2/s
- 무차원수: Pr, Sc
- 확산속도에 관여하는 인자

학습점검

- 전도방정식 확장
- 열확산계수
- 단위
- 물리적 의미

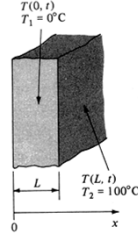
경계조건

강의목표

- 경계조건의 종류
- 온도
- 열속
- 대류
- 경계면에서 열적 조건
- 단열 경계조건
- 열적 대칭

제 1종 경계조건

- 확정된 온도경계조건
- 온도가 정해진 경우
- First kind boundary condition
- 적용의 예
- 일정온도
- 변동온도
- 적용



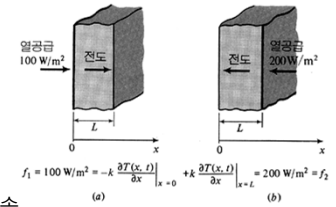
열전달

전도방정식

25

제 2종 경계조건

- 확정된 열속경계조건
- 열속이 정해진 경우
- Second kind boundary condition
- 적용의 예
- 일정열속
- 변동열속
- 적용
- 열속공급=전도열속



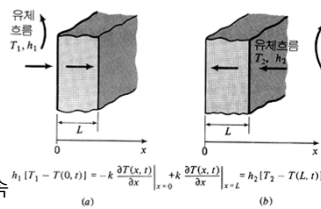
열전달

전도방정식

26

제 3종 경계조건

- 대류 경계조건
- 유체에 노출된 경우
- Third kind boundary condition
- 적용의 예
- 수냉각
- 바람에 의한 가열
- 적용
- 대류열속=전도열속



열전달

전도방정식

27

쉬어가기: 햇볕이 비치는 태양광 패널

- 태양광 패널에서 경계조건
- 전기장판의 경계조건

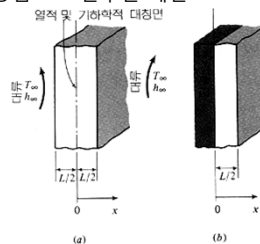
열전달

전도방정식

28

열적 및 기하학적 대칭

- 기하학적 대칭
- 열적 대칭
- 대칭축 중심으로 반구간 계산



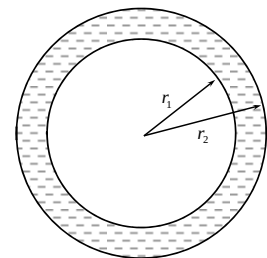
열전달

전도방정식

29

예제 3-1 (pp. 51)

- 안지름과 바깥지름에서 대류 조건인 경우
- 풀이: 경계조건 기술



열전달

전도방정식

30

예제 3-2 (pp. 51)

- 평면벽, $x = 0$ 에서 일정 열속, $x = L$ 에서 대류 경계 조건
- 풀이: 경계조건 기술

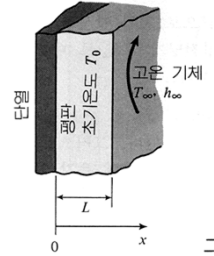
열전달

전도방정식

31

예제 3-5 (pp. 54)

- 물성치 일정, 두께 L , 초기온도 T_0 , $x = L$ 은 기체온도 T_∞ 로 가열, $x = 0$ 은 단열, 열전달계수 h_∞ , 열전달 수식 전개
- 풀이: 수식전개



열전달

전도방정식

32

학습점검

- 전도에 대한 에너지 균형식
- 내부에너지 증가 = 전도 이득 + 내부 열발생
- 직교, 원통, 구 좌표계
- 확산계수: 열전도 속도, m^2/s
- 동점성계수, 물질확산계수
- 경계조건
- 확정 온도, 확정 열속, 대류
- 열적 기하학적 대칭

열전달

전도방정식

33

평면벽 열저항

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

1

강의목표

- 전도열전달 온도분포
- 정상상태, 내부발열 없는 조건
- 평면벽
- 중공원통
- 열저항 정의
- 열저항 개념

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

2

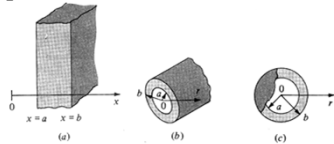
직교좌표계, 원통좌표계, 구좌표계

- 직교, 원통, 구

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + g$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + g$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + g$$



열전달(1)

5주, 전도, 단일층

3

지배방정식

- 직교좌표계

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

- 원통좌표계

$$\frac{d}{dr} \left[r \frac{dT}{dr} \right] = 0$$

- 구좌표계

$$\frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{dT}{dr} \right] = 0$$

열전달(1)

5주, 전도, 단일층

4

평면벽-온도분포

- 지배방정식

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

- 경계조건

$$T = T_1 \quad x = 0$$

$$T = T_2 \quad x = L$$

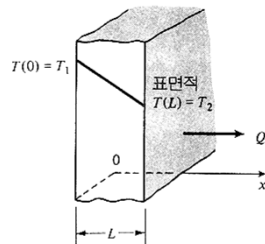
- 적분

$$T = C_1 x + C_2$$

- 경계조건 대입

$$T_1 = C_2$$

$$T_2 = C_1 L + C_2$$



열전달(1)

5주, 전도, 단일층

5

평면벽-열속

- 온도분포

$$T = \frac{T_2 - T_1}{L} x + C_1$$

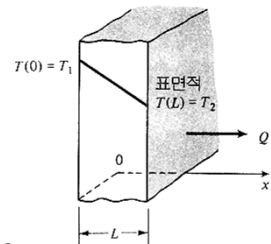
- 열속, 열전달률

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

$$q = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$Q = Aq$$

$$= Ak \frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{T_1 - T_2}{L/Ak} \quad [\text{W}]$$



열전달(1)

5주, 전도, 단일층

6

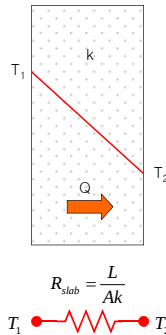
평면벽-열저항

- 내부열원 없는 정상상태

$$Q = Aq = \frac{T_1 - T_2}{L/Ak} = \frac{\Delta T}{R_{slab}}$$

$$R_{slab} = \frac{L}{Ak}$$

- 선형적인 온도분포
- 전열량 - 면적, 온도차에 비례
- 평면벽의 열저항



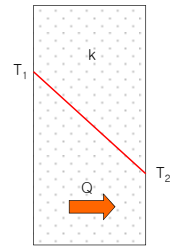
열전달(1)

5주, 전도 단열층

7

쉬어가기: 스티로폼과 구리에서 온도분포

- 온도 차가 같은 경우,
- 구리 ($k=340 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)
- 스티로폼 ($k=0.03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)
- 온도분포가 같은가?
- 무엇이 다른가?
- 왜 그런가?



열전달(1)

5주, 전도 단열층

8

열저항의 개념

- 전기
- 전류-전압-저항 계
- 전기저항

$$I = \frac{\Delta V}{R_e}$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta P}{R_{flow}}$$

- 열전달
- 열량-온도차-열저항 계
- 열저항

$$\dot{m}_w = \frac{\Delta W}{R_{vapor}}$$

- Driving Potential - Resistance

$$Q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

열전달(1)

5주, 전도 단열층

9

열저항의 개념

- 물흐름
- 유량-차압-유동저항 계
- 유동저항

$$I = \frac{\Delta V}{R_e}$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta P}{R_{flow}}$$

- 열전달
- 열량-온도차-열저항 계
- 열저항

$$\dot{m}_w = \frac{\Delta W}{R_{vapor}}$$

- Driving Potential - Resistance

$$Q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

열전달(1)

5주, 전도 단열층

10

열저항의 개념

- 물질확산
- 확산량-농도차-확산저항 계
- 확산저항

$$I = \frac{\Delta V}{R_e}$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta P}{R_{flow}}$$

- 열전달
- 열량-온도차-열저항 계
- 열저항

$$\dot{m}_w = \frac{\Delta W}{R_{vapor}}$$

- Driving Potential - Resistance

$$Q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

열전달(1)

5주, 전도 단열층

11

학습점검

- 전도열전달의 적용
- 평면벽
- 열저항의 정의
- 흐름량, 잠재력, 저항의 개념
- 열저항과 전기저항의 비교

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

12

대류열저항

강의목표

- 평면벽, 중공원통의 전도 열저항
- 대류열저항
- 열저항의 응용
- 전도열저항 + 대류열저항의 조합
- 총열저항

평면벽- 일정온도 및 대류 경계조건

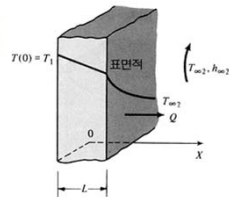
- 평판에서 전도열전달 ($0 < x < L$) = 대류열전달 ($x = L$)
- 열속, 열전달률

$$Q = Ak \frac{T_1 - T_{x=L}}{L} = Ah_{\infty 2} [T_{x=L} - T_{\infty 2}]$$

$$T_1 - T_{x=L} = Q \frac{L}{Ak}$$

$$T_{x=L} - T_{\infty 2} = Q \frac{1}{Ah_{\infty 2}}$$

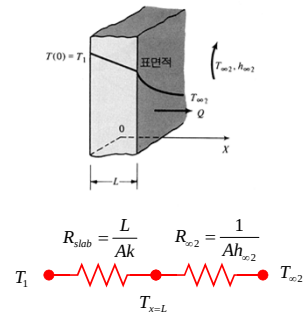
$$Q = \frac{T_1 - T_{\infty 2}}{\frac{L}{Ak} + \frac{1}{Ah_{\infty 2}}}$$



평면벽-대류열저항

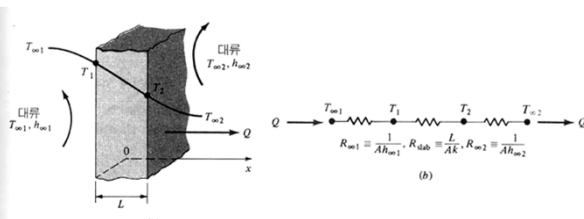
- 전도열저항
- 대류열저항
- 총열저항

$$R_{tot} = R_{slab} + R_{\infty 2} = \frac{L}{Ak} + \frac{1}{Ah_{\infty 2}}$$



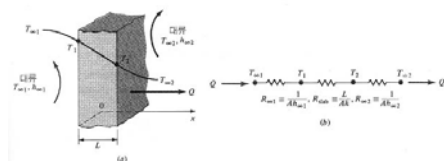
평면벽-양쪽 대류

- 대류열저항 - 전도열저항 - 대류열저항
- 총열저항 $R_{tot} = R_{\infty 1} + R_{slab} + R_{\infty 2} = \frac{1}{Ah_{\infty 1}} + \frac{L}{Ak} + \frac{1}{Ah_{\infty 2}}$



대류-전도-대류 조건

- 직렬회로계
- 열저항은 온도차에 위치
- 각 열저항에서 열 흐름량 일정
- 총열저항 - 양단 온도차
- 내부온도 계산 가능
- 열저항의 추가 및 생략 가능



쉬어가기: 사우나 탕과 목욕탕

- 건식 사우나의 온도?
- 왜 건식 사우나에서 오래 견딜 수 있나?

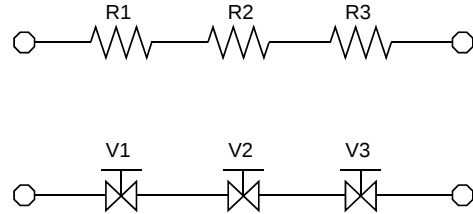
열전달(1)

5주, 전도 단일층

19

다중 밸브 시스템

- 열저항과 급수설비 비교



열전달(1)

5주, 전도 단일층

20

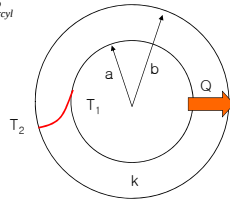
원통에서 온도분포

- 내부열원 없는 정상상태

$$Q = Aq = \frac{T_1 - T_2}{\ln(b/a)/2\pi kH} = \frac{\Delta T}{R_{cyl}}$$

$$R_{cyl} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi kH}$$

- 지수적인 온도분포
- 열속 - 반경에 반비례
- 원통벽의 열저항



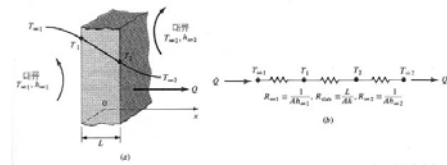
열전달(1)

5주, 전도 단일층

21

대류-전도-대류 조건

- 평면벽 양단에 대류조건
- 대류열저항 - 전도열저항 - 대류열저항으로 구성
- 직렬회로계
- 열저항은 온도차에 위치



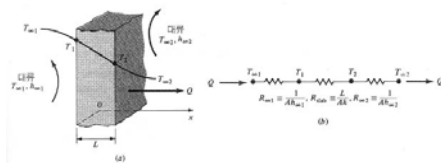
열전달(1)

5주, 전도 다중층

22

대류-전도-대류 조건

- 각 열저항에서 열 흐름량 일정
- 열전달량 = (양단 온도차)/총열저항
- 내부온도 계산 가능 - 열전달에 대한 모든 정보 계산 가능
- 열저항의 추가 및 생략 가능



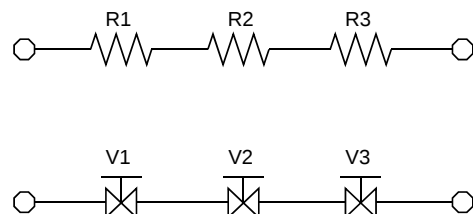
열전달(1)

5주, 전도 다중층

23

다중 밸브 시스템

- 열저항과 급수설비 비교



열전달(1)

5주, 전도 다중층

24

예제 4-1 (pp. 66)

- 두께 0.2 m, 벽돌벽, 온도 30°C 및 -20°C, 정상상태열속
- 풀이: 열저항

예제 4-2 (pp. 66)

- 두께 0.5 cm, 창유리, 내부온도 20°C 공기와 대류 ($h = 15 \text{ W/m}^2\text{°C}$), 외부온도 -15°C 공기와 대류 ($h = 50 \text{ W/m}^2\text{°C}$), 유리표면온도
- 풀이: 전도열저항, 대류열저항

학습점검

- 평면벽의 온도분포
- 원통에서 온도분포
 - 지수적인 온도분포
 - 열속 - 반경에 반비례
- 전도 열저항
 - 평면벽
 - 원통
- 대류열저항

$$R_{\text{slab}} = \frac{L}{Ak}$$

$$R_{\text{cyl}} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi kH}$$

$$R_{\text{c1}} = \frac{1}{Ah_{\text{c1}}}$$

다중층 열저항

강의목표

- 다중층에서 열저항
- 총열저항
- 총괄열전달계수

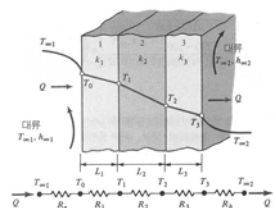
대류-다중층-대류 조건

- 대류1-전도1-전도2-전도3-대류2 시스템
- 총열저항

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{tot}}}$$

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{c1}} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{c2}}$$

$$R_{\text{tot}} = \sum_i R_i$$



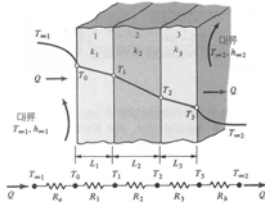
다중층 열전달량

열전달량

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{tot}}}$$

$$R_{\text{tot}} = R_{\infty 1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\infty 2}$$

$$R_{\text{tot}} = \sum_i R_i$$



열전달(1)

5주, 전도 다중층

31

예제 4-9 (pp. 77)

- 단열 복합이중 유리창, 두께 5 mm, 창유리, 10 mm 정체층, 유리 열전도율 0.78 W/m°C, 공기 열전도율 0.025 W/m°C, 유리창 내외부 공기의 열전달계수 내부 ($h = 10 \text{ W/m}^2\text{°C}$), 외부 ($h = 50 \text{ W/m}^2\text{°C}$)
- (a) 온도차 60°C, 열속, (b) 5 mm 유리의 단일층 일 때, (c) 공기 정체층이 없을 때
- 풀이: 전도열저항, 대류열저항

열전달(1)

5주, 전도 다중층

32

쉬어가기: 이중유리창의 효율성

- 단열 효과
- 그 이외의 효과들은?

열전달(1)

5주, 전도 단일층

33

총괄열전달계수의 개념

- 전도, 대류, 복사의 여러 열전달 기구가 복합적으로 작용

$$Q = UA\Delta T$$

- 오염 및 접촉열저항 관여

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{tot}}}$$

- 복수 전도 층이 존재

- 열전달계수의 개념

$$U = \frac{1}{AR_{\text{tot}}}$$

- 열교환기 설계의 중요인자

- 총괄열전달계수는 기준 면 또는 면적의 지시가 필요

열전달(1)

5주, 전도 다중층

34

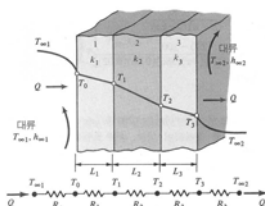
다중층에서 총괄열전달계수

총열저항

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{tot}}} = UA\Delta T$$

$$R_{\text{tot}} = R_{\infty 1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\infty 2}$$

$$R_{\text{tot}} = \sum_i R_i$$



열전달(1)

5주, 전도 다중층

35

학습점검

- 열저항
- 전도열저항
 - 평면벽
 - 원통벽
- 대류열저항
- 총열저항
- 복잡한 문제를 단순화/체계화
- 열저항, 열전달량 (열속), 온도
- 총괄열전달계수
 - (대류)열전달계수와 같은 형태로 표시
 - 대상 면적의 지시가 필요

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

36

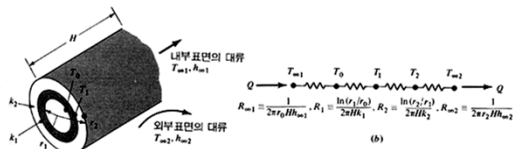
열저항의 계산

강의목표

- 2중 원통에서 열전달
- 전도열저항
- 대류-전도-대류열저항
- 총괄열전달계수
- 2중 원통에서 총괄열전달계수
- 응용 문제

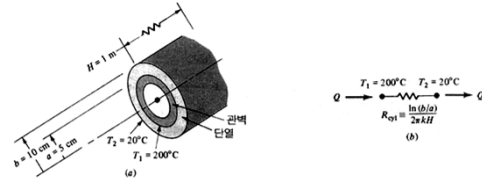
다중층 중공원통

- 2중 원통에서 열전달
- 대류-전도1-전도2-대류
- 대류열저항, 전도열저항
- 총열저항



예제 4-3 (pp. 70)

- 관 길이 1 m 당 열손실
- 풀이: 열저항

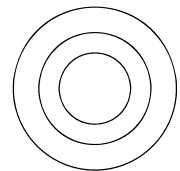


쉬어가기: 원통에서 전도열전달의 단순화

- 중공원통을 펼친다면?

