

TMCP강재의 연화현상

윤 중 근* · 김 희 진*

1. 서 론

선박등의 대형 용접구조물의 제작에 있어 대입열 용접은 생산성향상과 공기단축의 측면에서 매우 필요한 시공방법이나, 대입열용접으로 제작된 용접부의 인성은 일반적으로 약화되므로 구조물의 안전성 측면에서 그의 적용을 제한하고 있는 실정이다. 이와 같은 문제점을 극복하고자 1970년대 말기에 개발된 제조압연방법이 Thermo-Mechanical Control Process (TMCP)이다.^{1,2)} TMCP에 의하여 제조된 강재는 기계적 성질이 매우 우수하여 조선, 육상 및 해양구조물등의 중공업 분야에 점차 이들 강재의 사용량이 크게 증가되고 있는 추세이다.³⁾

특히 현재 가장 각광을 받고 있는 가속냉각형 TMCP 강재는 대입열 용접후에도 매우 우수한 기계적 성질을 유지하고 있어, 이 강재에 대한 one side one run submerged arc welding process 등의 대입열시공이 가능하게 되었다.^{4,5)} 그러나 가속냉각형 TMCP강재의 대입열 용접부 특히 열영향부의 강도는 모재의 강도보다 훨씬 저하되는 연화현상이 발생된다.^{4~7)} 이같은 가속냉각형 TMCP강재의 연화현상은 용접부의 구조강도를 저하시키게 되어 구조물의 안전성을 위협하게 되므로 이에 대한 정량적인 평가는 TMCP강재의 적용성 측면에서 매우 절실하게 요구되고 있다.

따라서 본 보고에서는 가속냉각형 TMCP강재에서 발생하는 연화현상을 정립하고자, 본 저자들의 그간 연구결과와 기존의 연구보고들을 종합적으로 검토하여 연화현상에 미치는 제반 인자들의 영향을 정량화하고자 하였다. 연화현상에 관계되는 인자로는 화학성분이나 강재 두께등의 강재 자체의 내적인자와 용접, 후열처리등의 외적인자로 나누어 평가하였다.

이를 토대로 시공시 발생하는 가속냉각형 TMCP강재의 강도변화를 예측함으로써 TMCP강재를 보다 효율적으로 중공업분야에 확대적용하고자 한다.

2. 가속 냉각형 TMCP강재의 연화현상

2.1. 연화현상의 정의

가속냉각형 TMCP강재의 강도는 주로 제조 압연시의 가속냉각 공정에서 야기된 기지(matrix)강화와 결정립 미세화에 기인되므로, 가속냉각에 의해서 형성된 TMCP강재의 미세 조직상태는 항상 열역학적으로 준안정(metastable) 상태로 존재하게 된다. 따라서 용접 혹은 후열처리등과 같은 thermal energy를 받게 되면 미세조직 상태가 안정화되어 가속냉각에 의한 강도증가분 예컨대 기지강화 효과등이 소실되어 원래의 강도보다 낮아지게 되는데 이를 “연화현상”이라 한다.

2.2. 연화현상의 현황

실 구조물의 제작시 용접 혹은 후열처리에 의해 발생된 가속냉각형 TMCP강재의 강도저하에 대한 현상을 Fig.1에 강재의 탄소당량별로 도시 하였다. Fig.1내의 ●와 ○표시는 후열처리에 의한 인장 및 항복 강도의 저하를, ▲와 △는 용접에 의한 인장과 항복 강도의 저하를 나타낸 것이다. 용접은 40~174KJ/cm의 입열량 범위에서 SMAW와 SAW시공법으로 실시 되었으며, 후열처리는 강재 두께 1 inch당 1시간으로 550~600°C의 온도범위에서 실시된것이다. Fig. 1에서 보여주듯이 가속냉각형 TMCP강재는 용접이나 후열처리로 인하여 인장 및 항복강도가 동시에 저하되는 연화현상이 발생되며, 때로는 7~8kg/

* 현대중공업(주) 용접기술연구소, 정회원

mm²까지 크게 강도가 저하되어 강재의 등급조건 (specification requirement) 조차도 만족시키지 못하게 된다. 이는 경우에 따라 용접부에서 설계상 요구되어 지는 구조강도를 확보할 수 없다는 사실을 의미하고 있으므로 이와 같은 연화현상은 매우 심각하다고 하겠다.

