

Chapter6

# Properties and Applications of Metals

강의명: 기계재료공학 (MFA9009)

---

정영웅

창원대학교 신소재공학부

[YJEONG@CHANGWON.AC.KR](mailto:YJEONG@CHANGWON.AC.KR)

연구실: #52-208    전화: 055-213-3694

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

# Intro

---

- 새로운 재료의 개발이 주 업무가 아닌 엔지니어라면 재료와 관련된 대부분의 문제는 특정한 응용에 필요한 적절한 특성을 갖는 재료를 선택하는 것이다. 재료 선택의 결정에 참여하는 엔지니어는 가능한 선택에 대한 지식을 가지고 있어야 한다.

- 이번 장에서는 중요한 상용(commercial) 합금의 종류와 성질 그리고 응용에 있어서의 한계점들을 간단히 살펴보도록 하겠다.

- 금속합금은 크게 두 종류로 나뉜다. 철합금(ferrous alloy)과 비철합금(non-ferrous alloy).

# 철합금 Ferrous alloy

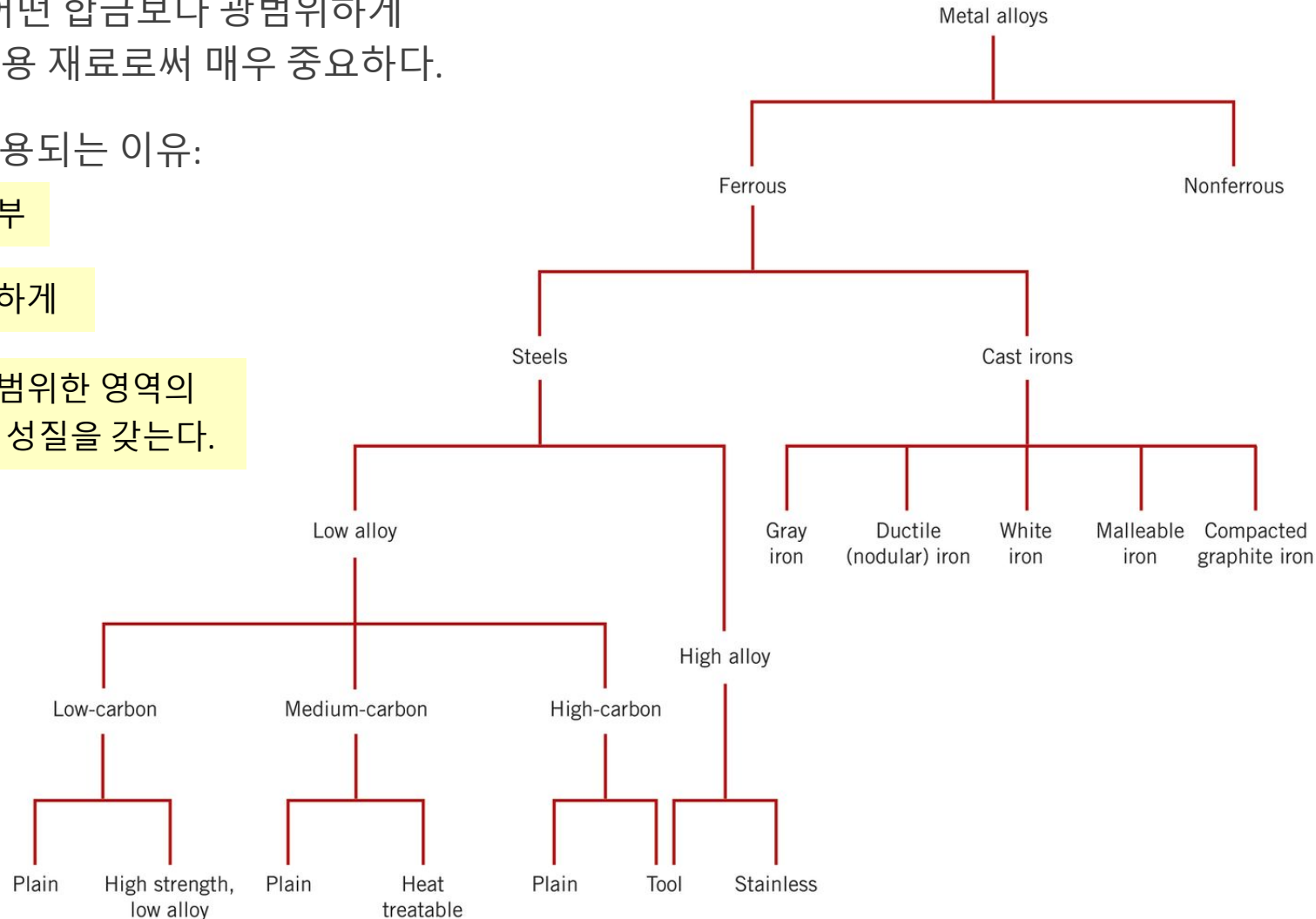
■ 주 성분이 Fe. 다른 어떤 합금보다 광범위하게 사용되며, 공학 구조용 재료로써 매우 중요하다.

■ Fe이 광범위 하게 사용되는 이유:

1) 지구상에 풍부

2) 비교적 저렴하게

3) 철합금은 광범위한 영역의 기계적/물성적 성질을 갖는다.



# Metal alloys

## Metal Alloys

Ferrous

Nonferrous

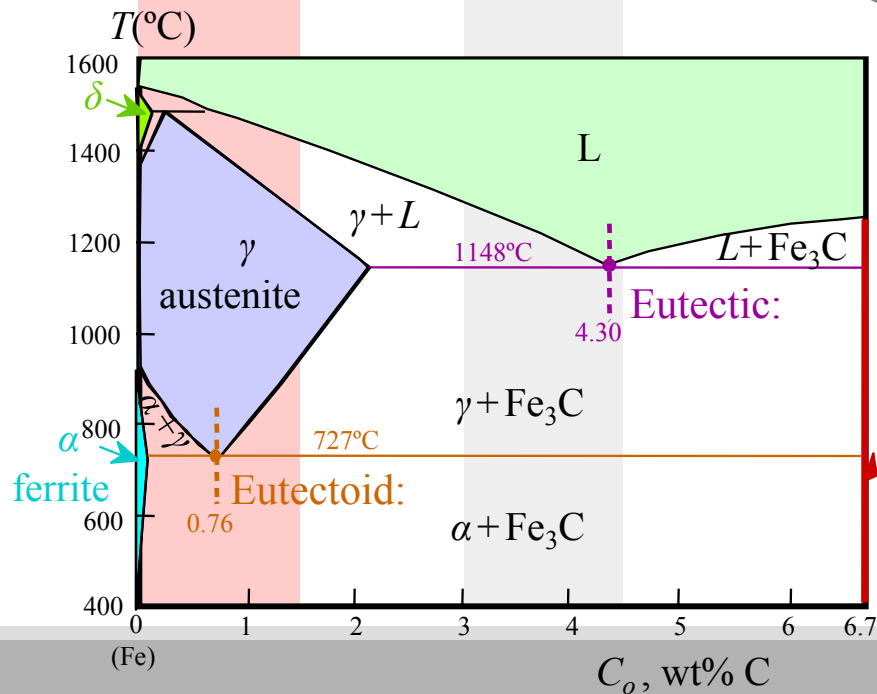
Steels

<1.4 wt% C

Cast Irons

3-4.5 wt% C

microstructure: ferrite, graphite/cementite



Fe<sub>3</sub>C도 사실은 Meta stable;  
Fe<sub>3</sub>C → 3Fe + C 로 바뀐다 (아주 긴 시간 필요)

