

## 강의 저온 템퍼링 취성

정병호 · 김무길

부경대학교 신소재공학부

### Tempered Martensite Embrittlement in Steel

B. H. Jung, M. G. Kim

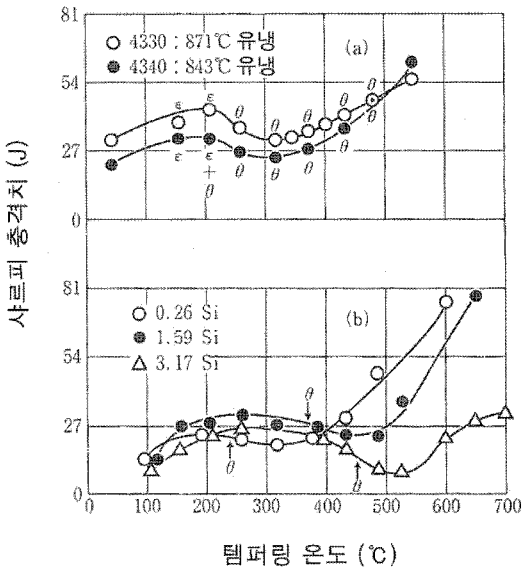
Div. of Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

#### 1. 서 론

퀸칭(Quenching)한 강을 템퍼링(Tempering) 할 경우, 250~400°C의 온도 범위에서 충격치가 낮아지는 현상이 알려져 있으며, 또 파괴인성치도 이러한 템퍼링 온도 구역에서 저하하는 것이 관찰되고 있다. 이와 같은 취화 현상을 저온 템퍼링 취성(Tempered Martensite Embrittlement: TME), 또는 350°C 취성, 500°F 취성 등으로 부르고 있다. 저온 템퍼링 취성의 원인으로서는 1946년 Grossman[1]에 의하여 연구가 시작되어 구오스테나이트(Prior austenite) 입계로의 시멘타이트(Cementite) 석출 설이 제기되었고, 그 후 1950년대 까지 이 이론이 지지 되었다. 그리고 1970년대에 이르러 전자현미경의 암시야 상에 의한 미량의 잔류 오스테나이트(Retained austenite) 및 탄화물의 동정, Auger 분광법에 의한 입계 면의 불순물 원소의 정량, 주사전자현미경에 의한 파면 관찰 등이 가능하게 되었으며, 이러한 방법을 구사한 새로운 정보가 얻어지게 되었다. 따라서 이러한 자료에 근거하여 잔류 오스테나이트의 분해에 의하여 생기는 시멘타이트 설, 석출 시멘타이트와 기계적으로 불안정한 잔류 오스테나이트와의 조합설, 오스테나이트 입계로의 불순물 원소 편석과 석출 시멘타이트와의 조합 설 등이 점차적으로 제안되기에 이르렀다. 본 기술 자료에서는 저온 템퍼링 취성에 관련하여 발표된 주요 문헌에 따라 이의 취성 현상에 대한 원인을 설명하였다.

#### 2. 오스테나이트 입계 석출 탄화물 설

Grossman[1]은 4150 강(0.5C-0.8Mn-1Cr)의 템퍼링 과정에서 시멘타이트의 생성 온도가 취성이 시작되는 온도와 일치함을 최초로 발견하였다. 그리고 충격시험에 의한 파괴는 구오스테나이트 입계에 따라 일어나며, 취화는 오스테나이트 입계에 석출되는 시멘타이트에 기인한다는 것을 추정하여 설명하였다. Lement 등[2]은 0.4C 강을 250°C 근방에서 템퍼링 할 때 마르텐사이트 경계에 박막(薄膜) 상의 시멘타이트가 존재함을 확인하였다. 그리고 구오스테나이트 입계에 접해 있는 마르텐사이트 경계의 평균 계면에 너지는 구오스테나이트 입내에 있는 마르텐사이트 경계보다 높기 때문에 박막 상의 시멘타이트가 오스테나이트 입계에 형성되기 쉬운 것으로 생각하여 여기서 나타난 2차원적인 시멘타이트가 원인이 되어 이러한 템퍼링 온도 근방에서 취화가 발생하는 것으로 결론지었다. Klingler 등[3]은 4330 강(0.3C-1.8Ni-0.8Cr-0.3Mo)과 4340강(0.4C-1.7Ni-0.8Cr-0.3Mo)에 있어 템퍼링 온도에 따른 충격치와 석출 탄화물의 변화에 대해 그림 1(a)와 같은 결과를 나타내었으며, 또 취화가 시작되는 템퍼링 온도 근방에서 구오스테나이트 입계에 박막 상의 시멘타이트를 검출하였다. 그리고 이 입계에 나타난 박막 상 시멘타이트의 국부적 석출이 취화의 원인이 된다고 하였다. Alstetter 등[4]은 4337 강(0.37C-0.26Si-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo)에서 Si량을 증가시키면 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 충격치가 최소로 되는 템퍼링 온도는 박



