

Chapter5

# Phase Transformation

Part I

강의명: 기계재료공학 (MFA9009)

---

정영웅

창원대학교 신소재공학부

YJEONG@CHANGWON.AC.KR

연구실: #52-208 전화: 055-213-3694

Homepage: [HTTP://YOUNGUNG.GITHUB.IO](http://YOUNGUNG.GITHUB.IO)

# Recap

---

- Failure: occurs by three main mechanisms
  - Fracture
  - Fatigue
  - Creep
- Fractography
- Fracture (파고)
  - Brittle fracture
  - Ductile fracture
  - DBTT
  - Basic Fracture mechanics and application to design problems
- Fatigue (피로)
  - Failure under stress far below YS, TS; Cyclic loading
- Creep (크리프)
  - Time dependent permanent deformation

# Objectives and outlines

---

- 전형적인 고체의 상변태에서 시간과 상변태 분율을 나타낸 대략적 그래프 이해

# 서론

---

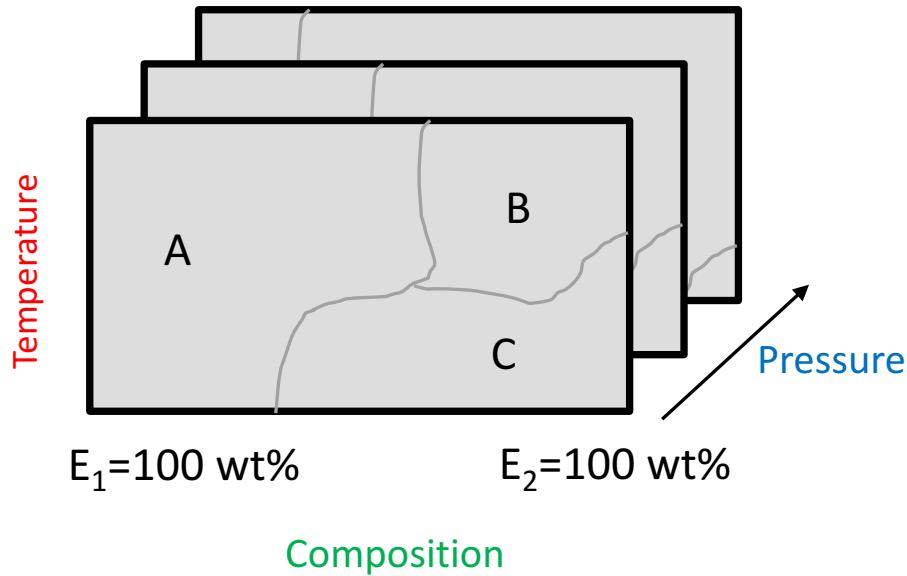
- 금속 재료가 널리 사용되는 이유중의 하나는 이들 재료가 가질 수 있는 기계적 특성의 폭이 넓고, 이러한 특성을 여러 방법에 의해 용이하게 구현할 수 있다는 점이다.
- 앞서 몇몇 강화기구(strengthening mechanism)에 대해 얘기했다.
- 금속의 기계적 특성들은 금속의 미세조직(microstructure) 특성에 의해 영향을 받는다.
- 단일상/2상 합금에서 미세조직의 변화는 상변태(phase transformation)를 수반한다.
- 고상(solid phase)의 상변태에 대한 기본 원리를 살피고, 고상상변태가 시간에 따라 발생하는 방식을 살펴볼 것이다.
- 다음으로 Fe-C 합금에서 생기는 two phase (2상) microstructure에 대해 알아보겠다.
- 그리고 특정 열처리 방식에 의해서 얻어지는 미세조직을 설명하는데 필요한 상태도에 대해 얘기하겠다.

# Reviews

---

- 상 Phase
- 평형 상태의 상 Phases in equilibrium
- 상변태 Phase transformation
- Allotropic transformation
- 회복, 재결정, 결정립 성장 Recovery, Recrystallization and grain growth
- Gibb's phase rule
- Eutectoid, eutectic, peritectic reactions (invariant points)
- 준평형 상태의 상 Metastable phase (resulting from diffusionless transformation)

# Binary phase diagram



등압 이원 상태도에서 3가지 법칙:

1. 온도와 전체 시스템의 조성(chemical composition)을 알면, 어떤 상이 평형상태인지 알 수 있다.
2. 온도와 전체 시스템의 조성을 알면, 평형상태의 상들의 각각의 조성을 알 수 있다.
3. 온도와 전체 시스템의 조성을 알면, 평형상들간의 분율 (구성비 – 부피 혹은 질량을 기준으로)을 알 수 있다.

# Binary eutectic systems

- The term “Eutectic” means, easy melting.

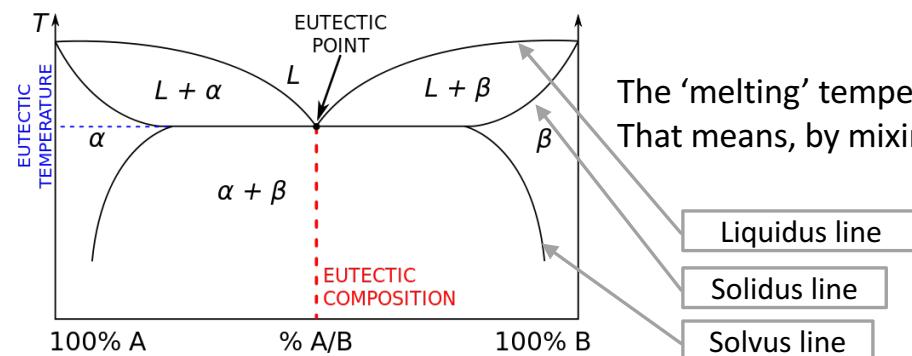
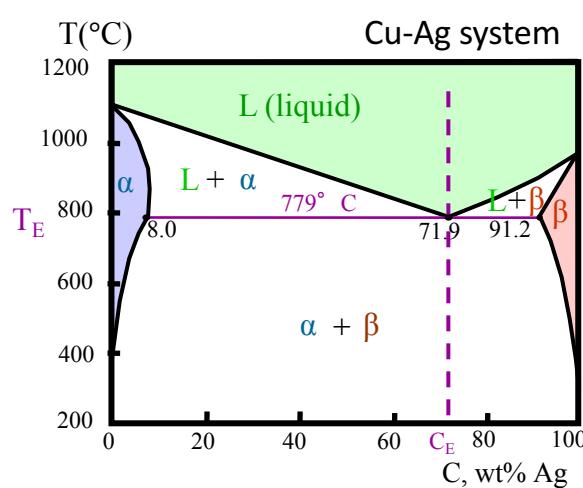


Image from Wikipedia

The ‘melting’ temperature of  $\alpha + \beta$  mixture is lower than that of pure  $\alpha$  and pure  $\beta$ . That means, by mixing with foreign species, the melting becomes easier (eutectic).

- Liquidus line
- Solidus line
- Solvus line

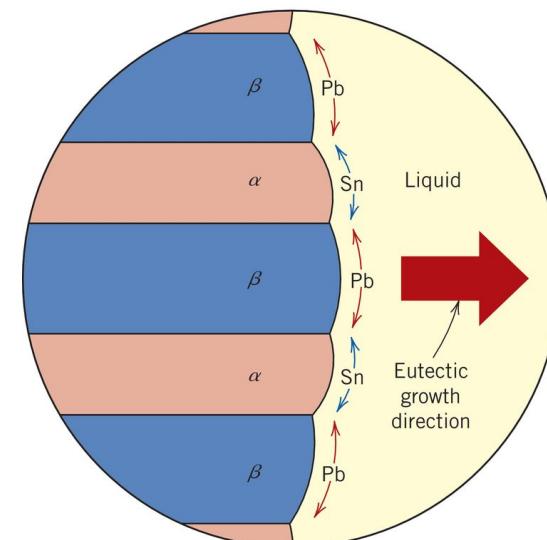
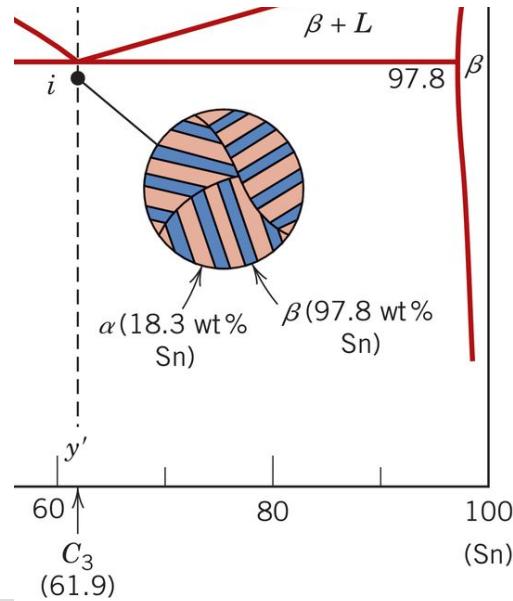


Characteristics of this binary eutectic systems

- 1) three regions where a single phase is present ( $L$ ,  $\alpha$  solid-solution;  $\beta$  solid-solution)
- 2)  $\alpha$  phase is a solid-solution rich in copper; silver as solute; FCC structure
- 3)  $\beta$  phase is also a solid-solution but rich in silver; copper as solute; FCC
- 4) Solubility of each solid-solution is reducing in  $T < T_E$
- 5) Three regions where two phases are co-existent:
  - $L + \alpha$ ;  $L + \beta$ ;  $\alpha + \beta$

