

# Chapter 3. Metallic and Ceramic Structures

Atom arrangements in solid state

Material structure

**Crystalline** (결정질)

single crystal (단결정)

polycrystalline (다결정)

**Noncrystalline** or **Amorphous** (비정질)

Crystallographic Labeling convention (표기 규약)

**Crystallographic direction** (결정학적 방향)

**Crystallographic plane** (결정학적 면)

## Fundamental Concepts

**Crystalline materials** (결정질 재료)

: 광범위한 원자 거리에 대해 단위결정구조(**unit cell**)가 반복적인 배열을 갖는 재료

3차원 패턴 형성

**Crystal structure** (결정 구조)

: 결정질 재료 내의 원자, 이온, 분자 등의 공간적 배열 구조

Metals

Ceramics

Polymers



구조 간단

구조 복잡

## Unit Cells (단위정) : 결정체의 반복적 기본 단위

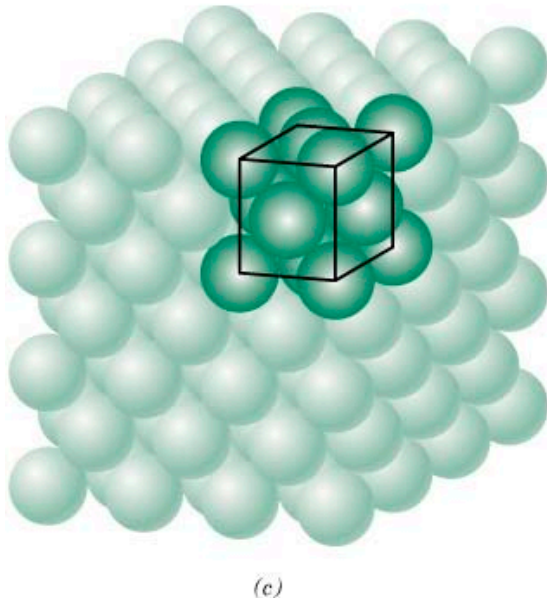
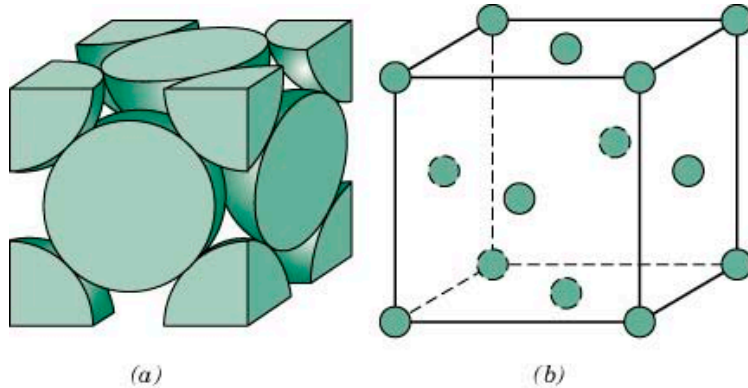


Fig. 3.1 면심입방 결정 구조(FCC)에 대한 단위정 표기 예:

- (a) Hard sphere unit cell
- (b) Reduced-sphere unit cell
- (c) Aggregate.

## Metallic Crystal Structures

→ 대부분 3 가지 결정 구조

Face-centered cubic (FCC) crystal structure  
(면심입방 결정 구조)

Body-centered cubic (BCC) crystal structure  
(체심입방 결정 구조)

Hexagonal close-packed (HCP) crystal structure  
(육방조밀 결정 구조)

**Table 3.1 Atomic Radii and Crystal Structures for 16 Metals**

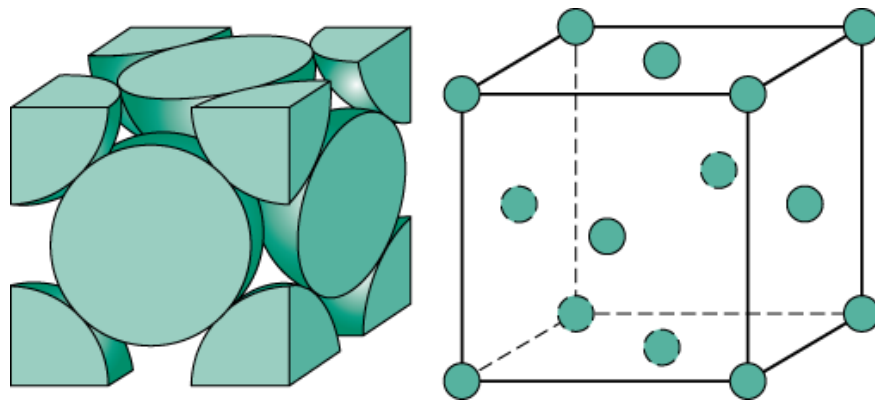
<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure<sup>a</sup></i>	<i>Atomic Radius<sup>b</sup> (nm)</i>	<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure</i>	<i>Atomic Radius (nm)</i>
Aluminum	FCC	0.1431	Molybdenum	BCC	0.1363
Cadmium	HCP	0.1490	Nickel	FCC	0.1246
Chromium	BCC	0.1249	Platinum	FCC	0.1387
Cobalt	HCP	0.1253	Silver	FCC	0.1445
Copper	FCC	0.1278	Tantalum	BCC	0.1430
Gold	FCC	0.1442	Titanium ( $\alpha$ )	HCP	0.1445
Iron ( $\alpha$ )	BCC	0.1241	Tungsten	BCC	0.1371
Lead	FCC	0.1750	Zinc	HCP	0.1332

<sup>a</sup> FCC = face-centered cubic; HCP = hexagonal close-packed; BCC = body-centered cubic.

<sup>b</sup> A nanometer (nm) equals  $10^{-9}$  m; to convert from nanometers to angstrom units ( $\text{\AA}$ ), multiply the nanometer value by 10.

- Face-centered cubic (FCC) crystal structure

: 원자가 입방체의 꼭지점과 면의 중심에 위치



입방체 변의 길이:  $a$   
Atomic radius:  $R$



$$a = 2\sqrt{2}R$$

(Ex. 3.1, 유도과정)

꼭지점에 1/8 원자가 8개

면에 1/2 원자가 6개

→ Unit cell에 총 4개의 원자가 존재

- **Coordination number** (배위수)

: 한 원자와 접촉하고 있는 원자의 개수

FCC 구조의 배위수는 12

- **Atomic packing factor** (원자충전분율)

: unit cell에서 고체 구가 차지하는 부피분율

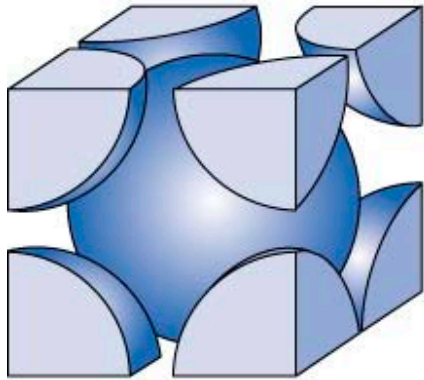
$$APF = \frac{\text{Volume of atoms in unit cell}}{\text{Volume of unit cell}}$$

∴ FCC 구조의 APF는 0.74 (Ex. 3.2, 유도과정)

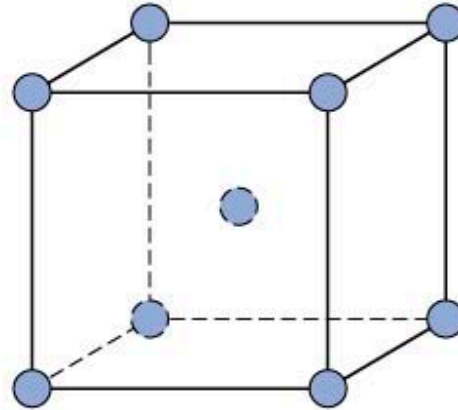
→ maximum packing volume fraction (최대충전부피분율)

- Body-centered cubic (BCC) crystal structure

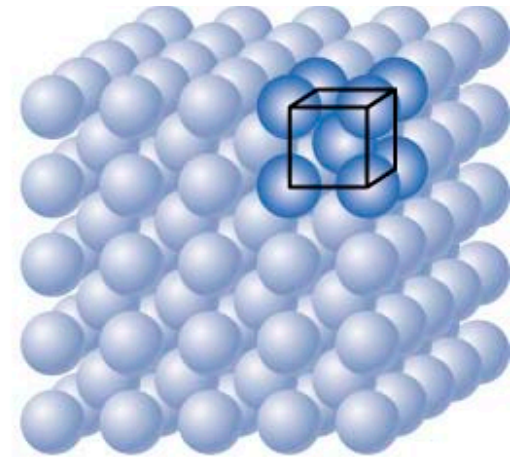
: 원자가 입방체의 꼭지점과 입방체의 중심에 위치



Hard sphere unit cell



Reduced-sphere unit cell



Aggregate

입방체 변의 길이:  $a$   
Atomic radius:  $R$

$$\Rightarrow a = \frac{4}{\sqrt{3}} R$$

꼭지점에 1/8 원자가 8개  
중심에 원자가 1개

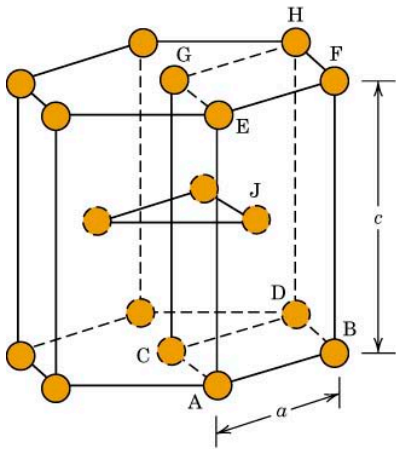
→ Unit cell에 원자 2개 존재

Coordination #: 8  
APF: 0.68

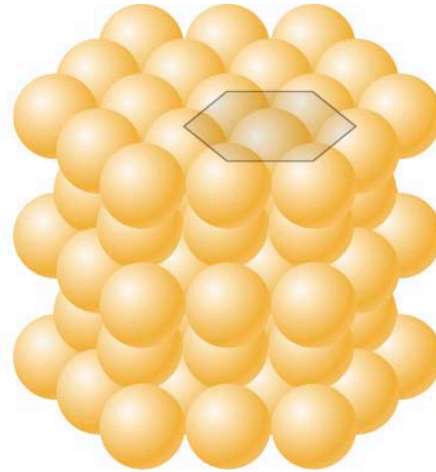


- Hexagonal close-packed (HCP) crystal structure

: 원자가 육각기둥 단위정의 꼭지점과 중심에 위치



Reduced-sphere unit cell



Aggregate

윗면 및 아랫면에 각각:

