

등온 열처리강의 조직 관찰을 위한 에칭액

정리: 최 참수, 정 인상
경북대학교

Etching Isothermally Treated Steels*

Chang-Soo Choi and In-Sang Chung
Kyungpook National University

1. 머리말

철계 합금의 미세조직은 합금의 조성, 조직의 균질성, 가공방법 및 단면의 크기에 따라 매우 복잡하게 나타난다. 조대한 결정립을 갖는 강의 미세조직은 미세한 결정립의 강에 비해서 훨씬 관찰하기 쉽다. 대체적으로 강은 최적의 기계적 성질을 부여하기 위해 미세한 결정립으로 만드는 것이 보통이다.

일반적으로 철강 재료의 조직 관찰은 열처리(급냉처리)하여 변태된 조직을 템퍼링 하기 전에 관찰하는 것이 가장 쉽다. 그러나 거의 모든 경화강은 템퍼링을 반드시 해야 하며, 이러한 상태에서 조직의 관찰이 이루어진다. 급냉(퀵칭)시에 베이나이트와 마르텐사이트가 생성되어 복합조직이 형성된 경우에는, 템퍼링 온도가 낮은 한계온도인 A_{c1} 에 가까워 질수록 두 조직을 구분하기란 더욱 어려워진다.

이러한 요인들은 철강재의 구성 조직과 상의 구분을 더욱 어렵게 한다. 게다가 철강의 조직을 조사하는 대부분의 연구자들은 시험편의 에칭에 나이탈(nital)만을 사용하는 경향이 대단히 많지만, 나이탈이 철강재의 모든 미세조직을 노출시키는데 있어 가장 우수한 시약은 결코 아니다. 피크린 산(picric acid)이 특정 조건에서 폭발의 위험성이 있다는 이유로 어떤 회사에서 피크랄(picral)의 사용을 금지한다면 이는 참으로 불행한 일이다. 피크랄은 철강재의 특정 미세조직의 구성물을 노출시키는데 있어 아주 우수한 시약의 하나이다. 그리고 에칭에 수반되는 사고도 나이탈을 사용할 때에 비해 더 자주 일어나는 것도 아니다.

본 자료에서는 탄소 함량이 0.2, 0.4, 0.6 wt % (각

각 SAE 8620, 4140, 5160에 해당)인 저합금강의 등온변태 미세조직에서 상과 구성물을 쉽게 구별하기 위해, 나이탈, 피크랄, 10% 이황화 나트륨산($Na_2S_2O_5$) 수용액(sodium metabisulfite, SMB), 색조 에칭액과 같은 에칭액을 사용할 때의 각각의 유리한 점을 비교하고자 한다.

특히 SMB는 열처리된 철강재의 조직 검사에 더욱더 폭넓게 사용할 만한 가치가 있다. SMB는 대체적으로 나이탈과 같은 반응을 나타내지만 에칭 작용은 더욱 균일하다. 그리고 피크랄과는 달리 급냉된 상태의 마르텐사이트 조직을 아주 잘 노출시켜 준다. 또한 무확산 변태에 의해 생성된 마르텐사이트 뿐만 아니라 확산변태의 산물인 페라이트, 필라이트, 베이나이트 상의 확인에도 우수한 성능을 발휘한다. 그리고 SMB를 사용하면 조직관찰 시 콘트라스트가 우수하고, 또 사용의 안정성도 나이탈이나 피크랄에 비해 우수하다.

2. 시편의 준비

철강 재료의 미세조직을 관찰하기 위해서는 적절한 시편을 준비해야 한다. 많은 사람들이 이 과정을 귀찮고 사소하게 생각하고 있지만, 정확하게 조직을 해석하기 위해서는 이 과정이 아주 중요하다.

2.1. 시편의 채취 (sampling)

첫째 단계는 채취해야 할 시험 부위의 선정이다. 이 시험결과가 재료의 다른 부위 또는 다른 룯드에서도 유효하기 위해서는 이 시편 채취가 아주 중요하며, 샘플링된 시편은 룯드 전체를 대표할 수 있어야 한다. 채취

* 이 자료는 "Heat Treating Progress, April/May(2001) 25 에 실린 내용을 정리한 것이다.

하여 연마된 시편의 관찰면이 전체 시료의 방향과 일치하지 않을 수도 있음을 유의해야 한다.

조직을 관찰하기 위해서는 선정된 채취 부위에서 적절한 크기와 방향이 되도록 절단과정이 필요하다. 절단 장비에서는 일반적으로 연마튕날(절단 휠)이 사용된다. 적당한 튕날과 적절한 냉매를 사용하면 재료의 손상이 최소화되는 우수한 절단 표면을 얻을 수 있다. 재료의 손상이 더욱 심한 절단 방법이 사용되기도 하는데, 이럴 때는 시편 절단면이 절단 과정에서 심하게 손상되었을 것이므로 손상된 절단면을 충분히 제거한 후 다음 과정으로 옮겨 가야 한다.

2.2. 마운팅

시편 취급의 용이함과, 준비의 단순화, 모서리 보존 및 시편의 구분을 용이하게 하기 위하여 고분자물질을 사용하여 시편을 마운팅할 필요가 있다. 마운팅에는 가열 장치가 부착된 프레스를 이용하는 경화성 수지나 열이나 압력이 필요 없는 액상의 고분자 재료를 사용한다.

2.3. 연마 (grinding and polishing)

지난 25년 동안 시편준비에 자동화 기계의 사용이 현저하게 증가했다. 자동 그라인딩기와 폴리싱기를 사용하면 손으로 할 때보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 즉, 연마에 자동화 기계를 활용하면 일관성 있는 결과와 더 우수한 평활도 및 모서리 보존과 높은 생산성을 얻을 수 있다.

미세조직 관찰을 위해 철강 시편을 준비하는 데 있어, 정확한 방법이 한가지만 있는 것은 아니다. 철강재료의 종류나 목적에 따라 많은 방법이 적용될 수 있고, 특별한 경우에만 적용되는 방법도 있다. 표 1에는 이 자료에서 거론된 시편을 준비하기 위하여 사용된 방법을 예시하였으며, 대부분의 철강재료에 있어서도 적용할 수 있는 적절한 방법이라고 생각한다. 표에 제시된 대로만 따른다면 모서리 보존이 잘 되며, 일관성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

기타 변수는 요구조건과 시편에 따라 달라진다. 조연마(planar grinding)라고 불리는 첫 번째 단계는 몇 가지 재료를 사용해서 이루어진다. 이 과정에서 많이 사용되는 SiC 연마지는 만족할만 하지만 수명이 짧으며, 알루미늄 연마지가 사용되기도 한다. 시편 절단 시 발

