

Chapter 13 특별관심주제

본 자료의 모든 그림, 표, 예제 등은 다음의 문헌을 참고 하였습니다.

참고문헌 : Yunus A. Cengel and Afshin J. Ghajar, "*Heat and mass transfer (Fundamentals and applications)*", 4th ed., McGraw-Hill Korea, 2011

<학습목표>

1. 열적쾌적성
2. 미분방정식
3. 벽과 지붕을 통한 열전달
4. 음식의 냉장과 냉동
5. 수치오차의 제어
6. 미소 규모의 열전달

특별관심 주제 : 열적쾌적성

인체가 처해 있는 온도를 쾌적하다고 느끼는가 혹은 아닌가를 일컫는 말.

열적쾌적성의 요인

1. 온도

주변 온도는 안락함의 가장 중요한 지표이다. 인간의 열적 쾌적구역(thermal comfort zone)에 대해 광범위한 연구가 수행되면서, 인체가 어떤 환경조건에서 쾌적함을 느끼는지 규명하였다. 그 결과, 일반적인 옷을 입고 휴식을 취하거나 가벼운 일을 하는 사람들은 적정온도(operative temperature, 대략 공기와 주위표면의 평균온도)가 23°C에서 27°C인 경우에 안락하다고 느끼며, 옷을 입지 않은 경우에는 범위가 29°C에서 31°C였다.

2. 습도

상대습도 역시 쾌적성에 대한 주요한 요소인데, 상대습도가 공기가 수분을 흡수하는 능력이므로 신체가 증발을 통해 방출하는 열의 양에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 높은 상대습도는, 특히 온도가 높은 경우, 증발에 의한 열방출을 낮추며, 낮은 상대습도는 증발을 가속화시킨다. 적절한 상대습도에는 30에서 70%까지 넓은 범위가 포함되지만, 50%가 가장 적절한 수준이다. 대부분의 사람들은 이러한 환경에서 덥거나 춥다고 느끼지 않으며, 신체도 정상체온을 유지하려는 방어수단을 가동하지 않는다.

3. 공기유동(외풍)

열적 쾌적에 영향을 주는 또 다른 요소는 과도한 공기유동 또는 외풍이며 신체의 원하지 않는 국부적 냉각을 일으킨다. 외풍은 직장이나 자동차 및 항공기 안에서 많은 사람들이 불쾌하게 생각한다. 외풍에 의한 불쾌감은 실내복장으로 가벼운 업무를 수행하는 사람에게서 가장 많이 나타나며, 활동량이 많은 일을 하는 사람에게서는 덜 나타난다. 외풍에 의한 불쾌감을 최소화하기 위해서는, 차가운 공기일 경우, 공기의 속도를 겨울에는 9m/min, 여름에는 15m/min 이하로 유지해야 한다. 잔잔한 수준의 공기유동은 신체주위에 형성된 따뜻하고 습한 공기를 몰아내고 새로운 공기로 환기시켜주기 때문에 바람직하다. 따라서 공기의 움직임은 신체부근의 열과 습기를 옮길 만큼 강해야 하지만, 감지가 어려울 정도로 잔잔해야 한다. 고속의 공기유동은 실외에서도 불쾌감을 유발한다. 일례로 주위온도가 10°C이고 풍속이 48km/h인 경우, 공기유동의 냉각효과로 인해 주위온도가 -7°C, 풍속이 3km/h인 경우처럼 춥다고 느끼게 된다.

4. 환기

열적 쾌감, 건강 및 생산성에 영향을 미치는 또 다른 요인은 환기이다. 외부의 신선한 공기는 인위적인 행위 없이 자연적으로 또는 기계적인 환기시스템에 의해 강제적으로 공급될 수 있다. 전자는 일반적인 주택에서 거주 공간의 틈새나 깨진 부분을 통하여 또는 창과 문의 개방을 통하여, 여과장치 없이 필요한 만큼의 환기가 이루어진다. 욕실이나 주방에서 필요한 추가적인 환기는 댐퍼를 설치한 환풍시설 또는 환기팬으로 달성할 수 있다. 그러나 이와 같은 비제어식 환기장치들은 신선한 공기를 필요 이상으로 공급하여 에너지를 낭비하거나, 적게 공

급하여 실내 공기의 질적 저하를 불러오게 된다. 그럼에도 현실적으로는 일반 주택에서의 변화를 기대하기 어려운데, 주택의 에너지 낭비나 공기 질에 관한 비판적 관심이 적어서 고비용이며 복잡한 기계적 환기시스템의 설치를 주장하는 데 어려움이 많기 때문이다.

환경속에서 이용되는 열적 쾌적성의 원리

1. 추운 환경

신체의 열 손실에 대처하기 위해 나타나는 첫 번째 대응 방법은 혈관을 수축시키거나 피부로의 혈액 공급을 감소시켜 피부의 온도를 낮추는 것이다. 이러한 조치들로 피부 근처 조직들의 온도는 감소하지만 신체 내부의 온도는 정상적으로 유지될 수 있다. 만약 스스로 활동량을 늘리거나 옷을 입는 등의 자발적 보호 방법을 택하지 않는다면, 다음 단계의 방어책으로 신체는 신진 대사를 높이기 위해 떨기 시작한다. 떨림은 적은 규모의 근육으로부터 서서히 시작되며, 이로 인해 신진 대사에 의한 열 발생은 초기 상태의 약 두 배가 된다. 극단적으로 온몸이 떨리는 경우, 발생하는 열은 휴식 상태에 비해 6배까지 증가한다. 만일 이러한 조치들로도 부족하다면, 신체 내부의 온도가 떨어지기 시작하며, 신체의 중심으로부터 멀리 떨어진 손이나 발은 조직 손상을 일으킨 정도의 위험 상황에 놓이게 된다.

2. 더운 환경

신체의 열 손실률은 신진 대사에 의한 열 발생률보다 낮아진다. 이 때 신체는 추운 환경과는 반대되는 움직임을 보인다. 우선 혈액 순환을 증가시켜 피부에 열을 전달하고, 이를 통해 피부와 근처 조직의 온도를 신체 중심부의 온도까지 끌어 올리려 한다. 극단적 상황에서는 뇌와 피부에 충분한 양의 혈액을 공급하기 위하여, 심장 박동이 분당 180회까지 증가하게 된다. 그런데 심장 박동이 높아지면 맥박 사이의 짧은 시간 동안 심장에 혈액을 채워야 하므로 심장의 체적 효율이 감소하게 되고, 그 결과 피부의 가장 중요한 뇌에 공급하는 혈액의 양이 줄어들게 된다. 열 탈진(Heat Exhaustion)에 의해 사람이 기절하는 원인이 바로 이 현상이다.

다음 방어 체계에서는, 스스로 옷을 벗거나 활동량을 줄이지 않는다면, 땀샘으로부터 물을 배출하면서 증발 냉각을 유도한다. 만일 충분한 물을 마셔서 체내 수분의 양이 유지되고 주위의 공기가 건조하여 땀이 흐르기 전에 증발할 수 있다면, 주위의 온도가 아무리 높더라도(군의 인내력 시험에서는 200°C의 고온까지) 인체는 그와 상관없이 내부 온도를 37°C로 유지할 수 있다. 그러나 이러한 조치들로도 부족하다면, 신진 대사에 의한 열을 신체가 흡수하면서 내부의 온도도 상승하게 된다. 사람은 1.4°C 정도의 체온 상승에는 큰 불편감을 느끼지 않지만, 2.8°C까지 증가하면 탈진하게 된다. 중심 온도가 41°C 이상이 되면 시상 하부 단백질의 파괴로 땀의 배출이 정지되고, 몸의 떨림으로 열이 발생하면서 회복 불가능한 열사병으로 발전하여 생명이 위협받는다. 그리고 43°C 이상이면 사망하게 된다.

신체 표면 온도가 46°C가 되면 피부에 통증을 느낀다. 따라서 이 온도 이상으로 뜨거운 금속과 직접 접촉하게 되면 고통을 느낀다. 그러나 온도가 100°C 이상인 방에서 인체는 피부의 손상이나 고통 없이 30분 이상 머물 수 있는데, 피부 표면에서의 대류 저항과 증발 냉각 때문이다. 짧은 시간 동안이면 우리의 손을 200°C의 오븐에 넣더라도 화상을 입지 않는다.