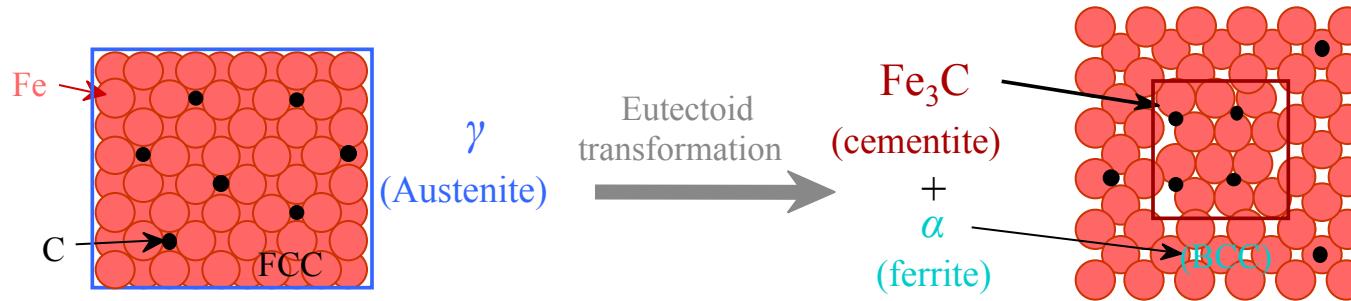
# 상변태 속도론 (예: Pb,Sn system)

- Recall lamella structure. 평형 상태에서의  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상의 분율 (부피 분율, volume fraction)을 상태도(phase diagram)에서 찾을 수 있다.
- 그리고 lamella 구조가 생성되기 위해서는 각  $\alpha$ ,  $\beta$  상에 주어진 분율을 맞추기 위해 Pb, Sn 원소가 확산(diffusion)되어야 한다. 확산은 시간과 온도에 영향을 받는다.
- 따라서 이러한 형태의 상의 변화(상변태)는 '시간'이 든다. 그리고 상변태를 완료할 때까지 필요한 시간은 상변태가 발생하는 온도에 영향을 받는다 (상변태 속도론)



# 상변태 속도론

- 아래는 Fe-C binary system에서 austenite가 cementite와 ferrite로 상변태가 발생하는 것을 설명하는 모식도이다 (eutectoid reaction; one solid  $\rightarrow$  two diff. solids)



- Cementite는 intermetallic compound; Fe 와 C 가 정해진 비율(3:1)로 정확한 비율로 존재해야 한다. 따라서 적절한 위치로 Fe와 c가 존재해야 한다 – diffusion 필요;
- Diffusion은 시간과 온도에 지배되는 mechanism 이다.
- 따라서 위의 상변태는 '시간'에 영향을 받는다! 즉, 위의 상변태가 발생하기 위해서는 일정한 '시간'이 필요하다.
- 그렇다면 상변태에 필요한 시간이 늘거나, 줄어드는 조건이 있을것이다. 상변태의 속도에 영향을 주는 인자? 혹은 상변태의 속도를 바꿈으로 인해서 어떤 현상이 생길까?

# 상변태 과정

앞서 설명했듯, 상변태는 순간적으로 발생하지 않는다. 다른 한편으로는 주어진 환경 ( $T, C, P$ )에 따라 '평형상'이 달라진다. 따라서 기존의 환경( $T_1, C_1, P_1$ )이 바뀌어 새로운 환경( $T_2, C_2, P_2$ )이 주어질 때, 기존에 평형했던 상이 새로운 환경에 더욱 알맞는 상으로 '변태'될 수 있다. 그러한 상변태의 과정은 크게 두 가지 단계로 나타난다.

## 1. 핵생성 (nucleation)

새로운 환경에 맞는 평형상태의 상이 매우 작은 알갱이 형태로 나타나는 단계 (~ 수백개의 원자들로 이루어진 작은 알갱이; 또는 핵nuclei; 혹은 seeds 라고 부름)

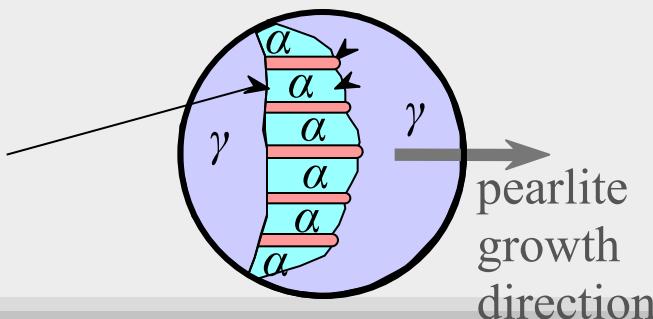
## 2. (새로운 상의) 성장 (growth)

그러한 핵들이 더 큰 덩이로 자라는 단계.

## 3. 종결 조건? 평형상태에서 나타나는 상의 평형 분율이 이루어지면 종결 (평형 상태도에서 알 수 있다).

### Austenite $\rightarrow$ Pearlite

Austenite ( $\gamma$ )  
grain  
boundary



근원상 polycrystal austenite의 grain boundary에서 핵이 생성후 성장하는 모습

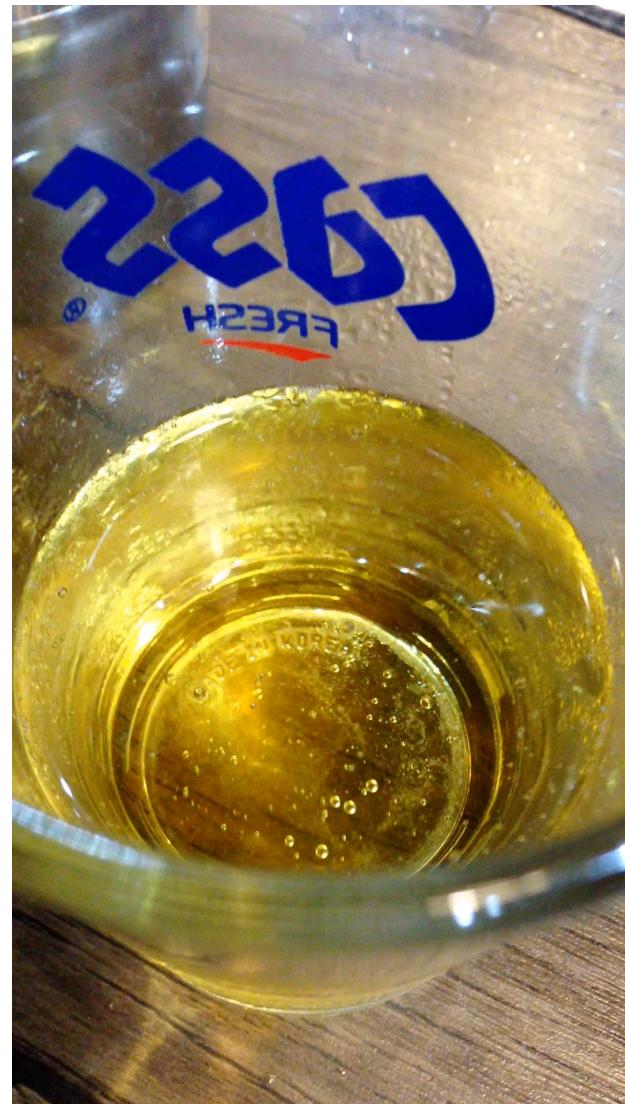
\*근원상: parent phase (기존의 환경에서 안정했던 상)

# 핵생성

- 핵생성은 두가지 형태로 나뉜다: 분류의 기준은 ‘어디에서 핵생성이 발생하느냐’
  - 1. 균일 (homogeneous) 핵생성
    - Nuclei form uniformly (or, in other word, randomly) through out the parent phase (근원상).
  - 2. 불균일 (heterogeneous) 핵생성
    - Nuclei form preferentially at structural inhomogeneities: 용기의 벽, 불용성 불순물, grain boundary, dislocation 등등이 핵생성 장소(site)를 제공한다.
- 균일 핵생성부터 논의하고 그 원리를 익혀 불균일 핵생성에 대해 확대/적용하는 방식으로 다뤄보자.

# 균일/불균일 핵생성 비교

Q. 탄산수의 liquid상 (liquid solution)이  
이산화탄소 gas상 (gas + water mixture) 으로  
상변태.. nuclei 가 계면(interface)에 생기는  
이유는?

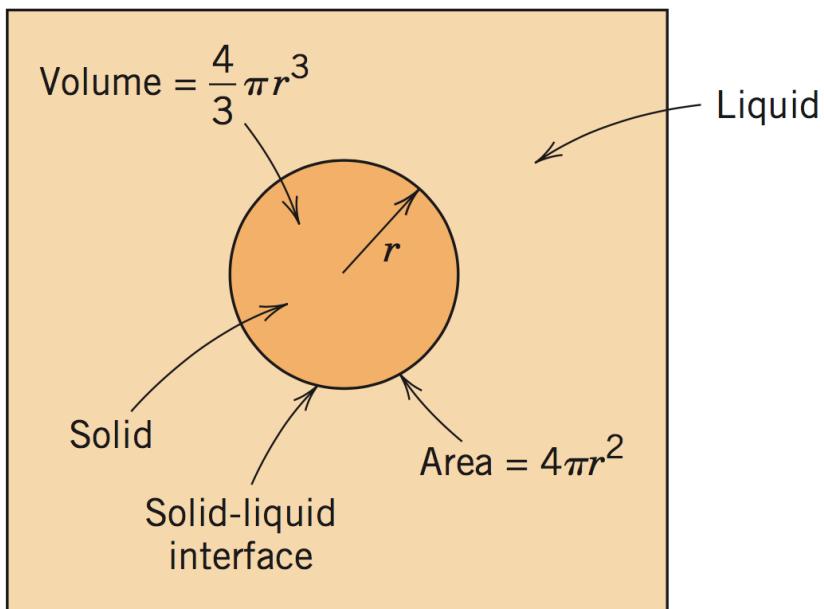


# GFE (Gibbs Free Energy)

- 핵생성 이론에 대해 논의하기 위해서 가장 처음 여러분은 열역학 매개변수인 자유에너지 (Gibbs Free Energy, G로 표기)에 대해 간략히 이해해야 한다.
- G는 시스템의 내부에너지 (Enthalpy, H로 표기), 그리고 원자(혹은 분자)들의 무질서도 (entropy, S로 표기)에 의해 결정된다. 즉 G는 H와 S가 변수인 함수로 표현 가능하다:  $G=f(H,S)$  - 혹은  $G\equiv G(H,S)$
- 상들마다 다른 G값을 가지고 있으며, G값들은 온도/압력/조성(T,P,C)에 따라 변한다.
- G는 해당 상이 얼마나 주어진 온도/압력/조성 조건 아래에서 '안정적'인지를 나타내주는 지표이다 – G가 낮을 수록 안정.
- 따라서 주어진 (T,P,C)에서 발생(혹은 존재) 가능한 상들 중에 G값이 가장 낮은 상이 '평형'상태에 존재한다 – 만약 두 상이 같은 G값을 가지면? 공존...