1/6 원자 6개, 1/2 원자 1개

중간면: 원자 3개

→ Unit cell에 원자 6개 존재

육각기둥 변의 길이:  $a$

육각기둥 높이:  $c$



$$c/a = 1.633$$

Coordination #: 12, APF: 0.74 (FCC와 동일)

## Metal의 밀도 계산

$$\rho = \frac{n A}{V_C N_A}$$

Unit cell 내 원자 수 ←  $n$  → 원자량  $A$

$V_C$  → Unit cell의 부피

$N_A$  → Avogadro 수

## Ex. 3.3) 구리(FCC 구조)의 이론적 밀도

Cu atomic radius: 0.128 nm  
원자량: 63.5 g/mol

$$\rho = \frac{4 \times 63.5}{(16\sqrt{2}R^3)N_A} = 8.89 \text{ g/cm}^3$$

cf.) 8.94 g/cm<sup>3</sup> (문헌상의 밀도)

비슷

## Ceramic Crystal Structures

↙ 2개 이상의 원소로 구성되어 metal 보다 복잡  
원자 결합도 이온결합에서 공유결합까지 다양

**Table 3.2** For Several Ceramic Materials,  
Percent Ionic Character of  
the Interatomic Bonds

<i>Material</i>	<i>Percent Ionic Character</i>
CaF <sub>2</sub>	89
MgO	73
NaCl	67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63
SiO <sub>2</sub>	51
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	30
ZnS	18
SiC	12

금속이온 → cation (양이온)

비금속이온 → anion (음이온)

## Ceramic 재료의 crystal structure 특징:

구성 이온의 **electrical charge** (전하량)

& 양이온과 음이온의 **relative size**에 의해 결정

$r_C$  : ionic radius of cation

$r_A$  : ionic radius of anion

일반적으로  $r_C/r_A < 1$

안정된 구조: 각 cation은 가능한 많은 수의 anion을 갖는 것을 선호  
 → 배위수(양이온에 인접한 음이온 수)는  $r_C/r_A$ 에 의해 결정

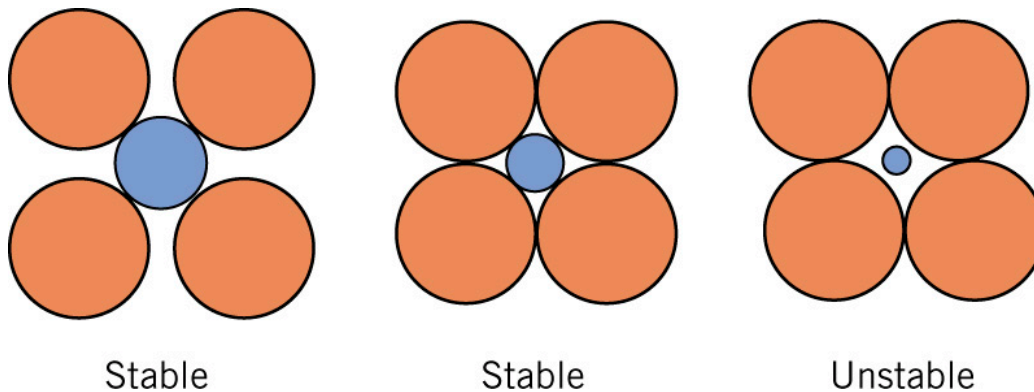
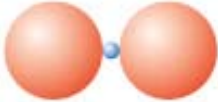



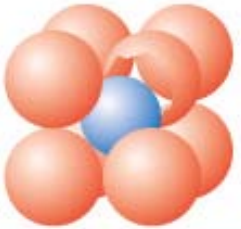


Fig. 3.4 안정 및 불안정한 양이온, 음이온 배위구조

**Table 3.3** Coordination Numbers and Geometries for Various Cation–Anion Radius Ratios ( $r_C/r_A$ )

Coordination Number	Cation–Anion Radius Ratio	Coordination Geometry
2	$<0.155$	
3	$0.155-0.225$	
4	$0.225-0.414$	
6	$0.414-0.732$	
8	$0.732-1.0$	

배위수 4, 6, 8인 경우가 ceramics에 흔함.

Ex. 3.4) 배위수 3인 경우  
최소  $r_C/r_A$ 가 0.155임을  
계산

**Table 3.4** Ionic Radii for Several Cations and Anions (for a Coordination Number of 6)

<i>Cation</i>	<i>Ionic Radius (nm)</i>	<i>Anion</i>	<i>Ionic Radius (nm)</i>
Al <sup>3+</sup>	0.053	Br <sup>-</sup>	0.196
Ba <sup>2+</sup>	0.136	Cl <sup>-</sup>	0.181
Ca <sup>2+</sup>	0.100	F <sup>-</sup>	0.133
Cs <sup>+</sup>	0.170	I <sup>-</sup>	0.220
Fe <sup>2+</sup>	0.077	O <sup>2-</sup>	0.140
Fe <sup>3+</sup>	0.069	S <sup>2-</sup>	0.184
K <sup>+</sup>	0.138		
Mg <sup>2+</sup>	0.072		
Mn <sup>2+</sup>	0.067		
Na <sup>+</sup>	0.102		
Ni <sup>2+</sup>	0.069		
Si <sup>4+</sup>	0.040		
Ti <sup>4+</sup>	0.061		

## AX 형 결정 구조

A(cation)와 X(anion)의 수가 동등

- **Rock salt** (암염) 구조  
: NaCl, MgO, MnS, LiF, FeO 등

$0.414 < r_C/r_A < 0.732$  범위

배위수: 6

양이온과 음이온으로 구성된  
FCC 격자가 상호침투된 형태

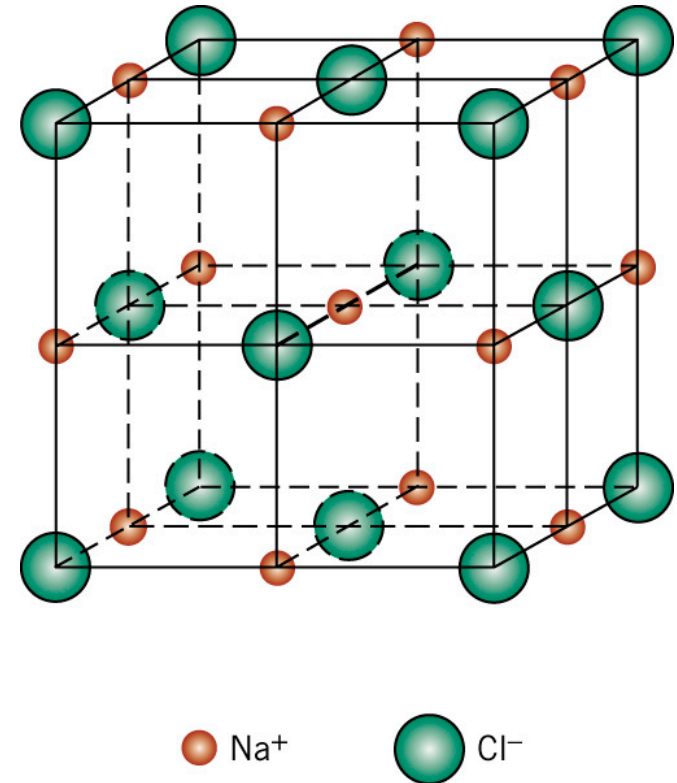


Fig. 3.5 Rock salt 형 결정 구조의 unit cell.