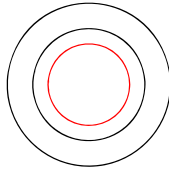
예제 4-10 (pp. 79)

- 2중 원통, 내외부 대류, (a) 관 길이 5 m에서 열손실, (b) 각 층에서 온도변화
- 풀이: 다중 열저항



예제 4-11 (pp. 80)

- 2중 원통, 내부 일정온도, 외부 대류, (a) 관 길이 1 m당 열손실, (b) 경계면에서 온도
- 풀이: 다중 열저항



열전달

접촉열저항, 전도형상계수

7

2중 원통에서 총괄열전달계수

- 2중 원통에서 열전달
- 총괄열전달계수
- Overall heat transfer coefficient
- 대류-전도1-전도2-대류
- 대류열저항, 전도열저항

열전달

접촉열저항, 전도형상계수

8

학습점검

- 총괄열전달계수
- 전도, 대류 복합조건
- 단일 열전달계수
- 면적 지정 필요

열전달

접촉열저항, 전도형상계수

9

접촉열저항

열전달

접촉열저항, 전도형상계수

10

강의목표

- 접촉열저항의 원인
- 접촉열저항에 미치는 인자
- 접촉열저항의 응용
- 해결방안
- 예제

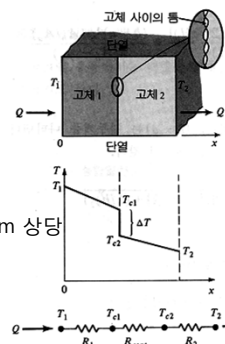
열전달

접촉열저항, 전도형상계수

11

접촉열저항

- 고체경계면
- 높은 열전도율의 고체
- 낮은 열전도율의 기체
- $k_{\text{copper}} = 380 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- $k_{\text{air}} = 0.024 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- $k_{\text{copper}} / k_{\text{air}} = 15,200$
- 공기층 1 mm는 구리 15.2 m 상당



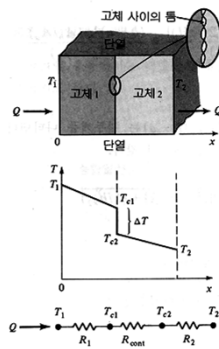
열전달

접촉열저항, 전도형상계수

12

접촉열저항에 미치는 인자

- 재질, 거칠기, 면압
- 온도, 유체



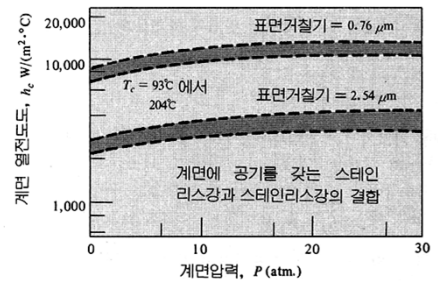
열전달

접촉열저항, 전도형상계수

13

계면열전도도

- 스테인레스 강



열전달

접촉열저항, 전도형상계수

14

쉬어가기: 금속의 내구성

- 구리와 알루미늄

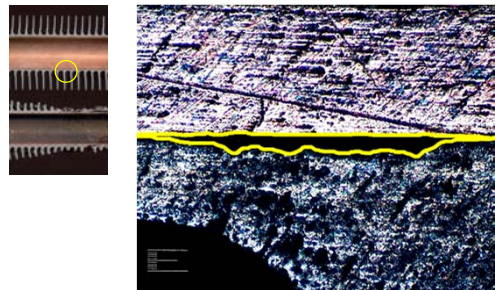
열전달

접촉열저항, 전도형상계수

15

접촉열저항의 예

- 구리-알루미늄 전조 계면, 금속현미경 사진



열전달

접촉열저항, 전도형상계수

16

접촉열저항의 해결

- 용접
- 용착

열전달

접촉열저항, 전도형상계수

17

예제 4-13 (pp. 85)

- 스테인리스 강 ($k = 20 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), 직육면체, 두께 1 cm, 길이 8 cm, 폭 6 cm
- 면압 20 atm, 거칠기 $0.76 \mu\text{m}$, 표면온도 120°C , 70°C
- (a) 열유동율, (b) 계면에서 온도강하
- 풀이: 접촉열저항

열전달

접촉열저항, 전도형상계수

18

학습점검

- 접촉열저항
- 열전도율이 높은 고체 계면(interface)
- 거칠기, 면압, 온도, 재질, 유체의 함수
- 계면 열전도도

전도형상계수

강의목표

- 전도형상계수
- 정의
- 형상에 따른 전도형상계수
- 전도형상계수의 이용
- 예제

전도형상계수

- 2차원, 3차원 형상의 전도열전달
- 편미분방정식 풀이
- 계산 복잡
- 전도형상계수 도입
- 계산 단순화
- 단위 [m]

$$Q = Sk\Delta T$$

평면벽의 전도형상계수

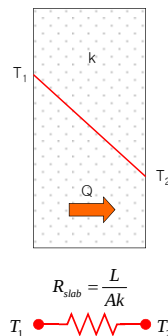
- 열저항

$$Q = Ak \frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{\Delta T}{R_{slab}}$$

$$R_{slab} = \frac{L}{Ak}$$
- 전도형상계수

$$Q = Sk\Delta T$$

$$S = \frac{A}{L}$$



중공원통의 전도형상계수

- 중공원통

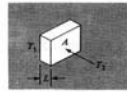
$$Q = Sk\Delta T$$

$$S = \frac{A}{L}$$

전도형상계수 예1

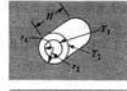
표 4-1 전도형상계수: S 는 $Q = Sk(T_1 - T_2)$ 로 정의됨

1. 평판을 통과하는 1차원 열전도



$$S = \frac{A}{L}$$

2. 긴 원통벽을 통과하는 1차원 열전도



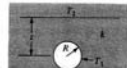
$$S = \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)}$$

3. 줄공구를 통과하는 1차원 열전도



$$S = \frac{4\pi r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

4. 표면온도 T_2 를 갖는 반무한매질 내에 수평으로 놓여 있는 길이 L , 온도 T_1 의 등온 구



$$S = \frac{4\pi R}{1 - R/(2z)}$$

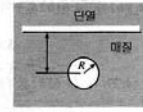
열전달

전복열저항, 전도형상계수

25

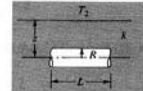
전도형상계수 예2

5. T_2 의 반무한매질 속에 단열 경계면 가까이 놓여 있는 T_1 의 등온 구



$$S = \frac{4\pi R}{1 + R/(2z)}$$

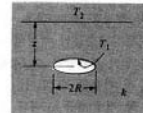
6. 표면온도 T_2 를 갖는 반무한매질 내에 수평으로 놓여 있는 길이 L , 온도 T_1 의 등온 원통



$$L \gg R \text{에 대하여}$$

$$S = \frac{2\pi L}{\cosh^{-1}(z/R)}$$

7. 표면온도 T_2 를 갖는 매질내에 수평으로 놓여 있는 온도 T_1 의 얇은 원판



$$L \gg R \text{에 대하여}$$

$$S = 8R,$$

보다 엄밀하게

$$S = \frac{8.88R}{1 - R/(2.83z)}$$

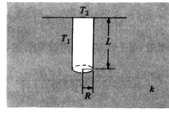
열전달

전복열저항, 전도형상계수

26

전도형상계수 예3

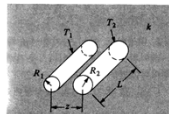
8. 표면온도 T_2 를 갖는 반무한매질 내에 수직으로 놓여 있는 길이 L , 온도 T_1 의 등온 원통



$$S = \frac{2\pi L}{\ln(2L/R)}$$

$$L \gg 2R$$

9. 반무한매질내에 수평으로 놓여 있는 길이 L 의 온도 T_1 와 T_2 의 두 등온 원통



$$L \gg R_1, R_2 \text{에 대하여}$$

$$L \gg z$$

$$S = \frac{2\pi L}{\cosh^{-1}[(z^2 - R_1^2 - R_2^2)/(2R_1 R_2)]}$$

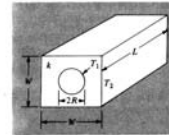
열전달

전복열저항, 전도형상계수

27

전도형상계수 예4

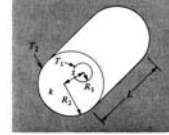
10. 길이 L 를 갖는 사각단면의 고체 구조물에서 중심부 원형 구멍



$$L \gg W \text{에 대하여}$$

$$S = \frac{2\pi L}{\ln(0.54W/R)}$$

11. 길이 L 를 갖는 원통 고체 구조물에서 편심된 원형 구멍



$$L \gg R_2 \text{에 대하여}$$

$$S = \frac{2\pi L}{\cosh^{-1}[(R_1^2 + R_2^2 - z^2)/(2R_1 R_2)]}$$

열전달

전복열저항, 전도형상계수

28

쉬어가기: 모서리에서 열전도

- 알 부화기에서 열전도 문제

열전달

전복열저항, 전도형상계수

29

예제 4-14 (pp. 90)

- 방사성 물질을 포함하는 구형용기, 반지름 1 m, 지면과 중심거리 4 m
- 발생에너지 500 W, 표면온도 20°C, 땅의 열전도율 $k = 1.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, 정상상태 온도
- 풀이: 전도형상계수

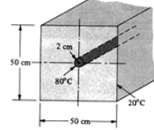
열전달

전복열저항, 전도형상계수

30

예제 4-15 (pp. 90)

- 외경 2 cm 고온 파이프가 단면이 50 cm x 50 cm의 구조물 중심에 위치
- 파이프 온도 80°C, 구조물 온도 20°C, 구조물의 열전도율 $k = 0.76 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, 파이프 단위 길이 당 열손실
- 풀이: 전도형상계수



학습점검

- 전도형상계수 정의
- 전도형상계수의 단위
- 전도형상계수의 이용
- 2차원, 3차원 형상에서 전도
- 계산 단순화

흰의 정의

열전달

흰

1

강의목표

- 흰의 필요성
- 흰의 정의
- 자연과 기계에서 흰

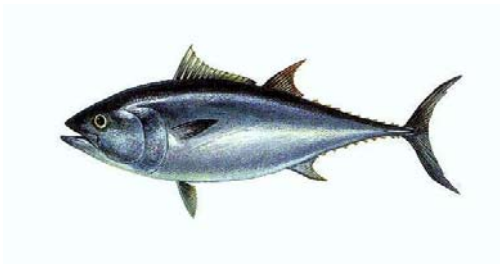
열전달

흰

2

자연에서 흰

- Fin, 지느러미



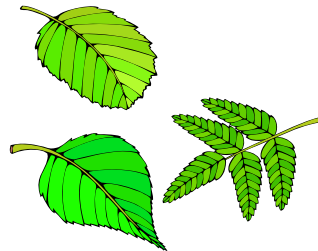
열전달

흰

3

자연에서 흰

- 오리나무, 백양나무, 마가목



열전달

흰

4

자연에서 흰

- 소나무



열전달

흰

5

자연에서 흰

- 나뭇잎
- 광합성 작용
- 산소 이산화탄소 대사
- 수분 증발
- 태양열 흡수



열전달

흰

6

자연에서 흰

■ 코끼리



열전달

흰

7

공룡1

■ 공룡사전, 2002, 황소걸음

디메트로돈 Dimetrodon

“두 종류의 이빨”이라는 뜻이다.
디메트로돈은 페라로사우루스처럼 고령에 달해 완만한 흰
색 배를 띠고, 요추와 목추의 조각이어서 몸통이 아리고, 주
눈이 앞쪽에 있는 이빨은 앞쪽이 크고 작은 갑작스런 앞다리를
대 이빨 양 옆으로 난 이빨은 매우 작다. 날카로운 이빨과 함께
행동도 활발하고 작은 초식 동물에게는 무서운 포식자였다.
다리는 긴 편은 아니지만 세발로 움직일 수 있었다. 등에 있
는 독특한 경골 돌기는 페라로사우루스와 마찬가지로 색조를
조절하는 역할을 할 것으로 보인다. 이 돌기는 태양열을
잘 흡수할 수 있도록 발달하였는데, 길고 가느다란
뼈가 많이 있어 쉽게 휘거나 휘어지지 않았다.
이 돌기가 뻗어 아랫의 원으로 세대를 향해 나
뻗은 돌기를 앞쪽이 디메트로돈은 ‘뿔뿔’
이라고도 한다.
디메트로돈의 화석은 백악기 이전 단계에서 많이
나오는 것으로 보아 아마도 물가에서 살았으며, 물고기 등을
잡아먹었던 것으로 보인다.



열전달

흰

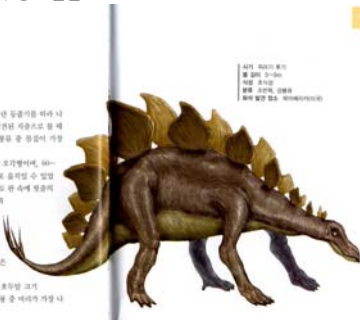
8

공룡2

■ 공룡사전, 2002, 황소걸음

스테고사우루스 Stegosaurus

“가시 도마뱀”이라는 뜻으로, ‘스테고’란 동물기를 피라 나
있는 공룡을 가리키는 말이다. 화석이 발견된 지층으로 볼 때
물 속에서 살았던 것으로 생각되며, 전룡류 중 몸집이 가장
크다.
이 공룡의 특징인 골판은 10~14쌍의 조각형이며, 60~
80cm의 배에 걸쳐서 붙어 있어 양쪽으로 움직일 수 있었
다. 이 골판들은 몸을 지켜 주는 일 외에도 한 곳에 정류하
는 것이 있는 것으로 보아 색조를 조절하
는 수 있는 역할을 한다.
코끼리처럼 배와 뒷 다리로는 가지가
네 개 있는데 목의 공룡을 움직이는
단기였다. 스테고사우루스는 아주 순한
초식 공룡으로 나뭇잎을 먹었으며, 깊은
목에다 먹이를 집어 먹었다.
큰 몸집에 비해 머리가 작고, 네 발 모두 앞뒤로 크게
뻗어 있는 것으로 보아 아마도 물가에서 살았던 공룡 중 하나가 가장 나
쁘고 행동이 느렸을 것이다.



열전달

흰

9

공룡3

■ 공룡사전, 2002, 황소걸음

스피노사우루스 Spinosaurus

“가시 도마뱀”이라는 뜻으
로, 디메트로돈처럼 등에 무릎
같은 돌기가 있다.
아 돌은 작은 돌기가 솟아서 된 것으로 높이가 2m 가까이
된다. 이 돌의 역할은 확실하지 않지만, 물 안에 살았을 때
같은 것으로 보아 색조를 조절하는 역할을 했을 것으로 생각
된다.
몸체가 날렵하고 조흔한 뒷다리가 있어 사냥을 할 때는
세우 빠른 속도로 움직였다.
제리는 약하게 굽혀지고 손목처럼 앞다리를 이용해 나
뻗는다. 이빨의 형태로 보아 물고기나 물 지대에 살면서 물고기를
잡아먹었던 것으로 보인다.



