



재료강도학-강의자료

제 3 장 전 위

한밭대학교 신소재공학과 신기현

제2장 소성: 복습

- 공칭응력과 공칭변형률

$$s = \frac{F}{A_0} \quad e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

- 진응력과 진변형률

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(e + 1)$$

- 소성변형의 가장 일반적인 모델

$$\sigma = K \epsilon^n$$

K : 강도계수, n = 변형경화 지수

- Tresca 항복조건

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2} = k$$

- Von mises 항복조건

$$(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 = C = 2\sigma_Y^2$$

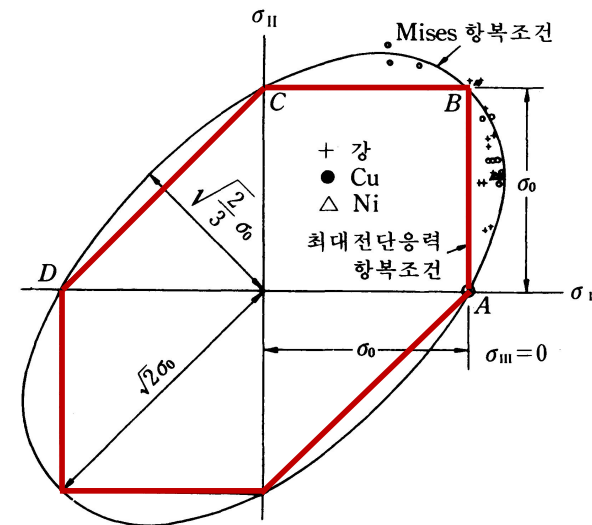
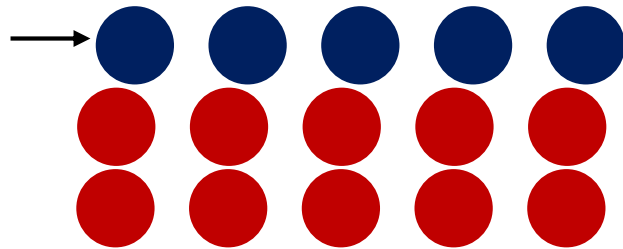
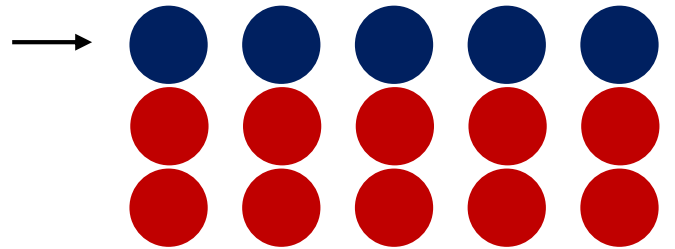


그림 2-11 항복조건의 이론값과 실험값과의 비교⁽⁵⁾

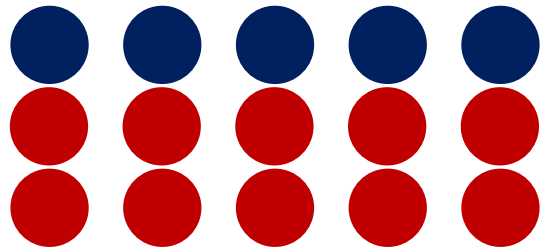
3.1 슬립에 필요한 임계분해전단응력 (전위 X)

(Critical resolved shear stress, CRSS)

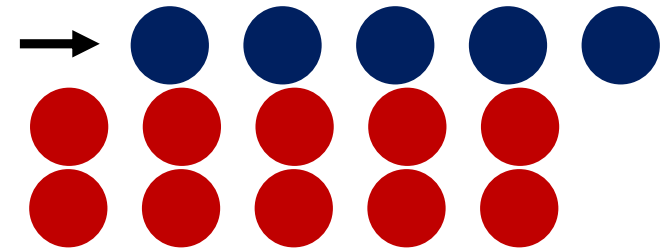
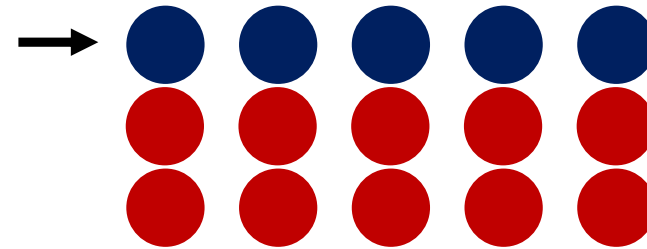
탄성



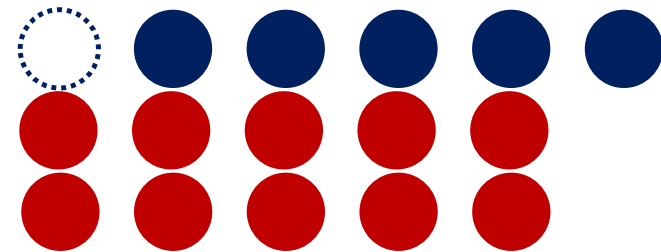
원래 위치로 복귀



소성



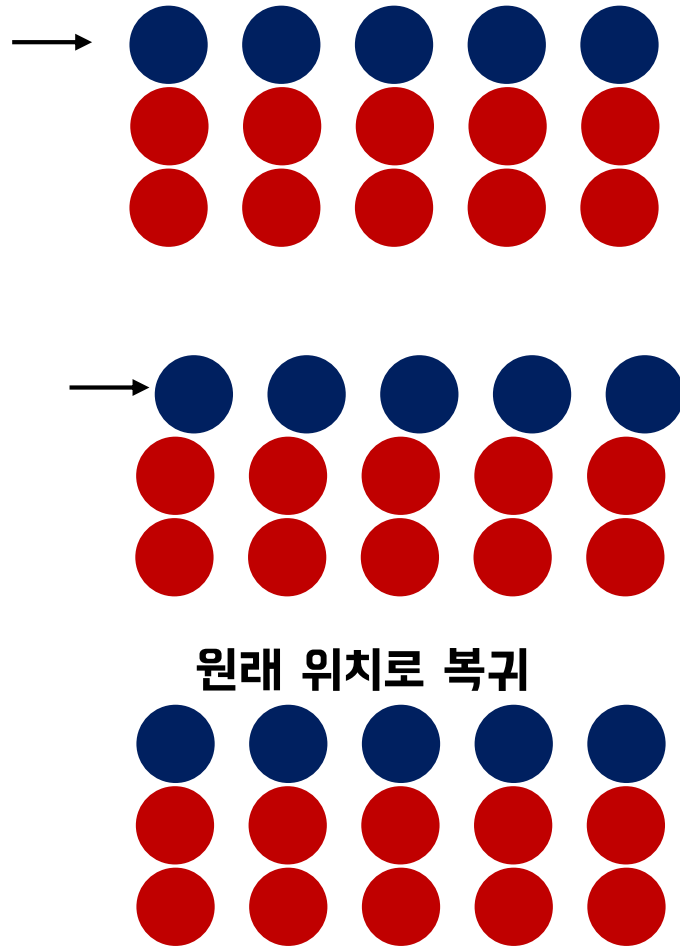
영구 변형



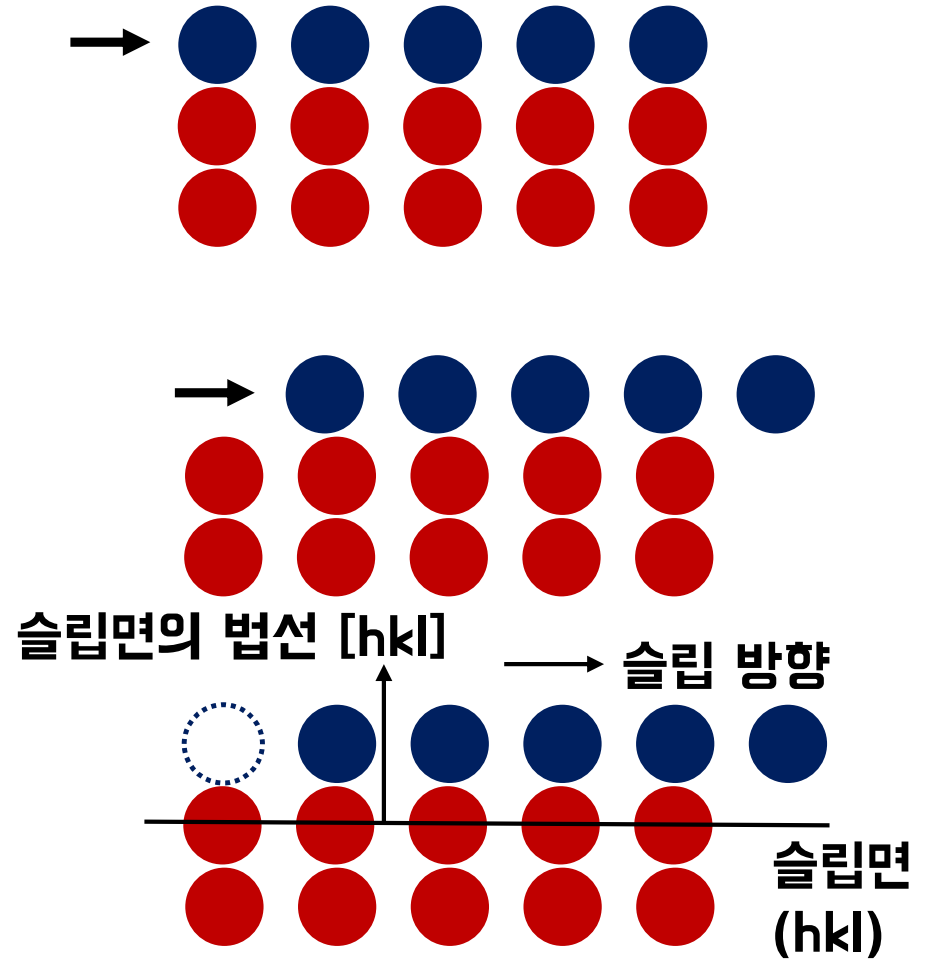
3.1 슬립에 필요한 임계분해전단응력 (전위 X)