- CsCl (염화세슘) 구조

$0.732 < r_C/r_A < 1.0$  범위

배위수: 8

BCC처럼 보이지만 구성  
원소가 다름

양이온과 음이온으로 구성된  
SC (simple cubic, 단순입방)  
격자가 상호침투된 형태

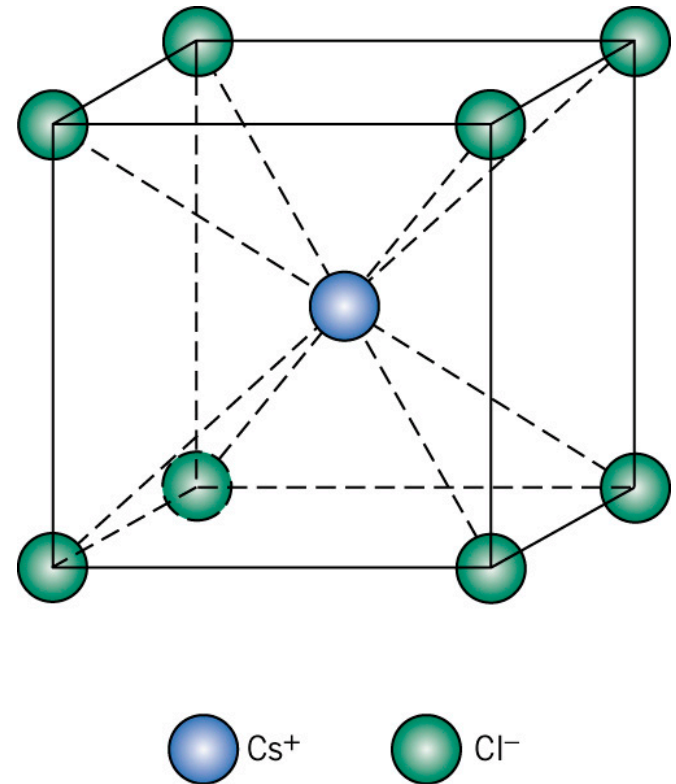


Fig. 3.6 Cesium chloride 형  
결정구조의 unit cell.



- **ZnS** (Zinc blende, 황화아연) 구조  
: ZnS, ZnTe, SiC 등

$0.225 < r_C/r_A < 0.414$  범위

배위수: 4

(모든 이온은 사면체의  
중심에 위치)

공유결합이 강한 원자 결합의 경우

양이온과 음이온으로 구성된  
FCC 격자가 상호침투된 형태

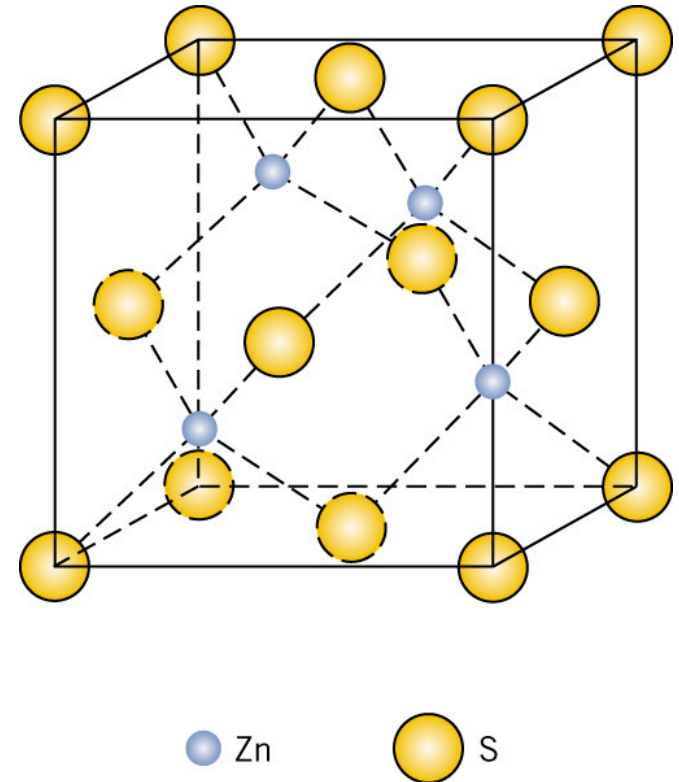


Fig. 3.7 Zinc blende 형  
결정구조의 unit cell.

**$A_mX_p$  형 결정 구조**

↙  
m or p의 값이 1이 아닌 경우

:  $\text{CaF}_2$  (fluorite, 형석),  $\text{UO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$  등

$r_C/r_A \approx 0.8$ , 배위수: 8

입방체의 중심에  $\text{Ca}^{2+}$  위치,  
옆 입방체는 중심이 비어 있음.

∴ Unit cell은 8개의 cube로 구성

양이온과 음이온으로 구성된  
SC 격자가 상호침투된 형태

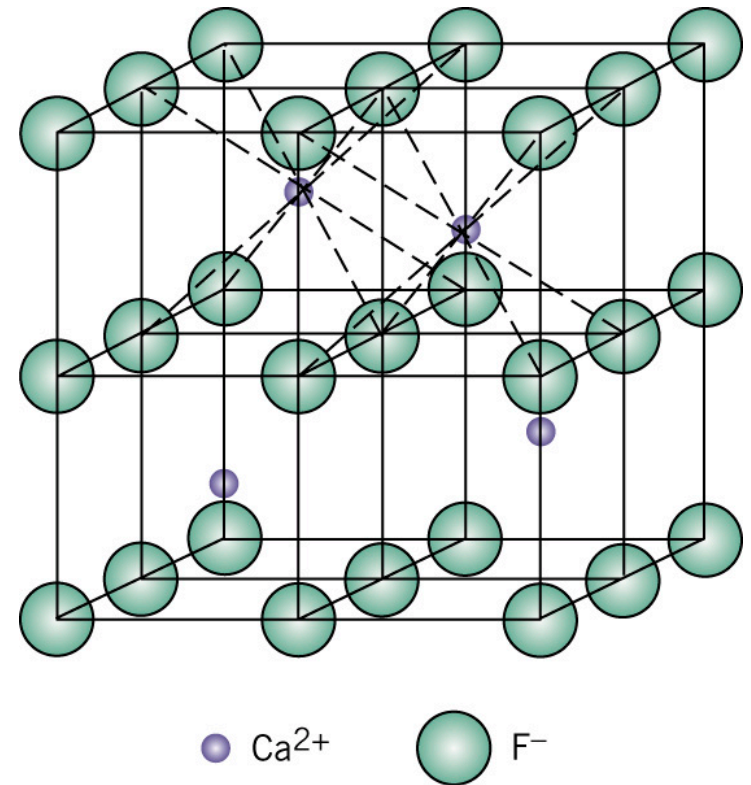


Fig. 3.8 Fluorite 형 결정 구조의 unit cell.

**A<sub>m</sub>B<sub>n</sub>X<sub>p</sub> 형 결정 구조**

2개의 cation과 1개의 anion으로 구성

Ex.) BaTiO<sub>3</sub> (Barium Titanate)

Ba<sup>2+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, O<sup>2-</sup>

Ba<sup>2+</sup>는 8개의 꼭지점에 위치

Ti<sup>4+</sup>는 중심, O<sup>2-</sup>는 6개의 면에 위치

Ba<sup>2+</sup> :  $8 \times 1/8 = 1$ , Ti<sup>4+</sup> : 1

O<sup>2-</sup> :  $6 \times 1/2 = 3$

∴ Ba:Ti:O = 1:1:3

양이온은 각각 SC, 음이온은 FCC로  
상호침투된 형태

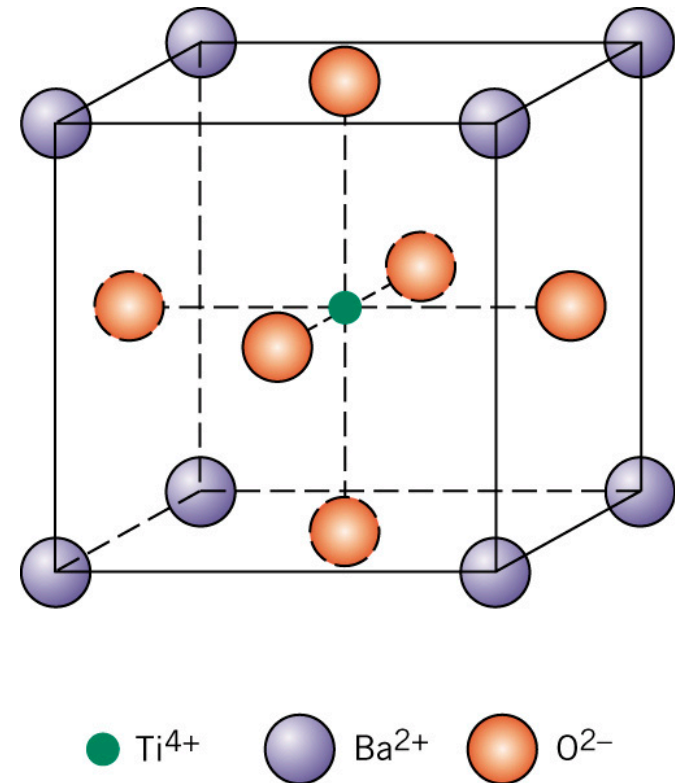


Fig. 3.9 Perovskite 형  
결정 구조의 unit cell.

