

항온변태와 연속냉각변태

항온변태 및 항온변태곡선(TTT Curve)

공석강을 A1 변태온도 이상으로 가열한 후 어느 정도의 시간을 유지하게 되면 단상의 Austenite 가 되는데, 이와 같이 Austenite 화한 후에 A1 변태온도 이하의 어느 온도로 급랭시켜서 이 온도에서 시간이 지남에 따라 Austenite 의 변태를 나타낸 곡선을 항온변태곡선(Isothermal transformation curve)이라 하고, 다른 용어로는 TTT 곡선(time-temperature-transformation curve), C곡선, 또는 S곡선이라고 칭한다.

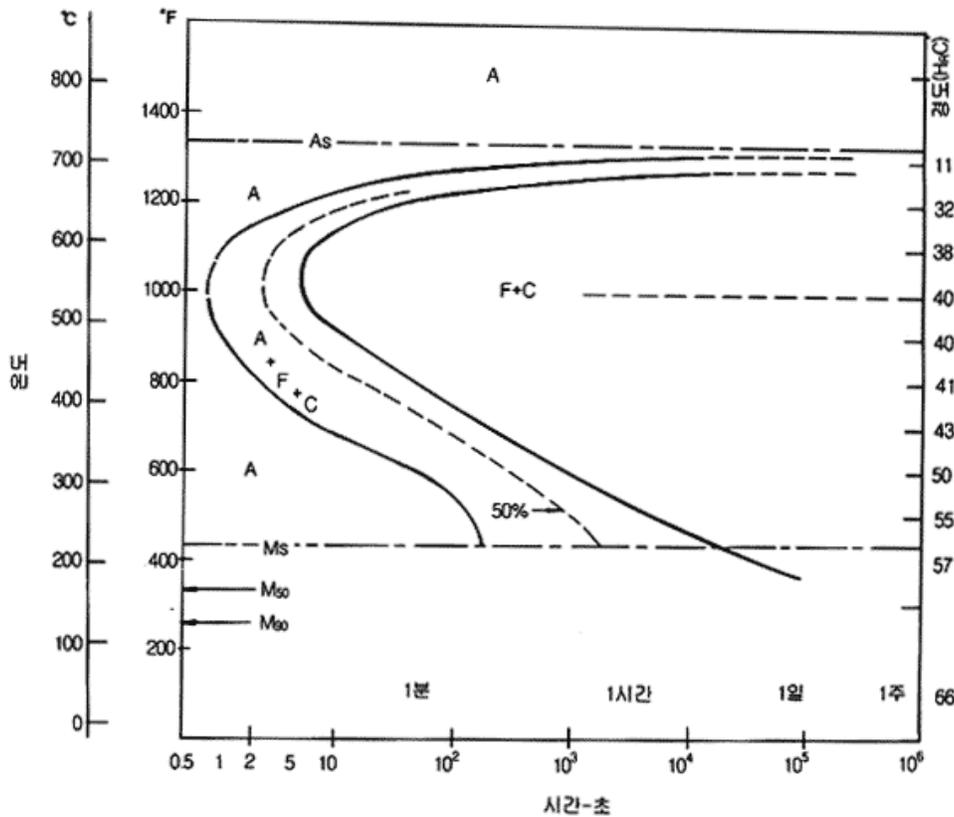


그림 1. 공석강의 항온변태곡선

그림 1은 공석강(0.8%C강)의 전형적인 TTT curve를 나타낸 것이다. TTT curve는 2개의 C자 형상을 가진 곡선으로 구성되어 있는데, 왼쪽 곡선은 변태 개시선을, 오른쪽 곡선은 변태 종료선을 나타낸다.

또한 550°C 부근의 온도에서 곡선이 왼쪽으로 돌출되어 있는데, 이것은 변태가 이 온도에서 가장 먼저 시작된다는 것을 의미하는 것으로서 이 곡선의 nose라고 부른다.

TTT curve의 특징은 변태가 시작되는 시간과 종료되는 시간을 나타낸다는 것으로서, 일반적으로 nose 온도 위에서 항온 변태시키면 Pearlite가 형성되고, nose 아래의 온도에서 항온 변태시키면 Bainite가 형성된다.

Pearlite와 Bainite 두 조직 모두 Ferrite와 Cementite로 이루어져 있으나, Pearlite는 두 상이 교대로 반복되는 층상조직을 나타내고 있고 Bainite는 침상에 가까운 형태를 나타낸다. 또한 Pearlite 형성온도범위 중 비교적 높은 온도에서 형성된 Pearlite는 조대하고, 비교적 낮은 온도에서 형성된 Pearlite는 미세하다. Bainite 역시 형성온도에 따라 조직의 차이를 보이는데, 350~550°C범위의 온도에서 형성된 상부 Bainite (upper bainite)는 Ferrite 주위에 Cementite가 석출되는 반면에, 250~350°C 온도범위에서 형성된 하부 Bainite (lower bainite)에서는 Ferrite 내에 Cementite가 석출되어 있다.

한편 그림 2는 공석강과 아공석강의 항온변태곡선을 Fe-C 상태도와 관련시켜서 나타낸 것이다. 그림 2의 (b)에서 보면 Pearlite가 형성되기 시작하는 시간과 종료되는 시간은 nose 부근에서 가장 짧고, A1선으로 온도가 올라갈수록 시간이 오래 걸린다. 또 그림 2의 (c)에서 보면 아공석강인 0.5%C강에서는 또 다른 곡선이 하나 존재하는데, 이것은 초석Ferrite가 형성되기 시작하는 시간을 나타내는 곡선이다. 이와 비슷하게 과공석강에서도 초석

Cementite가 형성되기 시작하는 곡선이 존재한다.

공석강과 아공석강의 항온변태곡선에서 나타나는 또 하나의 차이점은 Martensite가 형성되기 시작하는 온도인 Ms 온도가 다르다는 것이다. 일반적으로 탄소함량이 적을수록 Ms 온도는 올라간다.

