

현장기술 초심자를 위한 열처리의 기초(제 1보) -열처리의 효과-

정병호 · 김무길
부경대학교 신소재공학부

Heat Treatment of Steel for Beginners(1) -Effect of Heat Treatment-

B. H. Jung and M. G. Kim

Div. of Material Science & Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

1. 서 언

금속재료를 고온에 유지하면 이보다 저온의 경우에 비해 온도에 대한 에너지적인 안정 상태를 따라 빠르게 내부 구조가 변화한다. 따라서 압연이나 단조 등의 강한 가공에 의해 내부에 많은 결함이 도입된 금속재료에는 가열에 의해 결함이 감소하는 회복이나 재결정 현상이 발생한다. 또 고온에 유지됨에 의해 형성되는 상(相)의 조합이나 각 상의 성질이 변화하므로 재료 전체의 성질이 변화한다. 이러한 상태를 유지하려면 빠르게 냉각하거나 냉각 속도를 제어하여 별개의 상으로 변태시키면 가열 전과 다른 성질의 재료를 얻을 수 있다. 이와 같은 금속재료가 지닌 열적인 성질을 적극적으로 이용하여 내부 구조를 조절하는 방법이 열처리이다. 열처리는 온도, 유지 시간, 냉각 속도를 제어 인자로 하는 단순한 방법이나 실용 부재(部材)에 열처리를 실시하면 취화, 균열 또는 굽힘 등 여러 가지 문제가 생기는 경우가 있다. 이 때문에 실용 열처리 제품을 제조할 때에는 이와 같은 문제를 생기지 않게 하기 위해 재료 설계 및 설비 기술이나 관리 기술 등의 종합적인 기술이 필요한데, 이것을 총괄하여 열처리 기술이라고 부른다. 본 자료에서는 철강 재료를 중심으로 현장 기술 초심자를 위한 열처리 기술의 기본 사항에 대하여 이해하기 쉬운 몇 가지만 발췌하여 정리하였다.

2. 열처리의 종류와 효과

2.1 철-탄소계 평형 상태도와 열처리

철(鐵)은 철광석(산화철)을 고로(高爐)에서 환원하여 만든다. 고로 내에는 환원제로 넣는 코크스와 공기의 반응에 의해 발생한 CO 가스가 철광석을 환원시킨다. 이 때 고로 내의 온도는 매우 높기 때문에 환원된 철은 CO 가스로부터 탄소(C)를 다량으로 흡수한다. 철 중의 탄소 농도가 높아짐에 따라 철의 용점은 낮아지며 가장 용점이 낮게 되는 4.3 wt.(중량 %) 부근의 탄소량으로 되면 철은 용출된다. 이러한 4 wt.% 정도의 탄소를 함유한 철이 선철(주철)이다. 선철은 탄소 함유량이 많기 때문에 용점이 낮아 주조(鑄造)하기는 좋지만 소성 가공성이 나빠서 압연이나 단조하기 어렵다. 따라서 선철을 즉시 전로 등의 정련로에서 탈탄시켜 소성 가공성이 우수한 저탄소의 철로 변화시키는데 이것이 강(鋼)이다[1]. 따라서 철강재료는 탄소를 함유한 철이 기본이며, 이것을 열처리하는 것이기 때문에 철과 탄소의 관계를 충분히 이해하는 것이 필요하다. 다음에 철과 탄소의 관계를 간단히 정리한다. 순철(純鐵)을 실온으로부터 가열하면 911°C에서 체심입방 구조의 α 페라이트로부터 면심입방 구조의 오스테나이트(γ 상)로 결정 구조가 변화(고상 변태) 한다. 또 온도를 상승시키면 1392°C에서 다시 체심입방 구조의 δ 페라이트로 변태하고, 1536°C(용점)에서 용해하여 액상으로 된다[2]. 이러한 변태 온도는 철의 탄소 함유량 증가에 따라 연속적으로 변화한다. 이 변화를 나타낸 것이 그림 1의 철-탄소계 평형 상태도이다. 이 그림은 철이 탄소 함유량과 온도에 대하여 평형 상태로 있을 때의 상태를 나타낸다.