# GFE (Gibbs Free Energy)

- 주어진 환경조건 ( $T, P$ )에서 한 시스템의 조성( $C=\text{fixed}$ )에 의해 가능한 액체와, 고체 상태에서의 평형 상태를 결정 짓는 것은 액체상의 GFE와 고체상의 GFE를 비교하여 생각할 수 있다. GFE 비교로 상대적으로 더 안정한 상을 결정할 수 있다.



$$\begin{array}{lcl} G_{\text{액상}} & < & G_{\text{고상}} : \text{액상이 더 안정} \\ G_{\text{액상}} & > & G_{\text{고상}} : \text{고상이 더 안정} \end{array}$$

$$\Delta G_{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} = G_{\text{고상}} - G_{\text{액상}}$$

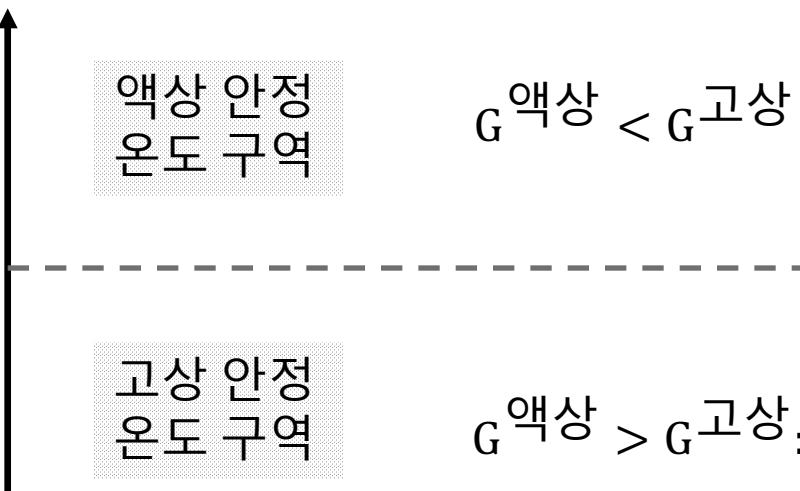
만약  $\Delta G_{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} < 0$ ,  
액상에서 고상으로의 상변태가 발생한다. 즉  
응고 (solidification) 발생한다.

단위 부피당  $\Delta G_{\text{액상} \rightarrow \text{고상}}$  값을 표현하기 위해 아래첨자  $v$ 를 붙여:  $\Delta G_v^{\text{액상} \rightarrow \text{고상}}$

# GFE (Gibbs Free Energy)

압력과 조성은 고정된 조건 (Fixed P and C)

온도



$$G_{\text{액상}} < G_{\text{고상}}$$

$$\Delta G_v^{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} = G_v^{\text{고상}} - G_v^{\text{액상}} > 0$$

자발적으로 액상에서 고상으로  
상변태 발생할 수 없다.

$$G_{\text{액상}} > G_{\text{고상}}:$$

$$\Delta G_v^{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} = G_v^{\text{고상}} - G_v^{\text{액상}} < 0$$

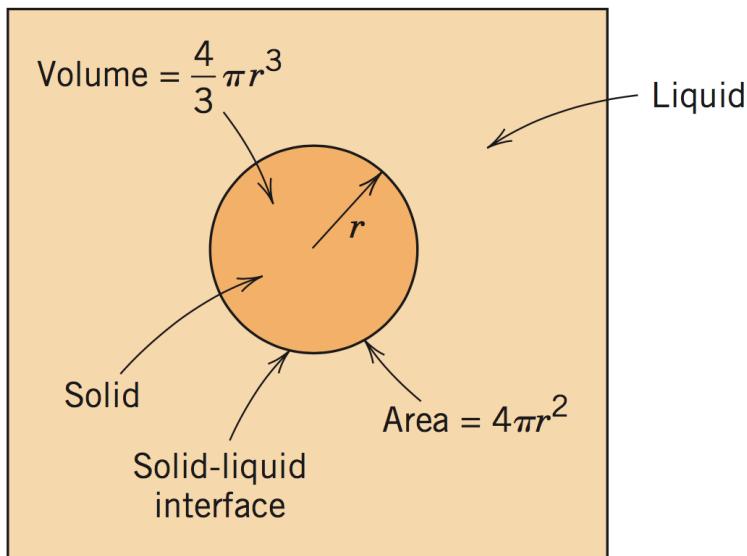
자발적으로 액상에서  
고상으로 상변태 발생

경계선상에서는:  $G_v^{\text{액상}} = G_v^{\text{고상}}$  따라서  $\Delta G_v^{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} = \Delta G_v^{\text{고상} \rightarrow \text{액상}} = 0$

# 응고 과정 $\Delta G$ 액상 $\rightarrow$ 고상 계산 모형 - 개요

$$\Delta G_{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} \gtrsim \Delta G_v^{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} \times \text{부피}$$

아래 모형을 사용해서 논의해보자



- 핵이 생성됨으로써 다른 새상(new phase)이 생겨 기존 상의 일정 부피를 차지 했을 뿐만 아니라, 그 두상 사이의 '상경계'도 생겼다.
- 두 상의 계면도 고유의 에너지를 가지고 있다:  
 $\Delta G_{\text{경계}}^{\text{액상} \leftrightarrow \text{고상}} > 0$  (양수값)
- 따라서 액상에서 고상으로 상변태에 따른 자유에너지 차이는 상경계에 의해 발생하는 기여(contribution)도 고려해야한다.

$$\Delta G_{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} = \Delta G_v^{\text{액상} \rightarrow \text{고상}} \times \text{부피} + \Delta G_{\text{경계}}^{\text{액상} \leftrightarrow \text{고상}} \times \text{면}$$

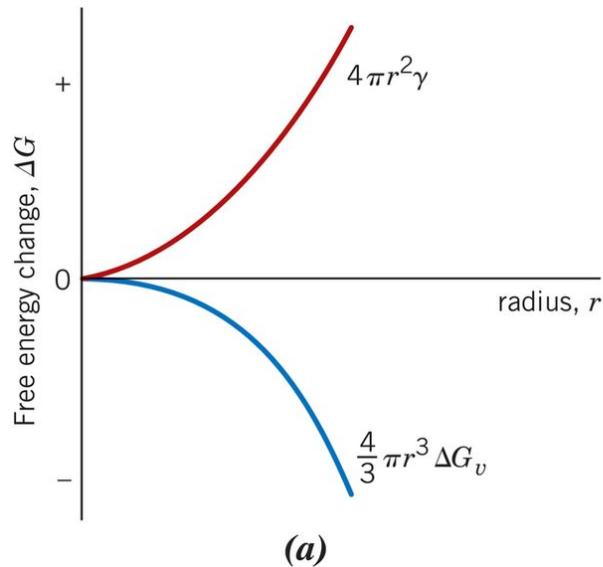
위 모형을 사용하면

$$\Delta G^{\text{liquid} \rightarrow \text{solid}} = \Delta G_v^{\text{liquid} \rightarrow \text{solid}} \times \frac{4}{3}\pi r^3 + \Delta G_{\text{상경계}}^{\text{liquid} \leftrightarrow \text{solid}} \times 4\pi r^2$$

더욱 간략하게 표현하자면  $\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$

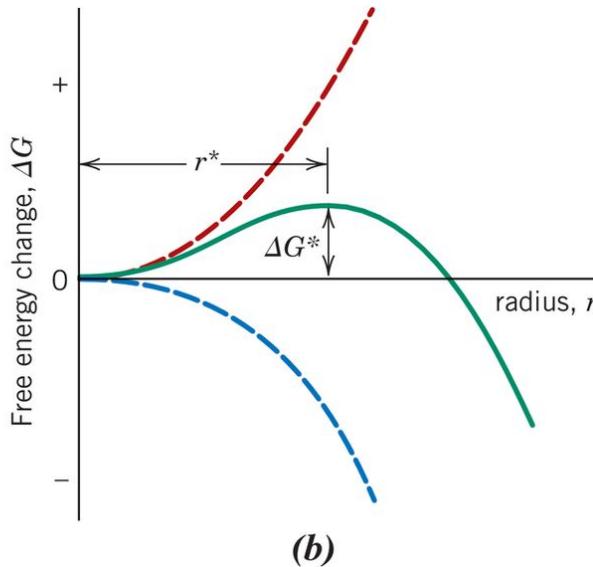
# 응고 과정 $\Delta G$ 액상 $\rightarrow$ 고상 계산 모형 - 두요소

■  $\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$  (액상  $\rightarrow$  고상 상변태 발생하려면  $\Delta G_v < 0$ ; 앞서  $\gamma > 0$ )



(a)

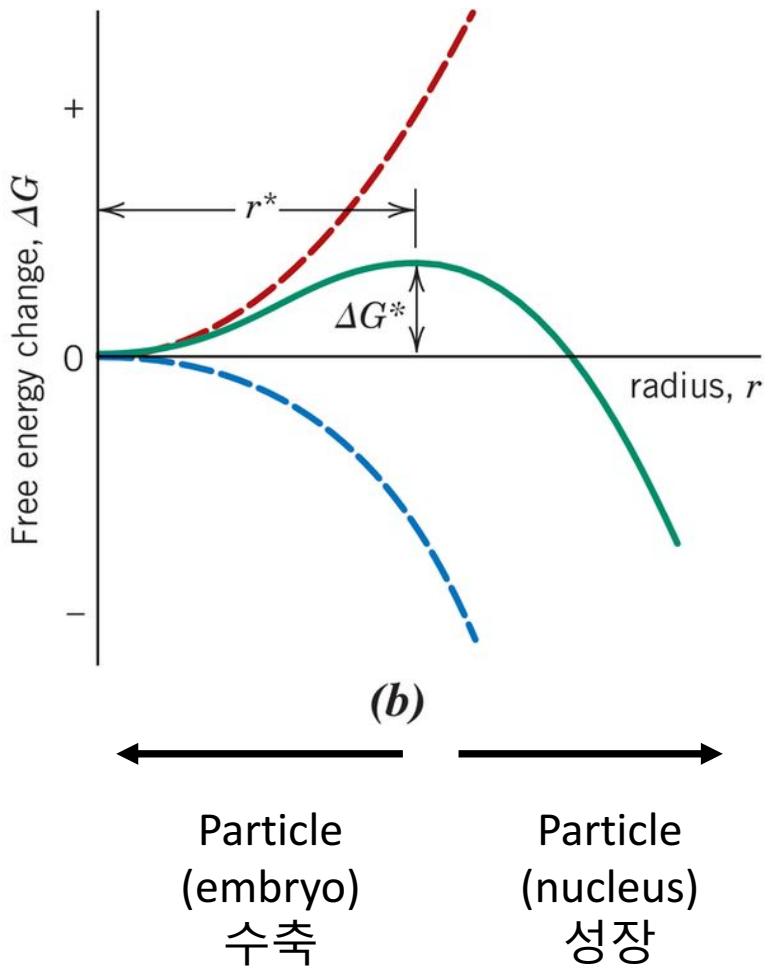
핵의 크기(반지름)가 증가함에 따라, 부피(당) 자유에너지  $\Delta G_v$ , 표면(당) 자유에너지  $\gamma$ 가 위의 그래프의 형태로 달리짐을 알 수 있다.