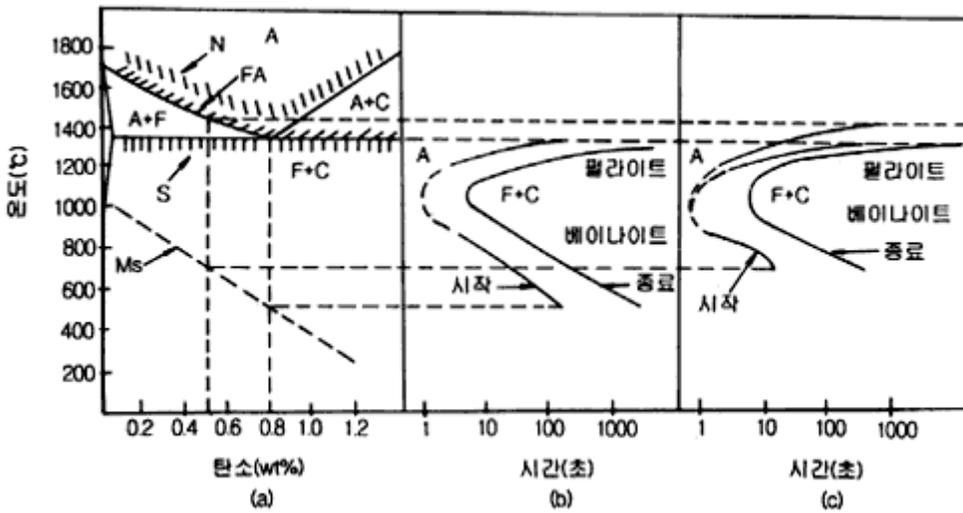


그림 2 Fe-C 상태도(a)와 공석강의 항온변태곡선(b) 및 0.5%탄소강의 항온변태곡선과(c)의 관계

Pearlite의 형성

공석강을 850°C로부터 750°C까지 냉각해서 이 온도에서 항온 유지시키면 어떠한 변태도 일으키지 않는다. 그러나 650°C까지 냉각시켜서 항온 유지하면 1초 후에 Pearlite 변태가 시작되고 10초 이내에 변태가 완료된다(그림 3(a)의 곡선 II). Pearlite형성온도가 낮아짐에 따라 층상Pearlite는 점점 미세해지고 조직은 더욱 경화된다.

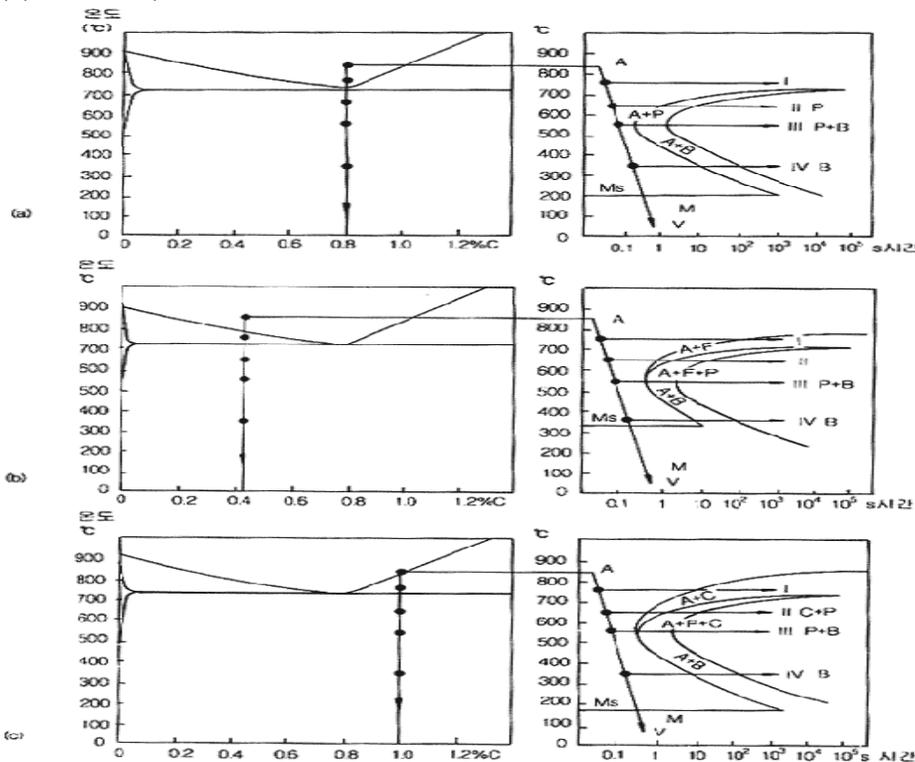


그림 3 (a) 0.80% C (b) 0.45% C (c) 1.0% C를 함유한 강에 대한 여러 가지 냉각프로그램으로부터 얻어지는 조직상의 상태

A=Austenite B=Bainite C=Cementite F=Ferrite
 P=Pearlite M=Martensite Ms= Martensite 생성 개시온도

Pearlite 형성과정을 Cementite 의 형성으로부터 시작된다고 가정하면, Austenite 에서 Cementite 가 형성되기 위해서는 탄소원자가 확산 이동해 와야만 하고, 동시에 Cementite 의 인접한 지역은 탄소가 고갈되므로 Ferrite 가 형성되어, Cementite 와 Ferrite 층이 나란히 성장해간다.

공석강을 860°C에서 Austenite 화 한 후 705°C에서 항온 변태시킬 때 유지시간에 따른 조직의 변화를 보면, 소정의 잠복기(Incubation period)가 지난 후에 생성된 Pearlite 콜로니(colony)의 핵이 이웃한 핵에서 성장하는 콜로니와 만날 때까지 계속 성장해간다.

A1 변태온도 바로 아래온도는 핵 생성속도는 작고 성장속도는 비교적 크기 때문에 소수의 핵만이 형성되어 성장하게 되어 형성된 Pearlite 의 층상간격(Inter lamellar spacing)은 비교적 큰 편이다.