(a) 4330 강, 4340 강(Klingler)  
 (b) 4337 강(Si량의 영향)(Altstetter)

그림 1. 충격치와 템퍼링 온도의 관계.

막 상 시멘타이트가 검출되는 온도와 상관관계를 가지기 때문에 고온 템퍼링 측으로 이동하는 것을 발견하였다. 그리고 이러한 강에 대한 저온 템퍼링 취성은 구오스테나이트 입계에 석출하는 박막 상의 시멘타이트에 의해 기인한다고 결론지었다.

### 3. 잔류 오스테나이트의 분해에 의하여 생기는 탄화물 설

그림 2는 Thomas[5]에 의해 얻어진 0.3C-1Cr-1Mo 강과 0.3C-4Cr 강의 충격치와 템퍼링 온도의 관계로, 양쪽 강종 모두 350°C 근방에서 명확한 취성을 나타내고 있다. 퀴칭 상태에서는 어느 강종에서도 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트의 래스(Lath) 경계에 다량으로 확인 되었다. 그리고 350°C 근방의 템퍼링에서는 이러한 잔류 오스테나이트가 분해하여 래스 경계에 시멘타이트로 석출하고, 이것이 취성 발생의 원인이라고 하였다. 취화가 매우 심한 300°C 템퍼링에서의 파단면은 의벽개(Quasicleavage) 형태이다. 또 이러한 취화 구역에서는 래스와 파켓(Packet)의 경계에 탄화물이 형성되기 때문에 파괴는 이의 경계에 따라 진행된다. 따라서 파괴의 전파는

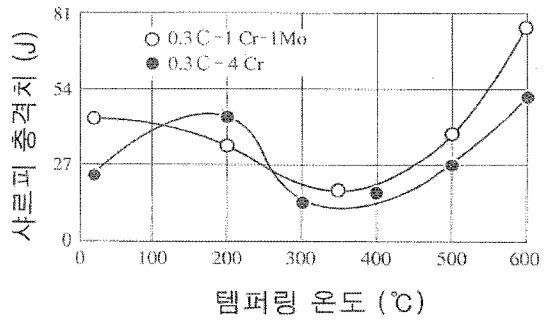


그림 2. 1Cr-1Mo 강, 4Cr 강의 충격치와 템퍼링 온도의 관계(Thomas).

마르텐사이트에 대해서는 입계이지만 구오스테나이트에 대해서는 입내가 된다. 또 Ni, Si, Al은 시멘타이트의 핵생성과 성장을 늦추기 때문에 취화 구역을 고온 템퍼링 측으로 이동시키고, Mn은 이와 반대의 작용을 한다고 설명하고 있다. Bhadeshia 등[6]은 0.2C-V 강을 1200°C로 가열 유지 후 수냉하고 템퍼링 한 경우, 300~350°C의 온도 영역에서 충격치가 크게 저하된다고 하였다. 퀴칭 상태에서는 래스 경계에 약 5%의 잔류 오스테나이트가 존재하지만, 이것은 295°C의 템퍼링으로 분해되어 시멘타이트로 석출하고, 350°C에서는 이 시멘타이트가 조대화 된다. 취화가 매우 심한 350°C의 템퍼링에서 파단면은 의벽개를 나타내는데, 여기서 균열은 래스를 가로질러 진행하지만 이의 기점은 시멘타이트의 균열로 추정하고 있다. 따라서 이 강종의 취성은 잔류오스테나이트의 분해에 의해 생성된 래스 경계에 있는 시멘타이트의 조대화에 기인하는 것으로 결론짓고 있다. Materkowski 등[7]은 4340 강(0.4C-0.27Si-0.73Mn-0.003P-0.0035S-1.83Ni-0.75 Cr-0.25Mo)은 250~400°C의 템퍼링 온도 범위에서 샤르피(Charpy) 충격치가 저하됨을 확인하였다. 그리고 취화가 가장 큰 350°C의 템퍼링에서 래스 경계에 두께가 얇은 판상의 시멘타이트를 관찰하였는데, 이것은 잔류 오스테나이트의 분해에 의해 생성된 것이라고 하였다. 또한 파괴는 구오스테나이트 입내에서 래스를 가로질러 생긴 벽개균열(Cleavage fracture)로 나타난다고 하였다. 래스 사이에 있는 시멘타이트는 충격 하중에 의해 최초로 균열이 생기며, 마르텐사이트의 Packet와 가장 일치가 잘 되는 방향의 결정면에서 벽개균열이 생긴다고 하였다. Sarikaya 등[8]은 진공 유도

