

5장. 강의 강화 및 온도에 따르는 성질

A. 금속재료의 강화 방법

- ① 가공에 의한 강화
- ② 결정립의 미세화에 의한 강화
- ③ 합금에 의한 강화
- ④ 석출강화 및 분산강화
- ⑤ 그 외의 강화법

B. 저온에서의 기계적 성질

C. 고온에서의 기계적 성질

- ① 청열취성
- ② 크리프
- ③ 철강의 고온산화

5-A. 금속재료의 강화방법

- ✓ 금속 재료의 변형 : 주로 전위를 매개로 한 미끄럼 변형에 의해 발생
→ 전위 활동을 억제함으로 재료를 강화시킴

➤ 전위 제거

- ✓ 결함이 거의 없는 결정 성장(예; 휘스커결정)
- ✓ 강도가 이론값에 가깝게 크다 → 복합 재료에 사용
- ✓ 크게 성장시키기 어렵다 → 상용화 어려움

[표 3-2] 임계전단응력의 계산값과 실측값

금속명	계산값(MPa)	실측값(MPa)	계산값/실측값
Ag	4500	0.92	4900
Cu	6400	1.00	6400

➤ 전위 이동 방해

- ✓ 전위 이동 위치에 장애물 또는 장애조건을 형성시킴
- ✓ 예) 가공경화, 결정립미세화, 고용강화, 석출강화, 마텐자이트강화
- ✓ 실질적으로 사용되는 고용법이다

5-A. ① 가공에 의한 강화

✓ 가공경화: 가공 → 전위밀도증가 →→→ 전위이동 어려워짐 → 강도증가

➤ 왜 전위 이동이 어렵게 되는가?

✓ 전위간의 탄성적 상호작용, 부동전위에 의한 전위들의 집적, 교차된 전위, 엉킨 전위

➤ 응력-변형률 곡선을 통해본 가공경화

✓ 1단계- 가장 용이한 미끄럼면으로 전위가 움직이고 전위증식됨- 소성변형

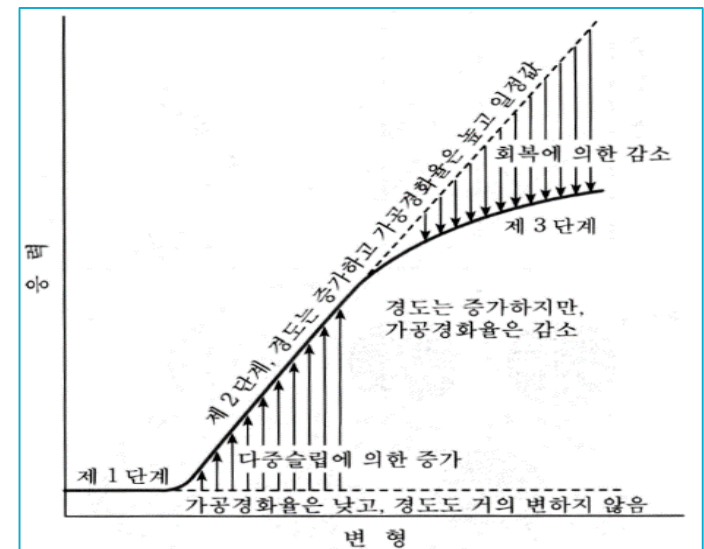
✓ 2단계- 가공경화범위: 미끄럼이 어려운 면에서도 전위 움직임이 활발

전위끼리 교차되고 엉킴 → 부동전위 형성 → 전위운동방해, 전위집적

✓ 3단계- 부하가 커서 움직일 수 없었던 전위가 다른 미끄럼면으로 움직이면서

교차 미끄럼 발생 → 연화현상 발생

❖ 생산현장에서 3단계 일어나지 않도록 한다



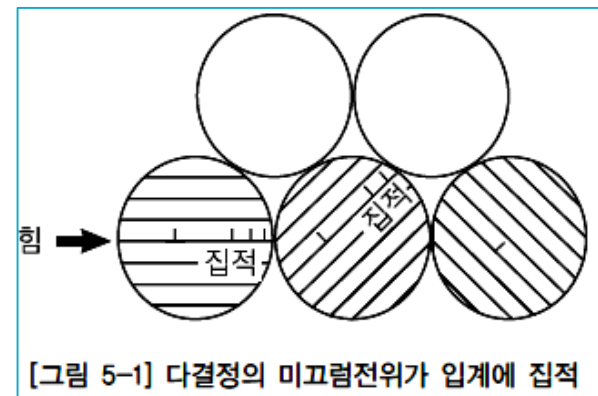
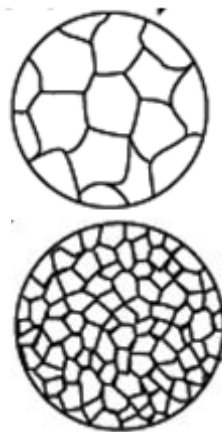
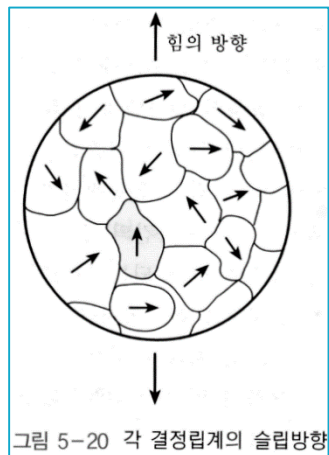
5-A. ② 결정립 미세화에 의한 강화

