3장. 금속재료의 기계적 성질과 소성가공

A. 금속재료의 기계적 성질

① 인장강도

② 경도

③ 인성

④ 피로강도

B. 금속재료의 변형

① 미끄럼변형

② 쌍정에 의한 변형

C. 소성가공과 기계적 성질

① 소성가공

② 가공경화와 어닐링

3-B. 금속재료의 변형

➢ 금속의 기계적 성질 (소성 변형)과 관련된 질문들

✓ 왜 금속은 다른 재료에 비해 잘 늘어나는 것 일까?

✓ 왜 금속은 부러지는 대신 구부러질까?

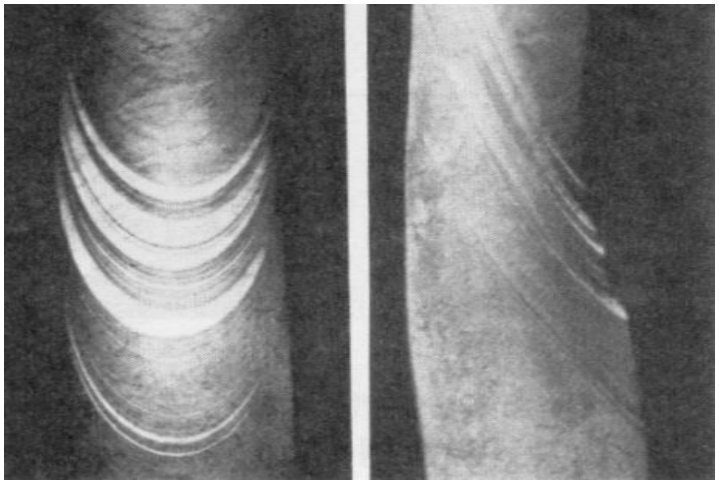
✓ 금속에 변형이 일어날 때 원자 배열에 어떤 일이 발생하는 것 일까?

3-B-①. 미끄럼 변형

✓ 금속 —(인장력)→ 변형(늘어남)

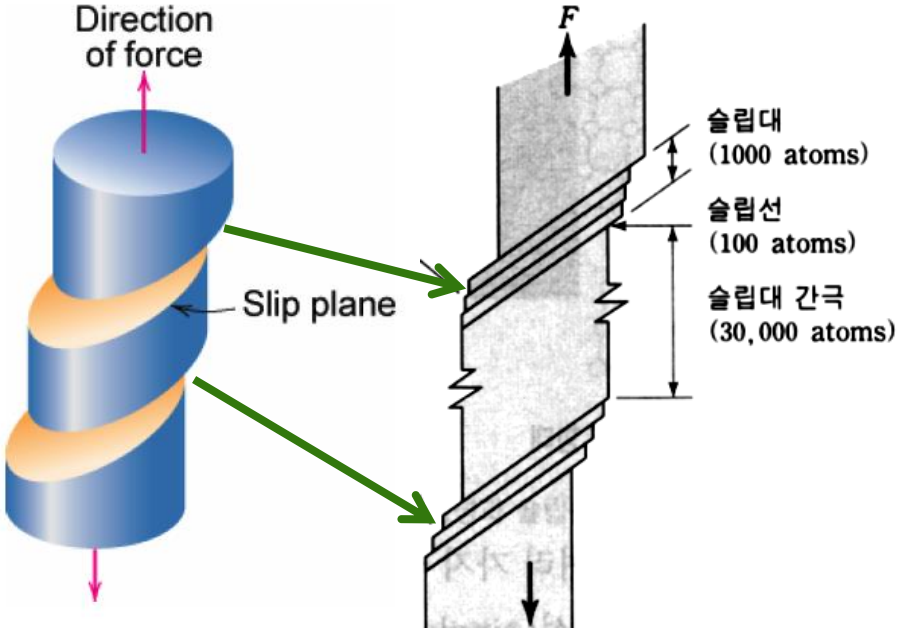
➢ 미끄럼 변형 (Slip Deformation)

- ✓ 금속 결정에 외력(인장력)을 가할 때, 결정의 특정 면이 미끄럼을 일으켜 생기는 변형
- ✓ **미끄럼선**– 미끄럼 변형 시 관찰되는 표면의 미세한 선
- ✓ **미끄럼면**– 미끄럼 변형 시 미끄럼이 일어나는 단결정의 특정 면



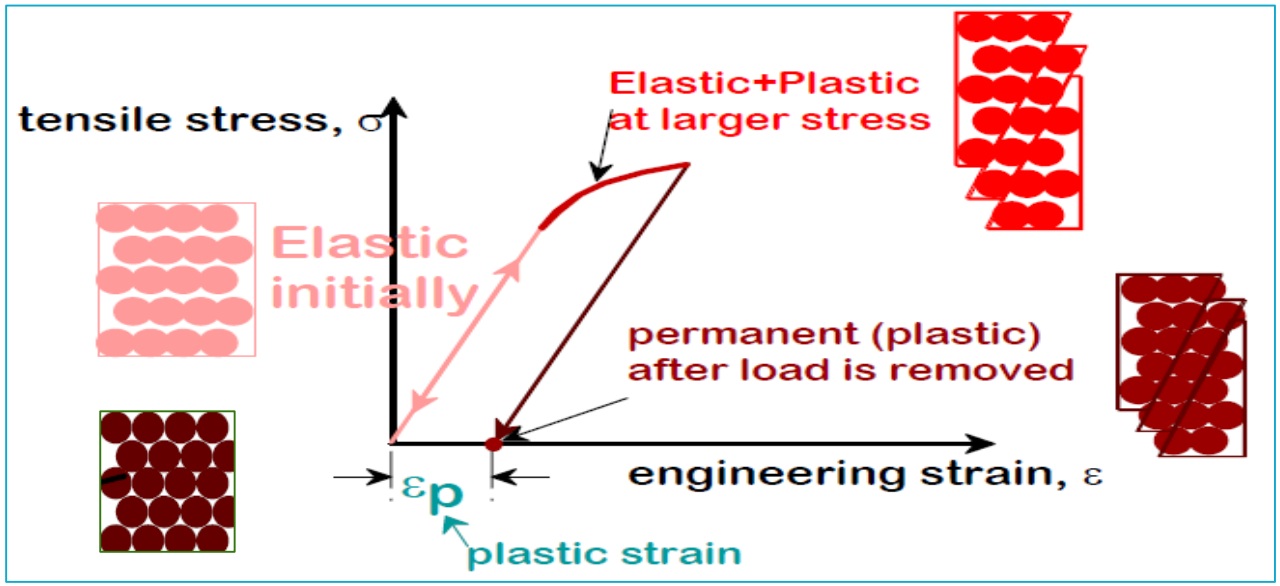
정면 측면

Zn 단결정 미끄럼 변형 (HCP)



3-B-①. 미끄럼 변형

- 원자의 결정구조와 미끄럼면 & 미끄럼방향
  - ✓ 미끄럼이 잘 일어나는 결정 면, 결정 방향, 결정구조(bcc, fcc, hcp)가 있을까?
- 미끄럼이 특정 결정면과 특정 결정방향으로 잘 일어난다!