용해한 0.25C-0.075Si-0.08Mn-0.007P-0.009S-2Ni-3Cr 강을 1100°C에서 유냉 후 템퍼링 하였을 때, 300~400°C의 온도 영역에서 샤르피 충격치가 낮아진다고 하였다. 퀴칭 상태에서는 래스 경계에 잔류 오스테나이트가 존재하지만, 템퍼링에 의한 오스테나이트의 분해는 300°C에서 시작되어 400°C에서 완료한다. 이러한 분해에 의해 박막 상의 시멘타이트가 래스 경계에 불연속적으로 형성되고 이것이 원인이 되어 취성이 발생한다고 하였다. 이 경우 파면은 의벽개이었다. Kwon 등[9]은 0.25C-5.85W 강, 0.31C-4.22Mo 강(두 강종 모두 진공 유도 용해한 강으로 < 0.01Si, < 0.01Mn, 0.005P, 0.005S)을 1200°C에서 수냉하고 액체 질소에서 서브제로(Sub-zero) 처리 후 템퍼링 한 것을 샤르피 충격 시험한 결과를 설명하였는데, 양쪽 강종 모두 300°C의 템퍼링 온도에서 예리한 취화가 발생한다고 하였다. 퀴칭 상태에서는 마르텐사이트의 래스 사이에 잔류 오스테나이트가 박막 상으로 존재한다. 그리고 300°C의 템퍼링에서 이 오스테나이트가 분해하여 래스 경계에 시멘타이트가 형성되고, 이것이 균열의 기점이 되어 기지의 파괴로 진행된다고 하였다. 이 경우 파면은 의벽개 이었다.

#### 4. 잔류 오스테나이트의 열적, 기계적 분해 설

Horn 등[10]은 4340 강(0.4C-0.3Si-0.8Mn-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo)과 300 M 강(0.4C-1.6Si-0.8Mn-1.8Ni-0.8Cr-0.4Mo)을 퀴칭 할 때, 유냉, 공냉 및 등온유지 후의 냉각을 실시함에 의해 잔류 오스테나이트의 량을 조사하고 템퍼링에 의해 생기는 잔류오스테나이트의 변화 거동과 저온 템퍼링에 의한 취성의 연관성에 대하여 상세히 연구 하였다. 그림 3은 300M 강에서 파괴인성 값과 템퍼링 온도의 관계를 나타낸 것이다. 각각의 퀴칭 방법에서도 250~450°C의 템퍼링 온도 범위에서 심각한 취성이 나타나며, 특히 퀴칭 할 때 냉각이 늦은 경우에는 취화의 정도가 크다. 300 M 강의 퀴칭 조직은 유냉의 경우에는 쌍정(Twin)을 약간 포함하는 마르텐사이트 조직을 나타내며, 이의 래스 사이에는 10~20 nm 두께의 박막 상 잔류 오스테나이트가 약 6% 존재한다. 공

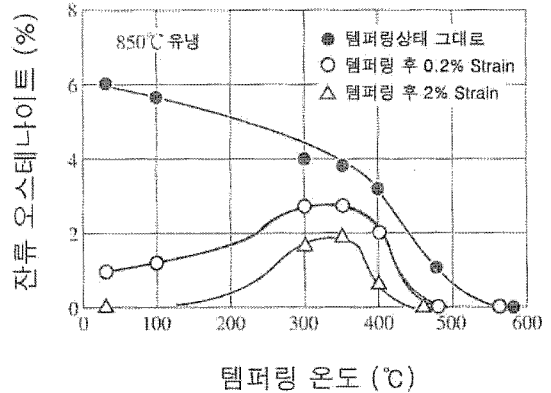


그림 3. 300 M 강의 파괴인성치와 템퍼링 온도의 관계 (Horn).