표 1. 자동기계를 이용한 강과 알루미늄의 시편 준비

표면	연마재와 크기	하중, lbf (N) ²⁾	속도(rpm)와 방향 ³⁾	시간 (분)
Ultra-Prep metal- or resin-bonded disks	30, 45 μm diamond, water cooled	6(27)	240-300, 같은방향	평평해질 때까지
BuehlerHercules, H or S rigid grinding disks	9 μm Metadi Supreme diamond suspension	6(27)	120-150 같은방향	5
Texmet 1000 or Trident cloths ³	3 μm Metadi Supreme diamond suspension	6(27)	120-150 같은방향	3
Microcloth, Nanocloth, or Chemomet I cloths	Masterprep 0.05 μm alumina suspension, or Mastermet colloidal silica	6(27)	120-150 반대방향	2
스테인레스강과 마로에이징강				
Carbimet waterproof paper	120 or 240 grit SiC, water cooled	6(27)	240-300, 같은방향	평평해질 때까지
BuehlerHercules H or S rigid grinding disks	9 μm PC Metadi Supreme diamond suspension	6(27)	120-150 같은방향	5
Texmet 1000 or Trident cloths ³	3 μm Metadi Supreme diamond suspension	6(27)	120-150 반대방향	5
Microcloth, Nanocloth, or Chemomet I cloths	Masterprep 0.05 μm alumina suspension, or Mastermet colloidal silica	6(27)	120-150 같은방향	2-5

1. 하중은 시편 홀더 내의 시편당 받는 하중.

2. 같은방향: 연마 디스크와 시편 회전방향 동일, 반대방향: 연마 디스크와 시편 회전방향 반대.

3. 연마하기 어려운 시편에서는 1 μm 다이아몬드 사용 단계 추가 가능.

생한 손상부위를 충분히 제거하고, 홀더에 있는 모든 시편들이 적절한 시간 내에 동일한 평활도를 가질 수 있도록 항상 가능한 가장 미세한 연마재로부터 연마를 시작한다. 연마지의 연마 효과가 없어진 후에도 계속 사용하면 열이 발생되고 시편이 손상될 것이라는 데 유의하여, 연마지는 계속 새 것으로 갈아 주어야 한다.

수지나 금속으로 고정된 그라인딩 디스크를 이용하면 연마면의 평면성 확보와 모서리 보존 및 손상층의 제거 속도에 있어서 우수하다. 디스크의 표면은 다이아몬드가 포함된 작은 패드로 덮여 있다. 패드 주위의 다이아몬드가 없는 부분은 표면장력을 줄이고 연마효율을 높인다. 이 디스크는 수명이 길다. 경도가 큰 철계합금에는 금속고정 디스크를 사용하고 좀 부드러운 철계합금에는 수지고정 디스크를 사용하는 것이 바람직하다.

단단한 그라인딩 디스크(Rigid Grinding Disks, RGDs)는 두번째 단계(미세연마)에 사용할 수 있다. 물론 조대한 다이아몬드 입자(30~45 μm)를 사용한다면 첫번째 그라인딩 단계(조연마)에서도 RGDs를 사용할 수 있다. 이것은 매우 평평한 면을 만들어 낼 수 있고, 특히 모서리 보존이 중요할 때 사용하면 좋다. 이러한 디스크는 연마재가 부착되어 있지 않으므로 다이아몬드 현탁액을 주기적으로 표면에 공급해 준다. 대부분의 철강 시편 준비를 위하여 “만능 RGDs”가 적당하며, 연한 재료도 사용할 수 있는 만능 RGDs도 상용으로 공급되고 있으므로 이용 가능하다.

두번째 단계인 미세연마에는 성능이 좋은 천을 이용할 수도 있지만 RGDs 만큼 수명이 길지 않다.

2.4. 에칭

강에 사용되는 에칭액은 많은 표준 교과서[1]와 핸드북[2], 그리고 ASTM E-407-99, “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”에 소개되어 있다.

나이탈은 2%가 가장 널리 사용되며, 강에 대하여 가장 일반적으로 사용되는 에칭액이다. 나이탈은 마르텐사이트 조직의 관찰에 아주 우수하다. 또한 마르텐사이트 기지에 들어 있는 페라이트에 대해서도 아주 우수하며, 저탄소강에서 페라이트 결정립계를 잘 드러나게 한다. 권장하는 나이탈 조성은 1~5 ml 질산(HNO₃)에 100 ml 순수 에탄올의 혼합액이다. (에탄올은 계속사용하면 독성이 있으니 에탄올을 사용할 것)

피크랄은 페라이트 조직의 합금에서 시멘타이트를 구별하고 싶을 때와 페라이트와 시멘타이트 구성되어 있

는 펄라이트와 베이나이트 복합조직의 관찰에 우수한 성능을 나타낸다. 권장 피크랄 조성은 4g 피크리산(트리니트로페놀, (NO₂)₃C₆H₂OH)과 100 ml 순수 에탄올 혼합액이다.

나이탈과 피크랄 에칭액은 모두 페라이트를 용해시킨다. 그러나 나이탈의 용해속도는 결정 방위에 따라 다르지만 피크랄은 결정방위에 상관없이 일정하다. 다른 시약들은 나름대로의 용도를 가지는 데, 특히 고합금강이나 어떤 조직만 선택적으로 부식시킬 때, 또는 구-오스트나이트 결정립계를 관찰하는 데 유용하다.

2.5. 색조 에칭액

어떤 연구실에서는 피크랄 사용이 금지되어 있기 때문에, 본 자료를 위하여 준비된 시편은 10% 소듐 메타비설파이트 수용액(약어로 SMB)으로 에칭하였으며, 이 에칭액은 나이탈과 피크랄 모두의 장점을 많이 가지고 있다. 10 g의 소듐 메타비설파이트(Na₂S₂O₅)와 100 ml 물로 이루어진다. 다른 색조 에칭액과 비교하면 상대적으로 사용하기 간편하다. 이와 같은 시편의 에칭은 5~15초 동안 에칭액에 침지하면 되고, 연마면을 문지르는 행위는 않된다.

SMB는 광범위한 조성의 강재에 대하여 사용할 수 있고, 색상에 차이를 나타낸다. 색상의 차이가 강하지는 않지만 민감한 색판을 갖는 편광 필터를 일부 사용하면 색상의 차이가 강해질 수 있다. 즉 편광필터를 사용하면 페라이트가 가볍게 채색되고(나이탈이나 피크랄처럼) 나이탈처럼 페라이트 결정립계가 노출되는데, 그 균일도가 훨씬 더 크게 된다. 또한 피크랄과 마찬가지로 펄라이트와 베이나이트가 선명하게 나타나고 또한 급냉상태의 마르텐사이트도 분명하게 노출시켜 준다. 이 에칭액은 사용시 아주 안전하지만 섭취하거나 직접 피부와 접촉하는 것은 피해야 한다.