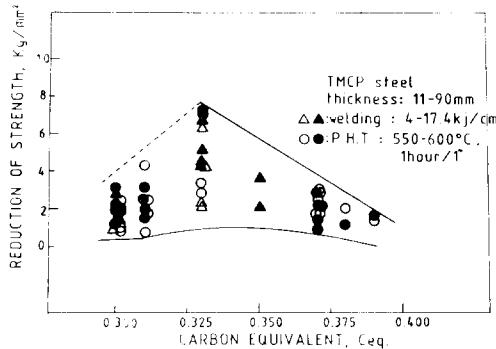


Fig. 1. Variation in the strength reduction caused by thermal treatments with carbon equivalent of ACC TMCP steel

3. 연화현상에 미치는 제 인자

가속냉각형 TMCP강재의 연화현상은 용접이나 후 열처리 등에 의하여 발생되나, 연화된 정도는 다음과 같은 인자들에 의해 영향을 받게 된다.

1. 내적 인자
 - 1) 화학 성분
 - 2) 강재 두께
 - 3) 가속냉각 속도
2. 외적 인자
 - 1) 용접 입열
 - 2) 후열처리 조건(온도, 시간)
 - 3) 시편 형상

따라서 가속냉각형 TMCP강재의 연화현상에 미치는 이들 인자의 영향력이 근본적으로 평가 및 정립되어야만 강재선택의 기준을 설정할 수 있으며, 용접구조물의 제작시 발생하는 강재의 강도 변화 (저하)를 예측할 수 있게 된다.

3.1. 용 접

3.1.1. 용접부의 연화현상

Fig.2에 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 전형적

인 연화현상을 경도 분포로서 기존 normalized강재의 용접부와 비교하여 도시하였다. Normalized 강재는 Fig.2의 N으로 표기된 용접부에서 보여 주듯이 용접후 경화되어 용접열에 의한 용접부의 강도 저하 문제는 발생되지 않는다. 그러나 ACC로 표기된 가속냉각형 TMCP 강재는 열영향부에서 경도가 상당히 감소되어 오히려 모재보다도 낮은 경도값을 갖고 있어, 용접부 인장강도의 감소가 예상되는 용접열영향부의 연화현상이 발생된다.

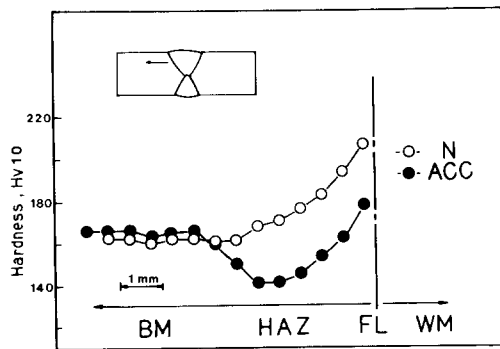


Fig. 2. Hardness distributions in the welded joints of ACC TMCP and normalized steels

3.1.2. 용접입열의 영향

TMCP강재의 가속냉각효과는 용접열에 의해 소실되므로, 연화현상과 용접간의 정량적인 관계를 유추하기 위하여 용접 입열량을 변수로 설정하였다.

Fig. 3에 용접입열량 변화에 따른 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 경도분포 양상을 도시하였으며, 또한 연화정도를 용접열영향부에서의 최저경도 값으로 나타내어 용접입열량별로 Fig. 4에 재도시하였다. Fig. 3과 4에서 보여주듯이 입열이 17KJ/cm인 경우 열영향부의 경도는 모재보다 높으나, 30KJ/cm부터 열영향부 경도가 모재의 경도보다 낮아지는 연화현상이 나타나며, 입열량이 70KJ/cm일 때는 상당히 심한 열영향부의 연화가 야기되고 있다. 즉, 입열량이 증가할수록 가속냉각형 TMCP강재용접 열영향부의 연화정도는 심각해짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 3의 결과를 살펴보면 열영향부의 최저경도값을 가지는 위치가 용접입열량이 증가할수록 모재쪽으로 점차 이동되고 있을 뿐 아니라 모재보다 낮은 경도값을 가지는 연화영역의 크기도 증가되고 있다. 이는 용접입열량에 따른 가속냉각형 TMCP강재의 self tempering정도에 기인된다고 할 수 있다.

한편 용접입열이 낮은 17KJ/cm 경우 열영향부에서는 전혀 연화현상이 관찰되지 않고 있는데, 이는 용접열 cycle의 냉각속도가 제조압연시 가속냉각 공정에서 TMCP강재가 부여받은 냉각속도보다 적을 경우에만 연화현상이 발생된다는 사실을 의미하는 결과이다.