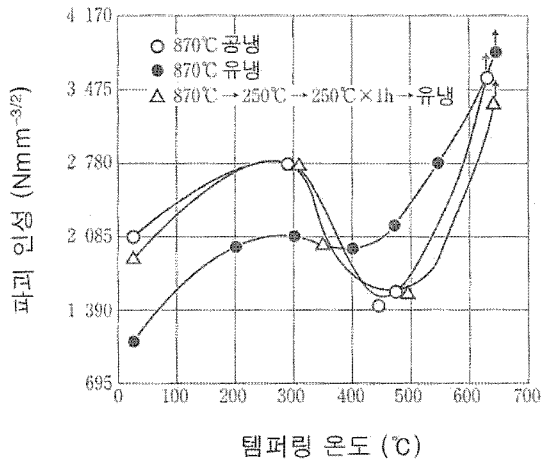


그림 4. 300 M 강의 잔류 오스테나이트 량과 템퍼링 온도의 관계(Horn).

냉 또는 등온유지 후 냉각의 경우에는 베이나이티 마르텐사이트(Bainitic martensite) 사이에 50 nm 두께의 잔류 오스테나이트 박막이 15~17% 확인되었다. 또 어떤 퀴칭 방법에서도 300°C 템퍼링에서는 ε 탄화물, 400°C 이상의 템퍼링에서는 시멘타이트가 검출되었다. 그림 4는 300 M 강을 870°C에서 유냉 후 템퍼링 한 그대로의 상태에서 잔류 오스테나이트의 량과 또 템퍼링 후 0.2, 2.0%의 인장 스트레인을 부여한 경우의 잔류 오스테나이트 량과 템퍼링 온도와의 관계를 나타내었다.

템퍼링 온도 변화에 대해서는 잔류 오스테나이트의 열적 안정성을, 스트레인(Strain)의 변화에 대해서는 잔류 오스테나이트의 기계적 안정성을 판정할 수 있다. 퀴칭한 상태에서는 약 6%의 오스테나이트가 잔

표 1. 300 M 4340 강 of 템퍼링 취성에 미치는 퀴칭 방법의 영향 (Horn)

강종 퀴칭 방법	취성온도 구역 (°C)	취성 최대 강하 (Nmm <sup>-3/2</sup> )	오스테나이트 분해 템퍼링 구역 (°C)	잔류 오스테나이트 (%)
300 M 유냉	~400	160	≥ 400	6
300 M 250°C 등온유지	~425	962	≥ 400	12
300 M 50 mm, 공냉	~450	1282	≥ 425	14
300 M 100 mm, 공냉	~450	2245	≥ 425	25
4340 유냉	~275	160	≥ 250	5
4340 25 mm, 공냉	~275	160	≥ 275	4

류하지만, 350°C의 템퍼링에서는 약 4%로 안정화되고 이의 분해는 470°C 이상에서 완료한다. 퀴칭한 상태의 잔류 오스테나이트는 약 2%의 스트레인에 의해 거의 대부분 마르텐사이트로 가공유기 변태(Deformation induced transformation)되기 때문에 기계적으로 매우 불안정하다. 그러나 300~350°C 템퍼링에서의 잔류 오스테나이트는 스트레인에 의한 변태량이 적고, 기계적 안정성이 상당히 높다. 그런데, 400°C의 템퍼링에서는 잔류 오스테나이트가 열적으로나 기계적으로나 불안정하게 된다. 한편, 여기서는 시멘타이트와 잔류 오스테나이트가 래스 경계에 공존하는 것이 관찰되며, 이것이 취화의 가장 큰 위치에 해당된다. 공냉이나 등온유지 후 냉각하는 경우에도 잔류 오스테나이트의 동일한 거동이 확인되었다. 300 M 강 of 표면은 유냉의 경우, 취화가 매우 심한 400°C 템퍼링에서는 약간의 인성파괴를 포함한 입내 벽개파면을 나타내었고, 공냉 또는 등온유지 후 냉각하는 경우는 취화도가 최대인 470°C에서 래스 경계의 벽개파면을 나타내었다. 표 1은 300 M 강과 4340 강을 여러 가지 퀴칭 법에 따라 저온 템퍼링하였을 경우, 취성의 발생 상황을 정리한 것이다. 300 M 강에서는 퀴칭시의 냉각이 느릴수록 잔류 오스테나이트의 양이 많을 뿐더러 이의 분해 온도와 취성 발생 온도가 높고 취화도도 크게 된다. 4340 강은 300 M 강에 비하여 Si 양이 낮기 때문에 잔류 오스테나이트의 분해와 취화 발생은 저온에서 템퍼링 할 때 일어난다. 이상의 결과로부터 다음과 같이 저온 템퍼링시의 발생 기구를 제안 하였다. 즉, 퀴칭 할 때 래스 경계에 잔류한 오스테나이트의 대부분은 400°C 근방의 템퍼링에 의해 열분해되어 시멘타이트로 석출한다. 그러나 나머지 미 변태의 오

