

\* 이 글은 日本 열처리기술협회 고문 大和久 重雄 박사가 저술한 鋼・熱處理アラカルト(1990刊)의 내용을 번역한 것으로 열처리mechanism를 이해하기 쉬운 내용으로 구성되어 향후 수회에 걸쳐 기술자료로 게재예정입니다.

## 1. 강(鋼) 이란

손 명 진

(주)대성테크

### 1.1 결정구조(結晶構造)

“연인과 오랫동안 사귀고 있어도 그 연인의 기분이라던 가 참모습(약한 점, 강한 점, 태도가 변할 때)을 알지 못하거나 알려고도 하지 않는 사람은 실연을 당하고 만다.

현장에서 일하고 있다면 좋던 싫던 강이라고 하는 것과 교제를 계속하지 않으면 안 된다. 그 연인(?) 강의 참모습을 알지 못하면 생각지도 못한 때에 밀려나게 된다. 강(鋼)도 취성(脆性)이나 강도(強度), 경도(硬度)등을 갖고 있다. 이를 확실히 파악하여 진정한 연인이 되자”

우리가 사용하는 고체금속은 원자로 구성되어 있다고 하는 것은 말할 것도 없다. 이 원자가 마음대로 돌아다니는 것이 아니고 짜여진 틀 속에서 규칙적으로 배열되어 있는 것이다. 만일 원자가 제 맘대로 돌아다닌다고 하면 정해진 형태를 갖추지 못하고 기체 또는 액체가 되고 마는 것이다. 철은 고체이므로 원자도 규칙에 맞추어 일정하게 변함없이 배열되어 있는 것이다.

이와 같은 원자의 규칙적인 배열법을 결정격자(結晶格子)라고 부른다. 어느 금속의 결정격자는 그 금속 특유의 것으로서 금속이 다르면 결정격자도 다르게 된다. 그러나 금속의 결정격자는 대체로 3가지 형태로 나눌 수 있다.

그 3가지란, 체심입방(體心立方, 略語로 B.C.C.라 부른다.), 면심입방(面心立方, F.C.C.), 조밀육방(稠密六方, C.P.H.)이다.

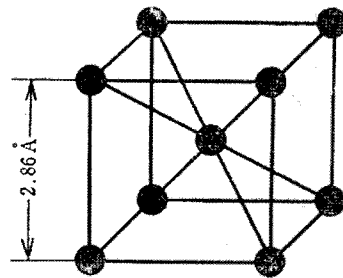


그림 1.1 체심입방격자.

#### 1.1.1 체심입방 - $\alpha$ 철

상온에서의 철은 체심입방이다. 이의 형태는 각설탕과 같은 정육면체로 되어 있고, 그 한 변의 길이는  $\text{\AA}$  Angstrom, (옹스트롬);  $10^{-8}$ cm이라는 단위로  $2.86 \text{\AA}$ , 즉, 1억분의  $2.86 \text{cm}$ 가 된다. 이와 같은 미세한 세계는 X선이 아니면 들여다 볼 수가 없다. 이 작은 각설탕이 철의 결정이고, 철원자는 이 안에 규칙적으로 배열되어 있는 것이다. 이를 알기 쉽게 그려 놓은 것이 그림1.1이다. 원자는 공(球)과 같은 형태라고 추측되므로 그림과 같이 나타낼 수 있는 것이다. 각설탕의 중심 즉, 체심에 1개의 원자가 존재하고 각 모서리(8군데)에 1개씩 존재하는 형태가 된다. 이 때문에 체심입방이라고 불리게 된 것이다. 이것이 철의 상온에서의 결정구조이고  $\alpha$ 철이라고 한다.

#### 1.1.2 면심입방 - $\gamma$ 철

상온의 철을 가열하여 온도를 올리면 팽창이 일어나는데, 이는 각설탕의 한 변의 길이가 늘어나기 때문이고 원자의 배열 즉, 결정구조가 본질적으로 변

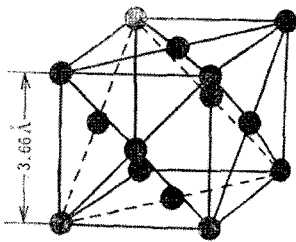


그림 1.2 면심입방격자.

하는 것은 아니다. 이 늘어나는 변의 길이를 격자정수라고 한다.

그러나 어느 온도(910°C)에 도달하면 갑자기 철원자의 배열이 변하여 그림1.2와 같이 변신을 하게 된다. 이 돌연변이를 변태(變態)라고 하며 변태를 일으키는 온도를 변태점이라 한다. 그림1.2의 원자배열은 그림1.1의 체심입방과 크게 다른 것을 알 수 있다. 양쪽 모두 입방체인 것은 변함이 없으나 변의 길이 즉, 격자정수가 3.66 Å으로 크게 늘어났다. 이 보다도 큰 변화는 철원자의 배열이다. 8개의 모서리에 원자가 하나씩 있는 것은 그림1.1과 마찬가지로 6개의 면 중심에 각각 1개씩의 존재하고 체심에는 원자가 존재하지 않는다.

이와 같은 배열을 갖는 것을 면심입방(F.C.C.)라고 하고  $\gamma$ 철이라 한다.

$\gamma$ 철은 910°C의 변태점(이를  $A_3$  변태점이라 한다.) 이상에서 존재한다.

### 1.1.3 $\alpha$ 철 - $\gamma$ 철 수축의 비밀

B.C.C.( $\alpha$ 철)에서 F.C.C.( $\gamma$ 철)로 변신을 하면 길이의 변화가 어떻게 되는가 하면 그림1.3과 같이 수축을 하게 된다. 그림1.1과 그림1.2에서 알 수 있는 바와 같이 B.C.C. → F.C.C로 변하면 변의 길이가 2.86 Å → 3.66 Å으로 되므로 팽창을 하는 것이 당연할 텐데, 왜 그림1.3과 같이 수축이 일어나는 지 그 비밀을 설명해 보기로 하겠다.

B.C.C.(그림1.1)에 있어서는 1개의 각설방(어렵게 말하면 단위세포, unit cell)이 몇 개의 철 원자를 가지고 있게 되는가 하면, 한눈에 모서리에 8개, 몸체의 중심에 1개 합계 9개의 철 원자가 있는 것처럼 보인다. 그러나 실제로는 모서리에는 인접한 결정들과 반,반 또 반씩 즉,  $1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/8$ 로 나누어진다는 것을 알 수 있다. 체심의 1개는 통째

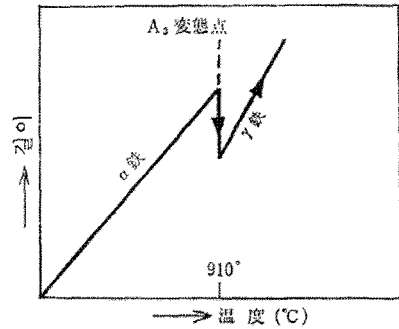


그림 1.3 가열곡선.

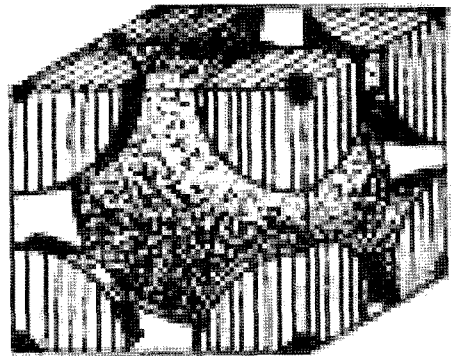


그림 1.4 체심입방형의 단위격자.

