

재료의 광학적 물성

광학적 물성 (Optical Properties)

- 빛의 특징

- a) 빛의 특징

- 빛의 입자 (particulate)와 파동 (wavelike) 특성

- b) 광자 (Photon)

- 빛의 양자 단위 (quantum unit of light)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

E = energy of a photon

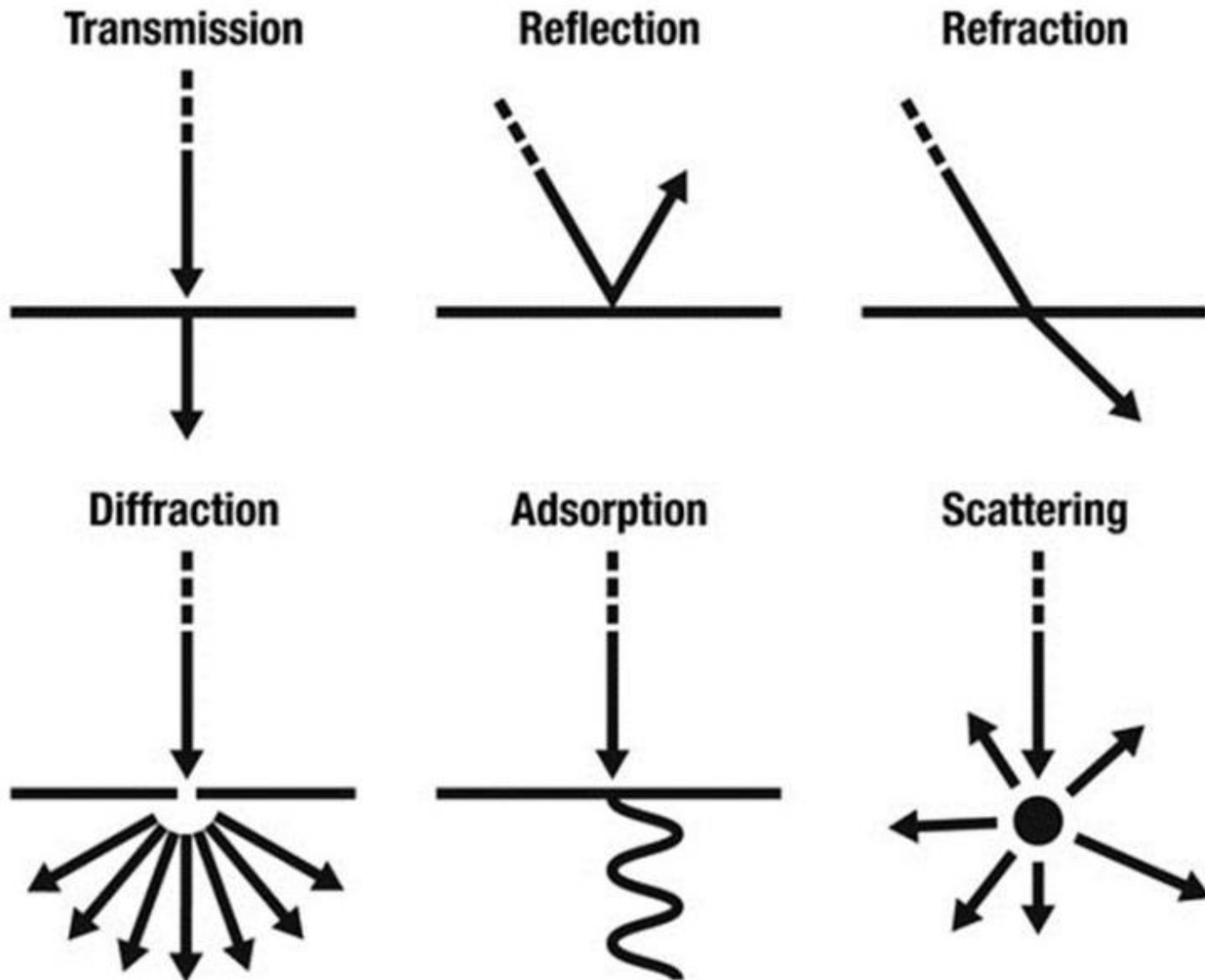
λ = wavelength of radiation

ν = frequency of radiation

h = Planck's constant (6.62×10^{-34} J·s)

c = speed of light in a vacuum (3.00×10^8 m/s)

광학적 물성 (Optical Properties)



굴절 (Refraction)

• 굴절 (Refraction)

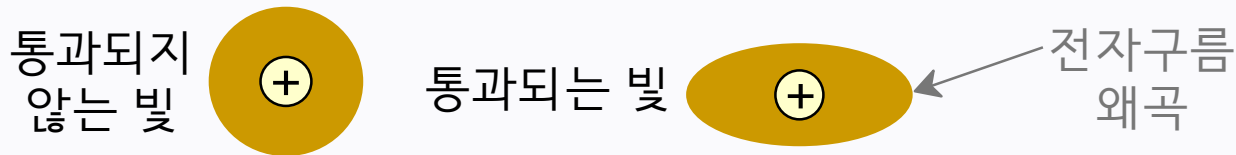
a) 원리

- 투과된 빛이 전자구름을 왜곡함에 의해 발생.

b) 빛의 속도

- 진공에서 보다 느려짐.

- 매질이 다른 물질을 통과할 때 통과 속도가 바뀌는 것.



$$n (\text{굴절률}) \equiv \frac{c (\text{velocity of light in vacuum})}{v (\text{velocity of light in medium})}$$

재료	n
유리	ca. 1.5 - 1.7
플라스틱	1.3 - 1.6
다이아몬드	2.41

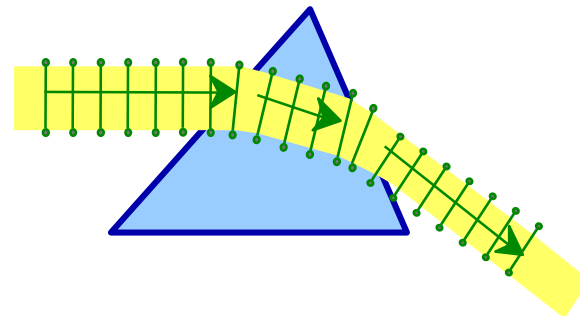
c) 빛의 속도

① 유리에 금속이온 첨가

- 금속첨가 유리 통과 빛의 속도 감소

② 빛의 속도 변화

- 프리즘 통과 빛의 구부러짐 (bent)



산란 (Scattering)

- 산란 (Scattering)

- a) 빛의 산란

- 매질 표면에서 다양한 방향으로 빛의 진행.