(Critical resolved shear stress, CRSS)

탄성



소성

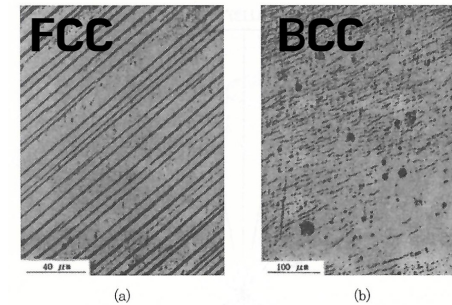


3.1 슬립에 필요한 임계분해전단응력 (전위 X)

- 가장 안정한 면 (= 밀도가 가장 큰 면 = 면간 거리가 가장 큰 면) 으로 주로 슬립이 일어남
- BCC, FCC : 슬립계의 숫자가 많음 → 소성변형이 잘 일어남 → 연성물질
- BCC의 슬립선 : 구불구불 → 슬립면 간의 각이 작아 다양한 면으로 소성 가능
- HCP : 슬립계의 숫자가 적음 → 소성변형이 잘 안일어남 → 취성물질

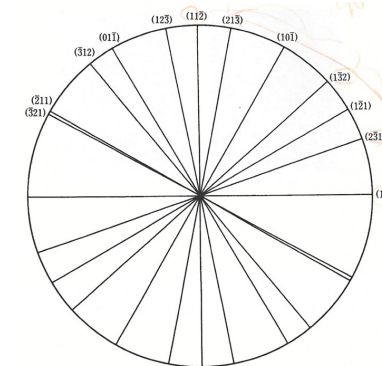
[표 3-1] 슬립계

재 료	결정구조	슬립면	슬립 방향	슬립 계수	고온에서의 추가 슬립계
Al, Cu, Ag, Au, γ (gamma)	fcc	{111}	$\langle 110 \rangle$	12	Al : 450°C {100} $\langle 110 \rangle$
α -Fe	bcc	{101}{112}{123}	$\langle 111 \rangle$	48	$\langle 111 \rangle$ 을 포함한 많은 면
Ta, W, Mo, Na	bcc	{101}{112}	$\langle 111 \rangle$	24	
Ca, Mg, Zn, Co, Be	hcp	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3	$\{1\bar{1}01\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$
α -Ti, Zr	hcp	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6	
		{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	6	
C, Ge, Si	다이아몬드 입방결정	{111}	$\langle 110 \rangle$		
NaCl, LiF, MgO	NaCl	{110}	$\langle 110 \rangle$		
CsCl	CsCl	{110}	$\langle 001 \rangle$		
CaF ₂ , UO ₂ , ThO ₂	CaF ₂	{001}	$\langle 110 \rangle$		
TiO ₂	TiO ₂	{101}	$\langle 101 \rangle$		
MgAl ₂ O ₄	스피넬	{111}	$\langle 110 \rangle$		
Al ₂ O ₃	육방결정	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$		



[그림 3-2] (a) 구리 (b) α -Fe의 슬립선⁽¹⁾

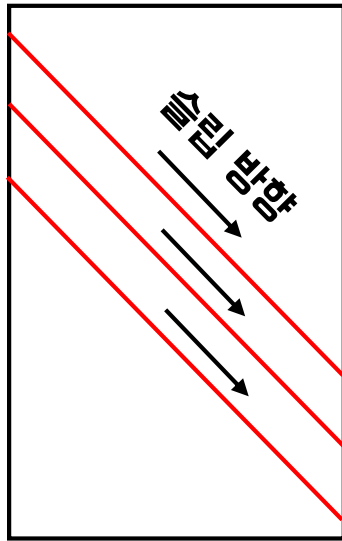
각도의 차이가 작음.



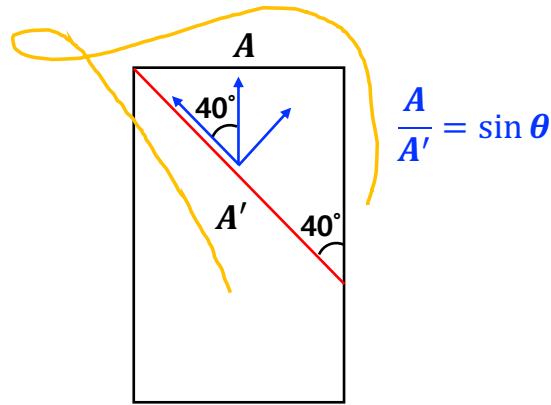
[그림 3-3] {111}을 정대축으로 하는 {110}, {112}, {123}면



3.1 슬립에 필요한 임계분해전단응력 (전위 X)



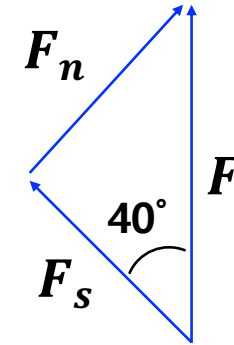
$$A' = A / \sin \theta$$



$$\frac{A}{A'} = \sin \theta$$

$$F_n = F \sin \theta$$

$$F_s = F \cos \theta$$

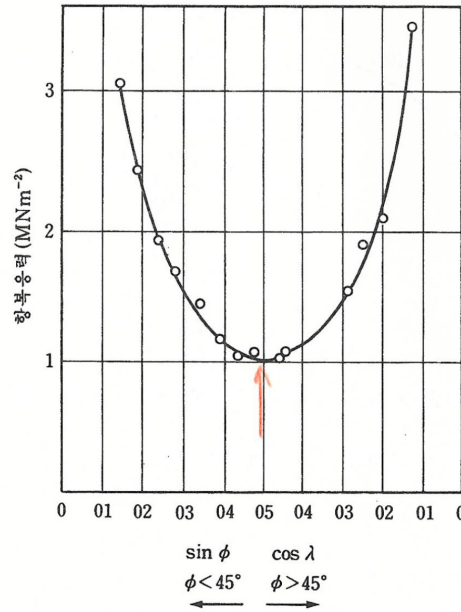


$$\sigma_{A'} = \frac{F_n}{A'} = \frac{F \sin \theta}{A / \sin \theta} = \frac{F}{A} (\sin \theta)^2 = \sigma (\sin \theta)^2$$

$$\tau_{A'} = \frac{F_s}{A'} = \frac{F \cos \theta}{A / \sin \theta} = \frac{F}{A} \cos \theta \sin \theta = \frac{\sigma \cos \theta \sin \theta}{\text{Schmid 계수}} \quad : \text{Schmid 법칙}$$

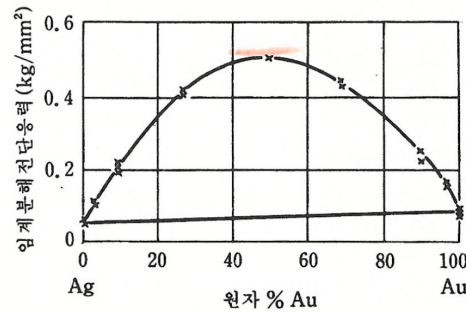
3.1 슬립에 필요한 임계분해전단응력 (전위 X)

- 각도의 변화에 따른 항복응력의 변화
- 불순물 농도에 따른 임계분해전단응력의 변화 (고용강화 현상)
- 온도변화에 따른 임계분해전단응력의 변화

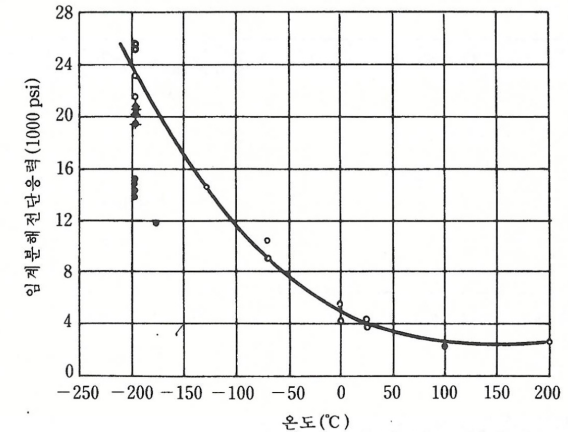


곡선은 일정한 τ_{CR} 값으로 계산한 것이다.