예제 1-9) <복사의 열적 쾌적성에 대한 영향>

→ 같은 실내온도에서 여름보다 겨울에 더 춥게 느껴지는 이유!!

이때 방안은 항상 22°C로 유지되며, 건물내부의 벽, 마루, 천정의 평균온도는 겨울에는 10°C, 여름에는 25°C이며 사람의 평균 표면적과 외부 표면온도가 각각 1.4 , 30°C이다.

① 여름

$$Q_{rad, 여름} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{sur, 여름}^4)$$

$$= (0.95)(5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)(1.4m^2) \times [(30 + 273)^4 - (25 + 273)^4] K$$
$$= 40.9 W$$

② 겨울

$$Q_{rad, 겨울} = \epsilon \sigma A_S (T^4 - T_{sur, 겨울}^4)$$

$$= (0.95)(5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)(1.4m^2) \times [(30 + 273)^4 - (10 + 273)^4] K$$
$$= 152 W$$

따라서 인체가 겨울에 복사로 인한 손실하는 열이 여름에 비해 4배 정도 크기 때문에, 실내가 같은 온도로 유지되더라도 겨울에 보다 쌀쌀하게 느끼게 된다.

특별관심 주제 : 미분방정식

1. 미분방정식이란?

미분 방정식(微分方程式, differential equation)은 미지의 함수와 그 도함수, 그리고 이 함수들의 함수값에 관계된 여러 개의 변수들에 대한 수학적 방정식이다.

미분 방정식은 엔지니어링, 물리학, 경제학 등 수학 외의 학문에서도 중요한 역할을 차지하고, 유체역학, 천체역학 등의 물리적 현상의 수학적 모델을 만들 때에도 사용된다.

2. 변수

변수란 연구하는 동안 여러 가지 값들로 가정될 수 있는 양이다. 고정된 값은 상수라고 한다.

-독립변수 : 독립변수란 연구자가 반응변수 또는 관찰변수를 관찰하기 위해서 조작되거나, 측정되거나, 선택되어진 변수를 말합니다. 독립변수는 다른 변수에 영향을 줄 수 있는 변수.

-종속변수 : 독립변수의 영향을 받아 변화될 것이라고 보는 변수를 말합니다. 즉, 독립변수에 대한 반응으로서 측정되거나 관찰이 된 변수를 말합니다. 그러므로, 종속변수는 독립변수에 의해 항상 영향을 받는 변수라고 생각하면 됩니다.

3. 도함수의 정의

$f'(x)$ 는 곡선 $y = f(x)$ 위의 임의의 점 $(x, f(x))$ 에서 곡선에 그은 접선의 기울기를 나타내는 함수입니다.

미분은 함수의 순간변화율을 구하는 계산 과정이다. 적분과 함께 미적분학을 이룬다.

순간변화율은 평균변화율의 극한으로 생각할 수 있다.

우선, 함수 $f(x)$ 에서 x 의 변화량 Δx 에 대한 $f(x)$ 의 변화량 $f(x + \Delta x) - f(x)$ 의 비

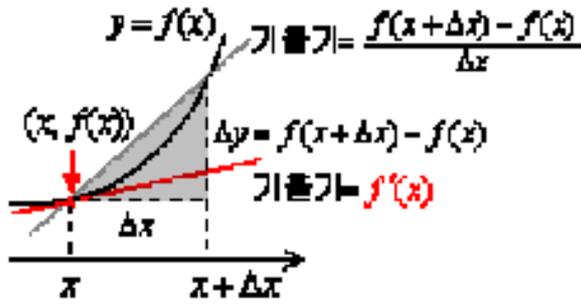
$\frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$ 를 구할 수 있을 때 이를 평균변화율이라고 한다.

평균변화율의 극한을 취하여 함수 $f(x)$ 의 특정 지점 x 에서 변화량 Δx 가 0으로 수렴할 때의 변화율을 순간변화율 또는 미분계수라고 하고 다음의 수식과 같이 나타낸다.

$$\frac{d}{dx}f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

미분은 연속적이고 지속적인 변화량에 대한 순간변화율을 의미한다. 따라서 연속적이지 않은 변화량에서나 첨점과 같은 특이점에서는 미분이 불가능하다. 함수의 그래프에서 미분은 함수 곡선의 특정 지점에서 접선으로 나타낼 수 있다.

함수 $f(x)$ 의 특정 구간을 정의역으로 하고 미분계수를 치역으로 하는 함수 $f'(x)$ 를 $f(x)$ 에 대한 도함수라고 한다.



5. 도함수의 차수

일반적으로 y 의 n 차 도함수는 $y^{(n)}$ 또는 $d^{(n)}y/dx^n$ 으로 표시. (n 은 양의 정수, 도함수의 차수)

6. 편도함수

편도함수란 어떤 함수 y 가 x 와 t 와 같이 두 개 이상의 독립변수에 종속되어 있을 때 변수들 중 1개만 종속 된다 보고 나머지 변수들을 상수로 두고 구한 도함수.

- 함수 $y(x, t)$ 의 x 의 1차편도함수 $\partial y / \partial x$ 는 t 를 상수로 취급하고 x 에 대해 미분하고 $\partial y / \partial t$ 는 반대로 x 를 상수로 취급하고 t 에 대해 미분하여 구한다.

7. 적분방정식

덧셈과 뺄셈이 역연산인 것처럼 미분과 적분도 역연산¹⁾ 관계로 적분은 미분의 반대과정으로 볼 수 있으며 미분방정식을 푸는데 사용.

도함수 $y'(x)$ 가 주어졌을 때 적분을 하게 되면 $y(x) + C$ 이다. (x 는 적분변수, C 는 적분상수)

8. 부정적분

적분상수 C 는 어떠한 값을 가지더라도 도함수 $y'(x)$ 이기 때문에 적분상수 C 만 다른 두 함수는 같은 도함수를 가지며 미분할 때 적분상수가 상실되더라도 적분할 때 항상 더하여진다. 이러한 상수 C 가 정의되지 않은 적분을 부정적분이라고 한다.

9. 고차도함수의 적분

일차도함수 $y'(x)$ 의 적분이 아닌 고차도함수일 경우에는 적분될 때마다 도함수의 차수가 1차씩 감소하게 된다. 예를 들어 이차도함수 $y''(x)$ 를 적분하면 $y'(x) + C$ 가 되고 차수가 n 인 고차도함수 $y^{(n)}(x)$ 를 적분하면 $y^{(n-1)}(x) + C$ 가 된다.

<미분 방정식의 분류>

선형미분방정식은 x^2 과 같은 멱 또는 독립변수의 비선형함수 그리고 x^2y 와 같은 종속변수와 독립변수의 함수와의 곱을 포함할 수 있다.

n 계 선형미분방정식은 2-86식처럼 표현 할 수 있고, 표현할 수 없다면 비선형이다.

1) 역연산이란 계산한 결과를, 계산을 하기 전의 수 또는 식으로 되돌아가게 하는 계산

$$y^{(n)} + f_1(x)y^{(n-1)} + \dots + f_{n-1}(x)y' + f_n(x)y = R(x) \quad (2-86)$$

$R(x)=0$ 이면 y 에 대한 미분방정식은 동차, 그렇지 않으면 비동차라고 한다.

미분방정식은 종속변수 또는 모든 항의 계수가 상수 일 때는 상수계수, 공통인자를 소거 한 후 종속변수 또는 계수로 독립변수를 가지고 있을 때는 변수계수로 나눌 수 있다.

★ 선형 미분 방정식의 일반형

따라서

n 계 선형미분 방정식을 일반형으로 표현하면

$$y^{(n)} + f_1y^{(n-1)} + \dots + f_{n-1}y' + f_ny = R(x)$$

로 표현 할수 있다.(이런 형태로 대입할수 없는 미분 방정식은 비선형 방정식 이다)

★ 선형 미분 방정식의 분류 ① 동차 / 비동차 = 재차 / 비제차

미분 방정식은

우변 $R(x)$ (비동차항) 의 유무로 미분방정식이 동차(homogeneous) 인지 비동차(non homogeneous) 인지 판별 할수 있다.