(b)

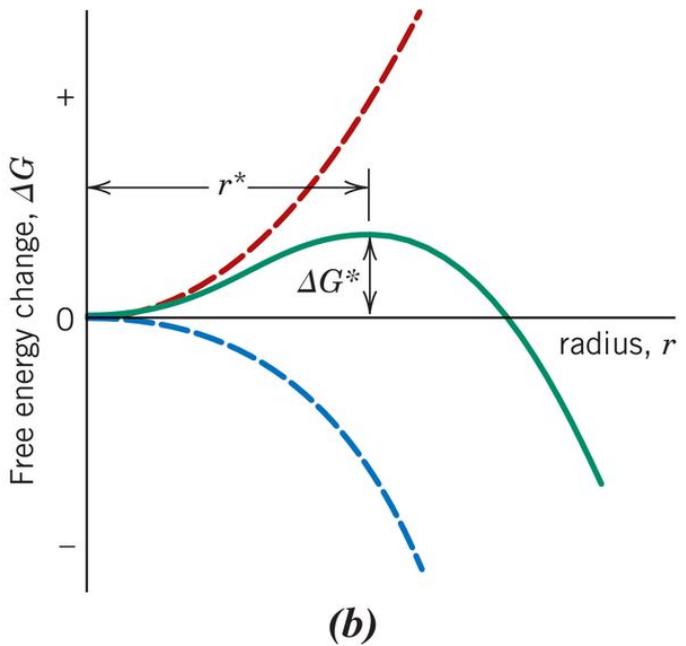
- 그 둘의 합(즉 위의 녹색 곡선)이 입자의 크기에 따라 변하는 것을 살펴보자.
- 주의: 액상  $\rightarrow$  고상 상변태가 발생하기 위해서는  $\Delta G$  가 음수여야 한다!

# 응고 과정 $\Delta G$ 액상→고상 계산 모형 - 임계값



- $\Delta G$  값이 최대치( $\Delta G^*$ )가 되는 고상 입자(solid particle)의 크기가 존재한다. 그리고 그에 해당하는 고상 입자의 반지름( $r^*$ )이 존재한다.
- 액상에서 입자(원자나 분자)가 모여 고체가 될 때, 초기에는 뭉칠 수록 자유에너지가 증가한다. 하지만 핵이 ‘임계(critical)’ 크기를 넘어서면 성장할 수록  $\Delta G$  액상→고상 가 감소한다 – 즉 자발적으로 액상은 고상으로 변태한다.
- 이렇게 임계값의 크기에 도달하지 못한 입자를 embryo로 구분하여 명칭하고, 임계값 이상의 크기를 가진 입자를 핵(nucleus; 복수형: nuclei)이라고 부른다.
- $\Delta G^*$ 를 활성화 자유에너지(activation free energy)라고 부르며, 안정적으로 핵이 성장할 수 있기 위해 필요한 자유에너지다. (혹은 핵이 성장하기 위해 넘어야 할 barrier로 생각할 수도 있다 – 왜냐면 이만큼의 에너지가 주어져야만 핵이 성장할 수 있으니까...)
- 핵은 생성후 수축이냐 성장이냐를 판가름하는 과정을 거친다. 따라서 핵이 얼마나 자주 생기느냐도 중요한 관점이다 (추후에  $v_d$  논의 )

# 응고 과정 $\Delta G$ 액상→고상 계산 모형 - 임계값



$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$$

- 위의 정의를 활용해서  $\Delta G$ 값을 구하는 방식은,  $\frac{d(\Delta G)}{dr} = 0$  인 지점에서의  $r$  값을 구하여 계산할 수 있다.

$$\frac{d(\Delta G)}{dr} = 3 \times \frac{4}{3}\pi r^2 \Delta G_v + 2 \times 4\pi r \gamma = 0$$

- 위 조건을 만족하는  $r$  값을  $r^*$ 로 표기:

- $r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v}$  위 조건을 만족하는  $r$ 값을  $r^*$ 로 표기. 그런데  $\Delta G^* = \Delta G(r = r^*)$  따라서

$$\begin{aligned} \Delta G^* &= \frac{4}{3}\pi(r^*)^3 \Delta G_v + 4\pi(r^*)^2 \gamma \\ &= \frac{4}{3}\pi\left(-\frac{2\gamma}{\Delta G_v}\right)^3 \Delta G_v + 4\pi\left(-\frac{2\gamma}{\Delta G_v}\right)^2 \gamma \\ &= -\frac{4}{3}\pi \frac{8\gamma^3}{(\Delta G_v)^2} + 4\pi \frac{4\gamma^3}{(\Delta G_v)^2} \\ &= \left(-\frac{32}{3} + 16\right)\pi \frac{\gamma^3}{(\Delta G_v)^2} = \frac{16}{3} \frac{\pi\gamma^3}{(\Delta G_v)^2} \end{aligned}$$

# 응고 과정 $\Delta G$ 액상 $\rightarrow$ 고상 모형 – 임계값의 온도 영향

- $\Delta G_v$ 는 온도에 따른 함수다. ( $G_{\text{액상}}$ ,  $G_{\text{고상}}$ 이 온도에 따른 함수라서)

$$\Delta G_v = \frac{\Delta H_f(T_m - T)}{T_m} \quad (1)$$

$\Delta H_f$ : 용융 잠열 (응고시에 발생하는 열);  $T_m$ : melting temperature

- 앞서 우리가 살펴본 모형에서  $\Delta G^*$ 는 다음과 같이 도출되었다.

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \frac{\pi \gamma^3}{(\Delta G_v)^2} \quad (2)$$

- (1)을 (2)에 대입하면

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3} \left[ \frac{T_m}{\Delta H_f(T_m - T)} \right]^2 = \frac{16\pi\gamma^3(T_m)^2}{3(\Delta H_f)^2} \frac{1}{(T_m - T)^2}$$

- (1)을  $r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v}$ 에 대입하면

$$r^* = -\frac{2\gamma}{\frac{\Delta H_f(T_m - T)}{T_m}} = -\frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f} \frac{1}{(T_m - T)}$$

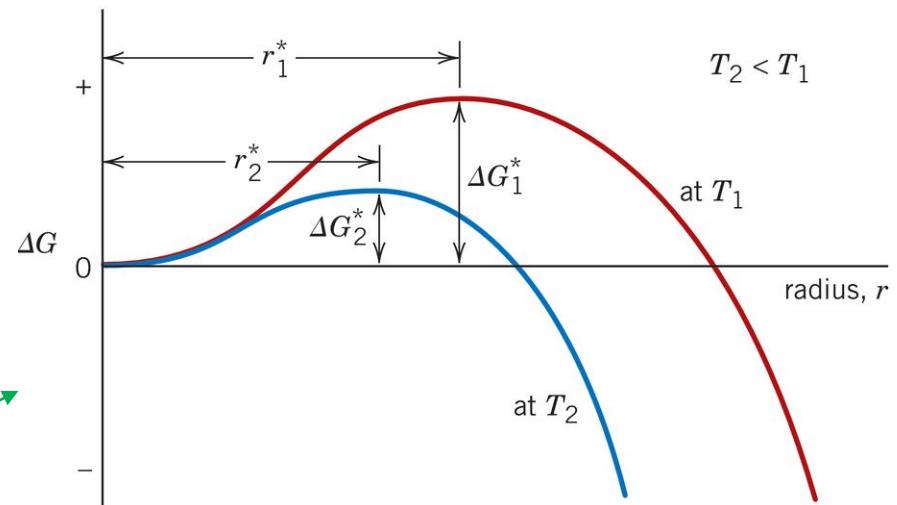
# 응고 과정 $\Delta G^*$ 액상 $\rightarrow$ 고상 모형 – 임계값의 온도 영향

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3(T_m)^2}{3(\Delta H_f)^2} \frac{1}{(T_m - T)^2}$$

$$r^* = -\frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f} \frac{1}{(T_m - T)}$$

$\gamma, \Delta H_f$ 는 온도변화에 민감하지 않으므로  
다음과 같은 결론이 도출된다.

$$(T_m - T) \uparrow \quad \Delta G^* \downarrow \quad r^* \downarrow$$

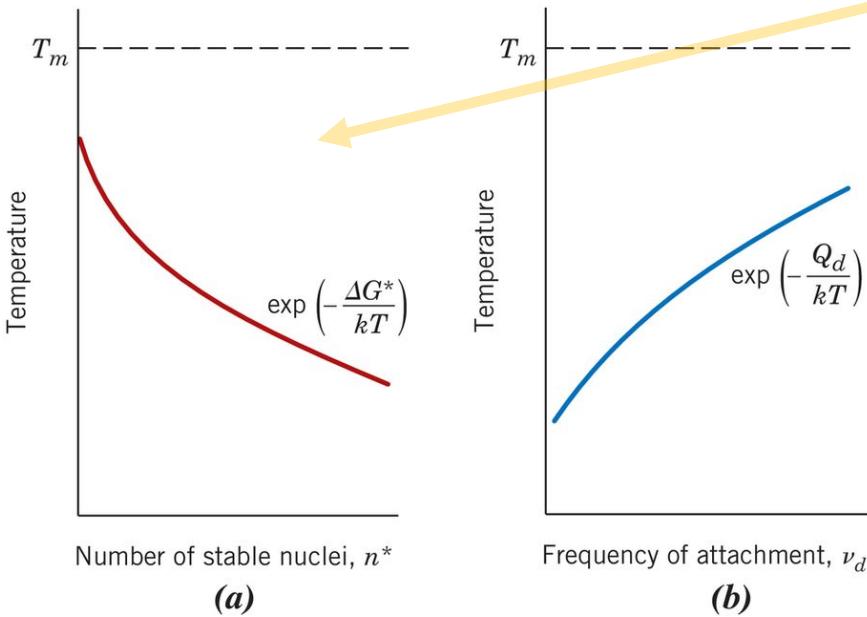


즉 평형 응고 온도보다 온도가 낮을 수록  $\Delta G^*$ 과  $r^*$ 이 낮아져 핵생성이 쉬워진다.