➤ 결정립의 서로 다른 미끄럼 방향

- ✓ 미끄럼 방향과 외력 방향이 일치할수록 미끄럼 쉽게 일어남
- ✓ 미끄럼이 쉽게 일어난 결정립의 경우, 주위 결정립에 의해 저항 받음
→ 결정립이 작을수록 결정립 수가 증가하므로 미끄럼 방향 다른 결정립이 많아지고 미끄럼 진행이 더욱 어려워짐 → 강의 강화

➤ 결정립계의 영향

- ✓ 결정립계를 경계로 결정 방향이 달라서 원자 배열이 달라짐
- ✓ 전위가 이동하다 결정립계에서 이동하기 어려워짐 → 결정립계 근처에 전위들이 모이게 됨
→ 결정립이 작을수록 전위가 이동하다 쉽게 결정립계를 만나 이동이 저지됨
→ 강의 강화



5-A. ② 결정립 미세화에 의한 강화

➤ 홀-페치 관계식

- ✓ 결정립 크기와 강의 강도와와의 관계 나타냄
- ✓ 결정립의 평균직경 D 가 작을수록 재료의 변형을 위해 큰 힘이 필요함

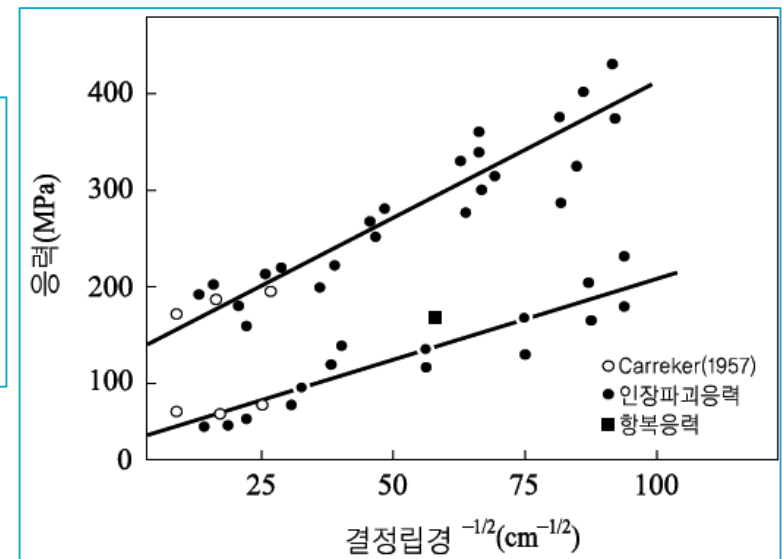
✓ $\sigma_y \propto \frac{1}{\sqrt{D}}$

$$\sigma_y = \sigma_i + K D^{-\frac{1}{2}}$$

σ_y : 항복응력

σ_i : 전위운동에 대한 격자저항을 나타내는 마찰응력

K : 상수



➤ 강의 강화와 인성과의 관계

- ✓ 일반적인 강화법에 의하면 강도가 증가할수록 인성이 약화됨
- ✓ 결정립이 미세할수록 전위가 한 결정립계에 집적하지 않음
- ✓ → 국부적 응력 집중이 낮아짐
- ✓ 강도가 크면서 인성도 큰 재료 얻음!

5-A. ③ 합금에 의한 강화

✓ 고용강화, 전위의 고착, 화학적 상호작용

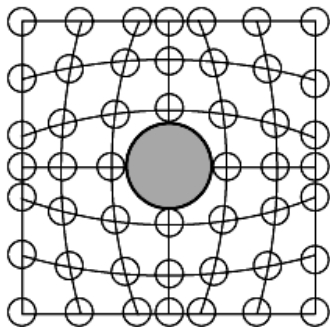
➤ 고용강화 (격자변형)