$R(x) = 0$ 이면 동차 방정식이고 0이 아니라면 비동차 방정식이다 즉, 우변에 어떠한 항이 있더라도 좌변에 종속변수와 독립변수의 곱의 항중에 하나와 소거가되면 우변이 0이므로 동차이다

★ 선형 미분 방정식의 분류 ② 상계수 / 변계수

미분 방정식은

종속변수 또는 그 도함수에 포함된 모든항의 계수에 의해 상계수(constant coefficients) 인지 변계수 (variable coefficients) 인지 구별한다.

종속변수 또는 그 도함수에 포함된 모든항의 계수가 상수이면 상계수 방정식 하나라도 독립변수를 포함한 항이 있으면 변계수 방정식이다.

즉, 상계수 방정식은 $ay'' + by' + cy = f(x)$ a, b, c 는 상수 의 형태이고

변계수 방정식은 $(x^2 - 1)y'' + xy' + cy = f(x)$ 의형태 이다.

<미분 방정식의 해>

미분방정식의 해는 간단한 적분으로도 풀 수 있지만 이러한 경우는 제한적인 경우이고 대부분의 미분방정식의 해법은 매우 다양하다. 대수학을 다룰 때는 간단한 이차함수의 대수방정식

즉, 일반적인 방정식을 만족하는 해를 항상 찾을 수 있다. 하지만 미분방정식을 다룰 때의 해는 정해진 구간에서 방정식을 만족하는 또 다른 함수로 나타난다.

대수방정식 중 하나인 삼차방정식을 생각해보자. 이 대수방정식을 만족하는 해는 3가지가 존재한다. 예를 들어 해가 1,2,3이라면 이 해들은 삼차방정식의 완전해라 말하고, 또 다른 해는 존재하지 않는다.

미분방정식에서도 같은 논리가 적용된다. 일반적으로 미분방정식의 해는 임의의 상수를 포함하는 복합해를 가진다. 이러한 미분방정식을 만족하는 임의의 상수를 가지는 해집합을 일반해라고 한다. 만약 방정식의 모든 해가 일반해를 만족시킨다면 이를 완전해라 한다. 특별한 초기조건이나 방정식의 해를 만족하는 어떠한 조건이 주어졌을 경우 이 값을 지정하여 얻을 수 있는 해를 특별해라 한다.

어떤 주어진 수가 대수방정식을 만족한다면 그 수는 대수방정식의 해라는 것을 우리는 알고 있다. 미분방정식에서도 마찬가지로 어떤 주어진 함수가 미분방정식을 만족한다면 이는 미분방정식의 해이다. 다시 말해 주어진 함수가 미분방정식에 대입되었을 때 항등식으로 나타난다.

특별관심 주제 : 벽과 지붕을 통한 열전달

정상 조건하에서 빌딩의 벽과 지붕의 어느 한 지점에서의 열 전달률은 다음과 같다.

$$= UA(T - T_0) = A(T_i - T_0)/R$$

T_i 와 T_0 는 내부와 외부의 온도이고, A는 열전달 면적, U는 총 열전달계수, R은 총 단위열 저항이다.

어느 한 구조의 총 열저항은 한 완전체를 실험하고 단위를 조합하는 것이 정확하겠지만, 많은 시간과 비용이 필요하다. 여기서 설명되는 해석적 접근으로 빠르고 직접적이며 정확한 값에 근접한 열저항을 구할 수 있다.

벽과 지붕을 통한 열전달은 노출된 표면에서 대류열전달계수나 복사열전달계수의 영향을 받는데, 이들의 물성치는 일반표면, 반사표면으로 표 (3-9) 에 나타나있다. 낮은 방사를 가진 표면이 복사열전달을 적게 받으므로 낮은 표면 전달계수를 갖는다.

TABLE 3-8
Unit thermal resistance (the R-value) of common components used in buildings

Component	R-value		Component	R-value	
	m ² ·C/W	ft ² ·h ² ·F/Btu		m ² ·C/W	ft ² ·h ² ·F/Btu
Outside surface (winter)	0.030	0.17	Wood stud, nominal 2 in × 6 in (5.5 in or 140 mm wide)	0.98	5.56
Outside surface (summer)	0.044	0.25	Clay tile, 100 mm (4 in)	0.18	1.01
Inside surface, still air	0.12	0.68	Acoustic tile	0.32	1.79
Plane air space, vertical, ordinary surfaces (ε _{air} = 0.82):			Asphalt shingle roofing	0.077	0.44
13 mm (½ in)	0.16	0.90	Building paper	0.011	0.06
20 mm (¾ in)	0.17	0.94	Concrete block, 100 mm (4 in):		
40 mm (1.5 in)	0.16	0.90	Lightweight	0.27	1.51
90 mm (3.5 in)	0.16	0.91	Heavyweight	0.13	0.71
Insulation, 25 mm (1 in):			Plaster or gypsum board, 13 mm (½ in)	0.079	0.45
Glass fiber	0.70	4.00	Wood fiberboard, 13 mm (½ in)	0.23	1.31
Mineral fiber batt	0.66	3.73	Plywood, 13 mm (½ in)	0.11	0.62
Urethane rigid foam	0.98	5.56	Concrete, 200 mm (8 in):		
Stucco, 25 mm (1 in)	0.037	0.21	Lightweight	1.17	6.67
Face brick, 100 mm (4 in)	0.075	0.43	Heavyweight	0.12	0.67
Common brick, 100 mm (4 in)	0.12	0.79	Cement mortar, 13 mm (½ in)	0.018	0.10
Steel siding	0.00	0.00	Wood bevel lapped siding, 13 mm × 200 mm (½ in × 8 in)	0.14	0.81
Gug, 13 mm (½ in)	0.067	0.38			
Wood, 25 mm (1 in)	0.22	1.25			
Wood stud, nominal 2 in × 4 in (3.5 in or 90 mm wide)	0.63	3.58			

▲ 표 3-8 건물에 자주 사용되는 재료의 단위열저항

TABLE 3-9
Combined convection and radiation heat transfer coefficients at window, wall, or roof surfaces (from ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chap. 22, Table 11).

Position	Direction of Heat Flow	h, W/m ² ·K		
		Surface Emissivity, ε		
		0.90	0.20	0.05
Still air (both indoors and outdoors)				
Horiz.	Up ↑	9.26	5.17	4.32
Horiz.	Down ↓	6.13	2.10	1.25
45° slope	Up ↑	9.09	5.00	4.15
45° slope	Down ↓	7.50	3.41	2.56
Vertical	Horiz. →	8.29	4.20	3.35
Moving air (any position, any direction)				
Winter condition (winds at 24 km/h)				
		34.0	—	—
Summer condition (winds at 12 km/h)				
		22.7	—	—

Surface emissivities can be obtained from $\epsilon = 1/A$.

표 3-9 일반표면 (ε=0.9), 반사표면 (ε=0.2 or 0.05)에서의 대류, 복사의 영향 ▶

하지만 이는 표면온도 21도씨, 표면 공기 온도 차이 5.5도씨를 기초로 했기 때문에 대기로의 추가적 복사열전도 등의 차이로 실제와는 상당히 다르다.

일반적으로 사용되는 내부 표면의 열전달계수 h_i 와 h_o 의 수치는 다음과 같다.

$$= 8.29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_0 = 34.0 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (울)}$$

$$22.7 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (여름)}$$

열전달계수 h_i 는 일년동안 거의 일정하지만 h_0 는 바람의 속도와 방향에 의존하기 때문에 여름(12km/h)과 겨울(24km/h)에서의 수치 차이가 난다.

대기 공간의 열저항은 그 층을 통과하는 온도차이나, 층의 두께, 대기온도, 각 표면의 방사율, 공기층의 방위, 열전달의 방향에 의존한다. 대기중의 어느 평행 평판의 유효방사율은

$$\frac{1}{\epsilon_{effective}} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1$$

여기서 ϵ_1 와 ϵ_2 는 공기중의 표면 방사율이다.