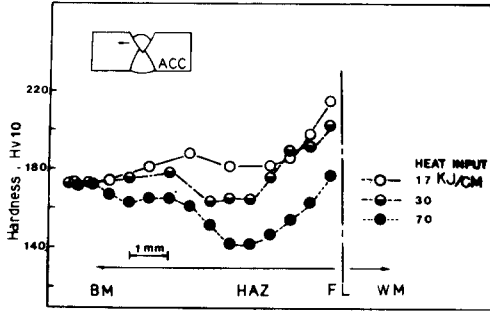


Fig. 3. Variation of hardness distribution with welding heat input in ACC TMCP steel welded joint

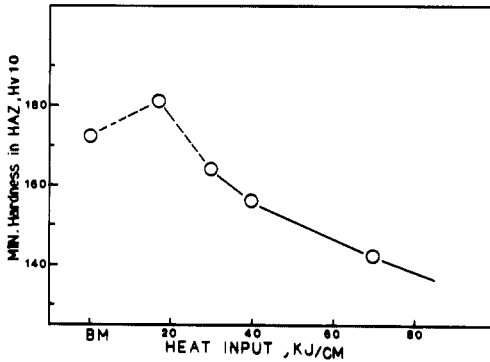


Fig. 4. Effect of welding heat input on minimum hardness in HAZ of ACC TMCP steel

이상의 정도분포로부터 가속냉각형 TMCP강재의 용접부는 강도가 감소된다고 예상되는데, 이를 평가하고자 Fig. 5에 용접부의 인장시험결과를 용접입열량별로 도시하였다. 이 결과에서 보여주듯이 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 인장강도는 용접에 의하여 모재보다 저하되고 있으며, 용접입열량의 증가에 따라 더욱 감소하고 있다. 인장시험시 가속냉각형 TMCP강재 용접부의 파단위치는 Fig. 5내의 삽입 사진으로 나타내었듯이 연화된 열영향부에서 발생되므로 연화현상이 용접부의 강도저하를 야기하는 직접적인 원인을 알 수 있다.

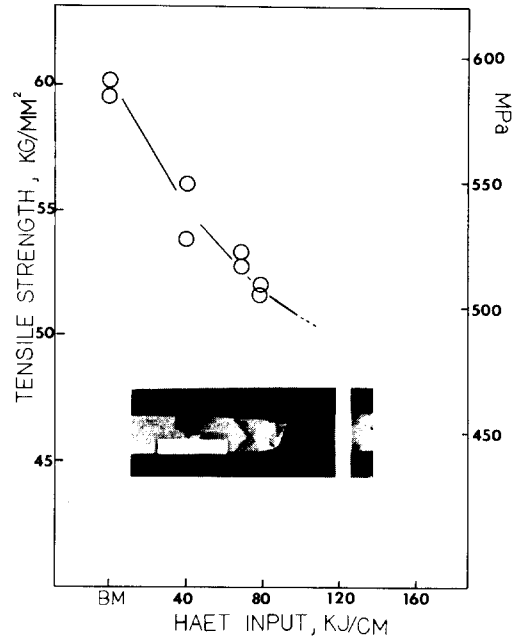


Fig. 5. Effect of welding heat input on tensile strength of ACC TMCP steel welded joint

한편 Fig. 5의 결과를 살펴 보면 용접입열량이 증가함에 따라 용접부의 인장강도의 감소량은 점차 감소되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에서도 보여 주듯이 용접입열량 변화에 따라 열영향부의 최저경도값은 초기에 급격히 감소되나 점차 그 감소폭이 적어지고 있다. 이처럼 용접입열량에 따른 용접열영향부의 최저경도값이나 인장강도의 저하량은 어떤 입계량으로 수렴되고 있어 가속냉각형 TMCP강재의 연화에는 한계성이 있음을 시사하고 있다. 연화현상의 한계성을 조사하고자 대입열 용접부에 대한 경도 분포를 조사하여 Fig. 6에서 도시하였다. Fig. 6에서 보여 주듯이 입열량이 78과 132KJ/cm인 양 용접부 모두에서 심한 연화현상이 발생되었으나, 연화된 정도는 입열량에 관계없이 동일하므로 연화에는 한계성이 존재한다는 결론을 얻을 수 있다. 이러한 가속냉각형 TMCP 강재의 연화현상의 입계점은 바로 가속냉각형 TMCP강재의 탄소당량 혹은 결정립 크기에만 의존되는 값이라고 할 수 있겠다.

이상의 결과를 통하여 용접부의 연화현상은 가속냉각 효과를 상쇄시킬 수 있는 용접열 cycle에 의존되며, 용접입열량이 증가됨에 따라 현저하여지고 연화되는 영역도 커지므로, 가속 냉각형 TMCP강재의 연화현상은 “용접입열량”이라는 열처리 현상의 한

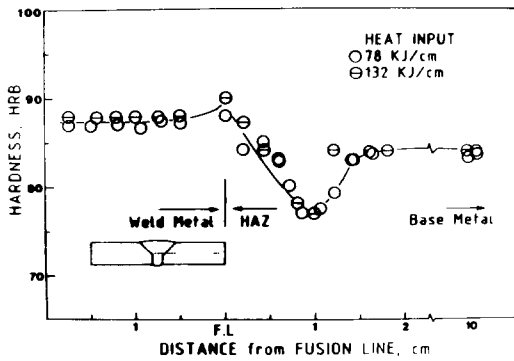


Fig. 6. Hardness distribution of ACC TMCP steel welded joint with 78 and 132 KJ/cm heat input

조건에 크게 의존된다는 결론을 얻을 수 있다.