- b) 재료에 따른 산란현상

- ① 무정형 기공 없는 고분자 (Amorphous pore-free polymer)

- 산란 거의 없음 (Little or no scattering)
 - 투명 (무정형 폴리스타이렌 (Polystyrene))

- ② 결정질 고분자 (Semicrystalline polymers)

- 무정형 및 결정형 영역에서 다른 굴절지수
 - 경계면에서 빛의 산란
 - 높은 결정질 고분자는 불투명 나타냄.
 - 불투명 (LDPE (Low-density polyethylene))

흡수 및 투과 (Absorption & Transmission)

• 흡수 및 투과 (Absorption & Transmission)

a) 빛의 흡수

- 광자가 밴드갭 에너지와 동일 및 큰 경우 발생
- 흡수된 빛의 양 측정 (Beer's Law)

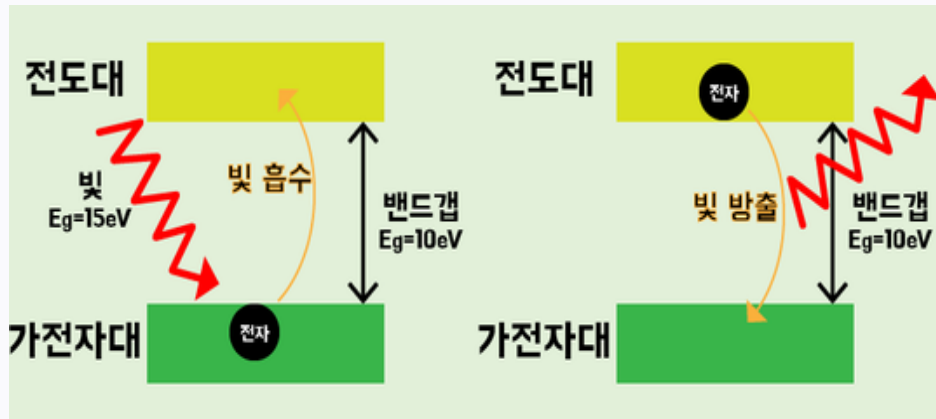
$$I'_T = I'_0 e^{-\beta l}$$

β = 흡수계수 (cm^{-1}), l = 샘플 두께 (cm)
 I'_0 = 입사한 빛의 세기, I'_T = 투과한 빛의 세기

b) 빛의 투과

- 밴드갭 에너지보다 작아 매질을 지나가는 것

밴드갭보다 큰 에너지 빛 조사 (빛 흡수)



밴드갭보다 작은 에너지 빛 조사 (빛 투과)

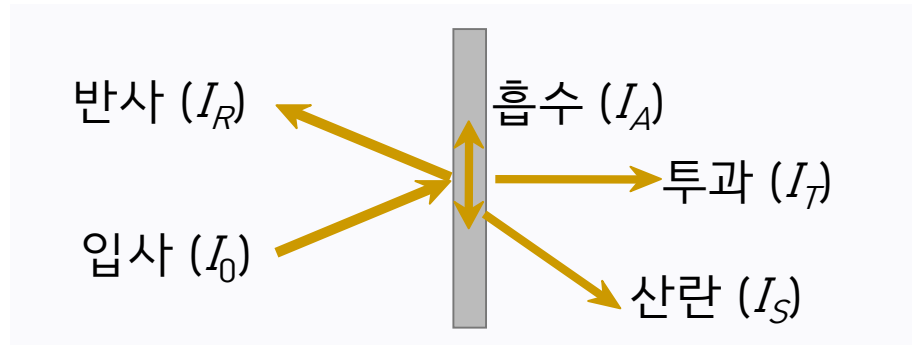


빛과 고체의 상호작용

• 투명도 (Transparency)

a) 빛의 세기: 입사한 빛의 반사, 흡수, 산란 및 투과 정도에 의존

$$I_0 = I_T + I_A + I_R + I_S$$



b) 재료의 광학적 분류



금속의 광학물성

• 금속재료에서 빛의 흡수 및 반사

a) 페르미 준위(E_f)

- 절대 영도 (0K)에서 전자가 가질 수 있는 최대 에너지 준위
- 임의의 온도 T에서 전자가 채워질 확률 $f(E=E_f)=1/2$ 인 에너지 준위

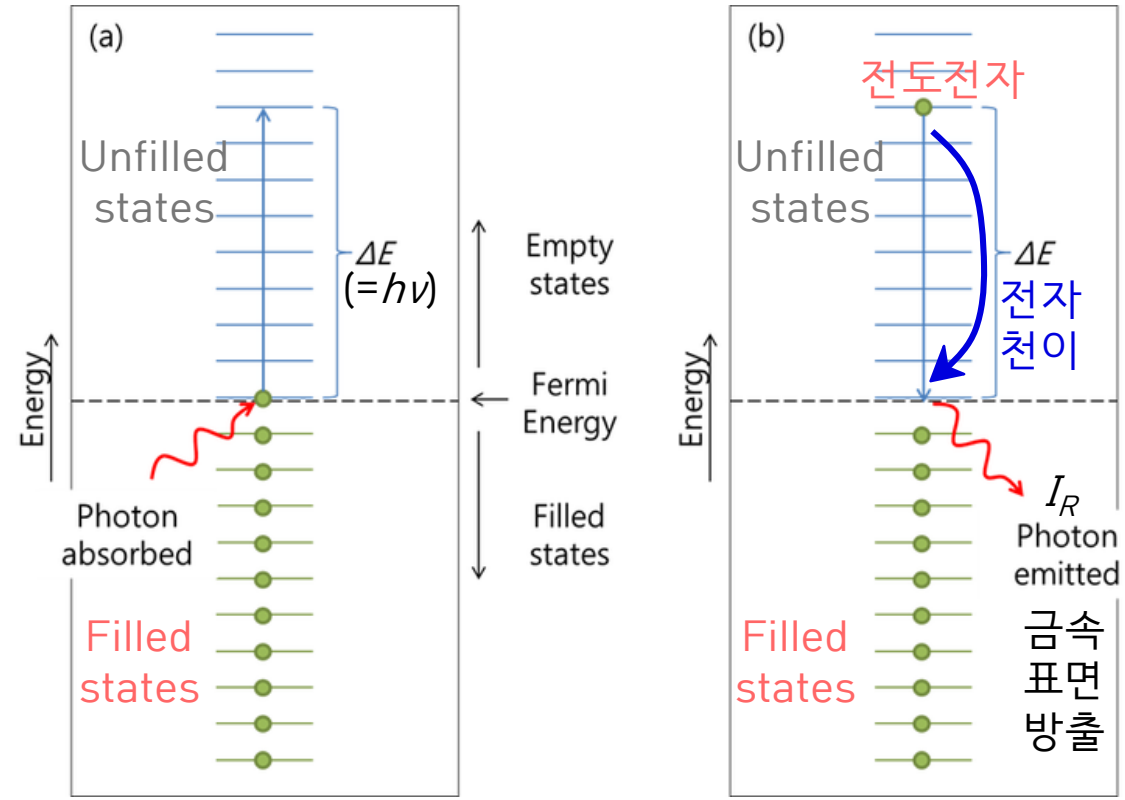
b) 빛의 흡수와 반사

① 빛의 흡수

- 최고에너지 준위에서 빛의 흡수
- 에너지 변화량 (ΔE) = 광자 에너지

② 빛의 반사

- 고에너지에서 저에너지로 직접 변화
- 광자 재방출
- 반사율 (I_R/I_0): 90~95%



금속의 광학물성

- 금속재료에서 빛의 반사

a) 반사도 (Reflectivity, I_R/I_0)