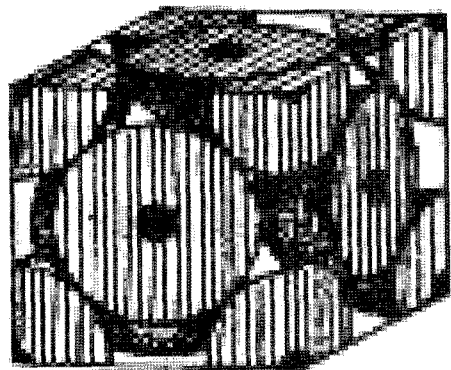


그림 1.5 면심입방형의 단위격자.

로 가지고 있는 것이 된다.

따라서 B.C.C. 1개의 결정이 갖고 있게 되는 철 원자의 수는  $1/8 \times 8 + 1 = 2$ 이 된다.(그림1.4)

마찬가지로 F.C.C의 경우는 면 중심(面中心)의 철 원자가 절반씩 나누어 가지고 있으므로  $1/8 * 8 + 1/2 * 6 = 4$ 가 되어(그림1.5), 결국 B.C.C가 F.C.C.로 변신하기 위해서는 2배의 철 원자가 필요하다는

것이 된다. 따라서 F.C.C로 되면 각설탕 1개의 크기는 커지기는 하지만 그 수가 줄어들기 때문에 전체적으로는 수축이 일어나는 것이다.

**1.1.4 강(鋼) - 철 + 탄소의 합금**

지금까지는 철의 결정구조에 대한 설명이었다. 그러면 강은 어떠한 것인가 하면, 바로 철에 탄소(C)가 들어간 합금이므로 철의 결정격자 안에 C의 원자가 끼어들어간 형태로 되어 있다. 어느 곳으로 들어가는가 하면 틈이 많은 곳이 될 것이다.

B.C.C와 F.C.C.중 어느 것이 틈새가 많은가 하면 F.C.C가 많으므로 B.C.C보다도 C가 많이 들어가게 된다. 결국 α철(B.C.C.)에는 C가 극히 적은 양밖에 못들어 가지만 γ철(F.C.C.)에는 많이 들어가게 된다. 그 양을 보면, α철은 0.002%C(중량비, 상온에서), γ철은 2.1%C(중량비, 1,147°C)이다.

**1.1.5 고용체(固溶體) - 침입형(侵入型) 과 치환형(置換型)**

α철이나 γ철 모두 고체이고 그 속에 끼어들어가는 C도 고체이므로, 이를 고용체라고 부른다. 결국 고체가 고체에 녹아 들어가 있다고 하는 의미이다. 이 고용체에는 침입형과 치환형의 2가지 형태가 있다. 철에 C가 고용되는 경우는 어거지로 끼어 들어가는 형태로서 침입형이다. 치환형이란 철원자와 다른 금속원자가 바뀌어져서 들어가는 형태이다.

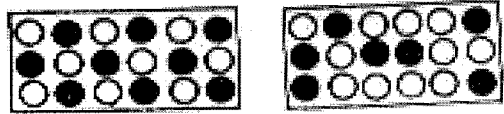
C량이 더욱 많아져서 고용한계를 넘어서게 되면 Fe와 C의 화합물, Fe<sub>3</sub>C(Cementite : 세멘타이트)가 만들어진다. 이 결정은 사방정구조(斜方晶構造)로서 조밀육방격자(稠密六方格子)를 다소 찌그러뜨린 것과 같은 구조의 Fe원자 배열 중에 C가 둘러 싸여있는 형태로 되어 있다. 고용한계 이상으로 C가 들어가면 이 세멘타이트(Fe<sub>3</sub>C)와 α철(B.C.C.)이 섞여있는 상태로 된다. 이것이 보통강의 경우로서 C%가 높을수록 세멘타이트가 많아진다.

그림1.6은 철 원자사이에 다른 원자가 끼어들어간 형태, 즉 침입형고용체로서 (a)는 α철(B.C.C.)의 고용체, (b)는 γ철(F.C.C.)의 고용체를 나타낸 것이다. γ철의 고용체를 금속상학(金屬相學)적으로는 Austenite(오스테나이트), α철의 고용체를 Ferrite(페라이트)라고 부른다.



a) 체심입방(B.C.C.) α 고용체      b) 면심입방(F.C.C.) γ 고용체

그림 1.6 침입형 고용체.



a) 규칙적 치환형      b) 불규칙적 치환형

그림 1.7 치환형 고용체.

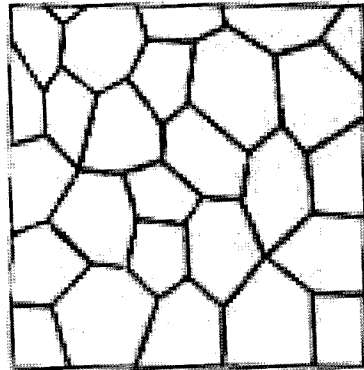


그림 1.8 현미경으로 본 순철의 조직(결정립).

**1.1.6 결정립(結晶粒) - 금속의 성질에 영향**

결정구조는 대단히 미세하므로 X선을 이용하여야만 하나, 결정 그 자체는 현미경으로 볼 수가 있다. 금속을 거울과 같이 연마하여 산(酸)에 부식(etching, 에칭)시켜 현미경으로 보면 그림1.7과 같이 입상(粒狀)으로 나누어져 있는 조직이 보인다. 이 입자를 결정립이라 부르며 하나의 입자는 하나의 결정으로 되어 있다.

결정립의 경계를 입계(粒界)라고 부른다. 결정립의 크기에 따라 결정립의 집합체인 금속재료의 강도나 그 밖의 성질이 달라지게 된다. 따라서 결정구조보다도 결정립을 보는 편이 훨씬 더 실용적이고 여러 가지 문제점을 해결할 수가 있다. 이상에서 현미경조직의 중요성을 이해했으리라 생각한다.

마지막으로 결정구조의 요약을 표 1.1에 나타냈다.

표 1.1 결정구조의 요약

종류	결정(結晶)	철강의 경우
1. 금속	단순 결정	체심입방(B.C.C.) ( $\alpha$ 철), 면심입방(F.C.C.) ( $\gamma$ 철)
2. 고용체	침입형	$\alpha$ 고용체(페라이트), $\gamma$ 고용체(오스테나이트)
	치환형	
3. 화합물 (탄화물)	결정격자가 규칙적으로 조합되어 일정한 결정격자를 만드는 것.	세멘타이트( $Fe_3C$ )
4. 합금	1, 2, 3이 각각 혼합된 상태를 나타내는 것	펄라이트(P)( $a+Fe_3C$ ), $\alpha + P$ , $P + Fe_3C$

## 1.2 전위(轉位)

“변덕이 심한 사람을 오뉴월 날씨 변하듯 한다는 말을 한다. 이는 기분이 수시로 변하기 때문이다. 결국 기분이 이랬다저랬다 한다는 것으로 기가 약한 사람에게 많이 일어난다. 반대로 기분이 좀 체로 변하지 않는 사람도 있다. 금속에도 이와 같은 변덕쟁이가 있다. 이는 결정이 엉크러져 있는 데에 기인한다. 이 결정의 엉크러짐을 전위라고 한다. 전위가 있는 금속은 약하다. 전위가 없다면 금속은 천하무적의 강자가 될 수 있다. 이번에는 이 금속의 내부의 엉크러짐에 대해 알아보자.”