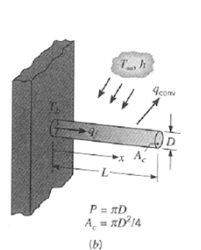
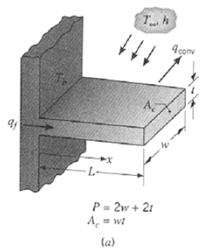
열전달

흰

10

흰(fin) 해석

■ 단면이 일정한 흰



열전달

흰

11

학습점검

- 확장 표면
- 열전달의 증대를 목적
- 자연에서 흰의 이용

열전달

흰

12

핀효율

열전달

핀

13

강의목표

- 핀에서 지배방정식
- 핀에서 온도분포 해석
- 핀효율 정의
- 여러 종류 핀의 핀효율

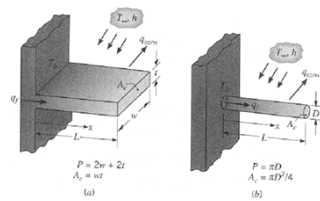
열전달

핀

14

핀 해석에서 기본가정

- 일차원 열전도
- 유체의 온도는 일정
- 열전달계수 균일



열전달

핀

15

핀(fin) 해석

- 핀 온도분포
 - 열전도율: k
 - 면적: A
 - 접수길이: P
 - 유체-핀 간 열전달계수: h
 - 유체온도: T_∞
 - 열속: q

$$-\frac{d(qA)}{dx} \Delta x + h[T_\infty - T]P \Delta x = 0$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{hP}{Ak} [T - T_\infty] = 0$$

열전달

핀

16

핀(fin) 해석

- 핀 온도분포

$$-\frac{d(qA)}{dx} \Delta x + h[T_\infty - T]P \Delta x = 0$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{hP}{Ak} [T - T_\infty] = 0$$

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 \theta = 0, \quad m^2 = \frac{hP}{kA_c}, \quad \theta = T - T_\infty$$

$$\theta/\theta_b = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL}, \quad \theta_b = T_b - T_\infty$$

열전달

핀

17

핀효율(fin efficiency)

- 핀 표면전체가 기저부의 온도와 같을 경우 열전달에 대한 실제 열전달의 비율
- 핀의 열전도율이 높고 두꺼운 핀
 - 핀효율 증가
 - 열전달량의 증가
 - 재료비 상승

$$\eta_f = \frac{\text{Actual heat transfer}}{\text{Maximum heat transfer}}$$

$$= \frac{q_f}{q_{\max}}$$

$$= \frac{\tanh mL}{mL}$$

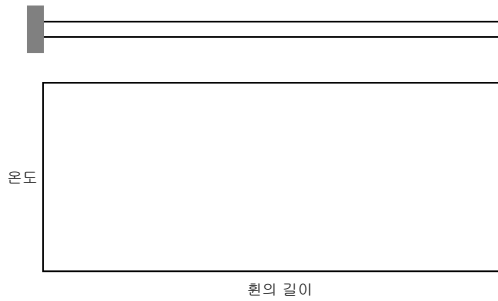
열전달

핀

18

회효율의 의미

- 회의 무차원평균온도

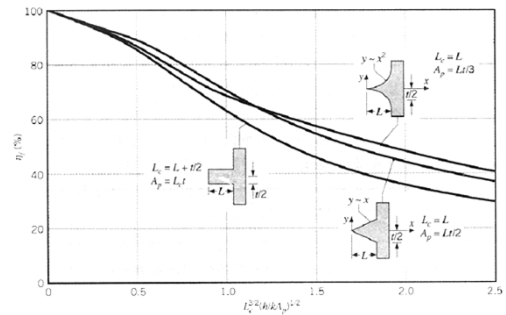


열전달

회

19

회효율 (1)

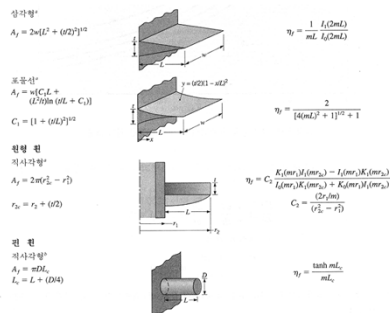


열전달

회

20

회효율 (2)



열전달

회

21

회과 기저부에서 열전달

- 총 열전달 = 기저부에서 열전달 + 회에서 열전달
- 기저부에서 열전달
 - 회효율 100%
 - Newton의 냉각법칙 적용
- 회에서 열전달
 - 회효율 고려
 - Newton의 냉각법칙 적용

열전달

회

22

학습점검

- 회: 열전달량 증대 목적
- 열전달계수 증대 가능
- 회효율의 정의
- 실제 열전달율 / 최대 가능 열전달율
- 최대 열전달: 회의 온도가 기저부와 동일할 경우
- 회에서 열전달 계산
- 기저부에서 열전달 + 회에서 열전달

열전달

회

23

회의 설계

열전달

회

24

강의목표

- 환에서 열전달
- 환효율 계산법
- 전체 열전달량의 계산
- 기저부 + 환

열전달

핀

25

여러 형상의 환

- 열전달계수 향상

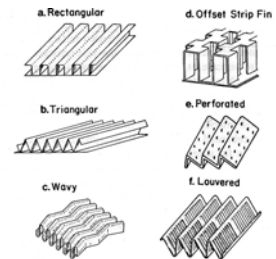


Figure 5.2 Plate-fin exchanger surface geometries. (a) Plain rectangular fins. (b) Plain triangular fins. (c) Wavy fins. (d) Offset strip fins. (e) Perforated fins. (f) Louvered fins. (From Webb [1987].)

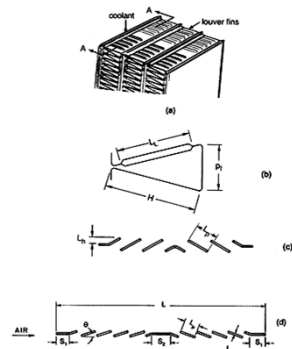
열전달

핀

26

환의 이용

- 자동차 라디에이터



열전달

핀

27

예제

- 사각단면 환, 구리판
- 풀이: 환효율 계산, 식을 이용

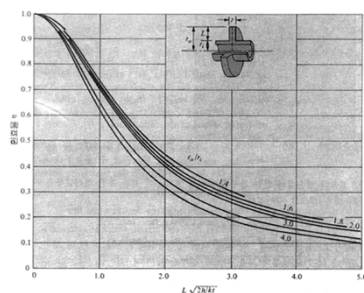
열전달

핀

28

예제

- 알루미늄 원형 환
- 풀이: 환효율 계산, 그래프 이용



열전달

핀

29

예제

- 핀 환
- 풀이: 환효율 수식 이용

열전달

핀

30

학습점검

- 환에서 총열전달
- 환효율
- 그래프를 이용한 계산
- 식을 이용한 계산
- 총열전달=기저부에서 열전달 + 환에서 열전달
- 환의 이용

기초 열전달 계산

강의목표

- 열전달 기초문제 실습

예제 1-1 (pp. 4)

- 두께가 25 cm 이고 열전도율이 $0.69 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 인 벽돌 담이 한 표면은 20°C 로 다른 표면은 10°C 로 유지되고 있다. 이 벽의 표면적이 5 m^2 이라고 할 때 열유동률을 구하시오.
- 풀이: 전도법칙, 표

예제 1-2 (pp. 4)

- 창유리의 내외부 표면온도가 각각 20°C 와 -5°C 이다. 유리의 크기는 $100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$, 두께가 1.5 cm, 열전도율이 $0.78 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 라고 할 때, 이 유리를 통한 2시간 동안 열손실을 구하시오.
- 풀이: 전도법칙, 단위계산

예제 1-3 (pp. 5)

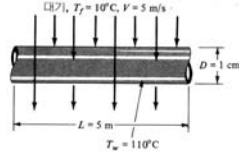
- 열전도율이 $0.05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 인 유리섬유 재질을 단열판으로 사용하여 단열판 양단이 온도차가 150°C 일 때 열손실이 100 W/m^2 을 넘지 않으려고 한다. 이 경우 단열판의 두께를 구하시오.
- 풀이: 전도법칙, 단위계산

예제 1-4 (pp. 8)

- 온도 10°C 의 저온 공기가 온도 40°C 의 고온 평판 위를 흐른다. 평균 열전달 계수 $h_m=30 \text{ W/m}^2\text{C}$ 이다. 평판의 표면적 $A=2 \text{ m}^2$ 을 통하여 평판에서 공기로 전달되는 열유동률을 구하시오.
- 풀이: 냉각법칙

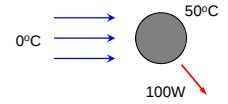
예제 1-5 (pp. 9)

- 온도 10°C 의 대기가 속도 5 m/s 로 바깥지름 1 cm , 길이 5 m , 표면온도 110°C 의 관 위를 흐른다. 관 표면으로부터 대기로 전달되는 열유동률을 구하시오.
- 풀이: 냉각법칙, 표



예제 1-6 (pp. 9)

- 지름 10 cm 인 구가 내부에 설치된 100 W 의 히터로 가열된다. 이 구의 외부 표면은 공기로 열을 발산한다. 구와 외부 공기의 온도차가 50°C 라고 할 때 공기와 구 사이의 대류열전달계수 $[\text{W}/\text{m}^2\text{C}]$ 를 구하시오.
- 풀이: 냉각법칙



예제 1-9 (pp. 13)

- 온도 20°C 의 흑체가 100°C 까지 가열되었다. 방사도의 증가를 구하시오.
- 풀이: Stefan-Boltzmann법칙

이중 유리창

강의목표

- 다중층 열전달
- 이중 유리창의 효과

예제 4-9 (pp. 77)

- 단열 복합이중 유리창, 두께 5 mm , 창유리, 10 mm 정체층, 유리 열전도율 $0.78\text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$, 공기 열전도율 $0.025\text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$, 유리창 내외부 공기의 열전달계수 내부 ($h = 10\text{ W}/\text{m}^2\text{C}$), 외부 ($h = 50\text{ W}/\text{m}^2\text{C}$)
- (a) 온도차 60°C , 열속, (b) 5 mm 유리의 단일층 일 때, (c) 공기 정체층이 없을 때
- 풀이: 전도열저항, 대류열저항

임계단열반경

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

13

강의목표

- 임계단열반경의 정의
- 임계단열반경의 이용
- 예제

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

14

임계단열반경

열전달(1)

5주, 전도 다중층

15

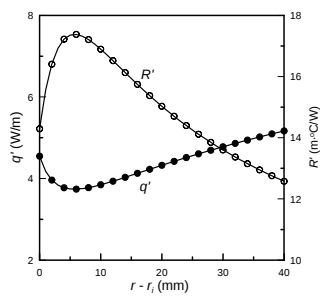
임계단열반경 예제 문제

열전달(1)

5주, 전도 다중층

16

임계단열반경 예제 문제



열전달(1)

5주, 전도 다중층

17

내부에서 열 발생이 있는 고체의 응용

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

1

강의목표

- 발열고체
- 적용의 예
 - 평면벽
 - 정상상태 열전도
 - 해석적 해
 - 일정온도분포
 - 열전달량

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

2

발열고체-연탄

- 연탄



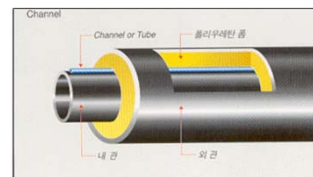
열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

3

발열고체-열선

- 동파방지 배관



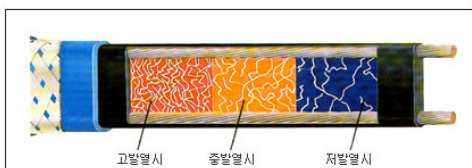
열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

4

발열고체-정온전선

- 발열전선
 - 정온전선
 - 발열선



열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

5

발열고체-면상발열체

- 반도체 흑연 발열필름
- PET Film에 흑연을 도포



열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

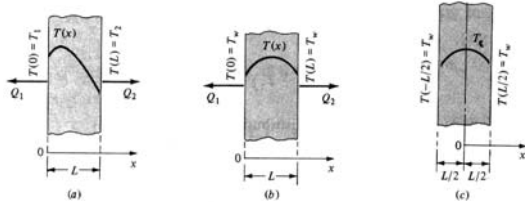
6

에너지 발생이 있는 평면벽

- 에너지발생
- 정상상태

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + g$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + g$$



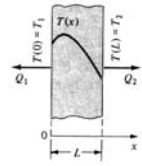
열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

7

평면벽-확정온도, 지배방정식

- 지배방정식
- 경계조건



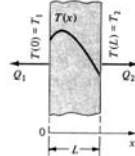
열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

8

평면벽-확정온도, 풀이

- 온도분포
 - 에너지발생이 없는 경우
 - 두 경계면의 온도가 일치 하는 경우



$$T = \frac{gL^2}{2k} \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] + (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1$$

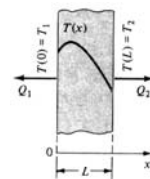
열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

9

평면벽-확정온도, 분석

- 열전달량



열전달(1)

9주, 발열고체 해석해

10

학습점검

- 내부 열발생, 정상상태
- 응용
- 지배방정식, 일정온도조건
- 평면벽 온도분포
- 열속
- 해석적 해

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

11

대류조건 발열고체

열전달

열전달 개요, 전도, 대류

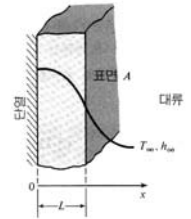
12

강의목표

- 발열고체
- 평면벽
- 정상상태 열전도
- 해석적 해
- 대류경계조건
- 열전달량
- 예제

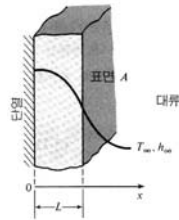
평면벽-대류, 지배방정식

- 지배방정식
- 경계조건



평면벽-대류, 풀이

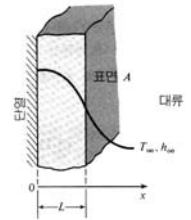
- 온도분포 풀이



$$T = \frac{gL^2}{2k} \left[1 - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] + \frac{gL}{h_c} + T_\infty$$

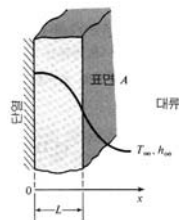
평면벽-대류, 분석

- 열전달계수가 매우 큰 경우



평면벽-대류, 분석

- 열전달계수가 매우 작은 경우



학습점검

- 내부 열발생, 정상상태
- 지배방정식
- 대류경계조건
- 평면벽 온도분포
- 해석적 해
- 열적 기하학적 대칭

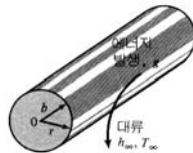
원통 발열고체

강의목표

- 발열고체
- 원통
- 정상상태 열전도
- 해석적 해
- 열전달량
- 예제

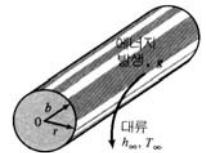
원통-대류, 지배방정식

- 지배방정식
- 경계조건



원통-대류, 풀이

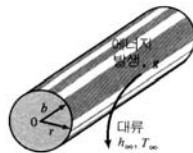
- 온도분포



$$T = \frac{gb^2}{4k} \left[1 - \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right] + \frac{gb}{2h_{\infty}} + T_{\infty}$$

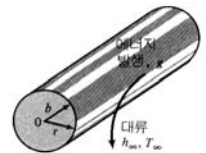
원통-일정온도 조건

- 열전달계수가 매우 큰 경우



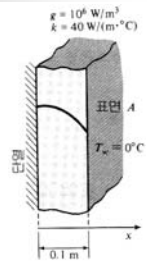
원통-열전달량

- 열전달계수가 매우 작은 경우
- 열전달량



예제 5-1 (pp. 111)

- $L=0.1\text{m}$, $g=10^6\text{W/m}^3$, $k=40\text{W/m}\cdot\text{K}$, $T_w=0^\circ\text{C}$
- 단열 경계면의 온도는?
- 풀이: 해석적 해



예제 5-2 (pp. 115)

- $D=3\text{mm}$, $k=20\text{W/m}\cdot\text{K}$, $g=10^6\text{W/m}^3$, $T_w=100^\circ\text{C}$
- 중심부의 온도는?
- 풀이: 해석적 해

학습점검

- 내부 열발생, 정상상태
- 원통형 발열고체
- 지배방정식
- 해석적 해

발열고체 수치계산

열전달

발열고체 수치계산

1

강의목표

- 고체에서 발열될 때 온도분포는 어떻게 되는지 설명할 수 있다.
- 발열고체에서 온도분포를 대수방정식으로 표시할 수 있다.
- 열전달 해석 결과를 논리적으로 설명할 수 있다.

열전달

발열고체 수치계산

2

발열고체-연탄

- 연탄



열전달

발열고체 수치계산

3

발열고체 문제

- 발열고체에서 온도분포를 알아야 하나?

열전달

발열고체 수치계산

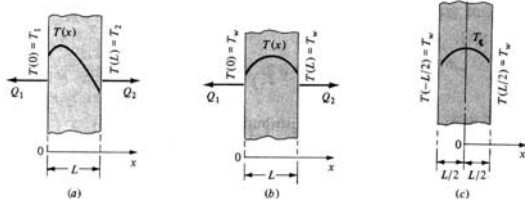
4

에너지 발생이 있는 평면벽

- 에너지발생
- 정상상태

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + g$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + g$$



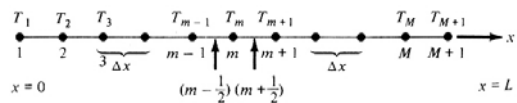
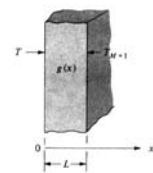
열전달

발열고체 수치계산

5

절점구분

- 내부절점
- 경계절점



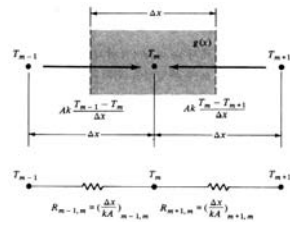
열전달

발열고체 수치계산

6

유한차분식-내부절점

- 유한차분방정식



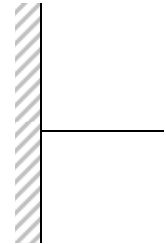
열전달

발열고체 수치계산

7

유한차분식-일정온도조건

- 유한차분방정식



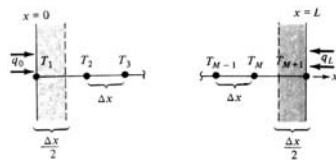
열전달

발열고체 수치계산

8

유한차분식-열속경계조건

- 유한차분방정식



열전달

발열고체 수치계산

9

학습점검

- 열발생, 정상상태
- 수치적 해법
- 절점구분
- 내부절점, 경계절점
- 내부절점에 대한 유한차분방정식
- 경계절점에 대한 유한차분방정식
- 일정온도

열전달

발열고체 수치계산

10

발열고체 수치계산

열전달

발열고체 수치계산

11

강의목표

- 단열경계조건
- 대류경계조건
- 온도분포의 자료가 주워졌다면, 이 자료로부터 열전달에 관한 어떤 량을 구할 수 있나?
- 어떻게 구할 수 있나?