# 강鋼 (steel)

Fe-C alloy (Carbon wt% < 1.4% - 탄소 농도에 따라 저탄소, 중탄소, 고탄소 강 분류)

탄소 외에도 상당히 많은 양의 다른 합금 원소(alloying element)를 포함한다.

조성(chemical composition)과 열처리(heat treatment)에 따라 다양한 종류가 존재한다.

기계적 성질은 탄소의 함량(carbon content)에 큰 영향을 받는다.

순탄소강(plain carbon steel)은 Carbon이외에 잔류하는  
미량의 타원소 존재 (그리고 약간의 망간Mn)



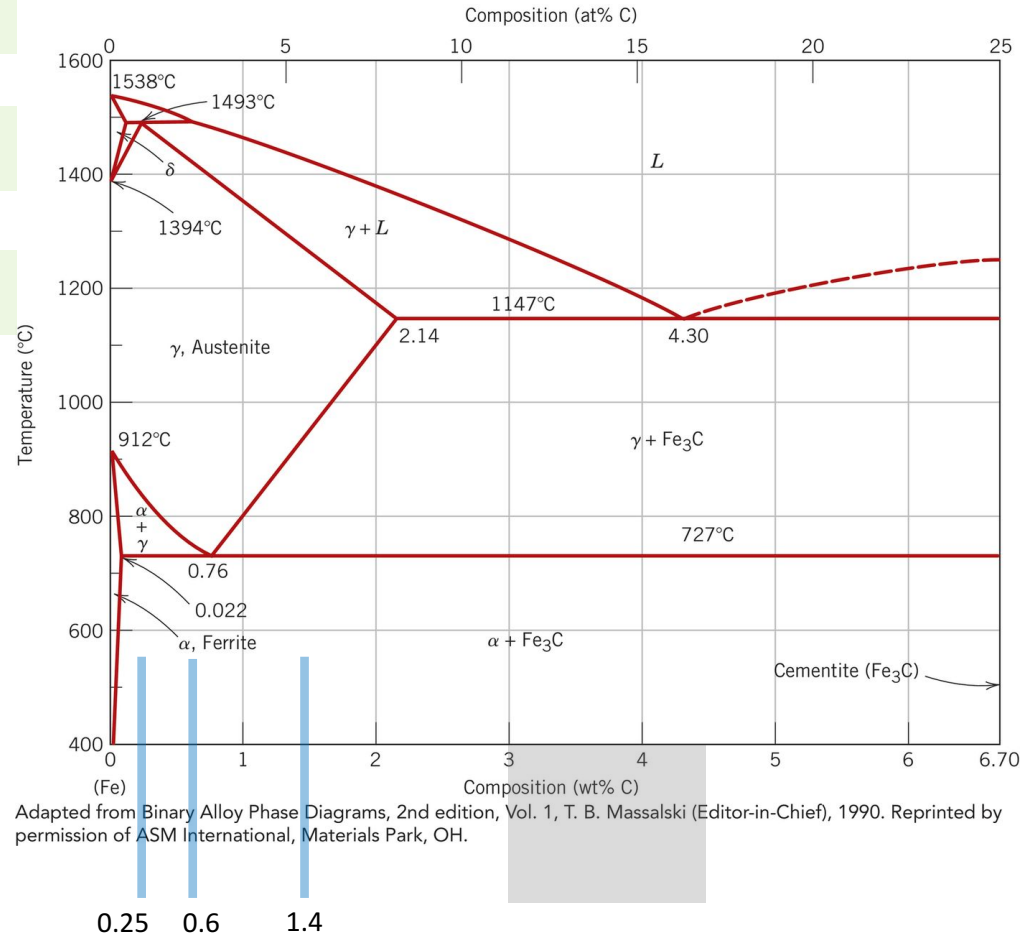
합금강(alloy steel)은 상대적으로 더 많은 합금 원소를 특정 농도만큼 첨가한다.

# 탄소 농도에 따른 강 분류

저탄소강 <0.25

중탄소강 <0.6

고탄소강 <1.4



Steels  
<1.4 wt% C

Cast Irons  
3-4.5 wt% C

# 탄소외의 합금 원소 여부에 따른 분류

강 (steel)의 분류법은 두가지:

- 탄소 함유량에 의한 분류
- 탄소에 합금 원소가 있는지 없는지

|      |       |
|------|-------|
| 저탄소강 | <0.25 |
|------|-------|

|      |      |
|------|------|
| 중탄소강 | <0.6 |
|------|------|

|      |      |
|------|------|
| 고탄소강 | <1.4 |
|------|------|

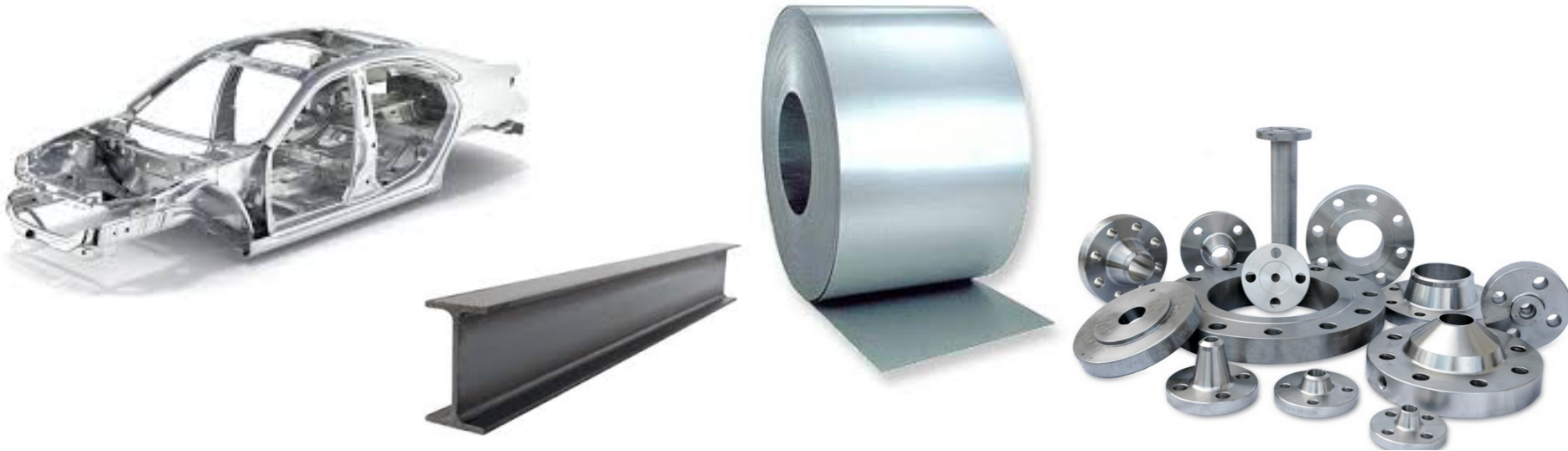
Plain-carbon steel (Fe + C) - **순탄소강**

Alloy steel (Fe + C + Ni, Cr, Mo, Mn, V, Ti, ...) - **합금강**

# 저탄소강

- 강(steel)중에 가장 많이 생산된다 (Carbon ~ 0.4 wt%)  
Martensite 열처리에 반응하지 않는다.
- Microstructure(미세구조)는 주로 Ferrite+Pearlite
- 우수한 연성과 인성
- 기계가공성이 좋다 – 연성이 높으니까
- 용접성이 좋다 – 합금 원소가 많지 않다!
- 다양한 응용 (차체, 건축, 판재, 강통 ...)

HSLA: **H**igh **S**trength **L**ow-**A**lloyed carbon steel – addition of Cr, V, Ni, Mo.  
순 저탄소(plain low-carbon steel)에 비해 hard, strong. 내부식성이 상대적으로 높다





# 중탄소강

Medium-carbon steel; 탄소 함유량이 0.25~0.60 wt%

열처리 과정:

Austenitizing (오스테나이트 상으로 변태 – 냉각 열처리/상변태의 시작 상태로)

Quenching (급랭 – martensite 생성)

Tempering (martensite의 취성을 낮추고, 연성과 인성을 높이는 열처리)

- Plain medium-carbon steel (즉 탄소외의 다른 합금 원소 없는 중탄소강)의 경우 위의 열처리가 표면에 국한하여 나타난다. 내부까지 tempered martensite를 갖기 위해서는 pearlite/bainite nose를 더욱 뒤로 shift할 필요 – Cr, Ni, Mo 등을 첨가.

- Hardenability (경화능 개념)

| AISI/SAE<br>Designation <sup>a</sup> | UNS<br>Designation | Composition Ranges<br>(wt% of Alloying Elements in Addition to C) <sup>b</sup> |           |           |                             |
|--------------------------------------|--------------------|--|-----------|-----------|-----------------------------|
|                                      |                    | Ni   | Cr        | Mo        | Other                       |
| 10xx, Plain carbon                   | G10xx0             |  |           |           |                             |
| 11xx, Free machining                 | G11xx0             |  |           |           | 0.08–0.33 S                 |
| 12xx, Free machining                 | G12xx0             |  |           |           | 0.10–0.35 S,<br>0.04–0.12 P |
| 13xx                                 | G13xx0             |  |           |           | 1.60–1.90 Mn                |
| 40xx                                 | G40xx0             |  |           | 0.20–0.30 |                             |
| 41xx                                 | G41xx0             |  | 0.80–1.10 | 0.15–0.25 |                             |
| 43xx                                 | G43xx0             | 1.65–2.00  | 0.40–0.90 | 0.20–0.30 |                             |
| 46xx                                 | G46xx0             | 0.70–2.00  |           | 0.15–0.30 |                             |
| 48xx                                 | G48xx0             | 3.25–3.75  |           | 0.20–0.30 |                             |
| 51xx                                 | G51xx0             |  | 0.70–1.10 |           |                             |
| 61xx                                 | G61xx0             |  | 0.50–1.10 |           | 0.10–0.15 V                 |
| 86xx                                 | G86xx0             | 0.40–0.70  | 0.40–0.60 | 0.15–0.25 |                             |
| 92xx                                 | G92xx0             |  |           |           | 1.80–2.20 Si                |

# 고탄소강

---

- High-carbon steel; 탄소 함유량이 0.60~1.40 wt%
- 탄소강중에서 가장 경하고 강하다(일반적으로 탄소 함유량 높을 수록). 그리고 가장 낮은 연성.
- 높은 내마모성이 요구될 때 (wearability)
- 공구강(tool steel), 다이용 강(die steel)
- Cr, V, W, Mo (고탄소 합금강)

# 스테인리스강 (대표적인 합금강)

---

- 내부식성 매우 우수; 표면이 미려
- 필수적인 합금 원소는 Cr. 적어도 11 wt% 이상 필요 (passive film)
- 주된 상이 Martensite or Austenite or Ferrite; 따라서 주된 상에 따라 stainless 세 종류로 나뉠 수 있다.
- Austenite stainless steel이 가장 흔하게 많이 쓰인다. Ni 필요 18-8 (Cr, Ni wt%); 최근 Ni 가격 상승으로 대체 STS 개발 요구된다.
- Austenite stainless steel은 자성이 없다.