[그림 3-6] Mg 결정의 방위에 따른 인장항복응력⁽⁴⁵⁾



[그림 3-7] Ag-Au 합금단결정의 임계분해전단응력⁽²⁾



[그림 3-8] α -Fe의 임계분해전단응력의 온도에 따른 변화⁽³⁾



3.1 슬립에 필요한 임계분해전단응력 (전위 X)

[표 3-2] 단결정 재료의 전단탄성계수 [GPa]와 임계분해전단응력(τ_{CR})

결합형태	재 료	G [GPa]	τ_{CR} [MPa]	$\tau_{CR}/0.1 G$
금속결합	Al	26.4	0.98	3.8×10^{-4}
	Ag	25.8	0.48	1.9×10^{-4}
	Cu	41.9	0.59	1.4×10^{-4}
	Cu(전위없음)	120	3000	2.5×10^{-1}
	Ni	201.1	3.2	1.6×10^{-4}
	Fe	82.2	14	1.7×10^{-3}
	Fe(전위없음)	200	13000	6.5×10^{-1}
	Mo	340	49	1.4×10^{-3}
	Nb	104.3	33.3	3.2×10^{-3}
	Cd	19.6	0.49	2.5×10^{-4}
	Mg(기저면 슬립)	44	0.39	8.9×10^{-5}
	Mg(프리즘 슬립)	44	39.2	8.9×10^{-3}
	Ti(")	106.2	13.7	1.3×10^{-3}
	Be(기저면 슬립)	309.8	1.37	4.4×10^{-5}
	Be(프리즘 슬립)	309.8	52	1.7×10^{-3}
Zn(기저면 슬립)	382	0.18	4.7×10^{-6}	
<hr/>				
결합형태	재 료	G [GPa]	τ_{CR} [MPa]	$\tau_{CR}/0.1 G$
이온결합	NaCl	14.2	1.98	1.4×10^{-3}
	SiO ₂ (전위없음) ⁺	28.3	5937	2.1
	Al ₂ O ₃ (전위없음) ⁺	161.2	20955	1.3
공유결합	흑연 ⁺	271.6	24448	0.9
	B ₄ C	450	6700	1.5×10^{-1}
	SiC	830	11000	1.3×10^{-1}

+ : 전위이동에 대한 저항이 실온에서 너무 크기 때문에 항복 전 파괴된다.

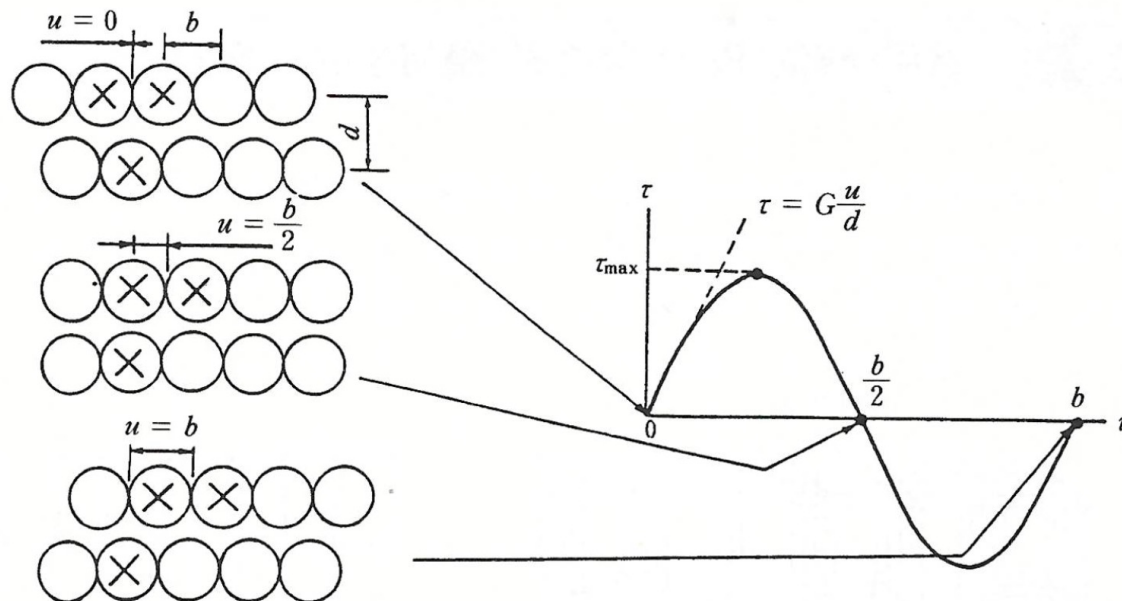


3.2 완전한 결정의 전단강도 (전위 X)

$$\tau = G\gamma = G \frac{u}{d} \text{ (만약 } u \text{가 충분히 작다면 탄성거동)}$$

$$\tau = \tau_{max} \sin \frac{2\pi u}{b} \quad (\because u = \frac{b}{2} \rightarrow \tau = 0, u = \frac{b}{4} \rightarrow \tau = \tau_{max})$$

$$\tau = \tau_{max} \sin \frac{2\pi u}{b} \approx \tau_{max} \frac{2\pi u}{b} \text{ (만약 } u \text{가 충분히 작다면)}$$



[그림 3-9] 2개의 인접조밀원자면의 전단에서의 변위 u 와 이에 따른 전단응력 τ 와의 관계

만약 $b \approx d$ 라면

$$\tau_{max} = \frac{Gb}{2\pi d} \approx \frac{G}{2\pi} \approx 0.1G$$

실제,

$$\text{임계분해전단응력} = G/10^{-5}$$

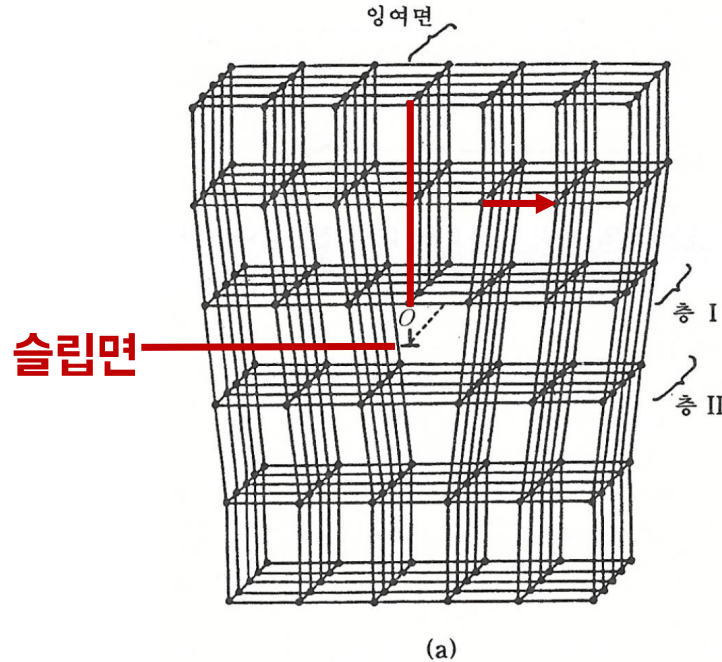
이론전단응력 \neq 실험값

새로운 이론이 필요

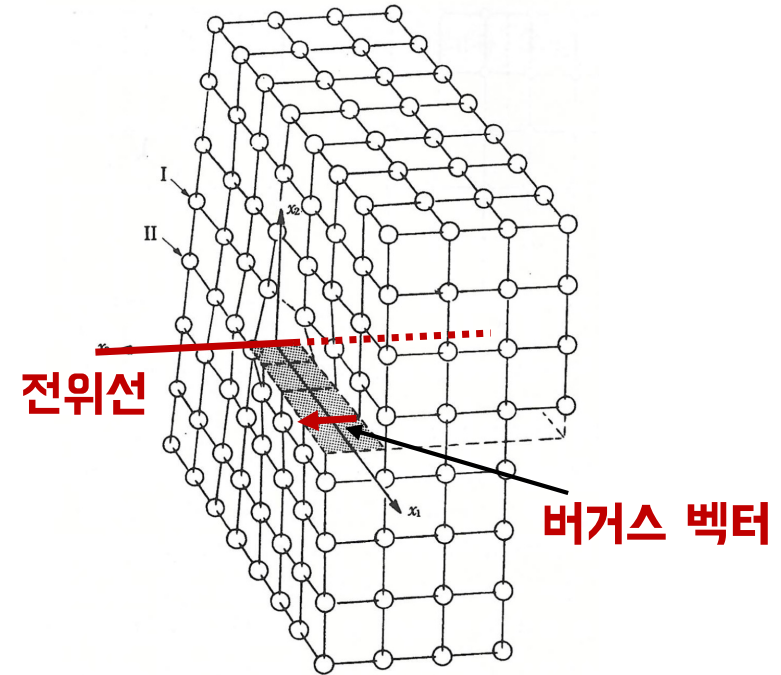
→ 전위

3.3 전위의 기하학적 모양 (이제부터 전위)

칼날 전위
(edge dislocation)