3. 등온변태

강에서조차 미세조직은 잘 이해되지 않았으며, 철강의 열처리는 다벤포트(Davenport)와 베인(Bain)이 오스트나이트의 등온변태에 관한 기념비적인 논문[3]을 발표하기 전까지는 과학이라기 보다는 오히려 예술이었다. 두 사람의 연구 결과는 조성이 다른 여러 철강재에 대하여 여러 온도에서 등온변태(isothermal transformation, IT)를 시키고, 그 결과를 시간-온도-변태(TTT) 곡선상에

나타내는 연구를 촉진시켰다[4,5]. 그 결과 수많은 강종에 대해 TTT곡선은 여러가지 접근 방법을 사용해서 개발되었다[6]. 이와 같은 등온변태된 시편은 강재의 미세조직을 이해하고 가르치는 데 아주 유용하다.

또한 오스트나이트의 변태는 등온변태가 아니라, 냉각속도를 제어하더라도 연구될 수 있으며, 이 결과를 연속냉각변태(CCT) 곡선상에 나타낼 수도 있다. 그러나 본 자료에서는 등온변태된 조직만 설명하기로 한다. (단, 등온유지 후에도 미변태 오스트나이트는 그 후의 급냉에 의하여 마르텐사이트로 변태된다.)

강의 탄소함량은 상의 종류와 구성물의 양과 형상에 영향을 미치는 주요한 인자이다. 본 연구를 위하여 탄소함량이 서로 다른 세 가지의 상업용 합금강(SAE 8620, 4140, 5160)을 선정하였다. 이 재료들은 설정 온도에서 오스트나이트화 시킨 후에 오스트나이트의 일부 또는 전부가 다른 상이나 구성물로 변환되도록 각각 다른 임계 온도(A_c1 아래)에서 유지되었다. 그 결과 얻

어진 이 합금들의 TTT 곡선은 그림 1과 같다.

3.1. 용어

미세조직의 관점에서 용어의 혼동이나 오용이 있다. 예를 들면, 솔바이트(sorbite)와 트루스타이트(troostite)는 1937년에 금속조직학 사전에서 제외되었다. 즉 그때까지 사용되었던 이 용어들은 강재의 미세조직을 정밀하게 구분하지 못했기 때문에 생긴 용어들이다, 그러나 아직도 이 용어들은 여전히 종종 사용되고 있다.

“상(phase)”이란 용어가 두 상(two phase)으로 이루어진 펄라이트나 베이나이트와 같은 혼합물(mixtures)에도 대하여도 때로는 사용되는데, 이것은 잘못된 것이다. 이러한 것은 “구성체(constituents)”라고 불리는 것이 더욱 적절하다. 상은 균질하고 물리적으로 독특한 물질이다. 급냉에 의해 생성된 마르텐사이트는 상이다. 그러나 템퍼링 후에는 이 상은 bct-마르텐사이트에서 bcc-펄라이트와 시방정계 시멘타이트로 분해되기 때문에 이

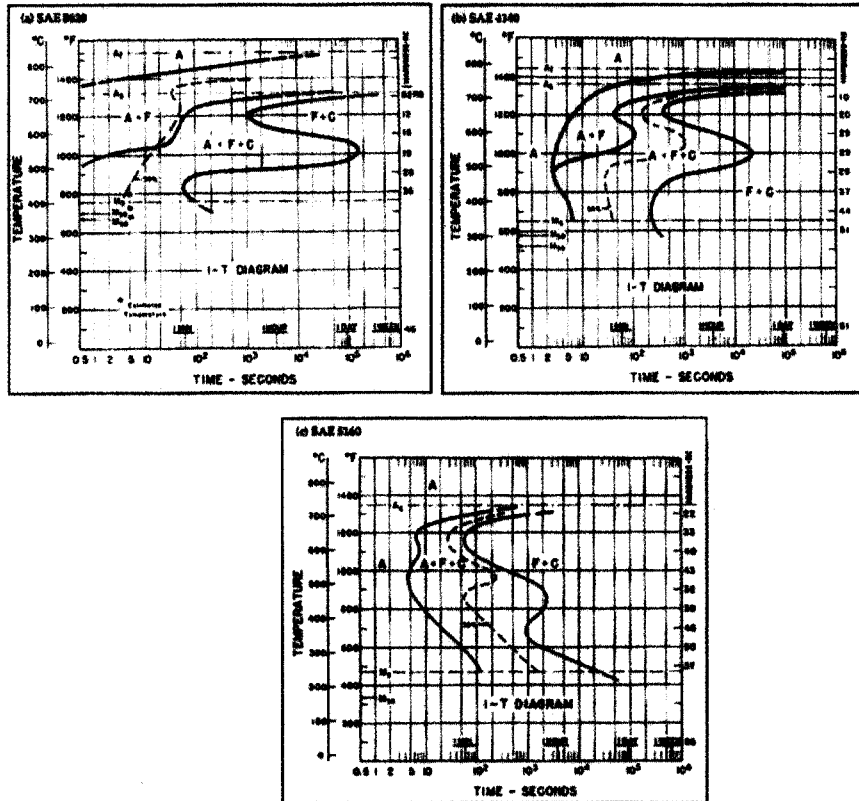


그림 1. 저합금강의 등온변태(IT) 또는 시간-온도-변태 곡선(TTT-diagram). (a) SAE 8620, (b) SAE 4140, (c) SAE 5160. A_1 와 A_3 는 상부와 하부 임계온도인 A_{c3} 와 A_{c1} 과 같다. A = 오스트나이트, F = 페라이트, C = 시멘타이트 또는 탄화물.⁵⁾

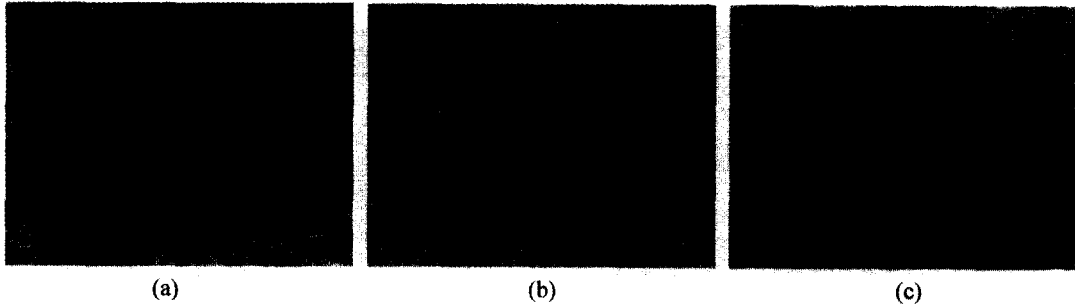


그림 2. SAE 8620; 925°C에서 30분간 오스테나이트화, 675°C에서 1분간 등온변태, 수냉. (a) SAE 8620, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 8620, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 8620, 10% SMB, 1000배.