이 그림에서와 같이 철에 탄소가 함유되면 순철에

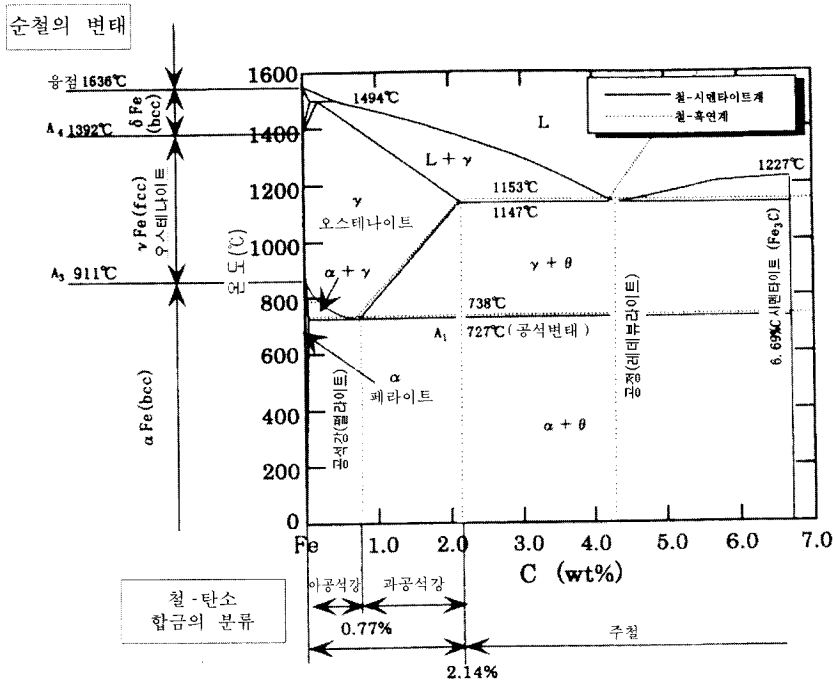


그림 1. 철-탄소 2원계 평형 상태도.

서 보이지 않는 시멘타이트(Fe₃C) 상이 나타난다. 6.69 wt.% 이하의 탄소 함유량에서 실온의 조직은 페라이트와 시멘타이트의 혼합조직(그림 중의 α+θ) 이 된다. 시멘타이트의 양은 탄소 함유량의 증가에 따라 증가한다. 시멘타이트는 페라이트에 비해 매우 경(硬)한 상이기 때문에 철은 탄소 함유량의 증가에 따라 경하게 된다. 고온의 상인 오스테나이트는 탄소를 많이 고용(固溶)할 수 있어 단상(單相) 영역이 넓다. 또 오스테나이트의 고용한도 이상의 탄소 함유량에서는 오스테나이트와 시멘타이트, 또는 오스테나이트와 액상의 혼합 조직(각각 그림 중의 γ+θ, L+γ)으로 된다. 또한 혼합 조직에 있어 각 상의 탄소 농도 및 각 상의 양은 철-탄소계 평형 상태도에서 정량적으로 구할 수 있다[3]. 이것을 구하는 방법은 참고 문헌 (3)에 상세히 설명되어 있다. 이상은 철-탄소계 평형 상태도를 기초로 철과 탄소의 관계를 간단히 설명 한 것이지만, 탄소 함유량과 온도에 대하여 평형 상태에서의 철의 상에 대한 상태를 나타낸 것이기 때문에 철강 재료의 열처리 온도를 결정할 때 많은 참고가 된다. 한편 철-탄소계 평형 상태도는 다음과 같은 정보를 얻는 경우에도 그 역할을

한다. 철강재료는 순철, 강, 주철로 크게 나누어진다. α 페라이트 상은 727°C에서 탄소를 가장 많이 고용한다. 이의 최대 고용량인 0.021 wt.% 이하의 탄소를 함유한 철을 순철이라 부른다. 또 고온의 상인 오스테나이트는 탄소의 최대 고용량이 1147°C에서 2.14 wt.%이다. 0.021 wt.% 이상(순철 이상)에서 2.14 wt.% 이하의 탄소를 함유하는 철을 강이라 하고, 2.14% 이상의 탄소를 함유하는 철을 주철로 구분하여 부른다. 또 0.77 wt.%의 탄소를 함유하는 강을 공석강(共析鋼), 이보다 탄소 함유량이 적은 강을 아공석강(亞共析鋼), 또 이보다 탄소 함유량이 많은 강을 과공석강(過共析鋼)이라 구별하여 부르고 있다. 이와 같이 철강재료의 탄소 함유량에 따른 분류는 철-탄소계 평형 상태도상의 고용 한도나 변태점의 경계에 의해 구분하고 있다. 기계 구조 부품의 주요 부품은 강의 단조품이 잘 이용되고 있다. 자동차의 기어나 액슬 샤프트와 같은 동력 전달용 부품은 우수한 피로특성, 내마모성 및 내충격성이 요구되기 때문에 침탄켄칭(浸炭燻込) 처리나 고주파 켄칭 등의 표면 경화 처리를 실시하여 이러한 특성을 부여한다. 이 중 침탄켄칭 처리를 실시할 경우에는 그림 2와