그림 3(b)에 있는 아공석강의 경우, 750°C에서 변태를 일으키면 Ferrite 만이 형성되어 Ferrite 와 Austenite 의 2상 평형상태가 된다(곡선 I). 변태를 650°C에서 일어나게 하면 Ferrite 가 우선적으로 형성되고, 잠시 후에 Pearlite 가 형성된다.

그림 3(c)에 나타난 과공석강의 경우에도 유사한 방법으로 Cementite 가 우선적으로 형성되고, 그 다음에 Pearlite 가 형성된다.

Bainite 의 형성

공석강을 약 550°C이하의 온도에서 항온 변태시키면 Bainite 가 형성되기 시작한다. Bainite 의 형성은 Austenite 결정립계에서 Ferrite 핵의 형성으로부터 시작된다고 가정하고 있다. Ferrite 핵이 형성되면 주위의 Austenite 탄소농도는 증가해서 Cementite 가 형성되어, Ferrite 와 Cementite 가 나란히 성장해간다.

Bainite 는 형성온도에 따라 상부 Bainite 와 하부 Bainite 로 분류되는데, 공석강을 860°C에서 Austenite 화 한 후 500°C에서 0.5초간 항온 변태시킨 상부 Bainite 조직을 보면 깃털모양의 상부 Bainite 조직과 일부 Pearlite 가 나타나는 것을 알 수 있다. 일반적으로 상부 Bainite 는 비교적 취약한 반면, 하부 Bainite 는 비교적 인성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

한편 비교적 낮은 온도인 300°C에서 형성된 하부 Bainite 조직은 상부 Bainite 와는 다른 형태를 나타낸다. 공석강을 860°C에서 Austenite 화 한 후 300°C에서 항온유지시간에 따른 조직의 변화를 보면 형태는 깃털모양이라기 보다는 침상의 형태를 보이고 있다.

공석강에서 상부 Bainite 에서 하부 Bainite 로의 천이는 350°C 정도에서 일어나지만 그 경계를 명확히 구분하기는 어렵다. 그러나 상부 Bainite 의 경도는 변태온도에 따라 약간 변화되는데 비하여 하부 Bainite 의 경도는 변태온도가 저하함에 따라 급격히 증가된다. 또한 상부 Bainite 는 동일경도로 급냉 tempering한 조직보다 인성이 그다지 높지 않지만, 하부 Bainite 는 동일경도의 급냉 tempering한 조직보다 현저하게 큰 인성을 나타낸다.

연속냉각변태 (Continuous cooling transformation) 및 연속냉각변태도(CCT)

공석강의 연속냉각변태

대부분의 실제 열처리작업에서는 항온변태에 의해서 강을 열처리하기도 하지만 Austenite 온도영역에서 상온까지 연속적으로 냉각 변태시켜서 열처리하고 있는 경우도 많다. 따라서 항온변태곡선을 연속냉각변태곡선으로 전환시키지 않으면 안 된다. 이를 위해서는 항온변태곡선 위에 연속냉각곡선을 그려서 구할 수가 있다. 세로축은 온도, 가로축은 시간(log 눈금)으로 정하여 항온변태곡선 위에 여러 가지 냉각속도로 냉각시켰을 때의 연속냉각곡선을 그림 4에 나타냈는데, 여기서는 간단히 하기 위해서 냉각곡선을 직선으로 표시하였다. 앞에서 공석강, 아공석강 및 과공석강을 연속적으로 서냉 시켰을 때의 조직변화에 대하여 자세히 알아보았는데, 이때에는 거의 평형냉각을 가정했기 때문에 그림 4의 도움 없이도 Fe-Fe₃C 상태도를 통하여 상 변화를 예측할 수 있었다. 그러나 실제적인 열처리작업에서는 아무리 느린 냉각인 노냉(Furnace cooling)을 시킨다 해도 평형냉각보다는 매우 빠른 냉각이고, 더욱 빠른 냉각인 유냉(Oil quenching)이나 수냉(Water quenching)은 비 평형 냉각조건이 되기 때문에 Fe-Fe₃C 상태도로부터 상 변화를 예측할 수 없다. 따라서 그림 4를 통하여 연속냉각속도에 따른 변태조직의 변화에 대하여 기본적인 안목을 기르는 것이 중요하다.

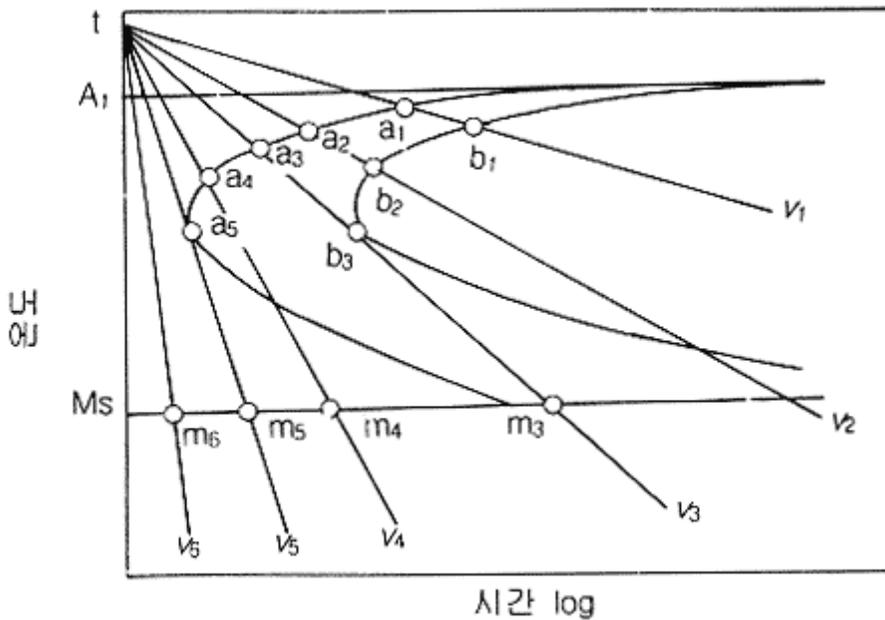


그림 4. S-곡선과 연속냉각곡선과의 관계

지금 몇 개의 공석강 시편을 A1 변태점 이상의 온도(그림 3.4에서 t)로 가열한 후, 여러 냉각속도(v1~v6)로 냉각시켰다고 하자. 이때 그림 4에서 직선의 기울기가 클수록 냉각속도가 큰 것이다. 노냉과 같이 제일 느린 냉각은 직선 v1, 공냉처럼 약간 빠른 냉각은 직선 v2, 유냉과 같이 더욱 빠른 냉각은 v3, v4, 수냉과 같이 가장 빠른 냉각은 v5, v6로 나타내진다.