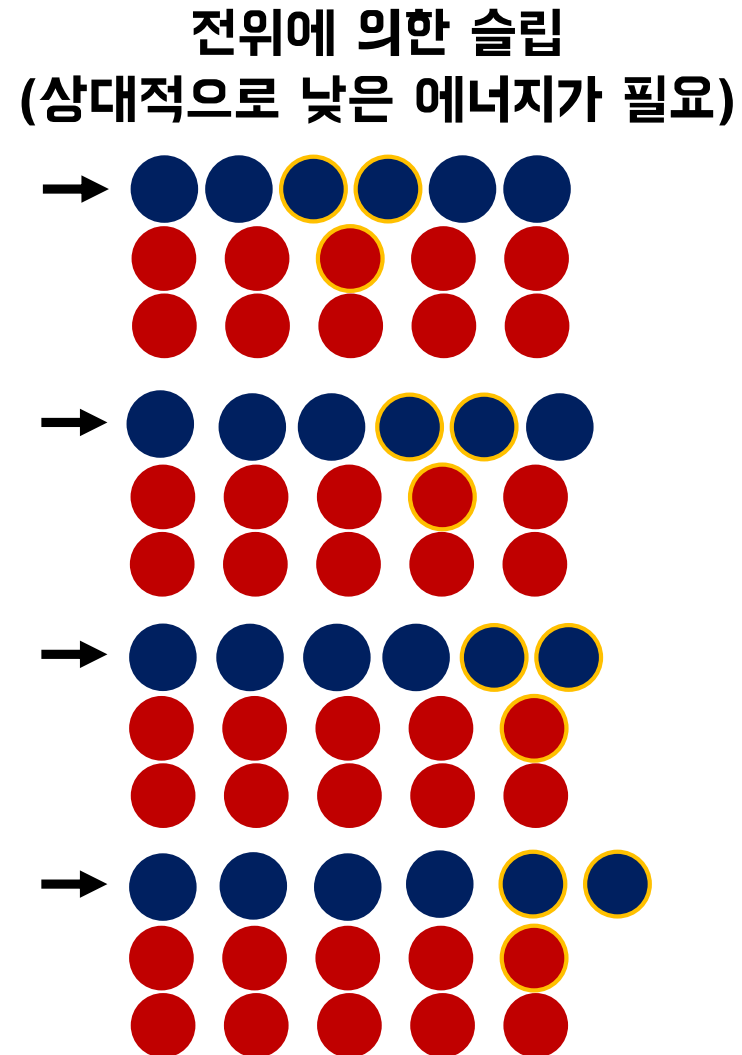
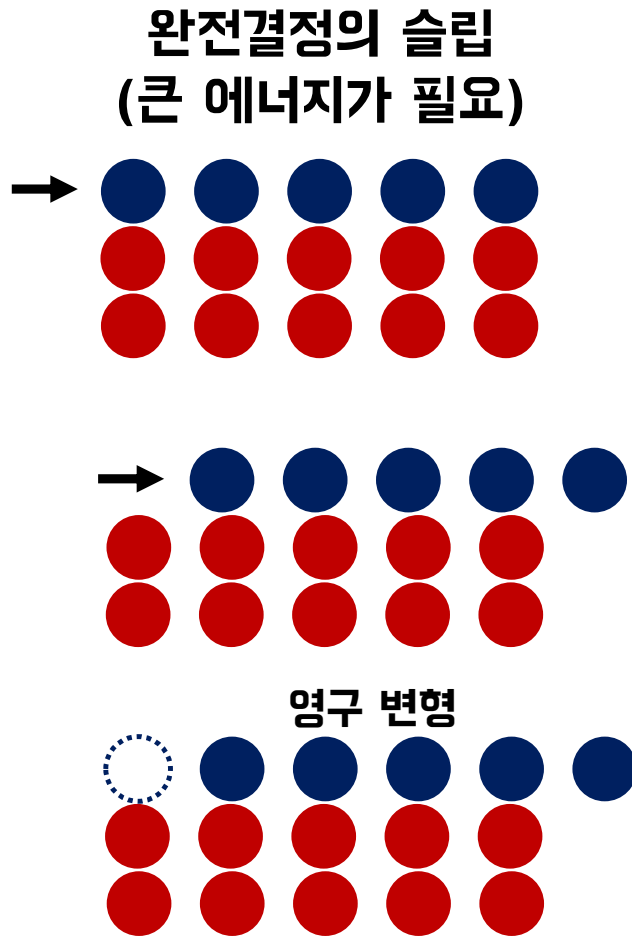
나선 전위
(screw dislocation)



- 대부분 혼합전위 = 칼날전위 + 나선전위
- 격자의 단위벡터 = 버거스 벡터 → 완전전위 (또는 단위전위)
- 버거스 벡터는 변하지 않는 양
 - 전위선은 결정 내에서 끝날 수 X
 - 표면에 끝나거나, 루프 (폐곡선)을 만들거나 마디 (노드)에서 다른 전위와 만날 수 O

3.4 전위의 이동에 의한 슬립

- 전위: 금속의 이론전단강도의 실험값과의 큰 차이를 설명하기 위해 도입



3.4 전위의 이동에 의한 슬립

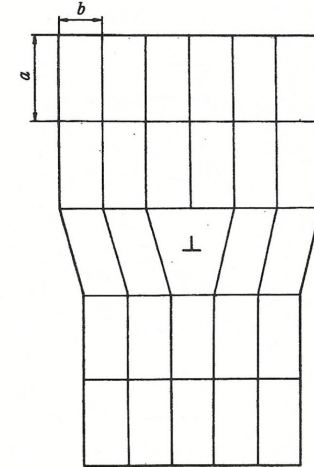
- Peierls-Nabarro 의 모형 기준으로 전위를 움직이는데 필요한 응력을 계산

$$\tau \approx \frac{2G}{1-\nu} \exp(-2\pi\omega/b) \approx \frac{2G}{1-\nu} \exp\left(-\frac{2\pi a}{(1-\nu)b}\right)$$

a = 슬립면 사이의 거리

b = 슬립방향으로의 원자간격

ω = 전위의 폭



[그림 3-22] Peierls-Nabarro 응력의 계산을 위한 전위 모형

- 전위의 폭이 전위를 움직이는데 필요한 응력에 큰 영향
- 금속 내에서의 전위 이동에 필요한 응력을 정확히 계산하는 데는 사용이 불가능
- 하지만, 이 응력이 아주 작다는 것을 증명하는 데는 충분
- 결함이 없는 결정 내에서 전위를 이동시키는데 필요한 응력 = 격자마찰응력

3.4 전위의 이동에 의한 슬립

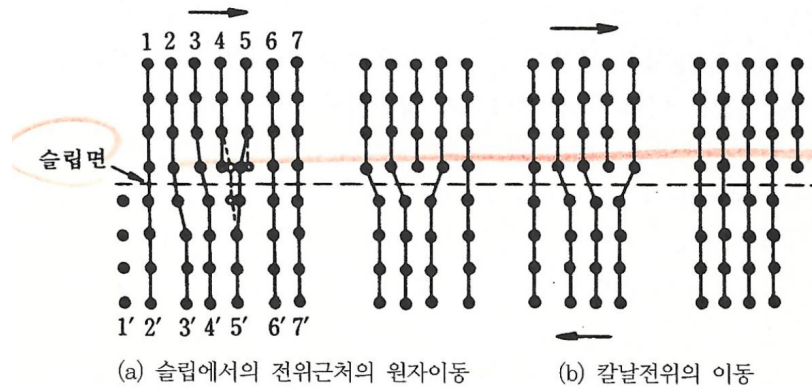
- 연성이 좋은 금속에서는 전위의 폭이 원자간격의 10배 정도
- 세라믹 재료는 계면에너지가 크고 전위의 폭이 좁아 움직이기 어렵다

- 원자밀도가 가장 큰방향으로 슬립이 일어난다는 사실은 b 가 최소라는 의미 \rightarrow 필요 전단응력이 감소
- 만일 $\alpha < b$ 이면, 슬립면간 거리는 좁고, 슬립면의 원자밀도는 작게 되며 \rightarrow 필요 전단응력이 증가
 - \rightarrow 즉 원자밀도가 가장 큰 면에서 슬립이 가장 쉽게 일어난다는 실험적 사실을 확인

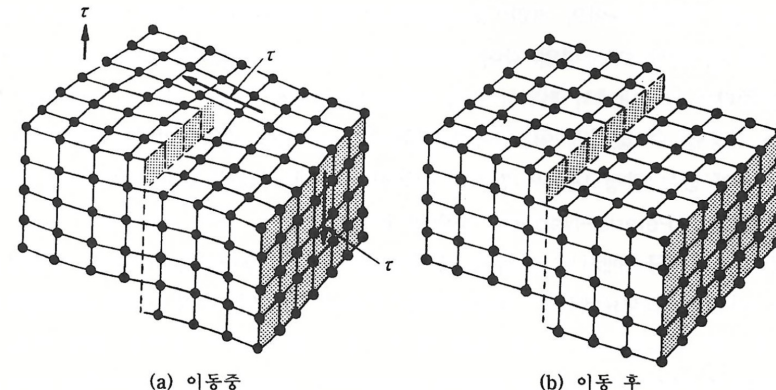
- 결정구조가 복잡하고 조밀면과 조밀방향이 없으면 전위가 움직이지 못함.
- 이 때문에 금속간화합물의 경우 경도가 증가, 취성
- 고온에서는 열적 운동이 활발 \rightarrow 덜 치밀한 면과 방향에서도 슬립이 가능