# Review on nomenclature (North America)

## Nomenclature for steels (AISI/SAE)

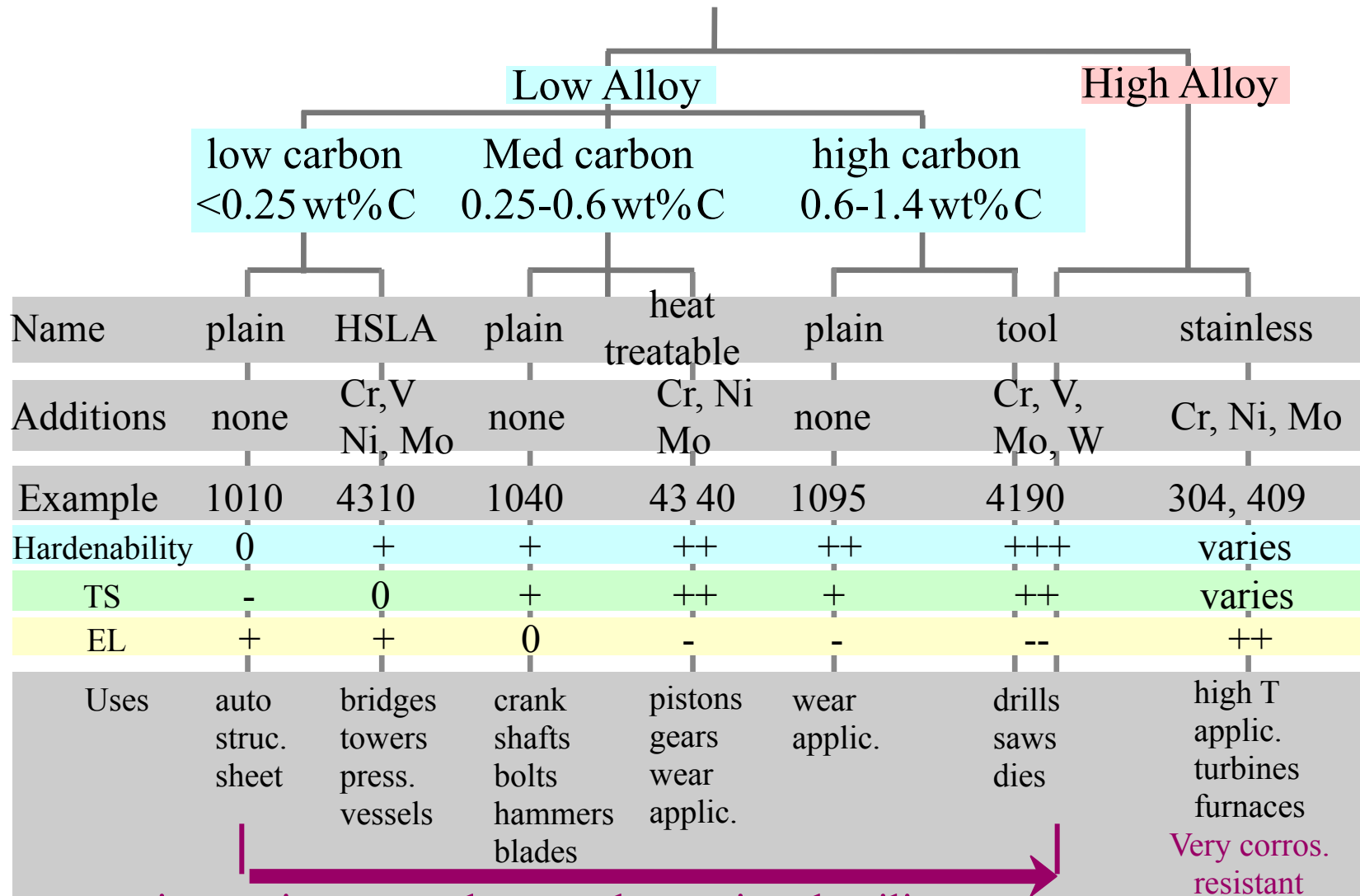
- 10xx Plain Carbon Steels
- 11xx Plain Carbon Steels (re-sulfurized for machinability-절삭 가공 쉽게하기 위해)
- 15xx Mn (1.00 - 1.65%)
- 40xx Mo (0.20 ~ 0.30%)
- 43xx Ni (1.65 - 2.00%), Cr (0.40 - 0.90%), Mo (0.20 - 0.30%)
- 44xx Mo (0.5%)

where xx is wt% C x 100

example: 1060 steel – plain carbon steel with 0.60 wt% C

Stainless Steel >11% Cr

# Steels

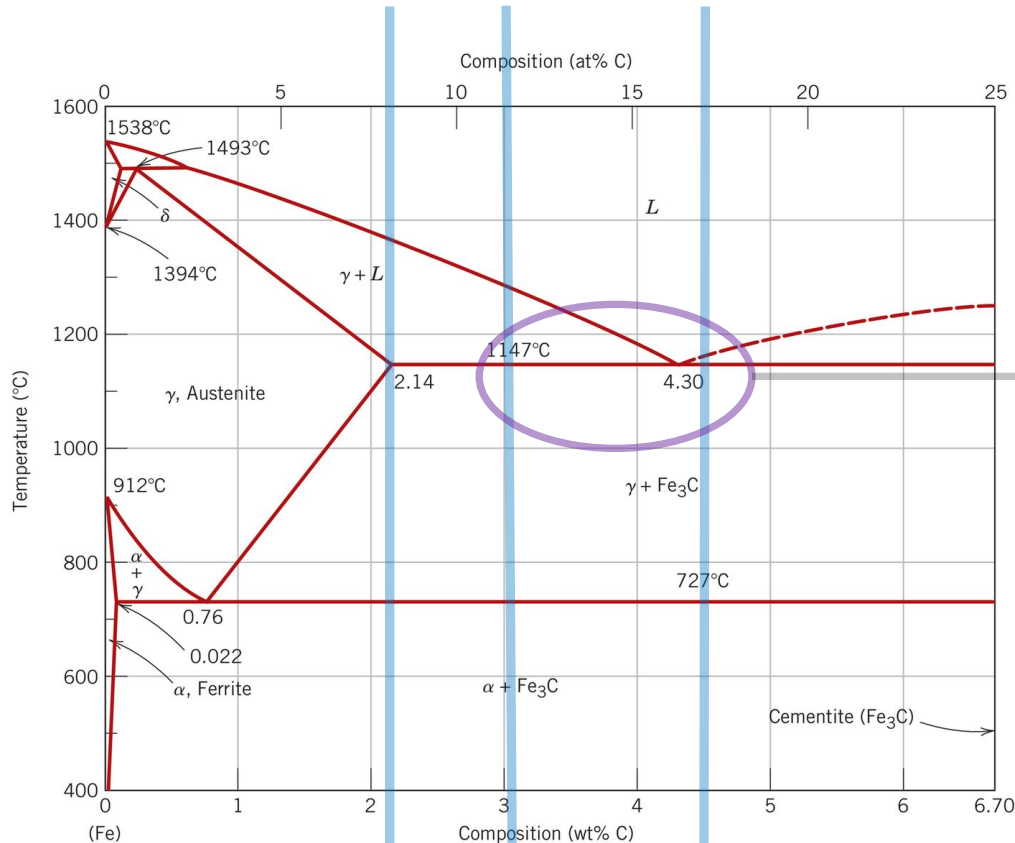


increasing strength, cost, decreasing ductility

Based on data provided in Tables 13.1(b), 14.4(b), 13.3, and 13.4, *Callister & Rethwisch 9e*.

# Cast iron (주철)

- 탄소 함량이 **2.14 wt% 이상**인 ferrous alloy (철합금)



Adapted from Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.

Cast iron은 용융 온도가 steel에 비해 현저히 낮다.  
(1493  $\leftrightarrow$  1147)

따라서, 주조(casting)에 적합;

사실 Brittle한 경우가 많아서  
주조 외의 가공법을 적용하기  
힘든 측면도 있다.