전위(轉位, dislocation, 디스로케이션)이란, 의학상으로 탈골, 지질학상으로는 단층이라고 부르는 것으로 일정한 줄에서 벗어나 있는 것을 의미한다. 금속에서는 결정주름이라던가 결정의 어긋남 등으로 불리기도 했으나 일본의 학자(谷安正博士)에 의해 전위라고 명명되어 통일되었다. 즉, 원자의 어긋남을 나타낸다. 앞에서 결정구조에 대해 설명한 것은 금속의 결정은 원자가 규칙적으로 배열되어 있는 것이라고 하였다. 이 규칙적인 원자 배열이 엉켜져서 어긋남으로 인해 생긴 것이 전위라고 하는 것이다.

왜 전위라고 하는 것을 생각하게 되었는가 하면, 이론적으로 금속재료의 강도를 원자 간의 힘으로부터 계산하면 실제로 측정된 강도의 1,000배 이상 강해야 한다는 점 때문이었다. 예를 들면 철은 이론적으로는  $1,000 \text{ kg/mm}^2$ , 구리는  $300 \text{ kg/mm}^2$  정도로서 실측치와는 현격한 차이가 난다. 이 차이는 금속재료에 전위가 있기 때문으로 전위만 없다면 이론 그대로의 강도를 나타내야만 하는 것이다. 이를 증명한 것이 유명한 위스커(whisker)라고 하는 결정이다. 이는 대단히 강하고 전위가 없으므로 철의 이론적인

강도  $1,000 \text{ kg/mm}^2$ 까지 나온다.

즉, 재료에 전위가 있으면 작은 힘에도 전위가 움직이게 되어 강도가 약해지는 것이다. 이와 같이 재료의 강도는 전위가 움직이는 조건에 의해 결정되는 것이다. 강하다고 하는 것은 전위가 움직이기 어렵다고 하는 것이다. 또 재료가 늘어난다, 즉 소성변형이 생긴다고 하는 것은 전위가 결정의 슬립면상을 이동하기 때문이다.

전위가 있으면 마치 미끄럼틀을 타듯이 쉽게 전위가 결정 안을 이동하게 된다. 즉 전위의 운동은 작은 힘으로도 생긴다고 하는 것이다.  $n$ 개의 전위가 있으면  $n$ 원자분의 어긋남이 생긴다는 말이 된다.

### 1.2.1 기계적 성질과 전위

이 전위의 수가 늘어난다거나 다른 전위와 합쳐져서 재동이 걸리게 되면 미끄러지기 어렵게 되기 때문에 단단해지고 강해지게 된다. 이것이 가공경화 현상이다. 또 가공 후 시간을 지체시키면 자유로운 전위가 있는 곳에 탄소나 질소 등이 들어와 끼게 된다. 이것이 변형 시효라고 하는 것이다. 또, 크립(Creep)이라고 하는 현상도 전위의 운동에 의해 일어난다. 일반적으로 재료의 변형과 동반하여 전위의 수가 증가하고 이것이 어느 장소에 몰려서 움직일 수 없게 되면 여기에 큰 응력이 집중하여 나중에는 원자와 원자의 결합이 끊어져서 깨지게 된다. 이것이 재료의 파괴라고 하는 것이다.

말하자면 재료의 기계적 성질(예를 들면 인장강도나 항복점등)이나 소성(塑性)변형(變形)등은 이 전위의 운동에 의해 설명할 수가 있는 것이다. 전위의 역할로서 중요한 것이 기계적 강도나 소성(塑性)이라고 하는 것이다.

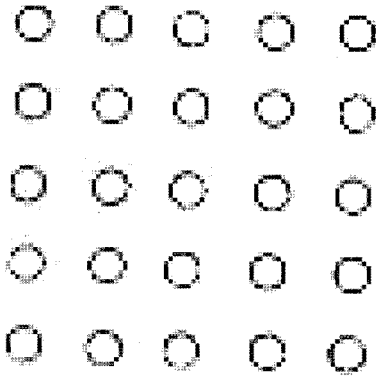


그림 2.1 완전결정.

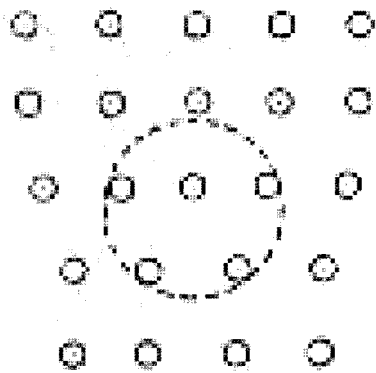


그림 2.2 전위가 있는 결정.

**1.2.2 두 종류의 전위**

전위, 즉 원자의 엉켜진 영역을 전위라고 하는데 이는 크게 나누어 2가지 종류가 있다. 하나는 칼날전위(Edge Dislocation)이고 다른 하나는 나사전위(Screw Dislocation)이다.

칼날전위는 간단히 말하면 결정의 미끄럼 면에 수직으로 틈을 벌려서 1장의 원자 면을 칼날과 같이 끼워 넣은 경우의 원자의 배열방식을 하고 있는 것이다.

전위의 다른 한 가지 대표적인 형태는 미끄럼 면과 전위선이 평행하고 있는 것으로 전위의 주위를 한번 회전하면 인접한 원자 면으로 이동하게 된다는 것이며 나사전위라고 부른다.

그림 2.1은 완전결정의 원자 배열을 나타낸 것으로 전위가 없는 경우이다. 그림 2.2는 전위가 있는 결정의 원자배열로서 중앙의 점선으로 원모양이 그려져 있는 부분이 전위이다.

**1.3 확산(擴散)**

“확산이라고 하는 것은 결정 속에서 원자가 어느 정도 움직인다고 하는 것을 말한다. 결정은 원자의 규칙적인 배열이라고 설명을 한바 있다. 그 원자는 격자점 예를 들면 입방체의 네 귀퉁이라던가, 면심입방이라면 면의 중심, 또 체심입방이라면 체심에 영구적으로 갇혀있는 것은 아니다. 즉, 고착되어 있는 것이 아니고 끊임없이 진동을 하고 있는 것이다. 이 진동의 진폭은 온도에 따라 증가하여 원자의 위치 교환, 즉 확산이 가능하게 되는 것이다.”

**1.3.1 공공(空孔)이 확산의 기점**

절대온도 0°K에 있어서 결정은 안정하고 각 격자점에는 필히 한 개의 원자를 갖는 완전히 규칙적인 상태에 있게 된다. 그러나 온도가 올라가면 원자가 격자점에서 방출되어 빠져 나간 점 즉 빈 공간이 생기게 된다. 이 원자가 빠져 나간 점을 빈 격자점 또는 공공이라고 한다. 금속중의 원자는 이 빈 격자점을 매개로 하여 위치 교환을 하는 것이다. 이것이 확산의 주요한 메카니즘이다. 빈 격자점의 수는 고온이 될 수록 많아진다. 알루미늄, 금, 은, 동(銅)등은 용융온도에 가까워지면 원자수의 1만분의 1정도가 된다고 한다. 이 빈 격자점이 확산의 기점이 되므로 확산도 온도가 높을수록 빨리 일어난다고 하는 것은 쉽게 상상할 수 있을 것이다. 예를 들면, 800°C에서 1초간에 일어나는 확산을 100°C에서 일으키려면 30조년이나 걸린다고 한다. 엄청난 차이가 아닐 수 없다.

