

# 압력용기 및 보일러용 Cr-Mo계 후판의 열처리 및 용접특성 ( I )

-열처리 조건에 따른 미세조직 변화거동

Heat Treatment and Welding Characteristics of Cr-Mo Steel Plates for Pressure Vessels and Boilers( I )

-Variation of Microstructures with Heat Treatment Conditions

장웅성

포항산업과학연구원 설비용접연구팀

## 1. 서론

국내에서는 압력용기 및 보일러용 Cr-Mo계 압연강과 관련하여 1991년 A387-11 grade 1.25Cr-0.5Mo강을 개발한 이후 생산실적이 없었으나 98년부터 국내 제작사들의 국산화 요구가 높아져 다양한 종류의 A387 grade Cr-Mo강을 개발하여 양산 공급 중에 있다. 이 중에서 Cr 함량이 1~2.25%, Mo 함량이 0.5~1.0% 수준인 A387-12, 11, 22 grade 강재들이 가장 범용적으로 적용되는 대표적인 중고온용강이다. 본 연구는 Cr, Mo 함량이 다른 위의 강재들을 대상으로 용접부 특성평가에 앞서 모재 제조과정에서 Tempering 및 PWHT 열처리 조건을 변화한 경우 미세조직 및 기계적 성질의 변화거동을 조사함으로써 Cr-Mo강의 기본적인 금속학적 특성을 이해하고자 하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 다양한 grade의 Cr-Mo계 A387강에 대하여 각 grade별 규격이 정한 성분범위내에서 모재의 기계적성질과 함께 주로 중고온용 압력용기 및 보일러용으로 사용되는 본 강재의 시공 및 사용상의 성능 향상을 위한 성분계 검토를 실시하고 통상의 제강-연속주조-후판압연 공정을 통해 생산하고 열처리 공장에서 소정의 normalizing과 tempering 공정을 통해 최종 제품을 생산하였다. 각 grade별 최종성분계는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Chemical compositions of ASTM A387 grade steels used (wt %).

Steel	C	Si	Mn	P	S	S.Al	Cr	Mo	Cu	Ni	Ceq
											J
A387-12	0.156	0.35	0.58	0.012	0.005	0.008	1.04	0.52	-	-	0.605 121
A387-11	0.155	0.678	0.51	0.015	0.002	0.007	1.32	0.56	0.21	0.14	0.68 190
A387-22	0.138	0.142	0.46	0.014	0.004	0.007	2.27	0.97	-	0.17	0.921 90

$$Ceq(\%)=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14(WES)$$

$$J\text{-factor}=(Si+Mn)\times(P+Sn)\times 10^4 \text{ (Sn=0.001로 가정)}$$

본 실험에서 적용한 강재는 모두 각 grade별 class2에 해당되는 강으로서 normalizing과 tempering 공정에 의해 제조된다. 본 연구에서는 각 강종의 판두께 차이에 따른 냉각조건 변화와

함께 normalizing 후 tempering 온도 및 유지시간 변화를 통한 최종 tempering parameter의 조절에 의한 기계적성질의 조정이 가능하도록 공정과 성질의 상관성을 구하기 위한 열처리 실험을 수행하였다. 또한 이들 강재는 제품 주문시 요구하는 SR 처리, PWHT 등 다양한 추가 열처리 후의 물성 요구가 빈번한 강으로서 이들 열처리 후 기계적성질의 열화 정도를 평가하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 Tempering에 의한 미세조직 및 기계적성질 변화