**Table 3.5** Summary of Some Common Ceramic Crystal Structures

<i>Structure Name</i>	<i>Structure Type</i>	<i>Anion Packing</i>	<i>Coordination Numbers</i>		<i>Examples</i>
			<i>Cation</i>	<i>Anion</i>	
Rock salt (sodium chloride)	AX	FCC	6	6	NaCl, MgO, FeO
Cesium chloride	AX	Simple cubic	8	8	CsCl
Zinc blende (sphalerite)	AX	FCC	4	4	ZnS, SiC
Fluorite	AX <sub>2</sub>	Simple cubic	8	4	CaF <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> , ThO <sub>2</sub>
Perovskite	ABX <sub>3</sub>	FCC	12(A) 6(B)	6	BaTiO <sub>3</sub> , SrZrO <sub>3</sub> , SrSnO <sub>3</sub>
Spinel	AB <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	FCC	4(A) 6(B)	4	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

**Source:** W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd edition. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

## Ceramic의 밀도 계산

$$\rho = \frac{n' (\sum A_C + \sum A_A)}{V_C N_A}$$

Formula unit 내의 cation 원자량의 합

Formula unit 내의 anion 원자량의 합

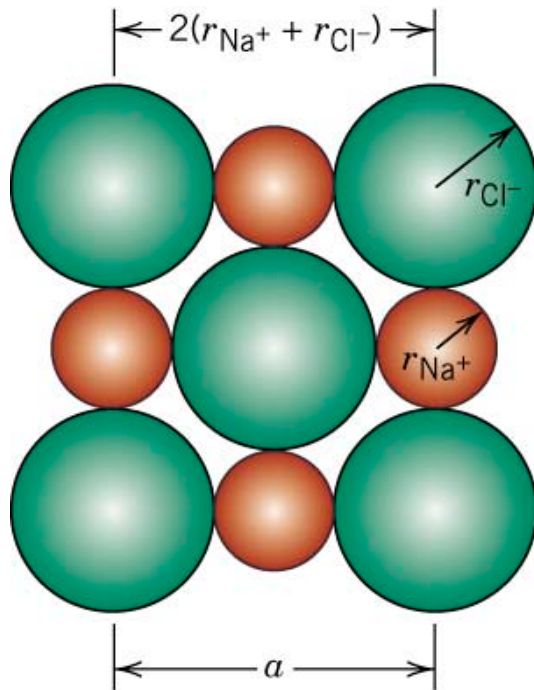
Avogadro 수

Unit cell의 부피

Formula unit (화학식 단위)의 수 (즉, unit cell 내의 화학식 분자의 개수)

ex. NaCl, BaTiO<sub>3</sub>

## Ex. 3.6) NaCl의 이론적 밀도



Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 모두 FCC 구조

$$\therefore n' : 4$$

$$\sum A_C = A_{Na} = 22.99 \text{ g/mol}$$

$$\sum A_A = A_{Cl} = 35.45 \text{ g/mol}$$

$$V_C = a^3$$

$$a = 2r_{Na^+} + 2r_{Cl^-}$$

$$\rho = \frac{4 \times (22.99 + 35.45) \text{ g/mol}}{[2(0.102 \times 10^{-7} \text{ cm}) + 2(0.181 \times 10^{-7} \text{ cm})]^3 \times 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}} = 2.14 \text{ g/cm}^3$$

비슷

cf.) 2.16 g/cm<sup>3</sup> (측정치)

## Silicate Ceramics (규산염 세라믹)

지표면 구성 물질 (soil, rock, clay, sand)

$\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{O}^{2-}$  Si와 O 간은 강한 공유결합  
 $\text{SiO}_4^{4-}$  사면체 구조가 기본단위

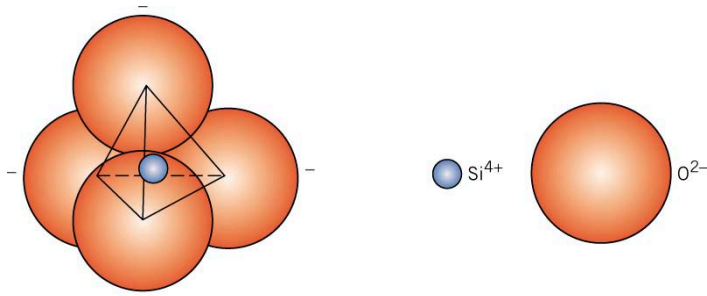


Fig. 3.10  $\text{SiO}_4^{4-}$  사면체 .

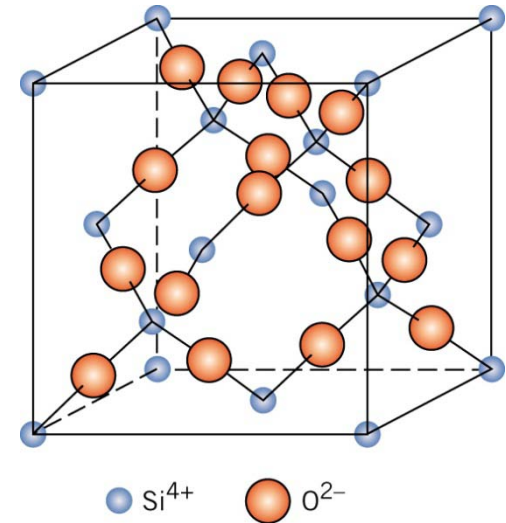


Fig. 3.11  $\text{SiO}_2$  unit cell  
 ( $\text{Si}^{4+}$  8개,  $\text{O}^{2-}$  16개).

## Silica

$\text{SiO}_2$  ~ 3차원 network 구조

결정질(석영) 및 비결정질(유리) 구조 모두 가능

## Silicates

$\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ ,  $\text{Si}_3\text{O}_9^{6-}$  등 다양.  
 $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  등 양이온이 결합해  
 전기적 중성이 되고 상호 결합시키는  
 역할을 함.

- **Simple silicates** (단순 규산염)  
 구조적으로 단순, 독립된 구조  
 ex.)  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$

- **Layered silicates** (층상 규산염)

2차원 층상구조, 각 사면체의 3개의  $\text{O}^{2-}$  이온이 판상으로 공유됨.  
 결합하지 않은 산소(지면으로 돌출된  $\text{O}^{2-}$ )와 중성 맞추기 위해  
 양이온 금속이온이 결합. → 층상 규산염 광물(점토의 기본구조)

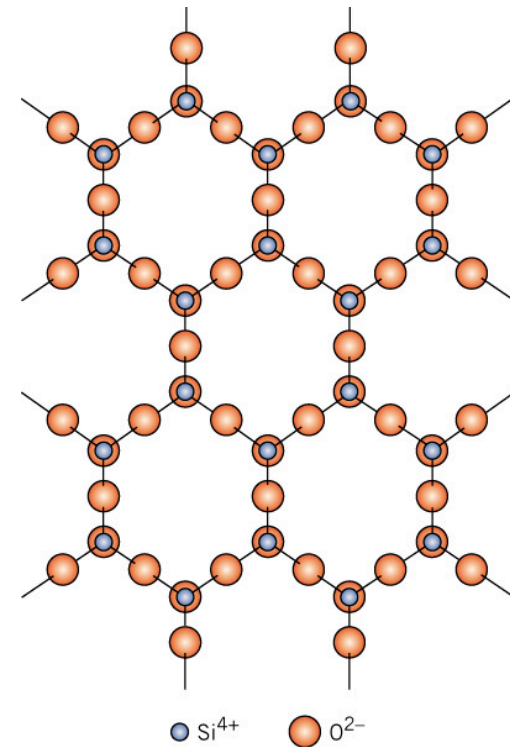


Fig. 3.13 층상 규산염의 기본구조.



## Carbon

다양한 polymorphic form이 존재

Carbon은 엄밀하게는 metals, ceramics, polymers에 속하지 않음. 흑연이 세라믹이므로 세라믹으로 들 수 있음.

- \* **Polymorphic form** (동질이상 형태): 같은 물질인데 둘 이상의 결정구조를 갖는 것.
- \* **Allotropy** (동소체): 동질이상 중에서 원소가 1개인 경우

Carbon의 polymorphic form (or allotropy)

: **Diamond, Graphite, Fullerenes, Carbon Nanotubes**

## Diamond

Metastable (준안정) C polymorph

완전공유결합 → “Diamond cubic”

가장 단단한 물질, 열전도도 우수

## Graphite (흑연)

Diamond 보다 stable

강한 공유결합으로 된 육각구조의 층이 van der Waals 력으로 결합

→ 면 방향으로 잘 미끄러짐 (윤활제)

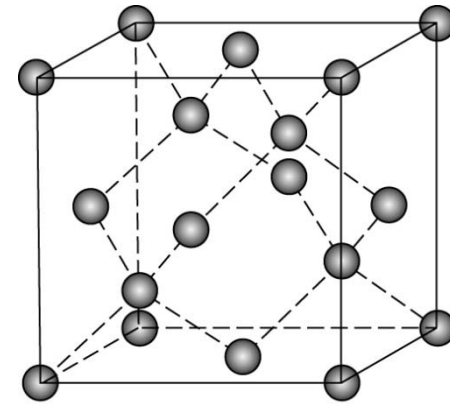


Fig. 3.16 Diamond의 unit cell.

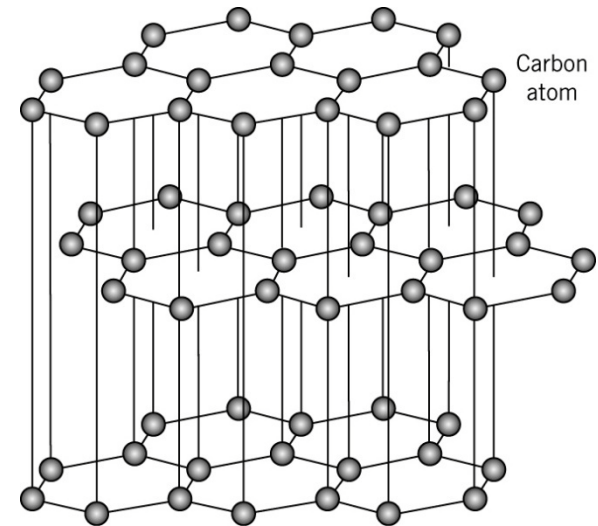


Fig. 3.17 흑연의 구조.