3.4 전위의 이동에 의한 슬립



[그림 3-19] 전위의 이동에 의한 슬립

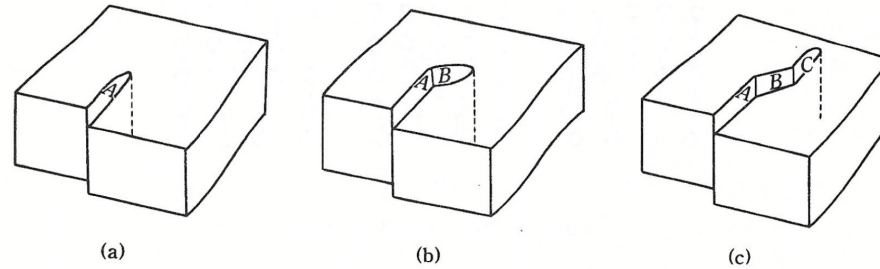


[그림 3-23] 나선전위의 이동의 효과

<활주전위 (glide dislocation)>

- 위 그림 처럼 버거스 벡터가 슬립면에 놓여 있는 전위
- 결정 내에서 비교적 쉽게 이동.
- 이동하는 데 재료의 확산이 필요 없다.
- 즉, 칼날 전위의 잉여면의 정도가 활주에 의해 변화하지 X
- 나선전위는 잉여반면이 없으므로 : 항상 보존운동

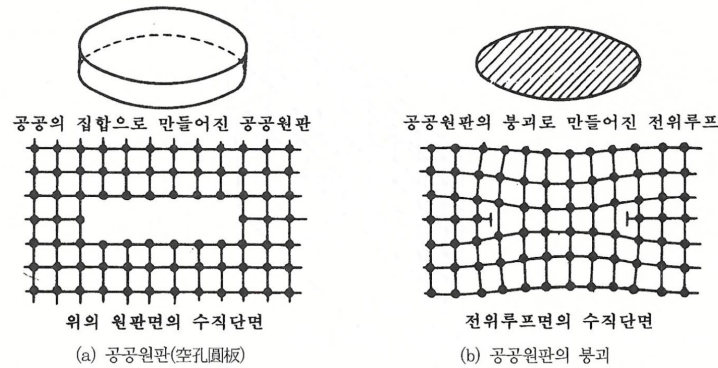
3.4 전위의 이동에 의한 슬립



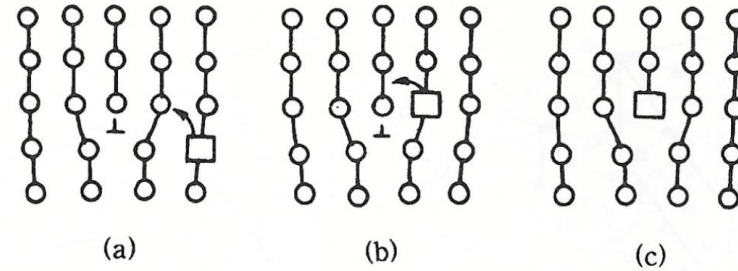
[그림 3-24] 나선전위의 슬립에 의한 슬립계단의 형성

- 나선전위가 면A에서 활주를 하다가, 다른 슬립면(B)에서 활주하기가 쉬운 조건에서는 다른 슬립면으로 활주방향을 바꾸어 활주 가능 : **교차슬립 (cross slip)**
- 이후 원래의 슬립면과 같은 종류의 슬립면(C)로 다시 교차 슬립 : **이중교차슬립 (double cross slip)**

3.4 전위의 이동에 의한 슬립



[그림 3-25] 공공의 집합에 의한 전위루프의 형성



[그림 3-26] 전위의 상승운동

- 슬립면에 공공이 모여 이것이 붕괴되면 **전위고리 (dislocation loop)**를 형성
- 이것의 버거스 벡터는 슬립면에 수직 → 활주하지 못함 : **부동전위 (sessile dislocation)**
- 전위고리의 일부분이 다른 슬립면과의 교차선상에 있다면 → 슬립이 가능
- 이외에는 확산에 의해서만 움직일 수 있으며, 격자간원자의 응축 또는 원자공공의 증발에 의하여 잉여반면이 늘어나기도 함
- 즉, 전위가 그 전위의 버거스벡터와 수직으로 움직이려면 원자나 공공의 확산이 필요
- 이러한 전위의 운동을 **전위의 상승 (dislocation climb)**이라 하며, **비보존운동 (잉여반면이 보존되지 X)**

3.5 전위 주위의 응력장 (탄성변형에 의한)

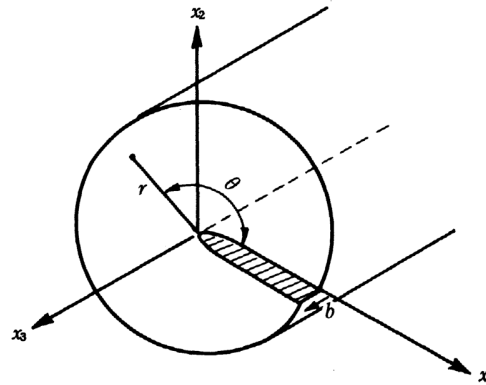


그림 3-30 연속체의 나선전위

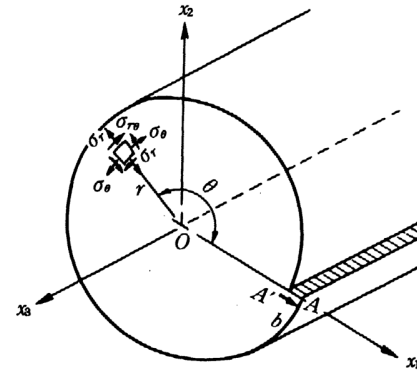


그림 3-31 연속체의 칼날전위

$$\sigma_{13} = G\gamma_{13} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2}$$

$$\sigma_{23} = G\gamma_{23} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2}$$

or

$$\sigma_{\theta_3} = G\gamma_{\theta_3} = \frac{Gb}{2\pi r}$$

$$\sigma_{11} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_2(3x_1^2 + x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

$$\sigma_{22} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_2(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

$$\sigma_{33} = \frac{Gb}{\pi(1-\nu)} \frac{x_1(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

$$\sigma_{12} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_1(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

or

$$\sigma_{\theta} = \frac{Gb \sin \theta}{2\pi(1-\nu)r}$$

$\frac{Gb}{2\pi r}$ 을 공통성분으로 보류, $r = 0$ 일때 응력이 무한대이므로, 전위선 주위의 매우 작은 영역은 해석에서 제외 ($r < r_0$), 일반적으로 r_0 는 0.5 ~ 1 nm 정도

3.5 전위 주위의 응력장

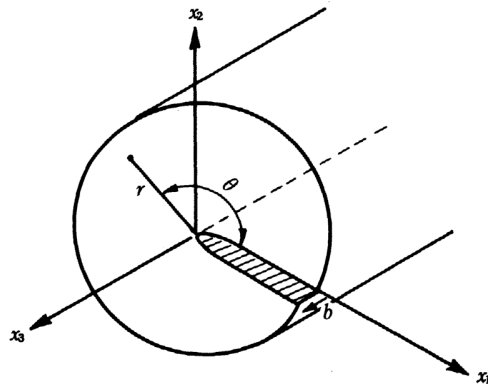


그림 3-30 연속체의 나선전위

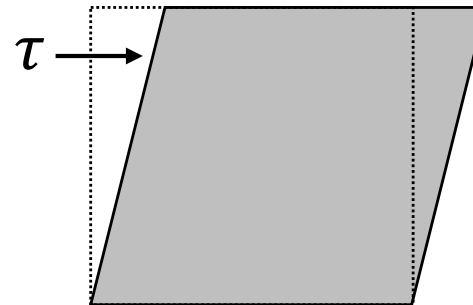
$$\sigma_{13} = G\gamma_{13} = -\frac{Gb}{2\pi} \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2}$$

$$\sigma_{23} = G\gamma_{23} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2}$$