표(3-10)은 여러 경우의 공기중 유효방사율을 표시하였다. ▶

다른 표면의 방사율 0.9일 때($\epsilon_1 = \epsilon, \epsilon_2 = 0.9$) 대기중 어느 한 공간의 방사율,

양쪽 표면의 방사율은 ϵ ($\epsilon_1 = \epsilon, \epsilon_2 = \epsilon$)이다.

대기공간을 통한 방사 열전달과, 특정 표면온도는 유효방사율과 비례한다

TABLE 3-10
Emissivities ϵ of various surfaces and the effective emissivity of air spaces (from ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chap. 22, Table 3).

Surface	Effective Emissivity of Air Space		
	$\epsilon_1 = \epsilon$ $\epsilon_2 = 0.9$	$\epsilon_1 = \epsilon$ $\epsilon_2 = \epsilon$	$\epsilon_1 = \epsilon$ $\epsilon_2 = \epsilon$
Aluminum foil, bright	0.05*	0.05	0.03
Aluminum sheet	0.12	0.12	0.06
Aluminum-coated paper, polished	0.20	0.20	0.11
Steel, galvanized, bright	0.25	0.24	0.15
Aluminum paint	0.50	0.47	0.35
Building materials:			
Wood, paper, masonry, nonmetallic paints	0.90	0.82	0.82
Ordinary glass	0.84	0.77	0.72

*Surface emissivity of aluminum foil increases to 0.30 with barely visible condensation, and to 0.70 with clearly visible condensation.

◀표(3-11)은 다양한 조건에서의 공기층 두께 20mm, 40mm, 90mm의 열저항을 나타냈다. 이 값은 공기 누출이 없는 균일한 두께의 공기층에 적용되며 대기, 방사율, 온도차에 대한 열저항은 추정이나 보간법으로 얻을 수 있다.

균일한 두께의 층을 포함하는 R-value는 나열된 그 층의 단의 열저항을 합치는 것으로 결정되고 구조가 다른 소재의 연결부를 가진 경우엔 병렬연결이나 2차원 효과를 포함한다.

이때의 총 R-value는 (1) 서로 다른 구조부의 면적을 평행하게 통과하는 열 흐름 경로로 가정 (2) 열전달의 방향에 수직인 등온 평면으로 가정할 수 있다. (1) 경우 총 열저항을 과대평가하게 되며 (2) 경우 과소평가하게 된다.

보통 0.01과 0.1 $\text{m}^2\text{K/W}$ 범위 내 건물 구조의 다양한 요소사이의 열접촉저항은 대부분 무시할 수 있지만, 금속구조에 대해서는 상당한 차이가 있다.

대부분의 건물은 천정과 지붕사이에 다락방이 있으며, R-value 값은 다락방 환기 여부에 따라 차이가 있다. 충분히 환기된 경우, 내, 외부 온도가 같으므로 지붕을 통한 열전달은 천정의 R-value에 의해 정해진다. 이 때, 지붕과 천정사이의 복사 열교환을 고려해야 한다.

TABLE 3-11
Unit thermal resistances (R-values) of well sealed plane air spaces (from ASHRAE Handbook of Fundamentals, Table 2)
[at SI units (in m²·°C/W)]

Position of Air Space	Direction of Heat Flow	Mean Temp., °C	Temp. Diff., °C	20-mm Air Space					40-mm Air Space					90-mm				
				Effective Emissivity, ϵ_{eff}					Effective Emissivity, ϵ_{eff}					Eff. Emis.				
				0.03	0.05	0.5	0.82	0.03	0.05	0.5	0.82	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05		
Horizontal Up ↑		32.2	5.6	0.41	0.39	0.18	0.13	0.45	0.42	0.19	0.14	0.50	0.47					
		10.0	16.7	0.30	0.29	0.17	0.14	0.33	0.32	0.18	0.14	0.27	0.35					
		10.0	5.6	0.40	0.39	0.20	0.15	0.44	0.42	0.21	0.16	0.49	0.47					
		-17.8	11.1	0.32	0.32	0.20	0.16	0.35	0.34	0.22	0.17	0.40	0.38					
45° slope Up ↑		32.2	5.6	0.52	0.49	0.20	0.14	0.51	0.48	0.20	0.14	0.56	0.52					
		10.0	16.7	0.35	0.34	0.19	0.14	0.38	0.36	0.20	0.15	0.40	0.38					
		10.0	5.6	0.51	0.48	0.23	0.17	0.51	0.48	0.23	0.17	0.55	0.52					
		-17.8	11.1	0.37	0.36	0.23	0.18	0.40	0.39	0.24	0.18	0.43	0.41					
Vertical Horizontal →		32.2	5.6	0.62	0.57	0.21	0.15	0.70	0.64	0.22	0.15	0.65	0.60					
		10.0	16.7	0.51	0.49	0.23	0.17	0.45	0.43	0.22	0.16	0.47	0.45					
		10.0	5.6	0.65	0.61	0.25	0.18	0.67	0.62	0.26	0.18	0.64	0.60					
		-17.8	11.1	0.55	0.53	0.28	0.21	0.49	0.47	0.26	0.20	0.51	0.49					
45° slope Down ↓		32.2	5.6	0.62	0.58	0.21	0.15	0.89	0.80	0.24	0.16	0.85	0.76					
		10.0	16.7	0.60	0.57	0.24	0.17	0.63	0.59	0.25	0.18	0.62	0.58					
		10.0	5.6	0.67	0.63	0.26	0.18	0.90	0.82	0.28	0.19	0.83	0.77					
		-17.8	11.1	0.66	0.63	0.30	0.22	0.68	0.64	0.31	0.22	0.67	0.64					
Horizontal Down ↓		32.2	5.6	0.62	0.58	0.21	0.15	1.07	0.94	0.25	0.17	1.77	1.44					
		10.0	16.7	0.66	0.62	0.25	0.18	1.10	0.99	0.30	0.20	1.69	1.44					
		10.0	5.6	0.68	0.63	0.26	0.18	1.16	1.04	0.30	0.20	1.96	1.63					
		-17.8	11.1	0.74	0.70	0.32	0.23	1.24	1.13	0.33	0.26	1.92	1.68					

(a) English units (in h²·°F/Btu)

Position of Air Space	Direction of Heat Flow	Mean Temp., °F	Temp. Diff., °F	0.75-in Air Space					1.5-in Air Space					2.5-in Air				
				Effective Emissivity, ϵ_{eff}					Effective Emissivity, ϵ_{eff}					Eff. Emis.				
				0.03	0.05	0.5	0.82	0.03	0.05	0.5	0.82	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05		
Horizontal Up ↑		90	10	2.34	2.22	1.04	0.75	2.55	2.41	1.08	0.77	2.84	2.66					
		50	30	1.71	1.66	0.99	0.77	1.87	1.81	1.04	0.80	2.09	2.01					
		50	10	2.30	2.21	1.16	0.87	2.50	2.40	1.21	0.89	2.80	2.66					
		0	20	1.83	1.79	1.16	0.93	2.01	1.95	1.23	0.97	2.25	2.18					
45° slope Up ↑		90	10	2.96	2.78	1.15	0.81	2.92	2.73	1.14	0.80	3.18	2.96					
		50	30	1.99	1.92	1.08	0.82	2.14	2.06	1.12	0.84	2.25	2.17					
		50	10	2.90	2.75	1.29	0.94	2.88	2.74	1.29	0.94	3.12	2.93					
		0	20	2.13	2.07	1.28	1.00	2.30	2.23	1.34	1.04	2.42	2.35					
Vertical Horizontal →		90	10	3.50	3.24	1.22	0.84	3.99	3.66	1.27	0.87	3.69	3.40					
		50	30	2.91	2.77	1.30	0.94	2.58	2.46	1.23	0.90	2.67	2.56					
		50	10	3.70	3.46	1.43	1.01	3.79	3.55	1.45	1.02	3.63	3.40					
		0	20	3.14	3.02	1.58	1.18	2.76	2.66	1.48	1.12	2.88	2.78					
45° slope Down ↓		90	10	3.53	3.27	1.22	0.84	5.07	4.55	1.36	0.91	4.81	4.33					
		50	30	3.43	3.23	1.39	0.99	3.58	3.36	1.42	1.00	3.51	3.30					
		50	10	3.81	3.57	1.45	1.02	5.10	4.65	1.60	1.09	4.74	4.36					
		0	20	3.75	3.57	1.72	1.26	3.85	3.66	1.74	1.27	3.81	3.65					
Horizontal Down ↓		90	10	3.55	3.29	1.22	0.85	6.09	5.35	1.43	0.94	10.07	8.19					
		50	30	3.77	3.52	1.44	1.02	6.27	5.63	1.70	1.14	9.60	8.17					
		50	10	3.84	3.59	1.45	1.02	6.61	5.90	1.73	1.15	11.19	9.27					
		0	20	4.18	3.96	1.81	1.30	7.03	6.43	2.19	1.49	10.90	9.52					

지붕이나 천정 쪽에 알루미늄 호일을 이용한 복사 장벽을 설치하면 복사열전달을 감소시킬 수 있다. 이 방법으로 냉방비용을 2~10% 감소시킬 수 있다.