- ① 금속의 반사도: 0.90~0.95.
- ② 금속 표면: 빛에 의해 빛남
- ③ 반사광: 흡수된 빛 대부분은 같은 파장에서 반사되어 나옴

b) 빛의 흡수

- ① 빛의 일부만 흡수됨
- ② 반사된 빛의 색깔이 파장 분포에 의존함
- ③ 빛 흡수 의한 금속색깔
 - 구리와 금의 빛 흡수 (녹색, 파란색): 반사된 빛은 금색 발현

비금속의 광학적 물성

- 비금속재료에서 빛의 반사

a) 비금속의 반사도 (Reflectivity of Nonmetals)

- 빛의 고체 직교 입사 (normal incidence) 투과 시 굴절률 (refractive index (n))

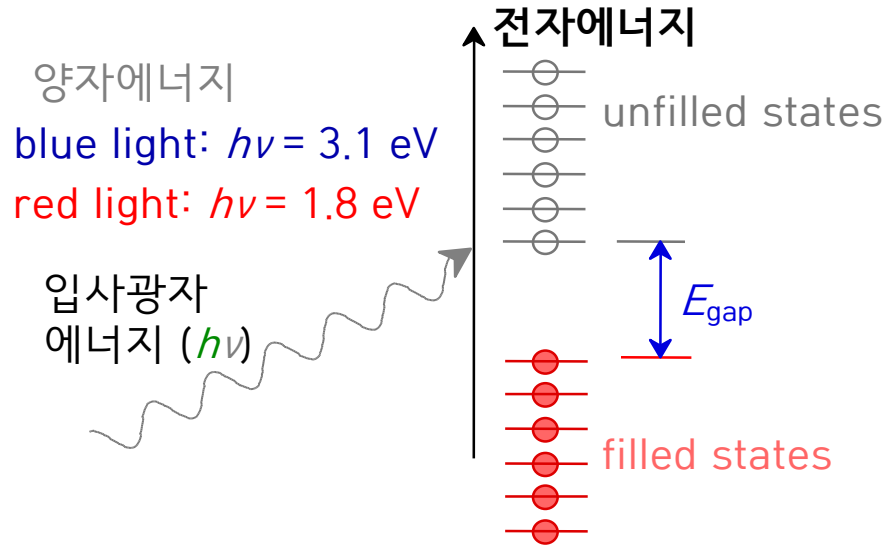
$$R = \text{reflectivity} = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

반도체의 광학적 물성

• 반도체에서 선택적 빛의 흡수

a) 반도체에서 빛의 흡수

- 특정 주파수 (ν)의 빛 흡수가 전자천이에 의해 발생 ($h\nu > E_{gap}$)



b) 양자에너지에 따른 빛의 물성

- $E_{gap} < 1.8 \text{ eV}$: 모든 빛의 흡수, 불투명 재료 (e.g., Si, GaAs)
- $1.8 \text{ eV} < E_{gap} < 3.1 \text{ eV}$: 부분적 빛 흡수, 유색 재료
- $E_{gap} > 3.1 \text{ eV}$: 빛이 흡수되지 않음, 무색 투명 재료 (e.g., diamond)

반도체의 광학적 물성

• 반도체에서 빛의 선택적 흡수

a) 파장 분포에 의해 색깔 결정

- 투과된 빛 (transmitted light)의 색깔,
- 전자천이로부터 빛의 재발산

b) 반도체 (Cadmium Sulfide (CdS), $E_g = 2.4$ eV)

- 빛 흡수 (파란색, 보라색): 고 에너지 영역의 가시광선
- 빛 투과 (빨강, 주황, 노랑): 저 에너지 영역의 가시광선

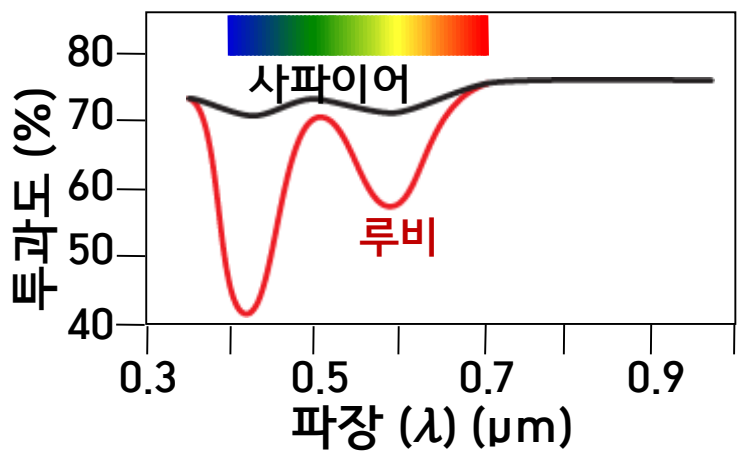
c) 세라믹 (루비: 사파이어 (Al_2O_3) + (0.5-2) at% Cr_2O_3)

① 사파이어의 광학특성

- 무색투명 ($E_g > 3.1$ eV)

② Cr_2O_3 첨가

- 밴드갭 변형
- 색깔의 발현
색 흡수: 파랑, 주황, 노랑, 초록
색 투과: 빨강
- 루비: 깊은 빨간색 발현



발광 (Luminescence)

• 빛의 발생

a) 발광 현상

- 재료에 의한 빛의 재방출
- 특정 주파수에서 빛 흡수 후 다른 (낮은) 주파수에서 재방출
- 불순물/결함 도입에 의해 갇힌 공여 (donor), 수여 (acceptor) 상태

b) 발광현상의 분류

① 광 발광(photoluminescence)

- 광자주입 의한 전자-정공 쌍 생성과 방사성 파괴 (radiative decay) 의한 발광

② 음극선 발광(cathodoluminescence)

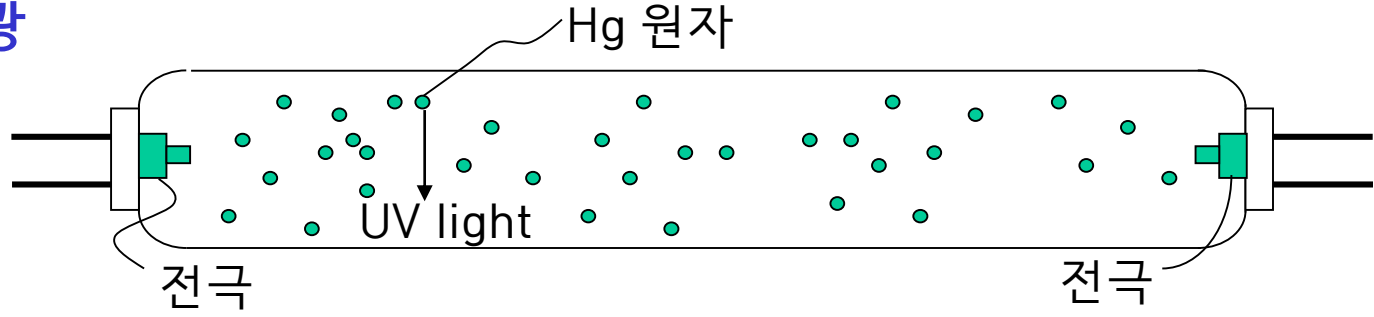
- 전자 충돌 의해 생성된 전자-정공 쌍의 방사성 재결합으로 생성

③ 전자 발광(electroluminescence)