**1.3.2 확산은 이렇게 일어난다.**

그러면 확산이 일어나는 양상을 모형으로 살펴보자. 그림 3.1에서 A금속의 원자를 흰색, B금속의 원자를 흑색으로 나타내면 a)는 확산전의 상태, 즉 A금속과 B금속원자의 경계가 확연히 들어난다. 그러나 A와 B가 섞여 들어가게 되면 b)와 같이 된다. 이것이 확산인 것이다.

이와 같은 확산이 어떻게 일어나는가 하면 우선 빈 격자점에 의한 원자의 이동을 생각할 수 있다. 빈 격자점은 그림 3.2와 같이 원자가 빠져 있는 곳이므로 빈 격자점 주위의 원자는 옆자리가 비어 있기 때문에 비교적 간단히 이동할 수가 있다. 여기서

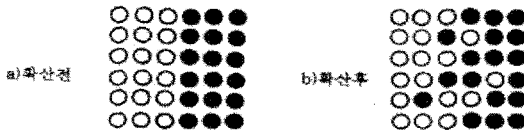


그림 3.1 확산의 양상.

규칙적으로 원자가 놓여져 있는 결정중에 원자가 빠져나간 곳이 있음을 나타낸 그림이다. 이 원자가 빠져나간 곳을 빈격자점이라 한다.

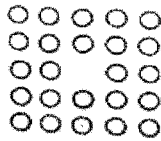
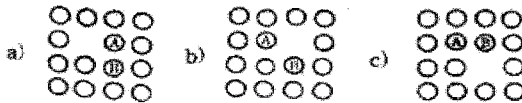


그림 3.2 빈격자점(空孔).



- a) 우선 A원자의 옆에 빈격자점이 생긴다.
- b) A가 빈격자점으로 이동하고 원래의 A위치에 빈격자점이 남는다.
- c) B가 새로운 빈격자점으로 이동한다. 이곳은 원래의 A원자가 있던 위치이다.

그림 3.3 빈격자점에 의한 원자의 이동.

그림 3.3과 같이 원자를 바꿔치기 한다면 결국은 A 원자와 B원자가 모두 움직인 것이 되어 그림 3.1의 b)와 같이 서로 섞여버리게 되는 것이다.

빈 격자점에 의한 확산은 소위 치환형 확산이라고 하는 것이고 탄소나 질소와 같이 원자의 틈에 끼어 들어가는 원자(이를 격자 간 원자라고 한다)가 침입형으로 확산되는 경우도 있다. 이를 개입확산 또는 침입형확산이라고도 한다.

일반적으로 확산이 일어나기 위해서는 양 금속 사이에 원자적 접촉이 필요하다. 이는 도금이라던가 용착으로 일으킬 수 있다. 그러나 온도가 높아지면 원자가 접촉하지 않더라도 침입하는 금속이 증발 용착되어 침입확산을 일으키는 수도 있다.

금속 내에서도 농도에 차이가 있으면 성분농도가 높은 곳으로부터 낮은 곳으로 이동하게 된다. 이것도 확산의 일종으로 자기확산(自己擴散)이라고 한다.

### 1.3.3 확산의 종류와 요소

확산에는 3가지 형태가 있다. 첫 번째는 자기확산

으로 이는 동일 금속내 또는 동일금속간의 확산이다. 두 번째는 상호확산이라 하여 두 가지의 금속 A, B가 접촉하여 상호간에 일어나는 확산이다. 세 번째는 단일 확산이라 하며 침탄이나 질화와 같이 한쪽 방향으로의 확산을 말한다. 고체의 확산에는 확산 원자가 고용되는 것이 전제되어야 하며 이에 는 치환형 확산과 침입형 확산의 2가지가 있다. 기체의 확산에는 침탄과 질화가 있으며 이를 단일 확산이라 한다.

확산에는 여러 가지 요소가 영향을 미친다. 우선 온도는 높을수록 확산속도가 빨라진다. 또 가공변형이 있는 편이 확산이 쉽게 일어난다. 그밖에 조직이나 첨가원소의 종류 및 양에 의해 확산속도가 변하며 또 확산에는 방향성이 있다고 하는 것을 잊어서는 안 된다.

한 가지 예로서 앞에서 공부한  $\alpha$ 철과  $\gamma$ 철에 대한 탄소(C)의 확산의 난이도에 대해 설명한다.  $\alpha$ 철은 체심 입방 형이므로  $\alpha$ 철 중의 C는 면 쪽에 있고 철 원자를 비집고 들어가지 않아도 되므로 확산이 용이하게 일어난다. 이에 반해  $\gamma$ 철은 면심입방형이므로  $\gamma$ 철 중의 C는 철 원자 사이의 좁은 통로를 비집고 들어가야만 하기 때문에 C의 확산은 늦어지게 되는 것이다.

결국  $\alpha$ 철이 C의 확산이 빠르다는 것이다. 또  $A_3$  변태점(약  $910^{\circ}\text{C}$ )에서는  $\alpha$ 철이  $\gamma$ 철보다도 확산계수가 크다. 즉,  $\alpha$ 철이 결정격자중의 틈이 크기 때문에 확산속도가 빠른 것이다.

### 1.3.4 확산은 강을 생각하는 기본

확산은 금속 특히 철강에 있어서는 중요한 현상으로 침탄이나 질화(단일확산) 또는 카로라이징(Calorizing)(Al침투)나 셰라다이징(Sherarding)(Zn확산)등의 금속침투(상호확산)등은 모두 확산 현상을 이용한 것이다.

또 석출(시효, 템퍼링)이나 변태는 확산집합의 결과이고 주조조직의 균질화(확산어닐링)나 결정립의 성장 등은 자기확산을 기본으로 한 것이다. 그밖에 나중에 공부할 상태도등도 확산현상을 기조로 한 것으로 그의 응용이다.

확산과 관계된 현상으로는 복잡한 것이 많이나 보통의 금속 내에서 일어나는 확산, 즉 원자의 이동은 거의 모두 빈 격자점을 이용하여 일어나는

것이라는 것, 또 철 중의 질소나 탄소 등은 철 원자 사이를 헤치고 움직인다고 하는 것을 염두에 두고 생각한다면 의외로 간단히 이해할 수 있는 현상도 많다. 충분히 공부해 두기 바란다.

1.4 변태(變態)

“변태라고 하는 말을 들으면 왠지 고약한 기분이 드는 것은 어쩔 수 없다. 확실히 변태라고 하는 것은 좋은 의미에서는 별로 사용되지 않는다. 그러나 강에 있어서는 변태가 없으면 안 되고 변태가 있으므로 해서 열처리가 가능하다고 하는 것이다. 변태가 없는 것은 열처리가 안 된다고 보아도 좋을 것이다.”