Cr-Mo강의 경우 기계적성질의 절대값이 미세조직 변화에 따라 민감하게 달라지므로 Temper Softening 지수를 정의하여 그 지수와 기계적성질과의 상관성을 구함으로써 열처리 공정의 최적화가 이루어지도록 시도하였다. 본 연구에서 tempering parameter는 일반적으로 강의 tempering 거동을 해석할 때 사용하는 Hollomon-Jaffe 인자인  $P = T(C + \log t)$  식을 이용하였다. 여기서 정수 C의 결정은  $P = T(C + \log t)$  식을 미분하여  $\Delta P = C\Delta T + \Delta(T \log t) = 0$  로 부터  $C = -\Delta(T \log t) / \Delta T$ 로 된다. 따라서 동일 재질 특성을 나타내는 (T, t)의 조합에 대해서 T와  $T \log t$ 의 관계를 plot하여 그 기울기를 구하면 C값이 얻어지는데 일반적으로 C값은 강의 탄소함량과  $C = 21.3 - 5.8x(\%C)$ 의 관계로 정의되므로 본 연구에서는 정수 C를 20으로 규정하여 적용하였다. A387 grade의 강은 다양한 Cr, Mo 함량을 지니며 이외에도 C, Mn, Si을 기본 강화원소로 활용한다. 이 경우 각 강재는 제조조건에 따라서 다양한 미세조직이 생성되고 이러한 미세조직의 차이는 열처리 공정을 통해 얻어지는 기계적 성질에 대한 평가를 복잡하게 만든다. 본 연구에서도 A387 grade의 세 강종에 대한 인장강도와 tempering parameter의 상관성을 도출하는데 제약이 있어 강도의 절대값을 활용하지 않고 temper softening 지수를 정의하여 이 지수와 tempering parameter의 상관성을 구한 결과 양호하게 normalizing 후 tempering 시 강도변화를 예측할 수 있었다. Fig. 1은 A387 grade의 세 강에 대한 temper softening과 T.P.와의 관계를 비교한 것으로서 TS 절대값을 활용한 경우 일관성 있는 강도 평가가 곤란하지만 temper softening 지수의 경우 미세조직의 차이에 관계없이 아주 양호한 상관관계를 도출할 수 있다. 두 강의 temper softening과 T.P.사이의 상관관계는 아래와 같다.

$$\text{A387-11강: } TS_T / TS_W = 208.5 - 6.04 \times \text{T.P.} (R=0.85)$$

$$\text{A387-22강: } TS_T / TS_W = 208.0 - 6.82 \times \text{T.P.} (\%) (R=0.94)$$

Fig. 2는 A387강의 미세조직에 따른 충격인성의 변화를 전 실험강종을 대상으로 정리한 것으로서 페라이트 주체의 조직은 높은 Upper Shelf Energy(USE)가 보장되는 반면 천이온도가 상대적으로 높고 베이나이트 주체의 조직은 USE가 낮은 반면 천이온도가 낮게 얻어지는 조직 특성을 지닌다.

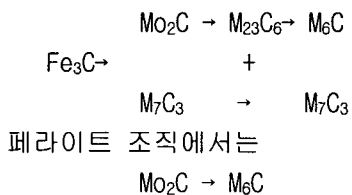
#### 3.2 Tempering에 의한 석출거동

본 연구에서 사용한 A387-22 grade 강에 대해 각 제조 단계별 Cr, Mo 합금탄화물의 석출 거동을 분석전자현미경 이용하여 관찰하였다. Fig. 3은 SEM을 이용하여 normalizing, 690°C 및 740°C tempering 조건에 해당하는 조직 및 탄화물 석출 거동을 관찰한 결과이다. 5000배 배율 확대상을 통해 광학현미경상에서 구분이 불가능한 페라이트와 베이나이트 조직 내부의 탄화물 크기나 분포

에 대해서 정성적인 구분이 가능하다. Normalizing 조건에서는 페라이트 조직은 탄화물이 거의 존재하지 않는 반면 베이나이트 조직에는 결정립계와 입내에 조대한 시멘타이트가 다량으로 분포하고 있다. 이러한 시료를 690°C에서 tempering 한 경우 베이나이트 내부에는 탄화물의 미세화가 이루어지고 입계에는 다소 조대한 탄화물이 형성된다. 페라이트 내부에도 미세한 탄화물의 석출이 관찰된다. Tempering 온도가 740°C로 높은 경우 낮은 tempering 조건에 비하여 전반적으로 탄화물의 조대화가 입내 및 입계에서 진행되고 탄화물의 밀도가 줄어드는 경향을 나타낸다. 이는 기계적성질 시험에서 이 시험편의 기계적성질이 현저히 저하된다는 결과와 잘 일치한다.