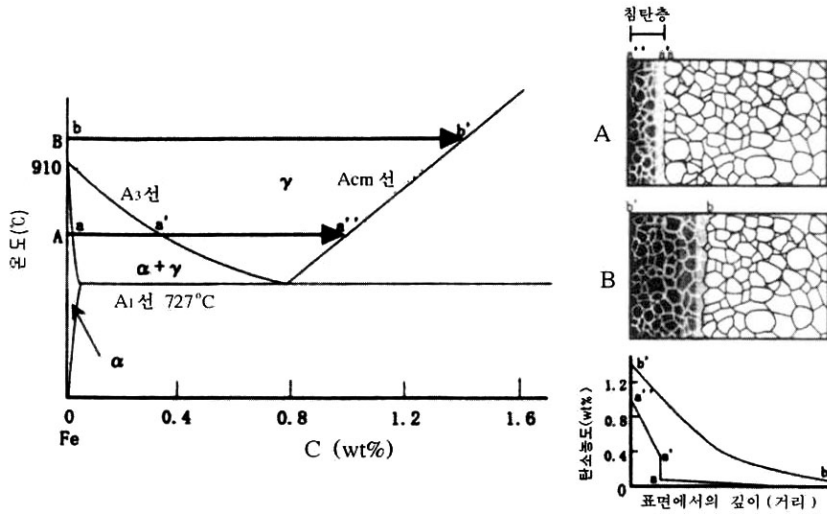


그림 2. 침탄 조직과 상태도.

같이 침탄 온도에 따라 표면 침탄층의 형성이 다르게 된다는 것을 평형 상태도에서 알 수 있다. 또 침탄과 반대인 탈탄(脫炭)의 경우는 그림 3과 같다.

2.2 열처리의 종류와 목적

철-탄소계 평형 상태도에서 같이 철강재료는 매우 변화가 많은 여러 가지 상변태를 보이고 있으며, 열처리에 의해 상태도에 나타나지 않는 여러 가지 상

도 나타난다. 이러한 상변태를 이용하면 여러 가지 열처리 효과를 얻을 수 있다. 이 때문에 특히 철강 재료에는 열처리의 종류가 많다. 본 절에서는 철강재료에 실시되는 열처리 전반의 개요에 대하여 알아보 고자 한다. 철강재료에 실시되는 대표적인 열처리를 간단히 요약하면 표 1과 같다. 표에서 나타난 기본 열처리는 내부 구조의 조절을 위해 실시되는 기본적인 열처리이다. 기본 열처리를 부재(部材)의 일부 또

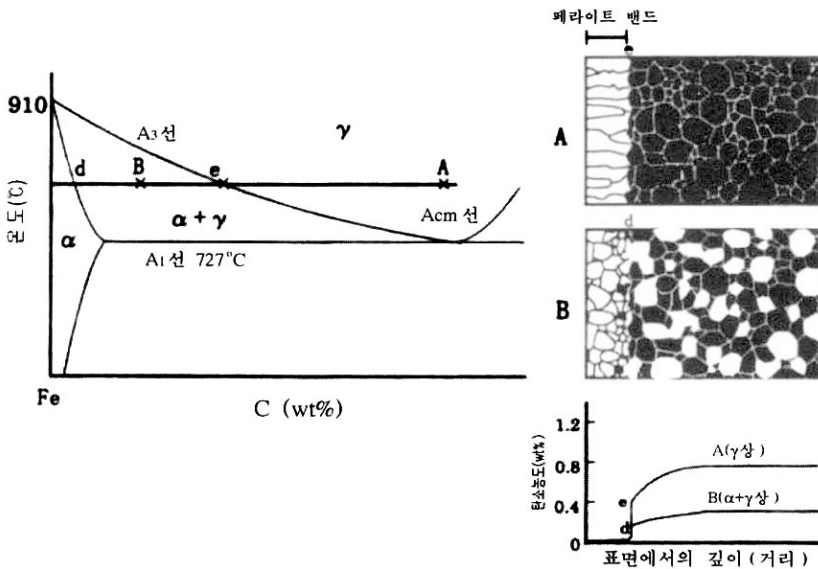


그림 3. 탈탄 조직과 상태도.

열처리의 종류		효과	
기본 열처리	퀵칭 · 템퍼링 (조질)		
	어닐링	균질화 어닐링	균질조직 (JIS 에서 완전어닐링)
		연화 어닐링	절삭성 · 고연성
		구상화 어닐링	절삭성 · 고연성
		응력제거 어닐링	잔류응력 제거
	노르말라이징		조직의 표준화
용체화 · 시효		석출 강화	
특수 열처리	표면경화 열처리 (고주파퀵칭, 침탄퀵칭 등)		
	단조퀵칭		
	가공 열처리		

는 다른 프로세스(공정)와 조합하여 실시함에 의해 별도의 효과를 얻을 수 있다. 이 중 몇 가지를 특수 열처리라 부른다.