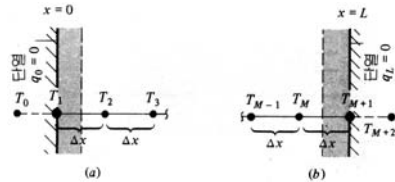
열전달

발열고체 수치계산

12

유한차분식-단열경계조건

- 열속이 0인 조건



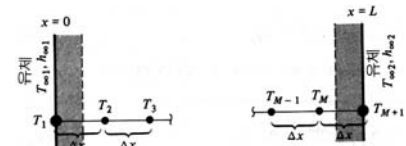
열전달

발열고체 수치계산

13

유한차분식-대류경계조건

- 유한차분방정식



열전달

발열고체 수치계산

14

중요사항

- 열발생, 정상상태
- 수치적 해법
- 절점구분
 - 내부절점, 경계절점
- 내부절점에 대한 유한차분방정식
- 경계절점에 대한 유한차분방정식
 - 일정온도
 - 일정열속, 단열조건
 - 대류조건
- 수치계산
- 예제

열전달

발열고체 수치계산

15

학습점검

- 유한차분방정식
- 일정열속, 단열조건
- 대류조건
- 수치계산

열전달

발열고체 수치계산

16

발열고체 수치계산 실습

열전달

발열고체 수치계산

17

강의목표

- 두께 10cm의 평면벽에서 단위체적당 100kW의 열이 발생 된다.
- 좌우 벽면이 여러 방식으로 냉각된다.
- 온도분포는 어떻게 될까?
- 온도분포를 가장 쉽게 계산하는 방법은?

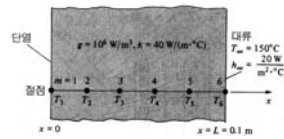
열전달

발열고체 수치계산

18

예제

- $L=0.1\text{m}$, $g=10^6\text{W/m}^3$, $k=40\text{W/m-K}$, 좌측 단열, 우측 대류
- 단열 경계면의 온도는?
- 풀이: 수치적 해



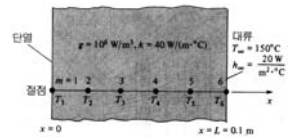
열전달

발열고체 수치계산

19

예제

- 경계절점



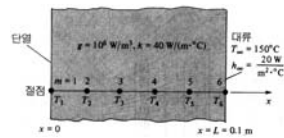
열전달

발열고체 수치계산

20

예제

- 차분방정식



열전달

발열고체 수치계산

21

삼선대각행렬 풀이

표 5-1 N개의 삼선대각선방정식계를 풀기 위한 컴퓨터프로그램

```

1 C**** COMPUTER PROGRAM FOR SOLVING A SYSTEM OF N
2 C SIMULTANEOUS EQUATIONS IN ONE-DIMENSIONAL
3 C HEAT CONDUCTION PROBLEMS, WITH A TRIDIAGONAL
4 C COEFFICIENT MATRIX.
5 C**** EXAMPLE 5-6 ****
6 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
7 DIMENSION A(50,4)
8 NDIM = 50
9
10 C**** READ THE MATRIX [A] AND THE VECTOR [D]
11 C (IN BAND STORAGE MODE) AND STORE THEM IN [A].
12 C N IS THE NUMBER OF ROWS.
13 N = 6
14 DO 10 I = 1,N
15 READ (5,*) (A(I,J), J=1,4)
16 10 CONTINUE
17
18 C**** PRINT THE INPUT DATA FOR CHECKING PURPOSES
19 WRITE (6,20) 'EXAMPLE 5-6'
20 FORMAT (1X,A)
21 DO 40 I = 1,N
22 WRITE (6,30) (A(I,J), J=1,4)
23 30 FORMAT (1X,/T7,3F9.3,G12.4)
24 40 CONTINUE
25 CALL TRIDG(A,N,NDIM)
26 C**** WHEN RETURNED, THE COLUMN VECTOR (A(I,4))
27 C CONTAINS THE SOLUTION.
28 WRITE (6,50)
29 50 FORMAT (1X///T10,'NODE #',5X,'TEMPERATURE'/
30 17X,'FINITE DIFFERENCE')
    
```

열전달

발열고체 수치계산

22

삼선대각행렬 풀이

```

31 C
32 DO 70 I = 1, N
33 IF (A(I,2)*A(I,3) .EQ. 0.000) THEN
34 JP = 1
35 ELSE
36 JP = I + 1
37 ENDIF
38 WRITE (6,60) JP, A(I,4)
39 FORMAT (1X,T8,15,7X,G13.5)
40 70 CONTINUE
41 STOP
42 END
43 C
44 C**** SUBROUTINE TO SOLVE A TRIDIAGONAL OF EQUATIONS
45 SUBROUTINE TRIDG(A,N,NDIM)
46 IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
47 DIMENSION A(NDIM,4)
48 DO 80 I = 2,N
49 A(I,2) = A(I,2) - A(I,1) / A(I-1,2) + A(I-1,3)
50 A(I,4) = A(I,4) - A(I,1) / A(I-1,2) + A(I-1,4)
51 80 CONTINUE
52 NM1 = N - 1
53 A(N,4) = A(N,4) / A(N,2)
54 DO 90 I = 1,NM1
55 M = N - I
56 A(M,4) = (A(M,4) - A(M,3) + A(M+1,4)) / A(M,2)
57 90 CONTINUE
58 RETURN
59 END
    
```

열전달

발열고체 수치계산

23

삼선대각행렬 계산결과

표 5-2 예제 5-6의 수치해

	0.000	-2.000	2.000	-10.00
	1.000	-2.000	1.000	-10.00
	1.000	-2.000	1.000	-10.00
	1.000	-2.000	1.000	-10.00
	1.000	-2.000	1.000	-10.00
	2.000	-2.200	0.000	-40.00
NODE #	FINITE DIFFERENCE		EXACT	
1	775.00		775.00	
2	770.00		770.00	
3	755.00		755.00	
4	730.00		730.00	
5	695.00		695.00	
6	650.00		650.00	

열전달

발열고체 수치계산

24

프로그램 이용 (강의자료 이용)

- 컴퓨터실의 앞쪽 computer 3대에 "C:\ Example.EXE"로 저장되어 있음.
- 또는 해당 PC의 e:\Example.EXE를 설치
- e drive에 "INPUT.DAT"가 있는 디스켓을 넣고,
- e:\ directory에서 'Example'를 실행
- 출력값은 e:\ directory에 'OUTPUT.DAT'로 저장 됨

Input Data

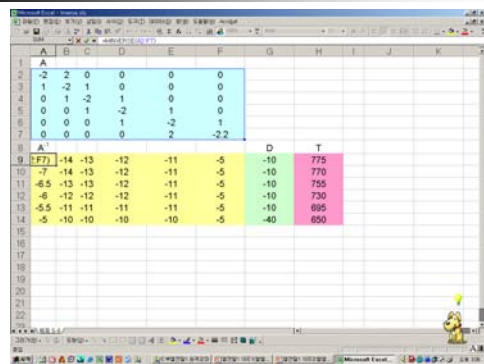
6	: 절점의 수(정수)
0 -2 2 -10	: 계수
1 -2 1 -10	: 계수
1 -2 1 -10	: 계수
1 -2 1 -10	: 계수
1 -2 1 -10	: 계수
2 -2.2 0 -40	: 계수

계수 사이에는 'space' 1칸씩 띄움
format은 free format 임
아래한글 등으로 작성시 text format으로 저장하여야 함
이름은 "INPUT.DAT"
절점의 개수는 300 개 까지 가능 함

Output Data

1	0.7750E+03
2	0.7700E+03
3	0.7550E+03
4	0.7300E+03
5	0.6950E+03
6	0.6500E+03

프로그램 이용2 (Excel 이용)



과제제출

- 문제
- 해석적 해
- 수치적 해
 - 유한차분방정식
 - 행렬식
 - 입력 및 출력 data
- 해석적 해와 수치적 해의 비교
 - $x - T$ graph
 - 계산오차
- 고찰

비정상 열전도 응용 및 기초

열전달

비정상 열전도

1

강의목표

- 비정상 열전도의 응용
- 간단한 형상의 물체를 갑자기 가열(냉각)
- 지배방정식
- 온도분포의 예
- 무한평판의 비정상열전도

열전달

비정상 열전도

2

들판-무한 평판

- 파종 발아에 중요 인자
- 임의의 깊이에서 온도



열전달

비정상 열전도

3

통닭 - 과도열전달



열전달

비정상 열전도

4

소시지 요리 - 과도열전달



열전달

비정상 열전도

5

감자튀김 - 과도열전달

- 감자튀김의 모양
- 온도와 시간



열전달

비정상 열전도

6

참치회 - 과도열전달

- 해동 시 참치의 온도변화



열전달

비정상 열전도

7

내화벽돌 - 과도열전달

- 내화벽돌 모양

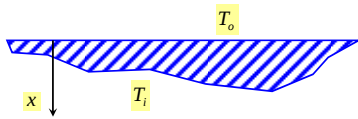
열전달

비정상 열전도

8

갑작스러운 표면온도 변화

- 무한하게 깊은 고체 벽면에 갑자기 다른 온도에 노출



열전달

비정상 열전도

9

반무한 고체에서 과도 열흐름

- 갑작스러운 표면온도 변화

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T = T_0 \quad @ \quad x=0, t>0$$

$$T = T_i \quad @ \quad x \rightarrow \infty, t>0$$

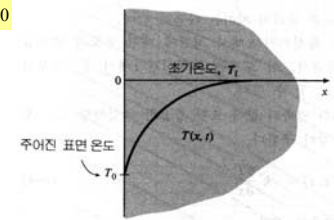
$$\theta = \frac{T - T_0}{T_i - T_0}$$

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$$

$$\theta = \text{erf}(\xi)$$

$$q_s = \frac{k(T_0 - T_i)}{\sqrt{\pi \alpha t}}$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + g$$



열전달

비정상 열전도

10

오차함수

표 D 오차 함수 $\text{erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-y^2} dy$ $\text{erf}(\infty) = 1$

ξ	$\text{erf}(\xi)$	ξ	$\text{erf}(\xi)$	ξ	$\text{erf}(\xi)$	ξ	$\text{erf}(\xi)$	ξ	$\text{erf}(\xi)$
0.00	0.00000	0.75	0.71754	1.52	0.96941	(계속)			
0.02	0.02254	0.76	0.72014	1.54	0.97150				
0.04	0.04511	0.78	0.72281	1.56	0.97363	0.40	0.42839	1.16	0.86010
0.06	0.06768	0.80	0.72548	1.58	0.97575	0.42	0.43759	1.18	0.86934
0.08	0.09025	0.82	0.72814	1.60	0.97786	0.44	0.44679	1.20	0.87858
0.10	0.11282	0.84	0.73081	1.62	0.97996	0.46	0.45599	1.22	0.88782
0.12	0.13539	0.86	0.73347	1.64	0.98206	0.48	0.46519	1.24	0.89706
0.14	0.15796	0.88	0.73614	1.66	0.98416	0.50	0.47439	1.26	0.90630
0.16	0.18053	0.90	0.73881	1.68	0.98626	0.52	0.48359	1.28	0.91554
0.18	0.20310	0.92	0.74147	1.70	0.98836	0.54	0.49279	1.30	0.92478
0.20	0.22567	0.94	0.74414	1.72	0.99046	0.56	0.50199	1.32	0.93402
0.22	0.24824	0.96	0.74681	1.74	0.99256	0.58	0.51119	1.34	0.94326
0.24	0.27081	0.98	0.74947	1.76	0.99466	0.60	0.52039	1.36	0.95250
0.26	0.29338	1.00	0.75214	1.78	0.99676	0.62	0.52959	1.38	0.96174
0.28	0.31595	1.02	0.75481	1.80	0.99886	0.64	0.53879	1.40	0.97098
0.30	0.33852	1.04	0.75747	1.82	0.99996	0.66	0.54799	1.42	0.98022
0.32	0.36109	1.06	0.76014	1.84	0.99996	0.68	0.55719	1.44	0.98946
0.34	0.38366	1.08	0.76281	1.86	0.99996	0.70	0.56639	1.46	0.99870
0.36	0.40623	1.10	0.76547	1.88	0.99996	0.72	0.57559	1.48	0.99994
0.38	0.42880	1.12	0.76814	1.90	0.99996	0.74	0.58479	1.50	1.00000

열전달

비정상 열전도

11

학습점검

- 과도열전도
- 시간에 따라 변화하는 열전도
- 반무한 고체
- 한쪽 표면만 노출된 매우 두꺼운 고체
- 오차함수 이용

열전달

비정상 열전도

12

비정상 열전도 무차원수

열전달

비정상 열전도

13

학습목표

- 비정상 열전도 관련 무차원수
- 무한평판에 갑작스런 열적 조건이 작용
- 해석방법

열전달

비정상 열전도

14

무차원수

$$\theta = \frac{T - T_o}{T_i - T_o} : \text{무차원 온도}$$

$$X = \frac{x}{L} : \text{무차원 좌표}$$

열전달

비정상 열전도

15

무차원수

$$Bi = \frac{hL}{k} = \frac{\text{고체표면 대류}}{\text{고체내부 전도}} : \text{Biot수}$$

열전달

비정상 열전도

16

무차원수

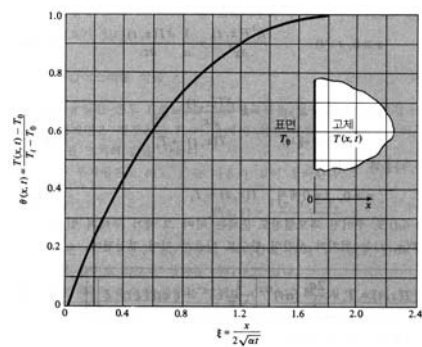
$$\tau = \frac{at}{L^2} = \frac{\text{전도열전달}}{\text{열저장}} : \text{Fourier수, 무차원 시간}$$

열전달

비정상 열전도

17

갑작스러운 표면온도 변화



열전달

비정상 열전도

18

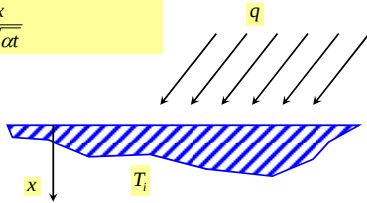
갑작스러운 표면열속 변화

- 무한하게 깊은 고체 벽면에 갑자기 열속이 주어짐

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 \quad @ x=0, t>0$$

$$T \rightarrow T_i \quad @ x \rightarrow \infty, t>0$$

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$$



열전달

비정상 열전도

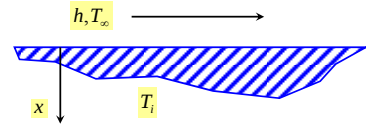
19

갑작스러운 대류열전달 변화

- 무한하게 깊은 고체 벽면에 갑자기 대류에 노출

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$$

$$T = T_i + \frac{2q_0}{k} (\alpha t)^{1/2} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} + \xi \text{erf}(\xi) - \xi \right]$$

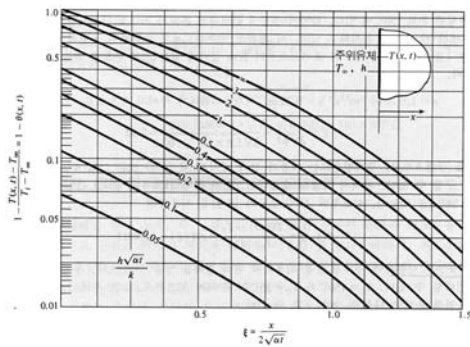


열전달

비정상 열전도

20

갑작스러운 대류열전달 변화

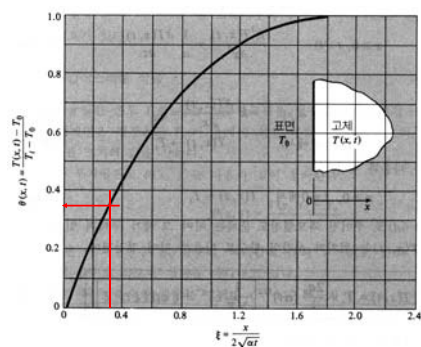


열전달

비정상 열전도

21

갑작스러운 표면온도 변화 (Fig 6-2)



열전달

비정상 열전도

22

예제 6-2 (pp. 150)

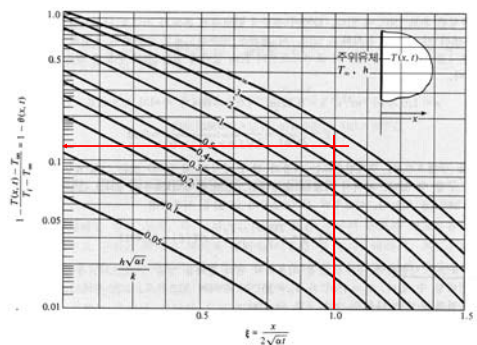
- 두꺼운 콘크리트, 초기온도 340C, 한 면이 40C 공기에 대류작용
- 1시간 후 깊이 10cm의 온도
- 풀이: 그림

열전달

비정상 열전도

23

갑작스러운 대류열전달 변화 (Fig 6-3)



열전달

비정상 열전도

24

학습점검

- 무한평판 과도 열전달
- 무차원수
- Biot 수
- 대류에 대한 전도 열저항의 비
- Fourier 수
- 무차원 시간
- 표와 Graph
- 온도, 열전달량

열전달

비정상 열전도

25

평판과 원통에서 비정상 열전달

열전달

비정상 열전도

26

학습목표

- 평판에 갑작스런 열적 조건이 작용
- 해석방법

열전달

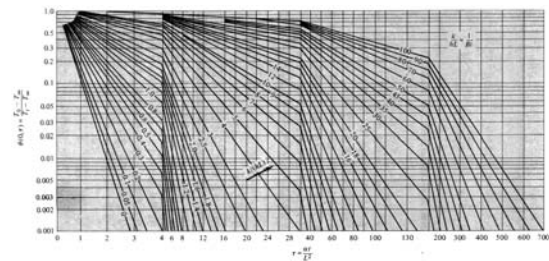
비정상 열전도

27

평판에 대한 과도온도 도표

- 중앙면에서 무차원 온도

$$h \frac{\partial T}{\partial x} = k(T - T_\infty) \quad \text{at } x = 0 \quad \text{and} \quad h \frac{\partial T}{\partial x} = k(T - T_\infty) \quad \text{at } x = L$$