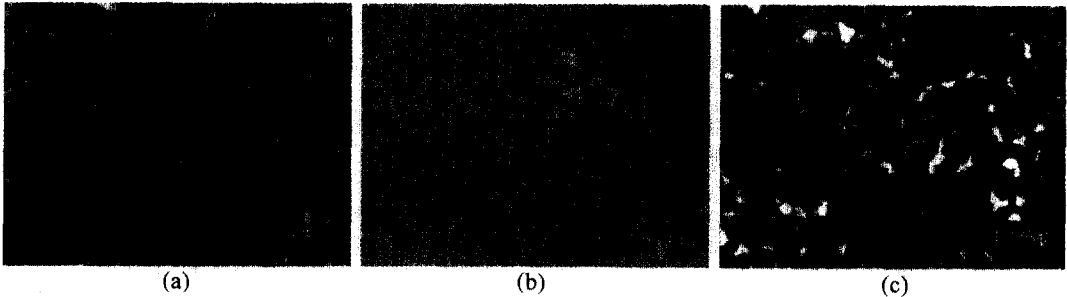


그림 3. SAE 4140; 845°C에서 30분간 오스테나이트화, 675°C에서 30초간 등온변태, 수냉. (a) SAE 4140, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 4140, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 4140, 10% SMB, 1000배.

때는 혼합물이며, 구성체가 된다.

4. 초석 페라이트

α -철은 엄격하게 말하면, 912°C 이하에서 안정한 bcc형의 순철이다. 반면에 페라이트는 하나 또는 하나 이상의 원소가 포함된 bcc-철의 고용체이다. 이러한 용어는 종종 동의어로(같은 종류)서 부정확하게 사용되고 있다. 페라이트는 소정의 냉각속도 이하에서 오스테나이트로부터 생성되는 침상형태(비트만스테텐 페라이트)의 석출물일 수도 있다. 대강(帶鋼, sheets)은 페라이트 조직 강이고, 페라이트 조직의 규소전기강판과 스테인레스 강이 있다. 페라이트는 임계 온도 이하에서 인성을 잃기는 하지만 매우 부드럽고 연성이 있는 상이다.

등온변태 온도가 저임계 온도(A_c1)에 가깝고 조성이 아공석(<0.8% C) 이면, 오스테나이트에서 펄라이트(페라이트+시멘타이트)가 형성되기 전에 페라이트가 먼저 석출될 것이고 이 페라이트를 초석 페라이트라 부른다.

그림 2, 3, 4는 2% 나이탈, 4% 피크랄, 10% SMB로 에칭된 8620, 4140, 5160 강재의 초석페라이트(화살표)

와 마르텐사이트(m)를 보여준다. 8620과 4140 시편에서는 유지시간이 짧아서 시편이 급냉되기 전에 페라이트만 등온적으로 형성되었다(나머지 오스테나이트는 급냉에 의해서 전부 마르텐사이트로 변태었다). 그러나 5160에서는 탄소함량이 많기 때문에 초석 페라이트 형성이 훨씬 어렵다. 5160의 TTT-곡선(그림 1)에서는 초석 페라이트 형성을 나타내주는 분리된 영역이 없다는 사실에 주목하면 이해가 될 것이다. 그래서 5160 시편에서는, 초석페라이트의 양은 아주 작고(부피비 1% 이하), 나머지는 펄라이트와 급냉 마르텐사이트가 형성되었음이 관찰된다.

4.1. SAE 8620

그림 2는 나이탈과 10% SMB가 마르텐사이트(m)를 잘 노출시켜 준다는 것을 보여준다. 그리고 SMB는 일부 페라이트 결정립(f)을 연하게 채색시켰고, 두 에칭액이 모두 페라이트 결정립계를 잘 노출 시켜 주지만, 4% 피크랄은 아무 것도 나타내주지 않고 있다는 사실을 보여준다.(페라이트와 펄라이트 사이의 미세한 기복은 정도 차이 때문이다.) 10% SMB는 페라이트 결정립의

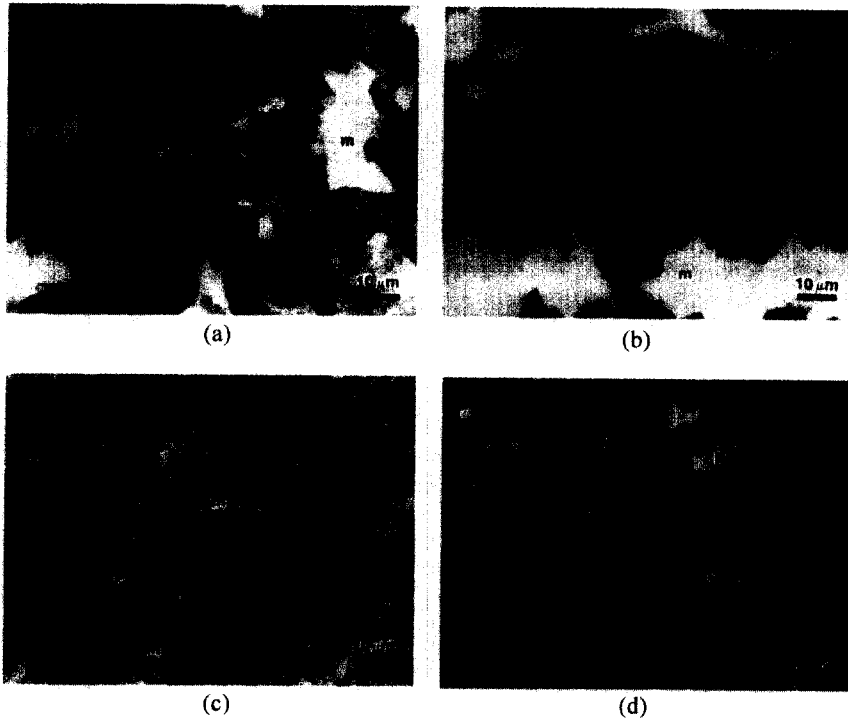


그림 4. SAE 5160 ; 830°C에서 30분간 오스트나이트화, 675°C에서 30초간 등온변태, 수냉. p = 펄라이트. (a) SAE 5160, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 5160, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 5160, 10% SMB, 초록 필터, 1000배, (d) SAE 5160, 10% SMB, 부분편광+민감색판 사용, 1000배.

일부를 채색시켰고, 나이탈보다 마르텐사이트를 더욱 어둡게 만들며, 나이탈보다 페라이트-페라이트 결정립계를 더욱 잘 구분해 준다.

4.2. SAE 4140

그림 3은 8620과 유사한 결과를 보여주는 4140에서 초석페라이트(화살표)와 급냉상태의 마르텐사이트를 보여준다. 물론 이 강재는 8620보다 탄소함량이 많기 때문에 초석페라이트가 더 적게 형성될 수 있다. 피크랄은 단지 마르텐사이트만 아주 미미하게 부식시켰을 뿐이다. 10% SMB가 가장 좋은 콘트라스트를 보여주고 있다.