위의 그림은 다락 복사 장벽의 설치 가능 위치이다.

실험결과 다락방이 비어있는 경우 다락방 마루가 복사장벽을 설치하는 최적의 장소로 나타났다. 통풍이 되지 않는 다락에서 총 R-value는 천정의 R-value의 종합적인 영향과, 지붕의 R-value와 더불어 다락 공간의 열 저항도 고려해야 한다. 이때 다락공간은 공기통으로 취급한다. 이때 총 저항은

$$R_{\text{천정}} + R_{\text{지붕}} \left(\frac{A_{\text{천정}}}{A_{\text{지붕}}} \right) \text{이다.}$$

지붕과 천정의 면적비는 평평한 지붕에서 1, 경사진 지붕 ($A_{\text{지붕}} > A_{\text{천정}}$)은 1보다 작다. 경사진 지붕은 평평한 지붕보다 열전달 면적이 넓으며 지붕의 R-value를 감소시킨다.

특별관심 주제 : 음식의 냉장과 냉동

음식은 제 때 먹지 않으면 변질되는 성질 있다. 그래서 예로부터 인류는 음식을 저장할 때 음식이 변질되지 않도록 하기위해서 과학의 힘을 빌려왔다.

음식의 변질을 야기하는 원인은 크게 온도, 시간, Ph 등이 있는데 더욱더 직접적인 원인은 그 음식 안에 존재하는 박테리아, 효모, 곰팡이, 바이러스와 같은 미생물이다.

음식 속의 미생물들은 성장 조건이 갖추어 졌을 때 음식물속의 영양분을 사용하여 성장하고 개체수를 증가시킴으로써 음식물을 부패시키고 품질을 저하시킨다.

이것들을 방지하기 위해 냉동분야 기술이 적용되었고 미생물을 제어하기 위해서는 미생물

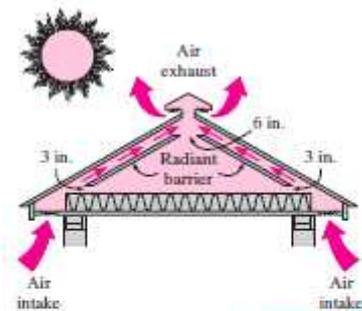


FIGURE 3-52

Ventilation paths for a naturally ventilated attic and the appropriate size of the flow areas around the radiant barrier for proper air circulation (from DOE/CE-0335P, U.S. Dept. of Energy).

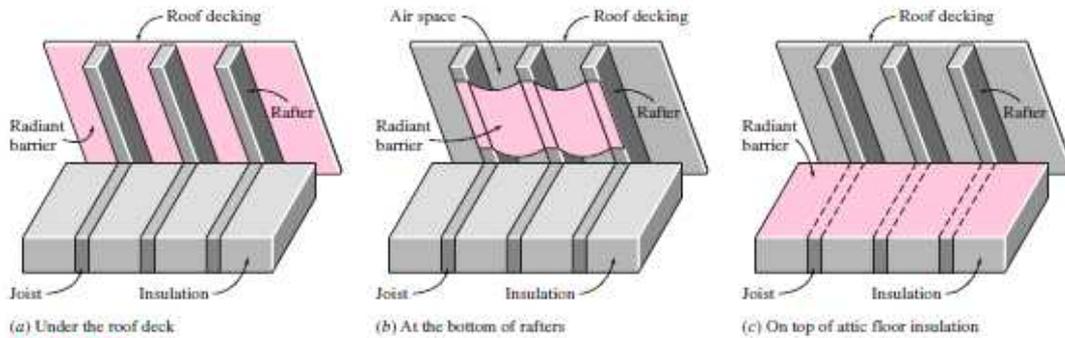


FIGURE 3-53 Three possible locations for an attic radiant barrier (from DOE/CE-0335P, U.S. Dept. of Energy).

들이 하는 역할과 전이, 성장, 소멸과 관련된 인자를 이해해야 한다.

음식물에 미생물이 침투하면 미생물은 새로운 환경 조건에 적응하기 위해 성장을 하지 않거나 느리게 성장하는 지연단계를 가지게 된다. 지연단계가 길면 길 수록 음식을 오래 저장 할 수 있다.

미생물이 적응하게 되면 이들이 성장하기에 적합한 환경 속에서 기하급수적으로 성장하는 지수성장 단계를 거친다.

마지막으로 영양분이 소진되고 독성이 쌓이게 되면 성장단계는 둔화되고 소멸기간이 시작된다.

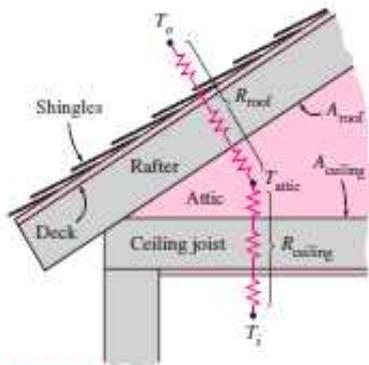
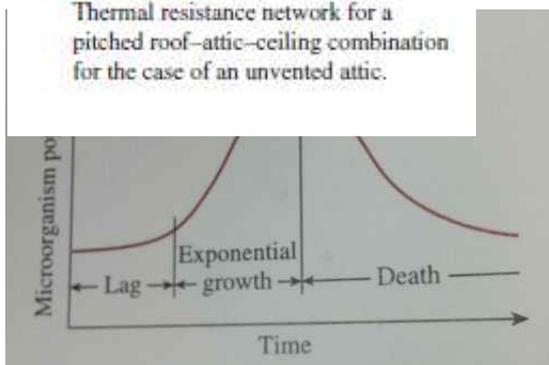
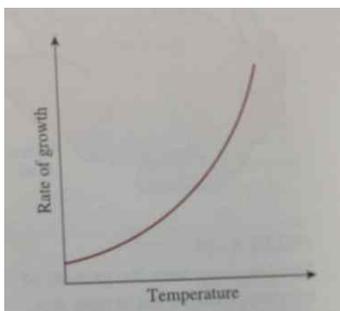


FIGURE 3-54 Thermal resistance network for a pitched roof-attic-ceiling combination for the case of an unvented attic.



미생물의 성장 속도는 화학구조, PH 수준, 억제제의 포함 여부, 미생물 대항체와 같은 음식물 본래의 특성, 물의 영향, 온도, 상대습도, 공기유동 등 여러 환경적인 영향을 받는다. 음식물 내부에서 미생물의 성장률의 조절을 위해서는 온도를 조절하는 것이 가장 중요하다.



미생물은 20~60도 사이의 따뜻한 온도에서 가장 잘 성장하고 70도 이상의 고온에서는 대부분 죽는다. 냉각은 미생물의 성장률을 감소시키기 위한 효과적이고 실질적인 방법이다.

미생물의 성장 조건을 고려해볼 때 4도 또는 그이하의 온도가 안전한 냉장 온도로 알려져 있다.

실제 냉장고를 조사해보면 냉장실은 2도가 적정온도로 기록되어있다. 이는 미생물의 성장 조건을 고려한 것임을 알 수 있다.