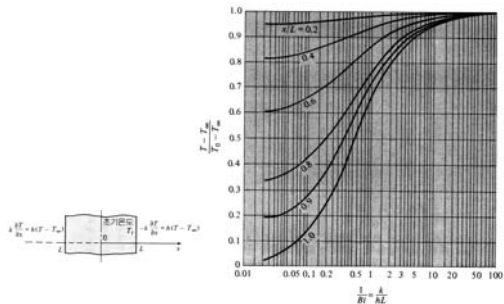
열전달

비정상 열전도

28

평판에 대한 과도온도 도표

- 위치수정



열전달

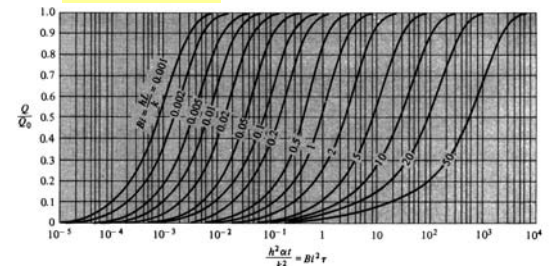
비정상 열전도

29

평판에 대한 무차원 열전달량

- 두께 2L의 평판에 대한 무차원 열전달량 Q/Q_0 .

$$Q_0 = \rho c_p V (T_s - T_\infty)$$



열전달

비정상 열전도

30

예제 6-1

- 스테인레스 강판의 초기온도 150C, 한면을 갑자기 20C에 노출
- 60초 후 깊이 2cm에서 온도와 열속
- 풀이: 그림 및 열전달식

열전달

비정상 열전도

31

예제 6-3

- 두께 10cm 강판의 초기온도 240C, 갑자기 40C 기름으로 냉각
- (a) 중앙면이 100C가 되는 시간, (b) 3cm 깊이의 온도, (c) 열량
- 풀이: 그림 이용

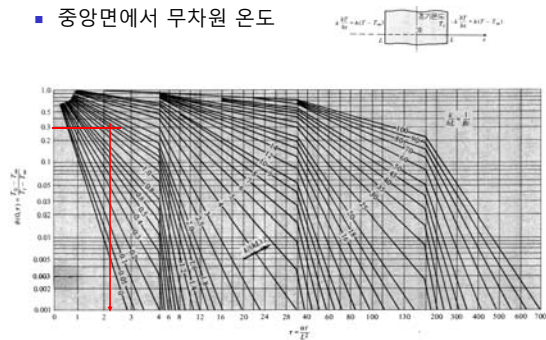
열전달

비정상 열전도

32

평판에 대한 과도온도 도표 (Fig 6-4b)

- 중앙면에서 무차원 온도



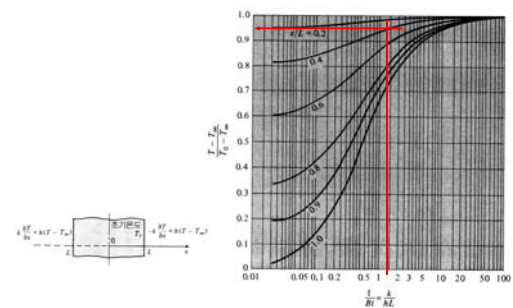
열전달

비정상 열전도

33

평판에 대한 과도온도 도표 (Fig 6-4c)

- 위치수정



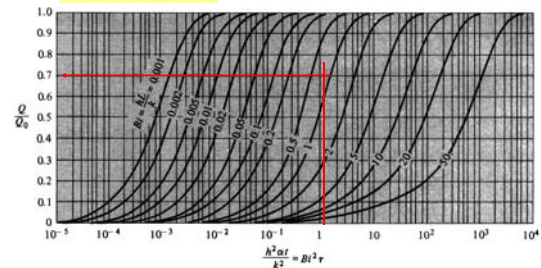
열전달

비정상 열전도

34

평판에 대한 무차원 열전달량 (Fig 6-5)

- 두께 2L의 평판에 대한 무차원 열전달량 Q/Q_0
 $Q_0 = \rho c_p V (T_i - T_\infty)$



열전달

비정상 열전도

35

학습점검

- 평판 과도 열전달
- 임의지점 온도 계산
- 열전달량 계산

열전달

비정상 열전도

36

대류열전달의 분류와 기초

강의목표

- 전도, 복사와 대류를 구분할 수 있다
- 대류의 정의를 설명할 수 있다
- 대류의 분류를 설명할 수 있다
- 강제대류와 자연대류를 구분할 수 있다
- 경계층을 구조를 설명할 수 있다
- 층류와 난류의 특성을 설명할 수 있다

대류

- 유체
- 대류의 정의

대류의 분류

대류의 원인

- 강제대류
- 자연대류

대류의 분류

유동형태

- 층류
- 난류

대류의 분류

상의 수

- 단상(single phase)
- 다상(multi-phase)

대류의 분류

고체의 형상

- 외부유동
- 내부유동

대류의 분류

흐름방향

- 발달영역
- 완전발달영역

대류의 분류

상변화

- 현열
- 잠열

자연대류

- 자연대류
- 온도차 → 전도열전달 → 유체의 온도변화 → 유체의 밀도변화 → 체력(body force)발생 → 유체이동(대류) → 대류열전달 → 전도열전달 → 온도차 변화
- 열전달 존재 → 온도차 발생
- 유체의 물성치 → 온도의 함수
- Driving Force
 - 체력: 부력
 - 표면력: 표면장력
 - 농도

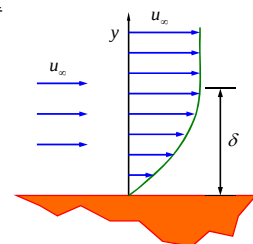


쉬어가기: 강제대류와 자연대류

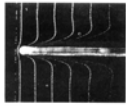
- 해풍은 강제대류 인가 자연대류 인가?

경계층이란?

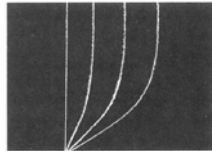
- 고체 표면 위를 흐르는 유체
- 점성의 영향으로 속도분포 형성
- 표면에 가까울수록 저속
- 자유흐름의 99% 유속
- 경계층의 두께



경계층 이란?



주요기초정보를 이용한 객관성검정의 결과정보출력의 개시도(0.01%) 적용후, $U_0 = 0.0$ (m), 객관치 = 0.7 mm(Nakayama 등 [12]).



평판위의 층류경계층에서의 길이방향속도프로파일에 관한 가시화: 0.01% 식염수, $U_\infty = 0.6 \text{ cm/s}$, 전단부에서 $x = 20 \text{ cm}$ 떨어진 거리(Nakayama 등 [12]).

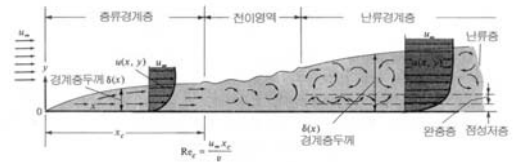
열전달

대류열전달 분류와 무차원수

13

경계층의 구조

- 흐름방향으로 층류, 전이, 난류로 변화
- 층류: 유체가 층을 따라 흐름
- 난류: 유체가 활발하게 혼합
- 난류경계층의 수직방향
 - 점성저층, 완충층, 난류층



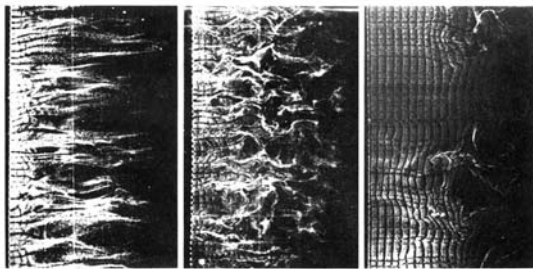
열전달

대류열전달 분류와 무차원수

14

경계층 내부 구조

- Kline, 난류 경계층의 구조



점성저항

완전 난류저층

$y^* = 407$
후류지역

열전달

대류열전달 분류와 무차원수

15

학습점검

- 대류열전달 구분 방식
- 대류열전달의 구분
- 경계층의 정의
- 경계층의 구조
- 층류와 난류 구분의 필요성

열전달

대류열전달 분류와 무차원수

16

대류열전달 관련 무차원수

열전달

대류열전달 분류와 무차원수

17

강의목표

- 경계층을 구조를 설명할 수 있다
- 경계층에 관련한 무차원수의 정의와 물리적 의미를 설명할 수 있다

열전달

대류열전달 분류와 무차원수

18

Newton의 냉각법칙

- 정의
- 열전달계수

열전달

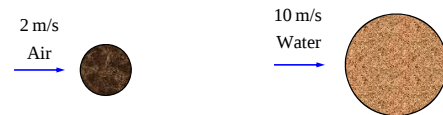
대류열전달 분류와 무차원수

19

무차원수, Re수

- Reynolds 수
 - 관성력 / 점성력
 - 층류와 난류 구분
 - 유동(대류)이 활발한 정도 결정
- 유동특성 결정
 - 찬호와 세리

$$Re = \frac{\rho u_{\infty} x}{\mu}$$



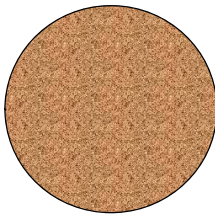
열전달

대류열전달 분류와 무차원수

20

점성력과 관성력

- Reynolds 수



열전달

대류열전달 분류와 무차원수

21

특성길이

- 특성길이는 적용 조건에 따라 변화
 - 평판: 선단에서 길이
 - 원형관: 관경
 - 구: 직경
 - 자동차: 차고*
- 현상(열전달, 마찰)에 따라 다를 수 있음
- 삼차원 형상
 - 여러 인자에 의하여 영향을 받음

$$Re = \frac{\rho u_{\infty} L}{\mu}$$

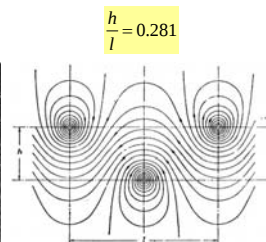
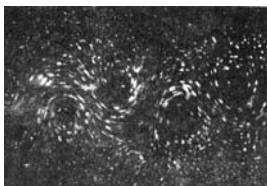
열전달

대류열전달 분류와 무차원수

22

Karman Vortex Street

- A. Timme [1957]



열전달

대류열전달 분류와 무차원수

23

쉬어가기: 무차원수의 위력

- 제주도

열전달

대류열전달 분류와 무차원수

24

무차원수, Pr수

- Prandtl 수
 - 운동량확산 / 열확산
 - 점성력과 열 확산이 상대적으로 활발한 정도
 - 유체의 물성치
 - 속도/열 경계층의 두께의 비를 결정
- 유체
 - 고 Pr수: 엔진오일, 기름 류
 - 중 Pr수: 물(~7), 공기(~0.7)
 - 저 Pr수: 액체금속

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k}$$

무차원수, Nu수

- Nusselt 수
 - 대류열전달/전도열전달
 - 전도열전달 대비 대류열전달의 활발한 정도
 - Biot수와 비교
 - 특성길이

$$Nu = \frac{hL}{k} \propto \frac{Ah\Delta T}{kA \frac{\Delta T}{L}}$$

학습점검

- 무차원수의 필요성
- Reynolds 수
- Prandtl 수
- Nusselt 수
- 정의, 물리적 의미
- 응용

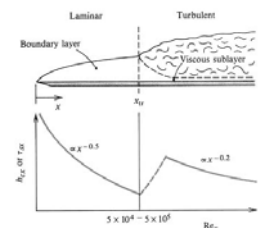
대류열전달 성능인자

강의목표

- 항력계수의 정의를 설명할 수 있다
- 열전달계수의 정의와 물리적 의미를 설명할 수 있다
- 경계층에 관련한 중요한 인자를 계산할 수 있다

층류와 난류의 판별

- 층류와 난류 결정: 임계 Reynolds 수
- 평판 외부: $Re_{cr} \sim 10^5$
- 평행평판 내부: $Re_{cr} \sim 1,000$
- 원관 내부: $Re_{cr} \sim 2,000$
- 특성길이의 방향
- 형상에 따라 다름



항력계수

- 전단응력(shear stress)

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = c \frac{\rho u_{\infty}^2}{2}$$

- 항력계수(drag coefficient)
 - 속도구배가 중요
 - 속도경계층의 두께가 마찰력에 밀접한 영향
 - [마찰저항] + 형상저항

$$c = \frac{2\nu}{u_{\infty}^2} \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0}$$

쉬어가기: 항력

- 물고기

열전달계수

- 열속(heat flux)

$$q = k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h(T_{\infty} - T_w)$$

열전달계수

- 열전달계수(heat transfer coefficient)
 - 온도구배가 중요
 - 열경계층의 두께가 열전달률에 밀접한 영향
 - 마찰저항 → 열전달
 - 형상저항 → 열전달

$$h = k \frac{\left[\partial T / \partial y \right]_{y=0}}{T_{\infty} - T_w}$$

예제 7-1

- 평판 위로 300K의 공기가 1m/s로 대류
- 층류에서 난류로 전이가 일어나는 길이
- 풀이: 전이 Reynolds 수

예제 7-2

- 평판 위로 300K의 공기가 2m/s로 대류
- 평균 항력계수로부터 항력계산
- 풀이: 항력계수의 정의

예제 7-3

- 엔진오일의 Pr 수
- 풀이: Pr 수의 정의

학습점검

- 열전달계수
- 단위면적 당, 단위 온도차 당 열전달율
- 항력계수
- 동압에 대한 마찰응력의 비율
- 계산 방법

대류열전달 관계식

열전달

평판 대류열전달 관계식

1

강의목표

- 경계층에 관련한 인자를 설명할 수 있다
- 경계층 관련 무차원수의 정의와 물리적 의미를 설명할 수 있다
- 평판 위를 흐르는 층류경계층의 특징을 설명할 수 있다
- 속도경계층과 열경계층이 어떻게 다른가를 설명할 수 있다
- 평판 위에서 마찰력과 열전달량을 계산할 수 있다

열전달

평판 대류열전달 관계식

2

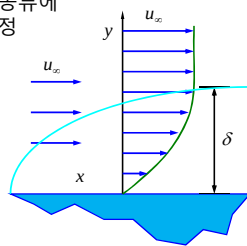
마찰에 관련 인자 (평판)

- 항력계수(c_f)

- 밀도(ρ)
- 점성계수(μ)

유체의 종류에 따라 결정

- 유속(u)
- 길이(x)



열전달

평판 대류열전달 관계식

3

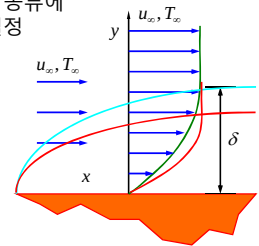
대류열전달에 관련 인자 (평판)

- 열전달계수(h)

- 밀도(ρ)
- 점성계수(μ)
- 비열(c_p)
- 열전도율(k)

유체의 종류에 따라 결정

- 유속(u)
- 길이(x)



열전달

평판 대류열전달 관계식

4

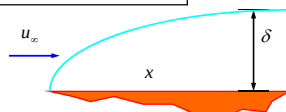
무차원화(평판)

- 7개의 인자 관련
- 기본차원: 시간(s), 길이(m), 질량(kg), 온도(K)
- 차원해석
- 무차원수: 3개
- 6개 변수 $\rightarrow$ 2개 변수

$$h = f(x, u, c_p, \mu, k, \rho)$$

$$Nu = f(Re, Pr)$$

- 열/유체 문제를 매우 단순화하는데 기여



열전달

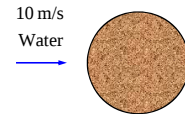
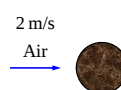
평판 대류열전달 관계식

5

무차원수, Re수

- Reynolds 수
 - 관성력 / 점성력
 - 층류와 난류 구분
 - 유동(대류)이 활발한 정도 결정
- 유동특성 결정

$$Re = \frac{\rho u_{\infty} x}{\mu}$$



열전달

평판 대류열전달 관계식

6

쉬어가기: 특성길이

- 사람의 방열
- 열교환기의 방열

무차원수, Pr수

- Prandtl 수
 - 운동량확산 / 열확산
 - 점성력과 열 확산이 상대적으로 활발한 정도
 - 유체의 물성치
 - 속도/열 경계층의 두께의 비를 결정
- 유체
 - 고 Pr수: 엔진오일, 기름 류
 - 중 Pr수: 물(~7), 공기(~0.7)
 - 저 Pr수: 액체금속

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k}$$

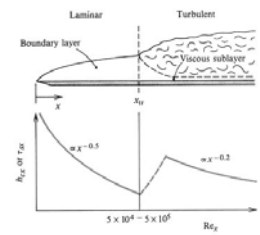
무차원수, Nu수

- Nusselt 수
 - 대류열전달/전도열전달
 - 전도열전달 대비 대류열전달의 활발한 정도
 - Biot수와 비교
 - 특성길이

$$Nu = \frac{hL}{k} \propto \frac{Ah\Delta T}{kA \frac{\Delta T}{L}}$$

층류와 난류의 판별

- 층류와 난류 결정: 임계 Reynolds 수
- 평판 외부: $Re_{cr} \sim 10^5$
- 평행평판 내부: $Re_{cr} \sim 1,000$
- 원관 내부: $Re_{cr} \sim 2,000$
- 특성길이의 방향
- 형상에 따라 다름



항력계수

- 전단응력(shear stress)