## Fullerenes

$C_{60}$  ~ 20개의 육각형과 12개의 오각형으로 구성된 구

1985년 발견, “bucky ball”

fullerenes: 이런 구형 구조를 총칭

## Carbon nanotubes (CNT, 탄소 나노튜브)

Tube 직경이 nm 크기 (<100nm)

재료 중에서 강도 가장 ↑

인장강도: 50 ~ 200 GPa

인장탄성률: 1 TPa 이상

- . Single-walled CNT (단일벽 CNT)
- . Multi-walled CNT (다중벽 CNT)

→ 탄소의 배향에 따라 전도성 및

반전도성 CNT가 있음(TV, 모니터, LCD 등의 분야에 적용 가능성이 큼).

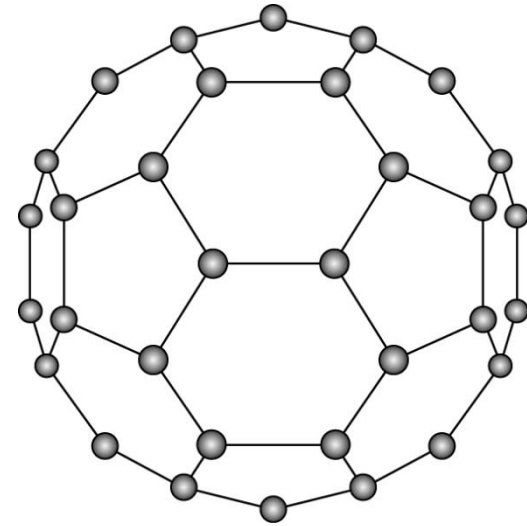


Fig. 3.18  $C_{60}$  (buckminsterfullerenes).

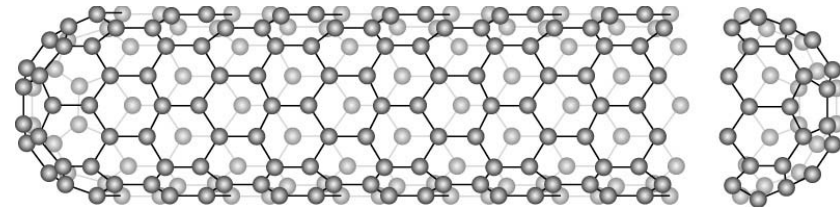


Fig. 3.19 Carbon nanotube의 구조.

## Crystal System (결정계)

: Unit cell geometry에 따라 분류

### Lattice parameters

각 변의 길이:  $a, b, c$

축 사이의 각도:  $\alpha, \beta, \gamma$

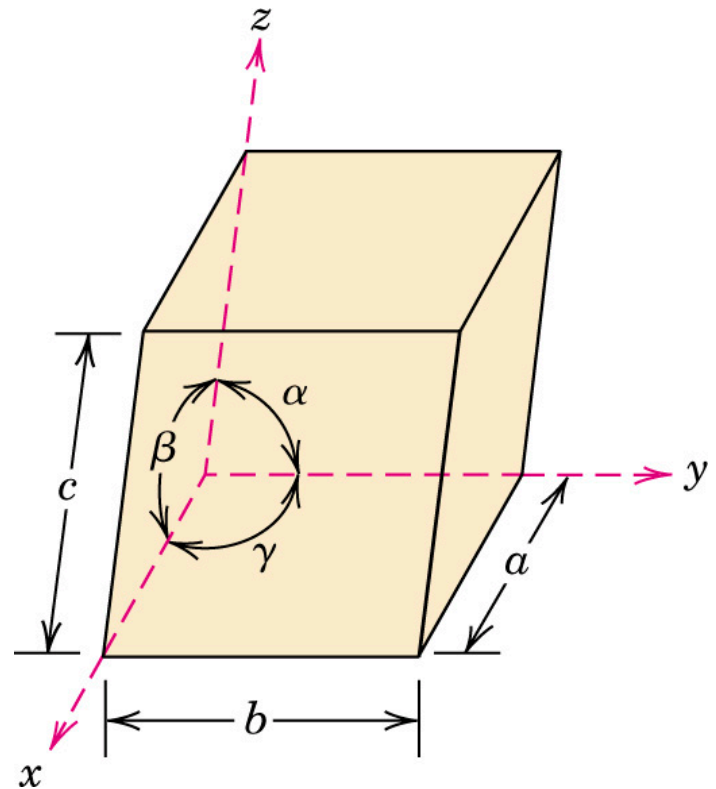
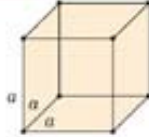
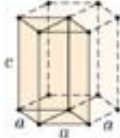
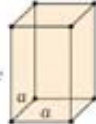
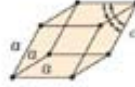
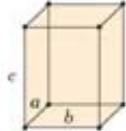
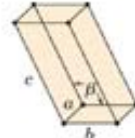
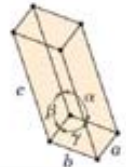


Fig. 3.20 Unit cell의 길이와 각에 대한 정의.

**Table 3.6** Lattice Parameter Relationships and Figures Showing Unit Cell Geometries for the Seven Crystal Systems

<i>Crystal System</i>	<i>Axial Relationships</i>	<i>Interaxial Angles</i>	<i>Unit Cell Geometry</i>
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Rhombohedral (Trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

(입방정계)

(육방정계)

(정방정계)

(삼방정계)

(사방정계)

(단사정계)

(삼사정계)

▶ VMSE  
▶ Crystal Systems/Unit Cells for Metals  
▶ Systems



## Crystallographic Directions (결정학적 방향)

“결정학적 방향” 표기법:

- i) 벡터의 시작점을 좌표축의 원점에 위치
- ii) x, y, z 축에 투영 길이를 a, b, c로 측정
- iii) 최소의 정수값이 되도록 곱하거나 나눔
- iv) 음수는 지수 위에  $\bar{\phantom{x}}$  (overbar)로 표기
- v) 수를 , 로 분리하지 않고 [ ] 속에 표기

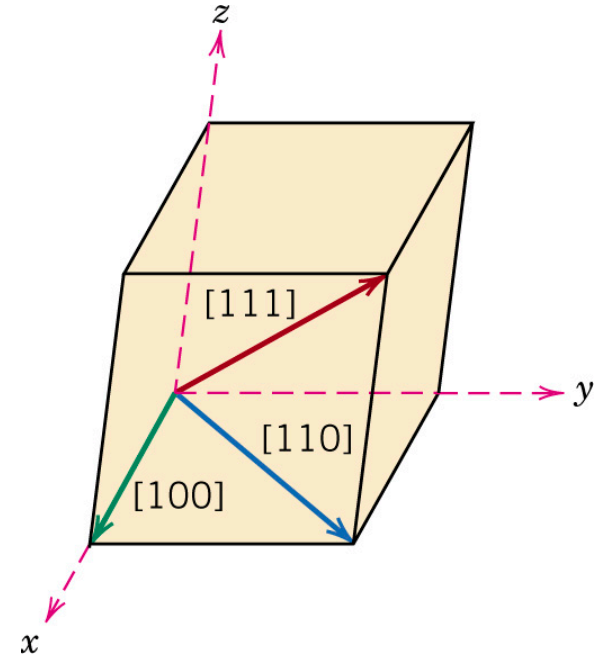
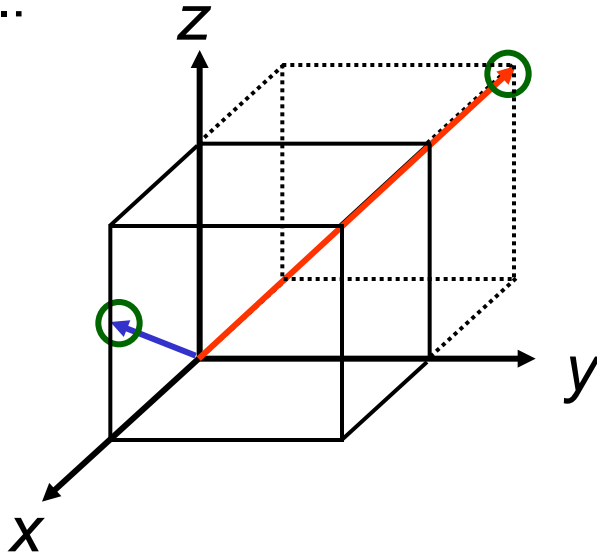


Fig. 3.22 Unit cell 내의  $[100]$ ,  $[110]$ ,  $[111]$  방향.

Ex.:



$$1) 1, 0, \frac{1}{2} \Rightarrow 2, 0, 1 \Rightarrow [201]$$

$$2) -1, 1, 1 \Rightarrow \bar{1}, 1, 1 \Rightarrow [\bar{1}11]$$

Cubic 결정계에서 다음은 등가임.