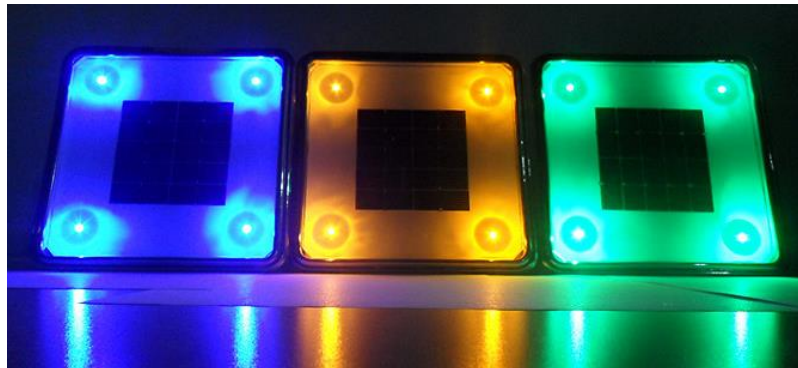
- p-n 접합 또는 유사 소자에서 캐리어 주입에 의한 방사성 재결합

광발광 (Photoluminescence)

• 광 발광



- 전극 사이의 아크선 (Arc): 램프에서 수은 전자의 고에너지로 여기
- 전자의 바닥상태 (ground state) 전이 의해 UV 선 방출 (선턴 램프).
- 튜브의 안쪽 표면에 코팅된 물질의 UV 흡수 및 가시광선
- 금속 양이온 도핑에 의해 색깔 조정 (Sb^{3+} (파란색), Mn^{2+} (붉은 오렌지 색))



음극선 발광 (Cathodoluminescence)

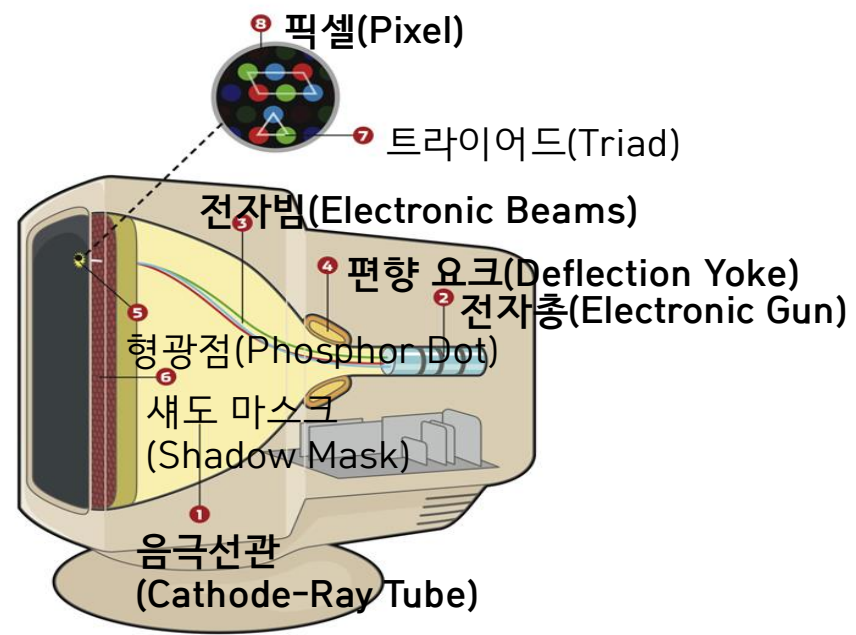
- 음극선 발광

 - a) 음극선 튜브 (cathode-ray tube)

 - b) 음극선 튜브에 의한 발광

 - 인광물질이 전자로 부딪침 → 인광물질내 전자가 높은 에너지 상태로 여기 → 전자가 바닥상태로 떨어져 가시광선 내 광자 방출

 - c) 발광색깔: 방출된 빛 색깔 (광자 파장)은 인광물질 파장에 의존



전자발광 (Electroluminescence)

- 전자 발광

- a) 전자발광

- 개선된 광학 기기 개발을 위해 신소재 개발 필요

- b) 발광 다이오드 (LED: Light Emitting Diodes)

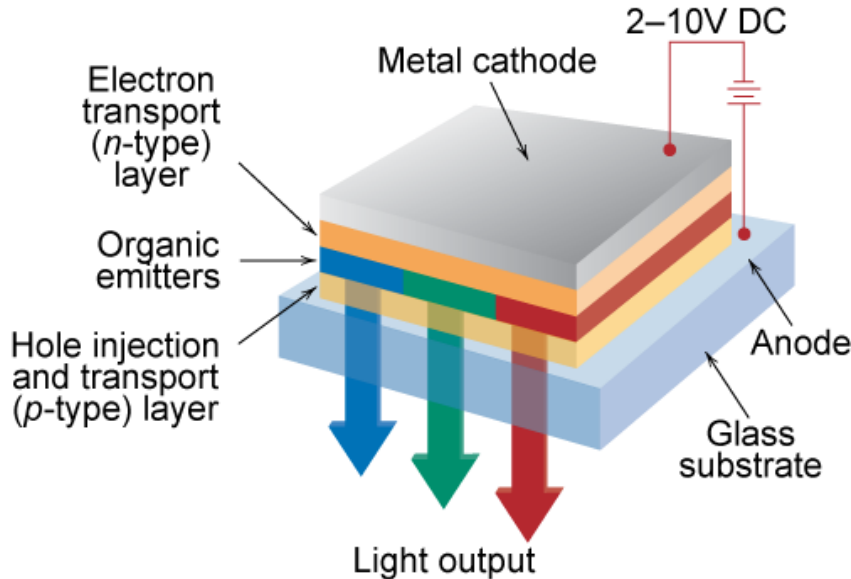
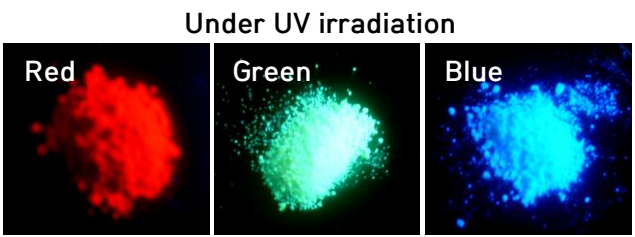
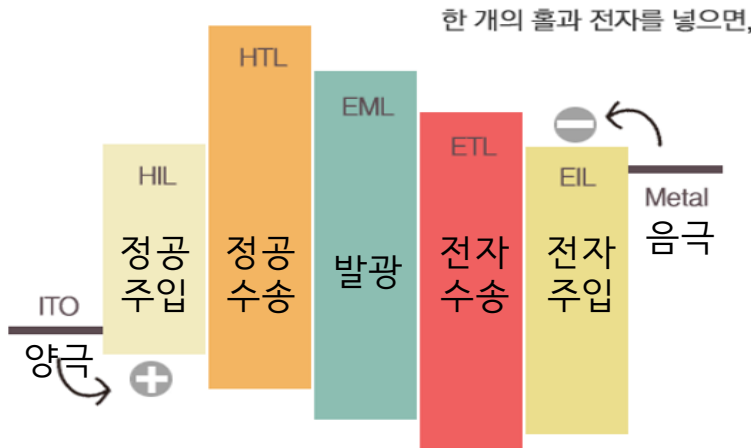


Fig. 22.12, Callister & Rethwisch 9e. (Reproduced by arrangement with Silicon Chip.)