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = c \frac{\rho u_\infty^2}{2}$$

- 항력계수(drag coefficient)
 - 속도구배가 중요
 - 속도경계층의 두께가 마찰력에 밀접한 영향
 - [마찰저항] + 형상저항

$$c = \frac{2\nu}{u_\infty^2} \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0}$$

열전달계수

- 열속(heat flux)

$$q = k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h(T_\infty - T_w)$$

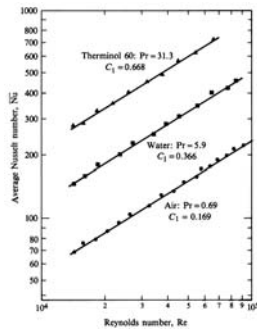
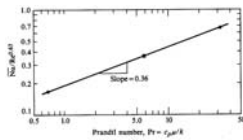
- 열전달계수(heat transfer coefficient)
 - 온도구배가 중요
 - 열경계층의 두께가 열전달률에 밀접한 영향
 - 마찰저항 → 열전달
 - 형상저항 → 열전달

$$h = k \frac{\left[\frac{\partial T}{\partial y} \right]_{y=0}}{T_\infty - T_w}$$

무차원수의 역할

- 유체의 종류
- 유체의 속도
- 관의 크기
- log-log graph

$$Nu = Re^{0.63} Pr^{0.36}$$



열전달

평판 대류열전달 관계식

13

학습점검

- 무차원수
- Re, Pr, Nu 수
- 항력계수 및 열전달계수
- 무차원수의 관계

열전달

평판 대류열전달 관계식

14

평판 층류경계층

열전달

평판 대류열전달 관계식

15

강의목표

- 경계층에 관련한 인자를 설명할 수 있다
- 평판 층류 경계층에 항력과 열전달량을 계산할 수 있다

열전달

평판 대류열전달 관계식

16

경계층 해석법

- 보존방정식 → 경계층방정식 → 상사변수 → 상미분방정식
- 적분형방정식 → 속도/온도분포 가정 → 미분방정식
- 실험
- 수치계산

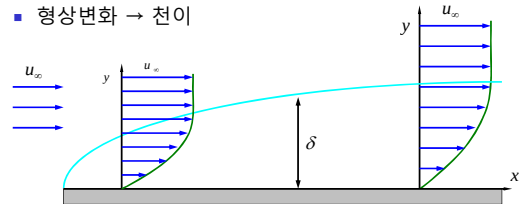
열전달

평판 대류열전달 관계식

17

층류 경계층의 특징

- 속도/온도구배가 중요
- 속도/온도분포 형상(profile shape)은 동일
- 경계층의 두께는 형상(shape)을 압축 또는 인장
- 형상변화 → 천이



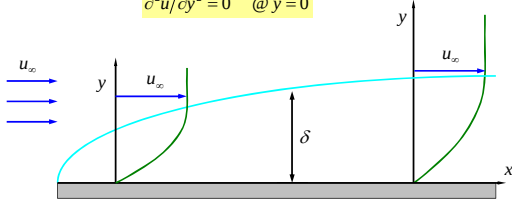
열전달

평판 대류열전달 관계식

18

층류 경계층의 특징

- 경계조건 $u = 0$ @ $y = 0$ $u / u_\infty = f(y/\delta)$
- 인자 $u = u_\infty$ @ $y = \delta$ $\delta = f(\text{Re}, x)$
- $\partial u / \partial y = 0$ @ $y = \delta$
- $\partial^2 u / \partial y^2 = 0$ @ $y = 0$



열전달

평판 대류열전달 관계식

19

층류 속도경계층, 속도분포

- 적분형 운동량방정식 $\frac{d}{dx} \left[\int_0^{\delta(x)} u(u_\infty - u) dy \right] = \nu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}, \quad 0 < y < \delta(x)$
- 속도분포 가정 $u(x, y) = a_0(x) + a_1(x)y + a_2(x)y^2$
- 경계조건 $u(x, y) = 0$ @ $y = 0$
 $u(x, y) = u_\infty$ @ $y = \delta$
 $\frac{\partial u(x, y)}{\partial y} = 0$ @ $y = \delta$
- 속도분포 $u(x, y) = u_\infty \left[2 \frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right]$

열전달

평판 대류열전달 관계식

20

층류 속도경계층, 경계층두께

- 적분형 운동량방정식에 대입 $\frac{d}{dx} \left(\int_0^{\delta(x)} u_\infty \left[2 \frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \left[u_\infty - u_\infty \left[2 \frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \right] dy \right) = \frac{2\nu u_\infty}{\delta(x)}$
- 정리하고 적분 $\delta \, d\delta = \frac{15\nu}{u_\infty} dx$
- 경계층의 두께에 대한 경계조건 $\delta(x) = 0$ @ $x = 0$
- 경계층의 두께 $\frac{\delta(x)}{x} = \sqrt{\frac{30}{\text{Re}_x}} = \frac{5.48}{\text{Re}_x^{1/2}}$

열전달

평판 대류열전달 관계식

21

층류 속도경계층, 항력계수

- 항력계수 $c_x = \frac{2\nu}{u_\infty} \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{2u_\infty}{\delta(x)} = \frac{2u_\infty}{\sqrt{30\nu x / u_\infty}}$
 $c_x = \frac{4\nu}{u_\infty \sqrt{30\nu x / u_\infty}} = \frac{0.73}{\text{Re}_x^{1/2}}$
- 국부 항력계수에 대한 엄밀해 $c(x) = \frac{0.664}{\text{Re}_x^{1/2}}, \quad \text{Re}_x \leq 10^5$
- 평균 항력계수 $c_x = \frac{1.328}{\text{Re}_L^{1/2}}, \quad \text{Re}_L \leq 5 \times 10^5$
 $c_m = \frac{1}{L} \int_0^L c(x) dx = 2c(x) \Big|_{x=L}$
- 항력 $F = w L c_m \frac{\rho u_\infty^2}{2}$

열전달

평판 대류열전달 관계식

22

쉬어가기: 속도분포 가정

- Sine 함수

열전달

평판 대류열전달 관계식

23

Blasius 속도분포

- 상사변수를 이용한 엄밀해

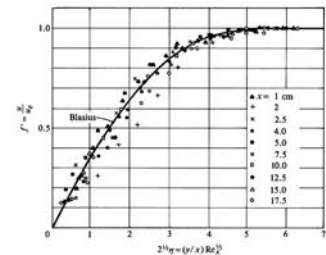


Figure 5.20 Comparison of theory with experiment for the velocity profile in a laminar boundary layer on a flat plate; air, $u_\infty = 8 \text{ m/s}$. (Data of M. Hansen, NACA TM 585, 1930.)

열전달

평판 대류열전달 관계식

24

층류 열경계층, 온도분포

- 적분형 에너지방정식에 대입

$$\frac{d}{dx} \left[\int_0^{\delta_i} u(1-\theta) dy \right] = \alpha \frac{\partial \theta}{\partial y} \bigg|_{y=0} \quad 0 < y < \delta_i$$
- 온도분포 가정

$$\theta(x, y) = a_0(x) + a_1(x)y + a_2(x)y^2 \quad \theta(x, y) = \frac{T(x, y) - T_w}{T_w - T_\infty}$$
- 경계조건

$$\begin{aligned} \theta(x, y) &= 0 & @ y = 0 \\ \theta(x, y) &= 1 & @ y = \delta_i \\ \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} &= 0 & @ y = \delta_i \end{aligned}$$
- 속도 및 온도분포

$$u(x, y) = u_\infty \left[2 \frac{y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \quad \delta = \sqrt{\frac{30 \nu x}{u_\infty}} \quad \theta(x, y) = 2 \left(\frac{y}{\delta_i} \right) - \left(\frac{y}{\delta_i} \right)^2$$

열전달

평판 대류열전달 관계식

25

층류 열경계층, 열경계층두께

- 적분형 에너지방정식에 대입

$$\frac{d}{dx} \left(u_\infty \int_0^{\delta_i} \left[2 \left(\frac{y}{\delta} \right) - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \left[1 - 2 \left(\frac{y}{\delta_i} \right) + \left(\frac{y}{\delta_i} \right)^2 \right] dy \right) = \frac{2\alpha}{\delta_i}$$
- 정리하고 적분

$$\frac{d}{dx} \left[\delta_i \left(\frac{1}{6} \Delta^2 - \frac{1}{30} \Delta^3 \right) \right] = \frac{2\alpha}{u_\infty \delta_i} \quad \Delta = \frac{\delta_i}{\delta}$$
- Pr수가 1보다 큰 경우, 열경계층의 두께에 대한 경계조건

$$\delta_i(x) = 0 \quad @ x = 0$$
- 열경계층의 두께

$$\delta_i(x) = 5.085 \frac{x}{\text{Pr}^{1/3} \text{Re}_x^{1/2}} \quad \delta(x) = 5.48 \frac{x}{\text{Re}_x^{1/2}}$$

열전달

평판 대류열전달 관계식

26

층류 열경계층, 열전달계수

- 열전달계수

$$h(x) = k \frac{[\partial T(x, y)/\partial y]_{y=0}}{T_w - T_\infty} = k \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \bigg|_{y=0} \quad h(x) = k \frac{2}{\delta_i(x)}$$

$$c_x = \frac{4\nu}{u_\infty \sqrt{30 \nu x / u_\infty}} = \frac{0.73}{\text{Re}_x^{1/2}}$$
- 국부 열전달계수

$$h(x) = \frac{2}{5.085 x} k \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$$
- 국부 Nusselt 수

$$\text{Nu}_x = \frac{xh(x)}{k} = 0.393 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad c_x = 1.328 \text{Re}_x^{-1/2}, \quad \text{Re}_x \leq 5 \times 10^5$$
- 열전달량

$$Q = Ah_w(T_w - T_\infty)$$

열전달

평판 대류열전달 관계식

27

층류경계층 결과식

	항 력	열전달
$\text{Pr} \rightarrow \infty$	$c_x = 0.664 \text{Re}_x^{-0.5}$	$\text{Nu}_x = 0.339 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$
$0.6 < \text{Pr} < 10$		$\text{Nu}_x = 0.332 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$
$\text{Pr} \rightarrow 0$		$\text{Nu}_x = 0.564 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/2}$

- Pr수에 대한 지수: 1/3
- Re수의 지수: 1/2, -1/2

열전달

평판 대류열전달 관계식

28

학습점검

- 평판 층류경계층
- 항력
- 열전달계수
- 상호 관계

열전달

평판 대류열전달 관계식

29

평판 난류경계층

열전달

평판 대류열전달 관계식

30

강의목표

- 평판 층류 경계층에 항력과 열전달량을 계산할 수 있다
- 평판 난류 경계층에 항력과 열전달량을 계산할 수 있다
- 평판한 면에 유체가 흐른 경우 마찰과 열전달을 계산할 수 있다.

층류/난류경계층 결과식

	층류 $Pr \sim 1$	난류 $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$
항력	$c_x = 0.664 Re_x^{-0.5}$	$c_x = 0.0592 Re_x^{-0.2}$
열전달	$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3}$

- 항력계수: Re 수의 함수, Nu수: Re 및 Pr수의 함수
- 물 및 공기에 적용
- Re 수에 대한 지수: 0.5(층류), 0.8(난류)
- Pr수에 대한 지수: 1/3
- Reynolds Analogy 성립

Reynolds Analogy

- 열전달-마찰의 상관관계
- 유체의 종류에 자유로움
- 열전달로부터 이상적인 항력수준 예측
- 단순유동인 경우 상사관계 성립
- 공학적 가치

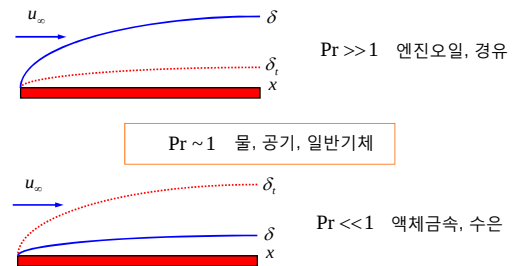
$$St_x Pr^{2/3} = \frac{1}{2} c_x$$

$$St_x = \frac{Nu_x}{Pr Re_x}$$

$$j = St_x Pr^{2/3}$$

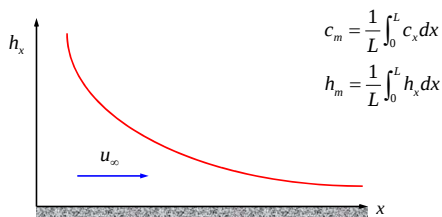
Pr수가 온도경계층의 두께에 미치는 영향

- Prandtl 수, 운동량확산 / 열확산



평균값과 국부값

- 항력 및 열전달은 고체 위치의 함수
- 공학계산 → 평균값 유용
- 선단효과(edge effect) → 루우버 원의 원리



쉬어가기: 열전달에 효과적인 유동특성

- 층류
- 난류

예제 7-4 (pp. 206)

- 국부 열전달관계식에서 평균 열전달관계식을 구하시오.
- 풀이: 국부열전달 관계식의 구간적분

예제 7-6 (pp. 207)

- 350K 인 공기가 15 m/s로 평판 위를 유동, 선단에서 길이 0.3 m, 폭 1m에 작용하는 항력
- 풀이: Re 수 → 항력계수 → 항력

학습점검

- 층류경계층과 난류경계층
- Reynolds Analogy 정의
- Reynolds Analogy의 활용
- 열전달계수의 계산

원통과 구에서 유동

열전달

원통과 구에서 열전달

1

강의목표

- 물체 주위의 유동에 영향을 주는 인자는 무엇인가?
- 유동특성에서 Reynolds 수의 역할은?
- Reynolds 수가 변화함에 따라 유동 특성을 설명할 수 있다
- 원통의 항력을 계산할 수 있다

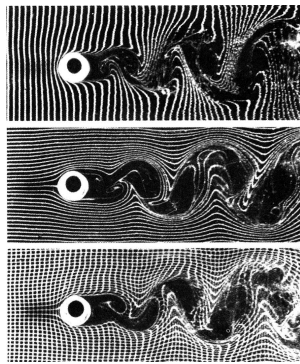
열전달

원통과 구에서 열전달

2

실린더 주위의 유동

- Nakayama
- $Re = 170$
- $U = 2.6 \text{ cm/s}$
- $D = 0.8 \text{ cm}$
- 원통후류 유동



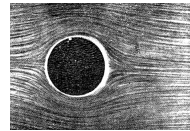
열전달

원통과 구에서 열전달

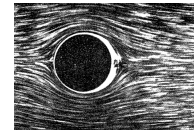
3

실린더 주위의 유동

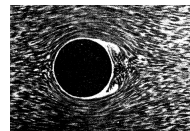
- Prandtl-Tietjens [1934]



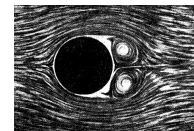
Potential frictionless flow pattern



Start of separation



Move of separation



Two concentrated vortices

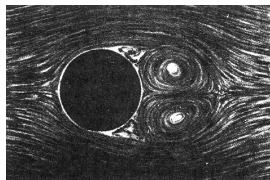
열전달

원통과 구에서 열전달

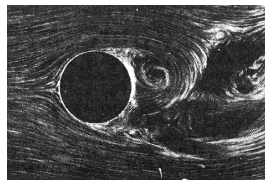
4

실린더 후류 와류

- Prandtl-Tietjens [1934]



Growth of vortices



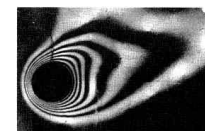
Oscillation of vortices

열전달

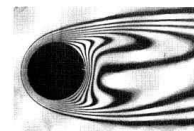
원통과 구에서 열전달

5

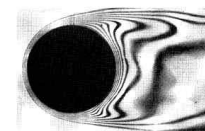
원형관에서 열전달



(a)



(b)



(c)

- 등온선
- (a) $Re = 23$
- (b) $Re = 120$
- (c) $Re = 597$

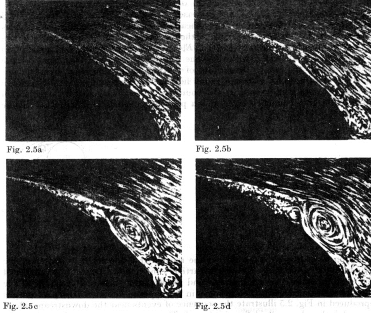
열전달

원통과 구에서 열전달

6

실린더 후류 유동박리

- Prandtl-Tietjens [1934]



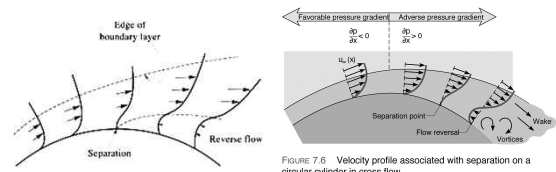
열전달

원통과 구에서 열전달

7

실린더 주위 유동

- 경계층 성장
- 형상변화 → 유로변화 → 압력구배 변화 → 유동이탈 유동박리
- 유동박리 → 국부마찰 및 열전달 감소
- 역류발생



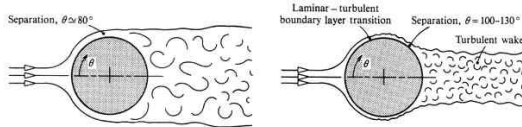
열전달

원통과 구에서 열전달

8

큰 Re수에서 원형관 주위의 유동

- 천이각도 변화
- 층류: 80°, 난류: 100°-130°
- 원형관 후류 저압
- 항력변화



열전달

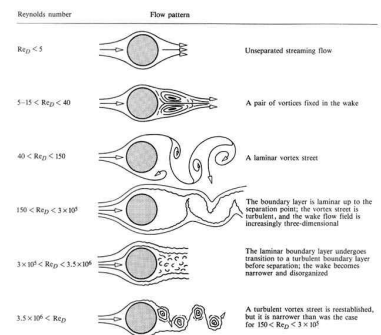
원통과 구에서 열전달

9

원형관 주위의 유동

- Re수의 함수
- 특성길이 D
- 유체의 종류에 무관
- 관의 재료에 무관
- 천이 Re수
 - 5
 - 15
 - 40
 - 150
 - 3×10^5
 - 3.5×10^6

$$Re_D = \frac{VD}{\nu}$$



열전달

원통과 구에서 열전달

10

원형관-항력계수

- 천이 Re수와 일치
- 항력계수 ~ 1 @ 상용범위

$$C_D = \frac{F}{(1/2)\rho V^2 A_f}$$

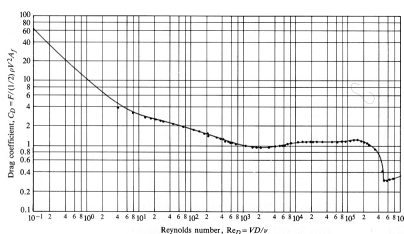


Figure 4.25 The drag coefficient $C_D = F/(1/2)\rho V^2 A_f$ for flow across a cylinder [11]. (Adapted with permission.)