3.1.2. 화학성분의 영향

가속냉각형 TMCP강재의 연화현상과 화학성분간의 상호관계는 모재의 탄소함유량 혹은 탄소당량 (Ceq.)으로서 평가될 수 있다.

Fig. 7에 입열량이 140에서 610KJ/cm의 범위에서

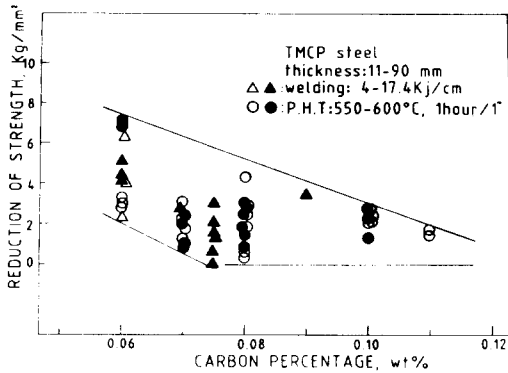


Fig. 7. Effect of carbon equivalent on softening of ACC TMCP steel⁸⁾

용접된 가속냉각형 TMCP강재의 열영향부에 대한 인장시험결과를 도시하였다.⁸⁾ Fig. 7은 동일한 입열량으로 용접된 용접부일지라도 용접 열영향부의 강도는 모재의 탄소당량이 저하됨에 따라 크게 감소된다는 결과를 보여주고 있다. 또한 입열량의 증가에 따른 용접부의 강도변화가 미미한 것을 알 수 있는데 이는 전절에서 기술하였듯이 연화현상의 한계성으로서 특정 입열량이상에서는 연화의 한계에 도달되어 더 이상의 연화가 발생되지 않음도 Fig. 7에

서 보여주고 있다.

한편 Fig. 1의 결과를 살펴보면, 가속냉각형 TMCP 강재의 연화현상은 탄소당량이 적을수록 커지는 경향을 보이고 있으나, 탄소당량이 0.325이하인 경우에는 오히려 감소되고 있어 탄소당량과 연화현상간의 직선적인 관계를 유추하기 힘들다. 연화현상을 보다 정량화하고자 가속냉각형 TMCP 강재의 강도저하 양상을 각 강재의 탄소함유량별로 Fig. 8에 재도시하였으며, Fig. 8내의 기호는 Fig. 1과 동일한 의미를 가진다. 용접이나 후열처리 등의 외부열원에 의한 가속냉각형 TMCP의 강도저하(연화현상)는 탄소함유량이 적을수록 커진다는, 즉 탄소함유량과 연화현상간에 대략적인 직선적 관계가 형성됨을 Fig. 8에서 보여주고 있다.

따라서 동일한 용접입열을 받을 경우 가속냉각형 TMCP 강재의 연화정도는 모재의 화학성분인 탄소당량 특히 탄소함유량에 크게 의존된다고 할 수 있다.

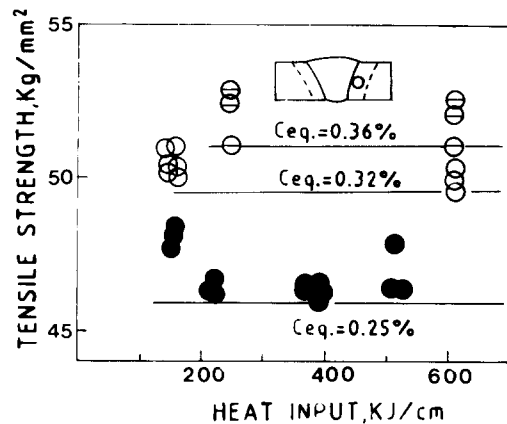


Fig. 8. Variation in strength reduction caused by thermal treatments with carbon contents of ACC TMCP steel

3.1.3. 시편형상의 영향

가속냉각형 TMCP 강재의 용접부에서 발생된 강도저하량(Fig. 5)은 용접부의 경도분포(Fig. 4)에서 예측된 것보다는 다소 적게 평가되었는데, 이는 연화된 열영향부 양쪽의 경한 모재와 용착금속의 인장시험시 연화된 열영향부의 necking에 대한 소성억제처로 작용했기 때문이다. 따라서 인장시험시 평가된 열영향부의 연화정도는 시편의 형상에 따라 변경될 수 있음을 의미하고 있다.