4.3. SAE 5160

5160 시편의 결과인 그림 4는 좀 다른 결과를 보여주고 있다. 시편의 대부분에서는 초석 페라이트가 거의 관찰되지 않았으며, 각 사진은 초석 페라이트(화살표)의 양이 매우 작은 부분을 선정한 것으로, 다른 부분에서는 거의 초석페라이트가 관찰되지 않는다. 피크랄 에칭은 어둡게 에칭된 부분인 펄라이트(p)와 매우 밝은 부

분인 급냉 마르텐사이트(m)를 보여 주고 있다. 초석 페라이트의 작은 조각들이 급냉된 마르텐사이트 사이에도 있는지 없는지는 확인하기가 쉽지 않다. 나이탈도 큰 도움을 주지는 못한다. 크고 밝은 조각안에 회미한 부분이 다소 있기는 하지만, 이것이 급냉 마르텐사이트인지 아니면 페라이트 혹은 가볍게 에칭된 펄라이트인지는 명확하지 않다. SMB 10%로 에칭하고 흑백상태에서 초록 필터를 사용해서 관찰한 결과인 그림 4(c)는 구성체의 대부분을 보여 주고 있다. 그리고 급냉 마르텐사이트는 미세한 펄라이트와 구분이 가능하지만 이것은 단순하지 않다. (주의: 초록 필터는 흑백사진에서 필요하다)

컬러사진인 그림 4(d)에서는 급냉 마르텐사이트와 미세 펄라이트가 명확히 구분된다. 색상은 부분적인 편광 필터와 민감한 색조 판을 이용하면 더욱 명확해 진다.

5. 오스트나이트: 모상

α -철과 마찬가지로 γ -철은 912~1394°C에서 안정한

순철의 면심입방격자(fcc)로 이루어져 있다. 반면에 오스트나이트는 fcc-철 내에 하나 또는 하나 이상의 원소가 포함된 고용체이다. 다시 말하면 이 두 용어는 서로 같이 사용되기는 하지만 정확한 것은 아니다. 열처리하는 강에 있어서 오스트나이트는 상업적으로 아주 다양하고 유용한 철계 합금을 제조하는 모든 변태 생성물의 모상이다. 즉 변태를 이용하여 경화를 시키기 위해서는 일단 강재를 오스테나이트로 만들지 않으면 안된다.

일반강에서 오스트나이트는 상온에서 안정하지 않다. 그러나 아주 유명한 Cr-Ni 스테인레스강(AISI 300 계열)에서는 상온에서도 안정하다. 오스트나이트는 부드럽고 연성이 있는 상이며 고강도 수준으로 가공경화가 가능하다. 이러한 예로는 완전히 오스트나이트로 이루어진 망간강(Hadfield steel, ~1.2%C, 13% Mn)이 있다. 여기서 오스트나이트는 더 이상 다루지 않는다.

6. 페라이트와 펄라이트

철 속에 들어 있는 탄소는 흑연이나 시멘타이트로서 존재한다. 흑연은 철 속에서 안정한 형태이지만(주로 주철에서 관찰 됨), 시멘타이트는 준안정하므로 장시간 고온에 노출되면 흑연으로의 변태가 가능하다. 시멘타이트는 Fe₃C의 화학식과 사방정계의 구조를 갖는 철과 탄소의 화합물이다. 그리고 철 속에 망간과 크롬과 같은 다른 원소들이 포함되어 있으면 이들과도 탄화물을 형성할 수 있다. 그래서 그 화학식을 일반적으로 M₃C로 표기하며, 여기서 M은 금속을 대표한다. 그러나 여러 가지 탄화물 형성원소가 아주 적은 양이 철 속에 포함되어 있을 때는 다른 결정구조와 화학식을 갖는 합금 탄화물이 형성되기 전에 철 원소와 치환될 수도 있음(즉 철 속에 고용되어 버릴 수도 있음)에 유의하라.

시멘타이트의 탄소 함량은 6.67 wt%이며, 보통 Fe-C 상태도의 끝선이다. 시멘타이트는 단단해서 순수 Fe₃C는 약 HV 800 정도이고, 합금성분이 많은 M₃C에서는 약 HV 1400까지 나오며 아주 취약하다.

6.1. 펄라이트

아공석 탄소강 또는 저합금강은 오스트나이트화 후 공냉되거나 임계 온도 이하에서 등온변태되면, 확산제어 변태가 일어나서 먼저 페라이트가 석출하고 이어서 펄라이트가 형성된다. 펄라이트는 페라이트와 시멘타이트의 준안정 층상 혼합물이다. 펄라이트는 공석반응에 의해서 형성된다. 공석변태는 고용체(오스트나이트)가 미세하게 혼합되어 있는 두 개의 고상(페라이트와 시멘타이트)으로 변환되는 등온-가역반응이다. 모든 공석변태 생성물은 층상이며, 이는 비철합금에서도 마찬가지다.

그림 5, 6, 7은 나이탈, 피크랄, SMB로 에칭시킨 8620, 4140, 5160 강의 오스트나이트에서 페라이트와 펄라이트로 완전히 변태된 결과를 보여 준다. 예상된 바와 같이 탄소함량이 0.2%에서 0.6%로 증가함에 따라서 페라이트는 감소하고 펄라이트는 증가하고 있다.

6.2. 8620

그림 5에서는 SMB로 에칭한 경우 초석 페라이트의 결정립이 약간 채색되기는 하지만, 나이탈과 SMB가 8620의 페라이트와 펄라이트에 대하여 유사한 결과를 나타낸다는 것을 보여준다. 일반적으로 피크랄은 페라이트 결정립계를 나타내주지는 않았다. 결과적으로 페라이트 결정립계에 존재하는 많은 작은 시멘타이트 입자를 훨씬 용이하게 관찰할 수 있다.

6.3. 4140

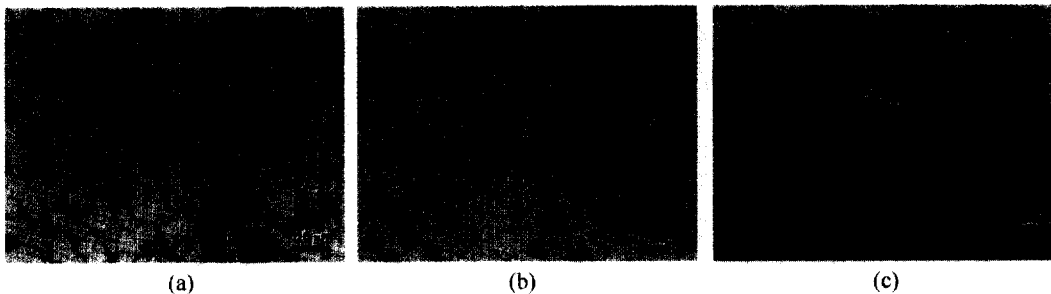


그림 5. SAE 8620; 925°C에서 30분간 오스트나이트화, 675°C에서 30분간 등온변태, 수냉. (a) SAE 8620, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 8620, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 8620, 10% SMB, 1000배.