스테나이트는 열적으로 안정하지만 탄화물의 석출에 의해 저탄소로 되기 때문에 기계적으로 불안정하게 되며, 파괴인성 시험시의 부하에 따른 변형에 의해 가공유기 변태를 일으켜 마르텐사이트로 된다. 이와 같이 래스 경계에 생성된 박막 상의 시멘타이트와 마르텐사이트의 양 쪽이 취화의 원인이 되는 것으로 설명하고 있다. 잔류 오스테나이트가 적은 경우에는 탄화물의 인장 균열에 의해 입내 벽개를 일으키기 때문에 탄화물의 취화 작용이 더 유력하다. 잔류 오스테나이트가 많은 경우에는 기계적으로 불안정한 오스테나이트가 많아짐에 따라 파괴가 래스 경계의 벽개 형태를 나타내게 되고, 기계적으로 변태한 오스테나이트 층 즉, 마르텐사이트 층의 취화 작용이 유력한 것으로 설명하고 있다.

## 5. 불순물 원소의 편석과 탄화물 석출의 조합 설

Materkowski 등[7]은 고 P의 4340 강(0.41C-0.26Si-0.72Mn-0.030P-0.004S-0.74Cr-0.25Mo)을 350°C 근방에서 템퍼링하면 현저한 취성이 일어난다고 하였다. 표면은 퀴칭 상태와 200°C 템퍼링에서는 약 20%의 입계파괴를 포함한 인성파괴를 나타내고, 취화가 가장 격심한 350°C에서는 입계파괴를 나타낸다고 하였다. 이와 같은 입계파괴가 발생하는 이유로는 입계 불순물 원소 P의 편석만으로는 불충분하므로 템퍼링시 입계의 시멘타이트 석출에 대한 설명도 필요하다고 하였다. 그러나 이러한 탄화물 석출의 증거는 제시하지 못하였다. 따라서 이러한 강종에 대한 저온 템퍼링 취성은 구오스테나이트 입계의 불순물 원소 편석과 탄화물 석출이 합쳐져 일어난다고

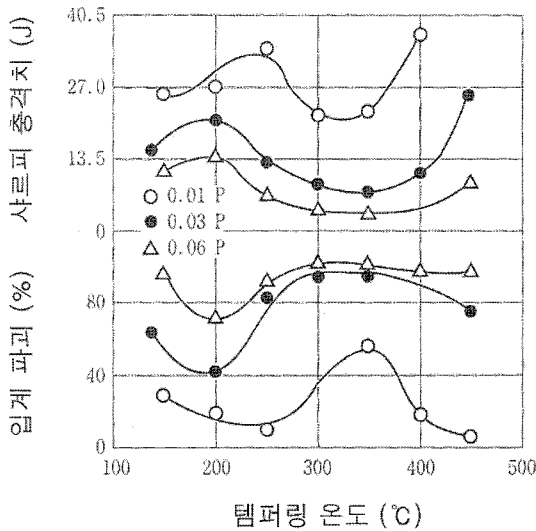


그림 5. 0.3C-3.5Ni-1.7Cr 강의 충격치, 입계파괴와 템퍼링 온도의 관계(퀵칭 온도 1200°C) (Briant).