2.2.1 퀵칭(焼込, 담금질, Quenching)

강을 오스테나이트화(Austenitizing) 후 충분히 빠르게 냉각하면 무확산 변태(마르텐사이트 변태)가 생겨 철-탄소계 평형 상태도에 보이지 않는 체심 정방정의 마르텐사이트상으로 변태한다. 이러한 격자변태가 생길 때는 강의 내부에 고밀도의 결함이 생기기 때문에 탄소를 다량 고용한 오스테나이트는 탄소를 침입형으로 고용한 그대로의 상태에서 마르텐사이트가 된다. 마르텐사이트는 그림 4와 같이 다른 상에

비해 매우 경(硬)한데, 탄소 함유량의 증가에 따라 그 정도가 급격히 크진다.

이러한 마르텐사이트상으로 변태시켜 경화(硬化)시키는 열처리가 퀵칭이다. 퀵칭처리는 고강도의 강을 얻기 위한 매우 중요한 열처리이다. 또한 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 적절한 열처리를 실시함에 의해 200~2400 MPa의 광범위한 강도 수준을 가진 강이 얻어진다[5]. 그러므로 철강재료는 그림 5와 같은 강도 수준에 따라 연강, 고장력강, 강인강 및 초장력강 등으로 분류되어 불려지고 있다[5].

철강재료는 이 외에 보론강, 공구강, 자동차용 강판 등 목적과 용도에 의해서도 분류되고 있다. 그림 6은 각각의 기본 열처리에서 추천하고 있는 가열 온도와 철-탄소계 평형 상태도와의 관계[6]이다. 아공석강을 퀵칭 할 때에는 통상 A₃ 변태점 이상으로 가열하여 완전히 오스테나이트화 한다. A₃ 변태점 이하의 α+γ 영역으로부터 퀵칭하면 연한 페라이트가 그대로 남게 된다. 이에 비해 과공석강은 통상 A₁ 변태점 이상이며 Acm 변태점 이하의 온도로 가열한다. 이것은 γ+θ(초석 시멘타이트) 영역으로부터 퀵칭하여도 초석 시멘타이트가 구상(球狀)으로 존재하여 매우 경하기 때문에 퀵칭 후에 남아 있어도 문제가 없기 때문이다. 오히려 Acm 변태점 이상으로 가열하면 오스테나이트의 결정립이 조대화되기 때문에 Acm 변태점 이상으로의 퀵칭은 잘 하지 않는다(燒? 性的의 관점에서는 결정립이 큰 쪽이 좋다.) 이상은 권장되는 퀵칭 온도로서 아공석강은 A₁~A₃ 변태점 사이의 온도에서, 또 과공석강은 Acm 변태점 이상

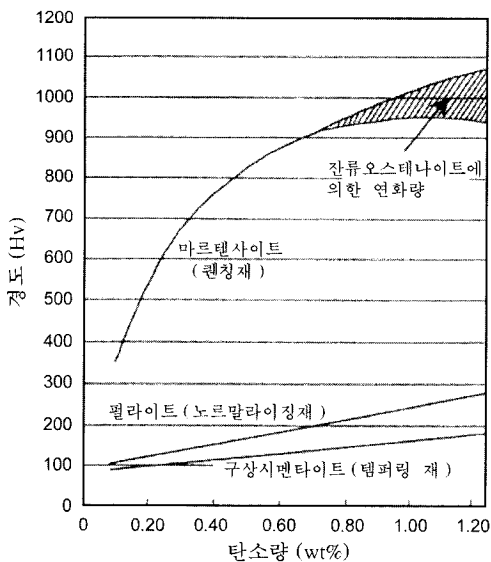


그림 4. 각 조직의 정도와 탄소량의 관계.

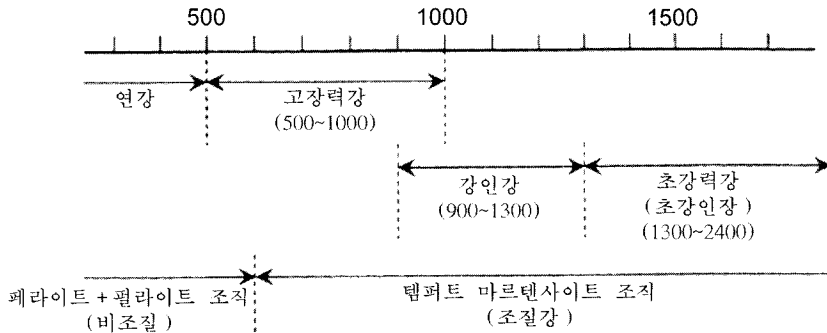


그림 5. 여러 가지 철강재료의 강도와 조직.