or

$$\sigma_{\theta_3} = G\gamma_{\theta_3} = \frac{Gb}{2\pi r}$$

**전단응력 성분만 존재
→ 체적의 변화가 X**



3.5 전위 주위의 응력장

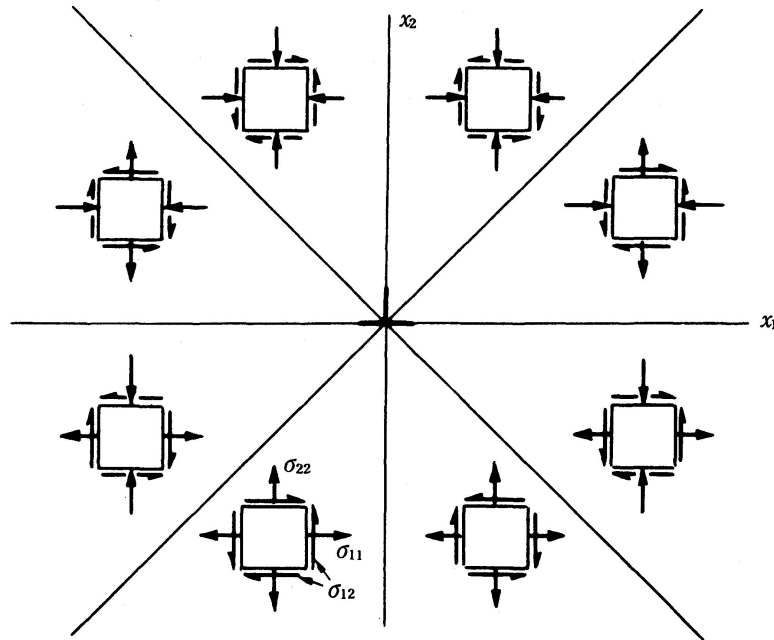
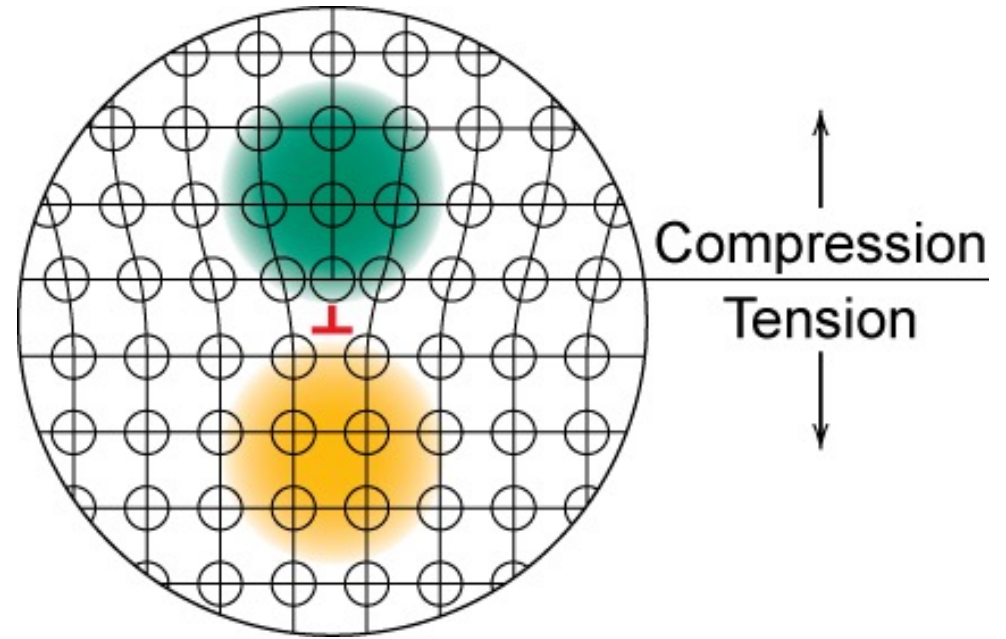


그림 3-32 陽의 칼날전위주위의 응력변화



3.5 전위 주위의 응력장

$$\sigma_{11} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_2(3x_1^2 + x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

$$\sigma_{22} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_2(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

$$\sigma_{33} = \frac{Gb}{\pi(1-\nu)} \frac{x_1(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

$$\sigma_{12} = \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \frac{x_1(x_1^2 - x_2^2)}{(x_1^2 + x_2^2)^2}$$

or

$$\sigma_\theta = \frac{Gb \sin \theta}{2\pi(1-\nu)r}$$

양(+)의 칼날전위 일 경우

$$\Delta = -\frac{b}{2\pi r} \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \sin \theta$$

$\Delta < 0$ when $0 < \theta < \pi$ (압축)
 $\Delta > 0$ when $\pi < \theta < 2\pi$ (인장)

총체적 변화는 $\int_0^{2\pi} \Delta d\theta = 0$

따라서, 칼날전위 및 나선전위에 의한 체적 변화는 없다.

하지만,

전위의 중심부에서는 선형탄성이 적용 되지 않고, 체적증가가 생긴다.

왜냐하면, 인장력에 의한 체적증가보다, 압축력에 의한 체적감소가 작기 때문

→ 하지만 매우 작음.

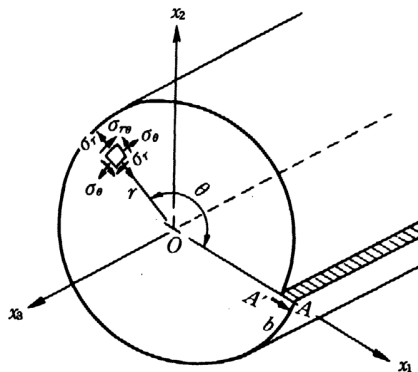


그림 3-31 연속체의 칼날전위



3.6 전위의 탄성변형에너지

- 전위 주위에는 탄성변형으로 인한 탄성응력장이 존재 (앞절에서)
- 전위로 인해 탄성변형에너지 역시 존재 → **전위의 탄성변형에너지**

- **나선전위**

$$W_s = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} \quad (\mathbf{r_0 \text{ 부터 } R \text{ 까지}})$$

일반적으로 W_c 가 W_s 에 비해 매우 작아 무시

$$W_c = \frac{Gb^2}{8\pi} \quad (\mathbf{\text{전위중심부, 중심부터 } r_0 \text{ 까지}}) \rightarrow \mathbf{\text{무시}}$$

- **칼날전위**

$$W_e = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0} \quad (\mathbf{r_0 \text{ 부터 } R \text{ 까지}})$$

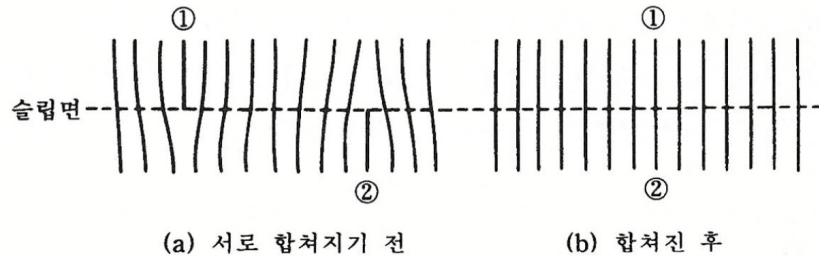
- **대부분 혼합전위 (나선전위 + 칼날전위)**

$$W \approx \frac{Gb^2}{2}$$



3.8 전위 사이에 작용하는 힘

- 같은 슬립면에서 **부호가 다른 전위**는 서로 **인력**이 작용하여 (할주하여) 사라짐



$$W_e = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}$$

[그림 3-38] 같은 슬립면 위 부호가 반대인 2개의 칼날전위가 서로 인력의 작용으로 없어지는 과정

- 같은 슬립면에서 **부호가 같은 전위**는 서로 **척력**이 작용하여 멀어짐

$$W_e = \frac{2Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}$$

가까워지면
(버거스 벡터가 2b인
전위로 근사 가능)

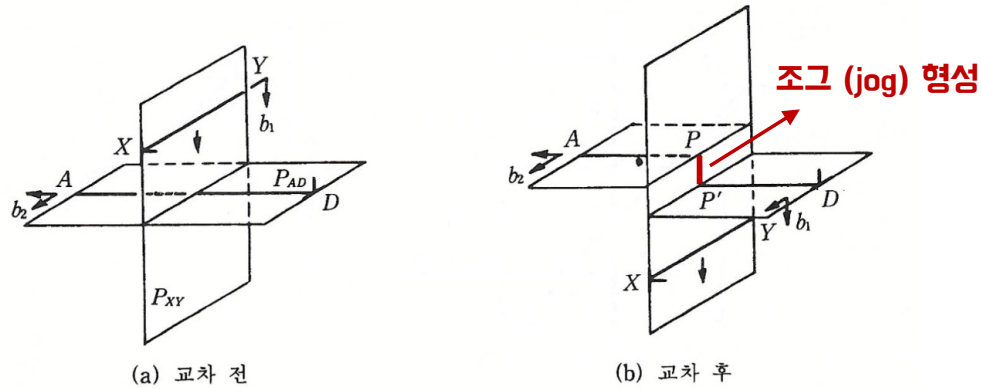
$$W_e = \frac{G(2b)^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}$$

→ 가까워지면 에너지가 증가 → 불안정 → 에너지를 낮추고 싶음 → 서로 멀어짐

3.8 전위 사이에 작용하는 힘

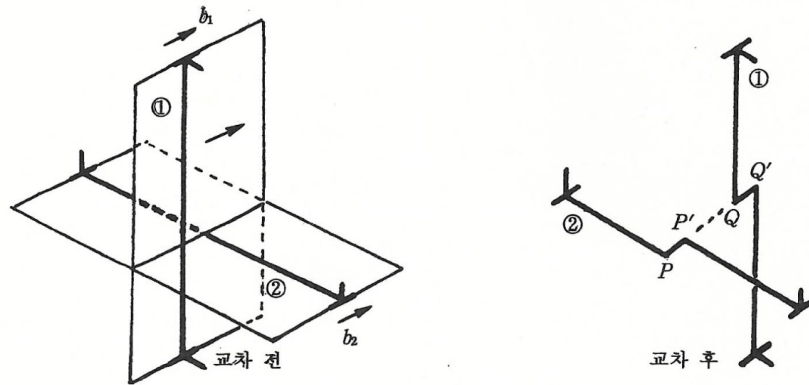
- 자유표면 (가장 바깥쪽)은 전위를 끌어당긴다.
 - 전위가 자유표면으로 빠져나가면, 결정의 변형에너지가 줄어들기 때문.
- 만일 금속표면이 산화피막 (금속보다 탄성계수가 큰)으로 덮혀져 있으면,
 - 표면으로 끌려가던 전위가 산화피막을 자르고 지나가지 못함
 - 전위의 **집적**
 - **표면경화**
 - 만일 산화물을 제거하면, 전위가 빠져나와 표면에 계단을 형성.