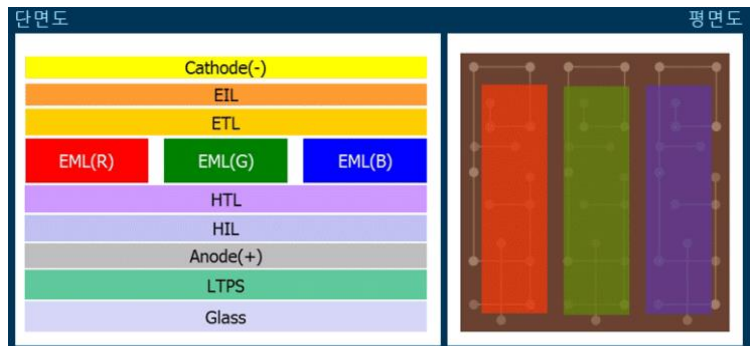
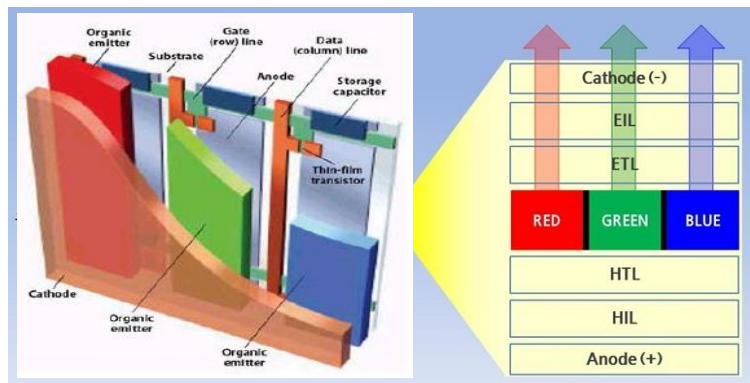
유기발광 디스플레이 (Organic Light Emitting Display)

- Organic Light Emitting Display (OLED)의 원리 및 구성

OLED의 구동원리



OLED의 구성



정리

a) 빛의 성질

- 빛의 재료조사시 반사, 흡수, 투과에 의한 현상: 투명, 반투명, 불투명

b) 금속의 광학물성

- 전자 에너지 밴드 구조에 따라서 불투명 또는 반사

c) 비금속의 광학물성

① 파장영역에 따른 재료의 빛 흡수거동 (가시광선)

- $E_{gap} < 1.8 \text{ eV}$: 모든 파장의 빛을 흡수
- $1.8 \text{ eV} < E_{gap} < 3.1 \text{ eV}$: 조사된 빛 파장의 일부 흡수
- $E_{gap} > 3.1 \text{ eV}$: 조사된 가시광선 빛 투과 (전혀 흡수 없음)

② 투과된 빛의 파장분포에 의해 재료의 색깔 결정

d) 광학기기 및 응용

- 발광 (luminescence), 광전도도 (photoconductivity), 발광다이오드 (light-emitting diodes), 태양전지 (solar cells), 레이저 (lasers) 등

재료의 열적 물성

열용량 (Heat Capacity)

• 열용량

a) 정의

- 열용량 (J/mol·K): 열을 흡수할 수 있는 재료의 능력
- C_p (정압 열용량), C_v (정적 열용량) (C_p usually $>$ C_v)

b) 열용량의 계산

- 1 몰의 재료에 대해 온도 1 unit 상승에 요구되는 에너지

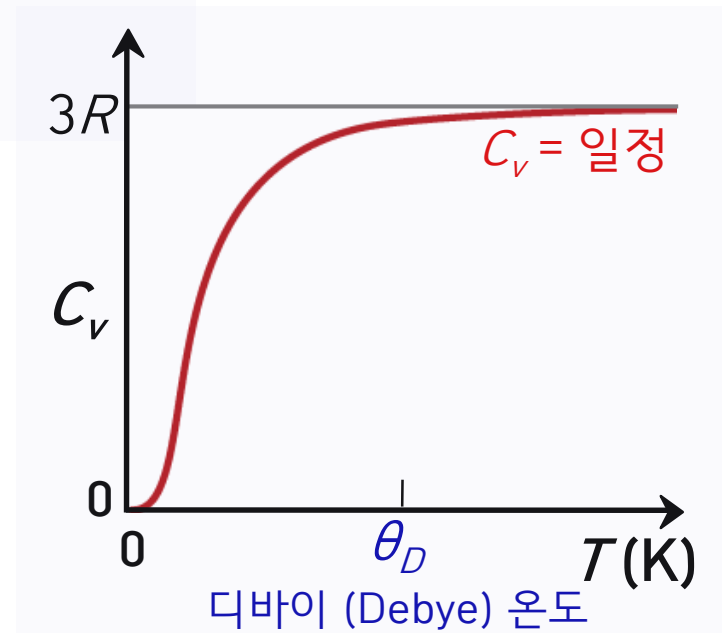
열용량 (J/mol-K) \rightarrow $C = \frac{dQ}{dT}$

에너지 공급 (J/mol) \rightarrow dQ

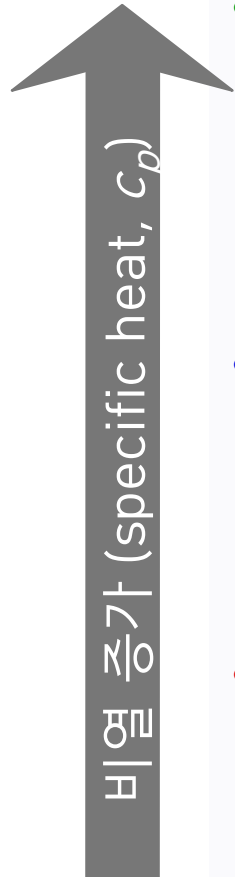
온도변화 (K) \rightarrow dT

c) 열용량의 온도 의존성

- 온도에 따른 열용량 증가 ($< 3R$)
(R (기체상수) = 8.31 J/mol-K)
- 고체의 열용량: $3R$ 이하
- 디바이 온도 (θ_D): 열용량의 한계 온도
(상온 이하에서 형성)