✓ 치환형 불순물 원자의 고용에 의한 강화

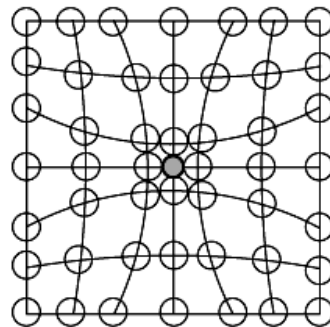
✓ 용질 원자 부근에 국부적으로 격자 변형이 크게 발생

✓ 전위 이동에 많은 에너지가 필요해 전위 이동이 어려워짐 → 강의 강화

✓ 용매, 용질 원자 크기 차이가 클수록, 용질원자 고용량이 많을수록 강도 증가

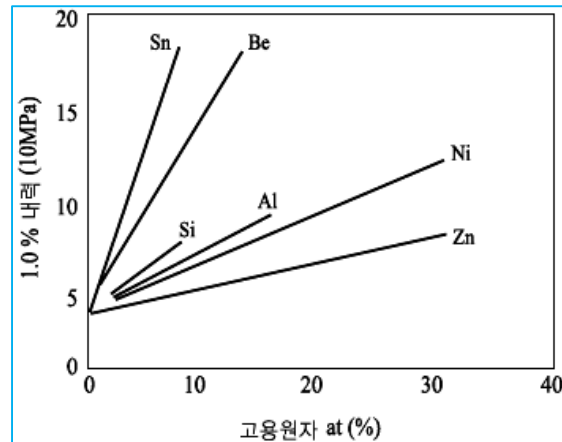


(a) 용질원자가 큰 경우



(b) 용질원자가 작은 경우

[그림 5-3] 치환형 용질원자에 의한 격자의 변형



[그림 5-4] 동의 1% 내력에 대한 고용원자의 영향

^4Be

^{14}Si

^{13}Al

^{28}Ni

^{29}Cu

^{30}Zn

^{50}Sn

5-A. ③ 합금에 의한 강화

➤ 전위의 고착 강화 (코트렐 효과)

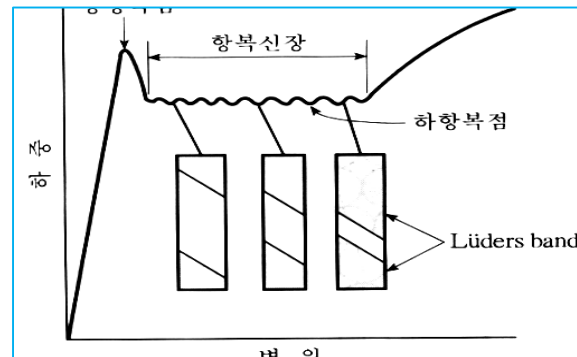
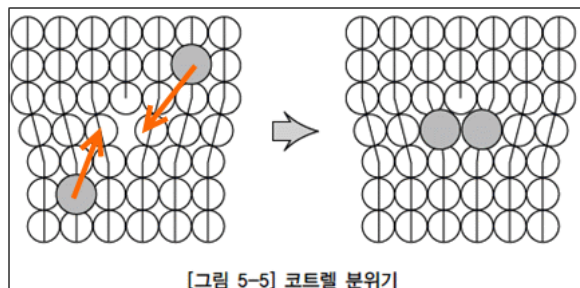
- ✓ 코트렐 분위기: 용질원자가 용매원자의 칼날전위 아래에 있는 상태 (안정된 상태)

➤ 코트렐 효과:

- ✓ 칼날 전위가 코트렐 분위기의 용질원자에 의해 고착되어 전위 이동에 큰 에너지 필요
- ✓ 상온에서 큰 강화효과 보임
- ✓ 고착 영역이 전위 부근으로 제한적이라 온도 높이면 쉽게 코트렐 분위기에서 벗어남
- ✓ α -철 등의 bcc 금속의 강화기구로 중요!

➤ 예) 연강 시험편의 항복현상과 코트렐 효과:

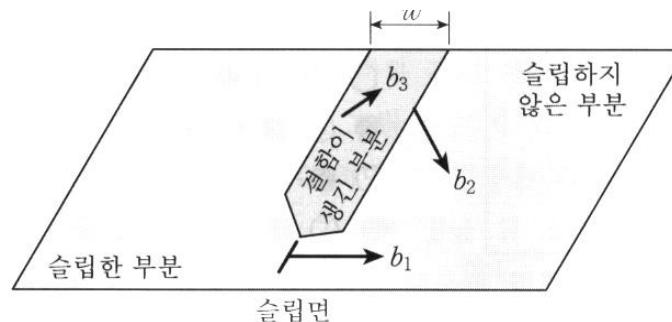
- ✓ 작은 탄소원자가 쉽게 모여 집단을 형성함으로 일정한 탄화물을 형성함
- ✓ 결정 내에서 전위가 이 탄화물들에 의해 안정한 상태로 매우 강하게 고착됨
- ✓ 상항복점: 연강의 전위가 탄소 또는 질소 원자에 의해 고착되어 전위 이동을 위하여 큰 외력이 필요
- ✓ 하항복점: 충분한 외력에 의해 전위가 고착상태에서 벗어남. 적은 응력으로도 전위가 이동