제일 느린 냉각속도인 v1에서는 냉각곡선이 Pearlite 변태의 개시 및 종료선을 통과하고 있다. 즉 변태개시선과는 a1점에서, 종료선과는 b1점에서 교차하고 있다. 이와 같이 노냉 시에는 Austenite가 Pearlite로 변태하게 된다. 특히 이 변태가 변태개시선의 가장 높은 온도에서 일어나므로 이 Pearlite 조직은 조대하게 된다.

좀더 빠른 냉각속도(공냉)인 v2에서도 역시 냉각곡선이 Pearlite 변태의 개시 및 종료선을 통과하고 있으므로 Austenite는 Pearlite로 변태된다. 그러나 변태개시온도가 a2이고, 종료온도가 b2이므로 노냉 시보다는 약간 낮기 때문에 Pearlite 조직은 좀더 미세해진다. 이와 같이 공냉에 의해서 형성된 미세 Pearlite 를 Sorbite라고 부른다.

더욱 빠른 냉각속도인 v3의 냉각속도에서는 변태온도가 더욱 낮으므로 형성된 Pearlite 는 Sorbite보다 더욱 미세해진다. 이와 같이 가장 미세한 Pearlite 를 Troostite라고 부르며, Troostite 변태가 시작되는 온도를 Ar'이라고 한다.

이와 같은 이유로 해서 v3보다 빠른 냉각일 경우에 냉각곡선은 단순히 변태개시선과 a4에서 교차될 뿐이며 종료선과는 교차되지 않는다. 이것은 Pearlite 변태가 시작되었을 뿐 종료되지 않았다는 것을 의미한다. 다시 말하면 일부의 Austenite는 Pearlite 변태되지만 나머지는 Pearlite 조직으로 변태할 만한 시간적 여유가 없었다는 것을 나타내는 것이다. 따라서 Pearlite 로 변태되지 못하고 남아 있는 Austenite는 그대로 냉각되고 m4점에 도달되면 Martensite로 변태하게 된다. 이와 같은 Martensite 변태가 시작되는 온도를 Ar'', 또는 흔히 Ms점이라고 한다. 그러므로 v4의 속도로 냉각하면 Troostite와 Martensite의 혼합조직을 얻을 수가 있고 이때의 냉각속도는 유냉에 해당된다.

냉각속도가 v5보다 클 때에는 Austenite는 전혀 Ferrite와 Cementite로 분해되는 일 없이 모두 Martensite로 변태된다. 탄소강에서는 이러한 냉각속도가 수냉에 해당된다. v3와 같이 Pearlite를 형성함이 없이 전적으로 Martensite를 형성시키는 최소의 냉각속도를 임계냉각속도(Critical cooling rate)라고 한다.

그림 4에서 연속냉각변태를 설명할 때 주의해야 할 사항이 한가지 있다. 즉 그림에서 냉각속도 v3~v1은 도면 상에서 Martensite 변태개시온도인 Ms점을 통과하고 있다. 예를 들면 냉각곡선 v3는 m3점에서 Ms선과 교차하

고 있지만 Martensite로 변태하는 것은 아니다. 왜냐하면 이 냉각곡선은 이미 Pearlite 변태개시선과 종료선을 통과했기 때문에 전부 Pearlite 로 변태되어 Martensite로 변태할 Austenite가 남아있지 않기 때문이다. 따라서 Martensite 변태는 일어나지 않게 되고, m3점보다 오른쪽의 Ms선은 아무런 의미가 없는 선이 되는 것이다.

연속냉각변태도

한편 공석탄소강을 연속 냉각시키면 Austenite로부터 Pearlite 로의 변태개시는 어느 일정한 온도에서 일어나는 것이 아니라 냉각속도가 커짐에 따라 변태개시온도는 낮아진다. 그러므로 그림 4에서와 같이 항온변태곡선으로부터 연속냉각에 의해서 형성되는 조직을 직접적으로 예측하는 것은 실제로 정확한 것이 아니다. 실험결과에 의하면 공석탄소강에서의 연속냉각변태도는 항온변태곡선에 비하여 좀더 저온 측으로 그리고 좀더 장시간 쪽으로 이동되어 있다는 사실을 알 수 있다. 일반적으로 항온변태곡선을 IT 곡선, 또는 TTT곡선이라고 부르는 것과 구별하기 위해서 연속냉각변태도를 CCT곡선(continuous cooling transformation diagram)이라고 부른다.

한편 공석강의 연속냉각변태도 위에 Austenite 화 온도로부터 여러 가지 속도로 냉각시켰을 때의 냉각곡선과 그에 따른 형성조직을 일반적으로 다음과 같이 구분한다. 매우 느린 냉각인 노냉에 의해서 조대한 Pearlite 를 형성시키는 열처리 방법을 풀림(Annealing)이라고 하고, 좀더 빠른 냉각인 공냉에 의해서 미세한 Pearlite 인 Sorbite를 형성시키는 열처리방법을 노멀라이징(normalizing)이라고 한다. 또한 가장 급랭인 수냉에 의해서 전부 Martensite조직을 얻는 열처리방법을 급냉(Quenching)이라고 하는데, 이 방법은 강을 경화시키는 열처리방법으로서 그 중요성이 매우 크다.