3-B-①. 미끄럼면 변형

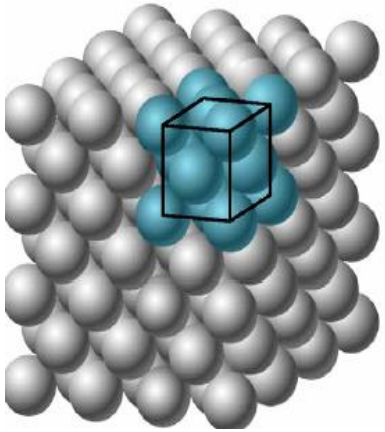
➢ 미끄럼면 – 미끄럼이 잘 일어나는 결정면

- ✓ 원자가 가장 조밀한 결정면 – 조밀하고 부드러운 면
- ✓ 격자 저항이나 마찰이 작다
- ✓ 임계전단응력이 작다

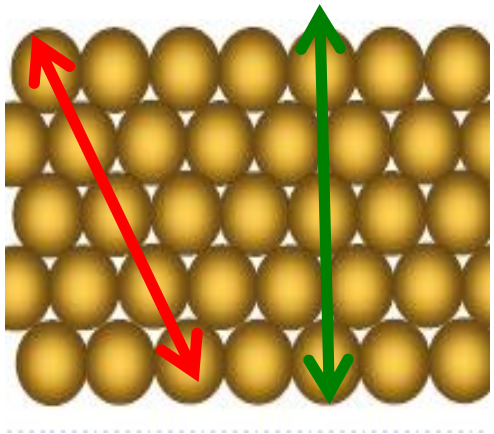
➢ 미끄럼방향 – 미끄럼이 잘 일어나는 결정방향

- ✓ 원자가 조밀하게 배열된 방향
- ✓ 단위 길이당 전위에너지 낮다

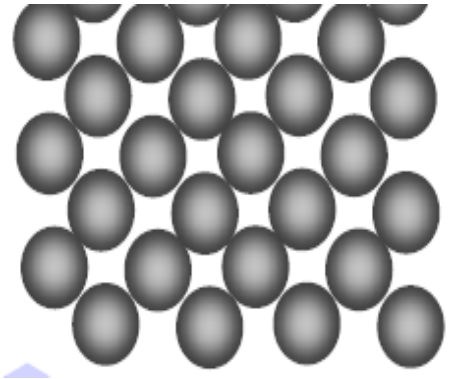
✓ FCC 결정 구조



✓(111)면

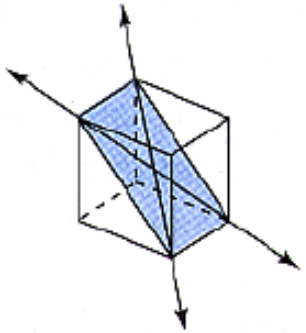
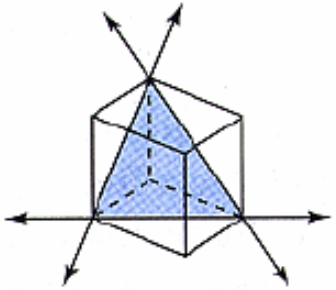
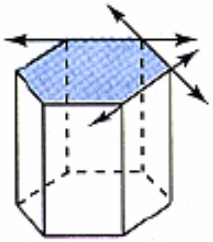


✓(100)면



3-B-①. 미끄럼계

➢ 미끄럼계 – 미끄럼면 & 미끄럼방향 으로 이루어진 한 쌍

Crystal structure	Slip plane	Slip direction	Number of slip systems	Unit cell geometry	Examples
bcc	{110}	$<\bar{1}11>$	$6 \times 2 = 12$		α-Fe, Mo, W
fcc	{111}	$<1\bar{1}0>$	$4 \times 3 = 12$		Al, Cu, γ-Fe, Ni
hcp	(0001)	$<\bar{2}0>$	$1 \times 3 = 3$		Cd, Mg, α-Ti, Zn

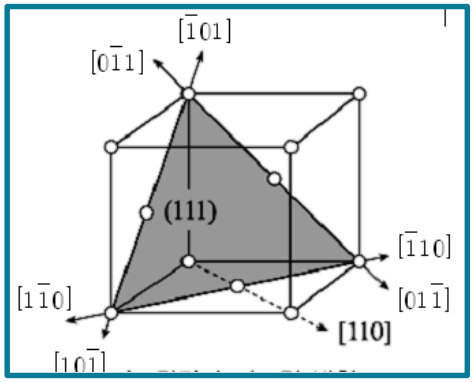
3-B-①. 미끄럼계

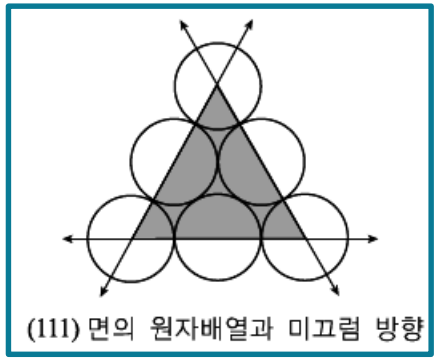
➢ FCC 구조

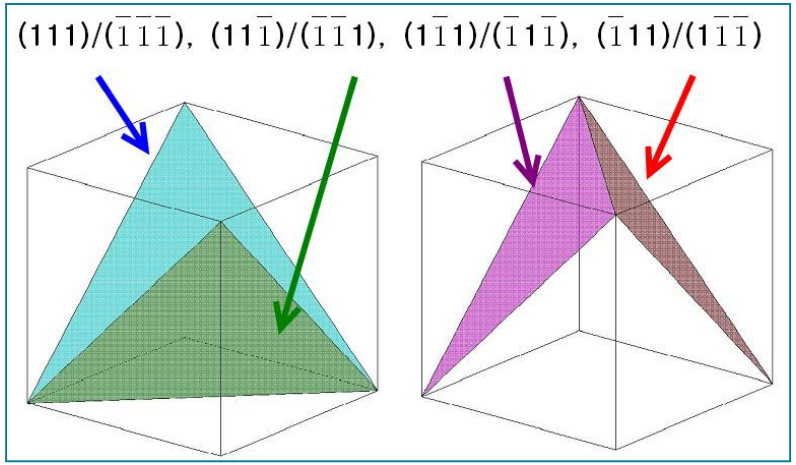
- ✓ 미끄럼면 : (111)면
- ✓ 미끄럼방향: $[\bar{1}01]$ /$[10\bar{1}]$ 방향, $[\bar{1}10]$ /$[1\bar{1}0]$ 방향, $[0\bar{1}1]$/ $[01\bar{1}]$ 방향

➢ FCC 구조의 미끄럼계 총 개수:

- ✓ 미끄럼면 4개 – {111} 밀러면족
- ✓ 미끄럼 방향 3방향 – $<1\bar{1}0>$ 밀러방향족
- ✓ 총 미끄럼계 개수 = 미끄럼면 4개 × 미끄럼방향 3개 = 12개



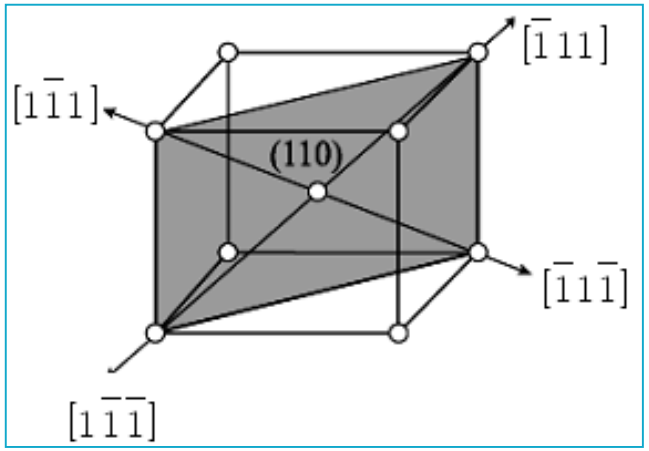

(111) 면의 원자배열과 미끄럼 방향

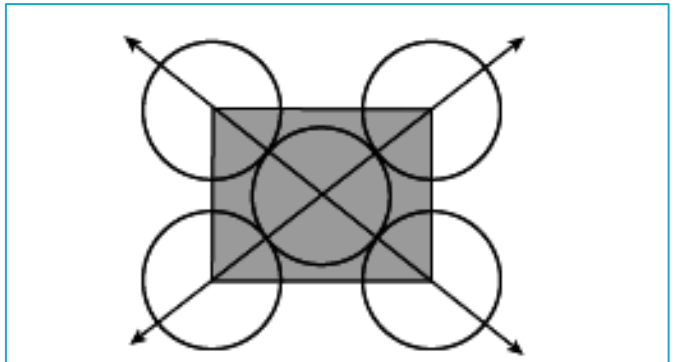


3-B-①. 미끄럼계

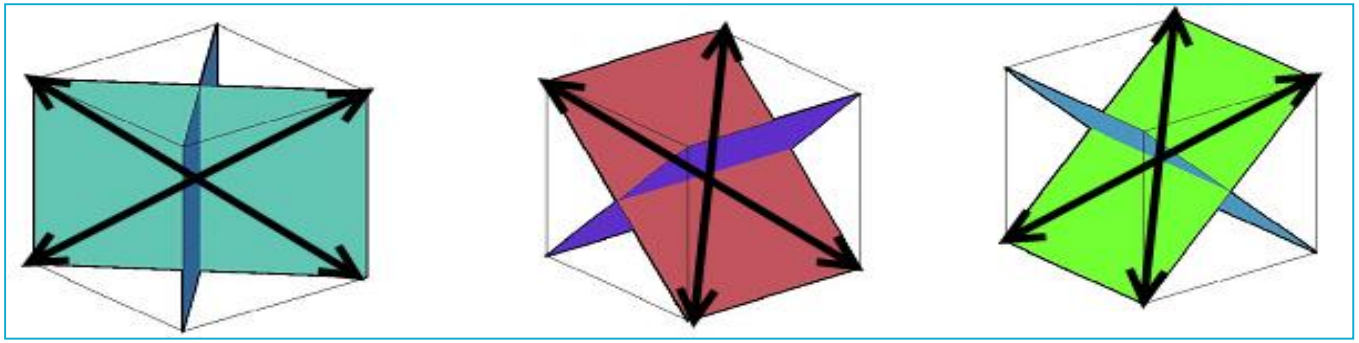
➢ BCC 구조의 미끄럼계 총 개수:

- ✓ 미끄럼면 6개 – {110} 면족
- ✓ 미끄럼 방향 2방향 – $\langle \bar{1}11 \rangle$ 방향족
- ✓ 총 미끄럼계 개수 = 미끄럼면 6개 × 미끄럼방향 2개 = 12개





(110) 면의 원자배열과 미끄럼 방향

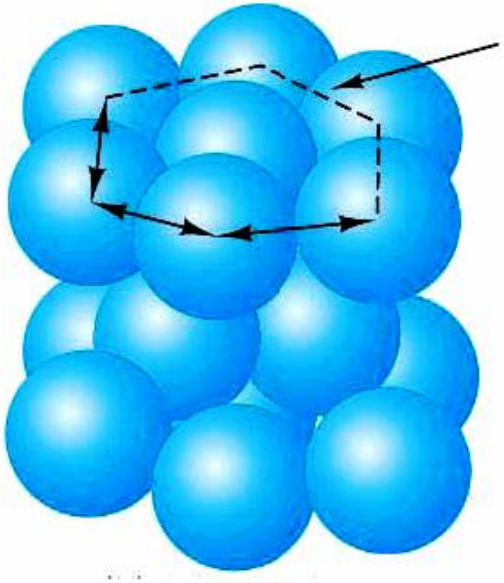


3-B-①. 미끄럼계

➢ HCP 구조의 미끄럼계 총 개수:

- ✓ 미끄럼면 1개 – (0001)면
- ✓ 미끄럼 방향 3방향 – $[11\bar{2}0]$, $[1\bar{2}10]$, $[\bar{2}110]$ $\langle 11\bar{2}0\rangle$ 방향족
- ✓ 총 미끄럼계 개수

= {0001}면 & $\langle 11\bar{2}0\rangle$방향, 총 1개면×3방향 = 3개



$(0001)\langle 11\bar{2}0\rangle =$

$(0001)[11\bar{2}0]$ $(0001)[1\bar{2}10]$ $(0001)[\bar{2}110]$

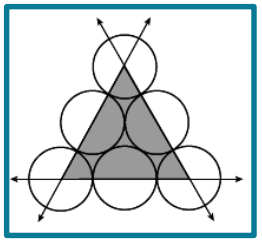
{0001}<1120>

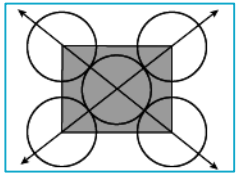
1 x 3 = 3 slip systems

3-B-①. 미끄럼계

➢ 결정 구조와 소성변형

✓ 연성 ∝ 미끄럼계의 개수, 미끄럼면의 면밀도





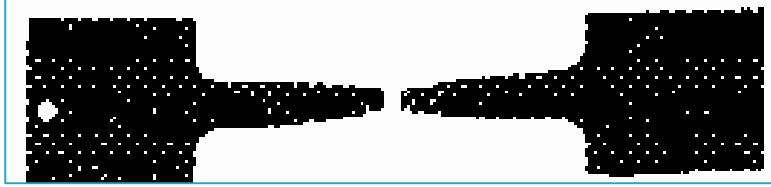
➢ FCC, BCC, HCP 결정의 소성변형 특성

✓ FCC : 잘 늘어남 (결정 내에 조밀한 면/방향이 많이 존재)

✓ BCC : 저온에서 잘 늘어나지 않음

✓ HCP : 잘 부러짐 (미끄럼면 1개/ 방향 3개 밖에 없음)

Mg (HCP)



Al (FCC)

3-B-①. 임계전단응력

➢ 전단응력

- ✓ 미끄럼 방향으로 단위 면적당 작용하는 힘 τ
- ✓ 미끄럼방향으로 작용하는 힘: $F_{//} = F\cos\lambda$
- ✓ 미끄럼면의 면적 A′ : $A'\cos\phi = A$

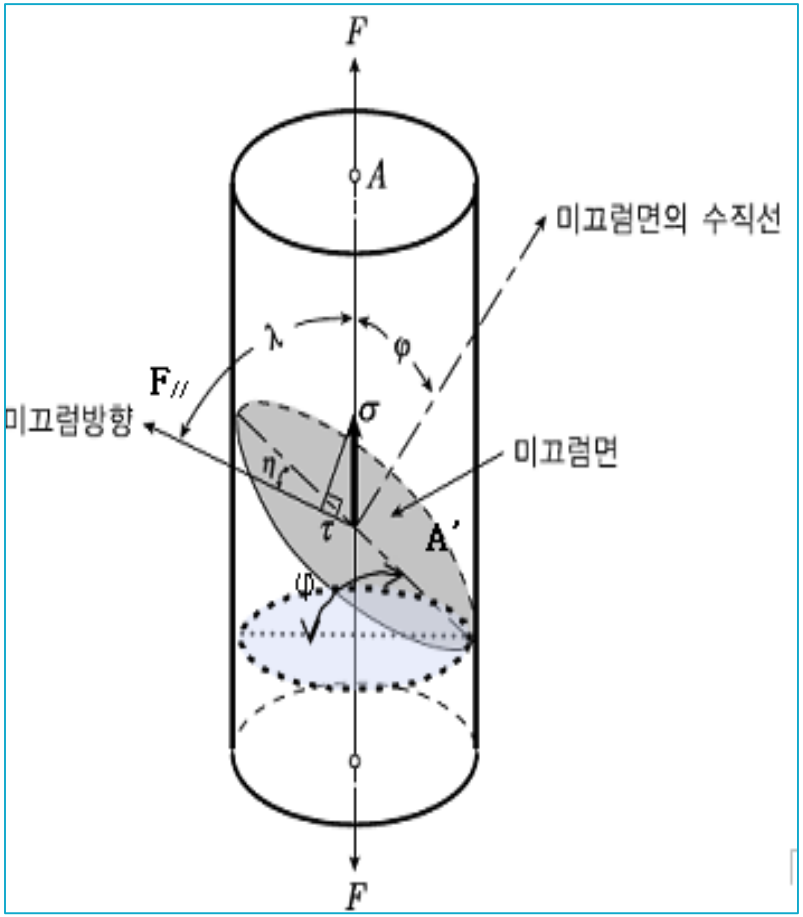
$$A' = \frac{A}{\cos\phi}$$

- ✓ 전단응력 τ :

$$\tau = \frac{F_{//}}{A'} = \frac{F\cos\lambda}{\frac{A}{\cos\phi}}$$

$$= \frac{F}{A}\cos\phi\cos\lambda$$

$$= \sigma\cos\phi\cos\lambda$$



➢ 임계전단응력 τ_c

- ✓ 미끄럼면이 미끄러지는데 필요한 최소 전단응력
- ✓ 미끄럼 변형 가능조건 : $\tau > \tau_c$

3-B-①. 임계전단응력

✓ 예) 금속의 임계전단응력 τ_c

표 5-1 각 결정구조의 슬립계와 임계전단응력

결정재료	결정구조	불순물 [%]	슬 립 면	슬립방향	임계전단응력 [MPa]
Al	FCC	0.006	{111}	<110>	0.8
Cu		0.02			0.5
Ag		0.001			0.4
Fe	BCC	0.18	{110}	<111>	16.7
Mo					71.5
Nb					33.3
Mg	HCP	0.05	{0001}	—	0.4~0.5
Co		0.001		<1120>	6.4~6.9