5-A. ③ 합금에 의한 강화

➤ 화학적 상호작용: fcc 금속의 적층결함

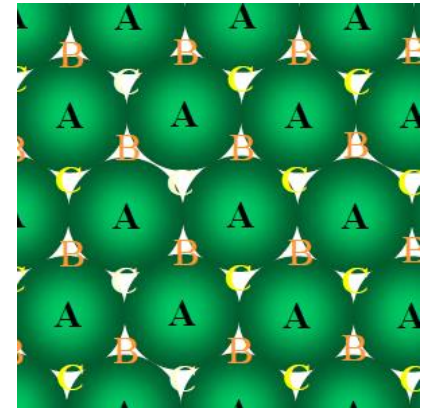
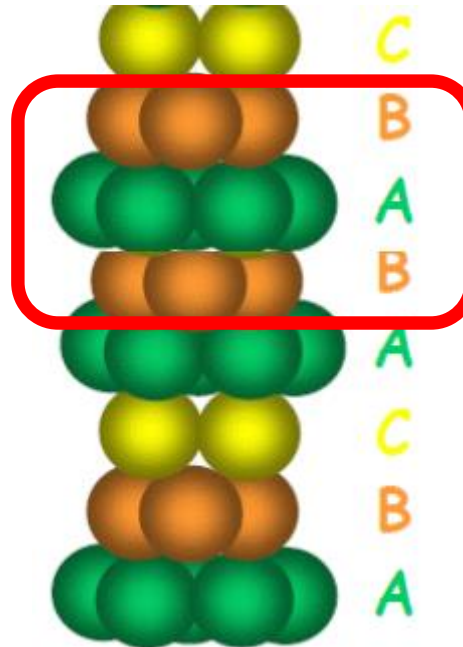
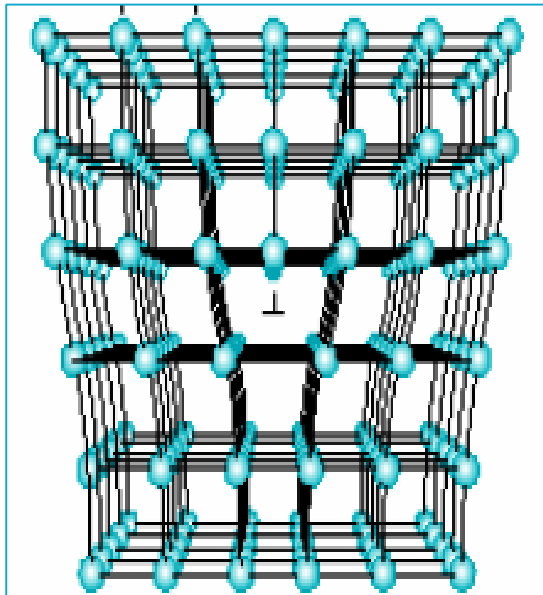
- ✓ fcc 금속에서 하나의 전위가 두 개의 전위로 나뉘면서 적층결함 발생
- ✓ 원자배열이 hcp인 적층결함면은 주위의 fcc 금속과 화학적 성질이 다름
- ✓ 화학적 성질이 평형이 되려고 하면서 원자의 편석이 생김
- ✓ 이 편석에 의하여 적층결함 장소에 용질원자가 모임
- ✓ 결함 폭이 더욱 확대됨으로 전위가 고착됨 → 강화됨
- ✓ 적층결함 & 코트렐 효과 비교
 - ❖ 코트렐 효과에 비해 전위의 고착 작용은 약하다
 - ❖ 고착 범위가 넓어 온도가 조금 상승해도 전위가 여전히 이동하기 어려움
 - ❖ 온도의 영향을 별로 받지 않음
 - ❖ 내열재료로 bcc 구조 재료보다 fcc 구조 재료가 적절함



5-A. ③ 합금에 의한 강화

✓ 적층결함 & 코트렐 효과 비교

- ❖ 코트렐 효과에 비해 전위의 고착 작용은 약하다
- ❖ 고착 범위가 넓어 온도가 조금 상승해도 전위가 여전히 이동하기 어려움
- ❖ 온도의 영향을 별로 받지 않음
- ❖ 내열재료로 bcc 구조 재료보다 fcc 구조 재료가 적절함



5-A. ④ 석출 강화 및 분산강화

➤ 석출강화 (시효강화, 분산강화)

- ✓ 결정 내에 제 2상 석출물의 형성 (시효강화: 석출물 형성에 시간이 필요함)
 - ❖ 석출물이 전위 이동에 장애가 됨
 - ❖ 석출물로 결정격자에 큰 변형이 생겨서 전위이동에 큰 힘이 필요
- ✓ 두랄루민 (Al-Cu-Mg 합금)을 급랭 후 시간이 지나면서 강화되는 것에서 발견됨
- ✓ Cu-Be 합금, PH스테인리스강, 마레이징강의 개발에 연결됨

➤ 석출강화 과정

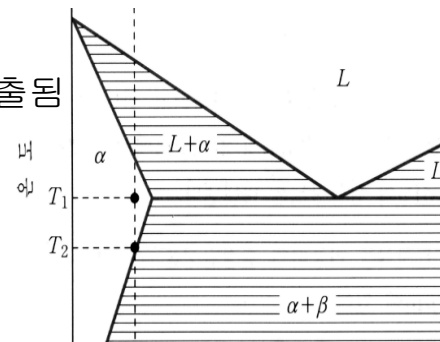
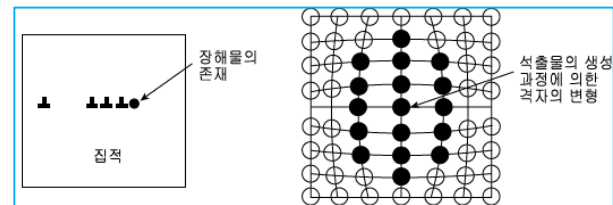
✓ 용체화처리