대대분 주철: 3~4.5 wt% carbon

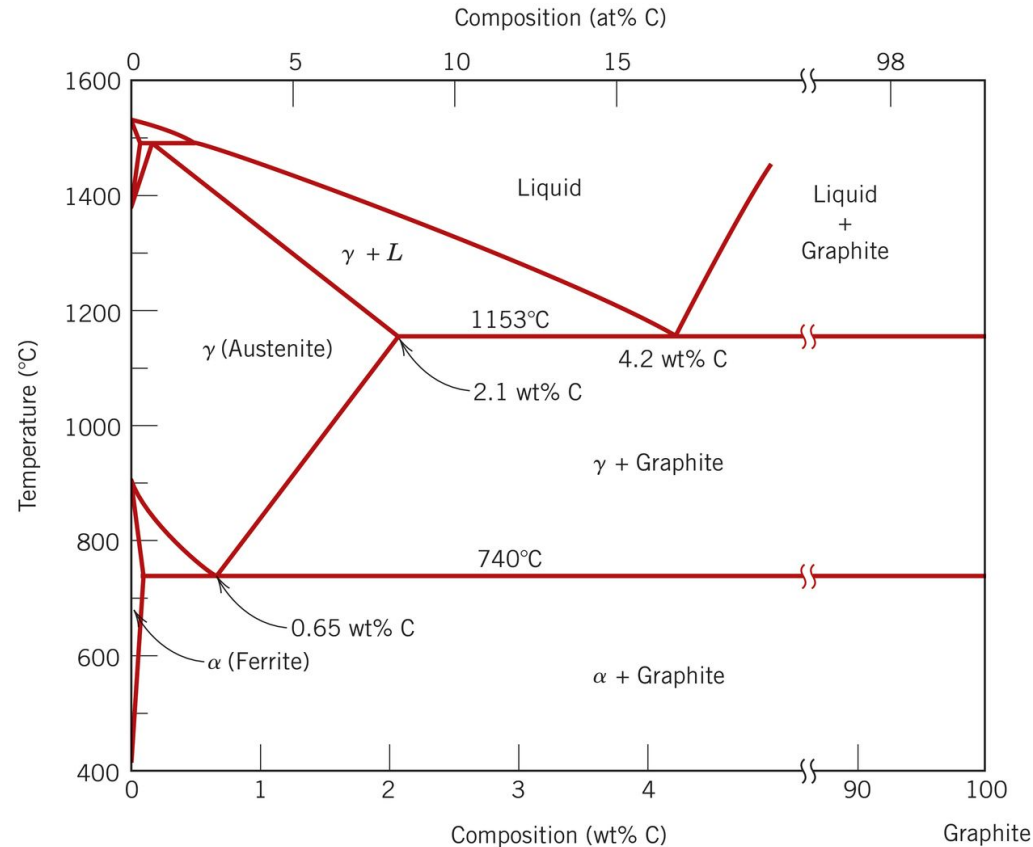
# Fe-C phase diagram (revisited)

앞서 Fe-C 평형 상태도에서 metastable한  $\text{Fe}_3\text{C}$ 를 평형상이라 가정하고 나타내었다. 주철의 경우 cementite가 열처리에 의해 평형상인 흑연(graphite)으로 변태하는 다음의 반응이 발생하는 경우가 종종있다:



따라서 다음과 같이 Fe-C 상태도가 더욱 적절하다.

다만 흑연의 생성되는 경향은 **조성과 냉각 속도(열처리 조건)**에 영향을 받는다. Si가 흑연 생성을 촉진하는 역할을 하기도.



Adapted from Binary Alloy Phase Diagrams, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.

# 회주철(gray cast iron)

## ■ 조성:

- Carbon: 2.5~4.0 wt%
- Silicon : 1.0~3.0 wt% (Si: 흑연 생성 촉진)

## ■ 미세구조

- 흑연(graphite)이 박편의 형태 – 콘후레크 (corn flake) 모양
- 주로  $\alpha$ - ferrite나 pearlite의 matrix에 graphite가 박혀 있는 형태

## ■ 물성

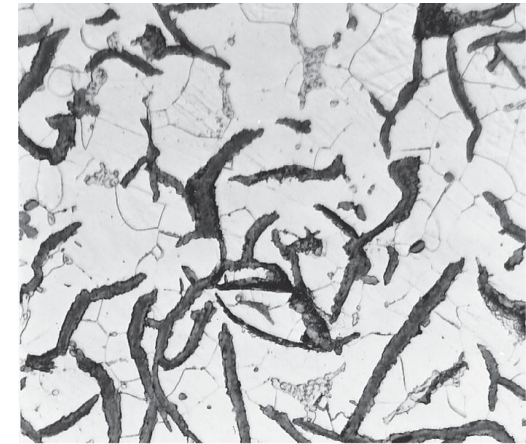
- 흑연의 박편 모서리가 뾰족하여 응력집중 인자 역할.
- 인장 응력상태에서 낮은 강도, 그리고 brittle
- 압축 응력상태에서 비교적 높은 강도, 연성.
- 진동에너지 흡수에 매우 효과적

## ■ 응용

- 진동에 노출되기 쉬운 기계의 지지 구조; 무거운 장비;

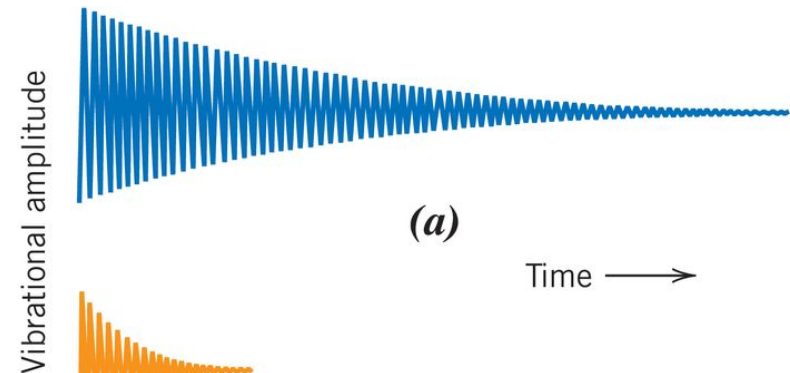
## ■ 기타:

- 매우 저렴. 마찰에 대한 내성이 좋다. 고온에서 유동성이 좋아 복잡한 형태의 제조 가능.