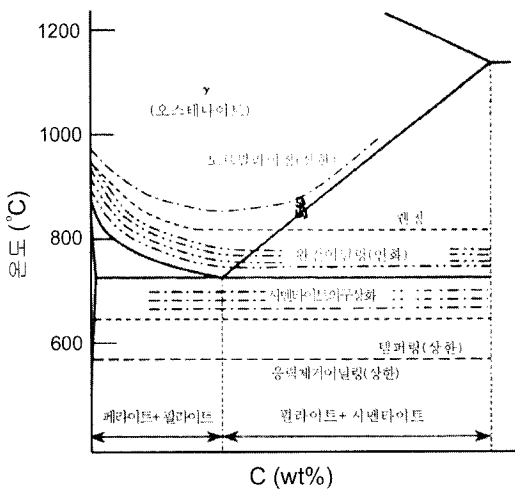


그림 6. 각종 열처리 온도와 상태도.

의 온도로부터 각각 퀴칭하여도 실질적으로 문제가 없다는 것을 지적하고 있다[7].

퀴칭 온도에서의 유지 시간은 아공석강의 경우, 완전히 오스테나이트로 하면 좋고 부재의 크기에 따른 유지 시간은 필요 없다. 한편 과공석강의 경우에는 탄화물을 오스테나이트에 고용시키는데 시간이 걸리기 때문에 15~20분의 유지 시간이 필요하다. 또 이전에는 1인치 당 30분의 시간이 필요했던 것으로 알려져 있지만 부재의 크기가 영향을 미치는 것은 승온 시간이라 이것은 속설이다[7]. 이상과 같이 설명한 온도 및 시간외에 열처리하는 냉각 속도가 중요하다. 퀴칭시에는 특히 냉각 속도의 제어가 중요하기 때문에 여기에 대해서는 제 2보에 다시 설명하기로 한다.

2.2.2 템퍼링(燒戻, 뜨임, Tempering)

퀴칭한 그대로의 마르텐사이트는 경하고 취약한 성

질을 가지고 있다. 또 퀴칭 처리에서 마르텐사이트로 변태할 때, 강에는 잔류응력(내부응력)이 생긴다. 잔류응력은 시효변형(時效變形), 가열변형(加熱變形), 가공변형(加工變形), 응력부식균열(應力腐蝕龜裂), 시효균열(時效龜裂) 및 연삭균열(研削龜裂)을 일으키는 원인이 된다. 또한 실제의 퀴칭 처리에서는 오스테나이트가 100% 마르텐사이트로 변태하지 않는다. 특히 탄소 함유량이 많아지면 미변태된 오스테나이트가 잔류한다. 이러한 잔류 오스테나이트는 실온에 장시간 방치하면 서서히 마르텐사이트로 변태하여 내부응력이 증가한다. 이 결과, 균열이나 찌수, 형상의 변화를 생기게 하는 원인이 된다. 이 때문에 실용적으로는 퀴칭 후에 A₁ 점(727°C) 이하의 적당한 온도(통상적으로 650°C 근방)에 가열하여 성질을 조절한다[8]. 이 열처리가 템퍼링 처리이다. 퀴칭과 템퍼링 처리는 일련의 작업으로 실시되는 것이 보통이며 합쳐서 조질(調質) 처리라 부른다. 퀴칭한 탄소강을 가열하면 그림 7과 같이 3단계의 과정을 거쳐 페라이트와 시멘타이트로 된다.

또 고온의 400°C 이상이 되면 회복 현상이 일어나 내부의 결함이 감소하게 된다. 이것에 의하여 강도와 인성의 균형이 향상됨과 동시에 잔류응력의 제거와 찌수, 형상의 안정화가 이루어진다. 그림 8[9]은 S40C에 대한 것으로 템퍼링 온도 변화에 따른 기계적 성질의 변화를 나타낸다.

일반적으로 템퍼링은 저온 템퍼링(150~200°C)과 고온 템퍼링(550~650°C)이 있다. 하중의 부하에 의한 변형이나 마모를 방지하기 위해 사용하는 공구 등의 경우는 잔류응력의 제거, 찌수, 형상의 안정이 주목적이므로 인성이 약간 증가하는 저온 템퍼링을

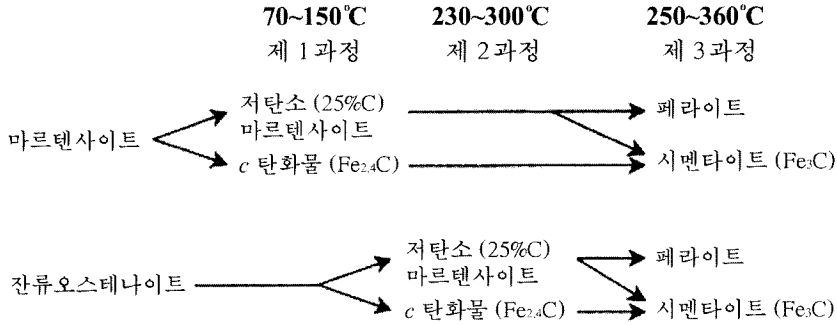


그림 7. 탄소강 마르텐사이트의 템퍼링 과정.