온도 이외에도 습도, 산소유무 등 미생물의 성장과 전이에 영향을 미치는 요소들이 많이있다. 미생물의 다양성을 조사해보면 어떤 미생물은 성장하기에 산소를 필요로 하지만 어떤 미생물은 산소 없이도 성장하는 것도 있다. 또 어떤 미생물은 높은 습도에서 잘 성장하는 반면 어떤 미생물은 낮은 습도에서 잘 성장한다.

이것은 한 미생물의 성장을 지연시키기 위해서 어떠한 조건을 차단시켰을 때 다른 미생물의 성장을 가속 시킬 수도 있다는 말이다.

그렇지만 다행이도 음식물 속에 있을 수 있는 보편적인 미생물들은 성장속도가 온도의 함수라고 할 수 있을 만큼 적정온도를 유지함으로써 성장속도를 감소 시킬 수 있다.

미생물의 다양성을 고려한 방법은 음식을 세분화하여 과일, 야채, 채소칸, 고기칸 등 칸을 나누어 특정 환경을 조성하는 것이다.

예를 들어 과일칸은 산소량을 감소시킴으로써 산소를 필요로 하는 미생물의 성장을 지연시킬 수 있다.

음식물 속 미생물을 줄이기 위해서 1.철저한 위생관리 2.주위 환경 변화 3. 열처리, 화학물질을 통한 박멸 등의 방법이 있다.

예를 들어 박테리아 운반 먼지를 제거하는 필터 사용, 필터를 건조한 상태로 유지, 응축수 제거 시스템 사용, 조리 음식과 조리 안된 음식의 접촉 피함, 상대습도 60이하로 유지, 높은 온도에서 가열, 화학처리, 자외선, 태양복사 박멸 등이 있다.

그리고 미생물의 생존과 성장을 구분 할 필요가 있다. 특정 미생물은 낮은 온도에서 성장할수 없으나 장기간 생존할수 있다. 따라서 냉동은 미생물 박멸에는 효과적이지 못하다. 그래서 식품의 냉장에서는 냉각률이 매우 중요하다.

식품의 냉장과 냉동

우리가 주변에서 쉽게 보고, 먹을 수 있는 육류, 생선, 야채, 과일과 같은 상하기 쉬운 식품의 보존기간은 통상 1°C에서 4°C 사이 즉, 어는점보다 약간 높은 온도에 보관하면 보존기간을 몇 일간 연장할 수 있다. 이것을 식품의 냉장이라 한다. 또한 식품은 -18°C에서 -35°C 사이의 아주 낮은 온도에서 냉동하면 보존기간을 몇 달까지 연장할 수 있다. 이것을 식품의 냉동이라 한다. 음식물의 냉장은 식품 내부의 화학 및 생물학적 반응을 늦추지만 질과 영양분을 잃게 되는 '가치 저하'를 동반한다. 하지만 실온에 보관했을 때보다 손실률은 줄어든다. 대부분의 식품에서 얼음결정의 크기, 품질, 구조, 영양분, 외형 등은 냉동률이 가장 큰 영향을 미친다. 천천히 냉동하면 얼음 결정이 커지고, 급속 냉동을 하면 많은 수의 얼음결정이 빠르게 형성되지만 크기는 작다. 큰 얼음결정은 세포벽에 구멍을 내고 녹이는 과정에서 조직이 손상되게 하여 식품의 맛 뿐 만 아니라 영양분도 잃게 한다. 즉 가치저하를 동반하지 않으려면 천천히 냉동하기보다는 급속 냉동이 좋은 방법이다. 일반적인 음식물

의 냉장은 상변화가 없는 냉각 과정으로 ①응고점까지의 냉각(현열 제거) ②냉동(잠열 제거) ③원하는 온도까지 과냉각(냉동식품의 현열 제거) 의 세 단계를 거친다.

육류제품

육류 제품을 보관하기 위해서는 1.7 °C 정도의 온도가 되도록 급속냉동을 시켜야 한다. 이는 미생물의 성장을 막고, 부패를 최소화하기 위해서이다. 또한 육류의 품질인 연한 정도를 유지하는 것이 육류의 냉장과 냉동에서 가장 중요한 요소이다.

고기는 주로 미세한 근육섬유다발로 구성되어 있으며, 서로간의 조직을 유지시켜주는 긴 연결세포 내부에 다발의 형태로 존재한다. 냉장 공기 온도를 낮추거나 공기 속도를 더 빠르게 하면 고기의 냉각율이 증가하지만, 표면이 얼게 되어 고기가 질겨지게 된다.

고기 덩어리 중 가장 두꺼운 부분은 넓적다리이며, 넓적다리의 중심부는 가장 늦게 냉각된다.

반면, 노출 표면은 열 손실로 인하여 온도가 감소하는 경향이 있다. 따라서 고기 덩어리의 냉각은 온도계를 넓적다리 살의 중심부에 설치하면 가장 잘 감지할 수 있다.

따라서 과도한 수축, 질겨짐, 변색을 방지하기 위해서 적절한 수준의 온도, 습도, 공기유동 등을 조절해야 한다.

보다 효과적인 냉동기법으로써 급속냉각이라는 방법이 있다.

급속냉각은 -40°C 에서 -30°C 의 낮은 온도, 그리고 2.5m/s에서 5m/s의 빠른 속도의 공기를 제품 위로 공급한다. 제품의 내부온도는 냉동 창고에 보관할 경우 -4°C , 즉시 운송할 경우 -18°C 이하로 냉각해야한다.

냉동률은 포장재의 재질, 단열재 특성, 가장 큰 상자의 두께, 고기의 종류, 냉장 시스템의 용량에 따라 달라진다.

냉장수송대는 냉동 부하를 줄이고, 저장 공간에서 온도변화를 억제한다. 수송대의 냉장온도는 4에서 7°C , 냉동온도는 1.5°C 정도이다. 수송대에서 제품표면에서 응축과 이로 인한 품질손실을 막기 위해 공기 노점온도(dew point)는 제품의 온도보다 낮게 유지되어야 한다.

※노점온도(dew point)

일정한 압력에서 공기의 온도를 낮추어 갈 때 공기 중의 수증기가 포화하여 이슬이 맺힐 때의 온도를 말한다.

조류식품

조류식품은 단기 저장을 위하여 1에서 2°C에서 또는 -2°C에서 냉동, 장기저장을 하기 위해서는 냉동하여 보관한다.

조류는 버둥거리는 것을 막기 위하여 자르기 전에 먼저 전기로 기절을 시킨다. 90초에서 120초 정도 피를 빼낸 다음, 털을 뽑기 위해 일반적으로 51에서 55°C 정도의 온수탱크에서 120초 정도 데친다. 그 다음부터는 기계를 이용하여 털을 뽑는다.

미생물의 성장을 조절하기 위하여 미국 식약청은 고기 덩어리의 무게 1.8Kg이하는 4시간 이내, 1.8에서 3.6Kg 사이는 6시간 이내, 3.6Kg 이상은 8시간 이내에 조류를 4°C 또는 그 이하로 냉각하도록 규정하고 있다. 담금냉각은 건조해지는 것을 방지하는 것 이외에도 물을 흡수하여 새의 무게를 증가시키는 이점이 있다.

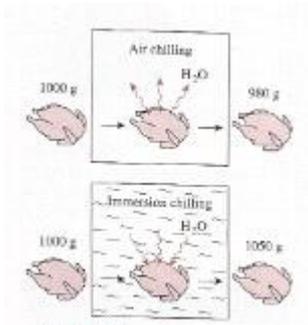


FIGURE 4-52

그림 4-52를 보면, 포장하지 않은 조류를 냉각 하는 경우 1에서 2% 정도의 수분 손실이 발생하지만, 담금냉각을 이용하면 최고 4%까지 습기를 흡수할 수 있도록 한다. 담금냉각 시 고기 덩어리 일부가 물에 용해되어 녹아 없어지지만, 맛에 그다지 큰 영향을 주지 않는다.

오늘날 얼음 슬러시를 사용하는 냉각탱크는 연속 유동타입 담금 냉각기로 대체되고 있다. 연속 얼음 슬러시 냉각기는 시간당 최고 10000마리의 처리 속도에서 조류의 내부온도를 32에서 4°C까지 떨어뜨리는데 30분이 소요된다. 그러나 이 방식에는 살모넬라와 같은 박테리아의 감염이 우려되므로 오염을 조절하기 위하여 물을 염소처리 해야한다.