1.4.1 변태란 변신(變身)이다

변태와 변화는 다르다. 변화라고 하는 것은 성질이 서서히 변하는 것인데 반해 변태라고 하는 것은 갑작스럽게 바뀌는 것을 의미한다. 즉, 변신이라고 말해도 좋을 것이다. 이를 길이의 변화에서 설명해 보기로 한다. 강으로 된 봉(棒)을 가열하여 온도를 올리면 팽창하여 길이가 길어진다. 이는 온도에 따라 서서히 길이가 변하는 것으로 이는 변화라고 할 수 있다.

그러나 어느 온도에 도달하면 가열을 하고 있는데도 불구하고 갑자기 수축이 일어난다. 이와 같은 갑작스런 변화가 변태이다. 그림 4.1에 이 길이의 변화를 나타냈다. A<sub>3</sub>라고 쓰여 있는 곳이 변태이다. 변태가 일어나는 온도를 변태점이라 한다. 이 점이란 기하학에서 말하는 점이 아니고 온도의 의미이다.

1.4.2 강에는 변태가 5가지가 있다.

변태에는 기호로서 A문자를 사용하며 여기에 번호를 붙여서 식별하도록 되어 있다. 강에는 변태가 모두 5가지 즉, A<sub>0</sub>~A<sub>4</sub>가 있다. 이밖에 퀸칭등에서 나타나는 특별 변태로서 Ar', Ar" 또는 Ms라고 하는 것도 있다.

또, 변태는 온도를 올릴 때와 내릴 때에 다소 변태온도가 다르기 때문에 온도를 올릴 때의 변태점에 c, 냉각할 때는 r의 기호를 붙여서 구별한다. 즉, A<sub>1</sub> 변태의 가열변태점은 Ac<sub>1</sub>, 냉각시에는 Ar<sub>1</sub>이 된다. c 및 r은 프랑스어의 chauffage(쇼파쥬, 가열),

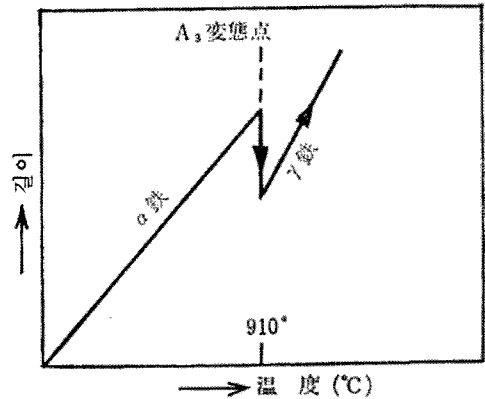


그림 4.1 가열곡선과 변태점.

refroidissement(르프르와디스망, 냉각)의 첫글씨를 따온 것이다.

1.4.3 결정구조가 바뀌어 진다.

그러면 여기에서는 변태의 내막을 들여다보기로 한다. 철은 상온에서는 α철이라고 하는 결정으로 그 구조는 입방체(B.C.C.)라고 하는 것은 앞에서 공부한 바와 같다. 이를 온도를 올리면 910°C(A<sub>3</sub> 변태점)에서 γ철이라고 하는 면방체(F.C.C.)로 변신하게 된다. 이것도 앞에서 공부한 바와 같다.

즉, A<sub>3</sub> 변태 ----- α철(B.C.C.) → γ철(F.C.C.) 가 된다.

이렇게 보면 변태라고 하는 것은 결정구조의 변화라는 말이 된다. 결정격자의 변화가 변태라고 한다면, A<sub>2</sub> 변태는 철이 자기(磁氣)를 잃어버리는 변화이고 A<sub>0</sub>는 세멘타이트가 자기를 잃어버리는 변화이므로 최근에는 순수한 변태라고 하지 않고 자기변태라고 부른다. 따라서 진정한 의미의 변태는 A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub> 뿐이라고 볼 수 있다. 표 4.2에 철강의 변태를 정리하여 보았다.

1.4.4 합금은 변태가 복잡

결정구조의 변화를 변태라고 한다면 순수한 금속 즉, 한 종류의 원자만으로 결정을 이루고 있는 경우는 합금과 비교하여 변태의 양상이 간단하고 그 종류도 적게 된다. 이것은 이사를 할 경우 독신자가 가족이 있는 때보다 훨씬 쉽고 간단하다는 것과 마찬가지로 이유이다.

표 4.2 철강의 변태

변태	철	강	내용
(A <sub>0</sub> )	-	(210°C)	세멘타이트의 자기변태
° A <sub>1</sub>	-	730°C (Ac <sub>1</sub> , Ar <sub>1</sub> )	공석(共析) 변태
(A <sub>2</sub> )	-	(770°C)	철의 자기변태
° A <sub>3</sub>	910°C	910~730°C(Ac <sub>3</sub> , Ar <sub>3</sub> )	a 철 ↔ g 철
A <sub>4</sub>	1,410°C	1,410°C (Ac <sub>4</sub> , Ar <sub>4</sub> )	g 철 ↔ δ 철
° A <sub>cm</sub>	-	730~1,145°C(Ac <sub>cm</sub> , Ar <sub>cm</sub> )	세멘타이트의 고용, 석출

° 표 ---- 강의 열처리에 있어서 중요한 것

표 4.3 강의 냉각변태

냉각변태	내용	기호
Ar <sub>1</sub>	오스테나이트 → 펄라이트	P <sub>S</sub> , P <sub>F</sub>
Ar <sub>3</sub>	오스테나이트 → 페라이트	F <sub>S</sub> , F <sub>F</sub>
Ar'	오스테나이트 → 미세펄라이트	P <sub>S</sub> , P <sub>F</sub>
Ar''	오스테나이트 → 마르텐사이트	M <sub>S</sub> , M <sub>F</sub>
A <sub>B</sub>	오스테나이트 → 베이나이트	B <sub>S</sub> , B <sub>F</sub>

합금의 경우는 결정을 이루고 있는 원자의 종류가 2개 이상이 되므로 변태가 복잡하고 그 종류도 많아진다. 또한 Ac변태(가열)와 Ar변태(냉각)의 온도차는 순금속의 경우는 작고 합금이 되면 커진다. 어려운 말로 하면 가역성(可逆性)이 변한다고 하는 것이다. 합금의 경우 가역성이 나빠지므로 이것이 경화가 잘 되는 이유가 되는 것이다.

1.4.5 변태가 일어나면 조직도 변한다.

강의 열처리에 가장 관계가 깊은 것은 A<sub>1</sub>과 A<sub>3</sub> 변태이다. 여러 가지 탄소량(C%)의 강의 변태점을 하나의 표로서 나타낸 것이 나중에 공부하게 될 강의 상태도라고 하는 것이다.

변태는 결정구조의 변화를 의미하므로 현미경조직도 변한다. 지금은 조직 이름의 머리글자와 변태 개시(Start의 S)와 변태 종료(Finish의 F)를 첨자로 붙이는 것이 유행되어 다음과 같이 붙인다.

- 오스테나이트 → 마르텐사이트(퀵칭) --- M<sub>S</sub>, M<sub>F</sub>
- 오스테나이트 → 베이나이트 (오스템퍼링) -- B<sub>S</sub>, B<sub>F</sub>
- 오스테나이트 → 펄라이트 (어닐링) --- P<sub>S</sub>, P<sub>F</sub>

마지막으로 표 4.3에 강의 냉각변태를 일괄하여 표시하였다.