# 응고 모형 - $n^*$ , $v_d$ 의 온도 영향 (1)

추가로  $r^*$ 를 가진 핵의 수(즉  $n^*$ )는 다음과 같이 온도의 함수로 나타난다:

$$n^* = K_1 \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right)$$



❑  $\Delta G^*$  값 또한 온도에 대한 함수이다:

$$\Delta G^* \propto \frac{1}{(T_m - T)^2} \text{ 따라서 } \left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) \propto \frac{1}{T(T_m - T)^2}$$

위를 활용하면  $n^* \propto \exp\left(-\frac{1}{T(T_m - T)^2}\right)$

$$T \downarrow \frac{1}{T(T_m - T)^2} \uparrow n^* \downarrow$$

핵생성 과정에서의 원자(분자)들의 확산이 필요. 확산또한 온도에 영향을 받는다. 확산효과는 원자들이 서로 달라붙는 '빈도'에( $v_d$ ) 영향을 받는다. 그 빈도는 다음과 같이 표현:

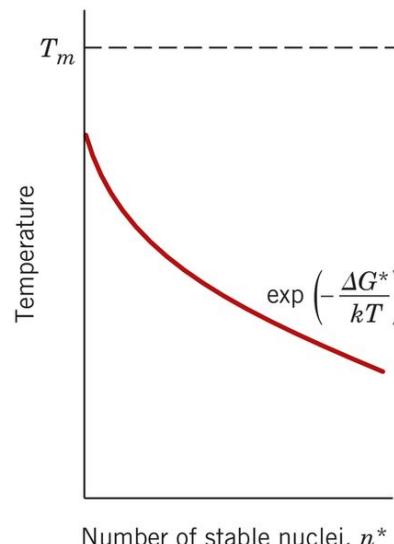
$$v_d = K_2 \exp\left(-\frac{Q_d}{kT}\right)$$

$Q_d$ : 해당 확산의 활성화 에너지;  $K_2$ : 상수

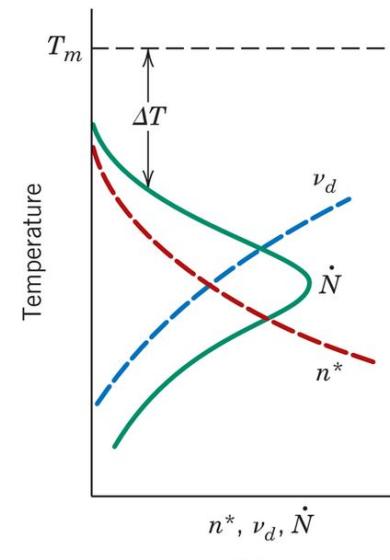
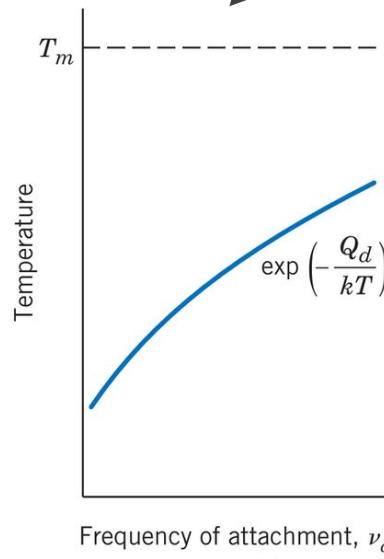
# 응고 모형 - $n^*$ , $v_d$ 의 온도 영향 (2)

임계 크기  $r^*$ 를 가진 핵의 수(즉  $n^*$ )  $\times$  그런 핵들이 얼마나 자주 붙는지 ( $v_d$ )

온도에 반비례



온도에 비례

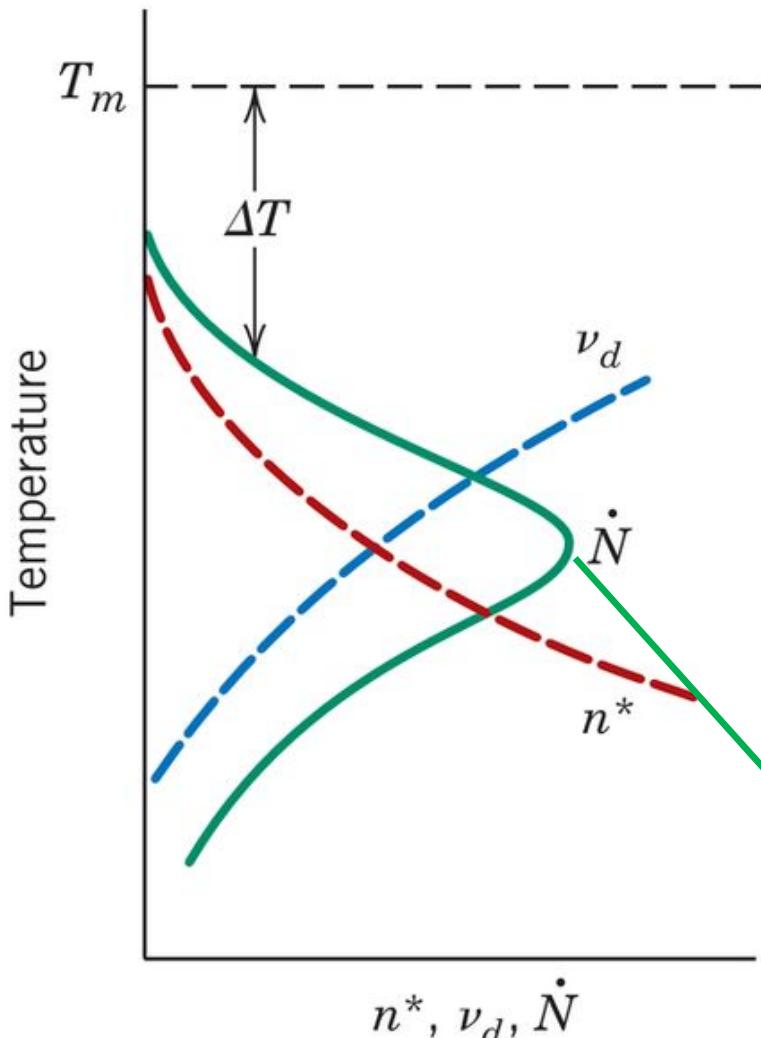


최적의  
온도가 존재

핵생성속도  
 $(\frac{dN}{dt} = \dot{N})$

$$\dot{N} = K_3 n^* v_d = K_1 K_2 K_3 \left[ \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) \exp\left(-\frac{Q_d}{kT}\right) \right] = C \left[ \exp\left(-\frac{\Delta G^* + Q_d}{kT}\right) \right]$$

# 응고 모형 – 핵학산의 온도 영향



$$\text{핵생성속도: } \dot{N} = C \left[ \exp \left( -\frac{\Delta G^* + Q_d}{kT} \right) \right]$$

$\Delta G^*$ : 핵이 몇개 생길 수 있는지 지배

$Q_d$ : 입자가 얼마나 자주 붙을지 지배

$\Delta G^* \gg Q_d$ : 핵생성 개수  $n^*$  가  
핵생성속도를 지배

$$\exp \left( -\frac{\Delta G^*}{kT} \right) \ll \exp \left( -\frac{Q_d}{kT} \right)$$

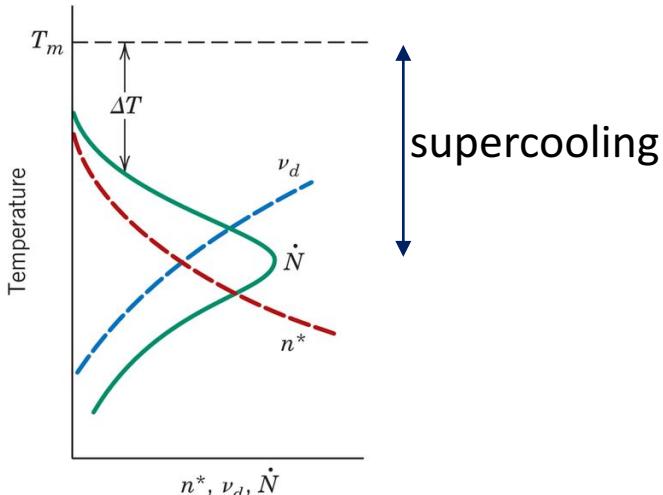
$\Delta G^* \ll Q_d$ : 낮은 온도에서는 확산이 느려  
 $\nu_d$  가 작다. 따라서  $\nu_d$  가 전체 핵생성속도를  
지배.

$$\exp \left( -\frac{\Delta G^*}{kT} \right) \gg \exp \left( -\frac{Q_d}{kT} \right)$$