육질의 연하게 유지하는 것은 조류의 냉동과 냉각에 중요한 요소이다. 사후강직 이전에 조류를 요리하거나 냉동하면 매우 질기다. 도살 즉시 고기는 자연적으로 연해지기 시작하며 3 시간 후에는 천천히 연해진다. 뜨거운 물에 담거나 고기를 자르는 방법은 연해지는 데 오히려 역효과를 가져온다. 데우는 물의 온도나 시간이 증가하면 고기는 질겨지고, 반대의 경우 연해진다. 고기를 자르는 것과 고기를 토막 내는 것은 연해진 이후에 해야한다. 그 이유는 털 뽑는 기계에서 충격을 주는 것과 급속으로 냉각하는 것은 육질을 질겨지게 하기 때문이다.

조류는 매우 상하기 쉽기 때문에 보존기간을 증가하기 위해서는 가능한 낮은 온도에서 보관해야한다.

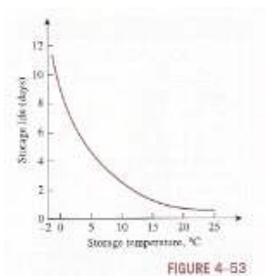


FIGURE 4-53

그림 4-53을 보면, -2°C에서 36시간, 0°C에서 14시간, 5°C에서 7시간, 25°C에서 1시간 이내에 두 배로 증가하는 것을 볼 수 있다.

조류 표면에 미생물이 번식하면 악취와 박테리아 진액이 발생하기 때문에, 처리과정에서 장비를 자주 청소하고 고기를 세척하는 위생적 처리는 보관온도와 마찬가지로 저장기간을 증가시키는데 중요하다,

외관상 보기 좋게 하려면 조류를 급속 냉각해야 한다. 조류를 천천히 냉각하면 검은색이 나며, 크기가 큰 얼음결정이 생겨 조직에 손상을 준다. 반면 냉동에서는 얼음결정의 크기가 작다. 최상의 결과를 얻기 위해서는 분사 터널에 상자를 일정한 간격으로 배열하여 공간을

완전히 채우고 공기유동이 상자의 모든 부분에 균일하게 흐르도록 해야 한다.

조류냉동에 사용되는 또 다른 방식으로는 글리콜, 염화칼슘 액체로 채워진 판 사이에 샌드위치 형태로 냉동하는 기법과 액체질소를 이용한 극저온 냉각 기법이 있다. 첫 번째 방식은 강제 공기유동에 비해 초기투자비용과 유지비가 적게 들어가지만 포장에 작은 구멍이 있거나 찢어진 경우 문제의 소지가 있다. 두 번째 방식은 때에 따라서 조류는 액체질소를 사용하여 -73°C 로 냉동한후, 공기온도가 -23°C 되는 실내에서 최종냉동을 한다.

장기간 냉동하면 맛과 즙에 상당한 변화가 오며, 썩은 것 같은 불쾌한 냄새가 난다. 냉동 조류는 수분이 빠지거나 냉동화상을 동반하기도 하는데 제품의 겉모양을 해치고 화상부위가 질겨지게 된다. 탈수와 냉동화상은 가습, 저장온도를 낮추거나 침투가 되지 않는 필름을 포장하며 막을 수 있다. 저장기간은 조류를 무산소 환경에서 포장하면 상당히 증가시킬 수 있다.

냉동조류는 맛의 큰 변화가 없이 공기 중이나 물 속, 냉장고 그리고 오븐 안에서 녹일 수 있다. 또한 커다란 용기 속에서 냉수에 4에서 6시간 담그거나 종이봉지에 넣어 녹일 수도 있다. 공기 중이나 물속에서 녹일 때 조류의 표면을 냉각하여 미생물이 자라지 않도록 주의해야 한다.

특별관심 주제 : 수치오차의 제어

원통에서 온도분포에 대한 수치계산 결과와 엄밀한 결과를 비교한다면, 수치계산결과와 엄밀해(참값)가 충분히 가까울 수도, 아닐 수도 있다. 이 차이는 수치해가 오차를 포함할 수 있기 때문이고, 주로 3가지 오차가 있다.

계산자의 오차: 계산하는 사람이 실수로 계산을 틀려서 발생하는 오차.

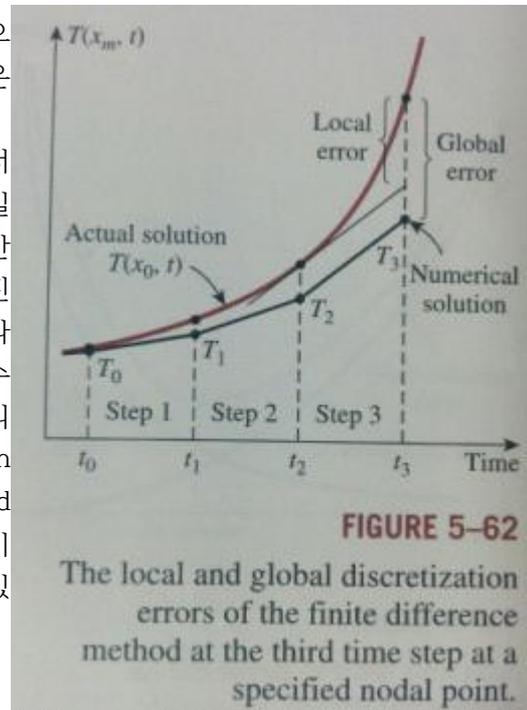
이산화 오차(discretization error)(절삭(truncation) 또는 수식(formulation)오차라고도 불림): 수치해법의 수식에서 사용되는 근사화에 기인한 오차

반올림 오차(round-off error): 컴퓨터가 유효숫자 이하의 숫자들을 반올림(버림)하기 때문에 발생하는 오차.

이산화 오차

이산화 오차는 각 단계에서의 도함수를 차분형으로 치환한다거나 두 인접한 절점들 사이의 실제 온도분포를 직선구역으로 치환하는 데 기인한다.

특정한 한 절점에 대한 비정상 열전달 문제에서 시간에 따른 해의 변화를 살펴보자. 수치해와 엄밀해는 첫 번째 시간 간격 초기에는 서로 일치하지만 t 가 증가함에 따라 수치해와 엄밀해는 서로 멀어진다. $t=\Delta t$ 일때의 차이를 국소(local)이산화 오차라고 한다. 국소 이산화 오차는 시간단계가 늘어날수록 계속 축적되는데, 축적된 국소 이산화 오차의 합을 전체 이산화 오차(global discretization error)또는 축적된 이산화 오차(accumulated discretization error)라고 한다. 해함수의 방향이 자주 변하면 전체 이산화 오차를 감소시킬 수도 있다.



컴퓨터나 계산기에는 sin함수 cos함수 exp함수 등 여러 가지 함수가 Taylor expansion의 무한급수 형태로 내장되어 있는데, 실제로 무한히 계산하는게 아니라, 적절한 지점 이하의 term들은 사용하지 않기 때문에 오차가 발생하며, 이러한 것도 이산화 오차라고 한다.

Δt , Δx 와 같은 차분값을 dx , dt 와 같은 미분값으로 접근시키면 이산화 오차를 0으로 접근시킬 수 있다.

반올림오차

컴퓨터는 일반적으로 유효자리수가 7개인데, 이것을 단일 정확도라고 한다. 단일 정확도 모

드에서 44444.12345-44444.12032의 계산을 하게될 경우 두 숫자 모두 7번째 자리까지 44444.12로 같으므로, 컴퓨터는 같은 수로 인식하여, 결과는 0.00313이 아닌 0이 된다.