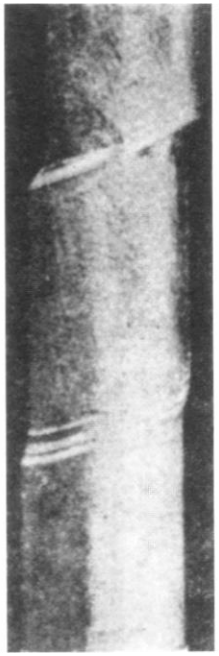
3-B-①. 다결정체의 미끄럼변형

➢ 다결정체의 미끄럼변형 :

- ✓ 미끄럼면과 방향이 결정립에 따라 다름
- ✓ 전단응력이 결정립에 따라 다름
- ✓ 결정립 결정방향에 따라 미끄럼이 힘든 방향의 결정립은 더 큰 힘이 가해져야 미끄럼변형이 일어남
- ✓ 다결정체가 일반적으로 단결정체보다 강함

✓ 다결정체

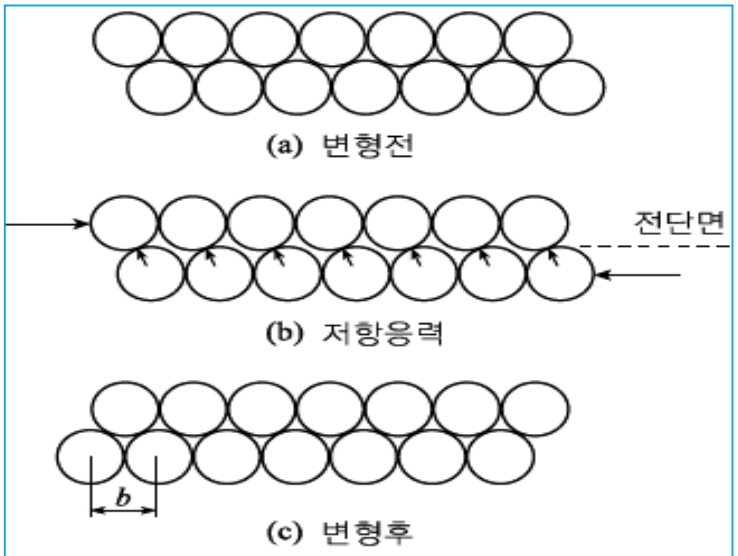
✓단결정체



3-B-①. 임계전단응력

➢ **임계전단응력의 계산값과 실측값 비교 결과**

- ✓ 계산값의 가정 – 미끄럼 변형이 일어날 때, 특정 원자면의 상하 원자들이 동시에 미끄러진다
- ✓ 결과 – 계산값 >> 실측값
- ✓ 오차해석 – 원자가 미끄러지는 메커니즘이 가정과 다르다



[그림 3-18] 미끄럼에 의한 변형의 설명도

금속명	계산값(MPa)	실측값(MPa)
Ag	4500	0.92
Cu	6400	1.00
Mg	3000	0.83
Zn	4800	0.94

➢ **미끄럼 변형이 일어날 때, 원자 이동의 기구(메커니즘)는 무엇인가 ??**

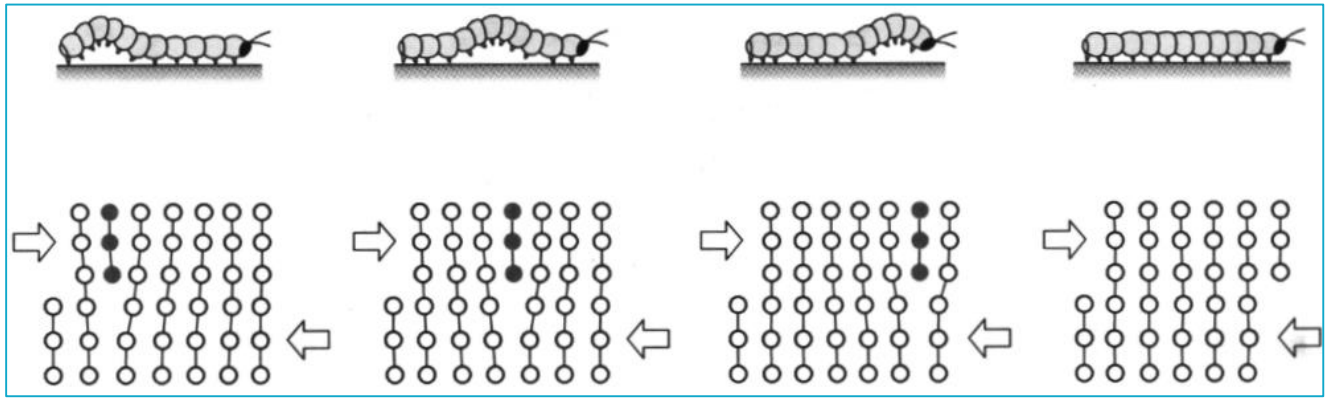
3-B-①. 전위와 미끄럼 변형

➢ 미끄럼 변형이 일어나는 기구

- ✓ 전위(칼날 전위, 나사 전위)의 움직임이 결정면 사이에 미끄럼을 유발함
- ✓ 외력 → 전위운동 → 미끄럼발생 → 소성변형

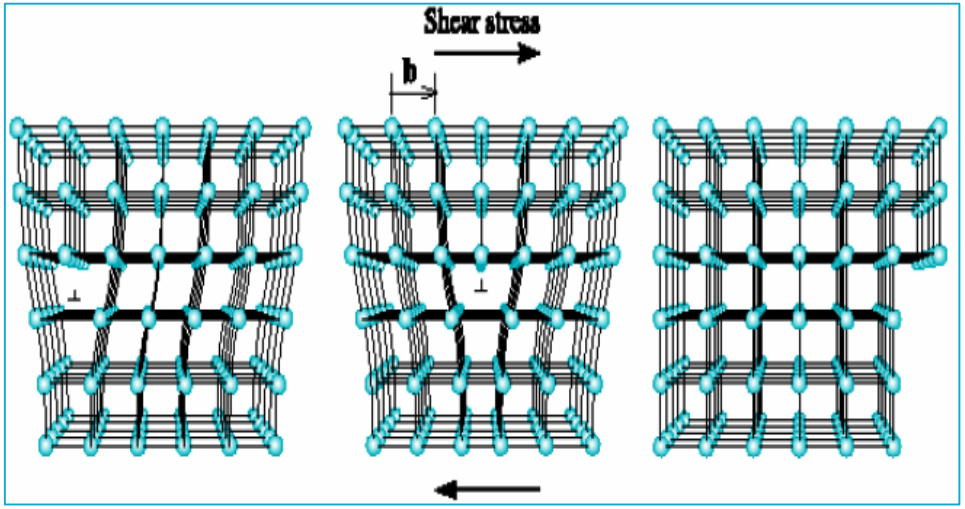
➢ 전위운동의 기구

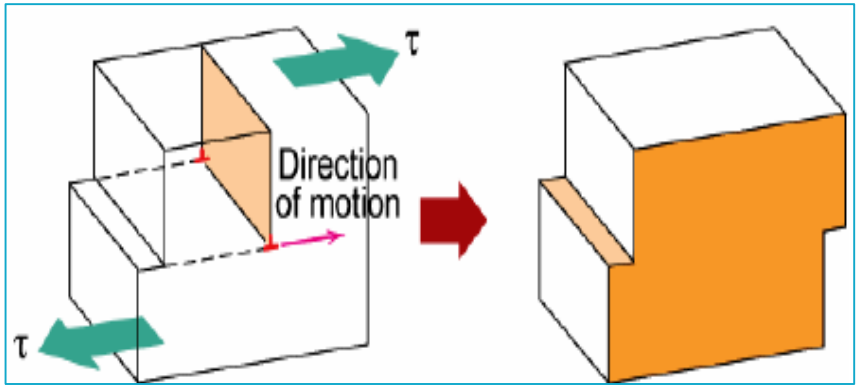
- ✓ 지렁이의 연동운동과 유사 :
  - ❖ 원자 일부가 부분적으로 조금씩 움직임
  - ❖ 미끄럼면의 상하 원자층이 동시에 움직이는 것 아님
- ✓ 전위를 원자거리만큼 이동시키므로 적은 힘으로 운동이 가능
- ✓ 임계전단응력의 작은 실측값을 설명한다