비열 (Specific Heat)



재료	상온 c_p (J/kg-K)
• <u>고분자</u>	
Polypropylene	1925
Polyethylene	1850
Polystyrene	1170
Teflon	1050
• <u>세라믹</u>	
Magnesia (MgO)	940
Alumina (Al ₂ O ₃)	775
Glass	840
• <u>금속</u>	
Aluminum	900
Steel	486
Tungsten	138
Gold	128

c_p (specific heat, J/kg-K)

C_p (heat capacity, J/mol-K)

열의 발생

• 열의 발생원인

a) 열 발생 원인

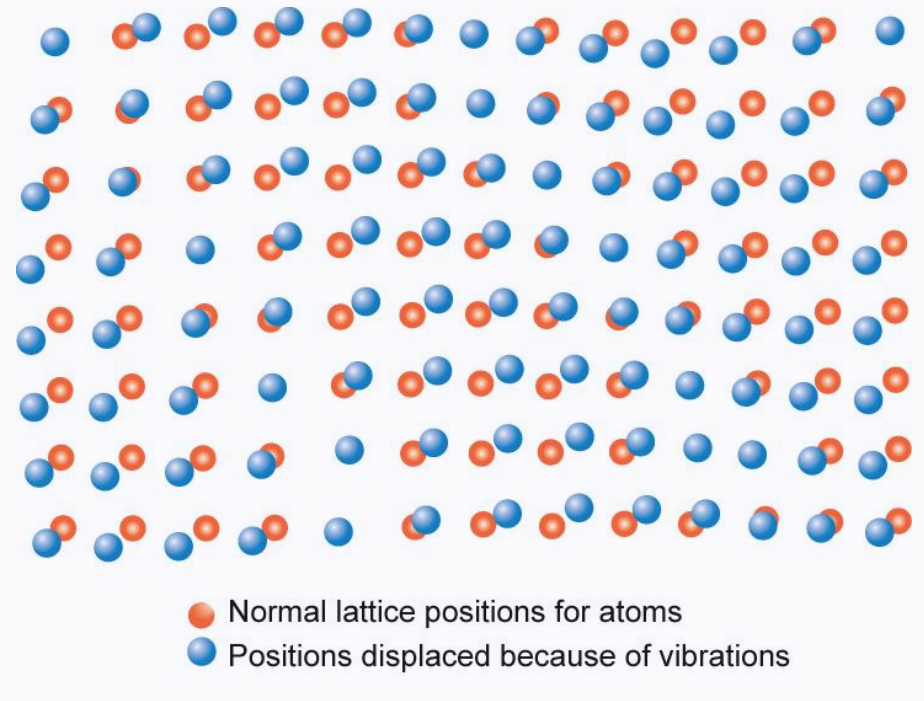
- 열에너지: 원자 진동형태로 저장
- 온도와 열에너지: 온도 증가에 따라 평균 열진동에너지 (atomic vibration energy) 증가

b) 원자 진동 (Atomic vibrations)

- 격자 파동 (lattice waves) 및 포논 (phonons)의 형태로서 열에너지 발생

c) 전자 운동 (Electron motion)

- 전자 운동에 의한 열의 발생



열팽창 (Thermal Expansion)

- 열팽창 현상

- 정의: 온도 변화(열에너지)에 따른 재료의 크기 변화



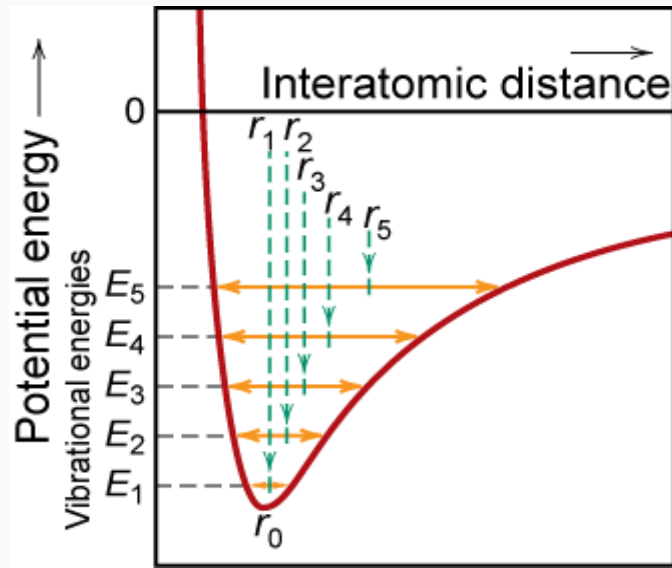
$$\frac{l_{\text{final}} - l_{\text{initial}}}{l_{\text{initial}}} = \alpha_l (T_{\text{final}} - T_{\text{initial}})$$

열팽창 선형계수 (1/K or 1/°C)

열팽창 (Thermal Expansion)

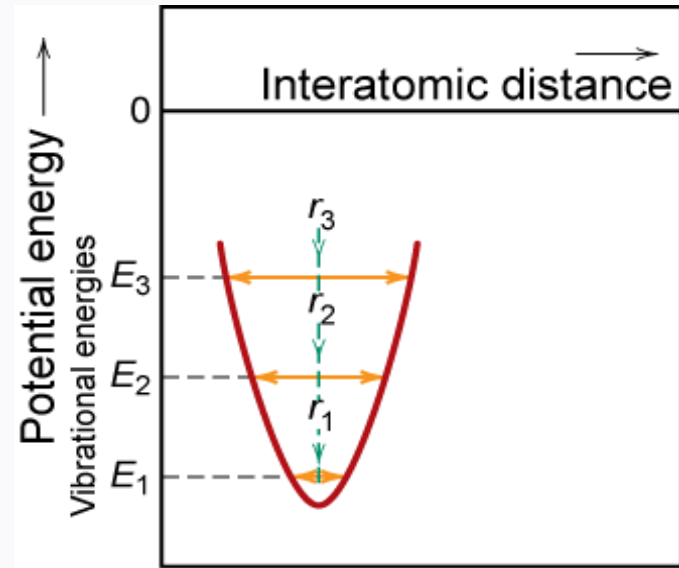
• 열팽창의 현상

a) 열적 팽창



- 원자간 거리-에너지의 비대칭 곡선 (Asymmetric curve)
- 승온에 따른 원자간 거리 증가 (increased interatomic separation)
- 열적 팽창 발생


b) 열적 무팽창



- 원자간 거리-에너지의 대칭 곡선 (Symmetric curve)
- 승온에 따른 원자간 거리 변화 없음 (no increase in interatomic separation)
- 열적 팽창 없음

열팽창계수 (Thermal Expansion Coefficient)

• 재료의 열팽창계수



재료	상온열팽창계수 α_ℓ ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
• 고분자	
Polypropylene	145-180
Polyethylene	106-198
Polystyrene	90-150
Teflon	126-216
• 금속	
Aluminum	23.6
Steel	12
Tungsten	4.5
Gold	14.2
• 세라믹	
Magnesia (MgO)	13.5
Alumina (Al ₂ O ₃)	7.6
Soda-lime glass	9
Silica (cryst. SiO ₂)	0.4