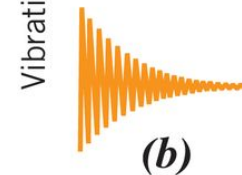
(a)

20  $\mu$ m



(a)

Time →



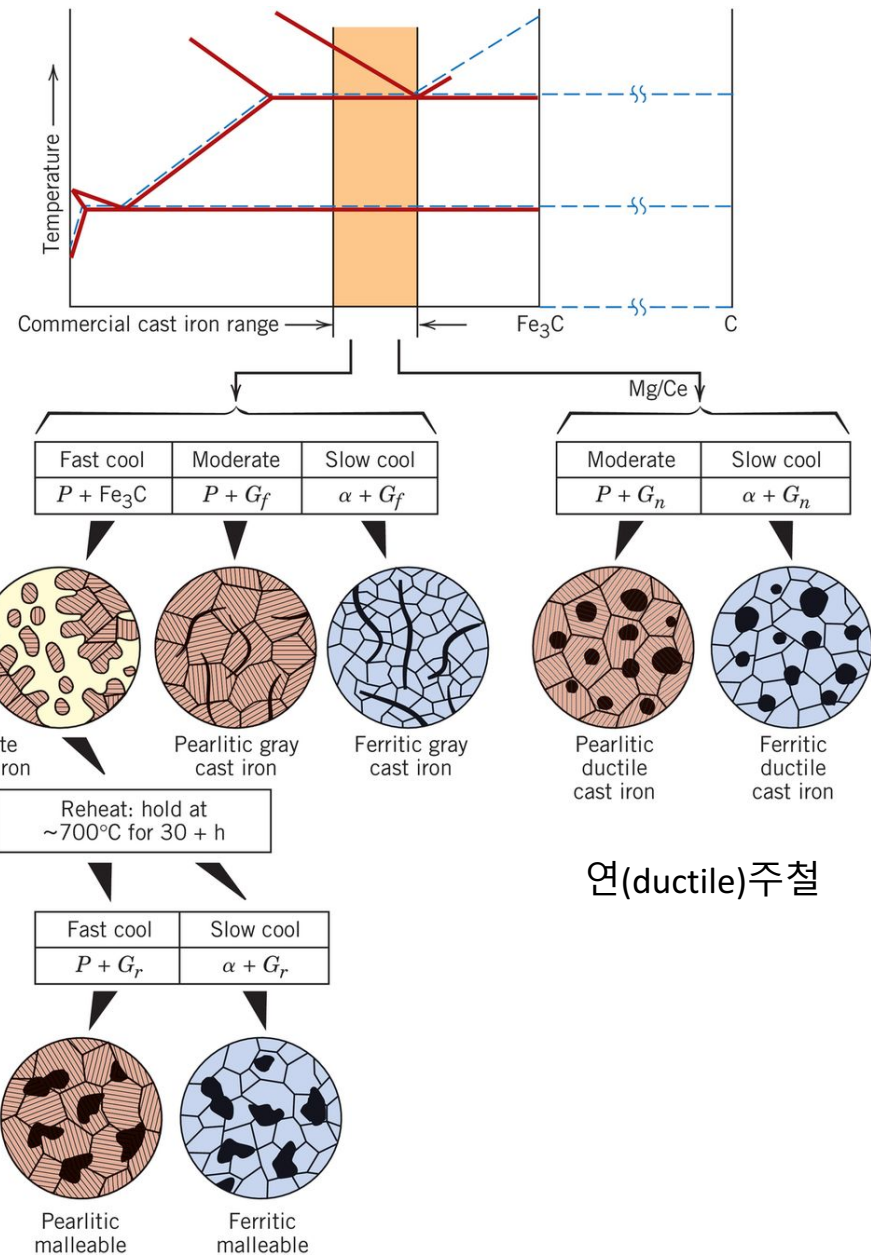
(b)

From Metals Engineering Quarterly, February 1961.  
Copyright © 1961. Reproduced by permission of ASM International, Materials Park, OH.



# 회주철의 미세구조 조정

- 조성변화와 다양한 열처리를 통해
  - 연성(또는 구상) 주철
  - 백주철
  - 가단주철 (단조가 가능한 주철)
  - 조밀 흑연 주철(compact graphite iron; CGI)



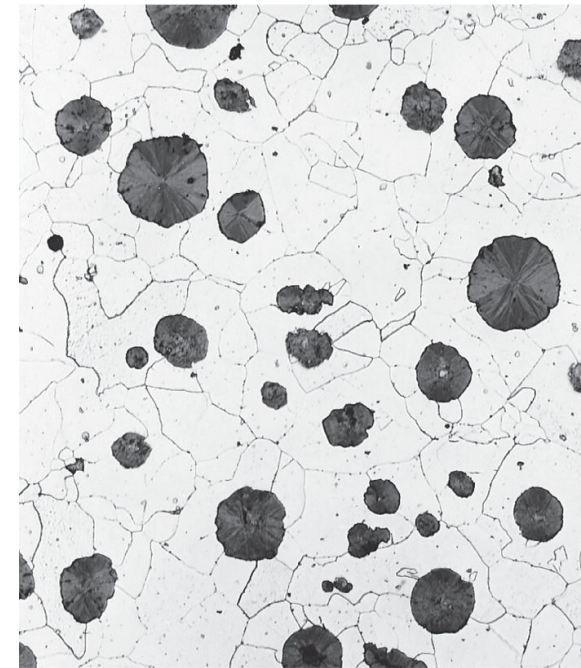
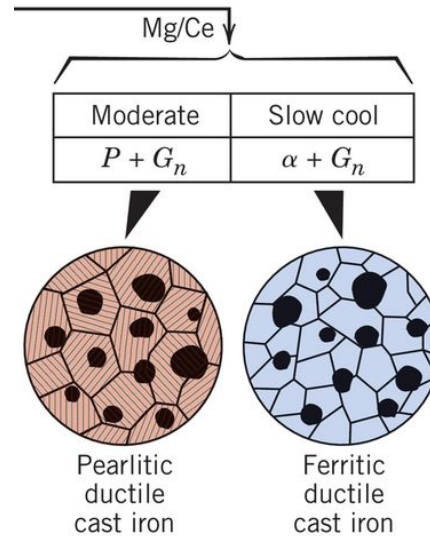
Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, The Structure and Properties of Materials, Vol. I, Structure, p. 195. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York.

# 연성(또는 구상) 주철

마그네슘/세슘 첨가

Ductile iron; or nodular iron

- 일반적으로 pearlite가 matrix(모체)이나, 700°C 장시간 열처리후 ferrite 기지로 바뀐다 (pearlite의  $\text{Fe}_3\text{C}$ 내 carbon이 diffusion 통해 뭉쳐 graphite 형성)
- Ductile한 물성.



(b)

50  $\mu\text{m}$

courtesy of C. H. Brady and L. C. Smith, National Bureau of Standards, Washington, DC (now the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).