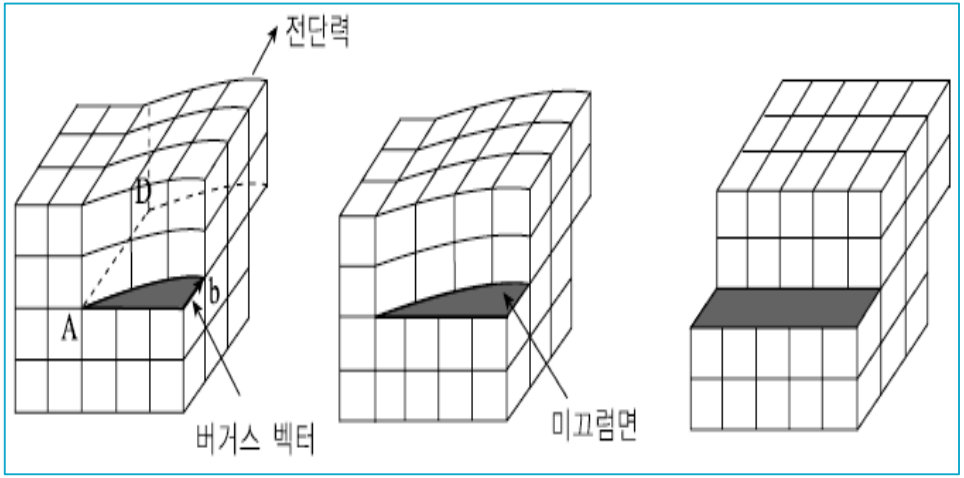


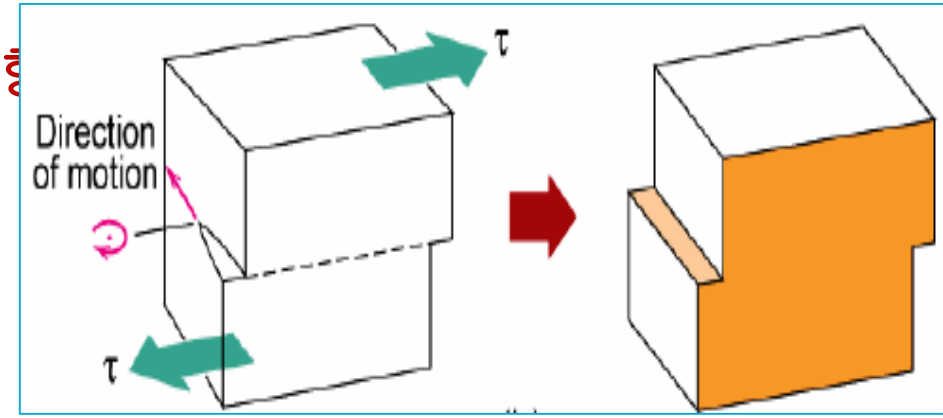
3-B-①. 전위와 미끄럼 변형

➢ 칼날 전위 운동에 의한 미끄럼 변형









3-B-①. 전위와 미끄럼 변형

➢ 전위 운동과 미끄럼계

- ✓ 전위의 운동성은 모든 결정면과 방향에서 같지 않다.
- ✓ 전위가 보다 쉽게 움직이는 결정면 (미끄럼면)과 결정방향 (미끄럼방향)이 있다.

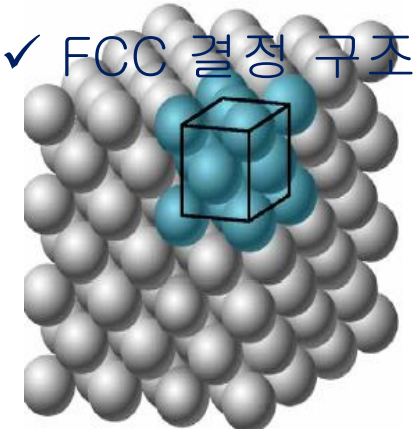
➢ 미끄럼면

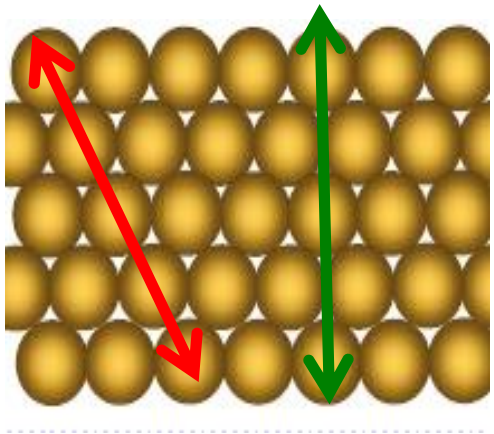
- ✓ 원자가 가장 조밀한 결정면 – 전위 운동의 격자 저항이나 마찰이 작다

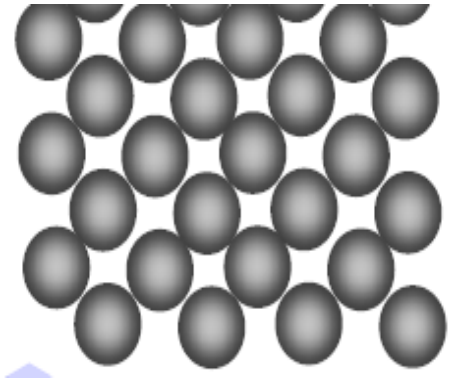
➢ 미끄럼방향

- ✓ 원자가 조밀하게 배열된 방향 – 단위 길이당 전위에너지 낮다

✓ FCC 결정 구조



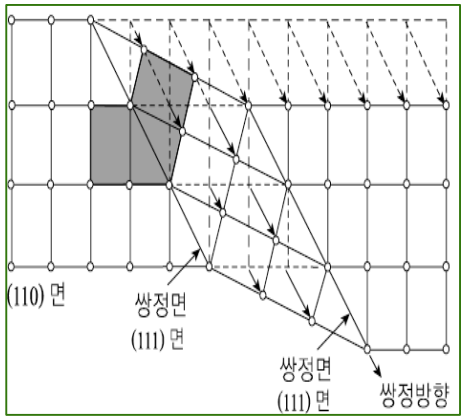


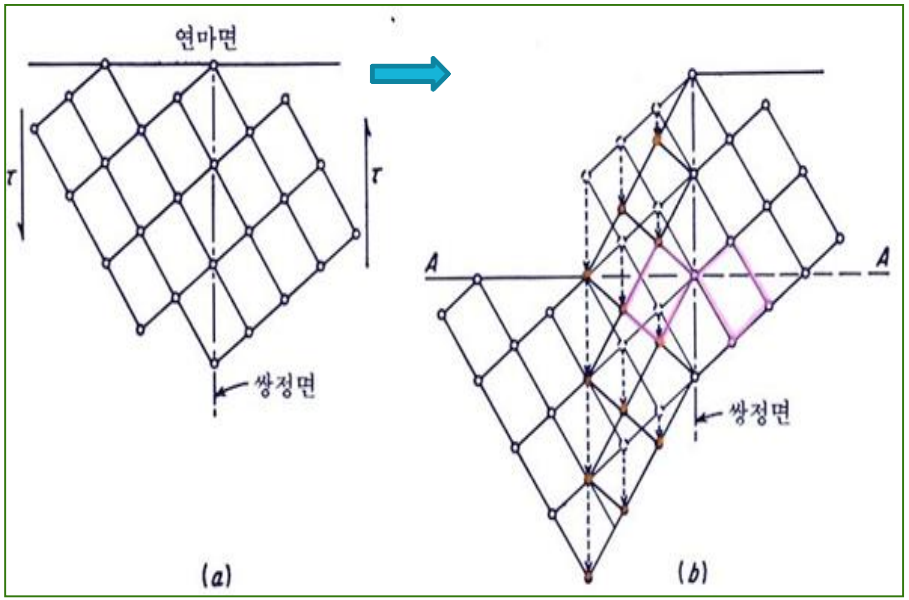


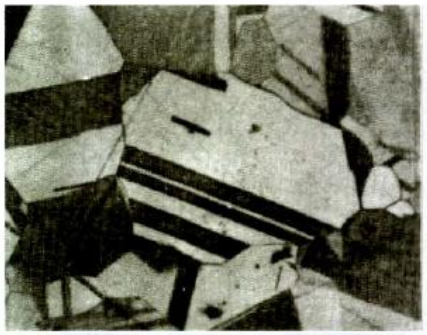
3-B-②. 쌍정에 의한 변형

➢ 쌍정 변형

- ✓ 쌍정이란 – 특정 변형면 (쌍정면)을 경계로 처음 결정과 거울대칭 관계에 있는 원자배열을 갖는 결정부분
- ✓ 쌍정면 (쌍정경계)이란 – 쌍정에서 나타나는 경계
- ✓ 변형 시에 원자들이 원자간 거리보다 짧게 움직인다
- ✓ 변형 후 결정 방향이 바뀐다
- ✓ 결정 방향의 차이를 이용하여 에칭을 통해 부식면을 관찰할 수 있다