- ❖ C_s 조성 α 상을 T_1 에서 급랭시킴
- ❖ α 상에서 β 상이 석출되지 않고 되지 않고 과포화된 상태의 불안정한 단일상이 얻어짐
- ❖ 용질원자가 불규칙적으로 분포함

✓ 시효 강화

- ❖ 용체화처리 후 상온에서 방치(자연시효)하거나 온도를 조금 높인다(인공시효)
- ❖ 과포화 $\alpha \Rightarrow$ 준비단계 (시효강화, β' 상 석출) \Rightarrow 포화 $\alpha + \beta$

- ① 과포화 고용체중의 용질원자가 국부적으로 집합하여 석출됨
- ② 중간상 β' 만든다
- ③ 중간상 β' 이 안정된 상 β 상이 된다



5-A. ④ 석출 강화 및 분산강화

➤ 예) Al-Cu 합금: 용체화 후 130°C에서 시효시간에 따른 경도의 변화

① 1단계 중간상 석출: GP-1 영역

❖ Al fcc 결정격자 (100)면에 Cu 원자가 정합배열(두께~Å, 지름~10Å)

❖ 원자크기 차이로 인한 격자변형 → 강화됨

② 2단계 중간상 석출: GP-2 영역(θ'')

❖ 원반상의 석출물(정방정계구조, 두께~150Å, 지름~1500Å), 평균성분 CuAl₂

❖ 모체 결정에 두께방향: 압축변형, 반지름방향: 전단변형 발생시킴

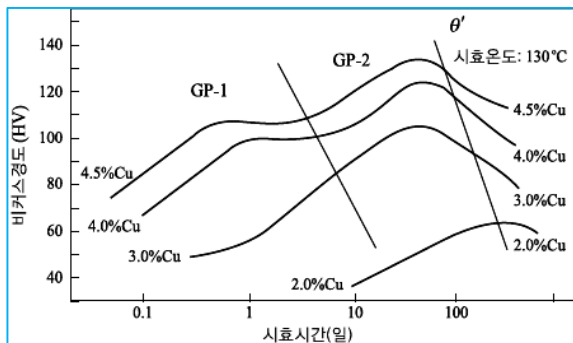
❖ 석출물 수도 많고 변형도 커서 석출강화 극대화됨

③ 3단계 중간상 석출: θ' 영역

❖ 석출물이 θ'' 와 비슷한 구조로, 지름 방향으로 늘어나고 두께방향으로 줄어듦

❖ GP-2 영역 주위에 전위가 생겨 모체와의 정합관계가 깨짐

❖ 장거리 탄성력이 완화되어 연화됨



[그림 5-8] Al-Cu합금을 시효했을 때 경도의 변화

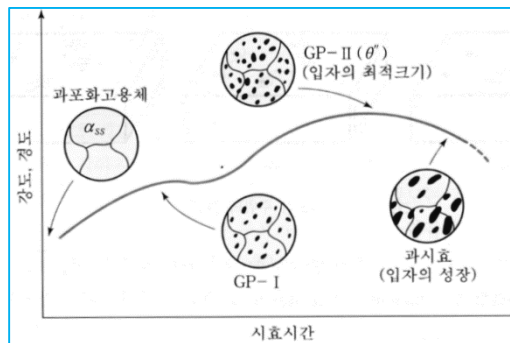
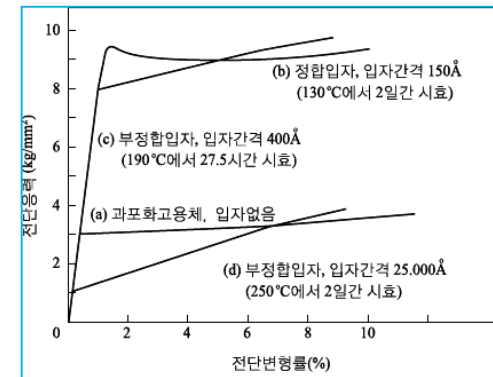


그림 5-24 시효시간과 석출강화와의 관계



[그림 5-9] Al-4%Cu 단결정의 응력-변형률 곡선(-196°C)

5-A. 금속재료의 강화방법

✓ 예) 각종 재료의 강화 기구

재 료 및 조 건	항복강도 [MPa]	강 화 기 구
Al 합금 Al-Cu-Mg(2024-T3) : 열처리 및 냉간가공	345	가공경화, 석출강화
Al-Zn-Mg-Cu(7075-0) : 어닐링	104	고용체강화
Al-Zn-Mg-Cu(7075-T6) : 열처리	500	석출강화
Cu 합금 Cu-Zn(황동) : 어닐링	240	고용체강화
Cu-Be(벨류강) : 열처리	964	석출강화
Ni 합금 Ni-Cr-Fe : 냉간가공	1,034	가공경화, 고용체강화
Ni-Mo-Fe : 어닐링	275	고용체강화
Ni-Co-Cr-Mo-Ti-Al : 열처리	827	석출강화
Fe 합금 Fe : 어닐링(고순도 : 0.01 wt% C)	173	고용체강화, 입계강화
Fe-C : 어닐링(1020강 : 0.4 wt% C)	310	고용체강화, 입계강화
Fe-Ni-Mo-Mn-Cr-C : 열처리(4340강 : 0.4 wt% C)	1,380	고용체강화, 입계강화
Maraging강 300	2,000	석출강화, 입계강화