Fig. 9에 시편 형상에 따른 가속냉각형 TMCP강재

용접부의 강도 변화양상을 용접입열량별로 도시하였다. Fig. 9내의 삽입 그림에 도시하였듯이 여러 선급회에서 규정된 용접부의 인장시험인 단표점거리 시험편과 모재의 인장시험 형상인 장표점거리 시험편을 사용하여 용접부의 강도를 평가하였다. Fig. 9에서 보여 주듯이 가속냉각형 TMCP강재는 용접후 열영향부의 연화에 기인하여 용접부의 강도가 저하되나, 전술한 바와 같이 입열량이 약 100KJ/cm 이상에서는 용접입열량 증가에 따른 강도저하는 비교적 적다. 그런데 단표점 거리의 시험편으로 평가된 용접부의 강도가 장표점거리 시험편으로 평가된 강도보다 훨씬 높음을 보여주는데, 이는 단표점거리 시험편의 경우가 연화된 열영향부에 대한 소성억제력이 크기 때문이다.

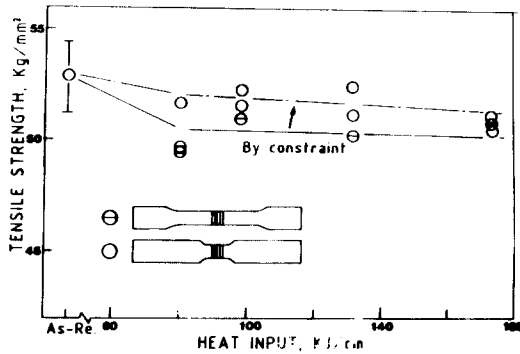


Fig. 9. Effect of specimen shape on softening of ACC TMCP steel after welding

Fig. 10은 가속냉각형 TMCP강재의 연화현상에 미치는 시험편의 영향을 나타내었다.⁸⁾ 시험편의 폭이 증가할수록 연화된 열영향부에 대한 소성억제력이 증가하므로 용접부의 강도는 계속 증가되고 있으며, 시험편의 폭이 400mm인 경우에서 거의 모재의 강도수준에 도달되고 있다.

따라서 실 구조물내에 존재하는 대형 가속냉각형 TMCP강판의 대입열 용접부는 비록 국부적인 열영향부의 연화현상이 존재하지만, 주위의 소성 구속력에 의하여 거의 모재수준의 강도를 회복할 수 있으므로 연화현상에 의한 구조강도의 격감은 발생되지 않는다는 결론을 유추할 수 있다.

이상을 요약하면 용접에 의한 가속냉각형 TMCP 강재의 연화현상은 모재의 화학성분 특히 탄소함유량, 용접자체의 변수인 용접입열량 그리고 시험편의 형상등이 동시에 고려되어야 하지만 정량적으로 평가될 수 있으며, 실구조물에 있어서는 용접부의 연

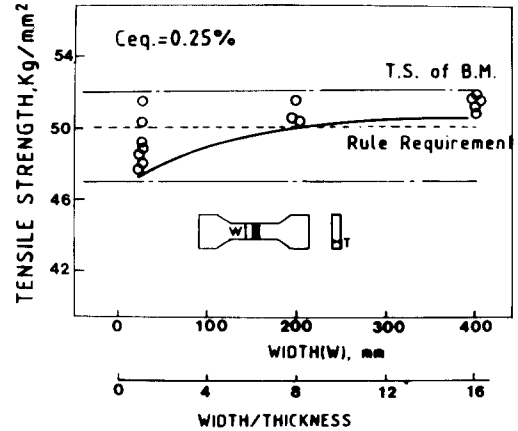


Fig. 10. Effect of specimen width on softening of ACC TMCP steel after welding⁸⁾

화현상은 주위의 소성구속력에 의해 다시 모재의 강도 수준으로 회복될 수 있다.

따라서 가속냉각형 TMCP강재를 대입열로 용접하였을 경우 우려되는 강도감소는 용접부 자체에서 보완하고 있음이 판명된다.

3. 2. 열처리

3. 2. 1. 강재 두께의 영향

Fig. 11에 탄소당량이 0.37인 가속 냉각형 TMCP강재의 두께에 따른 강도변화와 열처리 후의 강도변화를 함께 도시하였다. Fig. 11에서 강재의 두께가 증가할수록 강도는 감소되고 있음을 알 수 있다. 강재의 두께가 두꺼워질수록 가속냉각 공정시 얇은 판에 비하여 가속냉각속도가 느려지고 강재의 두께 방향으로의 냉각속도가 불균일해지므로 충분한 가속냉각 효과를 얻기 어렵기 때문이다. 이는 강재의 두께 차이로 인하여 최종제품에서 얻어지는 강도증가량이 변화됨을 의미한다. 한편 열처리후에는 가속냉각형 TMCP강재의 인장, 항복강도가 동시에 감소하는 연화현상이 발생되고 있음도 Fig. 11에서 보여 주고 있다. 열처리후 항복강도의 감소정도는 강재의 두께에 크게 관계없이 일정한 반면, 인장강도는 강재의 두께가 얇을수록 더욱 감소되고 있다. 따라서 가속냉각효과가 클수록, 즉 강재의 두께가 얇을수록 열처리에 의한 인장강도의 감소량(연화현상)은 증가됨을 알 수 있다.