이러한 탄화물의 결정구조나 화학조성을 조사하기 위해서는 분석투과전자현미경을 통한 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 각 열처리 조건에 해당하는 시료를 통상의 추출레플리카 제조방법에 따라 제조하고 EDX와 전자회절, bright field image 작업을 병행하여 탄화물의 분석을 실시하였다. 탄화물의 종류, 크기 및 분포는 열처리 조건에 따라 판이하게 달라진다. 먼저 normalizing 조건에서는 Cr이나 Mo계 탄화물이 관찰되지 않고 구상의 CuS가 다수 존재하였다. Normalizing 재를 tempering 하는 경우 온도가 690°C에서 740°C로 높아짐에 따라 탄화물의 조대화가 진행되고 조대한 탄화물 주위로는 석출물 free zone이 생긴다. 페라이트와 베이나이트 입내의 경우  $M_2C$  탄화물의 조대화와 밀도의 감소가 생긴다.

Cr-Mo강의 tempering 과정에서  $Fe_3C$ ,  $Mo_2C$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ 와  $M_6C$  등 많은 종류의 탄화물이 형성된다. 상업적 2.25Cr-1Mo강에 대해 Baker와 Nutting에 의해 제안된 석출과정은 베이나이트 조직에서는



석출반응이 일어난다고 보고되고 있다. 그러나 본연구에서 적용한 tempering 조건내에서는 기계적성질이 저하되는 과시효상태의 시료에서도  $M_6C$  type의 석출물은 관찰되지 않고 주로  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$  및  $Mo_2C$  형태의 입자들이 tempering 진행에 따라 조대화되는 경향을 나타내었다.

#### 4. 결 론

Cr-Mo계 A387강의 tempering 조건 변화에 따른 미세조직 변화는 Cr, Mo 함량 변화에 따라 페라이트와 베이나이트 혼합조직 또는 베이나이트 단독 조직 형태로 변화하며 동일 성분계의 경우 냉각 속도(판두께)의 차이에 따라 조직 구성이 달라진다. 이러한 페라이트와 베이나이트 조직은 tempering 과정 중에 Cr, Mo계 석출물의 형성과 조대화가 일어나고 이러한 석출거동은 강재의 기계적성질에 영향을 미친다. 따라서 A387강의 모재 제조 및 사용환경하에서 충분한 기계적성질을 확보하기 위해서는 적절한 열처리조건의 적용을 통한 미세조직의 최적화가 중요한 기술이다. 본 연구에서는 이러한 열처리 조건의 최적화를 위해 temper softening 지수를 도입한 강도 예측식을 제안하였다.