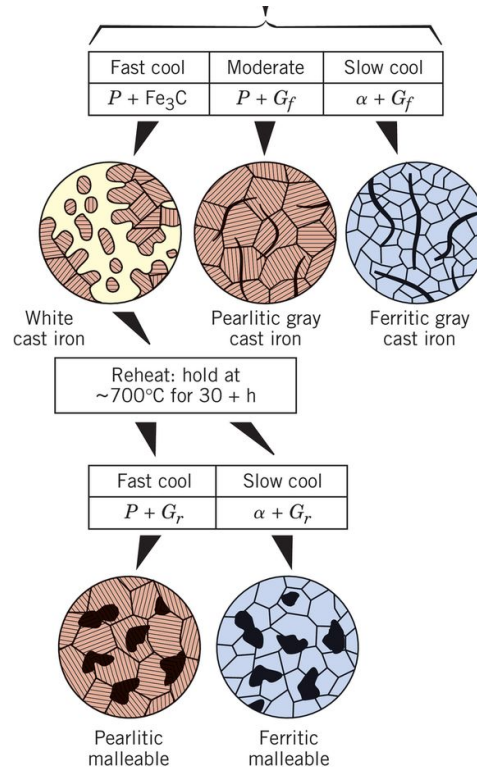
# 백주철

■ 낮은 Si (1.0wt% 미만) 주철에서 급속 냉각을 통해 cementite상을 얻는다. 이 합금의 파단면이 백색의 외관을 띄어 백주철(white cast iron)이라고 부른다.

■ 두꺼운 주철의 생산 공정중에 급속히 냉각될 수 있는 표면층에 백주철이 보일 수도 있다. 회주철은 그 내부(interior)에서 더욱 느리게 냉각되는 영역에서 생성. Cementite상의 비율이 높다 매우 brittle하지만 매우 강하다.

■ 응용:

- 매우 단단하고 표면의 강한 내마모성이 필요한 분야. 압축기의 롤러
- 가단 주철 생산의 주원료.



(c)

20  $\mu\text{m}$

courtesy of Amcast Industrial Corporation.

# 회주철/백주철 미관

---

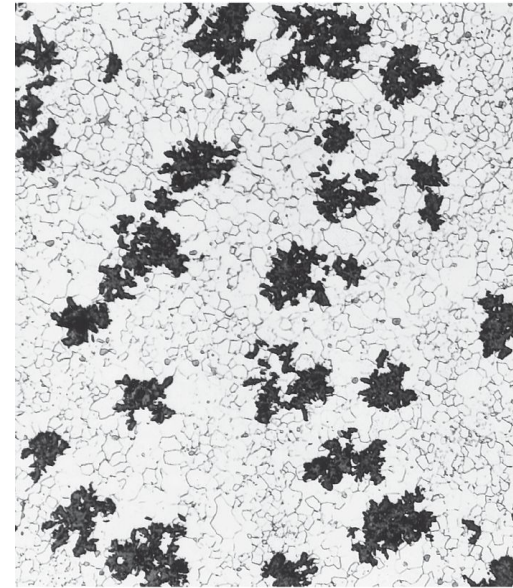
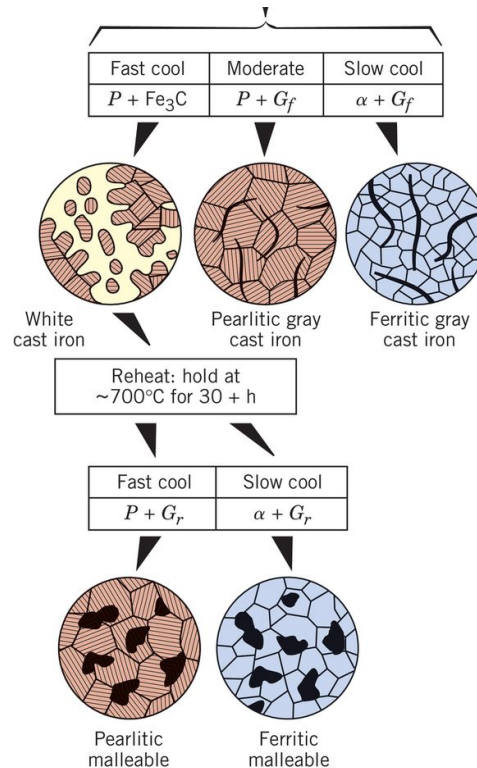




# 가단 주철

- 백주철을 800~900°C 에서 가열하면 cementite가 분해되어 흑연 생성. 흑연상은 냉각속도에 따라 응집형(cluster) 또는 장미형(rosette)으로 나타난다.

- 높은 강도와 상당한 연성 (따라서 단조 가능 - 가단이라는 명칭)

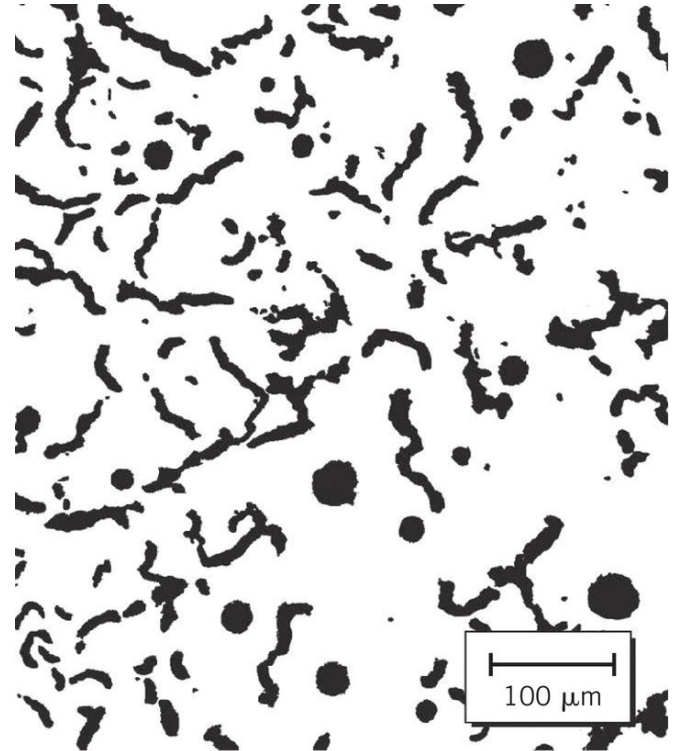


(d) 100 μm

reprinted with permission of the Iron Castings Society, Des Plaines, IL.

# 조밀 흑연 주철 (compacted graphite iron, CGI)

- 회주철(박편)과 연성(구상)주철의 중간 형태의 미세 조직을 가진다.