핵생성 속도는 intermediate  
temperature에서 최대가 된다.  
여기서는  $\Delta G^* \approx Q_d$

# 응고 모형 고찰

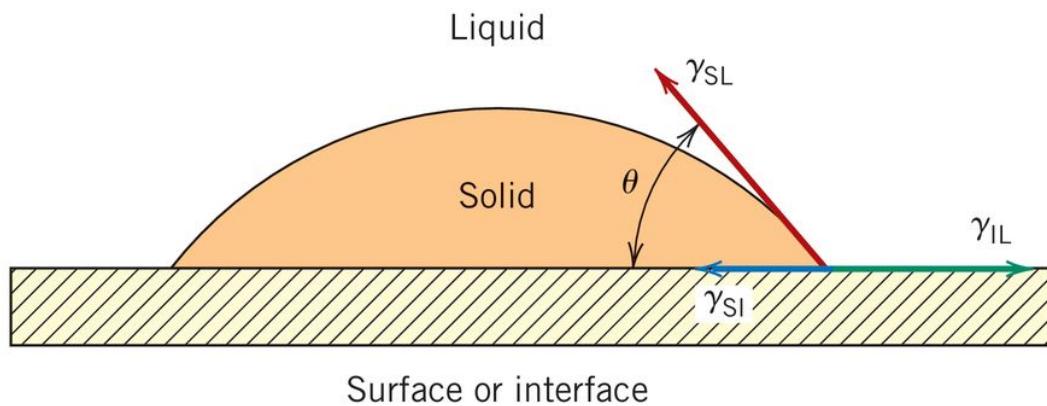
- 이때까지 우리는 구형의 핵 모양을 가정하여 논의하였다. 하지만 우리가 사용한 원리들은 핵이 어떠한 모양이어도 같은 결과를 얻는다.
- 우리는 응고 - 즉 액상에서 고상으로의 변태과정 - 을 살펴보았다. 하지만 이 논의에서 얻은 결과는 다른 종류의 변태 - 즉 고체에서 기체로, 혹은 고체에서 또 다른 고체로 변태하는 - 과정에도 동일하게 적용된다.
- 물론 우리가 사용한 매개변수는 변태의 종류에 따라 달라질 수 있다. 우리가 앞으로 더욱 살펴볼 고체-고체 변태에서는 새로운 상의 형성에 수반되는 부피의 변화에 따른 변형률도 발생할 수 있다.



실제 응고 온도 ( $T_m$ ) 보다 낮은 온도에서 감지할 만한 핵생성 (상변화의 첫번째 단계)이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 과냉각 (supercooling, undercooling)이라고 한다. 균일 핵생성에 대한 과냉각은 매우 크다 (수백 K) – Table 12.1 참고

# 불균일 핵생성 모델

- 균일 핵생성을 위한 과냉각은 매우 크지만 (수백  $^{\circ}C$ ), 실제로는 단지 수  $^{\circ}C$ 이다. 그 이유는 핵이 이미 존재하는 표면이나 계면에서 생성되면 표면에너지 term이 감소하여 전체 핵생성 활성화에너지(energy barrier)가 낮아지기 때문이다.
- 다음과 같은 모델을 활용하여 논의해보자.

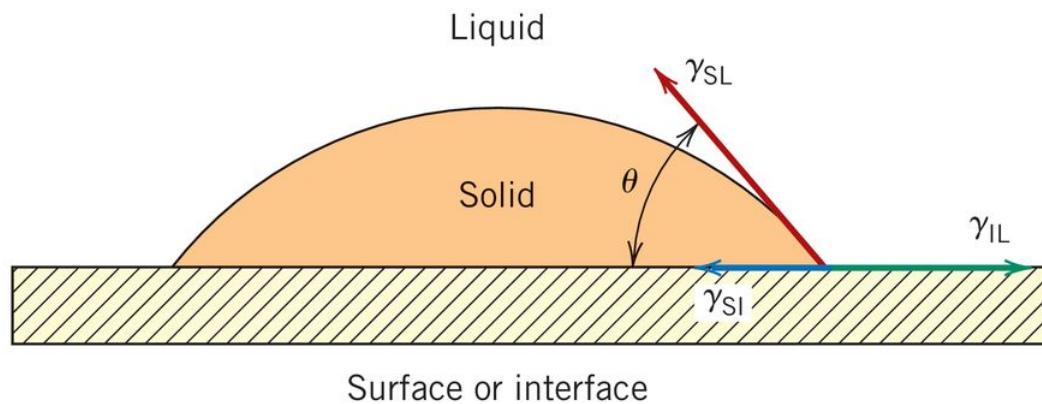


액상  $\rightarrow$  고상 변태 과정에서  
핵이 편평한 표면위에 생성되는  
'불균일 핵생성 모델'

액상 고상 모두 표면에 완전히 '젖어' 부착이 되어 있다.

세 가지 종류의 계면이 존재한다(Solid/Liquid, Interface/Liquid, Interface/Solid)  
SL과 interface 사이의 각도(젖은 각, wetting angle): 벡터  $\gamma_{SL}$ 와  $\gamma_{SI}$ 의 사잇각

# 불균일 핵생성 모델



$\gamma$ : 계면 에너지;  
혹은 surface tension(표면 장력)

세 계면의 surface tension 사이의 관계:  $\rightarrow \gamma_{IL} = \gamma_{SI} + \gamma_{SL} \cos \theta$

$$r_{\text{hetero}}^* = -\frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_v} \quad \Delta G_{\text{hetero}}^* = \left(\frac{16\pi\gamma_{SL}^3}{3\Delta G_v^2}\right) S(\theta)$$

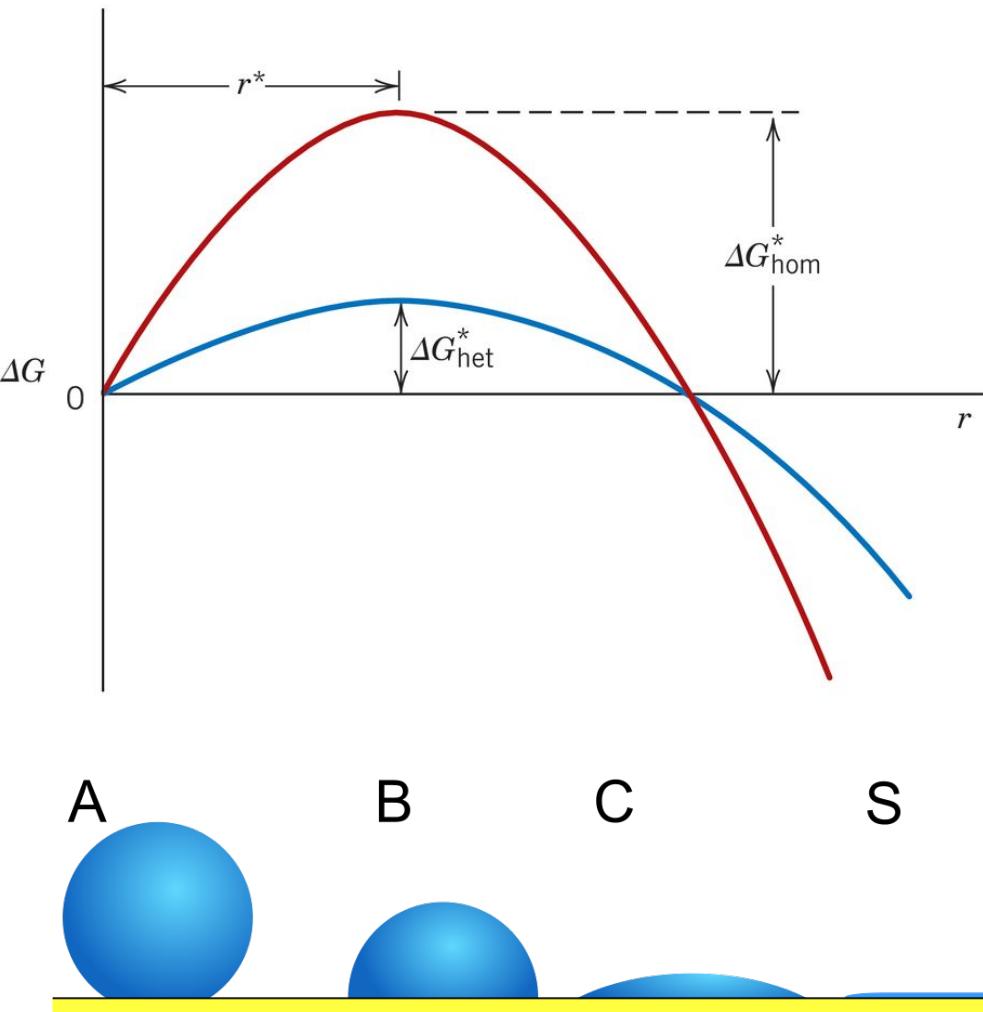
$$r_{\text{homo}}^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v} \quad \Delta G_{\text{homo}}^* = \frac{16}{3} \frac{\pi\gamma^3}{(\Delta G_v)^2}$$

$$\therefore \Delta G_{\text{hetero}}^* = \Delta G_{\text{homo}}^* S(\theta)$$

불균일 핵생성 모델  
 $S(\theta)$ : wetting angle에 대한  
함수 0-1 사이 값 가진다

균일 핵생성 모델

# 균일/불균일 핵생성 비교



$$r_{\text{hetero}}^* = -\frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_v}$$