하였다. Briant 등[11~12]은 P 함유량이 다른 3종류의 0.3C-3.5Ni-1.7Cr 강에 대한 저온 템퍼링 취성을 연구 하였다. 그림 5는 이러한 강의 템퍼링 온도에 대한 충격치와 입계파괴 량의 변화를 나타낸 것이다. 어떠한 것도 300~350°C의 템퍼링 구역에서 가장 심한 취화가 일어나 있으며, P 량이 증가하면 충격치의 수준이 낮아짐과 동시에 취화의 폭이 넓게 되고 입계파괴 면적도 크게 된다. 또 0.03, 0.06% P와 같은 고 P강의 취화 구역에서는 대부분 입계파괴를 일으키며 이러한 입계 파면에 대한 P의 농도는 400°C 근방의 템퍼링까지는 퀵칭 상태와 동일하여 변화되지 않는다고 하였다. 따라서 입계로의 P 편석은 퀵칭 중에 생긴 것으로 설명하고 있다. 또한 취화가 가장 심한 350°C의 템퍼링에서는 입계 파면에 래스 경계에 존재하는 작은 판상의 시멘타이트와 입계에 평행하고 길이가 긴 시멘타이트가 관찰되었다. 그러므로 이러한 입계 탄화물들은 슬립(Slip)에 대한 장애물로 작용하고, 또 P의 편석에 의해 약화된 입계에 균열의 발생을 조장시킬 뿐 아니라 노치(Notch) 인성도 급격히 저하시키기 때문에 입계 파괴를 증가시킨다고 설명하고 있다. 이상과 같이 P의 함유량이 높은 강에 대한 저온 템퍼링 취성은 퀵칭시 입계로의 불순물 원소 편석과 템퍼링시 입계로의 탄화물 석출이 합쳐져 일어난다는 것이 실험 데이터로 명확하게 나타났다.

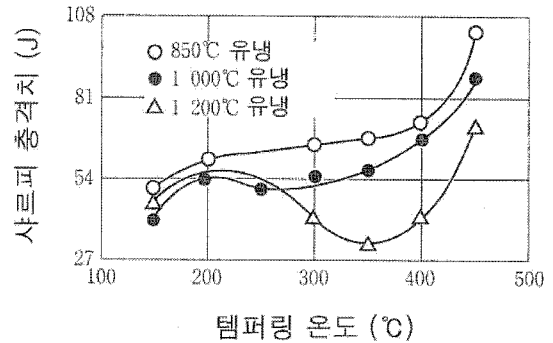
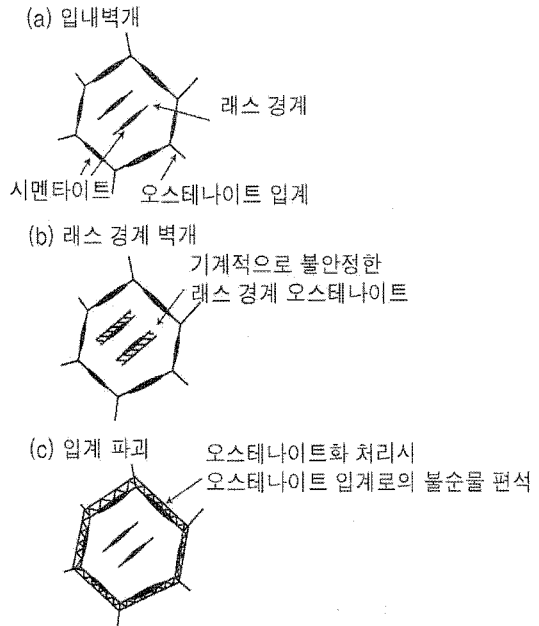


그림 6. 0.3C-0.004P-0.004S-3.5Ni-1.7Cr강의 충격치와 템퍼링 온도의 관계(Briant).