한편 곡선 C와 같은 냉각속도에서는 앞서 설명한 바와 같이 미세한 Pearlite 의 변태가 개시되지만 이 변태를 완료시킬 만한 충분한 시간이 없기 때문에 Pearlite 로 변태하지 못하고 남아있는 Austenite가 Martensite로 변태하게 된다. 따라서 최종조직은 극히 미세한 Pearlite 인 Troostite와 Martensite의 혼합조직으로 된다.

공석탄소강의 연속냉각변태도로부터 알 수 있는 또 하나의 중요한 사실은 Pearlite 변태를 일으키고 난 후에야 Bainite 변태 개시선이 통과된다는 것이다. 이 사실은 연속냉각에 의해서는 Bainite 변태가 일어날 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 Bainite 조직을 얻기 위해서는 공석강을 Ms온도와 nose 온도 사이로 급랭시켜서 항온 변태시키는 수 밖에 없다. 그러나 이것은 탄소강에만 해당되는 것으로서 합금원소가 첨가된 특수강에서는 연속냉각에 의해서도 Bainite 변태를 일으킬 수 있다.

Martensite 변태

Austenite 상태에서 상온으로 급격히 냉각하면 탄소가 확산할 만한 시간적 여유가 없으므로 이동하지 못하여 α 철 내에 고용상태로 남아 있게 된다. 그런데 탄소원자가 차지할 수 있는 격자 틈 자리의 크기는 γ 철(0.51 \AA)에서 보다는 α 철(0.35 \AA)에서 더 작기 때문에 격자가 팽창될 수밖에 없다. 이때 야기되는 응력 때문에 강의 경도가 증가되어 경화된다. 이와 같이 α 철 내에 탄소가 과포화 상태로 고용된 조직을 Martensite라고 부른다.

이 Martensite 변태가 시작되는 온도를 Ms점, 종료되는 온도를 Mf점이라고 하며, 이 온도는 Austenite의 화학조성에 따라서 달라지는데 공석강에서는 약 230°C 정도이다. 그밖에 탄소량에 따른 MS, Mf점의 변화를 보면, 탄소량이 증가됨에 따라 Ms, Mf점은 저하하는 것을 알 수 있다. 또한 Martensite 조직의 형태도 탄소량에 따라서 래스(lath), 혼합 및 판상(plate) Martensite로 변화된다.

한편 Pearlite 와 Bainite의 형성은 변태시간에 따라 진행되는 반면에, Martensite 형성은 변태시간에는 무관하고 Ms 온도 이하로의 온도 강하량에 따라서만 결정된다. 일반적으로 공석강을 850°C 에서 Austenite화 한 후 Ms온도 아래로 냉각시키며 관찰한 따른 Martensite 형성과정을 보면 210°C , 200°C , 180°C 및 20°C 로 온도가 내려감에 따라 Martensite 변태량이 증가함을 명확히 알 수 있다.

잔류 Austenite

공석강을 급냉하면 Austenite가 100% Martensite로 변태하는 것이 아니라 일부의 Austenite가 Martensite로 변태되지 못하고 상온까지 내려오게 된다. 이와 같이 상온에서 존재하는 미 변태된 Austenite를 잔류Austenite (Retained Austenite)라고 한다. 그림 13에서 보는 바와 같이, 0.6%C 이상의 탄소강에서는 Mf온도가 상온 이하로 내려가기 때문에 상온까지 급냉하여도 Martensite 변태는 종료되지 않는다. 이것이 잔류Austenite를 형성시키는 이유로 된다.

한편 급냉한 강을 상온 이하의 어느 온도로 냉각시키면 잔류Austenite가 Martensite로 변태하게 되는데, 이와 같은 처리를 심냉처리(Sub-zero treatment)라고 한다.

고탄소강이나 고합금강에서는 잔류Austenite가 많이 존재하므로 급냉 경도가 낮아질 수 있다. 또한 잔류

Austenite는 상온에서 불안정한 상이므로 이것이 존재하는 강을 상온에서 방치 시 또는 사용시 Martensite로 변태되어 치수변화를 일으키고, 연마 시에도 Martensite로 변태되어 균열을 일으킬 염려가 있다. 심냉 처리에 사용되는 냉매로는 드라이아이스(-78℃)나 액체질소(-196℃) 등이 있는데, 이 심냉처리에 대해서는 다음에 자세히 서술하고자 한다.

● 강의 변태에 미치는 합금원소의 영향

앞에서는 강에서 일어나는 Pearlite 변태나 Marten site 변태 등에 대한 기본적인 사항을 설명하였다.

본 난에서는 탄소강에 합금원소가 첨가되었을 때에 이러한 변태상황이 어떻게 달라지는지를 설명하고자 한다. 즉, 탄소강에 Ni 이나 Cr 등의 합금원소가 첨가되면 S곡선이 우측으로 이동하여 Pearlite 변태가 일어나기 어려워짐으로 두께가 큰 강재를 급냉할 때에 냉각속도가 작아도 Martensite조직을 얻을 수 있고, 또한 18Cr-8Ni 스테인리스강에서처럼 MS점이 현저하게 저하됨으로써 상온에서도 완전한 Austenite 조직상태로 존재하게 된다.

급냉- 풀림(Quenching-Tempering) 처리를 행하여 사용하는 기계구조용강이나 공구강에서 합금원소를 첨가하는 목적은 여러 가지가 있지만 그 중에서도 중요한 사항은 전술한 바와 같이 Pearlite변태를 억제시켜서 급냉에 의한 Martensite 조직을 얻기 쉽도록 하기 위한 것이다. 즉 경화능을 향상시키기 위한 것이다. Pearlite 변태와 Martensite변태에 대한 합금원소의 영향에 대해서 설명하기로 한다.

Pearlite 변태에 미치는 영향

(1) A1, A3 및 Acm 선의 변화

강을 급냉하거나 풀림 처리할 경우에 우선 Austenite 상태의 온도로 가열할 필요가 있다. 탄소강에서는 A3 또는 Acm선 이상으로 가열하면 Austenite단상으로 되지만, 합금원소가 첨가되면 이 A3 및 Acm선의 온도가 달라지므로 합금강에서는 Austenite 조직으로 하기 위한 가열온도의 선정에 주의할 필요가 있다.