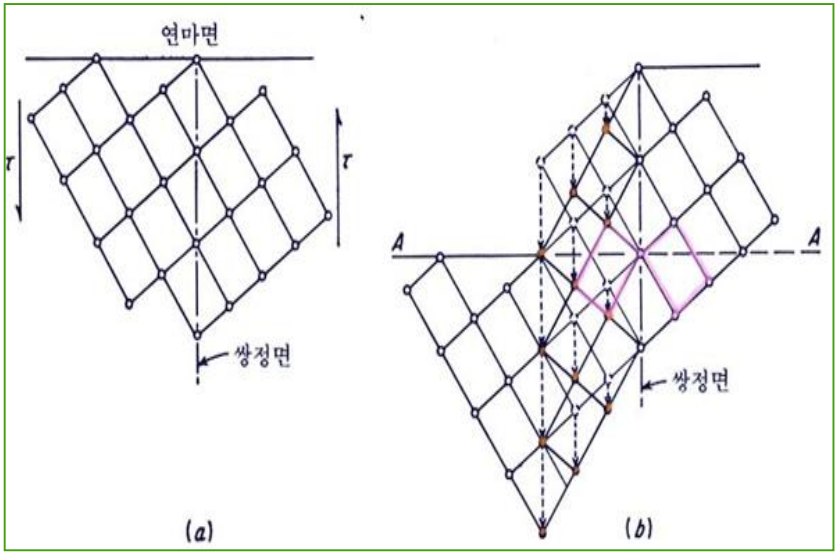


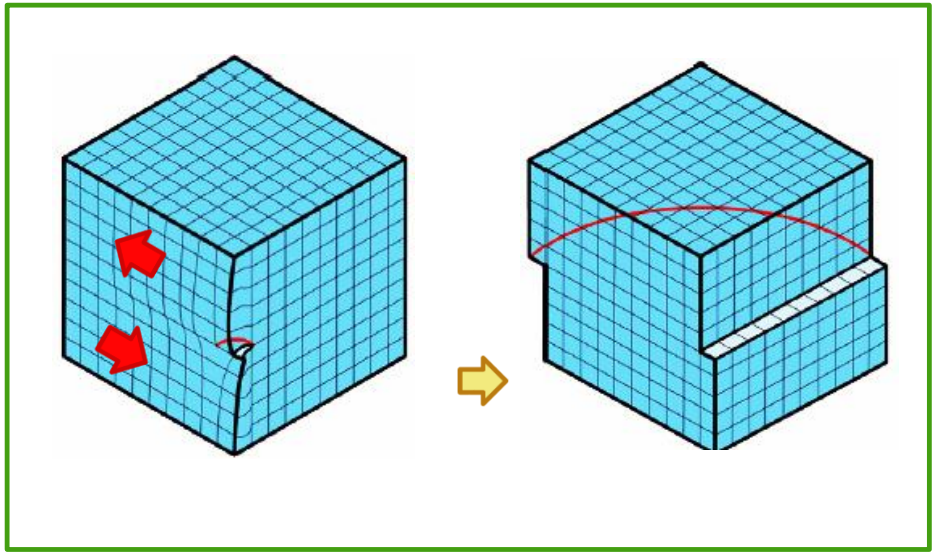
Twins within a grain of Brass

3-B-②. 미끄럼 변형 & 쌍정에 의한 변형

➢ 금속의 소성변형 기구 : 미끄럼변형 & 쌍정변형 의 차이점

쌍정 변형	슬립 변형
- 쌍정변형 전후의 결정방위가 변화	- 슬립 전후의 결정방위 동일
- 원자의 이동거리가 한 원자간거리 이하	- 원자간 거리의 정수배만큼 슬립이 발생(슬립 변형률 큼)
- 쌍정 중의 모든 원자면이 변형에 참여	- 슬립면에서만 발생
- 수 μsec내에 생성	- 슬립띠 형성에 수 msec 시간 소요

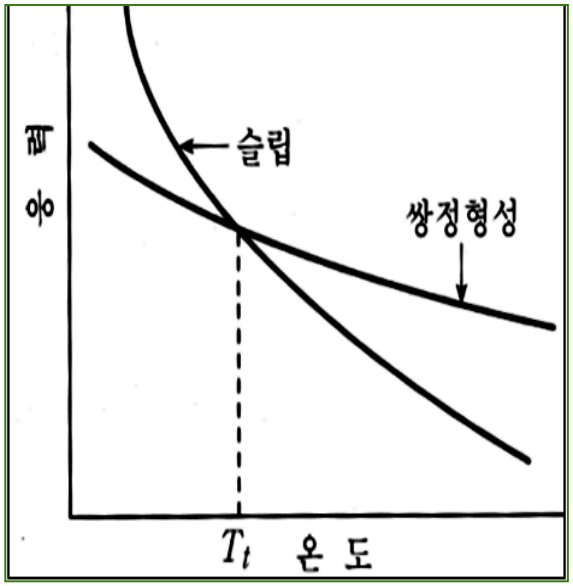




3-B-②. 미끄럼 변형 & 쌍정에 의한 변형

➢ 금속의 소성변형 기구 : 미끄럼변형 & 쌍정변형 의 차이점

- ✓ 대부분의 온도 : 주로 미끄럼에 의한 변형 ($\tau_{미끄럼} << \tau_{쌍정}$)
- ✓ $\tau_{쌍정}$: 온도에 따라 크게 변화하지 않는다
- ✓ $\tau_{미끄럼}$: 온도가 저하하면 크게 증가한다
- ✓ 매우 낮은 온도 : 쌍정에 의한 변형 ($\tau_{쌍정} < \tau_{미끄럼}$): 예 – Mg (hcp)
- ✓ ($\tau_{쌍정} < \tau_{미끄럼}$)인 환경에서 쌍정 형성이 미끄럼변형을 촉진시킬 수 있다. 즉, 쌍정이 형성되면 재료면의 결정방향이 변하면서 더 많은 미끄럼을 유도.