Bandyopadhyay 등[13]은 Si, Mn, P, S를 변화시킨 일련의 4340 강(0.4C-1.7Ni-0.8Cr-0.3Mo: 0.01~0.32Si, 0.007~0.72Mn, 0.003~0.09P, 0.005~0.16S)을 850°C에서 유냉 후 각 온도에서 템퍼링 한 경우, 샤르피 충격치의 변화를 나타내어 저온 템퍼링 취성이 나타나는 원인을 조사 하였다. 저온 템퍼링 취성은 저 Si, 저 Mn 강에서는 확실치 않았지만, 고 Si, 고 Mn 강은 300~350°C의 템퍼링 온도 구역에서 확실하게 나타난다고 하였다. 이러한 취화 구역에서는 퀵칭시 입계에 P, S가 편석 되고, 또 템퍼링에 의해 입계에 시멘타이트가 석출하는 것이 명확하다고 하였다. 고 순도 강에서 Si, Mn의 증가는 템퍼링 취성에 대한 감수성을 높이기 때문에 이러한 원소는 입계에 P 및 S의 편석을 조장하는 작용을 한다고 설명하고 있다. 즉, 이러한 강종에서의 저온 템퍼링 취성은 P의 편석에 의해 약화된 구오스테나이트 입계에 시멘타이트가 석출하여 일어난다고 설명하고 있다. 취화가 가장 심한 350°C의 템퍼링에서는 상당량의 입계파괴가 생기지만, 250°C의 템퍼링에서는 입계파괴가 전혀 일어나지 않았다. 또 입계에 있는 잔류 오스테나이트는 템퍼링에 의한 분해로 취화에 다소 기여할 수도 있지만, 입내에 존재하는 잔류 오스테나이트의 분해는 취화에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 설명하였다. Briant 등[14]은 실험실에서 용해 제작한 고순도 강(0.3C-0.004P-0.004S-3.5Ni-1.7Cr)에서 불순물 원소가 없음에도 불구하고 40 ppm 정도의 S가 존재하면 저온 템퍼링 취성이 생기는 것을 발견하였다. 그림 6은 이 강에서 템퍼링 온도에 대한 충격치의 변화에 미치는 퀵칭 온도의 영향을 나타낸 것이다.

저온 템퍼링 취성은 850°C에서 퀴칭 한 경우에는 거의 나타나지 않았지만 1000°C의 경우는 250~300°C에서 템퍼링 할 때 약간 일어나고 1200°C의 경우는 350°C의 템퍼링에서 현저히 나타나고 있다. 즉, 취성이 발생하는 입계 퀴칭 온도가 존재한다는 것이다. 파편은 저온 퀴칭 후 템퍼링 한 상태에서 입내 인성파괴, 중간 정도의 온도에서 퀴칭 한 경우는 200~300°C 템퍼링으로 2~3%의 입계파괴, 그리고 고온 퀴칭에서는 300~400°C의 템퍼링으로 22~26%의 입계파괴를 나타내었다. 그리고 이러한 입계 면에 S가 농화되어 있는 것이 관찰되었다. 한편, 1100°C 또는 1200°C에서 3시간 가열 후 850°C로 로냉하고, 여기서 1시간 유지한 후 유냉한 경우는 템퍼링 과정에서 취성이 발생하지 않았다. 이의 파편에는 많은 딴플(Dimple) 상들이 입계 면에 존재하였으며, 각각의 딴플 바닥에는 작은 입자가 확인되었다. 이러한 입자는 Cr과 S 성분을 나타내었기 때문에 CrS로 확인되었다. 따라서 S가 입계에 유화물로 존재하는 경우에는 취성이 발생하지 않는 것으로 설명되었다. 이상의 결과로부터 고 온도 강의 저온 템퍼링 취성의 기구에 대하여 다음과 같이 결론지을 수 있다. 즉, 취성이 생기지 않는 입계 퀴칭 온도(900°C) 이하에서는 S는 CrS로 되어 기지(Matrix)에 존재한다. 그러나 이 온도를 초과하면 CrS는 고용하여 S는 입계에 편석하게 된다. 그리고 P 편석의 경우[12]와 같이 S 편석에 의해 약화된 입계에 템퍼링에 의한 시멘타이트가 석출할 때에는 350°C 근방의 템퍼링에서 전형적인 취성이 발생한다고 설명할 수 있다. 또 Briant 등[15]은 고 S 강(0.3C-0.01S-3.5Ni-1.7Cr)의 취성에 대하여 연구한 결과, 고 온도 강의 경우[14]와 동일하게 저온 템퍼링 취성은 입계로의 S 편석과 탄화물 석출의 조합 작용에 기인한다고 하였다. 이를 설명하면 다음과 같다. 즉, S는 퀴칭될 때 입계에 편석 되지만 편석의 정도는 퀴칭 온도에 크게 의존된다. 그리고 퀴칭 온도가 1050°C 이하의 경우에는 S가 CrS로 석출하기 때문에 입계로의 S 석출은 거의 미미하다. 따라서 입계 파괴를 일으키는 경우는 적고 취화도 적다. 퀴칭 온도가 1050°C를 초과하는 경우는 CrS는 기지 중에 고용되어 S는 빠르게 입계에 편석 된다. 또한 S량이 많기 때문에 입계에서의 S 농도가 매우 높아