1.5 상태도(狀態圖)

“이번에는 상태도에 대해서 이야기해 봅시다. 금속

이라고 하면 팔히 따라 다니는 것, 머리가 아플 정도로 복잡하게 얽혀 있는 선, 그러나 그곳에 금속의 수수께끼를 푸는 열쇠가 있는 것이다. 금속을 알려고 하는 사람은 상태도를 모르면 안 된다.”

1.5.1 합금의 상태를 나타내는 그림

합금에도 여러 가지가 있으나 이 합금에 대해서 여러 가지 비율의 성분 금속이 녹아져 있는 상태에서부터 굳어져서 상온으로 내려올 때까지의 상태를 그 래프로 나타낸 것이 상태도이다. 한마디로 말하면, 합금의 상태를 나타낸 그림이다. 횡축으로 성분 비율(%)을 종축으로는 온도(°C)를 취하고 A 금속과 B 금속이 섞여지면 어떻게 되는가, 또 몇 도에서 녹는가의 관계를 나타낸다. 말하자면 금속이 갖고 있는 여러 가지 상(金相)을 나타낸 것이므로 상도(相圖)라고도 한다. 순금속의 상은 용융상과 고체상의 두 가지, 합금상은 순금속, 고용체, 금속간화합물의 3가지가 된다.

상태도에는 몇 가지의 규칙이 있다. 조성, 즉 성분 비율을 나타내는 데는 중량 %와 원자량 %가 있다. 보통 공학자들은 중량 %를 사용하고 이화학자들은 원자량 %를 사용하나 상태도의 경우는 중량 %가 대부분이다. 또 나타나는 상은 왼쪽에서 오른쪽으로 가면서 α, β, γ, --- 의 기호로 나타낸다. 또, β' 같이 뭇쉬를 붙인 것은 규칙격자라고 부르는 특별한 구조를 갖는다는 뜻의 표시이다. 또 변태를 나타내는 경우에는 온도가 낮은 쪽부터 α, β, γ, ---의 기호로 나타낸다.

금속성분이 2개인 경우 즉 2성분계인 경우에는 횡축에 조성(%), 종축에 온도(°C)를 취하여 나타낸다. 그러나 어느 범위에서 공존하는 것은 2상까지이고 3상이 공존하는 경우에는 일정온도에서의 상태를 나타낸다. 3성분계에서는 정삼각형의 정점에 3성분을 취



하고 이 삼각형의 면에 수직으로 온도를 취한다. 따라서 2성분 계에서는 선으로 나타낼 것이 3성분 계에서는 면으로 나타나게 된다. 3차원적(입체도)에서는 직관적으로 이해하기 어려우므로 보통은 각 온도 점에서의 단면도로 나타낸다.

### 1.5.2 상률 - 상태도의 기본법칙

상태도에는 이를 지키지 않으면 안 되는 기본적인 법칙이 있다. 이를 상률(相律), Phase rule이라 한다. 이는 미국의 물리학자 깁스(Gibbs, 1839~1903년)가 상태도의 열역학적인 고찰로부터 이끌어낸 것으로 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\text{상의 수}(P) + \text{자유도}(F) = \text{성분의 수}(C) + 1$$

자유도란 평형 되어 있는 상태를 바꾸지 않고 선택할 수 있는 변수의 수(예를 들면 온도나 조성, 단, 압력은 1기압으로 하여 변수로 보지 않음)를 의미한다. 이 자유도는 위의 식에서도 알 수 있는 바와 같이 2성분계라면 3에서 존재하는 상의 수를 뺀 것이 된다. 상이 한 개 있는 경우는 자유도는 2가 되어 그 상태를 유지하기 위해서는 온도와 조성을 모두 함께 변화시켜도 된다고 하는 것을 나타낸다.

2상의 경우는 자유도는 1이 되므로 온도나 조성의 하나만을 바꿀 수 있다. 그러나 3상의 경우는 자유도는 0 즉, 온도나 조성 모두 바꿀 수 없고 한가지로 정해진다고 하는 것이다.

상률의 식은 영어의 머리글자를 취하여 나타내면

$$P + F = C + 1$$

이 된다. 이를 미국 학생은

$$\text{Police} + \text{Force} = \text{Cops} + 1$$

즉, 경찰력이란 경찰관 플러스 1이라고 외운다. 재미있는 기억법이라 하겠다.

### 1.5.3 상태도의 연구 - 재검토가 필요

상태도를 만드는 가장 일반적인 방법은 열분석(용융상태에서 응고될 때까지를 조사)과 X선 회절, 여기에 현미경조직(응고된 후 단일상인가 혼합상인가를 조사)검사법이다. 상태도를 실험적이 아니고 계산으로 구할 수는 없는가를 Gibbs 이래 많은 사람들이

여러 가지로 시도를 해보았다. 그러나 머리속에서 상태를 그리는 것은 대단히 어려운 일이다.

상태도의 연구가 가장 왕성했던 때인 1910년경과 1930~1940년에 걸쳐서 연간 50~70(2원계)편의 논문이 발표되어 많은 박사가 탄생했다. 현재 1,000개 정도의 2원계 상태도가 알려져 있으나 반 정도는 재검토하여 수정되어야 한다고 한다. 그 이유는 금속 성분의 순도, 분석방법, 온도측정방법 등이 옛날에 비해 고급화되어 정도(精度)가 높아졌기 때문이다.

### 1.5.4 평형상태에서 나타나는 조직

앞에서 상태도는 상률에 근거하여 금속의 각상을 나타내는 것이라고 말했다. 요는 합금의 각상의 존재 형태를 나타내는 것으로 평형상태 즉, 천천히 가열, 또는 천천히 냉각시킬 때 어떠한 조직이 나타나는가를 나타낸 것이다. 따라서 상태도는 금속기술자에게는 바이블과 같은 것이다.

그림 5.1은 Fe-C 2원계의 상태도(설명적)를 나타낸 것이다. 그중 강의 부분, 특히 열처리와 관계가 있는 곳만을 나타낸 것이 그림 5.2이다. 이는 탄소 강의 평형 상태도이므로 강의 평형상태에 있어서의 조직관계, 즉 강을 아주 천천히 가열, 냉각했을 때의 조직, 바꾸어 말하면 어닐링 처리를 했을 때의 조직을 나타낸다. 이 때문에 평형 상태도를 실제의 열처리에 적용하려고 하면 어닐링에 밖에는 사용할 수 없다는 불편함이 따른다.

퀵칭과 같은 급냉의 경우는 평형상태가 아니므로 그에 따른 상태도가 필요하게 된다. 급속냉각에 의해 어떠한 조직이나 변태가 생기는가 하는 것은 평형상태도에서는 알 수가 없다. 따라서 열처리 기술자에게 필요한 것은 평형상태도가 아니라 급냉에 의해 생긴 과냉 오스테나이트가 어느 온도에서 어떤 조직으로 변태되어 가는가 하는 것이다. 결국 과냉 오스테나이트의 변태 내용을 나타내는 그림이 필요하게 되는 것이다.