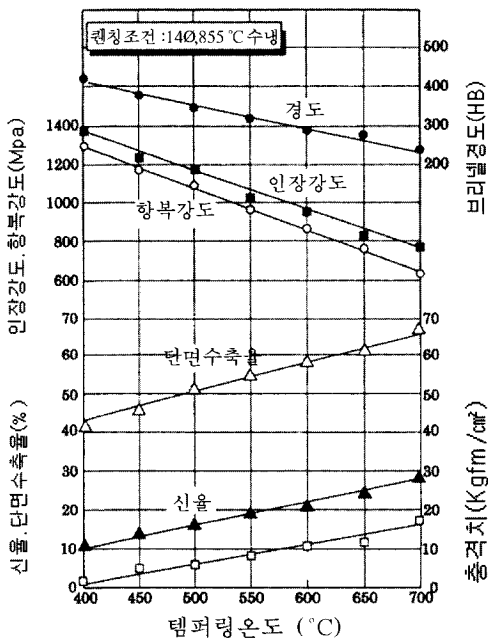


그림 8. S40C의 템퍼링에 의한 성능 곡선.

실시하여 경도의 저하를 최소로 억제시켜 사용하는 경우가 많다. 또 기계 구조 부품과 같이 충분한 인성이 필요한 경우에는 고온 템퍼링을 실시한다. 템퍼링시에는 석출 현상이 있기 때문에 템퍼링 온도에 따른 유지 시간이 필요하다. 구조용 탄소강이나 구조용 합금강에서는 경험적으로 합금 원소의 종류나 양에 따르지 않고 온도와 시간으로부터 얻어진 다음 식을 이용할 수 있는데, 이 식에서 템퍼링 매개변수 λ가 동일 값이면 거의 동일한 템퍼링 상태가 되는 것으로 알려져 있다.

$$\lambda = T(\log t + A)$$

여기서 T는 템퍼링시의 온도(K), t는 템퍼링시의 시간(sec), $A=17.7-5.8 \times C(\%)$ 이다.

또 구조용 탄소강이나 구조용 합금강에서는 경도가 동일하다면 기계적 성질이 거의 동일하기 때문에 경도와 템퍼링 매개변수의 관계를 구할 수 있고 또 목표로 하는 경도로부터 온도와 시간을 결정할 수 있다[8]. 그러나 생산적으로 보면 여러 강종의 크기가 다른 부재에 대한 열처리의 경우에는 부재의 크기에 따르지 않고 템퍼링 시간을 1시간으로 하는 것이 합리적이다. 템퍼링은 기본적으로 장시간 실시하는 것이 좋지만 1시간의 템퍼링을 2~3회 반복하여 실시하면 양호한 성질이 얻어진다. 특히 공구강에 대한 반복 템퍼링 처리는 장시간의 템퍼링을 1회 실시한 것보다 매우 효과적이다[7].

2.2.3 어닐링(燒鈍, 풀림, Annealing)

강을 연화(軟化)시키거나 결정 조직의 조정 및 내부 응력의 제거를 위하여 적당한 온도로 가열한 후 천천히 냉각하는 방법이 어닐링이다. 어닐링은 표 1에 표시한 것 외에 저온 어닐링, 가단화(可鍛化) 어닐링, 흑연화(黑鉛化) 어닐링 등 넓은 목적으로 실시된다. 내부 응력 제거나 연화를 목적으로 하는 경우는 적당한 온도로 가열하고 또 결정 조직의 조절을 목적으로 하는 경우는 A_3 변태점+약 50°C의 온도로 가열 후 로냉(爐冷) 또는 회냉(灰冷)을 실시한다.

2.2.4 노르말라이징(燒準, 불림, Normalizing)

강의 조직을 표준화하기 위하여 A_3 변태점 또는 A_{cm} 변태점보다 30~50°C 높은 온도로 가열한 후 대기 중에서 공냉(空冷)하는 것을 노르말라이징이라 한다. 강은 이 열처리에 의해 가공의 영향이 제거되고 결정립이 미세화되어 기계적 성질이 향상(강인화)

된다. 한편 노르말라이징에 의한 표준화 조직(노르말라이징 조직)은 평형 상태도에서 얻어지는 표준 조직과는 다르기 때문에 주의를 요한다.