- (a) 래스 경계와 오스테나이트 입계로의 시멘타이트 석출
- (b) 래스 경계로의 시멘타이트 석출과 기계적으로 불안정한 박막 상의 잔류 오스테나이트
- (c) 구오스테나이트 입계로의 시멘타이트 석출과 불순물 원소의 편석

그림 7. 저온 템퍼링시의 취성 파괴양식 기구에 대한 모식도(Horn).

여기서 CrS가 석출하는 것과 같이 되지만 상당량의 S가 그대로 입계에 남아 입계의 응집력을 약화시킨다. 한편, 300~400°C의 템퍼링 영역에서는 얇은 판상의 시멘타이트가 S 편석으로 약화된 입계에 석출하기 때문에 여기서 현저한 입계파괴 취성이 발생한다고 설명하고 있다.

## 6. 결 론

이상에서 설명한 바와 같이 저온 템퍼링 취성의 원인에 대해서는 여러 가지 설이 제시되어 있지만 적어도 하나의 기구로만 설명할 수 없는 현상이라는 것은 의문의 여지가 없다. 취성의 원인에 대해서는 Horn 등[10]이 그림 7에 나타난 바와 같이 명쾌한 결론을 제시하였기 때문에 이것을 채택하여 다음과

같이 정리하였다.

1. 템퍼링 과정에서 마르텐사이트 래스 경계와 구 오스테나이트 입계에 시멘타이트가 석출하는 것이 취성 발생의 근본 원인이다.

2. 잔류 오스테나이트가 소량 존재하는 강에서의 취화는 래스 경계와 입계에 석출된 시멘타이트의 균열에 의해 발생하며 이 경우, 입내 벽개파괴가 생긴다(그림 7a).

3. 잔류 오스테나이트가 다량 존재하는 강에서의 취화는 래스 경계에 석출하는 시멘타이트에 의해 생기는 기계적으로 불안정한 오스테나이트와 합쳐서 발생하며 이 경우, 래스 경계에 벽개파괴가 생긴다(그림 7b).

4. 다량의 불순물 원소를 함유하는 강은 입계로의 불순물 원소 편석과 시멘타이트의 석출이 합쳐져 취화의 발생 원인이 되고 이 경우, 입계 파괴가 일어난다(그림 7c).

※ 이 글은 “日本 熱處理” 제 36권 5호 PP. 287~292를 번역 정리한 것임.

### 참고문헌

1. M.A. Grossman, : Trans. AIME, **167** (1946) 39.
2. B.S. Lement, B.L. Averbach, and M. Cohen : Trans.

- ASM, **46** (1954) 851.
3. L.J. Klingler, W.J. Barnett, R.P. Frohmberg, and A.R. Troiano : Trans. ASM, **46** (1954) 1557.
4. C.J. Altstetter, M. Cohen, and B.L. Averbach : Trans. ASM, **55** (1962) 287.
5. G. Thomas : Met. Trans., **9A** (1978) 439.
6. H.K.D.H. Bhadeshia and D.V. Edmonds : Met. Sci., **13** (1979) 325.
7. J.P. Materkowski and G. Krauss : Met. Trans., **10A** (1979) 1643.
8. M. Sarikaya, A.K. Shingan, and G. Thomas : Met. Trans., **14A** (1983) 1121.
9. H. Kwon and C.H. Kim : Met. Trans., **14A** (1983) 1389.
10. R.M. Horn and R.O. Ritchie : Met. Trans., **9A** (1978) 1039.
11. C.L. Briant and S.K. Banerji : Met. Trans., **10A** (1979) 123.
12. C.L. Briant and S.K. Banerji : Met. Trans., **10A** (1979) 1729.
13. N. Bandyopadhyay and C.J. McMahon Jr. : Met. Trans., **14A** (1983) 1313.
14. C.L. Briant and S.K. Banerji : Met. Trans., **10A** (1979) 1151.
15. C.L. Briant and S.K. Banerji : Met. Trans., **12A** (1981) 309.