고분자는 큰 열팽창계수 (α_ℓ) 나타냄
→ 약한 이차결합

열전도도 (Thermal Conductivity)

• 열전도도

a) 열전도도: 열을 이동시키는 재료의 능력

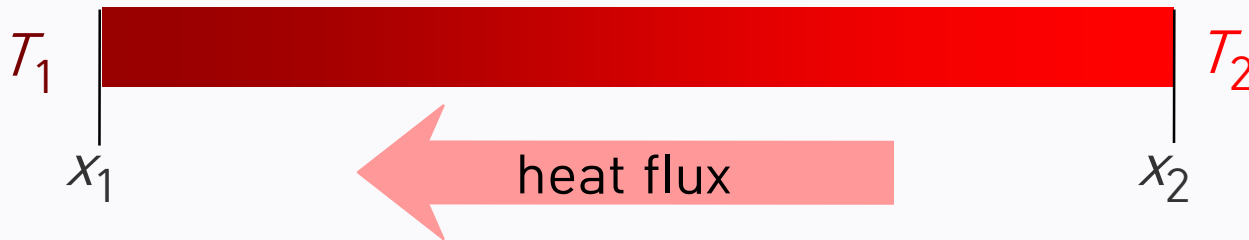
Fourier's Law

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

열흐름 (J/m²·s) → q

열전도도 (J/m·K·s) → k

온도구배 $T_2 > T_1$ → $\frac{dT}{dx}$




b) 열전도 개념

- 고온 영역에서 원자적 진동 (vibrations)과 자유전자 (free electron)는 에너지를 차가운 영역으로 이동시킴.

열전도도 (Thermal Conductivity)

• 재료의 열전도도



재료	k (W/m-K)	에너지 전이 메커니즘
• 금속		
Aluminum	247	원자진동 및 자유전자운동 (atomic vibrations and motion of free electrons)
Steel	52	
Tungsten	178	
Gold	315	
• 세라믹		
Magnesia (MgO)	38	원자진동 (atomic vibrations)
Alumina (Al ₂ O ₃)	39	
Soda-lime glass	1.7	
Silica (cryst. SiO ₂)	1.4	
• 고분자		
Polypropylene	0.12	사슬분자의 진동/회전 (vibration/rotation of chain molecules)
Polyethylene	0.46-0.50	
Polystyrene	0.13	
Teflon	0.25	

열적 응력 (Thermal Stresses)

- 재료의 열적 응력

- a) 열적 응력 발생

- 열적 팽창/수축을 제한 (restrained)
 - 온도 구배 (temp. gradients)는 차원변화 제어 (differential dimensional changes)

- b) 열적 응력 계산

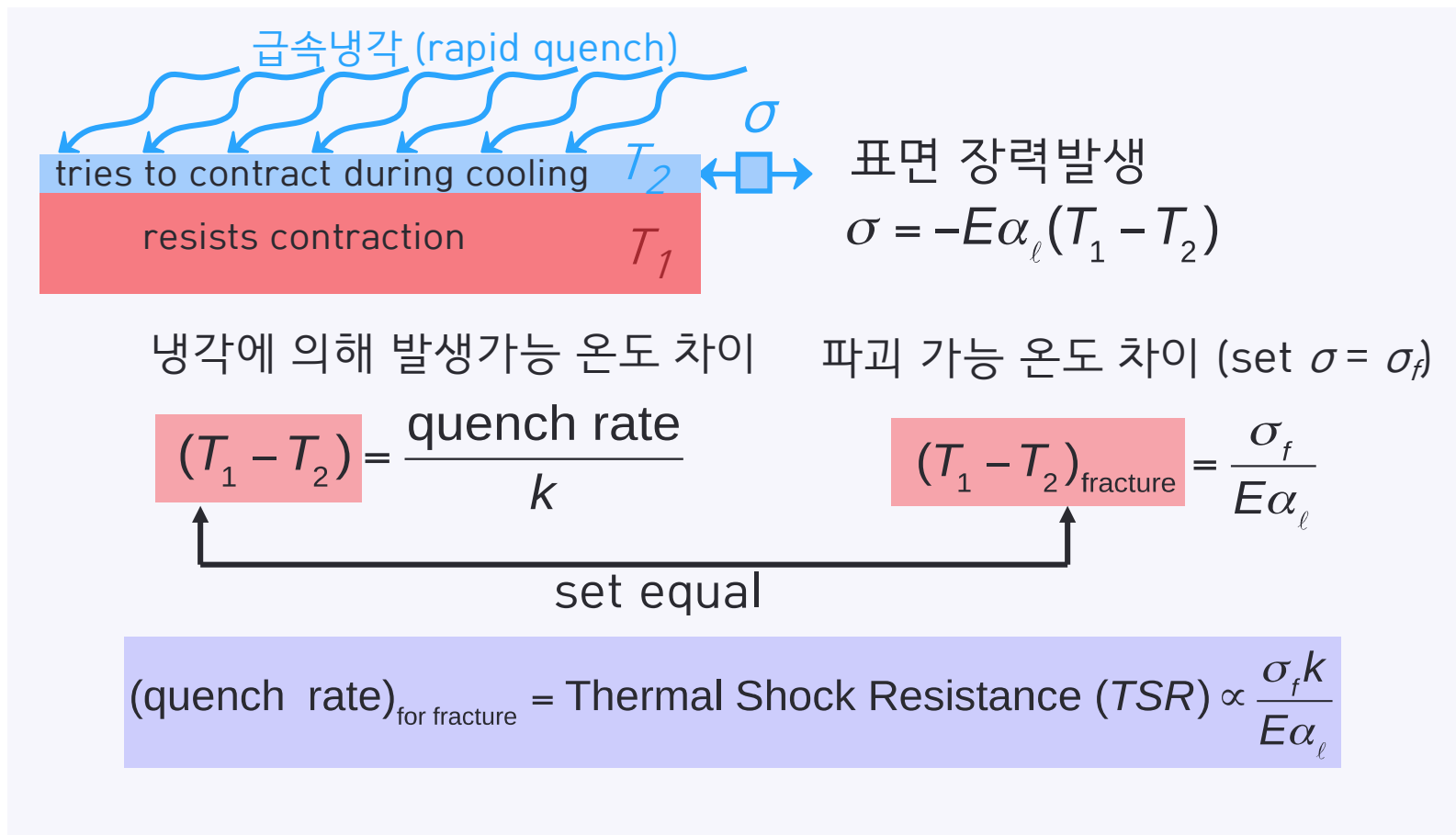
$$\begin{aligned}\text{열응력} &= S \\ &= E\alpha_{\ell}(T_0 - T_f) = E\alpha_{\ell}\Delta T\end{aligned}$$

열적 쇼크 저항 (Thermal Shock Resistance)