5-A. ⑤ 그 외의 강화법

➤ 마텐자이트 변태에 의한 강화 (열처리법)

✓ 강을 담금질(급랭)하면 굉장히 단단해짐

① 미세한 쌍정구조

❖ 두께 $0.1\mu\text{m}$ 인 평행한 판상 쌍정으로 구성된 내부구조 가짐 → 전위이동 억제 → 강화

② 높은 전위 밀도

❖ 단위면적당 $10^9 \sim 10^{10} \text{mm}^{-2}$ 개의 높은 전위밀도 → 전위이동 억제 → 강화

③ 탄소원자에 의한 격자변형

❖ 급랭에 의한 오스테나이트 → 페라이트 변태는 탄소용해도를 크게 감소시킴

❖ 탄소원자가 페라이트 격자를 변형시켜서 전위이동을 방해 → 강화

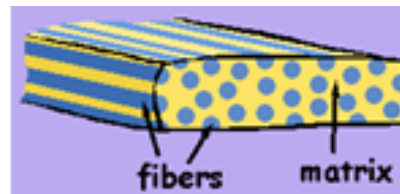
④ 석출강화

❖ (100)면에 탄소원자 집합체가 형성되어 전위이동 방해 → 강화

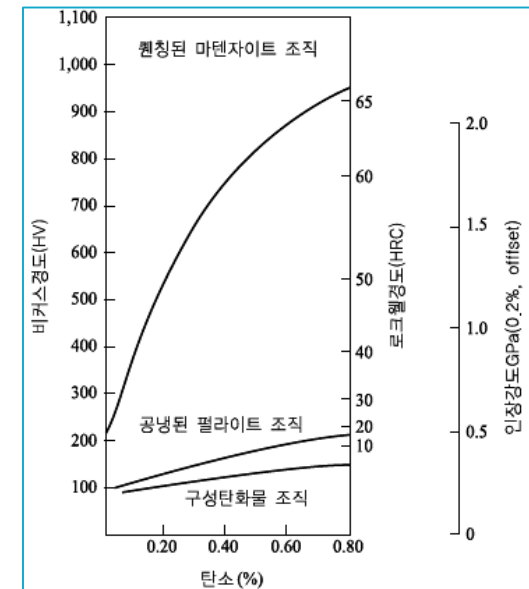
➤ 섬유강화 합금

✓ 섬유강화금속: 금속 + 섬유 (가늘고 긴 형태의 물질)

→ 전위이동 방해받음 → 강도 증가



섬유강화 복합재



5장. 강의 강화 및 온도에 따르는 성질

A. 금속재료의 강화 방법

- ① 가공에 의한 강화
- ② 결정립의 미세화에 의한 강화
- ③ 합금에 의한 강화
- ④ 석출강화 및 분산강화
- ⑤ 그 외의 강화법

B. 저온에서의 기계적 성질

C. 고온에서의 기계적 성질

- ① 청열취성
- ② 크리프
- ③ 철강의 고온산화

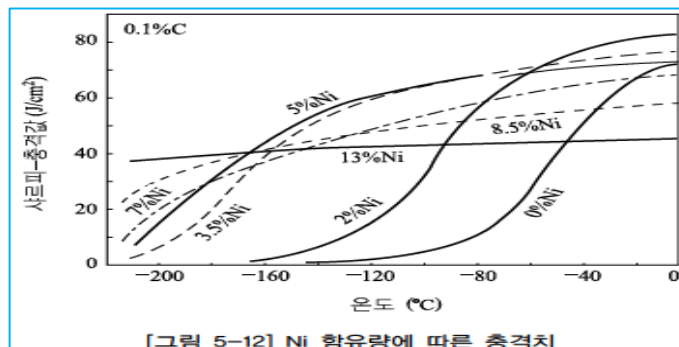
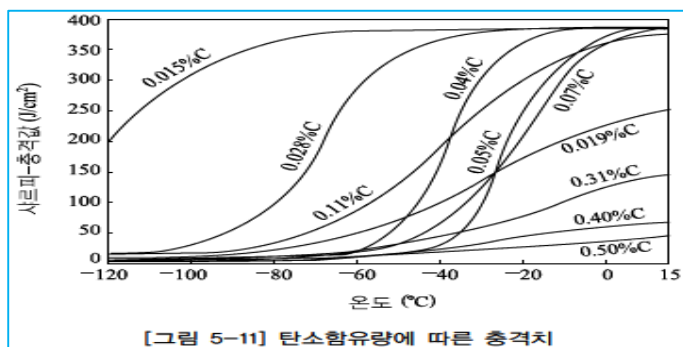
5-B. 저온에서의 기계적 성질