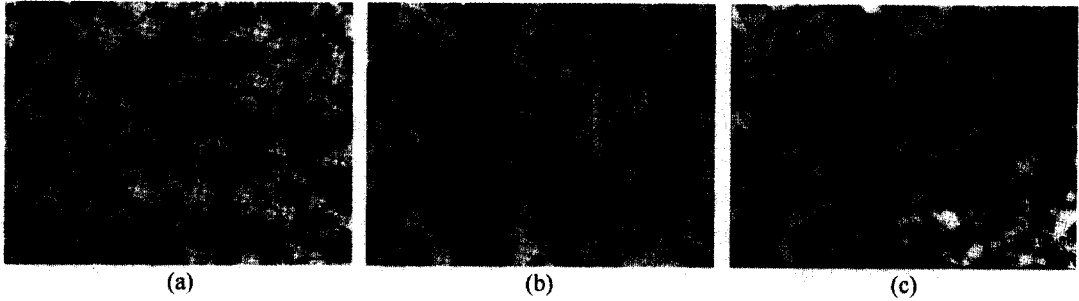


그림 6. SAE 4140 ; 845°C에서 30분간 오스트나이트화, 675°C에서 45분간 등온변태, 수냉. (a) SAE 4140, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 4140, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 4140, 10% SMB, 부분편광+민감색판 사용, 1000배.

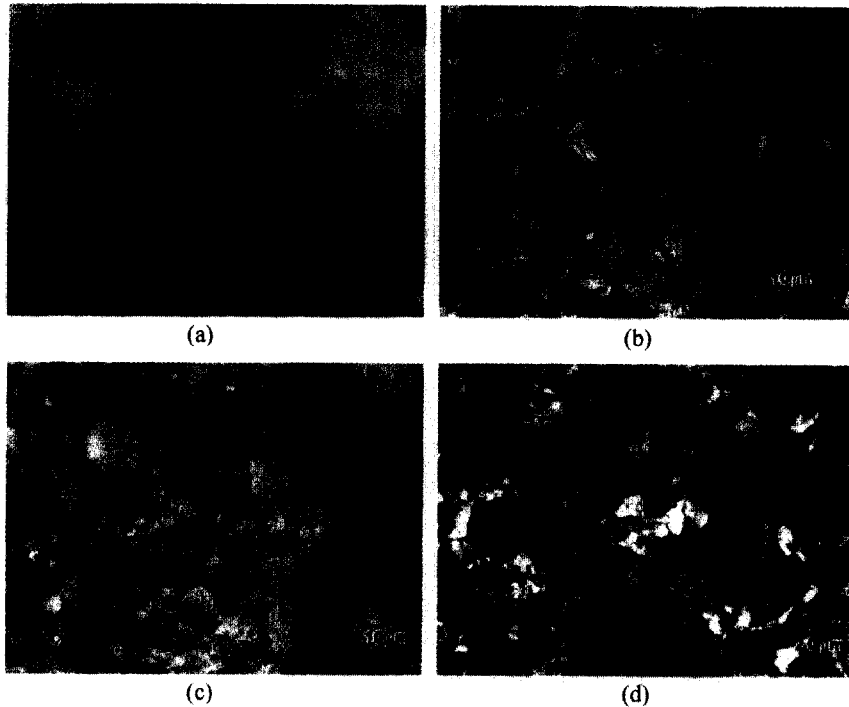


그림 7. SAE 5160 ; 830°C에서 30분간 오스트나이트화, 675°C에서 30분간 등온변태, 수냉. SMB. (a) SAE 5160, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 5160, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 5160, 10% SMB, 초록필터, 1000배.

4140(그림 6)을 보면, 나이탈은 펄라이트의 일부를 밝게 에칭시켰는데, 이러한 조각들이 펄라이트인지 급냉 마르텐사이트인지 단언하기는 어렵다. 10% SMB는 조직을 잘 노출 시킨다.

6.4. 5160

5160(그림 7)에서, 나이탈은 펄라이트 조각들을 밝게 에칭시켰는데, 이 펄라이트들은 급냉 마르텐사이트나 심지어는 페라이트로 오해 될 수도 있다. 그러나 피크랄

이나 SMB를 사용하면 그 조직은 총상간격이 아주 작은 100% 펄라이트에 가깝다는 것을 알 수 있다.

7. 상부 또는 '깃털' 베이나이트

만약 등온 변태온도가 TTT-곡선의 마르텐사이트 변태가 시작되는 온도(M_s 온도) 아래는 아니지만 코부분보다 아래에 있다면, 베이나이트라고 하는 서로 다른 2상 구성체가 관찰될 수 있다. 이것은 마르텐사이트 생성

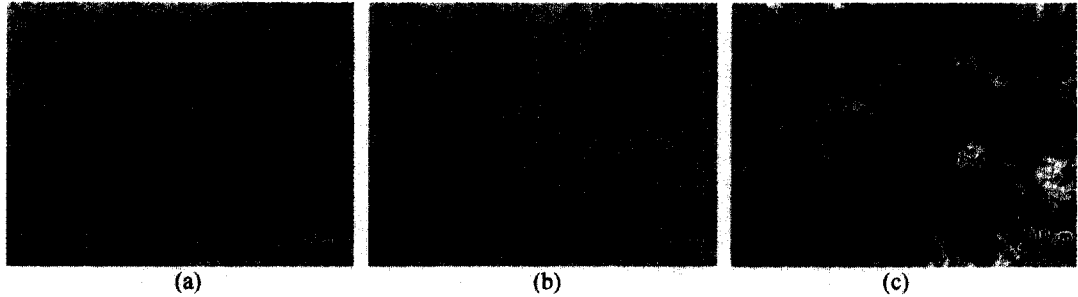


그림 8. SAE 8620 ; 925°C에서 30분간 오스트나이트화, 540°C에서 60분간 등온변태, 수냉. 화살표는 급냉-마르텐사이트. (a) SAE 8620, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 8620, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 8620, 10% SMB, 1000배.

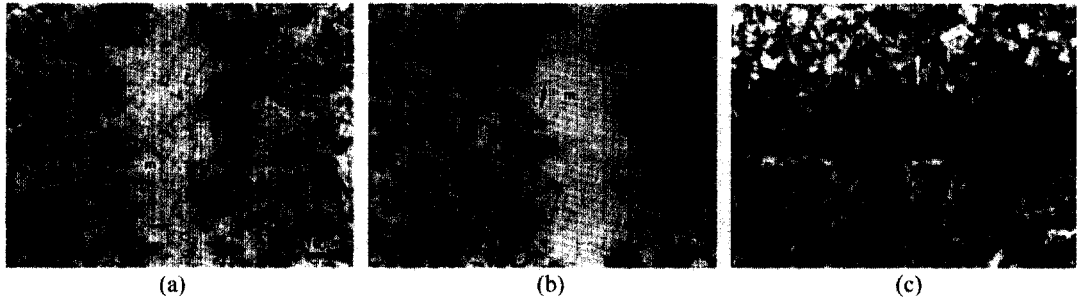


그림 9. SAE 4140 ; 845°C에서 30분간 오스트나이트화, 565°C에서 15분간 등온변태, 수냉. 화살표는 밝게 에칭된 마르텐사이트(m)의 편석 때에서 생성되기 시작하는 베이나이트. (a) SAE 4140, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 4140, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 4140, 10% SMB, 부분편광+민감색판 사용, 1000배.