이에는 연속냉각시킨 때의 변태도(C.C.T. 線圖)나 등온냉각시킨 때의 변태도(T.T.T. 線圖, 일명 S곡선)가 필요하게 된다. 이는 종축에 온도(°C), 횡축에 대수(對數) 눈금으로 표시된 시간을 취하여 나타내져 있다. 횡축의 시간을 대수눈금으로 표시한 것은 시간이 짧은 쪽은 자세하게, 그리고 긴 시간 쪽도 하나

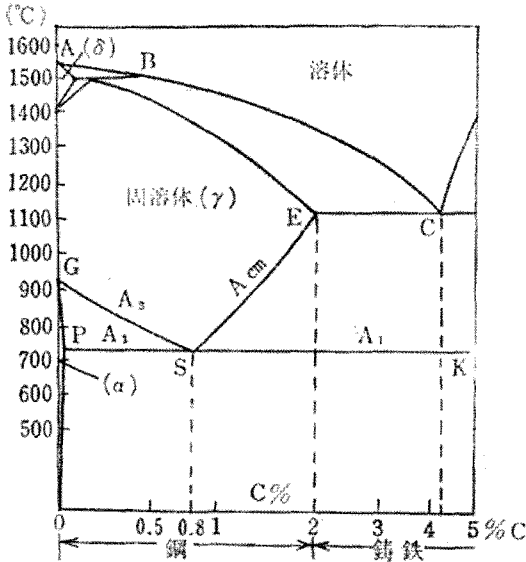


그림 5.1 Fe-C 계 평형 상태도.

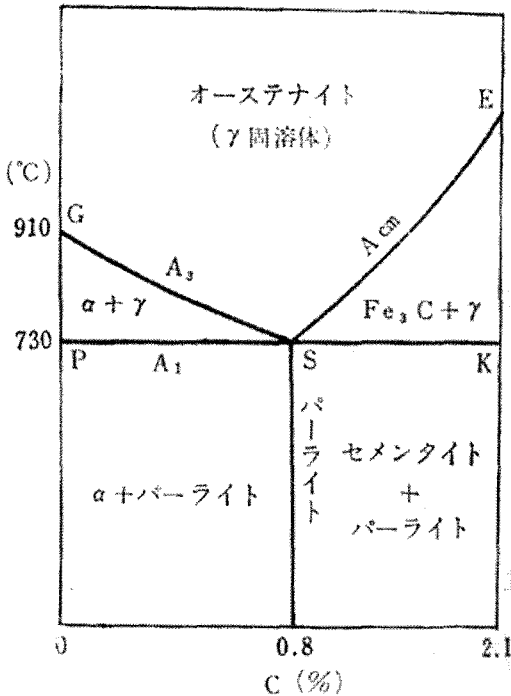


그림 5.2 강(鋼)의 평형 상태도.

의 표로서 나타내고자 한 것이다.

평형상태도와 변태도는 근본적으로 다른 것이다. 그러나 어느 그림이나 철강을 취급하는 데는 길을

찾는 데에 필요한 지도와 같이 또는 그 이상으로 중요한 것이다. 따라서 금속의 수수께끼를 풀고자 하는 사람은 꼭 머리 속에 넣어 두어야 한다.

마지막으로 이들 그림의 종류를 정리해 두자.

평형 상태도 : 평형상태의 조직 관계(어닐링용)

연속냉각변태도 : 연속 냉각시켰을 때의 조직관계 (켄칭, 노말라이징용)

등온냉각변태도 : 등온냉각시의 조직관계(오스템퍼링, 마르켄칭용, 일명 S곡선)

가열변태도 : 서서히 가열, 급속가열시의 조직관계 (고주파가열, 화염가열켄칭용)

### 1.6 조직(組織)

“사람에게도 인상(人相)이나 수상(手相)이 있는 것처럼 금속에는 금상(金相)이 있다. 금상은 금속의 조직이며 얼굴이라고도 할 수 있다. 안색에 따라 사람의 건강도를 알 수 있는 것과 같이 금상에 의해 금속의 건강도 즉, 강약이나 좋고 나쁨을 알 수 있다. 금상에는 육안으로 보았을 때의 조직(이를 마크로 조직이라고 한다.)과 현미경으로 보았을 때의 조직(이를 마이크로 또는 미크로 조직이라 한다.)의 2가지가 있다. 두 가지 모두 중요하나 여기에서는 마이크로 조직에 대해 공부해 보자.”

마이크로 조직 즉, 현미경 조직에는 대개 ○○○이트(ite)라고 하는 어미가 붙는다. 이는 그 조직을 발견한 사람의 이름에 “이트”를 붙이는 습관에서 나온 것이다. 그중 유명한 것은 펄라이트, 오스테나이트, 마르텐사이트, 투르스타이트, 솔바이트, 베이나이트 등이다.

#### 1.6.1 페라이트

α철을 조직학상으로 Ferrite(페라이트)라고 부른다. 라틴어의 Ferrum(페럼)으로부터 나온 말이다. 그 성분은 거의 순철에 가깝다. 결정구조는 체심입방정(B.C.C.)로서 910°C에서 A<sub>3</sub> 변태를 일으켜서 γ철(F.C.C.)로 변신한다. 현미경 조직으로는 백색을 나타낸다.

페라이트는 연하고 전연성이 크고 자석에 잘 붙는다. 간단히 말하면 페라이트는 순철이라고 생각하면 된다.

페라이트라는 이름에는 또 하나의 의미가 있다. 그것은 자석이나 철심에 사용되는 아철산염(亞鐵酸鹽)으로서 라디오나 T.V등의 코아, 필터, 또는 자석등 우리의 신변에 많이 사용되고 있다.

### 1.6.2 세멘타이트

탄화철( $Fe_3C$ )를 금상학적(金相學的)으로는 세멘타이트라고 부르며 이는 미국의 H. M. Howe가 명명한 것이다. 세멘타이트는 금속적 광택을 띠고 대단히 단단하며 또 자성을 갖는다. 경도는 켄칭을 한 강보다도 높고 비중은 7.82이다. 자성은 순철의 약 2/3,  $215^{\circ}C$ 에서 자성을 잃는다. 이 변태를  $A_0$  변태 또는 세멘타이트의 큐리 포인트(Curie point)이라고도 부른다.

현미경 조직에 나타나는 형태는 층상(層狀), 구상(球狀), 망상(網狀), 침상(針狀)등 여러 가지가 있다. 보통은 백색의 조직으로 나타나므로 페라이트와 구별이 어려우나 피크린산 소다의 알카리 용액에서 끓여 주면 흑색이 되어 페라이트와 식별이 쉽게 된다. 세멘타이트는 불안정한 화합물로서  $900^{\circ}C$ 에서 장시간 가열하면 분해하여 흑연 Graphite로 변화한다. 이를 그래파이트의 흑연화라고 한다.

### 1.6.3 펄라이트

1885년 영국의 H. C. Sorby에 의해 이름이 붙여졌으며 페라이트와 세멘타이트가 층상으로 되어 있고 사광선(斜光線)을 이용하여 현미경 검사를 하면 마치 진주조개(Pearl)와 같은 형색을 나타내므로 Pearlite(펄라이트)라고 명명되었다.

펄라이트는 오스테나이트상태의 강을 천천히 냉각했을 때, 즉 어닐링에 의해 얻어지는 조직으로 말하자면 기본이 되는 조직이라고 할 수 있다. 펄라이트 조직을 가열하면  $A_1$  변태점( $730^{\circ}C$ )에서 전부 오스테나이트로 변태한다. 펄라이트중의 C%는 일정하며 약 0.8%이다. 펄라이트는 경도, 강도가 그다지 높지 않고 자성을 띠며 가장 안정한 조직이다.