➤ 저온 취성

- ✓ 천이온도보다 낮은 온도에서 금속의 인성이 크게 약화되는 특성 → 취성파괴
- ✓ **천이 온도**: 온도에 따른 인성실험에서 충격값이 급격하게 내려가는 온도
- ✓ bcc 구조 재료에서 쉽게 발생: 철강재료
- ✓ fcc 구조 재료에서 덜 발생: Al, Cu, Ni, 오스테나이트강
- ✓ (비교: 저온에서 인장강도, 경도 등은 큰 변화 없음)

➤ 천이 온도를 낮추는 조건 → 저온취성 문제가 적어지는 조건 (강재료)

- ✓ 탄소 함유량이 적을수록
- ✓ Ni, Mn 함유량이 증가할수록 (액화가스용 설비 재료로 Ni 함유한 강 사용)
- ✓ 결함입자가 작아질수록
- ✓ 탄화물이 강 조직 내에 골고루 분포될수록: 열처리(담금질 후 불림)함
- ✓ 천이온도 순서: 미세페라이트 < 결정페라이트 < 마텐자이트조직



5-C. 고온에서의 기계적 성질: ① 청열취성

➤ 청열취성

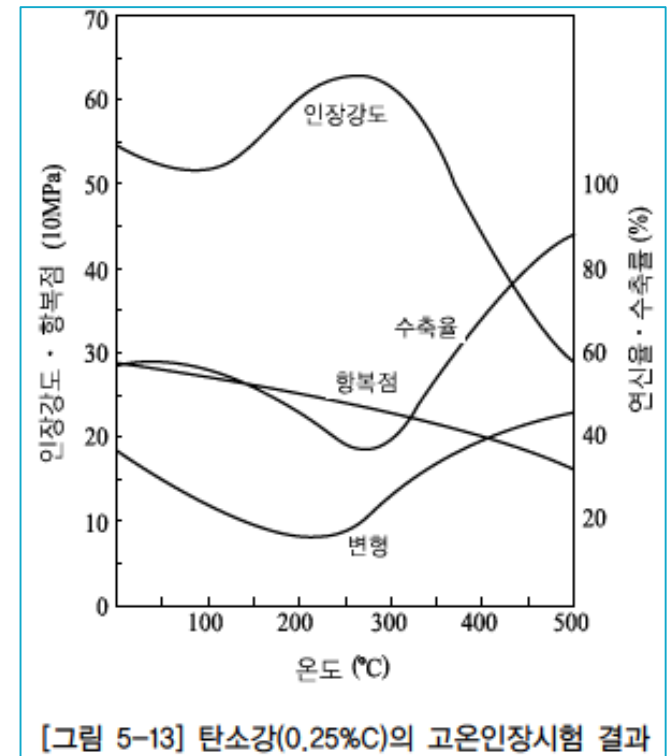
- ✓ 탄소강이 250~350℃ 부근에서 상온보다 부서지기 쉽게 되는 현상
 - ❖ 인장강도는 증가하나 단면수축율은 감소

➤ 청열취성 원인

- ✓ 침입형 고용원소인 C와 N에 기인
- ✓ 예) 림드강

➤ 청열취성 감소

- ✓ Al, Ti 등이나 C와 N을 탄화물과 질화물로 고정
- ✓ 예) 킬드강



5-C. 고온에서의 기계적 성질: ② 크리프

➤ 크리프

- ✓ 고온에서 일정응력이 가해졌을 때 시간에 흐르면서 변형이 진행되는 현상

➤ 크리프 곡선

- ✓ 일정온도에서 일정하중을 가하고 얻은 시간-변형률 측정 결과
- ✓ 초기신장: 부하순간 탄성변형+소성변형이 일어남 (상온: 시간에 따라변화없다)

① 1차 크리프 (천이크리프)

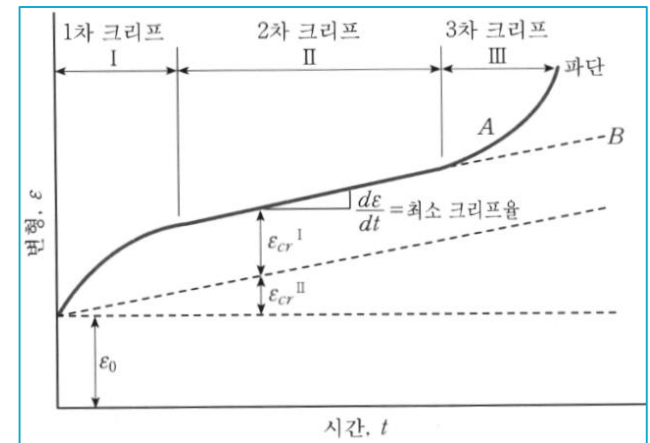
- ❖ 시간에 따라 변형이 진행되고 변형률이 감소함

② 2차 크리프 (정상크리프)

- ❖ 일정한 변형률로 변형이 진행됨

③ 3차 크리프 (가속크리프)

- ❖ 시간에 따라 변형률이 증가하다 시료가 파단됨



5-C. 고온에서의 기계적 성질: ② 크리프

➤ 크리프 현상이 일어나는 기구

① 1차 크리프 (천이크리프)