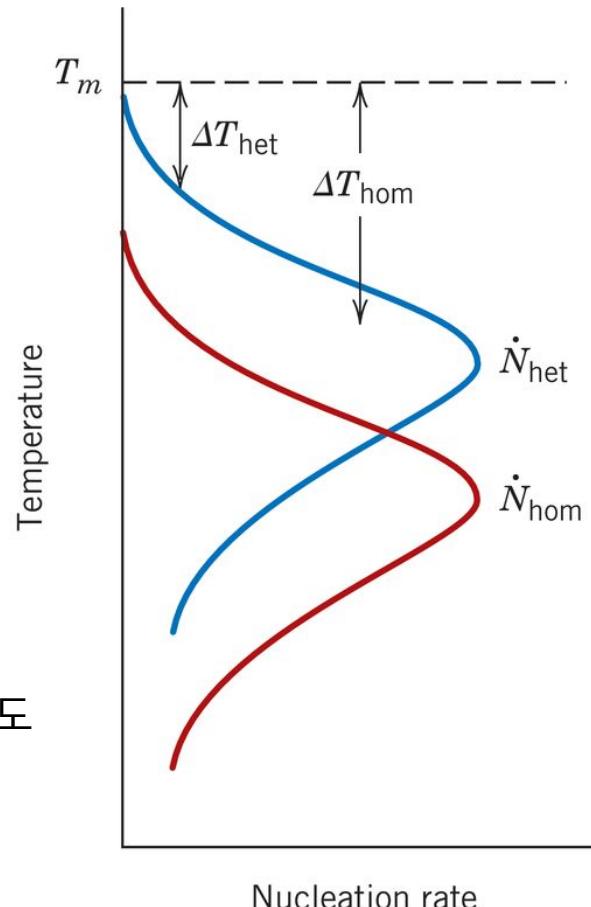
$$r_{\text{homo}}^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v}$$

$$\Delta G_{\text{hetero}}^* = \Delta G_{\text{hom}}^* S(\theta)$$

Wetting angle  $\theta$  값의  
변화에 따른  
nucleation 거동 변화

# 균일/불균일 핵생성 비교

Q. 냄비의 바닥, 혹은 벽면에서 먼저 수증기 방울이 생겨난다. 그 이유는?



Q. 균일 핵생성과 불균일 핵생성에 대한 온도에 따른 핵생성 속도 차이, 과냉각( $\Delta T$ )의 차이를 설명할 수 있겠는가?

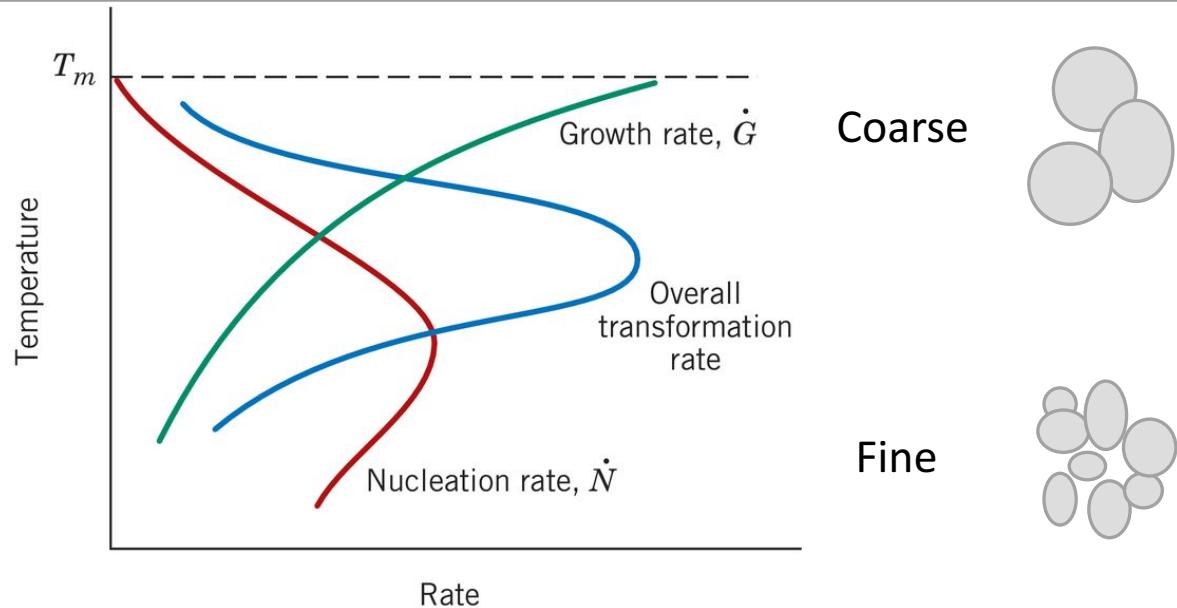
# 성장

---

- 임계 크기 이상의 핵들은 '성장' 단계를 거쳐 안정화된다. 새로운 상 입자의 성장과 동시에 핵생성은 계속되지만, 새로운 상으로 이미 변한 구역에서는 핵생성이 발생하지 않는다. 성장은 새로운 상들이 성장과정에서 만나게 되면 종료된다.
- 성장의 또한 확산기구(diffusion mechanism)에 지배받는다. 따라서 확산속도(diffusion rate)가 성장 속도( $\dot{G}$ )를 결정한다. 따라서 다음의 형태로 표현된다:
  - $\dot{G} = C \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$
  - Q: activation energy, C: pre-exponential parameter – 둘 다 온도에 무관한 상수.

# 전체 변태 속도와 조밀/조대 조직

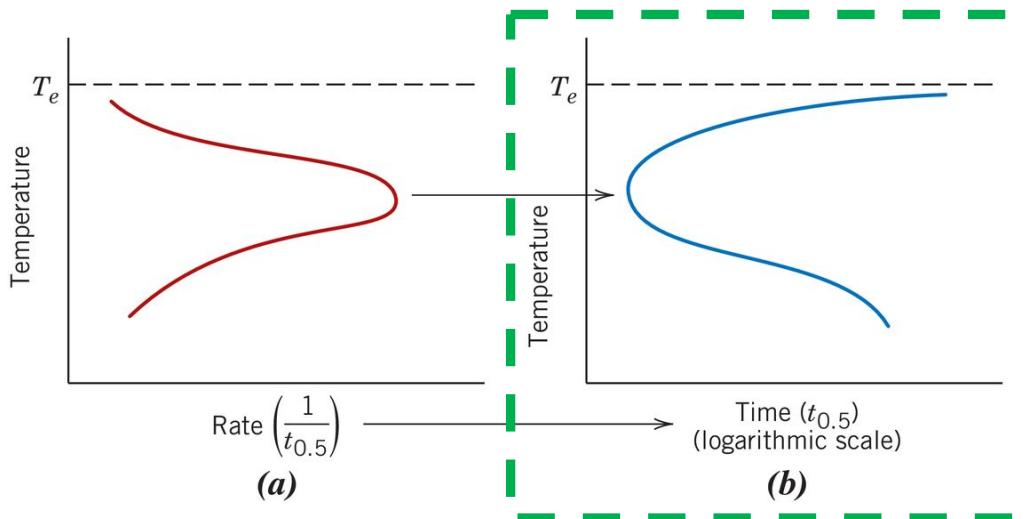
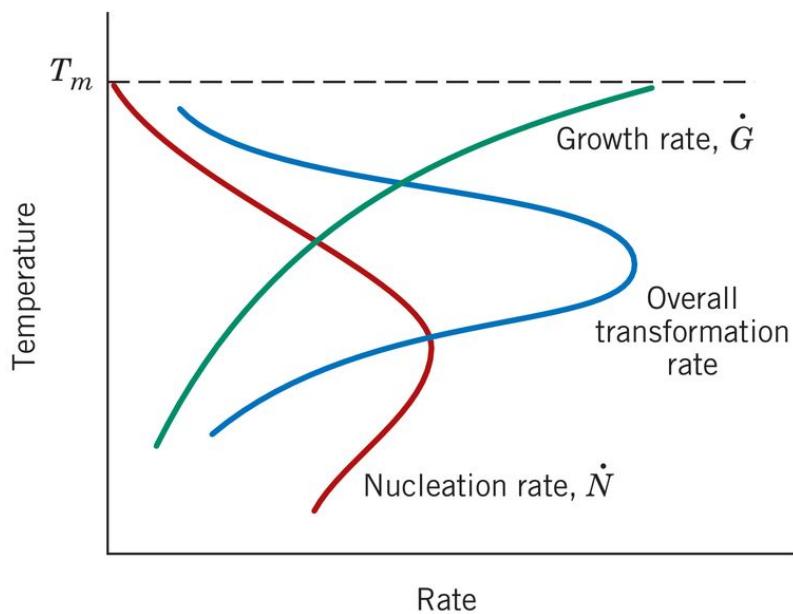
- Rate of transformation  $\propto \dot{G}\dot{N}$



- 결과 상(product phase) 입자의 크기는 변태 온도에 의존한다.  $T_m$  부근에서 더욱 큰 알갱이가 생성된다.  $T_m$ 보다 낮은 온도일 수록 growth rate가 낮아 작은 알갱이가 생성; 하지만  $T_m$  부근에서는 입자가 생성되는 속도  $\dot{N}$ 가 낮아 많은 수의 알갱이가 존재 하진 않는다.

# 변태속도, 변태시간, 비평형상

변태 속도와 어느 정도까지의 변태에 필요한 시간은 서로 역비례한다.  
오른쪽 그림에서  $t_{0.5}$ : 50% 변태까지 걸린 시간.