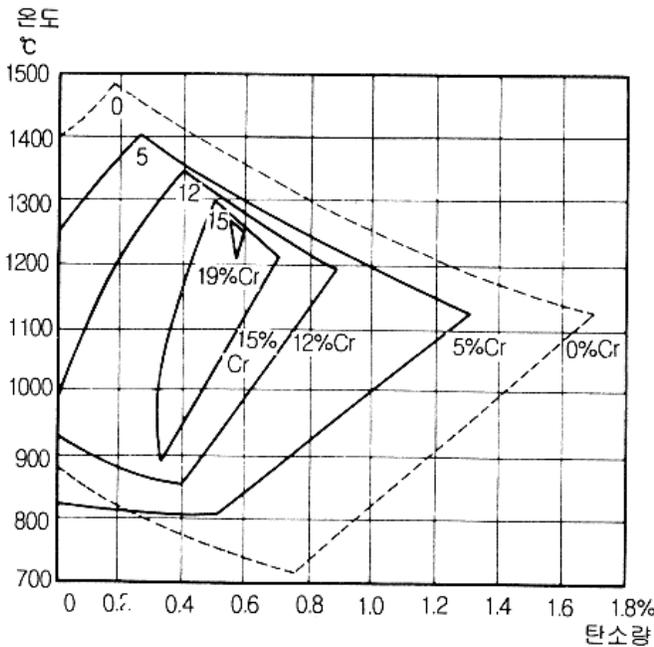


그림 5. Austenite 영역에 미치는 Cr과 C의 효과. 점선은 탄소강과 Austenite 영역을 나타낸다.

즉, 공석점은 철과 탄소만을 함유한 합금에서는 이동되지 않음을 나타낸다.

그림 5는 Cr 첨가에 따라 A3선과 Acm선이 변화되는 상태 즉 Austenite 상 영역이 변화되는 상태를 나타낸 것으로서, Cr량이 증가함에 따라 723℃, 0.8%C에 해당되는 A1 변태점이 저 탄소 쪽으로 그리고 고온 쪽으로 이동함으로 Austenite 단상영역은 Cr량이 증가함에 따라 점점 좁아지게 된다. 따라서 Austenite화 하기 위해서는 보다 높은 온도로 가열해야만 한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 탄소와의 친화력이 강한 원소 즉 탄화물 형성원소에서 공통적으로 볼 수 있는 현상으로서, 예를 들면 0.8%C-18%W-4%Cr-1%V를 함유한 고속도공구강에서는 900℃ 정도로 가열 시 Austenite 중에 고용되는 탄소량은 불과 0.25% 정도이므로 이것을 급냉하여 Martensite조직으로 변태시켜도 그다지 경화되지 못하지만, 1270~1300℃로 가열하면 0.55% 정도의 탄소가

Austenite 중으로 고용됨으로 이것을 급냉하면 HRC 65~67 정도의 경도를 얻을 수 있다.

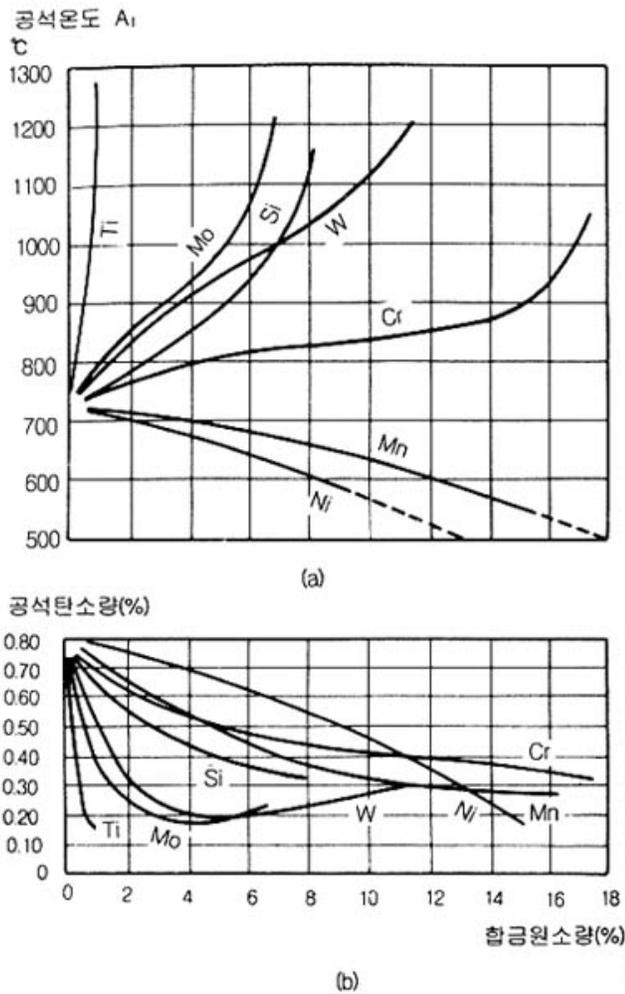


그림 6. 공석온도와 공석 탄소량에 미치는 첨가합금원소의 영향

여러 가지 합금원소 첨가에 의한 A1 변태점과 공석탄소량의 변화를 그림 6에 나타냈는데, Ti, Mo, Si 및 W 등은 모두 A1 변태점을 상승시키고, 반대로 Ni과 Mn은 저하시킨다. 그림에 나타내지는 않았지만 질소도 A1 변태점을 저하시키므로 침탄 질화에 의해서 질소가 강 중에 들어가 있는 경우는 급냉 온도를 다소 낮출 수 있다. 그림 (b)는 공석탄소량의 변화를 나타낸 것으로서 여기에 나타낸 모든 원소가 공석탄소량을 낮춘다. 즉 Fe-Fe₃C계에서 아공석의 탄소량에서도 이들 합금원소가 들어가면 공석이나 과공석이 되므로 전술한 바와 같이 탄화물을 완전히 고용시키는 데에 보다 높은 온도가 필요하게 된다.