열전달

원통과 구에서 열전달

11

중요사항 정리

- 원형관 및 구 주위의 유동 특성
 - Re의 물리적 의미
 - 천이: 5, 15, 40, 150, 3×10^5 , 3.5×10^6
- 항력계수
 - 항력/(투형면적×동압)
 - 유동특성 변화와 항력계수의 변화

열전달

원통과 구에서 열전달

12

학습점검

- 원통과 구 주위 유동
- 유동특성 변화-천이
- 항력계수
- 항력의 계산

원통과 구에서 열전달

강의목표

- 원통과 구에서 열전달에 미치는 주요인자는?
- 원형 관에서 원통과 구에서 국부 열전달계수의 특성을 이해할 수 있다
- 원통과 구에서 열전달량의 계산할 수 있다

원형관에서 국부열전달

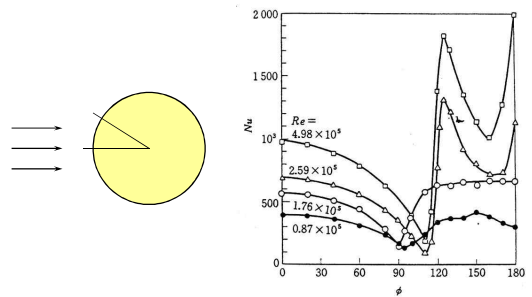


図 12 球まわりの局所ヌセルト数分布

원형관의 원주방향 국부열전달 특성

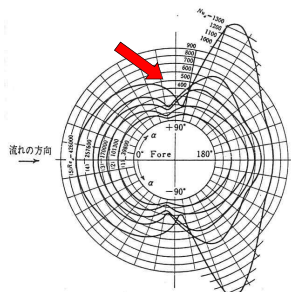


図 7 一様流中の円柱まわりの局所ヌセルト数分布

원형관의 평균열전달 특성

- Re 수에 대하여 Nu 수가 비교적 선형적
- 항력계수와 비교

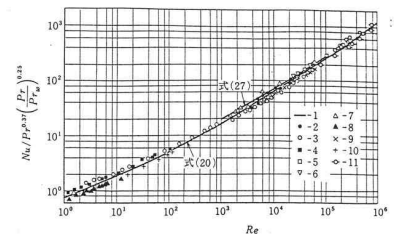


図 8 円柱의 평균ヌセル트數

원형관에 대한 열전달 상관식

- 원형관 (Churchill과 Bernstein)

- Re → 0 인 경우 (전도)

$$Nu_m = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{1/4}\right]^{1/4} \left[1 + \left(\frac{Re}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}}$$

$10^2 < Re < 10^7, Re Pr > 0.2$

$$Re = \frac{u_\infty D}{\mu}$$

열전달

원통과 구에서 열전달

19

구에 대한 열전달 상관식

- 구

- 점성수정

$$Nu_m = 2 + \left(0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3}\right) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_w}\right)^{0.25}$$

$3.5 < Re < 8 \times 10^4, 0.7 < Pr < 380, 1 < \mu_\infty / \mu_w < 3.2$

열전달

원통과 구에서 열전달

20

쉬어가기: Strouhal Number

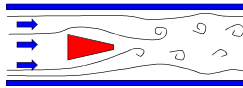
- Karman vortex street에서 유동진동 측정
- Blenk, Fuchs, Liebers [1935]

- Re < 60 층류
- 60 < Re < 5000 규칙진동
- Re > 5000 완전난류 혼합
- 5000 < Re < 2 × 10⁵ 거의 규칙진동
- Re > 10⁶ 불규칙 와류

$$S = \frac{nd}{V}$$

- Strouhal Number, S = f (Re)

- 유속, 유량 측정에 이용



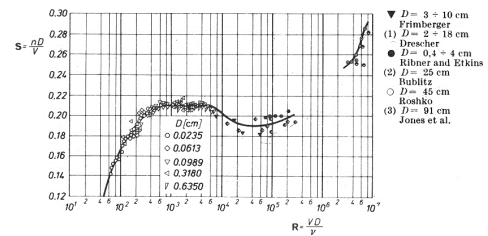
열전달

원통과 구에서 열전달

21

Strouhal Number

- Roshko
- Ribner, Etkins, Nelly
- Relf, Simmon
- Jones



열전달

원통과 구에서 열전달

22

박찬호가 던지는 공의 Re수는?

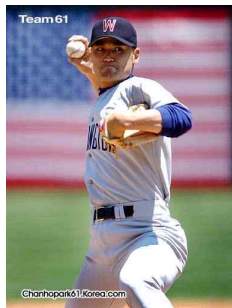
- 속도 150km/h
- 야구공의 직경 7.3 cm
- 공기온도 15°C

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$= \frac{1.23 \times 41.7 \times 0.073}{1.79 \times 10^{-5}}$$

$$= 2.09 \times 10^5$$

- 항력계수는?
- 박세리 골프 공은?



열전달

원통과 구에서 열전달

23

학습점검

- 원통과 구 주위 유동에서 대류열전달
- 열전달계수의 계산
- 열전달 계산

열전달

원통과 구에서 열전달

24

비원형관에서 열전달

강의목표

- 비원형관에서 열전달량의 계산할 수 있다

비원형관에 직교하는 흐름

- 비원형관
- 기체
- $Pr \sim 0.7$

$$Re_{De} = \frac{\rho V D_e}{\mu}$$

$$Nu = c Re_{De}^n$$

표 7-2 식 (7-44)의 상수 c 와 n

흐름방향과 기하학적 상태	$Re = \frac{\rho u D_e}{\mu}$	n	c
$u_\infty \rightarrow \diamond \text{---} D_e$	5,000-100,000	0.588	0.222
$u_\infty \rightarrow \bigcirc \text{---} D_e$	2,500-15,000	0.612	0.224
$u_\infty \rightarrow \diamond \text{---} D_e$	2,500-7,500	0.624	0.261
$u_\infty \rightarrow \bigcirc \text{---} D_e$	5,000-100,000	0.638	0.138
$u_\infty \rightarrow \bigcirc \text{---} D_e$	5,000-19,500	0.638	0.144
$u_\infty \rightarrow \square \text{---} D_e$	5,000-100,000	0.675	0.092
$u_\infty \rightarrow \square \text{---} D_e$	2,500-8,000	0.699	0.160
$u_\infty \rightarrow \text{---} D_e$	4,000-15,000	0.731	0.205
$\dots \rightarrow \bigcirc \text{---} D_e$	19,500-100,000	0.782	0.035
$u_\infty \rightarrow \bigcirc \text{---} D_e$	3,000-15,000	0.804	0.085

예제 7-9 (pp. 213)

- 40C 인 공기가 8 m/s로 100C 평판 위를 유동, $L = 3$ m, 평균열전달계수?
- 풀이: 물성치 $\rightarrow$ Re 수 $\rightarrow$ 층류/난류 구분 $\rightarrow$ 열전달계수

예제 7-10

- 40C 인 공기가 8 m/s로 100C 평판 위를 유동, $L = 3$ m, 폭 1m, 전열량?
- 풀이: 열전달계수, Newton의 냉각법칙 $\rightarrow$ 전열량

예제 7-11

- 온도가 -5C 인 대기가 지름 25 cm 인 단일관에 수직으로 6 m/s로 유동, 관 표면온도가 180C 일 때 평균열전달계수?
- 풀이: 물성치 $\rightarrow$ Re 수 $\rightarrow$ 층류/난류 구분 $\rightarrow$ Nu수 $\rightarrow$ 열전달계수

예제 7-12

- 온도가 -5°C 인 대기가 지름 25 cm 인 단열관에 수직으로 6 m/s로 유동. 관 표면온도가 180°C 일 때, 관 길이 1m에 대한 열전달량?
- 풀이: 열전달계수, Newton의 냉각법칙 $\rightarrow$ 열전달량

학습점검

- 원형관에 직교하는 흐름에서 강제대류 열전달
- 국부열전달계수 특성: 90부근에서 최저
- 평균열전달계수: Churchill과 Bernstein 식
- 구에 대한 강제대류 열전달
- 전도극한
- 기타형상: Re수와 특성길이 정의 변경
- Table 이용

강제대류 내부유동 기초

열전달

강제대류 내부유동

1

강의목표

- 관 내부유동의 구조
- 내부유동의 분류
- 압력강하
- 펌프 소요동력

열전달

강제대류 내부유동

2

입구영역 및 발달영역

- 유체역학적 입구영역
 - 입구영역 (hydrodynamic entry region)
 - 발달영역 (hydrodynamically developed region)
 - 입구길이 (entry length)
- 천이 Reynolds수
 - 층류에서 난류로 천이

$$Re = \frac{\rho u_m D}{\mu} > 2,300$$

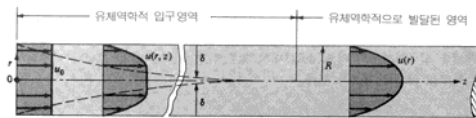


그림 8-1 유체역학적 입구영역의 개념

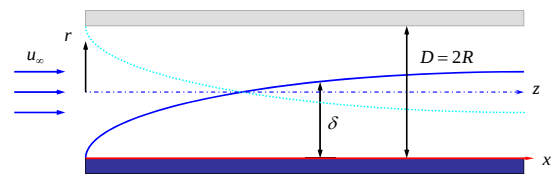
열전달

강제대류 내부유동

3

덕트유동에서 층류와 난류

- 외부유동-평판경계층
- 경계층의 두께 / 덕트의 반경 비교



열전달

강제대류 내부유동

4

원관 내 난류유동



그림 8-11 직선관을 지나는 유동에서 난류의 시작 [B. Dubs 가 찍음 [10]].

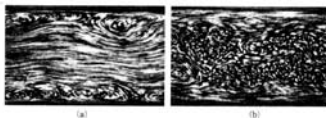


그림 8-12 계량수로에서의 난류유동. 하류방향으로 V 속도로 운행하는 사진기로 찍음 : (a) V는 벽 근처의 속도 (b) V는 중심선 속도 [Prandtl과 Tietjens [11]].

열전달

강제대류 내부유동

5

입구영역 및 발달영역

- 열적 입구영역
 - 열적 입구영역 (thermal entry region) $\theta(r, z)$
 - 유체역학적 발달영역 (thermally developed region) $\theta(r)$
 - 입구길이 (entry length)

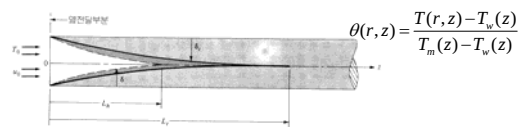


그림 8-2 유체역학적 및 열적 입구영역과 완전 발달된 영역의 개념

열전달

강제대류 내부유동

6

혼합평균유체온도

- 유체의 온도가 x, r 방향으로 변화
- 유체의 대표온도가 필요

$$T_m(z) = \frac{\int_0^R \rho c_p u(r) T(r, z) (2\pi r) dr}{\int_0^R \rho c_p u(r) (2\pi r) dr}$$

열전달

강제대류 내부유동

7

압력강하-마찰계수

- 관 마찰
- 관 길이 및 동압에 비례
- 관 직경에 반비례

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

열전달

강제대류 내부유동

8

펌프동력

- 펌프동력
 - 체적유량 x 압력강하
- 마찰에 대한 펌프동력

$$\dot{W} = \dot{V} \Delta P = f A_c \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^3}{2} \quad [\text{W}]$$

열전달

강제대류 내부유동

9

열전달계수

- 열속
 - 유체의 열전도율
- 열전달계수
- 완전발달영역의 열전달계수

$$q = -k \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$h(z) = -\frac{k}{T_m(z) - T_w(z)} \left. \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right|_{r=R} \quad \leftarrow \theta(r, z) = \frac{T(r, z) - T_w(z)}{T_m(z) - T_w(z)}$$

$$h(z) = -k \left. \frac{\partial \theta(r, z)}{\partial r} \right|_{r=R}$$

$$h = -k \left. \frac{\partial \theta(r)}{\partial r} \right|_{r=R}$$

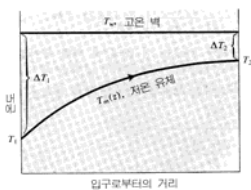
열전달

강제대류 내부유동

10

대수평균온도차

- 유체와 고체벽의 온도차가 거리에 따라 변화
- 대수평균온도차, 산술평균온도차
- 입구와 출구의 온도차가 큰 경우 대수평균이 타당



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

$$\Delta T_{AM} = \frac{1}{2} (\Delta T_1 + \Delta T_2)$$

$$\Delta T_{\ln} < \Delta T_{AM}$$

$$\text{if } \Delta T_1 / \Delta T_2 \leq 0.5, \Delta T_{AM} / \Delta T_{\ln} \leq 1.014$$

열전달

강제대류 내부유동

11

무차원수

- 특성속도 $\rightarrow u_m$
- 특성길이 $\rightarrow L$

$$\text{Re} = \frac{u_m L}{\nu} = \frac{u_m^2 L}{\nu u_m} = \frac{\text{관성력}}{\text{점성력}}$$

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{운동량확산율}}{\text{열확산율}}$$

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = \frac{\text{대류열전달}}{\text{전도열전달}}$$

$$\text{St} = \frac{h}{\rho c_p u_m} = \frac{h\Delta T}{\rho c_p u_m \Delta T} = \frac{\text{대류열속}}{\text{유체흐름의 열전달용량}}$$

열전달

강제대류 내부유동

12

완전히 발달된 층류흐름, 마찰계수

- 속도분포 $\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$
- Re수 $Re = \frac{u_m L}{\nu}$
- 마찰계수 $f = - \frac{8\mu}{\rho u_m^2} \frac{du}{dr} \bigg|_{r=R} = \frac{64\mu}{\rho u_m D} = \frac{64}{Re}$
 $f_{Darcy} = 4 f_{Fanning}$



그림 8-2 원형 관내의 층류, 완전발달된 유동에 대한 비뉴턴유체의 속도 분포

열전달

강제대류 내부유동

13

완전히 발달된 층류흐름, 열전달계수

- 일정열속조건
 $\theta = \frac{9}{11} \left[\frac{3}{16} + \frac{1}{16} \left(\frac{r}{R} \right)^4 - 4 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$
 $\frac{d\theta}{dr} \bigg|_{r=R} = - \frac{8}{11} \frac{1}{2R} = - \frac{48}{11D}$
 $h = -k \frac{d\theta(r)}{dr} \bigg|_{r=R} = \frac{48}{11} \frac{k}{D}$
 $Nu = \frac{hD}{k} = \frac{48}{11} = 4.36$
- 일정온도조건
 $Nu = \frac{hD}{k} = 3.66$

열전달

강제대류 내부유동

14

비원형관 내부유동

열전달

강제대류 내부유동

15

강의목표

- 비원형관에서 마찰과 열전달
- 수력직경
- 예제

열전달

강제대류 내부유동

16

각종 형태의 단면을 갖는 덕트 내의 흐름

- 수력직경
 - 비원형관을 유체역학적으로 등가인 원형관의 상당직경으로 환산
 - 유동이 형성되는 단면적
 - 유체역학적으로 마찰을 주는 단면상의 길이
 - 원형관 $D_h = D$
 - 정사각형관 $D_h = L$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4 \times \text{유동단면적}}{\text{접수길이}}$$

표 8-1 각종 형태의 단면을 갖는 덕트내의 유체역학적 특성 및 유체역학적으로 등가인 원형관의 단면적 Nu_{D_h} 수와 마찰계수

기하학적 형상 ($D_h > 100$)	Nu_{D_h}	Nu_{D_h}	f_{D_h}
○	3.657	4.364	64.00
○	3.34	4.002	60.22
$\frac{2b}{a} \left[\frac{a^2}{b^2} \frac{16}{15} + \frac{1}{3} \right]$	2.47	3.113	55.33
$\frac{2b}{a} \left[\frac{a^2}{b^2} \frac{16}{15} + 1 \right]$	2.076	3.008	56.91
$\frac{2b}{a} \left[\frac{a^2}{b^2} \frac{16}{15} + 1 \right]$	3.361	4.123	62.20
$\frac{2b}{a} \left[\frac{a^2}{b^2} \frac{16}{15} + 1 \right]$	3.06	3.989	58.8
$\frac{2b}{a} \left[\frac{a^2}{b^2} \frac{16}{15} + 1 \right]$	5.207	6.490	82.34
$\frac{2b}{a} \left[\frac{a^2}{b^2} \frac{16}{15} + 1 \right]$	7.543	8.275	96.00
단면적 $\frac{a}{b} = 0$	4.861	5.305	96.00

* Shah and London.