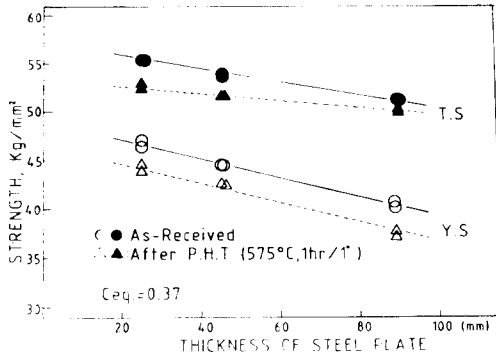


Fig. 11. Effect of thickness on strength of ACC TMCP steel ($C_{ep} = 0.37$) in as-received condition and after heat treatment

3. 2. 2. 화학 성분의 영향

강재의 화학성분이 연화현상에 미치는 영향을 평가하고자 탄소함유량과 탄소당량이 서로 다른 두 강재를 선정하여 열처리를 실시하였으며, 열처리후의 강도변화를 열처리 온도별로 Fig. 12와 13에 도시하였다. Fig. 12는 탄소함유량이 0.08% ($C_{eq} = 0.31\%$)인 강재의 경우이며, Fig. 13은 탄소함유량이 0.06% ($C_{eq} = 0.33\%$)인 강재의 경우이다. Fig. 12와 13에서 보여주듯이 열처리로 인하여 가속냉각형 TMCP 강재의 인장 및 항복 강도는 동시에 저하하였으며, 그 강도 저하정도(연화현상)는 열처리온도의 증가와

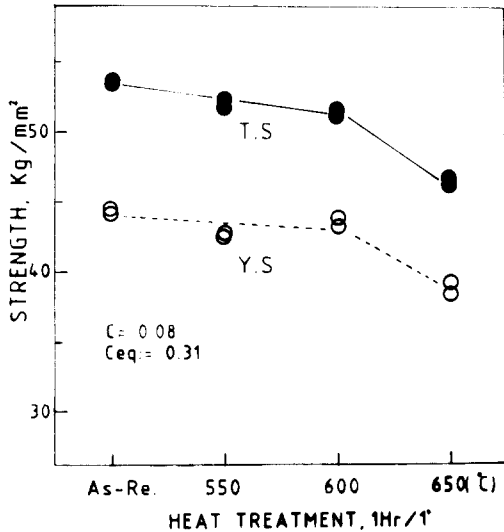


Fig. 12. Effect of heat treatment on strength of ACC TMCP steel ($C_{eq} = 0.31\%$, $C = 0.08\%$)

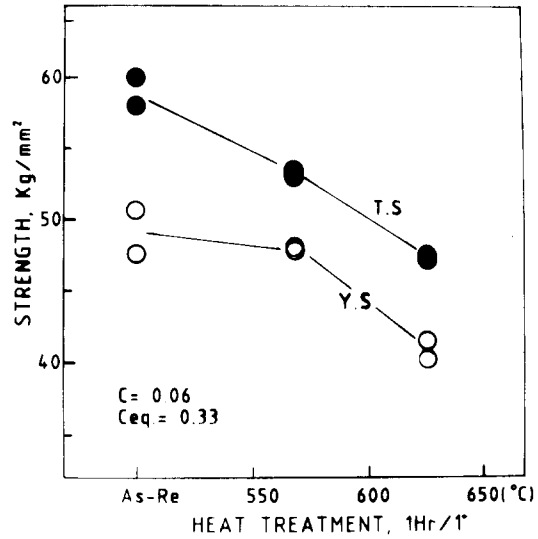


Fig. 13. Effect of heat treatment on strength of ACC TMCP steel ($eq. = 0.33\%$, $C = 0.06\%$)

더불어 증대되고 있다. 특히 625°C나 650°C 열처리 시에는 강도가 현저히 감소되어 강재의 등급조건인 인장강도 50Kg/mm²을 만족시키지 못하고 있다. 한편 Fig. 12와 13의 결과를 비교해 보면, 열처리로 인한 가속냉각형 TMCP강재의 강도저하는 탄소함유량이 0.08%(탄소당량=0.31%)인 강재가 0.06%(탄소당량=0.33%)인 강재보다 적음을 알 수 있는데, 이는 전술한 바와 같이 탄소함유량이 적을수록 연화현상이 현저하다는 것과 연화현상은 탄소당량보다는 탄소함유량과 더욱 밀접한 관계가 있다는 사실을 재차 입증해 주고 있다.