2.2.5 용체화(溶体化) · 시효(時效) 처리

고온으로 가열하여 석출상을 고용(용체화 열처리)시킨 후 이보다 낮은 온도에 유지하여 석출상을 균일하고 미세하게 석출(시효 열처리)시켜 재료를 강화하는 방법이 용체화 · 시효 열처리이다. 이 처리는 비철 금속재료의 강화에 잘 이용된다. 철강재료에 대해서는 퀸칭 · 템퍼링(일명 Q.T 처리)에 대응하기 때문에 시효 석출에 의한 강화를 실시하는 경우에도 퀸칭 · 템퍼링이라 부르고 있다. 이 열처리에 의해 강화시키는 철강재료에는 마르텐사이트계 스테인리스강이나 마르에이징강(Maraging steel)이 있다. 용체화 처리 후 급냉 처리(퀸칭)에 의해 석출 경화 원소를 과포화로 고용한 마르텐사이트계 스테인리스강이나 마르에이징강은 경도도 낮고 가공성이 풍부하지만 시효 처리에 의하여 금속간화합물의 석출로 경도가 현저히 증가한다. 또 비철 금속재료의 경우도 포함하여 시효 처리는 일반적으로 그림 9와 같이 시효 온도가 낮을수록 경도의 최고 값에 도달할 때까지의 시간은 길어지지만 최고 경도 값은 고온 시효의 경우보다 높게 되는 경향이 있다.

2.2.6 특수 열처리

이상과 같은 기본 열처리를 부재의 일부에 실시하거나 다른 열처리 공정을 조합함에 의해 별도의 효과를 얻을 수 있다. 이러한 특수 열처리에 대하여 간단히 요약한다.

우수한 피로 특성, 내마모성이나 내충격성을 얻기 위해서는 부재의 표면이 경(硬)한 것이 요구된다. 이러한 특성이 필요한 부재에는 고주파 퀸칭이나 침탄 퀸칭 처리 등의 표면 경화 처리를 실시하여 부재 표면만 경화(硬化)시킨다. 열처리에 의한 표면 경화법은 이 외에 질화(窒化)처리, 침탄질화(浸炭窒化)처리 등이 있다. 또한 표면 경화법으로 코이닝(Coining)이나 샷 피닝(Shot peening) 등의 기계적 방법도 있다. 철강재료의 열간단조(熱間鍛造)는 1100~1250°C 정도의 온도 범위에서 실시된다. 단조 후 그대로 급냉하여 퀸칭 처리하면 퀸칭 공정을 생략할 수 있다. 이 외에 열간단조는 자체의 열을 이용하여 노르말라이징 등도 할 수 있다. 이상과 같이 가열하여 가공

하는 부재는 그 열을 이용하여 열처리하면(냉각 속도를 제어한다) 생산 가격의 절감 뿐 아니라 에너지 절감에 의해서 환경에도 좋은 생산 공정이 된다.

2.3. 강종(鋼種)과 기계적 성질의 관계

철강재료는 그림 4나 그림 9에 나타난 바와 같이 열처리에 의하여 폭 넓은 강도 수준의 재질이 될 수 있다. 여기서는 강의 종류에 따른 기계적 성질과의 관계를 살펴 보기로 한다.

그림 10은 구조용 탄소강과 구조용 합금강의 인장 강도와 기계적 성질의 관계를 나타낸 것이다[10]. 그림 10(a)에서와 같이 구조용강의 인장 강도와 경도, 0.2% 내력, 파단 신률의 관계는 강종에 따르지 않고 각각 하나의 데이터(Data) 집단을 이루고 있다.

이러한 성질은 강종 및 열처리에 따르지 않고 동일한 강도에서는 거의 동일한 성질이라는 것을 나타낸다. 특히 경도와 인장 강도는 상관 관계가 높다. 제품에는 파괴 시험을 할 수 없기 때문에 기계적 성질을 추정하거나 열처리가 충분히 실시되었는지를 판단할 때에는 경도 시험이 이용되고 있다. 이에 대하여 단면 수축률이나 충격치는 하나의 데이터 집단으로 표시되지 않는다. 그림 10(b)와 같이 단면 수축률이나 충격치는 탄소강보다 합금강이 인장 강도와 균형이 우수하다. 또 S25C 노르말라이징재와 S35C~S55C 조질재가 크게 성질이 다른 것과 같이 열처리 조직에 의한 차이가 크다(노르말라이징재에 비해 조질재가 인장 강도와 균형이 좋다). 합금강에서는 Mn강보다 다른 합금강이 더 균형이 우수하다. 이상 각 강종의 기계적 성질에 대하여 살펴보았