$[100], [\bar{1}00], [010], [0\bar{1}0], [001], [00\bar{1}] \rightarrow$  family는  $\langle \rangle$ 로 표기:  $\langle 100 \rangle$

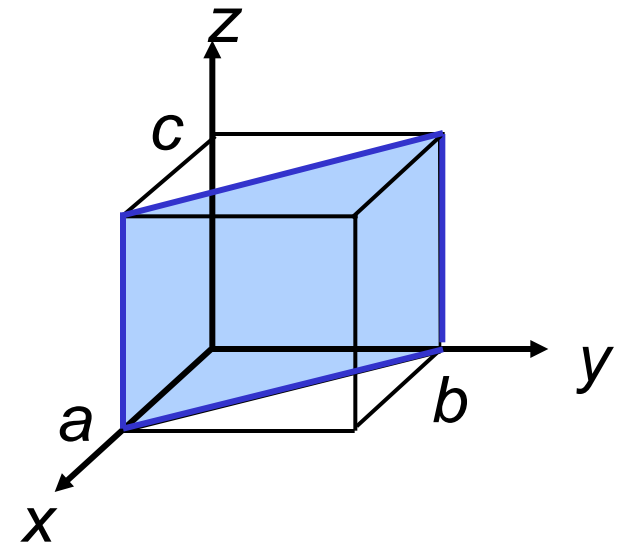
또한 cubic 결정계에서는 지수의 순서, 부호에 관계없이 같은 지수는 등가

ex)  $[123]$  &  $[\bar{2}1\bar{3}]$

## Crystallographic Planes (결정학적 면)

“결정학적 면” 표기법 (Miller index):

- i) 먼저 결정면이 원점을 지나면 **평행이동**
- ii) 각 축의 **절편**을 구한 다음 **역수**를 취함
- iii) **최소의 정수값**이 되도록 곱하거나 나눔
- iv) **음수**는 지수 위에  $-$  (overbar)로 표기
- v) 수를  $,$ 로 분리하지 않고  $( )$  속에 표기



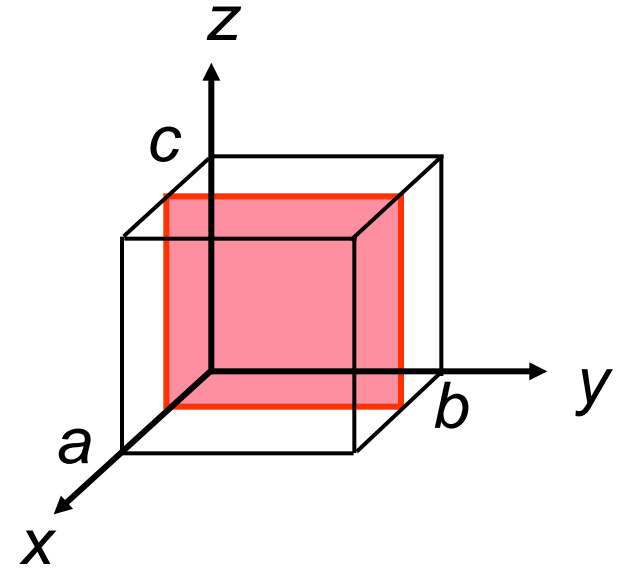
Ex.) 그림과 같은 결정면의 Miller 지수 ?

절편:  $1, 1, \infty \rightarrow$  역수:  $1/1, 1/1, 1/\infty \rightarrow$  최소 정수:  $1, 1, 0$

$\rightarrow \therefore$  Miller 지수:  $(110)$



<u>example</u>	$a$	$b$	$c$
1. Intercepts	$1/2$	$\infty$	$\infty$
2. Reciprocals	$1/1/2$	$1/\infty$	$1/\infty$
3. Reduction	2	0	0
4. Miller Indices	(100)		



Cubic 결정계에서 다음은 등가임.

$(100)$ ,  $(\bar{1}00)$ ,  $(010)$ ,  $(0\bar{1}0)$ ,  $(001)$ ,  $(00\bar{1}) \rightarrow$  family는 { }로 표기:  $\{100\}$

(Ex. 3.12) & (Ex. 3.13) --- 각자 풀어볼 것.

## Close-Packed Crystal Structures (조밀 결정구조)

### Metals

FCC & HCP:  $APF=0.74$

Close-packed plane stacking  
(조밀면 적층)

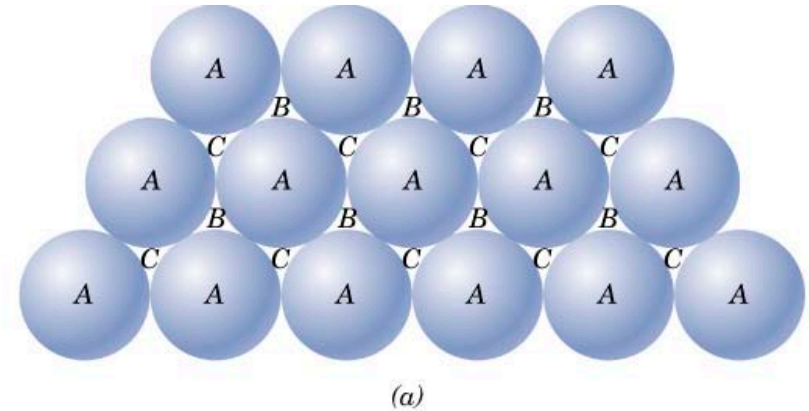
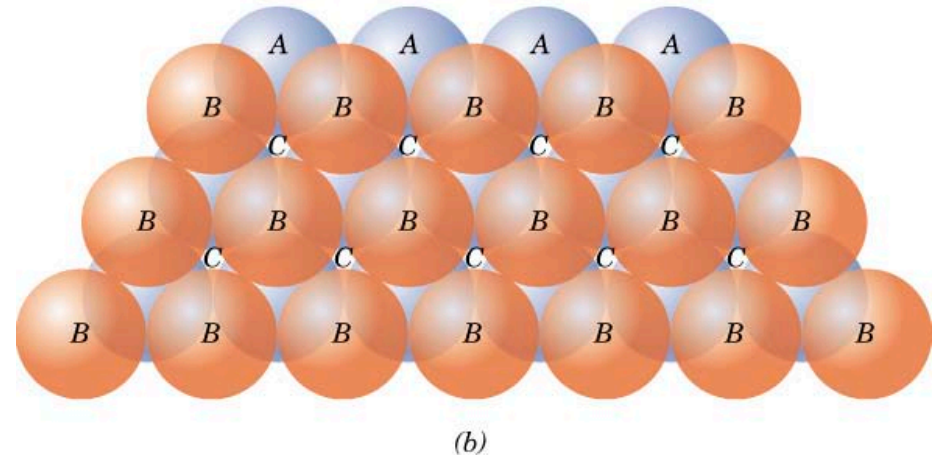


Fig. 3.29 조밀면 적층 순서:

(a) A층 위 적층 위치는 B or C

(b) B층 위 적층 위치는 A or C.



HCP 구조의 적층 순서:

ABABABAB...

(원자의 정렬이 매 2면마다 반복)

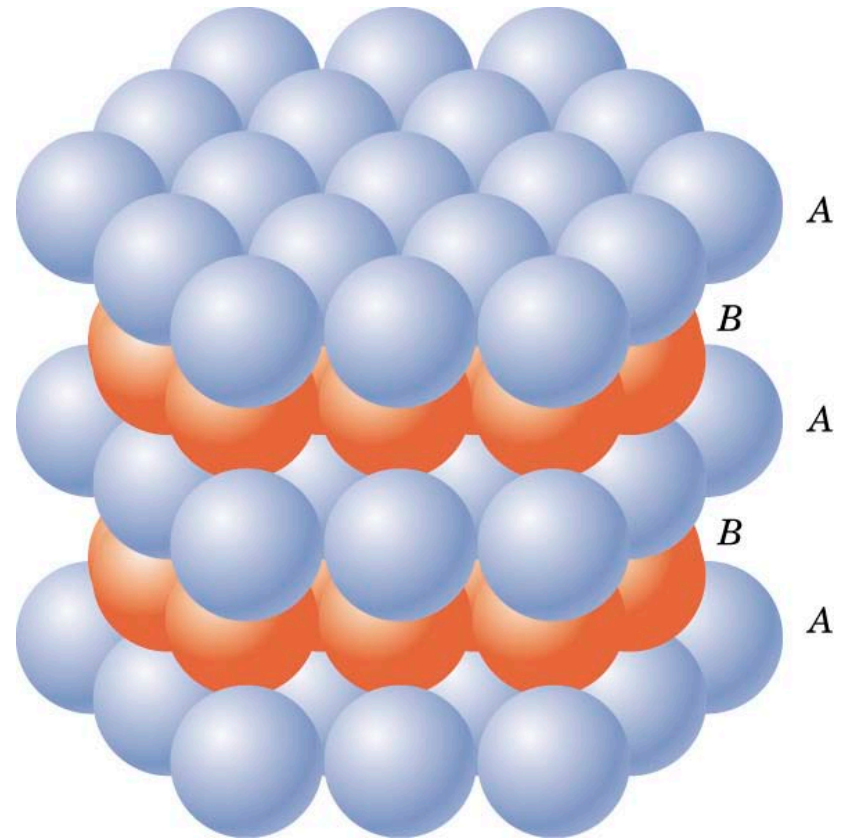


Fig. 3.30 HCP 결정구조의 적층 순서.

FCC 구조의 적층 순서: ABCABCABC...