3. 2. 3. 열처리 온도의 영향

전절에서 언급한 바와 같이 열처리후의 가속냉각형 TMCP강재의 강도는 열처리온도가 증가됨에 따라 현저하게 감소되는데 이는 열처리온도에 따른 미세조직변화에 기인된다고 할 수 있다. Photo. 1의 열처리온도에 따른 미세조직변화에서 보여주듯이 열처리 온도가 증가됨에 따라 ferrite결정립내에 탄화물이 많이 석출되고 있으며 이 석출물들은 구상형태로 조대해진 것을 알 수 있다. 또한 제2상내에 존재하던 탄화물들도 ferrite결정립내 및 입계로의 이동 및 성장하게 되어 가속냉각으로 형성된 hard phase (bainite)에 의한 상변태 강화 효과가 소실될 뿐 아니라 열처리로 인한 기지 강화 효과등도 소실되므로 강도 저하가 유발되게 된다.

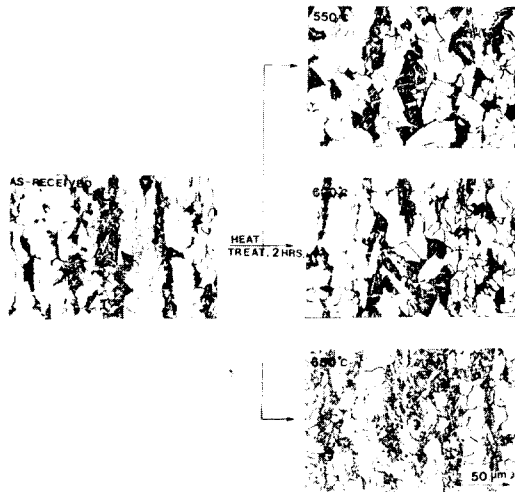


Photo 1. Microstructures before and after heat treatment at various temperature

3.2.4. 열처리 시간의 영향

Fig. 14에 600°C의 열처리 온도에서 유지시간에 따른 가속냉각형 TMCP강재의 강도 변화를 나타내었다. 열처리시간이 증가함에 따라 강도저하(연화현상)는 현저하여, 이 강재의 최저 등급조건인 인장강도 50 Kg/mm²은 5시간 이상에서는 만족시킬 수 없게 된다.

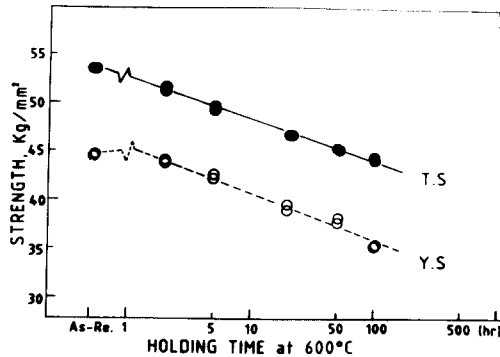


Fig. 14. Effect of holding time on strength of ACC TMCP steel at 600°C heat treatment

Photo. 2에 600°C에서의 열처리시간에 따른 가속냉각형 TMCP강재의 미세조직 변화양상을 나타내었다. 열처리시간이 증가할수록 가속냉각으로 형성된 hard phase인 bainite가 현저히 소실되고, ferrite 결정립내의 탄화물 형성이 증가될뿐 아니라 이 탄화물이 성장되므로 강도저하가 발생하게 된다. 더우기 후열처리시간이 50시간이상에서는 전혀 hard phase의 형태를 발견할 수 없고 단지 구상 탄화물의 존재

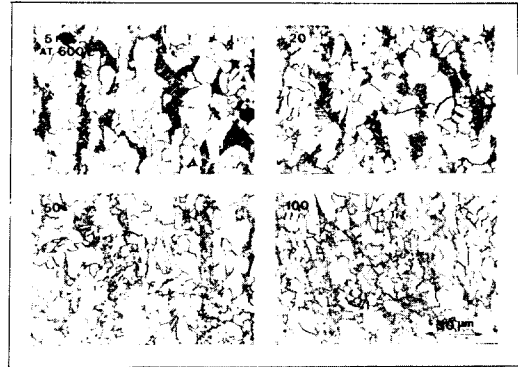


Photo 2. Microstructural change in ACC TMCP steel with holding time at 600°C

양상만이 관찰되고 있다.