온도와 펄라이트 생성온도의 사이에서 오스트나이트로부터 형성되는 페라이트와 시멘타이트의 준안정 혼합물이다. 베이나이트의 형상은 고온에서는 “깃털” 모양, 저온에서는 “침상” 형태로, 변태온도에 따라서 달라진다. “상부” 베이나이트의 깃털 모양은 탄소 함량의 영향을 받으며, 고탄소강에서 자주 나타난다. 그러나 “침상”으로 보인다고 해서 그것이 반드시 “하부” 베이나이트라고 볼 수 있는 것은 아니다.

그림 8, 9, 10은 각각 나이탈, 피크랄, SMB의 에칭에 의한 저합금강의 상부 베이나이트와 마르텐사이트를 보여준다. 강의 탄소함량에 따라 그 형상의 차이가 나타나는 것을 주목할 필요가 있다.

7.1. 8620

그림 8은 540°C에서 등온변태된 8620 합금의 조직을 보여준다. 그것은 상부 베이나이트와 급냉 마르텐사이트(화살표)의 혼합물로 되어 있다. 피크랄은 상부베이 나이트만을 확인하는 경우에는 가장 좋은 에칭액이다. 반면에 나이탈과 SMB는 두 구성체를 노출시키기는 하

지만 그들을 구분하기에는 매우 어렵다.

7.2. 4140

그림 9는 합금의 편석이 이러한 변태생성물의 분리에 어떤 영향을 미치는지 아주 잘 보여준다. 피크랄과 나이탈은 4140 시편의 경우에, 편석 때 내에서(종단면) 침상 페라이트(화살표)를 포함하고 있는, 밝은 색으로 에칭된 부분이며 상부 베이나이트가 생성되기 시작하는 점, 급냉마르텐사이트(m)를 잘 나타내 주고 있다. SMB로 에칭한 자료인 그림 9(c)에서는 급냉 마르텐사이트가 어두운 색으로 나타나고 있으며, 여기에 실지는 않았으나 컬러사진은 흑백사진에 비해서 조직을 더 잘 나타내준다.

7.5. 5160

그림 10은 5160 시편에서 부분적으로 변태된 상부 베이나이트를 보여 주고 있다. 마르텐사이트상에 현저한 차이가 있음에 유의하라. 피크랄 에칭으로는 마르텐사이트를 전혀 확인할 수 없는 반면, 나이탈로서는 약간(과부식되면 어둡게), 그리고 SMB에서는 다소 어둡게

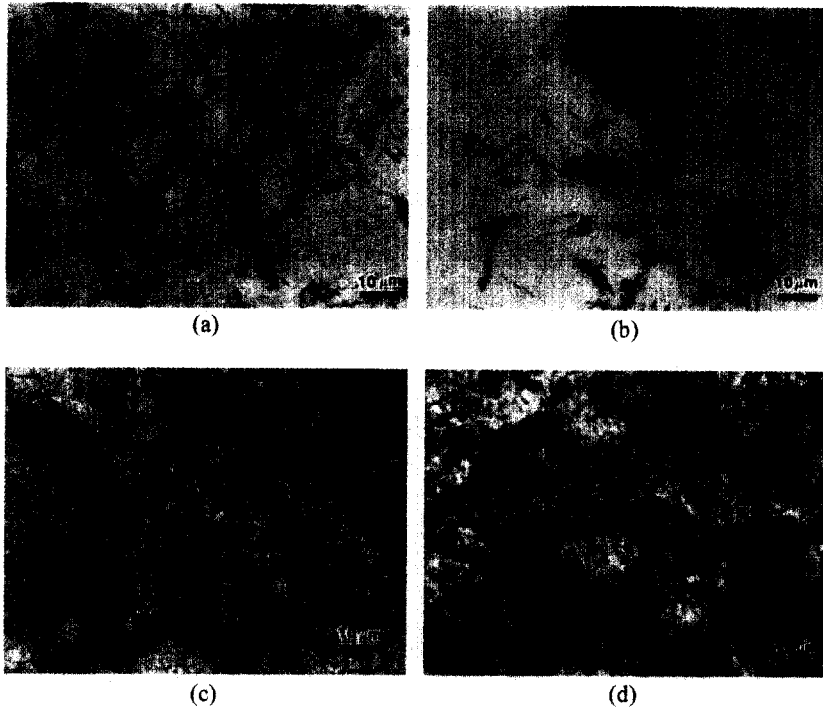


그림 10. SAE 5160 ; 830°C에서 30분간 오스트나이트화, 675°C에서 60초간 등온변태, 수냉. (a) SAE 5160, 2% 나이탈, 1000배. (b) SAE 5160, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 5160, 10% SMB, 1000배, (d) SAE 5160, 10% SMB, 1000배.

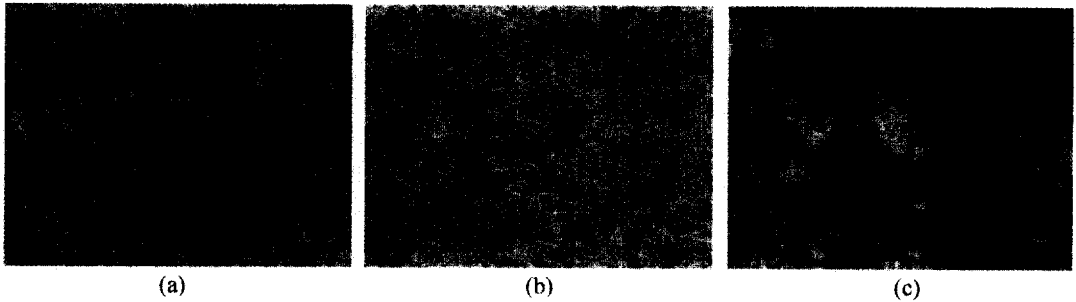


그림 11. 완전히 변태된 SAE 8620; 925°C에서 30분간 오스트나이트화, 425°C에서 5분간 등온변태, 수냉. (a) SAE 8620, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 8620, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 8620, 10% SMB, 1000배.

나타난다. 칼라사진에서 SMB 이미지는 더 잘 구분 된다.

8. 하부 또는 '침상' 베이나이트

그림 11, 12, 13은 부분적으로 또는 완전히 하부 베이나이트로 변태된 시편을 세 종류의 에칭액을 사용해서 확인된 조직사진이다.

8.1. 8620

그림 11은 완전히 변태된 8620의 조직을 보여준다. 이 합금에서 하부 베이나이트는 다소 희미하게 나타난다. 나이탈과 SMB는 아주 유사한 결과를 보여주는데 반하여, 피크랄은 아주 다른 결과를 보여준다.