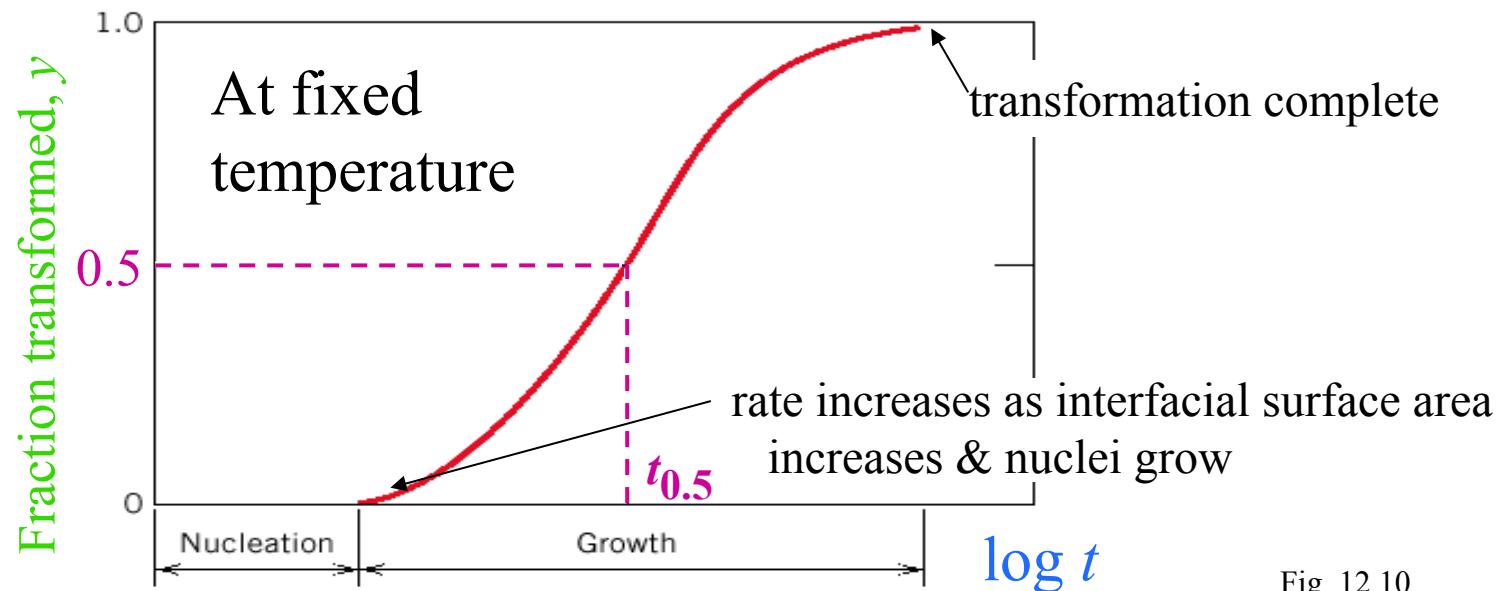
차후에 등온 변태도의  
근간이 되는 모양이다  
(nose)

응고 과정중에 평형 온도보다 훨씬 낮은  
온도에서는 오히려 변태속도가  
낮아지면서 '비평형'상 구조를 얻을 수도  
있다 (추후에 더 논의)

# 고체 상태 변태의 속도론 (kinetics)

- 앞서 “액체→고체” (응고) 상변태에 관한 핵생성, 성장 및 **변태 속도의 온도 의존성**에 중점을 두었다. **변태 속도의 시간 의존성**(변태의 속도론 kinetics)은 주로 열처리에서 주요 고려사항이다. 그리고 우리는 앞으로 “고체a→고체b” 타입의 상변태로 제한하여 논의하겠다 (재료공학에서의 주 관심 상변태)
- 상변태 속도론(transformation kinetics)에서 상변태의 속도를 파악하기 위해 온도를 고정시킨 상태에서 상변태의 량(정도)을 시간에 따른 함수로 표현(혹은 측정)한다. 상변태의 정도를 시간에 따라 측정하는 방법은:
  - X-ray diffraction (microscopy) – snapshots of various samples (thus many specimens)
  - Real-time (in-situ) monitoring of changes in electrical conductivity (different phases have different electrical conductivity) – single specimen
  - Measuring propagation of sound waves – single specimen

# Rate of phase transformation



Avrami equation =>  $y = 1 - \exp(-kt^n)$

fraction  
transformed      time

- $k$  &  $n$  are transformation specific parameters

By convention

$$rate = 1 / t_{0.5}$$

Fig. 12.10,  
Callister &  
Rethwisch 9e.

# 예제 12.2 변태 속도 계산

- Q. Avrami 식  $y = 1 - \exp(-kt^n)$  로 austenite에서 ferrite로의 상변태 속도가 결정(determine)된다. 이때  $n$  값이 3.1로 알려져 있다. 20분이 경과한 후 새로운 상의 분율이 0.3(즉 30% 상변태 완료)라면, 해당 상변태 속도는 얼마인가?
- 중요한 정보 하나: 상변태 속도는 관례적으로 50% 변태가 발상할 때까지 걸린 시간의 역수로 표현한다. 우선 Avrami 식을 사용하여  $t_{0.5}$ 를 구하자:

$$0.5 = 1 - \exp(-kt_{0.5}^{3.1}) \rightarrow 0.5 = \exp(-kt_{0.5}^{3.1}) \rightarrow -kt_{0.5}^{3.1} = \ln(0.5)$$

$$\rightarrow t_{0.5} = \left( -\frac{\ln(0.5)}{k} \right)^{1/3.1}$$

- 또 다른 정보하나: 20분뒤 30% 상변태 완료 즉

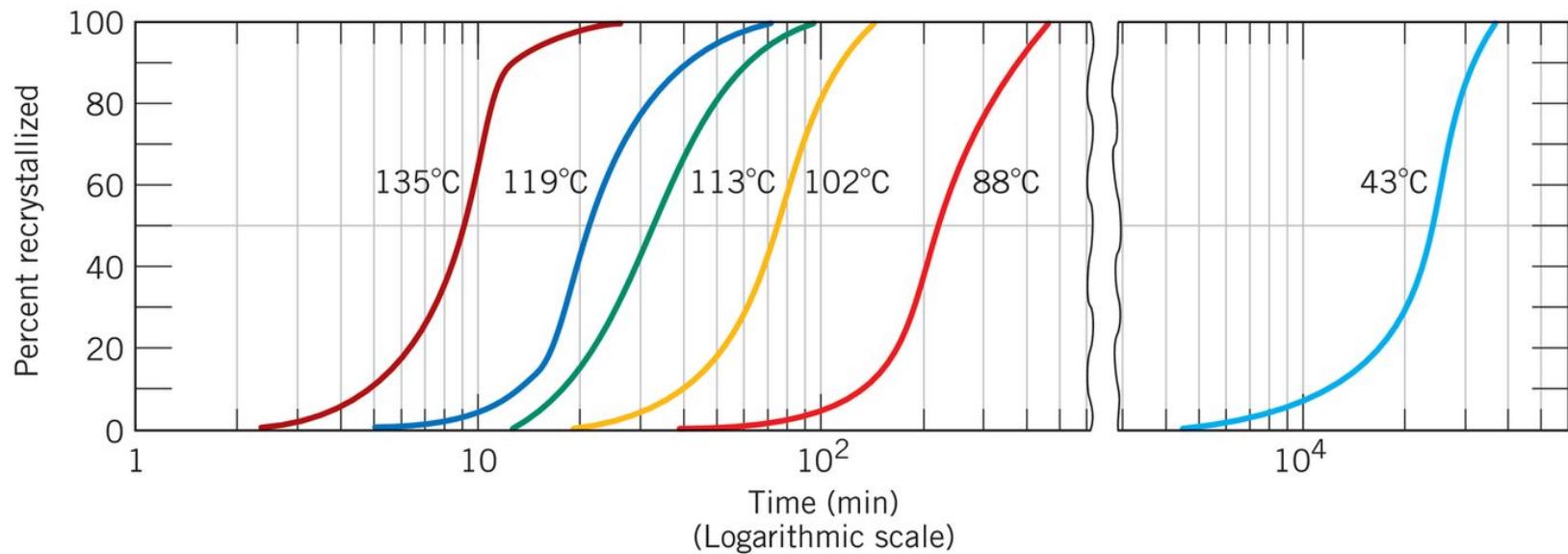
$$0.3 = 1 - \exp(-k(20 \text{ [min]})^{3.1}) \rightarrow -k (20[\text{min}])^{3.1} = \ln(0.7) \rightarrow k = \frac{-\ln(0.7)}{(20[\text{min}])^{3.1}}$$

- 위 결과를 결합하면:

$$t_{0.5} = \left( -\frac{\ln 0.5}{-\ln(0.7)} \right)^{1/3.1} = \left( \frac{\ln 0.5}{\ln 0.7} (20[\text{min}])^{3.1} \right)^{1/3.1} = \left( \frac{\ln 0.5}{\ln 0.7} \right)^{1/3.1} 20[\text{min}] = 24.78 \text{ [min]}$$

$$\text{Rate of transformation (by convention)} = \frac{1}{t_{0.5}} = 0.04035 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$$

# Rate of recrystallization (pure Cu)



Reprinted with permission from Metallurgical Transactions, Vol. 188, 1950, a publication of The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA. Adapted from B. F. Decker and D. Harker, "Recrystallization in Rolled Copper," Trans. AIME, 188, 1950, p. 888.

변태속도론에 사용되는 Avrami 식은 재결정의 속도론에도 사용가능하다 (위 구리의 경우를 참고). 재결정의 속도 또한 관례적으로 50% 재결정 완료에 걸린 시간으로 정의한다.

# 준안정 상태(metastable state)와 평형상태 (equilibrium state)

- Recall that phase transformation is controlled by Temperature, pressure, chemical composition. 제조 공정상에서 금속의 상변태를 조절하는데 적절한 변수는 ‘온도’이다.
- 상태도(phase diagram)은 해당 온도, 압력, 그리고 조성에 따라 어떠한 상이 평형 상태인지 알려준다. 우리는 상변태는 온도 조건에 따라 핵생성과 성장의 조건이 달라지는 것과, 속도론을 통해 온도에 따라 상변태의 속도가 좌우되는 것을 살펴보았다. 적절한 온도에서는 상변태 속도가 매우 낮아져 평형 상태의 상으로 변화는데 매우 오랜 시간이 걸릴 수 있다.
- 특히 고체 상태의 경우 상변태에 필요한 확산 현상이 매우 더디게 일어나 평형 상태의 구조가 만들어지는 것이 드물다. 평형 상태는 가열과 냉각이 극한적으로 느리고 비현실적인 속도로 진행될 경우에만 유지된다.
- 평형 냉각이 아니라면 supercooling 평형 가열이 아니라면 superheating이 발생.
- 냉각 속도가 빠를수록 과냉과 과열 현상이 크게 일어난다.
- 공업적으로 중요한 많은 합금은 초기와 평형의 중간 상태로 나타나는 경우가 많다 (때로는 이러한 준안정 상태의 구조가 필요할 때도 있다)

# Summary

---

- 상태도 리뷰
- 상변태 과정
  - 핵생성 (균일/불균일 모델 비교) – 응고 모형.
  - 성장
  - 조밀/조대 조직이 발생 조건 비교
- 상변태 변태속도론
- 준안정 상태