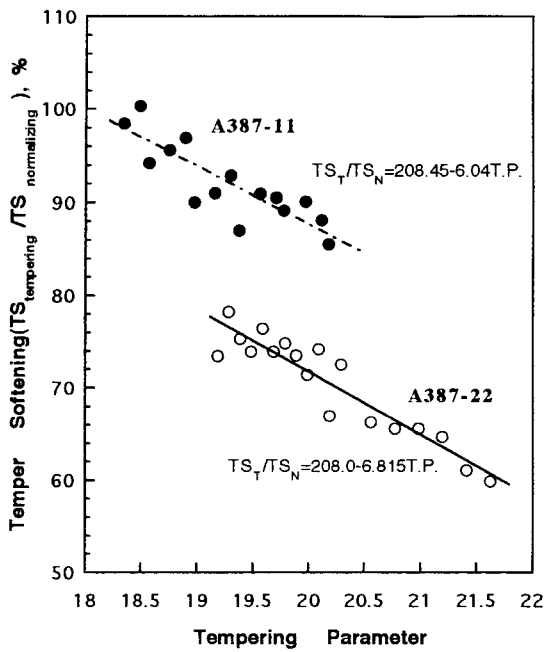


Figure 1 A correlation between temper softening and T.P. for A387 grade steels

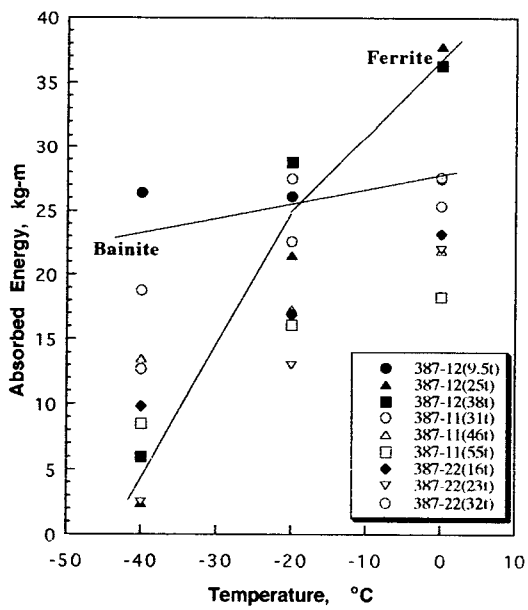


Figure 2 Comparison of Charpy impact properties between ferritic and bainitic microstructures in A387 grade steels

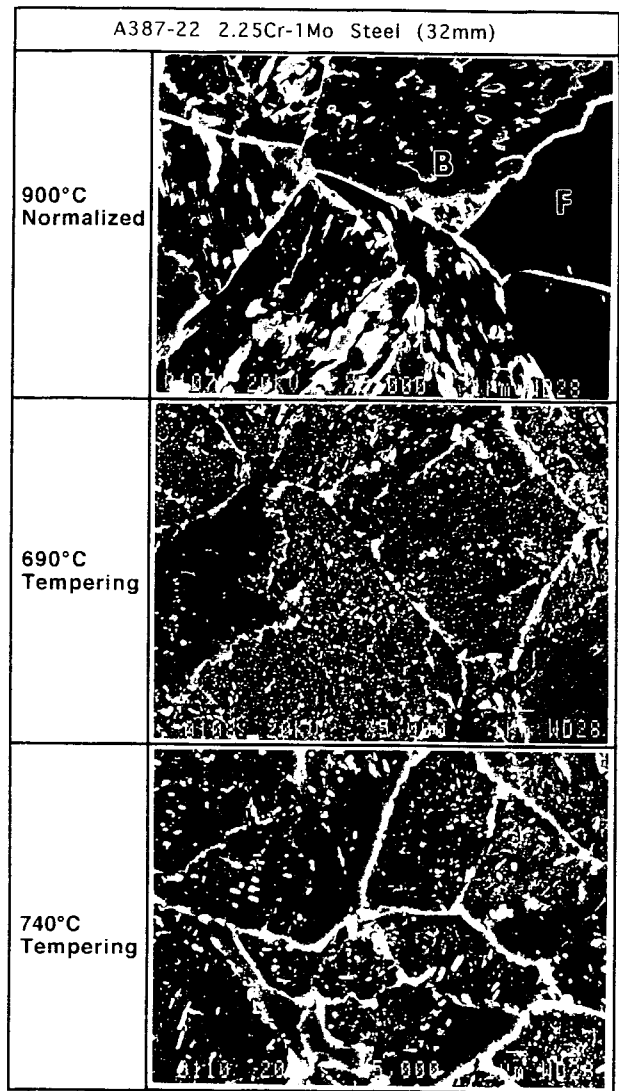


Figure 3 SEM images showing different morphology and distribution of carbides in N+T A387-22 steel