3.9 전위의 교차



[그림 3-43] 2개의 칼날전위의 교차

- 슬립과정 중 전위들이 서로 교차하는 경우가 많이 생김.
- 버거스 벡터 크기의 **조그 (jog) 형성** : 슬립면에 수직으로 형성된 전위
- 전위 XY에 조그가 생기지 않는 이유는 **XY가 b_2 와 평행하기 때문**

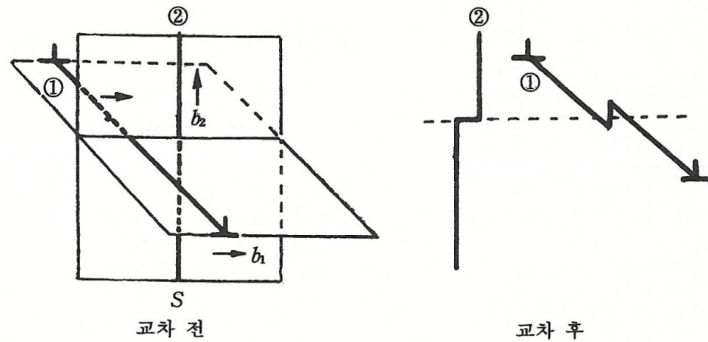


[그림 3-45] 서로 평행한 Burgers 벡터를 가진 2개의 수직 칼날전위의 교차

- 서로 **평행한 버거스 벡터**를 가진 서로 수직인 2개의 **칼날전위**의 교차
- 두 전위 모두 **조그**를 생성, 이 경우 조그는 둘 다 **나선전위**
- 이와 같이 원래의 슬립면 위에 있는 조그를 **킵크 (kink)**라 한다.

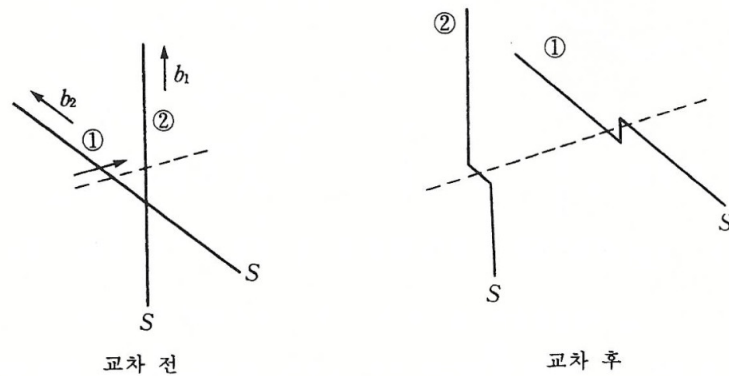


3.9 전위의 교차



[그림 3-46] 나선전위와 칼날전위의 교차

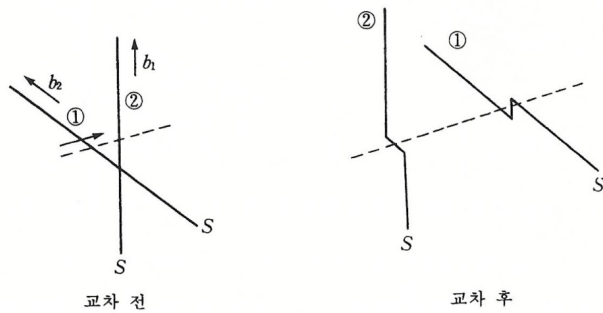
- 나선전위와 칼날전위의 교차
- 칼날전위에는 조그가, 나선전위에는 키크가 형성



[그림 3-48] 2개의 나선 전위의 교차

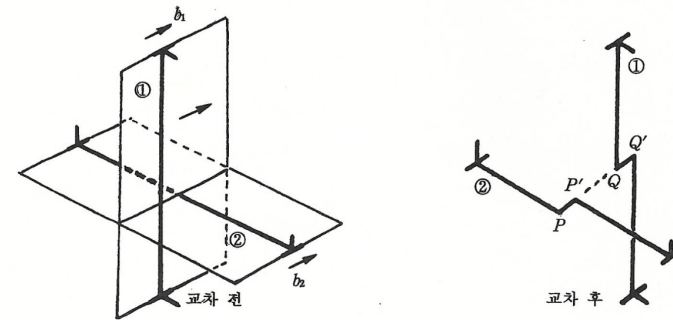
- 2개의 나선전위의 교차
- 둘 다 조그 형성
- 조그가 칼날전위의 성격을 가짐. 조그가 활주할 수 있는 방법은 나선전위의 축을 따라

3.9 전위의 교차



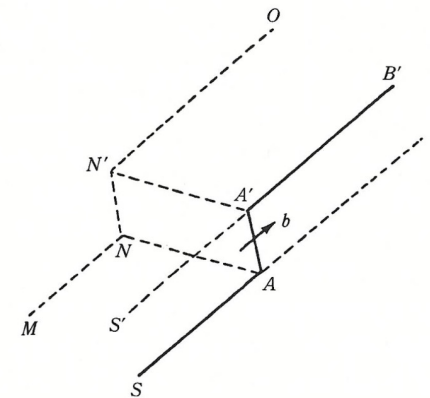
[그림 3-48] 2개의 나선 전위의 교차

- 2개의 나선전위의 교차
- 둘 다 조그 형성
- 조그가 칼날전위의 성격을 가짐
- 나선전위의 축으로만 이동 가능. (S'SBB')
- SAA'B' → MNN'O 로 이동하려면 비보존운동 (상승운동) 이 필요
- 비보존운동 = 온도의존성
- 상승운동이 일어날 수 없는 온도라면 나선전위의 운동이 조그에 의해 방해
- 조그의 운동에 의해 공공이나 격자간원자가 형성



[그림 3-45] 서로 평행한 Burgers 벡터를 가진 2개의 수직 칼날전위의 교차

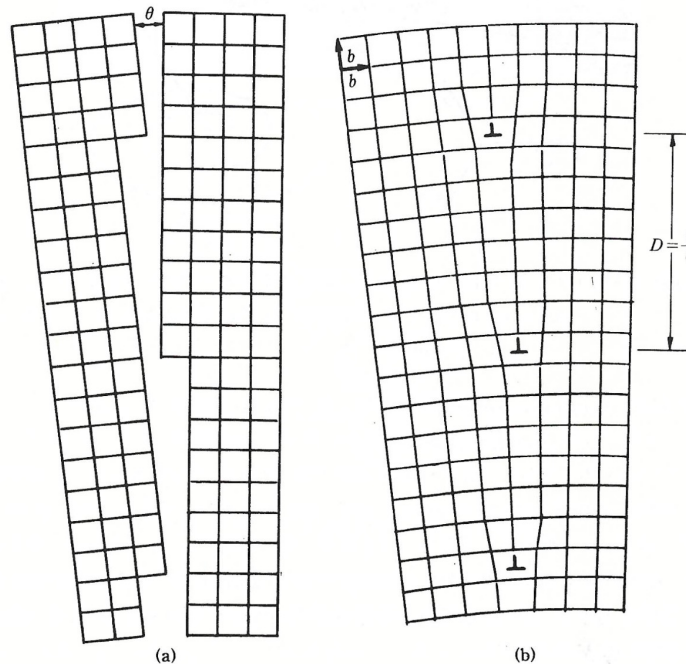
- 2개의 칼날전위의 교차
- 둘 다 킥 형성
- 전위의 슬립면에 존재 → 쉽게 활주 가능
- 전위의 이동에 영향 X



[그림 3-49] 나선전위상의 조그(AA')의 보존운동(활주)은 면 SS'BB'에 국한되어 있다.

3.12 소각입계 (경각입계와 비틀림입계)

- 방향이 다른 2개의 결정영역 또는 결정립 (grain) 이 만날 때, 결정립사이의 천이영역을 입계 (grain boundary)라 한다.
- 결정립 사이의 방향 차이가 작을 때 입계의 구조를 전위의 배열로 나타낼 수 있다.
- 아래와 같이 칼날전위 만으로 이루어진 입계를 경각입계 (low-angle grain boundary)라고 한다.

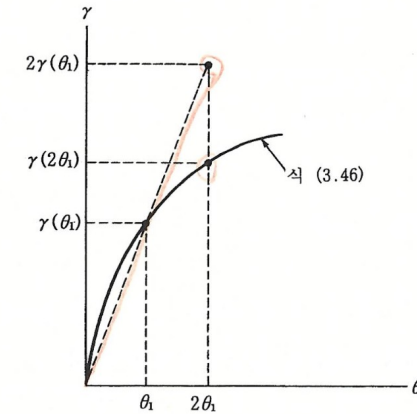


[그림 3-74] (a) 지면(紙面)에 수직으로 공동(共同)[100]축을 가진 2개의 단순입방격자
(b) 2개의 결정이 결합하여 경각입계를 이룸. 입계의 구조는 칼날전위의 배열로 나타낼 수 있다.⁽²⁴⁾

3.12 소각입계 (경각입계와 비틀림입계)

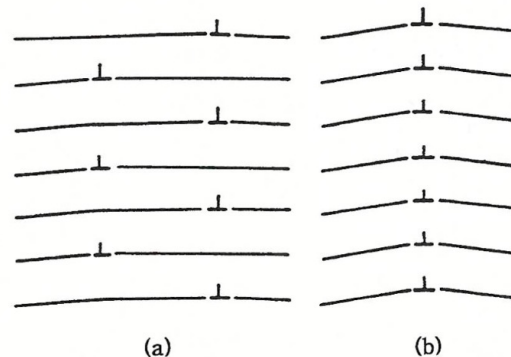
- 각 θ 가 작을때 ($\theta \leq 6^\circ$), 입계의 단위 면적당 에너지(γ)

$$\gamma = \frac{Gb\theta}{4\pi(1-\nu)} (\ln \alpha - \ln \theta) = E_0\theta(A - \ln \theta) \longrightarrow$$



[그림 3-75] 경각입계에너지 γ 와 입계의 경사각 θ 사이의 관계

- 만일 경사각이 θ 인 2개의 소각입계가 합쳐져서 2θ 인 하나의 새 입계가 형성되면, 새 입계의 에너지는 처음 2개의 입계의 에너지의 합보다 작아짐.
- 전위가 이동하여 큰 각의 (여전히 작음) 입계로 되면 결정의 에너지가 감소
→ 이러한 현상은 어닐링 중에 나타남.