(원자의 정렬이 매 3면마다 반복)

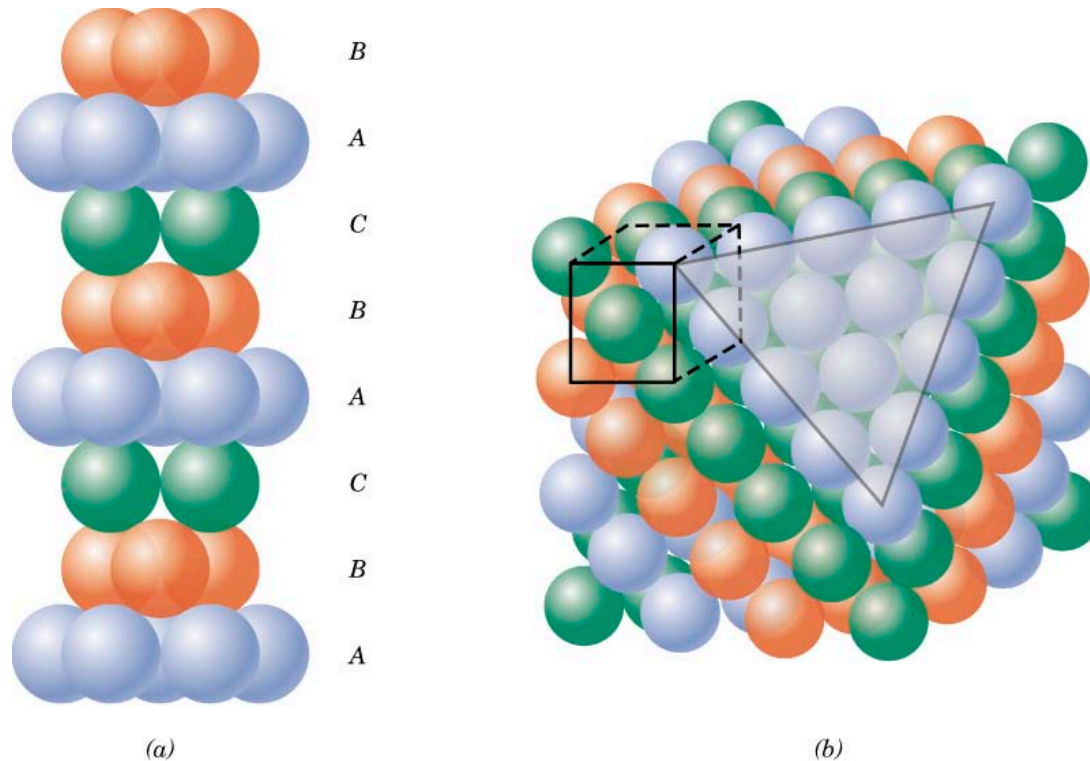


Fig. 3.31 (a) FCC 결정구조의 적층 순서, (b) FCC 구조와 조밀면 적층 사이의 관계 (꼭지점 자른 결정면은 Miller 지수 (111)임).

## Ceramics

조밀면을 큰 이온(anion)으로 구성시켜 적층  
작은 빈 공간(interstitial sites: 침입형 공간)에 cation을 위치시킴

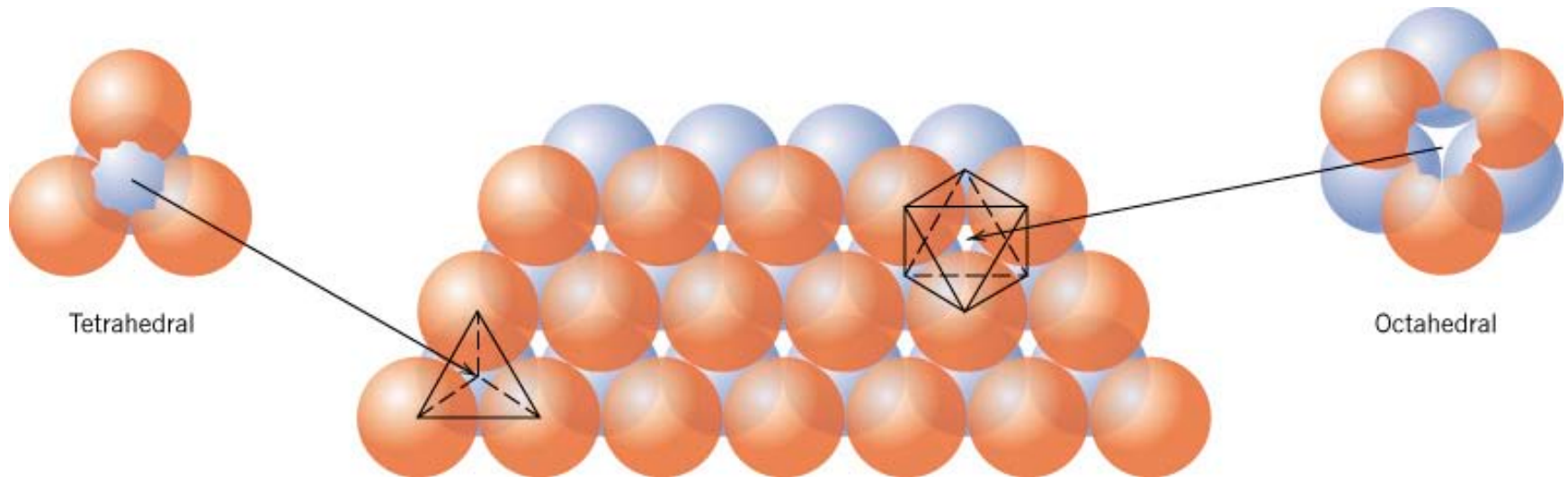


Fig. 3.32 Anion 구로 적층된 면 사이의 사면체 또는 팔면체 공간에 cation 구가 위치함.

사면체에 위치하는 cation의 배위수: 4

팔면체에 위치하는 cation의 배위수: 6

각 anion에 대해 1개의 팔면체 위치가 존재하고  
“ 2개의 사면체 위치가 존재함.

- 세라믹의 결정구조에 영향을 미치는 두 요소:
  - 1) 조밀면의 적층순서에 따라 FCC or HCP
  - 2) Interstitial site(침입형 공간)에 cation이 채워지는 방법

Ex.) 암염

Cubic symmetry이며 조밀 적층된 음이온이 {111}인 FCC 배열

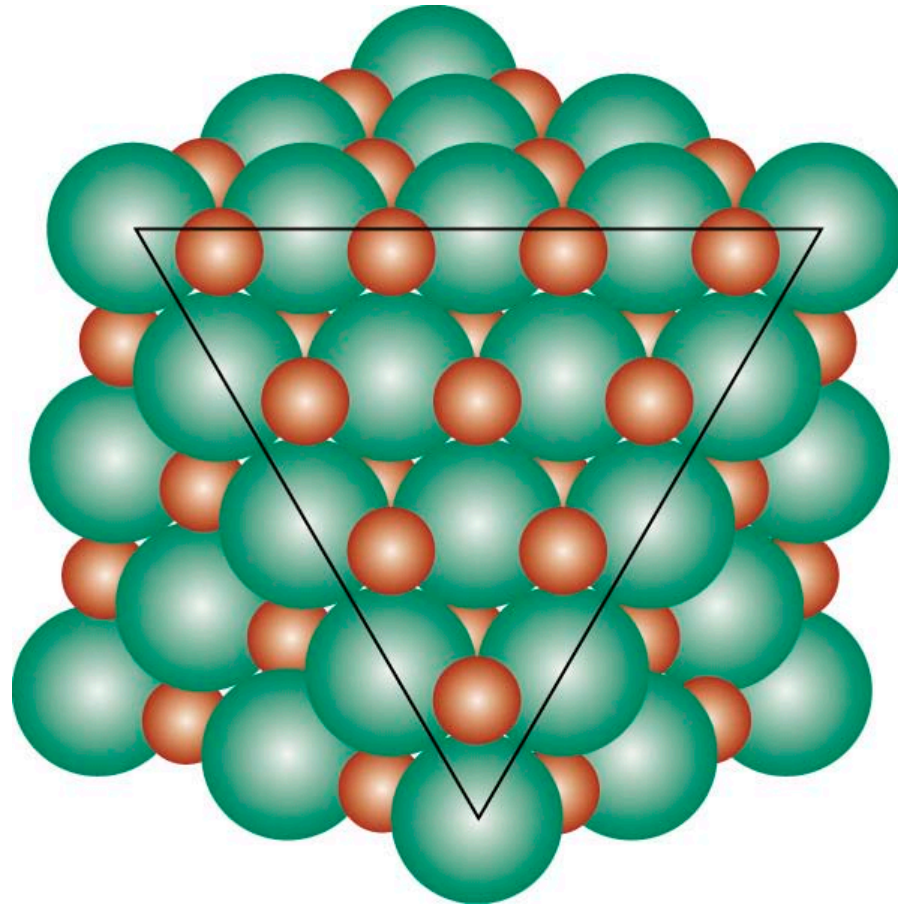


Fig. 3.33 꼭지점을 자른 암염(rock salt) 결정구조: cation이 interstitial octahedral position에 존재  
(Cl<sup>-</sup> 1개당 Na<sup>+</sup> 1개가 팔면체 위치에 존재 → 양이온:음이온=1:1).

## Single Crystals (단결정)

- : 결정고체에서 원자의 주기적, 반복적 배열이 재료전체에 걸쳐 완전하거나 방해받지 않고 이루어진 결정체
- 반도체 재료에서 중요



Fig. 3.34 중국 복건성에서 발견된 석류석 단결정 사진.