(2) Pearlite 변태속도의 변화

평형상태도상에서 A1 및 A3선이 합금원소 첨가에 의해서 변화되는 양상은 전술한 바와 같으나 실제로 Austenite 상태에서 어느 냉각속도로 냉각시킬 때에 Ar3변태나 Ar1변태가 어떻게 나타나는가 하는 것은 냉각속도와 합금원소에 의해서 현저하게 달라진다.

Pearlite 변태속도는 핵 생성속도(N)과 핵 성장속도(G)에 의해서 결정되지만 합금원소 중에서 Co와 Al만은 이 N과 G를 증가시켜서 Pearlite 변태를 촉진시키는 반면에 그 이외의 원소들은 Pearlite 변태를 지연시키는 효과를 갖고 있다. 특히 Mo, Ni 및 Mn 등은 그 작용이 현저한데, 예를 들면 Mn은 0.2%에서 0.8%로 함유량이 증가하면 G를 1/5로 감소시키고, 또 Mo은 불과 0.5%첨가로서 G를 1/100로, N을 1/1000로 감소시킨다고 알려져 있다. 그림 3.7은 Pearlite 변태속도에 미치는 Ni의 첨가영향을 나타낸 것으로서, Austenite 안정화 원소(austenite stabilizer)인 Ni은 Pearlite 변태를 지연시키기 때문에 Pearlite 변태개시선이 오른쪽으로 이동되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 Pearlite 변태가 완료되는 걸리는 시간이 훨씬 길어지게 된다. 또한 Ni첨가에 의해서 A1 변태온도도 낮아짐을 알 수 있다.

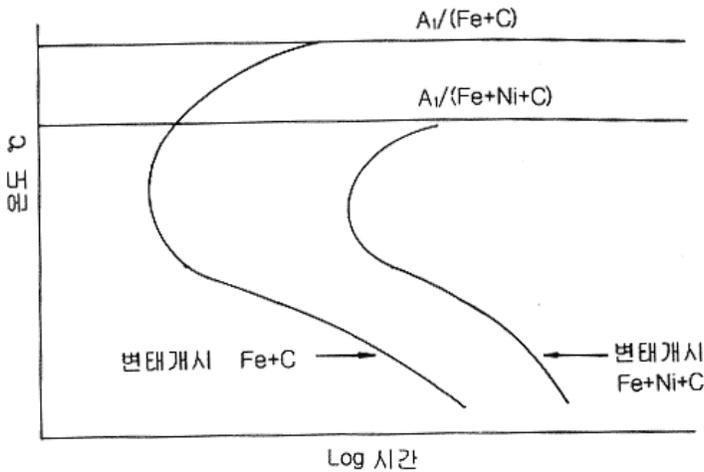


그림 7. Austenite안정제 Ni에 의한 변태곡선의 이동.

이와 같이 Pearlite 변태를 지연시키는 합금원소를 첨가하면 두께가 큰 강재를 급냉하는 경우에 중심부의 냉각 속도가 다소 늦더라도 Pearlite 변태가 일어나기 어려우므로 완전한 Martensite 조직으로 경화된다는 사실을 알 수 있다.

Martensite 변태에 미치는 영향

(1) Ms점과 합금원소

이미 서술한 바와 같이 Martensite 변태는 Austenite 상태에서 급랭할 때 Ms 온도에서 변태가 시작되고 일반적으로 그 이하로 온도 강하량에 따라 변태량이 증가하다가 Mf 온도에 도달하면 변태가 종료된다. Ms와 Mf 사이의 온도구간은 보통 200~300℃이다. 그러나 Austenite 중의 탄소나 Ni 함유량이 증가하면 Ms점은 강하하므로 이들 원소량이 어느 만큼 이상이 되면 상온에서 100% Martensite 조직을 얻을 수가 없다.

마르텐사이트 조직으로 변태시키는 것을 목적으로 하는 보통의 급냉에서는 우선 강종에 따라서 Ms점이 어떻게 다른가, 또 Ms점 이하로 온도가 내려감에 따라서 어떻게 Martensite 가 증가하는가를 알 필요가 있다.

강의 화학성분 중에서 Ms점에 가장 큰 영향을 주는 것은 탄소량이다. 이미 전술한 바와 같이 보통의 탄소강의 경우 탄소량 0.1% 증가에 따라 약 35℃정도 Ms점이 강하한다. 또한 Mf점은 탄소량에 따라 Ms점 이상으로 현저하게 강하되어 0.6% 이상의 탄소를 함유하는 강에서는 상온에서 Austenite 의 일부가 잔류하게 된다.

탄소 이외의 합금원소로서는 Co와 Al만이 Ms점을 상승시키고 그 밖의 실용원소는 거의 모두 Ms점을 강하시키는 작용을 하고 있다. 그림 3.8과 3.9는 여러 가지 탄소량의 강에 Cr과 Mn을 첨가한 경우 Ms점의 변화를 나타낸 것으로서, Cr은 1% 첨가당 20℃정도, Mn은 탄소량에 따라 다소 차이가 나지만 1% 첨가당 약 40℃정도 Ms점을 강하시킨다.