[그림 3-76] 칼날전위 사이의 수직간격이 넓게 옆으로 벌어져 있는 경우(a) 보다 수직으로 배열된 경우(b)가 작은 변형에너지를 갖고 있다.

3.13 전위-점결함의 상호작용

- 점결함 (고립된 용질원자, 공공(vacancy))은 전위와 마찬가지로 탄성변형의 중심
- 점결함과 전위는 탄성적으로 반응
- 점결함 주위의 격자변형은 근사적으로 구형 (**등방향응력만 고려**)
- 탄성연속체 내에서 반지름 a 의 구형 구멍 속에 반지름 a' 의 탄성구를 넣은것과 유사 $\varepsilon = (a' - a)/a$
- **(반지름 a 의 원자로 이루어진 고체내에서 하나의 원자를 반지름 a' 의 원자로 치환 했다고 생각)**
- 공공인경우, 반지름 a 는 격자자리에 있는 원자의 반지름
- 격자간원자인 경우, a 는 격자간 자리의 평균 반지름



3.13 전위-점결함의 상호작용

- 양의 칼날전위로 부터 r, θ 지점에 있는 점결함과 이 칼날전위의 탄성작용에너지는

$$U_i = \frac{4(1 + \nu)Gba^3 \varepsilon \sin \theta}{3(1 - \nu)r} \quad \varepsilon = (a' - a)/a$$

- 하지만, 이 식은 점결함 밖의 에너지만을 포함, 용질원자의 탄성변형으로 인한 변형에너지를 고려하면 작용에너지 (**상호작용에너지**)는

$$U_i = \frac{4Gba^3 \varepsilon \sin \theta}{r} = A \frac{\sin \theta}{r}$$

- 이 식은 탄성론에 의해 유도, 탄성론이 적용될 수 없는 전위의 중심 근처에서는 정확하지 않다.
- 최대의 상호작용에너지가 이 중심의 근처에서 일어나기 때문에, 위 식은 대략적인 값만을 나타낸다. (**부호가 중요**)

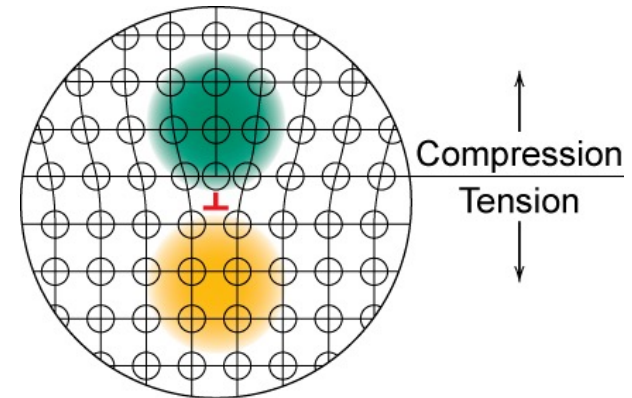


3.13 전위-점결함의 상호작용

$$\text{상호작용에너지} = U_i = \frac{4Gba^3 \varepsilon \sin \theta}{r} = A \frac{\sin \theta}{r} \quad \varepsilon = (a' - a)/a$$

- 상호작용에너지 < 0 : 점결함과 전위 사이에 인력
상호작용에너지 > 0 : 점결함과 전위 사이에 척력
- 용매원자 < 용질원자 ($\varepsilon > 0$) $\rightarrow \sin \theta < 0$ 이어야 에너지↓ $\rightarrow \pi < \theta < 2\pi$ (인장영역)
용매원자 > 용질원자 ($\varepsilon < 0$) $\rightarrow \sin \theta > 0$ 이어야 에너지↓ $\rightarrow 0 < \theta < \pi$ (압축영역)

- 점결함 주위의 변형장 = 구대칭
 - \rightarrow 나선전위와는 상호작용X
 - \rightarrow 나선전위는 순수전단이기 때문
 - \rightarrow BCC의 침입형은 비대칭이서 상호작용이 있음



- 용매원자 = 용질원자 (크기)
 - \rightarrow 서로의 탄성계수가 다르면, 상호작용이 있음
 - \rightarrow 전위가 이동하는데 용질원자의 전단계수가 높으면 이동이 힘들
 - \rightarrow 점결함이 연하면 : 인력이 작용
 - \rightarrow 점결함이 경하면 : 척력이 작용

3.13 전위-점결함의 상호작용

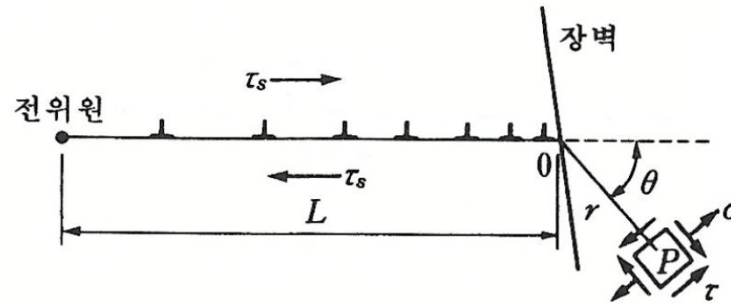
- 적층결함에서와 기지의 구조가 다르기 때문에
- (FCC의 적층결함은 HCP)
- **적층결함에서의 원자의 응집력 \neq 기지에서의 원자사이의 응집력**
- 따라서, 적층결함에서의 용질의 평형농도와 기지에서의 용질의 평형농도가 다름
- 이러한 **용질의 불균질 분포 = 전위와 용질원자 사이의 상호작용**
- 일반적으로 **적층결함에서 용질의 평형농도가 기지에서보다 크다.**
 - 이런 현상을 화학작용 혹은 **Suzuki 효과**라고 한다.
- 다시말해, 절결함과 관련된 에너지가 전위의 접근으로 영향을 받기 때문에 점결함의 농도가 전위선 주변에서 달라짐.

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right)$$

- C_0 는 평균농도, U_i 가 음수이면 → **전위 주위의 점결함의 농도는 평균농도보다 크다.**
 - 이때를 불순물 분위기, 불순물운(구름), Cottrell 구름
 - C 가 1을 초과할만큼 낮은 온도에서는 전위중심 근처의 자리는 용질원자로 포화
 - 불순물 분위기가 전위선에 응집되었다 라고 함.



3.14 전위집적



[그림 3-86] 장애물에 집적된 전위

- 전위는 입계 (grain boundary), 제2상 (other phase), 부동전위 등 **장벽에 부딪치면 슬립면상에서 집적** 된다.
- 전위집적에서 제일 앞의 전위는 작용전단응력 뿐만 아니라 다른 전위와의 상호작용 힘도 받는다. → **매우 큰 응력집중**
- 이 높은 응력은 **장벽에 항복을 일으키거나 균열을 발생**시킬 수 있다.
- 장벽에 대하여 집적된 전위는 **척력으로 인해 전위의 이동을 방해하는 역응력**이 생긴다.
- 집적된 전위는 앞에서는 **뽁뽁하게 배열**되고, 뒤로 갈수록 전위간격이 커진다.

3.15 쌍정형성 및 킹크형성에 의한 변형

- 소성변형에서 가장 중요한 기구: 슬립 → 전위의 이동에서 의해서 일어난다.
- 슬립 다음으로 중요한 기구는 쌍정형성
- 그러나, **슬립계가 많은 금속에서는 쌍정형성이 지배적이지 않다.**
- 슬립계가 제약을 받거나, 어떠한 이유로 슬립의 임계분해전단응력이 증가하여 쌍정형성에 필요한 응력이 슬립형성에 필요한 응력보다 작을 때 형성
 - 즉, **FCC, BCC가 높은 변형속도로 변형되거나, HCP에서 주로 쌍정이 발생**
- 소성변형에서 쌍정형성이 중요한 역할을 하는 이유는 쌍정형성으로 생기는 변형이 아니고, 쌍정형성으로 인한 **방위변화로 새로운 슬립계가 작용할 수 있게 되어** 슬립이 더 일어날 수 있는데 있다.
- 쌍정형성은 **HCP와 같이 슬립계가 적은 금속에 중요**
- 그러나 결정 전체 부피의 비교적 **작은 분량만이 쌍정형성으로 방위가 변하기 때문에,** HCP가 일반적으로 슬립계가 많은 금속에 비해 연성이 작다.