## Polycrystalline Materials (다결정 재료)

대부분의 결정질 고체 – many small crystals (grains: 결정립)의 집합체

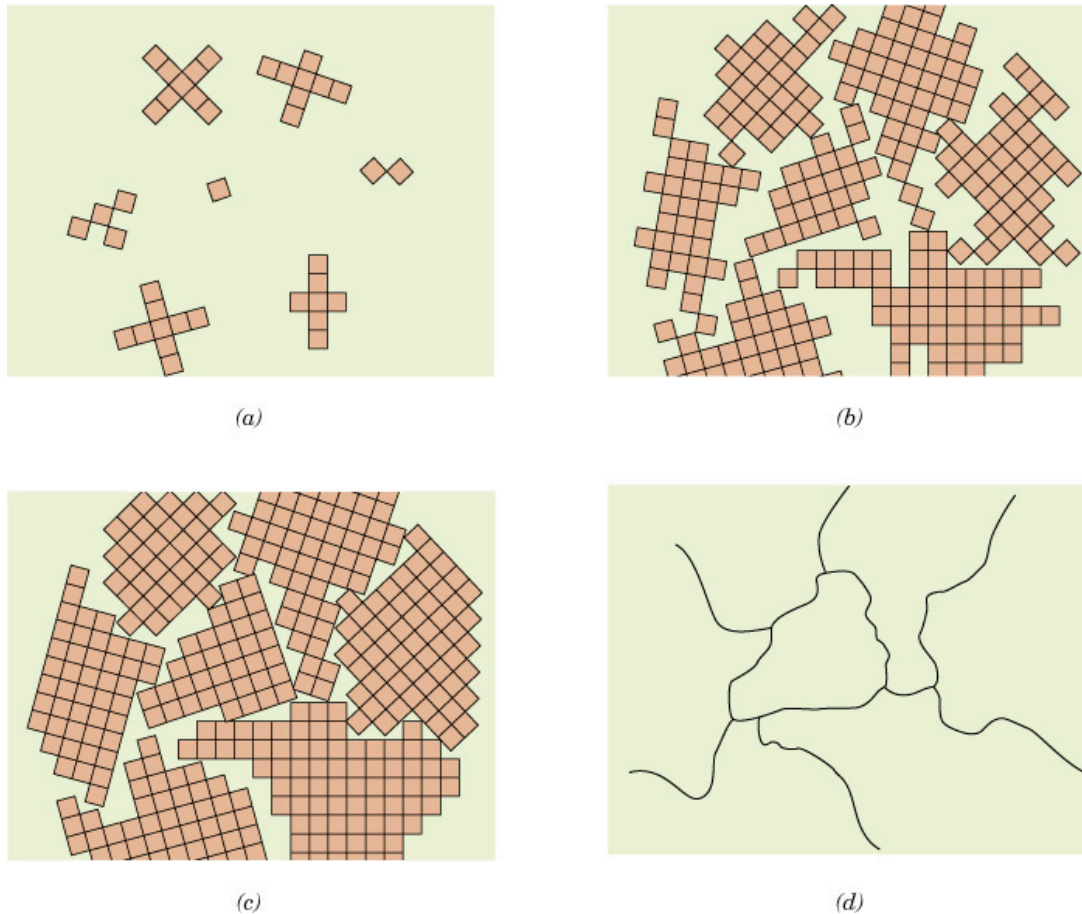


Fig. 3.35 다결정질 재료의 응고 과정: (a) 결정핵 생성, (b) 성장, (c) 완료, (d) 현미경 관찰시 보여지는 grain boundaries).

## Anisotropy (이방성)

→ 물성이 방향에 따라 다른 것

**Table 3.7** Modulus of Elasticity Values for Several Metals at Various Crystallographic Orientations

<i>Metal</i>	<i>Modulus of Elasticity (GPa)</i>		
	<i>[100]</i>	<i>[110]</i>	<i>[111]</i>
Aluminum	63.7	72.6	76.1
Copper	66.7	130.3	191.1
Iron	125.0	210.5	272.7
Tungsten	384.6	384.6	384.6

cf.) 등방성(isotropy): 방향에 관계없이 물성이 일정

결정 대칭성↓ → 이방성↑ (즉, triclinic 구조가 이방성 큼)

각 grain은 이방성이라도 grain aggregate은 등방성을 보임.

## Noncrystalline Solids

↙ 비결정질 or 비정질, 무정형 (**amorphous**)

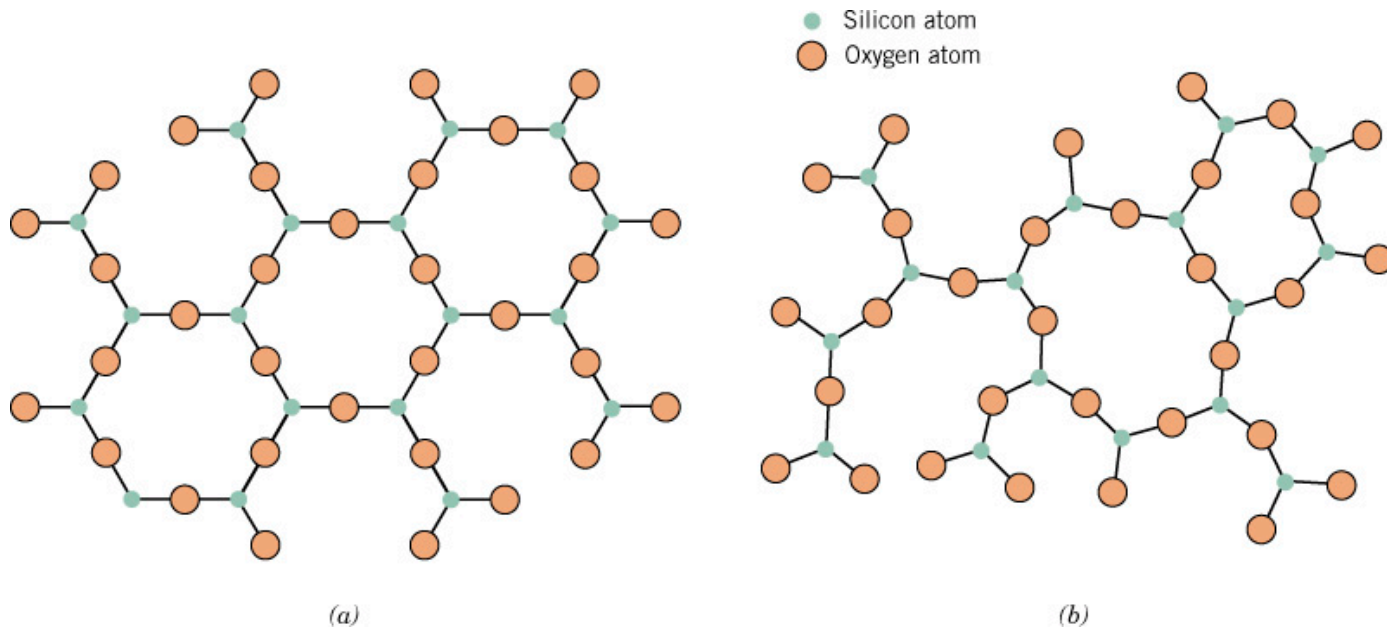


Fig. 3.40 Silica의 이차원 구조: (a) 결정질 SiO<sub>2</sub>, (b) 비결정질 SiO<sub>2</sub>.

- 액상에서 응고시 급냉은 비정질 고체로 만들게 함.

## Silica glasses

→ 비정질 silica로 만든 유리

$\text{SiO}_2$  ~ Network former (형성제)

$\text{CaO}$  or  $\text{Na}_2\text{O}$  ~ Network modifier  
(변형제: network 특성 개조)

$\text{TiO}_2$  or  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ~ Intermediate  
(중간제: Si와 치환, network 안정화)

변형제와 중간제는 유리의 녹는점 및  
점도를 낮추어 가공을 용이하게 함

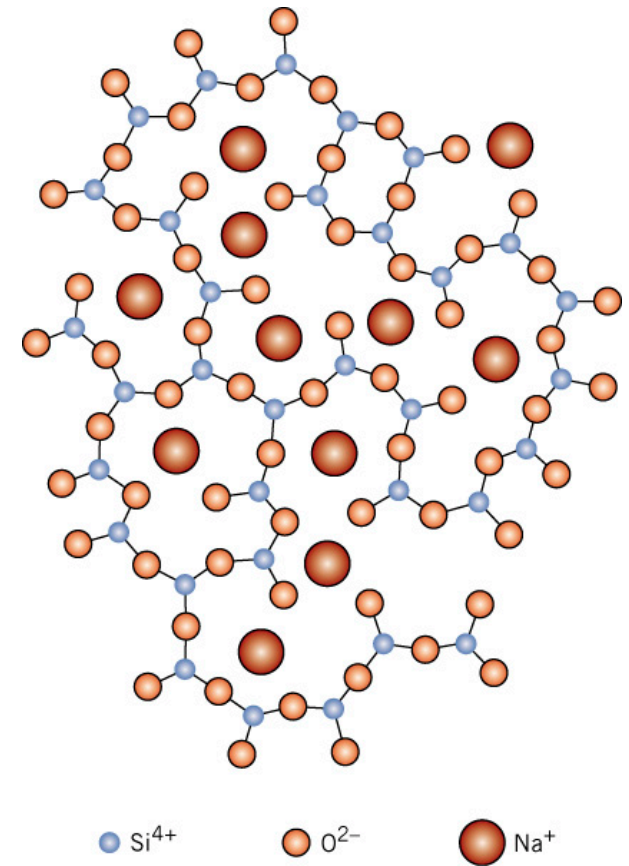


Fig. 3.41 Sodium-silicate glass  
에서의 이온 위치 개략도.