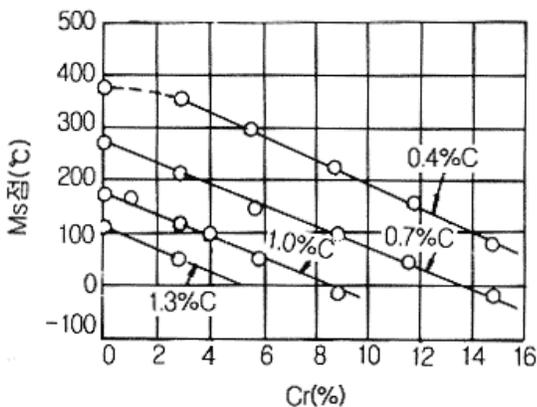


그림 8. 강의 Ms점에 대한 Cr의 영향

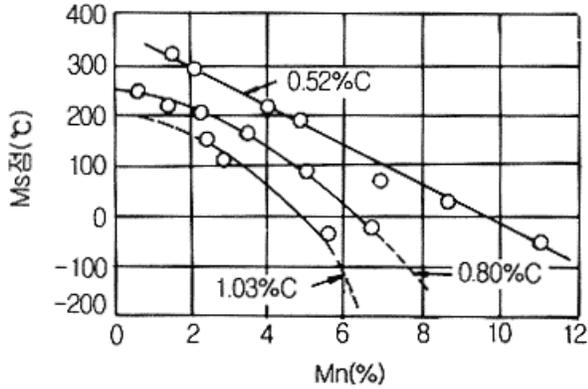


그림 9. 강의 Ms점에 대한 Mn의 영향

이와 같이 여러 가지 합금원소가 강의 Ms점에 미치는 영향을 조사한 연구결과를 기초로 하여 강의 Ms점을 화학조성으로부터 계산할 수 있게 한 실험식이 몇 가지 제안되고 있다.

그 예는 다음과 같다.

$$Ms(°C) = 550 - 350 \times C\% - 40 \times Mn\% - 35 \times V\% - 20 \times Cr\% - 17 \times Ni\% - 10 \times Cu\% - 10 \times Mo\% - 10 \times W\% - 10 \times Si\% + 15 \times Co\%$$

위의 식에서 알 수 있듯이 탄소 다음으로 Mn, Cr, Ni순으로 Ms점의 강하효과가 약해지고, Si, W, Mo 등은 거의 같은 정도의 효과를 나타냄을 알 수 있으며, Co는 반대로 Ms점을 상승시킨다. 식 중에 포함되어 있지 않지만 Al도 역시 Ms점을 상승시키지만 그 효과는 Co보다는 약하다. 또 Cu는 Ms점을 약간 저하시킨다고 알려져 있다. 그러나 위의 계산식은 함유원소가 전부 Austenite 중에 고용된 상태에서 급냉한 경우에만 적용되는 것이며, 탄화물 등의 고용이 완전치 못해서 일부분 잔류할 경우에는 Austenite 중의 고용원소량이 적어지므로 실제 MS점은 위의 식에서 계산된 Ms점보다 높아진다는 데에 주의하여야 한다.

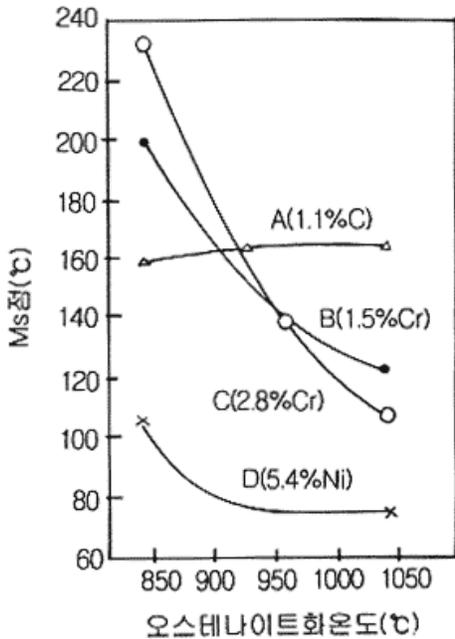


그림 10. 4종류의 1.1%C를 함유한 강에서 Ms점에 미치는 Austenite화 온도의 영향

그림 10은 1.1%C가 함유된 A강과 1.1%C에 1.5%Cr을 함유하는 B강, 2.8%Cr을 함유하는 C강 및 5.4%Ni을 함유하는 D강의 4강종에 대하여 Austenite화 온도에 따른 Ms점의 변화를 나타낸 것으로서, 탄소강과 Ni강에서는 850°C 이상에서 이미 Fe₃C가 완전히 고용되어 있으므로 Ms점의 변화는 적지만 Cr강에서는 급냉 온도의 상승과 함께 Cementite나 Cr탄화물들이 Austenite 속에 고용되므로 Ms점은 현저히 저하된다. 이것으로부터 알 수 있듯이 공구강과 같이 탄화물이 잔류된 상태에서 급냉 할 때에는 강 전체의 화학성분을 알고 있더라도 Ms점을 계

산할 수는 없다. 이 경우에 Ms점을 계산하기 위해서는 Austenite자체의 화학조성을 알 필요가 있다.

(2) 응력에 의한 잔류Austenite의 Martensite화

Austenite는 외부로부터의 탄성적 혹은 소성적인 힘을 가함으로써 Martensite변태를 일으킬 수가 있다. 18-8스텐레스강의 박판(薄板)이나 세선(細線)을 상온에서 압연하거나 인발하면 강한 자성을 나타내므로 Martensite로 변태되었다는 것을 알 수 있다.

통상적인 퀴칭강에서도 Austenite가 잔류되어 있는 경우 여러 가지 이유로 인하여 Martensite로 변태된다.

해머로 쳐도 Martensite로 변태할 때가 있고, 또 급냉한 충격시험편을 Charpy 충격시험기로 파단시키면 그 파단면으로부터 먼 부위에서는 잔류Austenite가 존재하지만 파단면 부근에서는 전부 Martensite로 변태되어 있는 경우도 같은 현상으로 설명할 수 있다. 특히 급냉된 부품을 그라인더로 연삭하는 경우에 종종 발생하는 연삭 균열은 부품의 일부가 연삭될 때 발생하는 열에 의해서 그 부품내부의 잔류응력분포가 변하고, 잔류Austenite가 국부적으로 Martensite로 변태했기 때문인 것으로 생각된다.

이와 같이 잔류Austenite는 매우 불안정한 상이므로 상온에서 장시간 방치함에 의해서도 응력분포가 점차로 변화됨에 따라서 Martensite로 변태하여 치수변화를 일으키거나 균열의 원인이 되기도 하므로 주의해야 한다.