- 재료의 열적 쇼크 저항

- a) 열적 쇼크 발생

- 불균일한 가열 및 급속냉각

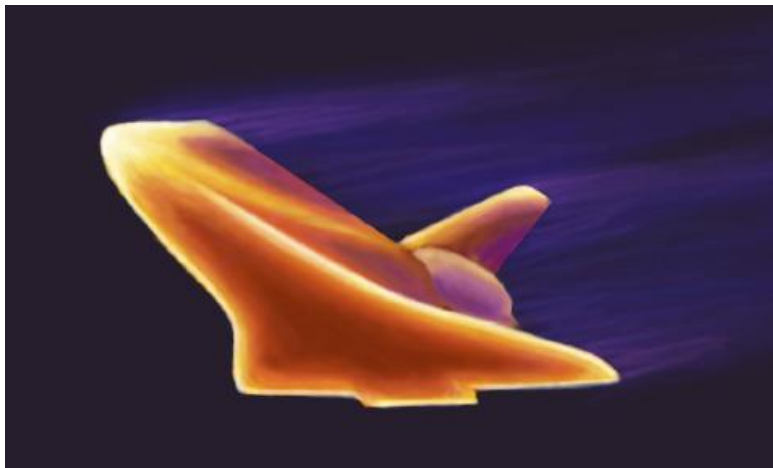
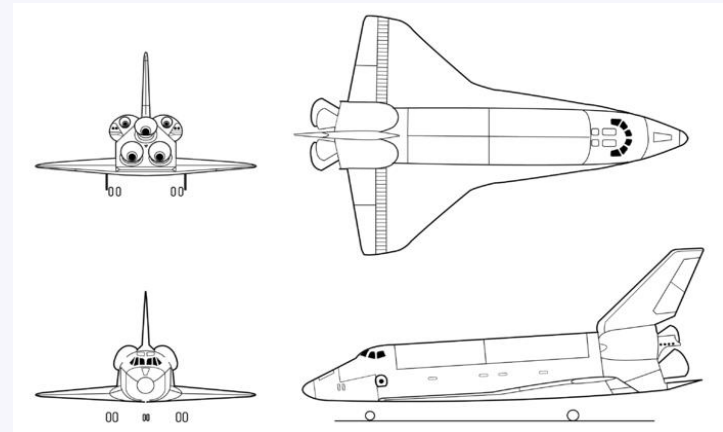


열적 보호시스템 (Thermal Protection System)

- 열적쇼크저항의 응용

- a) 응용처

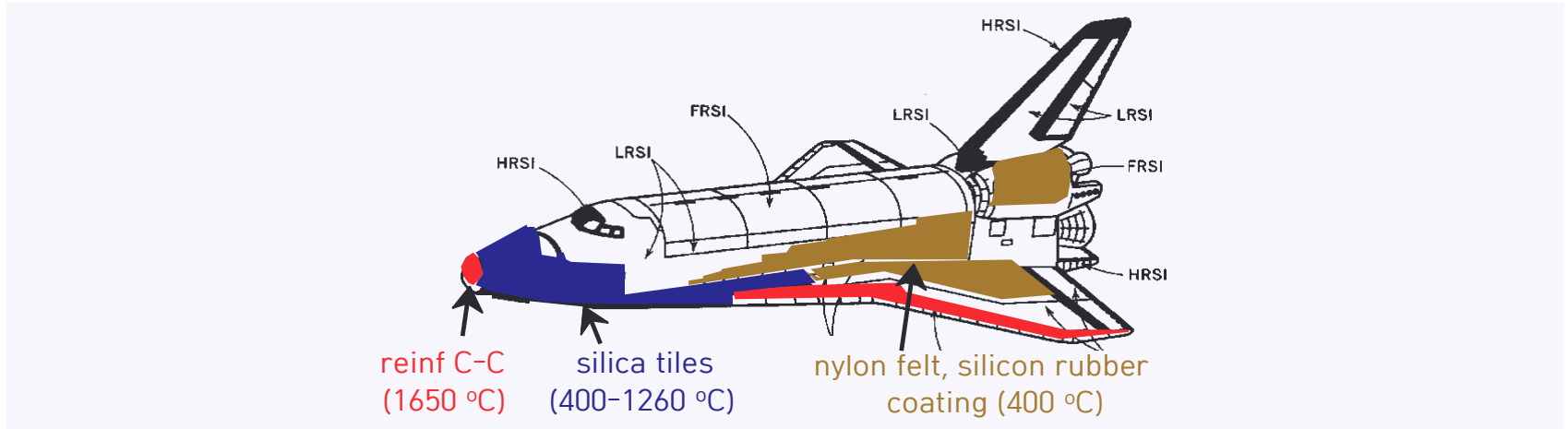
Space Shuttle Orbiter



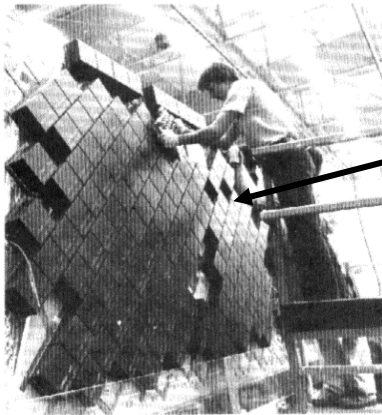
열적 보호시스템 (Thermal Protection System)

b) 사용재료

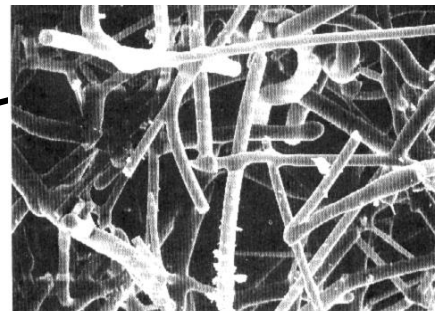
- 재진입용 외부 타일: 실리카 (Silica) (적용온도범위: 400-1260°C)



① 선체 외부 적용



② 내부미세구조



- 기공도 (porosity) : 90%
- 가공과정 : 고온 열처리 통한 실리카 섬유 연결 (네트워크 구조)

정리

- 열용량 (Heat capacity)

- 단위 온도 (T) 만큼 재료 1몰의 온도를 높이는데 필요한 에너지
- 원자 진동 (atomic vibrations)로 에너지 저장

- 열팽창 계수 (Coefficient of thermal expansion)

- 열팽창: 재료의 크기가 온도에 따라 변함.
- 물성: 재료마다 다른 계수를 갖고 고분자가 가장 큰 열팽창 발현

- 열전도도 (Thermal conductivity)

- 열전도도: 재료의 열을 전달할 수 있는 능력
- 물성: 재료마다 열전도 능력 다름. 금속의 열전도 능력 가장 우수

- 열충격저항 (Thermal shock resistance)

- 열충격저항: 급속 냉각 후, 재료의 파괴 방지 능력

- 열충격저항 ($\frac{\sigma_f k}{E \alpha_l}$) 클수록 온도변화에 대한 재료의 기계적 내성 큼