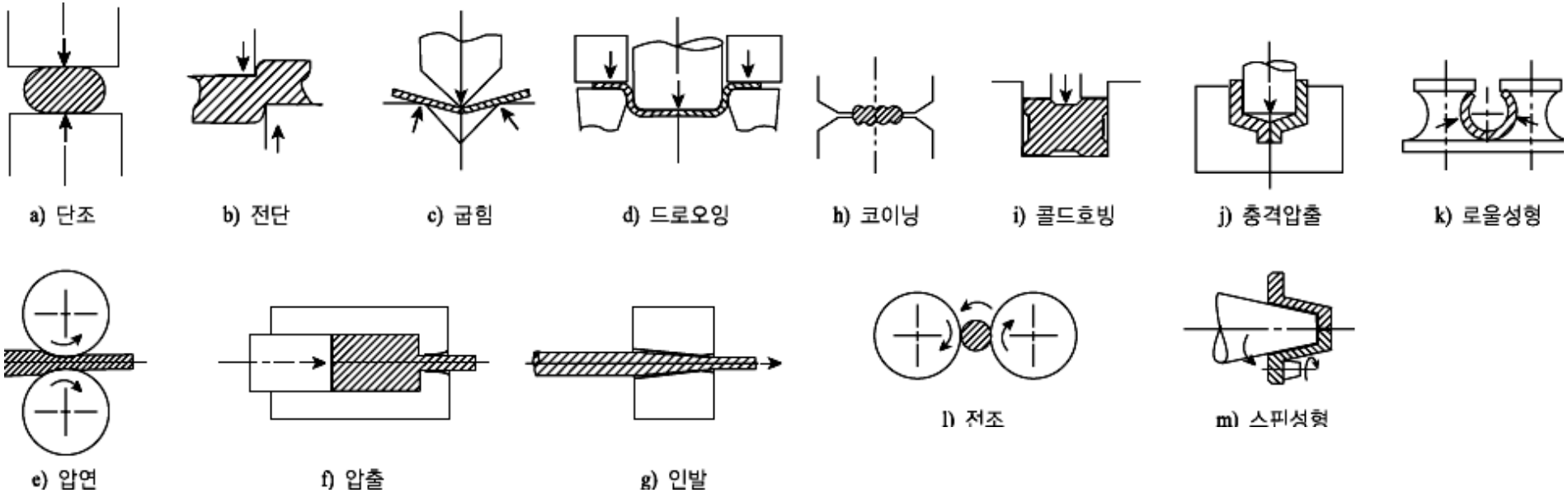
3-C-①. 소성가공

- ✓ 소성변형이 큰 금속재료에 외력을 가해 원하는 행태로 변형시키는 기계 가공법
- ✓ 비교- 그 외 기계 가공법 : 주조, 용접, 절삭 등.

➢ 장점

- ✓ 정밀하고 균일한 제품을 높은 생산율로 제조(원하는 모양 얻음)
- ✓ 재료의 강도를 높여 기계적 성질을 개선할 수 있다

➢ 소성가공의 예



3-C-②. 가공경화

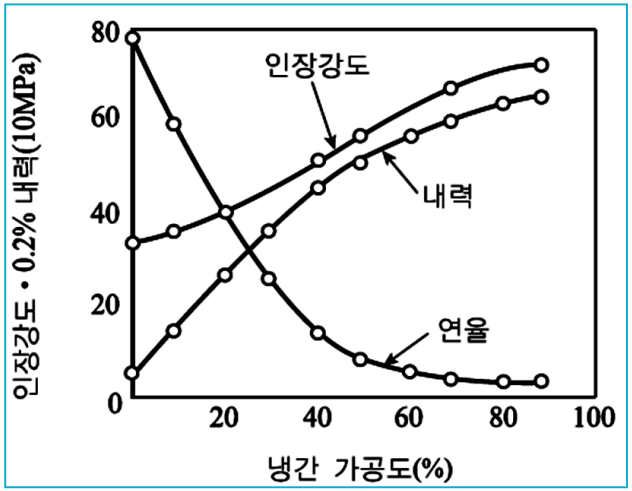
➢ 가공경화 란?

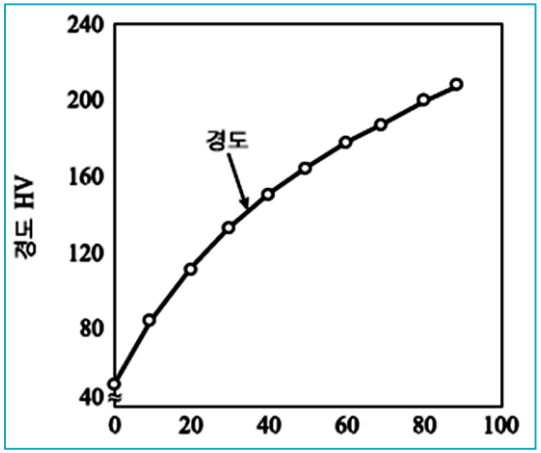
- ✓ **소성 가공에서 가공도가 증가할수록 재료의 강도가 증가되는 현상**
- ✓ 가공도 증가 → 인장 강도, 항복응력, 경도 증가
- ✓ 가공도 증가 → 연신율 감소!
- ✓ **가공할수록 가공이 힘들어진다!**
- ✓ 가공도 : 재료가 원래 형상에 대하여 변형된 비율.

  예) 단면감소율 – 압연, 압출, 인발 가공

$$\frac{A_o - A_1}{A_o} \times 100\ \%$$

- ✓ 예) 7/3 황동(Cu와 Zn의 합금)의 가공도에 따른 기계적 성질의 변화





3-C-②. 어닐링

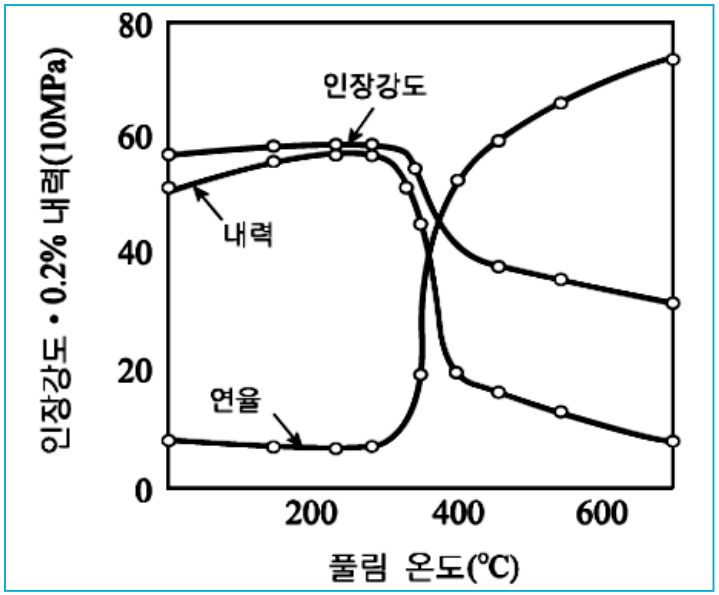
➢ 어닐링 (풀림 annealing) 이란?

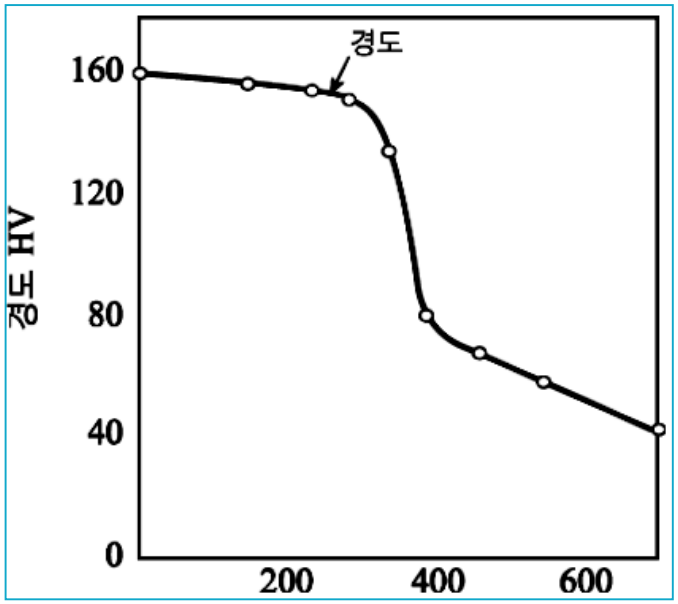
- ✓ 소성가공 후 경화된 재료의 기계적 성질이 가공 전 상태로 되돌아오도록 하는 열처리
- ✓ 어닐링 후 → 인장 강도, 항복응력, 경도 감소
- ✓ 어닐링 후 → 연신율 증가

재료가 가공하기 쉬워진다 (재료의 연화)