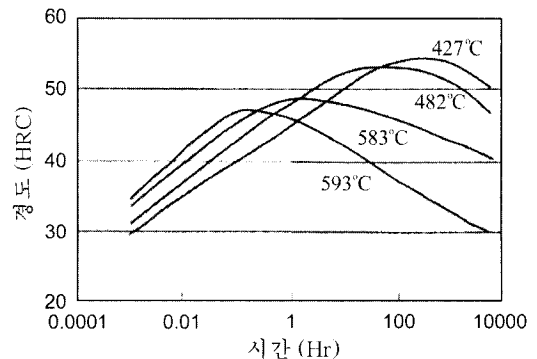


그림 9. 18Ni 마르에이징강의 시효 경화 곡선.

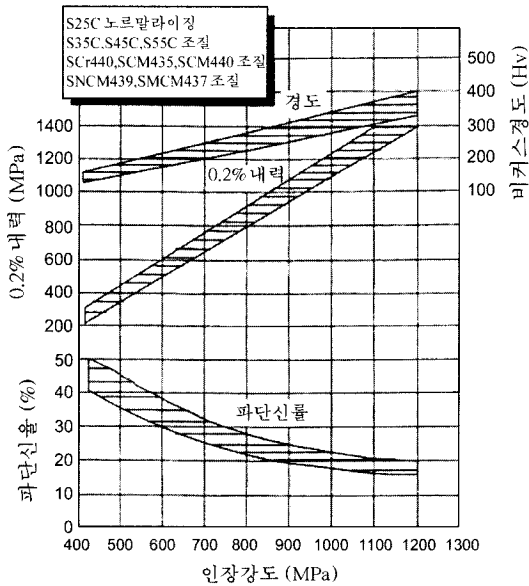


그림 10(a). 인장 강도와 각 기계적 성질의 관계.

으나 실제의 열처리에서는 부재의 체적이 열처리(특히 냉각 속도)에 크게 영향을 준다. 급냉이 필요한 열처리에서 부재가 크면 중심부까지 충분히 빠르게 냉각하기가 곤란하다. 이 때문에 데이터에서 나타낸 바와 같은 성질이 중심부까지는 얻어지지 않는다. 이와 같은 경우에는 탄소 함유량이 높은 강이나 합금강을 이용하여 열처리 성능을 높힐 필요가 있다.

*이 글은 日本"熱處理", 43(6), 2003년, p.395~401에 게재된 내용을 번역한 것임.

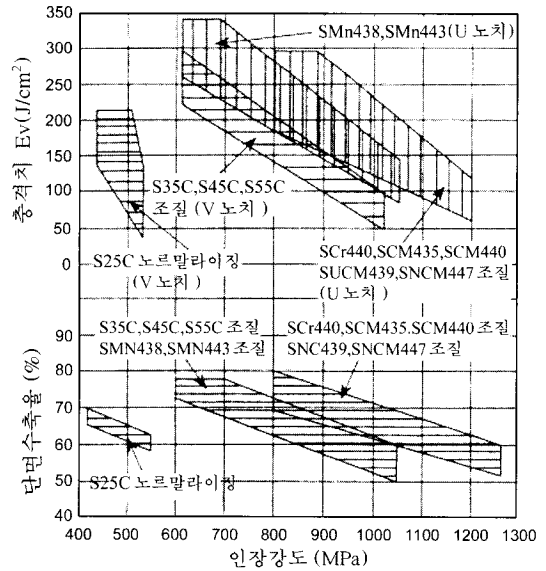


그림 10(b). 인장 강도와 각 기계적 성질의 관계.

참고문헌

1. 守谷英明, 長井 壽 : バウンダリ-, 17, 7, p. 38 (2001).
2. 守谷英明, 長井 壽 : バウンダリ-, 15, 10, p. 36 (1999).
3. 守谷英明, 長井 壽 : バウンダリ-, 16, 7, p. 24 (2000).
4. 守谷英明, 長井 壽 : バウンダリ-, 16, 10, p. 28 (2000).
5. 牧 正志 : 熱處理, 35, p. 195 (1995).
6. 橋本宇一, 大和久重雄 : 熱處理技術と材料および試験 (第 13版), 地人書館 (1987).
7. 大和久重雄 : 金屬臨時増刊号, p. 2 (1985. 5).
8. 梅澤 修 : 平成 15年度 第1回 熱處理技術 세미나テキスト, (株)日本熱處理技術協會, p. 3-1 (2003).
9. 特殊鋼ハンドブック, 大同特殊鋼(株).
10. 金材技研疲勞データブック 5, JIS 機械構造用鋼の基準疲勞特性, 科學技術廳金屬材料 技術研究所 (1989).