펄라이트는 페라이트와 세멘타이트의 층상의 혼합물이나 그 층간 간격의 크기에 따라 보통 펄라이트(조대펄라이트), 중 펄라이트, 미세 펄라이트의 3종류로 나눌 수 있다. 보통 펄라이트는 배율 100배에서도 층상이 보이므로 종래 펄라이트라고 부르던 것이

이에 해당한다. 중 펄라이트는 층 간격이 3/10,000 ~ 3.5/10,000 정도인 것을 말하며 1,000배에서는 층상이 보이지 않고 2,000배에서 확인할 수 있을 정도의 펄라이트이다. 종래 켄칭 솔바이트라고 부르던 조직이 이 중 펄라이트이다.

미세 펄라이트는 층 간격이 2.5/10,000 mm 이하의 것으로 2,000배에서도 층상이 보이지 않는 것을 말한다. 지금까지 투르스타이트라고 부르던 것이 이 미세 펄라이트이다.

### 1.6.4 오스테나이트

영국의 로버트 오스틴경(Sir Robert Austen)이 발견한 조직이다. 탄소를 고용하고 있는  $\gamma$ 철 즉,  $\gamma$ 고용체(침입형 고용체)를 말한다. 결정구조는 면심입방정(F.C.C.)이고 강을  $A_1$  변태점 이상으로 가열했을 때 얻어지는 조직이다.

비자성체로서 전기자항이 크고 경도는 마르텐사이트보다 낮다. 현미경적으로는 다각형의 조직으로 나타난다. 강을 켄칭하려면 펄라이트 조직을  $A_0$  변태점 이상으로 가열하여 오스테나이트 조직으로 하는 것이 제 1의 조건이다. 이를 오스테나이트화라고 한다.

### 1.6.5 마르텐사이트

1891년 독일의 아돌프 마르텐스(Adolf Martens)가 발견한 조직이다. 탄소를 고용하고 있는  $\alpha$ 철, 즉  $\alpha$  고용체(침입형 고용체)를 마르텐사이트라고 한다. 현미경 조직적으로는 침상을 띄고 있다.

결정구조는 체심정방정(體心正方晶, B.C.T.) 및 체심입방정(B.C.C.)로서 오스테나이트를 급냉하여 켄칭할 때에 얻어진다. 말하자면 켄칭조직의 대표로서 강의 열처리 조직중 가장 단단하고 취성이 있으며 강자성을 띤다. 켄칭한 강이 단단한 것은 이 마르텐사이트 조직으로 변신하기 때문이다.

### 1.6.6 베이나이트

1930년 미국의 베인(E. C. Bain)이 발견했다. 오스테나이트를 오스텝퍼링이라고 하는 특별한 열처리(등온열처리)할 때 얻어지는 독특한 조직이다. 현미경 조직으로는 흑색의 익모상(翼毛狀, 펄라이트의) 또는 흑색의 침상(마르텐사이트의)을 나타낸다. 흑색 익모상을 상부 베이나이트, 흑색의 침상을 하부 베이나이

트라고 구별하고 있다.

오스테퍼링에 의 생긴 베이나이트를 템퍼링하지 않고 종래의 퀴칭, 템퍼링한 것과 동일한 경도 및 질긴 성질을 가지므로 강인한 성질을 필요로 하는 기계부품에 적용된다.

**1.6.7 투르스타이트**

프랑스의 투르스트(Troost)가 발견한 조직이라 하여 투르스타이트(Troost-ite)라 명명되었다. 마르텐사이트를 약 400°C에서 템퍼링 하였을 때 얻어지는 조직으로서 α철과 세멘타이트의 미세한 입자가 혼합된 조직 상태로 되어 있다. 즉, 마르텐사이트의 기지 조직에서 세멘타이트의 미세 입자가 석출된 것과 같은 조직으로 되어 있다.

투르스타이트는 마르텐사이트에 버금가는 경도를 갖고 대단히 강하므로 고급 칼의 조직으로서 활용된다. 단 녹이 잘 스는 결점이 있다.

**1.6.8 솔바이트**

1863년 영국의 소르비(H. C. Sorby)가 발견한 조직이라 하여 솔바이트로 명명되었다. 마르텐사이트를 500~600°C에서 템퍼링할 때 얻어지는 조직으로 투르스타이트의 세멘타이트가 약간 거칠어진 상태를 나타낸다.

투르스타이트보다 연하고 충격에 강하므로 스프링 등에 널리 사용된다.

**1.6.9 조직 상호간의 관계**

금상학적(金相學的)으로 대표적인 조직을 8개 설명

했다. 그중 페라이트와 세멘타이트를 제외한 6개의 조직은 그림 6.1과 같은 공정에 의해 얻을 수 있다.

즉, 펄라이트를 가열하여 A변태점을 넘으면 오스테나이트가 되고 이를 퀴칭하면 마르텐사이트 혹은 베이나이트가 된다. 마르텐사이트를 템퍼링하면 400°C에서 투르스타이트, 600°C에서 솔바이트가 얻어진다.

퀴칭후 400°C이상에서 템퍼링하는 것을 조절(調質) 처리라 한다. 이렇게 보면 퀴칭에 의해 얻어지는 조직은 마르텐사이트와 베이나이트, 조절에 의해 얻어지는 조직은 투르스타이트와 솔바이트의 두가지가 되는 것이다.

그러면 마지막으로 6개의 조직의 스케치를 살펴보자(그림 6.2). 이는 스케치이므로 특징을 각각 과장하여 그려 놓았다. 실물은 현미경 조직사진으로 공부하면 된다.

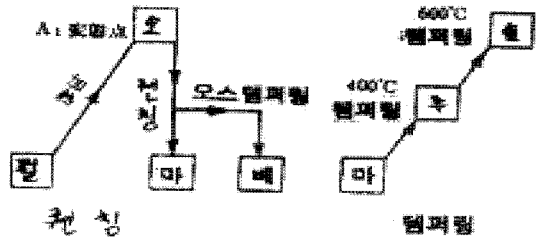


그림 6.1 조직 상호간의 관계.

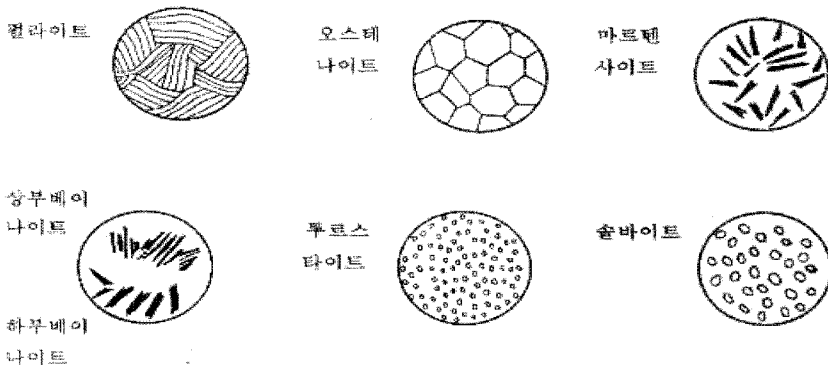


그림 6.2 6개의 조직 스케치.