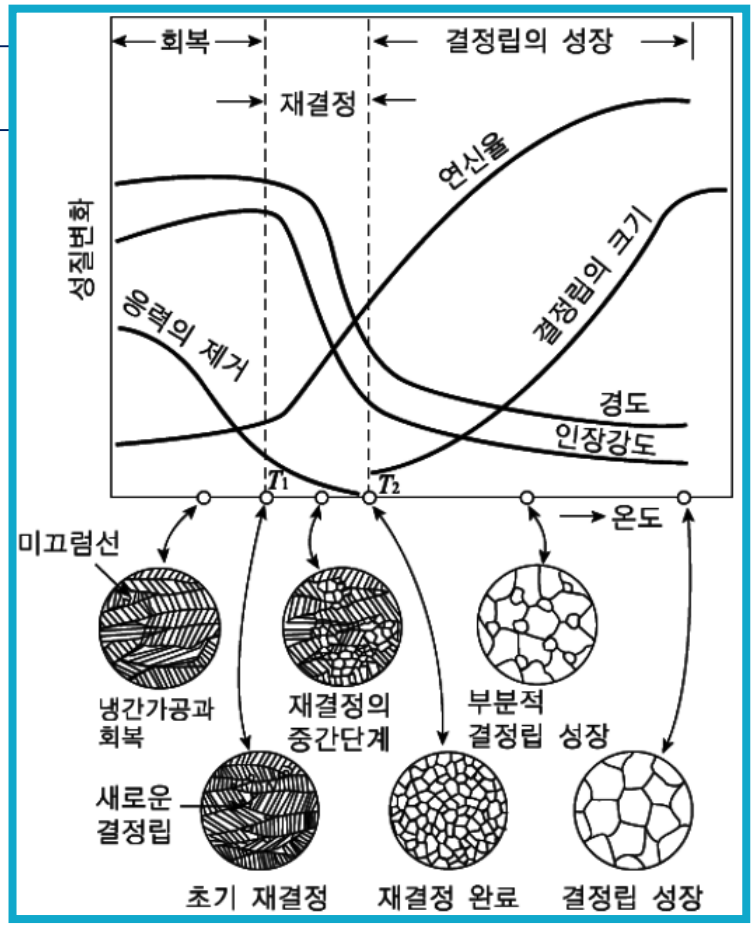
예) 50% 가공한 7/3 황동의 어닐링에 의한 기계적 성질 변화

- ✓ 재료의 연화 : 300°C 근처에서 급격한 변화





3-C-②. 어닐링에 의한 재료의 연화



① **회복 단계** (상온 ~T_1 온도 영역)

- ✓ 기계적 성질의 변화는 거의 없다.
- ✓ 내부 응력이 낮아짐 (열에너지로 결함 밀도가 낮아지는 등의 이유로)
- ✓ 전기저항 같은 물리적 성질이 가공 전 상태로 돌아오고 있음.

② **재결정 단계** (T_1 ~ T_2 온도 영역)

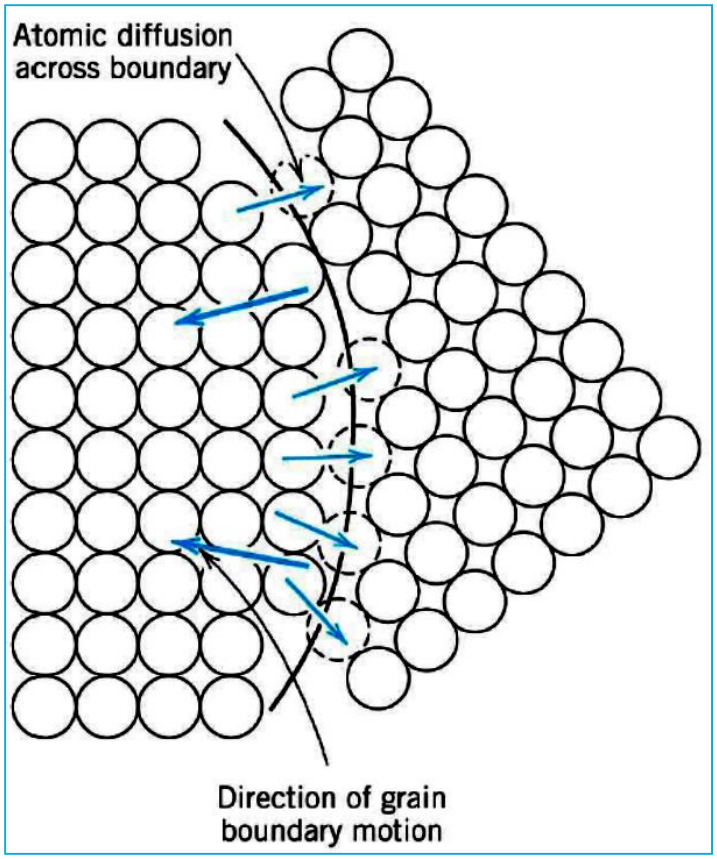
- ✓ 재료의 기계적 성질이 크게 변화함 (강도 감소, 연신율 증가)
- ✓ 변형된 결정립 중에 새로운 결정핵이 발생하기 시작해서 전체가 새로운 작은 결정립으로 바뀌어감 ⇒ 재결정
- ✓ 재결정 온도-재결정이 시작되는 최저 온도 (T_1)

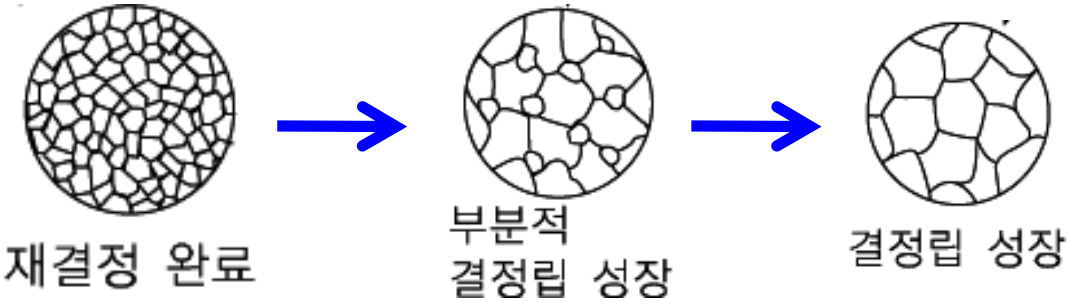
③ **결정립의 성장 단계** (T_2 온도 이상 영역)

- ✓ 재료의 기계적 강도가 저하된다
- ✓ 열에너지에 의해 서로 이웃한 결정립이 서로 병합하여 커져간다

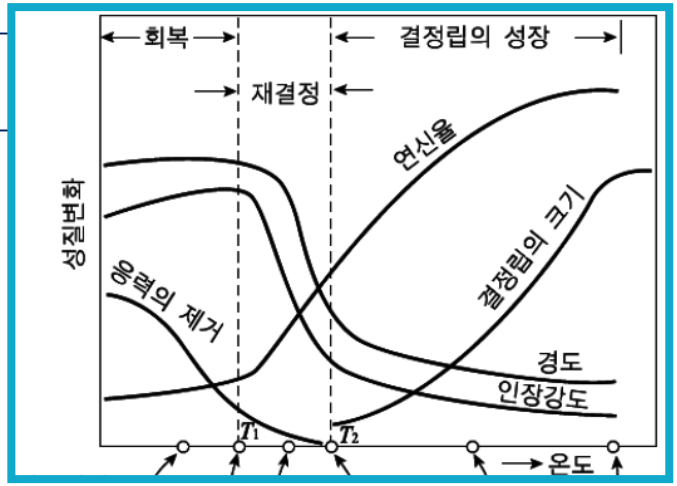
3-C-②. 결정립 성장

➢ 결정립의 성장





3-C-②. 가공경화와 어닐링



- **재결정 온도**
  - ✓ 재결정이 시작되는 최저 온도 (T_1)
  - ✓ 재료의 가공도, 가열 시간에 따라 변한다
- **재결정 생성 조건**
  - ✓ 가공도가 어느 정도 이상이어야 한다.
  - ✓ 가공도가 작은 경우에도 고온에서 가열하면

  ⇒ 재결정이 생긴다.
  - ✓ 가공도가 크고, 가열 온도가 낮으면

  ⇒ 재결정에 의한 결정립의 크기가 작다.
- **가공 온도에 따른 소성가공법**

  ① 열간 가공 : 재결정 온도 이상에서 가공

  ② 냉간 가공 : 재결정 온도 이하에서 가공
- **열간가공의 경우**
  - ✓ 재료의 가공경화가 곧 재결정에 의하여 연화된다.

금속	재결정온도 (℃)
Au	200
Ag	200
Cu	200~250
Ni	530~660
Al	150~200
Fe	350~500
Mo	900
W	1200
Zn	15~50
Sn	0~25
Pb	0
Mg	150