열전달

강제대류 내부유동

17

수력직경 이용-원형관 입증

- 원형관 상관
- 정사각형관=원형관

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4 \times \text{유동단면적}}{\text{접수길이}}$$

열전달

강제대류 내부유동

18

수력직경 이용-국부가열 및 국부마찰

- 일부마찰 및 가열

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4 \times \text{유동단면적}}{\text{접수길이}}$$

열전달

강제대류 내부유동

19

쉬어가기: 개수로

- 일부 유동단면

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4 \times \text{유동단면적}}{\text{접수길이}}$$

열전달

강제대류 내부유동

20

입구길이

- 입구길이
 - Re수, Pr수
 - 형상
 - 경계조건
- 실제 예
 - 물, Pr=5
 - 층류, Re=1000
 - $L_{h,T}/D = 56$
 - $L_{h,T}/D = 165$
 - $L_{h,H}/D = 215$
- 원형관 < 사각관
- 난류
 - $\frac{L_h}{D} \approx \frac{L_t}{D} = 10$

표 8-2 덕트내의 층류흐름에 대한 유체역학적 입구길이 L_h 와 열적입구길이 L_t

기하학적 형태	$\frac{L_h/D_h}{Pr}$		
	$\frac{L_h/D_h}{Re}$	비온도 일정	벽에서 열속 일정
	0.056	0.033	0.043
	0.011	0.008	0.012
$\frac{a}{b} = 0.25$	0.075	0.054	0.042
0.50	0.085	0.049	0.057
1.0	0.09	0.041	0.066

열전달

강제대류 내부유동

21

발달중인 층류흐름

- 분류(동시 발달 여부)
 - 유체역학적으로 발달을 마치고 열적으로 발달 중인 흐름
 - 동시에 발달 중인 흐름
- 경계조건
 - 일정온도
 - 일정열속
- 국부/평균
- 형상
 - 원형관
 - 평행평판
 - 사각덕트

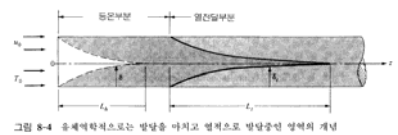


그림 8-4 유체역학적으로는 발달을 마치고 열적으로 발달중인 영역의 개념

열전달

강제대류 내부유동

22

예제 7.7

예제 7-7 대기압하에서 평균온도 77°C 인 공기가 9m/s의 속도로 평판에 따라 흐른다. 층류경계층에 대한 평판의 전연으로부터의 거리의 함수로서 국부열전달계수와 평균열전달계수를 그래프로 나타내어라.

열전달

강제대류 내부유동

23

예제 7.9

예제 7-9 $T_\infty = 40^\circ\text{C}$ 인 대기가 자유흐름속도 $u_\infty = 8\text{m/s}$ 로 균일한 온도 100°C 로 유지되고 있는 $L = 3\text{m}$ 의 긴 평판을 따라 흐른다. 평판 전체에 대한 평균열전달계수를 구하라. 전이는 $Re_c = 2 \times 10^5$ 에서 일어난다고 가정한다.

열전달

강제대류 내부유동

24

학습점검

- 무차원수의 필요성?
- Reynolds 수?
- Nusselt 수?
- Prandtl 수?
- 대수평균온도차?
- 대향류, 평행류, 직교류?

열전달

강제대류 내부유동

25

강제대류 내부유동 계산

열전달

강제대류 내부유동

26

강의목표-내부유동 계산

- 층류유동, 입구영역
- 난류유동
 - 매끈한 관
 - 거친 관
 - 액체금속
- 물성치의 보정
- 압력강하: Moody 선도

열전달

강제대류 내부유동

27

발달중인 층류흐름

- 분류(동시 발달 여부)
 - 유체역학적으로 발달을 마치고 열적으로 발달 중인 흐름
 - 동시에 발달 중인 흐름
- 경계조건
 - 일정온도
 - 일정열속
- 국부/평균
- 형상
 - 원형관
 - 평행평판
 - 사각덕트

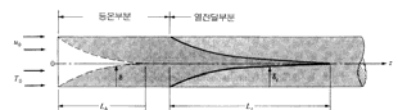


그림 8-4 유체역학적으로는 발달을 마치고 열적으로 발달중인 영역의 개념

열전달

강제대류 내부유동

28

유체역학적으로 완전발달 열적으로 발달 중

- 원형관
 - Graetz 수
 - $Gz \rightarrow 0$, 완전발달 영역의 값에 접근

$$Gz = \frac{RePr}{x/D}$$

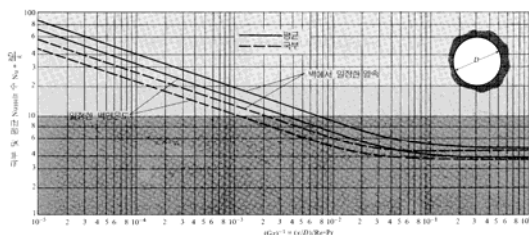


그림 8-5 원형관의 유체역학적으로 발달을 마치고 열적으로 발달중인 층류흐름에 대한 국부 및 국부 Nusselt 수

열전달

강제대류 내부유동

29

유체역학적으로 완전발달 열적으로 발달 중

- 평행평판
 - 국부 > 평균
 - 일정열속 > 일정온도

$$Gz = \frac{RePr}{x/D}$$

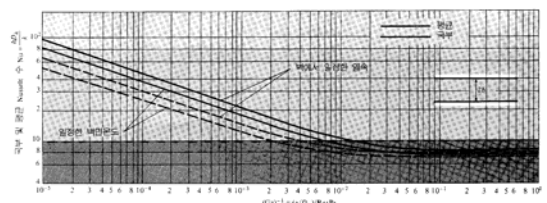


그림 8-6 평행평판 사이의 유체역학적으로 발달을 마치고 열적으로 발달중인 층류흐름에 대한 국부 및 평균 Nusselt 수

열전달

강제대류 내부유동

30

유체역학적으로 완전발달 열적으로 발달 중

- 사각덕트
 - $Nu_T = 2.976$
 - $Nu_H = 3.608$

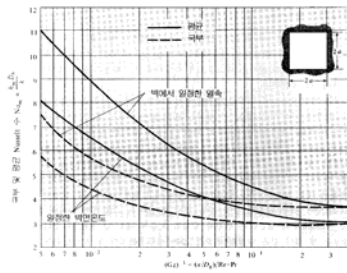


그림 8-7 사각 덕트내의 유체역학적으로 발달을 이치고 열적으로 발달중인 증류흐름에 대한 평균 및 국부 Nusselt 수

열전달

강제대류 내부유동

31

동시에 발달 중인 흐름, 원형관

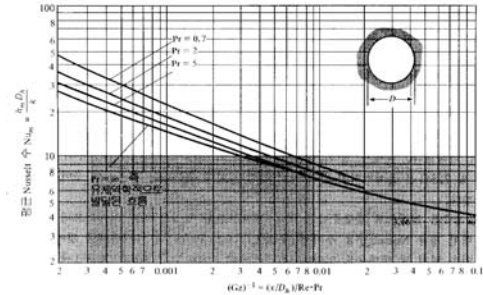


그림 8-8 벽면온도가 일정한 경우에 원형관내의 동시에 발달하는 흐름에 대한 평균 Nusselt 수

열전달

강제대류 내부유동

32

동시에 발달 중인 흐름, 평행평판

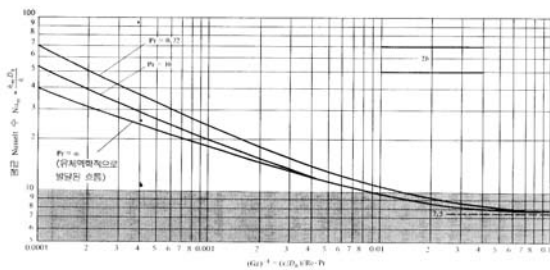


그림 8-9 양쪽 벽면의 온도가 일정하고 같은 평행평판 사이의 동시에 발달하는 증류흐름에 대한 평균 Nusselt 수

열전달

강제대류 내부유동

33

완전발달 난류흐름, 마찰계수

- 매끈한 관

$$f = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2}$$

- 매끈한 관의 근사식

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad 2 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^4$$

$$f = 0.184 Re^{-0.2} \quad 2 \times 10^4 < Re < 3 \times 10^5$$

- 거친 관

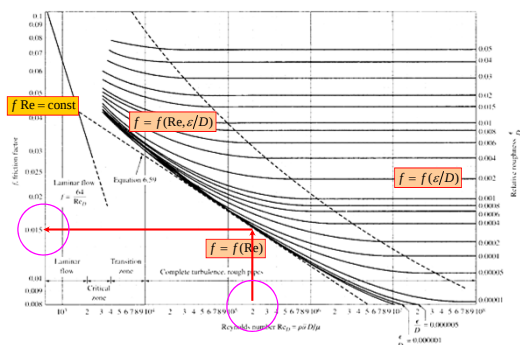
- Nikuradse의 모래임자 거칠기(sand-grain roughness) 실험
- 저 Re수 영역: 상대조도와 Re수의 함수
- 고 Re수 영역: 상대조도의 함수

열전달

강제대류 내부유동

34

마찰계수 - Moody선도



열전달

강제대류 내부유동

35

완전발달 난류흐름: Dittus-Boelter 식

- 매끈한 관, Dittus-Boelter 식
- 내부유동에 대한 매우 보편적인 열전달 상관식

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$$

$$0.7 < Pr < 160, 2000 < Re < 10000, L/D > 60$$

$$n = 0.4 (T_w > T_b), n = 0.3 (T_w < T_b)$$

열전달

강제대류 내부유동

36

완전발달 난류흐름: Sieder와 Tate식

- 매끈한 관
 - 온도차가 큰 경우 물성치 수정
 - Dittus-Boelter식보다 정확

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

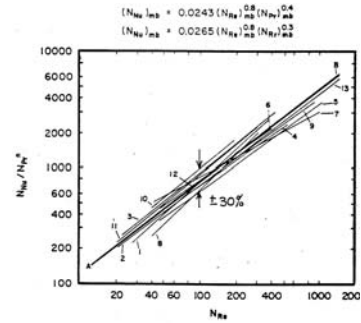
$0.7 < Pr < 16700, 2000 < Re < 10000, L/D > 60$

열전달

강제대류 내부유동

37

Original Dittus-Boelter Correlation



Univ. California, Eng 2, 443, 1930

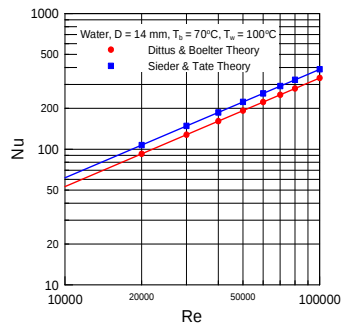
열전달

강제대류 내부유동

38

Dittus-Boelter식과 Sieder-Tate식의 비교

- 물, 30°C 온도차
- 직경 14mm
- S&T/D&B=1.13



열전달

강제대류 내부유동

39

완전발달 난류흐름, 열전달계수, 거친 관

- Petukhov 상관식
 - 거친관
 - 오차 10%
 - 물성치 기준 온도: 혼합유체온도, 단 점성계수(μ_w)는 벽온도
 - 마찰계수: Moody선도 이용

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1.07 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)(f/8)^{1/2} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^n}$$

$n = 0.11 (T_w > T_b), n = 0.25 (T_w < T_b)$

$0.5 < Pr < 2000, 10^4 < Re < 5 \times 10^6, 0.08 < \frac{\mu_w}{\mu_b} < 40$

열전달

강제대류 내부유동

40

물성치의 영향

- 열전도율, 점성계수, 밀도 온도의 함수
- 액체: 점성계수 $\rightarrow \frac{Nu}{Nu_{iso}} = \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^n$
- 기체: 절대온도 $\rightarrow \frac{f}{f_{iso}} = \left(\frac{T_b}{T_w} \right)^k$

$$\frac{Nu}{Nu_{iso}} = \left(\frac{T_b}{T_w} \right)^n$$

$$\frac{f}{f_{iso}} = \left(\frac{T_b}{T_w} \right)^k$$

표 8-4 식 (8-39) 및 식 (8-40)에 있는 지수 n 및 k 의 값

흐름 종류	유체	T_w = 일정조건	n	k
총류	액체	냉각 또는 가열	0.14	
	기체	냉각 또는 가열	0	-1
난류	액체	냉각	0.25	
	액체	가열	0.11	
	기체	냉각 또는 가열	0	-0.25
	기체	가열	0.5	0.1

열전달

강제대류 내부유동

41

물성치의 영향, 난류

TABLE 2.3 Correction for Fluid Properties (Turbulent Flow)

	Heating	Cooling
Liquids		
$\frac{St}{St_{cp}} = \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^n$	$n = 0.11$	$n = 0.25$
$\frac{f}{f_{cp}} = \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^m$	$m = \frac{1}{6} \left(7 - \frac{\mu}{\mu_w} \right)$ $m \approx -0.25$	$m = -0.24$
Gases		
$\frac{St}{St_{cp}} = \left(\frac{T}{T_w} \right)^n$	$n = 0.3 \log_{10} \frac{T_w}{T} + 0.36$ $n \approx -0.5$	$n = 0.36$
$\frac{f}{f_{cp}} = \left(\frac{T}{T_w} \right)^m$	$m = 0.6 - 5.6 \left(\frac{Re Pr}{\mu} \right)^{-0.38}$ $m \approx 0.1$	$m = 0.6 - 7.9 \left(\frac{Re Pr}{\mu} \right)^{-0.11}$ $m \approx 0.1$

Source: Petukhov [1972] and Kays and London [1984].

열전달

강제대류 내부유동

42

물성치의 영향, 층류

TABLE 2.4 Correction for Fluid Properties (Laminar Flow)

	Heating	Cooling
<i>Liquids</i>		
$\frac{St}{St_{cp}} = \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^n$	$n = 0.14$	$n = 0.14$
$\frac{f}{f_{cp}} = \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^m$	$m = -0.58$	$m = -0.50$
<i>Gases</i>		
$\frac{St}{St_{cp}} = \left(\frac{T}{T_w} \right)^n$	$n = 0.0$	$n = 0.0$
$\frac{f}{f_{cp}} = \left(\frac{T}{T_w} \right)^m$	$m = -1.0$	$m = -1.0$

Source: Kays and London [1984].

열전달

강제대류 내부유동

43

점성계수의 영향, 액체-층류

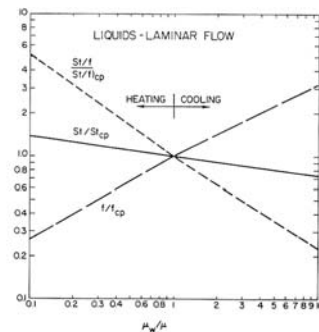


Figure 2.5 Fluid property correction variation versus μ_w/μ for laminar flow of liquids.

열전달

강제대류 내부유동

44

액체금속의 난류흐름

- 균일 열속, Lubarsky & Kaufman

$$Nu = 0.625Pe^{0.4}$$

$$Pe = RePr, 10^2 < Pe < 10^4, L/D > 60$$

- 균일벽 온도, Azer & Chao

$$Nu = 5.0 + 0.05Pe^{0.77} Pr^{0.25}$$

$$Pr < 0.1, Pe < 15000, L/D > 60$$

$$Nu_x = Nu \left(1 + \frac{2}{x/D} \right)$$

$$Nu_r = 6.3 + 0.0167Pe^{0.85} Pr^{0.08}$$

$$Nu_H = 4.8 + 0.0156Pe^{0.85} Pr^{0.08}$$

$$0.0042 < Pr < 0.1$$

- 열적 입구영역

열전달

강제대류 내부유동

45

예제 8-10 (pp253)

- 40°C 엔진오일 이 균일한 온도 100°C로 유지되고 있는 안지름 2.5 cm, 길이 40 m의 관 속으로 유량이 0.3 kg/s 로 흐른다. 흐름이 유체역학적으로 발달되었다고 가정하고 (a) 평균열전달계수, (b) 오일의 출구온도를 구하라.
- 풀이)
 - 물성치 → Re, Gz 수 → Nu 수 → 열전달계수 → 출구온도

열전달

강제대류 내부유동

46

유체역학적으로 완전발달 열적으로 발달 중

- 원형관
 - Graetz 수
 - $Gz \rightarrow 0$, 완전발달 영역의 값에 접근

$$Gz = \frac{RePr}{x/D}$$

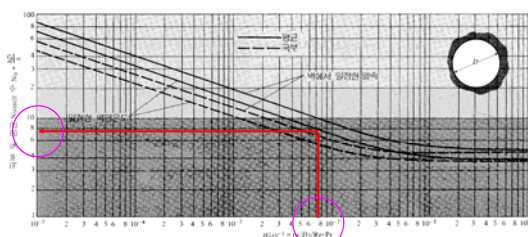


그림 8.5 원형관내의 유체역학적으로 발달을 마치고 열적으로 발달중인 층류흐름에 대한 평균 및 국부 Nusselt 수

열전달

강제대류 내부유동

47

예제 8-12

- 안지름이 $D=5$ cm 인 매끈한 원형관 내에 물이 평균유속 $u_m=2$ m/s로 흐른다. 관은 시판되는 강관 이고, 관의 벽면은 관의 외부표면에 증기가 응축되어 균일한 온도 $T_w=100^\circ\text{C}$ 로 유지되고 있다. 유체역학적 열적으로 충분히 발달된 위치에서 혼합평균유체온도가 $T_b=60^\circ\text{C}$ 이다. 다음식을 이용하여 열전달계수를 구하여라
- (a) Dittus-Boelter식, (b) Sieder-Tate 식, (c) Petukhov 식
- 풀이)
 - 물성치 → Re, f 수 → Nu 수 → 열전달계수

열전달

강제대류 내부유동

48

학습점검

- 관내 유동의 분류?
- 입구영역과 발달영역의 차이점?
- 열전달계수 계산?
- 압력강하의 계산?
- Moody 선도?