8.2. 4140

그림 12는 하부 베이나이트와 마르텐사이트의 혼합물로 이루어진 SAE 4140의 미세조직이다. 피크랄은 단지

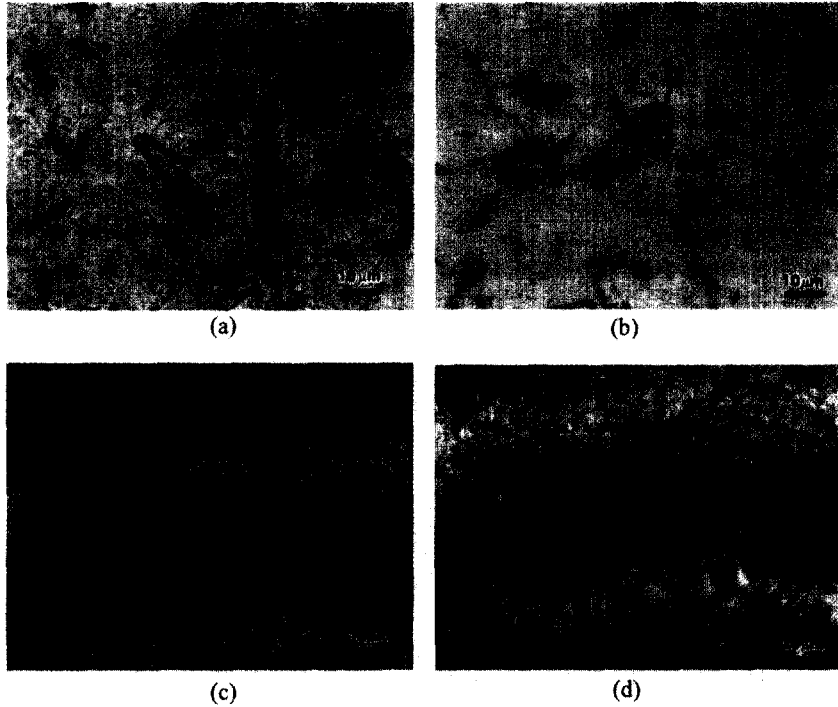


그림 12. SAE 4140의 하부베이나이트와 급냉-마르텐사이트; 845°C에서 30분간 오스트나이트화, 415°C에서 30초간 등온변태, 수냉. (a) SAE 4140, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 4140, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 4140, 10% SMB, 초록필터, 1000배, (d) SAE 4140, 10% SMB, 부분편광+민감색판 사용, 1000배.

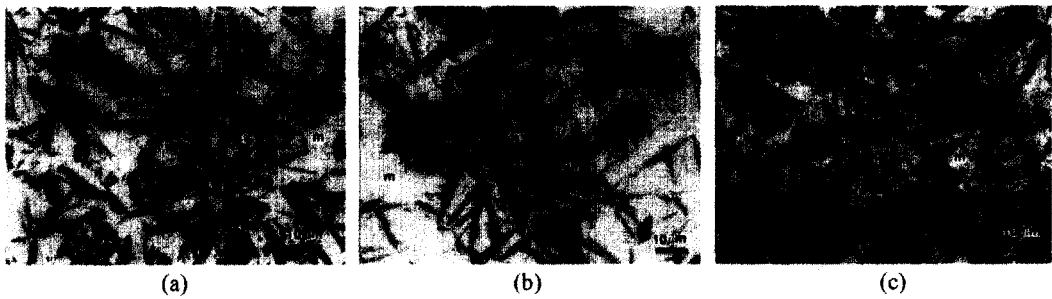


그림 13. SAE 5160의 하부 베이나이트와 급냉-마르텐사이트(m); 830°C에서 30분간 오스트나이트화, 345°C에서 5분간 등온변태, 수냉. (a) SAE 5160, 2% 나이탈, 1000배, (b) SAE 5160, 4% 피크랄, 1000배, (c) SAE 5160, 10% SMB, 1000배, (d) SAE 5160, 10% SMB, 1000배.

베이나이트만 관찰되는 반면, 나이탈과 SMB는 두 구성체를 모두 보여준다. SMB는 나이탈보다 마르텐사이트를 잘 나타내주며, SMB로 에칭된 조직의 컬러 이미지가 흑백 이미지보다 훨씬 좋다.

8.3. 5160

마지막으로, 그림 13은 5160에서 하부 베이나이트와

급냉-마르텐사이트를 보여주고 있다. 기본적으로 동일한 경향이 관찰된다. SMB로 에칭한 경우에, 두 구성체의 콘트라스트가 가장 우수하고 또 관찰하기가 용이하다.

9. 마르텐사이트

만약 오스트나이트에서 냉각속도가 위에서 언급한 상

들은 형성되지 않을 정도로 빠르면, 대신에 마르텐사이트가 생성될 것이다. 잘 알다시피 마르텐사이트는 급냉에 의하여 오스트나이트로부터 생성되는 체심정방격자(bcc) 상으로서, 모상과 생성상 모두 동일한 화학조성이며, 두 상 사이에는 특별한 결정학적인 관계를 갖는다. (마르텐사이트 생성에 필요한 냉각속도는 시료의 크기, 경화능, 급냉 매질에 따라서 다르다)

마르텐사이트는 철속의 탄소와 같이 고용원자가 침입형 자리를 점유하고 있는 합금에서 생성될 수 있으며, 반드시 경화되며, 큰 내부 변형에 의한 잔류 응력, 그리고 취성을 가지고 있다. 그러나 마르에이징강과 같이 Ni 함량이 높고 탄소가 없는 합금에서는 고용원자인 Ni 이 치환형 자리를 점유해서 부드럽고 연한 마르텐사이트가 생성될 수 있다.

탄소강에서 마르텐사이트의 형상은 침입형 자리에 있는 탄소 함량에 따라서 변한다. 저탄소강에서는 래스 마르텐사이트가 생성된다. 고탄소강에서는 모든 탄소가 오스트나이트에 용해되어 있을 때, 판상 마르텐사이트가 생성된다. 이 판상(plate) 마르텐사이트를 종종 부정확하게 “침상(acicular)”마르텐사이트라고도 불리는 수가 있으나 이는 잘못된 용어이다. 본 자료에 실린 모든 광학

현미경 조직사진에서 마르텐사이트가 관찰되고 있다. 이는 열처리 조건이 오스트나이트에서 페라이트와 펄라이트 혹은 베이나이트로 완전히 변태할 시간이 충분하지 않았기 때문에 생긴 것이다.

참고문헌

1. Metallography: Principles and Practice, by G. F. Vander Voort: ASM International, Materials Park, Ohio, 1999.
2. ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructures: ASM International, Materials Park, Ohio, 1985
3. "Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures," by E. S. Davenport and E. C. Bain: Trans. AIME, 1930, p. 117
4. "Isothermal Transformation in Steels," by E. S. Davenport: Trans. ASM, Vol. 27, 1939, p. 837.
5. Isothermal Transformation Diagram, 3rd ED.: United States Steel Corp., Pittsburgh, Pa., 1963.
6. Atlas of Time-Temperature Diagram for Irons and Steels, G. F. Vander Voort (ED.): ASM International, Materials Park, Ohio, 1991.