(e)

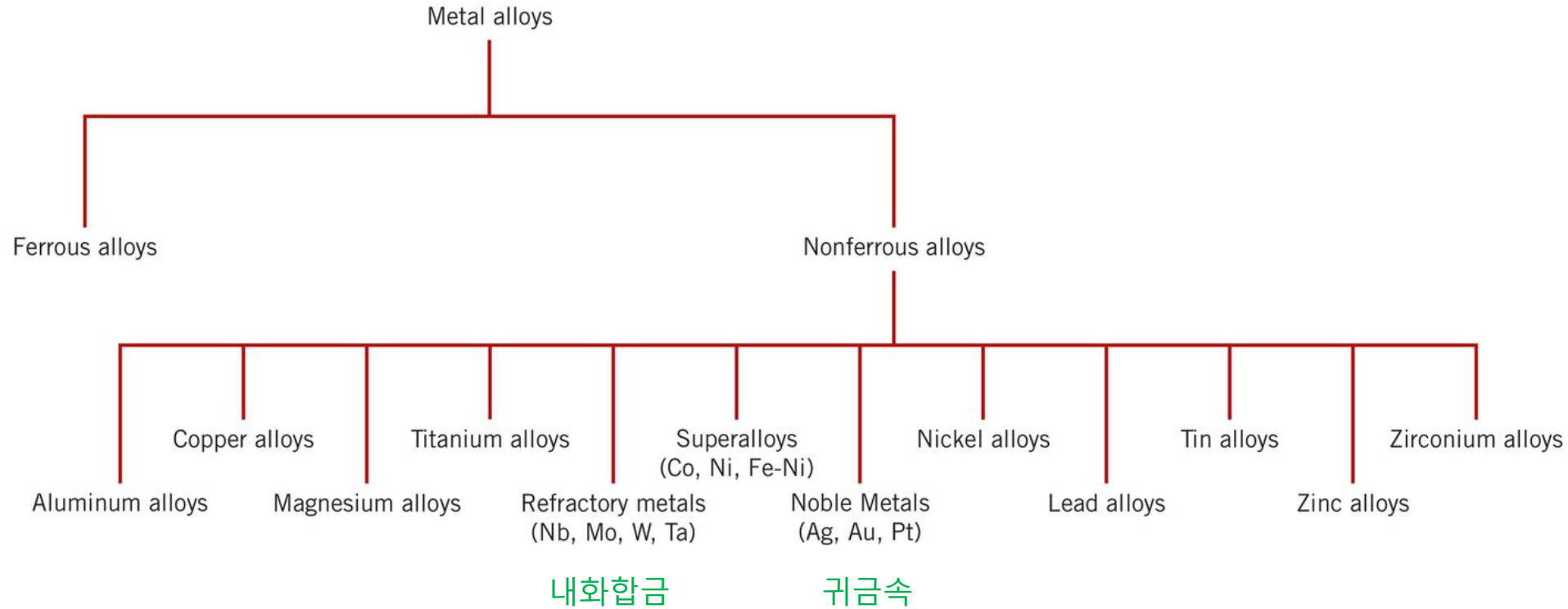
courtesy of SinterCast, Ltd.

# Non ferrous alloys

---

- 철합금의 단점
  - 상대적으로 높은 밀도
  - 낮은 전기 전도도
  - 일상 분위기에서의 낮은 내부식성 (스테인레스 제외하고)
  - 더 이상적인 물성을 가진 합금이 필요한 곳이 있다.
- 성형/가공성에 따른 분류
  - 주조합금(cast alloy); brittle하여 가공에 필요한 소성변형이 어렵다.
  - 단조합금(wrought alloy): 소성 변형이 가능한 경우
- 열처리에 의해 기계적 강도가 높아질 수 있는 합금을 우리는 ‘열처리가 가능한 합금’이라 한다 – heat treatability (열처리 가능성)

# 다양한 비철합금





# 구리 및 구리합금

---

- 순수 구리는 연성이 높아 냉간 가공이 매우 쉽다. 하지만 절삭이 어렵다.
- 내부식성이 높다.
- 구리 합금은 대부분 열처리에 의해 경화나 강화되지 않는다. 따라서 냉간 가공을 통한 물성 향상이 주로 행해진다.
- 합금:
  - 황동 (brass): Substitutional alloy with Zinc
  - 청동 (bronze): Cu + Tin, Al, Si, Ni – 황동보다 단단하고 좋은 내부식성.
  - Be-Cu: 우수한 특성 ; 높은 인장 강도와 전기적 성질. 내부식성, 내모마성 등이 높다. Heat-treatable. 하지만 제조 원가가 높다 (Be 비쌈)

# 알루미늄 및 알루미늄 합금

---

- FCC 결정구조
- 밀도가 낮다 ( $2.7 \text{ g/cm}^3$  ; steel:  $7.9 \text{ g/cm}^3$ )
- 높은 전기/열전도성
- 대기에서 높은 내부식성;
- 비교적 높은 연성으로 성형 가공이 용이하다 – 알루미늄 호일
- 기계적 강도는 냉간 가공과 합금화에 의해 증가. 석출 경화를 일으키는 합금도 있다.
- 저밀도 경량 합금 (+Mg, Ti)
- 명명법
  - 네자리 숫자 (합금) + 열처리 기호

# 마그네슘 및 마그네슘 합금

- 밀도가 매우 낮은 구조용 금속 ( $1.7 \text{ g/cm}^3$ )
- 비행기 부품, 차체의 경량화를 위한 금속으로써 많은 연구가 활발히.
- 내부식성 낮고, 점화가 쉽다 (발화가능성 높음)
- 각종 모바일 기기, 컴퓨터, 자동차 등등.



# 타이타늄과 타이타늄 합금

---

- 비교적 낮은 밀도 ( $4.5 \text{ g/cm}^3$ )
- 높은 용융점 ( $1668^\circ\text{C}$ )
- 인장 강도가  $1400 \text{ MPa}$
- 연성이 높고, 단조, 기계 가공이 가능하다.
- 상온에서 안정한  $\alpha$ 상의 경우 HCP 결정 구조.
- $883^\circ\text{C}$  에서 HCP상이 BCC- $\beta$ 상으로로 변태
- 합금 원소에 의해  $\alpha - \beta$ 상의 안정성이 달라진다.
- 합금으로 인해 상온에 안정화된  $\beta$ 상 타이타늄 합금

# 고용융점 금속

---

- 특별히 높은 용융 온도(melting temperature)를 갖는 금속들을 refractory metal(고용융점 금속)이라고 부른다 - 내열금속
- Nb, Mo, W, Ta 등이 대표적인 고용융점 금속
- Melting T of Nb: 2468 °C, W: 3410 °C
- 텅스텐이 금속중 가장 높은 용융점 가진다.

# 초합금 (superalloy)

---

- 최상의 성질을 갖는 합금- 고온과 가혹한 산화분위기에 장시간 노출되는 비행기의 터빈 부품 등에 사용된다.
- Co, Ni, Fe.
- Inconel, Rene 등이 널리 알려진 superalloy.

# 귀금속 (noble metal)

---

- 산화와 부식에 강하고, 비싸고 ductile. 열에 강한 특징.
- Ag, Au, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Os

# Summary

---

- Steel / Cast iron
- Low/medium/high carbon steels.
- Plain carbon steel / alloy steel (such as stainless steel)
- Cast iron
  - Gray cast iron
  - Ductile cast iron
  - White cast iron
  - Malleable cast iron
- Non ferrous alloys