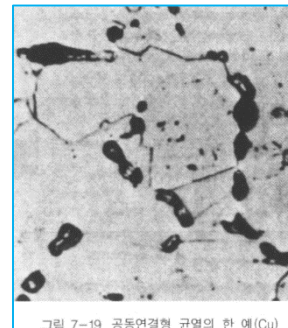
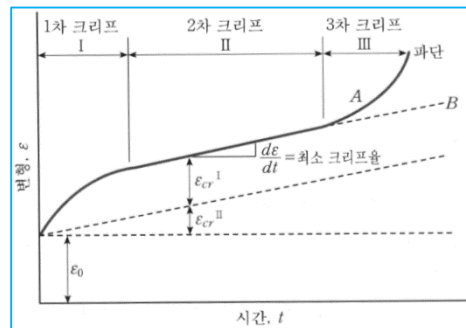
- ❖ 시간에 따라 변형이 진행되고 변형률이 감소함
- ❖ 가공경화로 묶였던 전위가 고온에서 응력 하에서 이동 → 변형 진행 → 전위가 많아져 서로 엉킴 → 크리프속도 감소

② 2차 크리프 (정상크리프)

- ❖ 일정한 변형률로 변형이 진행됨
- ❖ 가공경화와 회복(고온)에 의한 연화가 평형을 이룸 → 크리프 속도 일정

③ 3차 크리프 (가속크리프)

- ❖ 시간에 따라 변형률이 증가하다 시료가 파단됨
- ❖ 원자공공 농도 증가 → 원자확산 빠름 → 전위이동 쉬움 → 크리프속도 증가
- ❖ 원자공공이 결정립계에 모여 공동이 결합 → 미세균열 형성 → 파단



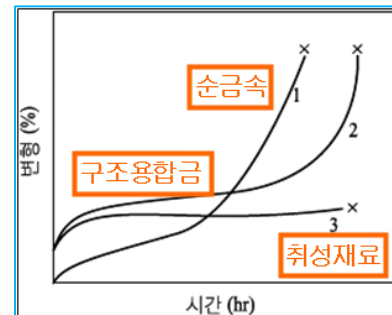
5-C. 고온에서의 기계적 성질: ② 크리프

➤ 크리프 현상에 영향 미치는 조건

- ✓ 온도가 높을수록, 응력이 증가할수록 크리프 현상이 두드러짐

➤ 재료에 따른 크리프 곡선 특성

- ✓ 순금속: 정상단계 짧다
- ✓ 취성재료: 가속단계없이 갑자기 파단



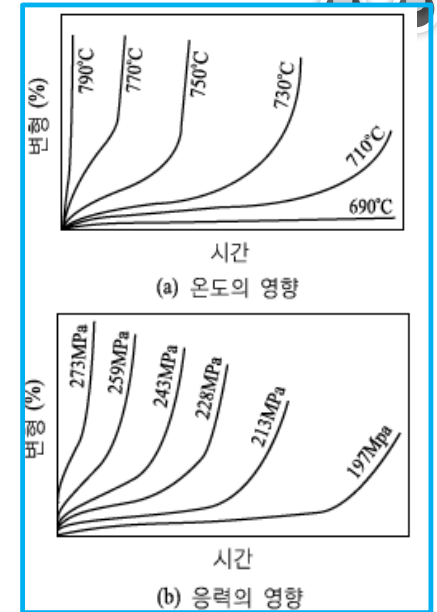
➤ 크리프 특성 표기법

- ✓ 온도, 응력조건 표기
- ✓ 크리프강도

- ❖ 일정온도, 일정한 하중에서, 크리프에 의해 기울기가 규정한 값에 이르는 응력
- ❖ 예) T_0 온도에서 0.1%/1000hr의 크리프 강도가 50MPa : T_0 온도, 50MPa의 응력에서 1000시간에 0.1%의 비율로 정상크리프를 일으킬 때

✓ 파단강도

- ❖ 어떤 규정된 시간에 크리프 파단을 나타내는 응력
- ❖ 예) T_0 온도에서 1000시간의 크리프 파단강도가 50MPa : T_0 온도에서 1000시간에 파괴되는 응력이 50MPa 일때



5-C. 고온에서의 기계적 성질: ③ 철강의 고온산화

➤ 철강의 고온산화

- ✓ 고온에서 철의 표면이 쉽게 산화되는 현상
- ✓ 버나둬어택
 - ❖ 보일러기관등 중유 연소시에 생성물 중 융점이 낮은(약 680°C) V_2O_5 이 철 표면에 부착 → 철에 산소를 제공 → 철 표면을 산화 (FeO_x 형성) 시키는 현상
 - ❖ 유사한 현상이 $\text{MnO}_3(759^{\circ}\text{C})$, $\text{BiO}_3(817^{\circ}\text{C})$ 등에 의해서도 발생

➤ 철의 고온산화를 방지하는 방법

- ✓ 표면에 FeO_x 보다 안정된 산화물 보호막을 형성시킴
 - 공기 중에 있는 산소를 붙잡아 두어 철이 산소와 반응하는 것을 막음
- ✓ 예: AlO_x , CrO_x , SiO_x