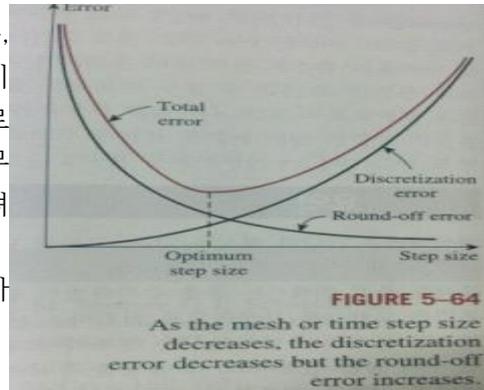
이렇게 계산 과정에서 제한된 개수의 자리수를 가지기 때문에 발생하는 오차를 반올림 오차라고 한다. 이것은 계산의 수, 반올림의 방법, 컴퓨터의 기종, 계산의 순서에 따라 달라진다. 반올림 오차를 줄이기 위한 방법들로, 어떤 수에 10을 곱하는 것은 그 수를 10번 더하는 것보다 더 안전하다. 또한 어떤 덧셈 과정을 가장 작은 수에서 시작하여 큰 수로 행하여 나가는 것이 더 안전하다. 이 법칙은 부호가 교차하는 많은 항들의 전개식의 값을 구할 때 특히 중요하다.

반올림 오차는 풀이 과정동안 수행된 계산 수에 비례한다. 예를 들어 망의 크기나 시간 단계의 크기를 반으로 줄이면, 계산의 수는 두 배가 되고, 그러면 마무리 오차가 축적되게 된다.

수치해법에서의 오차제어

수치해법으로 얻은 어떤 결과에 포함된 전체 오차는, 단계크기를 줄이면 줄어드는 이산화 오차와, 단계크기를 줄이면 증가하는 반올림 오차의 합이다. 그러므로 좀 더 정확한 해를 얻기 위하여 단계의 크기를 너무 줄이면 반올림 오차의 급격한 증가로 실제로는 오히려 더 정확하지 못한 결과를 낳게 된다.

우리는 수치해법으로 얻어진 결과의 정확성을 평가하기 위하여 다음과 같은 실용적인 절차를 추천한다.



- 경험에 비추어 이치에 맞는 망크기 Δx (비정상 문제에 대하여 시간단계 Δt)로 계산을 시작한다. 그다음 $\Delta x/2$ 의 망크기로 계산을 반복한다. 만약 망크기의 반으로 계산하여 얻어진 결과가 원래의 크기의 결과와 크게 다르지 않다면 이산화오차는 받아들일 수 있는 수준이다. 하지만 차이가 크다면, 망크기를 더 줄여서 이산화오차가 받아들여질 수 있는 수준까지 감소할 때 까지 계산을 반복해야 한다.

- 망크기를 일정하게 하고 이중정확도를 사용하여 계산을 반복한다. 만약 변화가 현저하지 않다면, 마무리 오차는 문제가 되지 않는다는 결론이 된다. 하지만 변화가 크다면 망크기를 늘리든지 계산의 순서를 바꾸든지 하여 전체 계산 수를 줄여야 한다. 그러나 증가된 망크기가 이산화 오차를 발생시킨다면 타당한 절충점을 찾아야 한다.

특별관심 주제 : 미소 규모의 열전달

각종 최신 장치들은 에너지의 상호작용을 이해하고 조절해야하는데 조절을 위해서는 표면 현상을 이용하거나 부피에너지에 초점을 맞춘다.
그러한 예로 미소규모의 열전달이 있다.

미소 시스템의 주요한 메커니즘의 세부적 이해는 미래 기술의 중점에 서 있는데 평형상태의 접근법에서 재료의 연속성으로 유도되는 고전적 열전달 지식으로는 마이크로 나노 스케일 장치 개발이 더 이상 유효하지 않다.
따라서 일반적인 열전달 개념에 대한 이해가 필요하다.

길이 스케일은 어떤 물체의 길이 스케일이 줄어들어 따라 물체의 단위 부피당 표면적이 증가한다는 사실로 중요성을 알 수 있다. 즉, 마이크로 스케일의 물체인 경우 일반적으로 볼 수 있는 물체보다 표면적을 통한 열전달이 매우 중요하다는 것을 의미한다. 보통 장치 에너지 전달 및 변환은 폭 넓은 스케일이며 모델링이 까다롭다. 전자나 열전기 장치의 열에너지 전달 길이 스케일은 밀리미터에서 나노미터 까지며 예로 드레인에서 발생한 열이 밀리미터 단위 두께의 회로기관을 통해 전도되는 마이크로전자 칩을 들 수 있다.

작은 단위 시간 스케일은 에너지전달 메커니즘에 중요한 역할을 한다.
예로, 초단파(피코: 10^{-12} 초, 펨토: 10^{-15} 초) 펄스레이저가 있다. 매우 작은 시간 스케일은 국소 영역에서 레이저와 재료의 상호작용이 고 에너지의 축적 및 전달에 도움이 되게 한다.

연속체 모델의 응용가능성은 국소 무차원 누센 수(Kn)의 값에 의해 결정된다.
무차원 누센 수는 열전달 매개체의 평균 자유행로(mfp)와 시스템의 특성길이 스케일(열확산길이)의 비로 정의된다. 미소규모 효과는 국소 무차원 누센 수(Kn)가 0.001보다 작을 때 더 중요해진다. 결과적으로 재료의 열 물리화학적 특성치들은 구조에 더 영향을 받고 열전도 과정은 넓은 범위의 복사효과를 보인다는 것을 알 수 있다.

현재 가장 적절한 모델은 포논(음자)의 개념이다. 음자란 격자 진동이나 음파를 양자화한 준입자이다. 어떤 균일한 고체 재료의 열에너지는 격자 진동으로 해석될 수 있다. 격자 진동을 하는 원자들은 그 재료 안에서 음속으로 에너지를 전달하는 음파들의 모드를 보여주고, 양자역학적 원리로부터 음자들은 제로 스핀을 가지는 보손들의 입자와 같은 파동-입자의 이중성들을 보여준다. 음자는 고체의 물리적 성질인 열전도도나 전기전도도에 큰 영향을 끼치는데, 그 이유는 전기 전도나 열전도, 빛의 복사 등의 현상이 음자의 흡수, 방출되는 과정으로 설명되는 경우가 많기 때문이다.

절연고체에서는 음자들은 열전도가 일어나는 최초의 메커니즘이다.

만약 연속체 접근법이 성립하지 않으면, 기존의 뉴턴의 냉각 법칙은 수정되어야 한다.
벽과 근접한 유체의 온도차가 있다면 즉, 미소규모에서의 온도차이가 있다면, 스몰루초푸스

키에 의해 유도된 식 6-84 식을 이용할 수 있다.

이 식은 온도 점프를 계산하는 식으로 T 는 절대온도 T_w 는 열순응계수로서 벽으로부터 확산되어

반사되는 분자들을 가리키며, γ 는 비열비(C_p/C_v), Pr 은 프랜틀 수이다. 이 식을 $-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)$ 를

좌변에 두고 정리를 하면, 식 6-85와 같이 된다.

예를 들면, 폭 $H=1.2\mu\text{m}$ 인 마이크로튜브 안에서 질소와 헬륨의 초음속 유동의 경우에 대한 온도분포와 마하수(유체의 속도를 유체속을 전파하는 음파의 속도로 나눈 값. 유체의 유속 v 와 유체속을 전파하는 음파의 속도 C 의 비($M=v/c$))가 그림 6-44에 나타나 있다.

(a)는 Kn (누센수)=0.062일 때 질소의 경우(누센수 : 진공에서 기체의 흐름, 열이동, 확산을 취급하는 경우에 사용하는 무차원 수, 기체분자의 평균자유행동 와 장치나 흐름의 대표길이 L 의 비, 평균자유행동 : 어떤 입자가 연속적으로 충돌하면서 이동하는 평균거리) 그림 6-44(a)와 같이 벽의 온도 T_w 는 약 322K 기체의 온도 T_g 는 507k 정도이다. 이는 그림 6-44(b)와 같이 마하수는 x 방향으로 조금씩 감소하지만, 마하수가 1보다 크므로 초음속상태로 남아있다.

그리고, 누센수 0.14, 벽의 온도가 298K 인 헬륨가스의 경우 벽에 근접한 기체의 온도는 586K까지 올라간다.

그리고 그림 6-44(d)에서 보면, 이러한 경우의 열전달은 유동이 일어나지 못하게 할 수 있을 만큼 크다. 즉 마하수가 1보다 작아지게 된다.