한편 가속냉각형 TMCP강재의 연화현상의 중요성을 보다 강조하고자 normalized강재를 동일한 조건에서 실험하여, 그 결과를 Fig. 15에 함께 도시하였다. Fig. 15에서 보여주듯이 열처리에 따른 인장, 항복 강도의 저하는 양 강재에서 모두 관찰되나 가속냉각형 TMCP강재의 강도 감소율이 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이는 열처리나 열처리시간의 증가로 인하여 normalized강재 나 가속냉각형 TMCP강재 모두에서 전술한 미세조직변화가 발생되어 강도가 감소하게 되나, 가속냉각형 TMCP 강재의 경우에는 가속냉각시 부여받은 기지 강화 인자도 동시에 소멸되기 때문에 normalized강재의 경우보다 더욱 강도저하가 심한 것이라고 할 수 있다. 따라서 용접구조물의 후열처리의 적용이나 고온강도측면에서 가속냉각형 TMCP강재는 normalized강재에 비하여 매우 불리한 것으로 판명된다.

이상의 결과를 요약하면, 열처리에 의한 강도저하

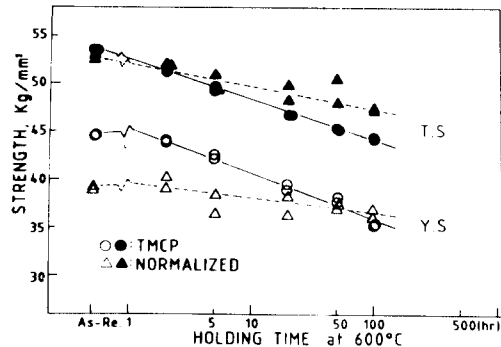


Fig. 15. Comparison of strength deterioration of ACC TMCP steel with that of normalized steel after heat treatment

(연화현상)는 열처리에 의한 탄화물의 morphology 변화, 구상화 및 조대화 그리고 bainite조직의 소실 등의 미세조직변화에 기인된다고 할 수 있다.

3.2.5. 열처리후의 강도에측

열처리에 의한 강도감소는 열처리 조건 (온도 및 시간)에 크게 의존되므로, 종래부터 Larson-Miller 인자(tempering parameter, $T(20 + \text{Log } t) \times 10^{-3}$)을 이용하여 열처리에 의한 탄소강의 강도변화를 예측하고 있다.^{9~12)}

Fig. 12, 14, 15의 실험결과들을 tempering parameter로써 평가하여 Fig. 16에 재도시하였다. Fig. 16에서 보여주듯이 열처리에 따른 각 강재들의 강도는 전반적으로 감소되고 있다.

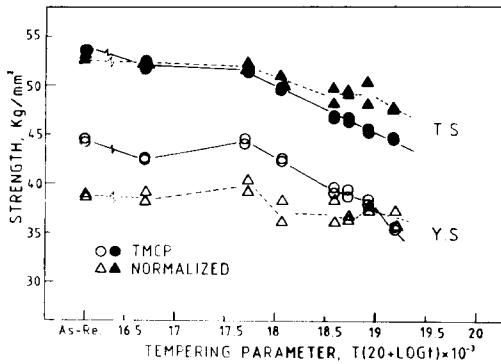


Fig. 16. Relationship between strength and tempering parameter after heat treatments

그런데 Fig. 16에서 보여주듯이 열처리후의 강도감소량과 tempering parameter 간에는 정량적인 직선관계가 없음이 인정되며, 또한 기존 연구결과들에서도 양자간의 직선관계가 성립되지 않는 경우도 많이 관찰되고 있다.^{9~12)} 따라서 열처리조건(시간, 온도)의 변화시 발생하는 강재의 강도저하를 보다 정량적으로 예측하고자 Tempering Factor라는 인자를 제안하였다.⁷⁾ “Tempering Factor { $\text{Exp}(-Q/RT) \cdot \text{log } t$ }”는 열처리시 온도의 항을 강도저하에 필요한 활성화 energy항과 함께 exponential함수로 평가하여 시간의 log 함수와 함께 적용시킨 것으로 이미 그 유용성을 입증한 바 있다.¹³⁾ Fig. 17에 Tempering Factor를 이용하여 열처리에 의한 가속냉각형 TMCP 강재의 강도감소율을 도시하였다. Fig. 17에서 보여 주듯이 Tempering Factor와 TMCP강재의 열처리에 의한 강도감소율은 매우 정량적인 직선관계가 성립되었으며, 이를 토대로 다음의 실험식 (1)을 정립할

수 있다.

따라서 (1)식을 이용하면 각종 열처리에 의한 가속냉각형 TMCP강재의 강도변화를 쉽게 예측할 수 있게 되었다.

$$\sigma_{HT}/\sigma_{as-re} = A - B \text{Exp}(-Q/RT) \cdot \text{log } t \quad (1)$$

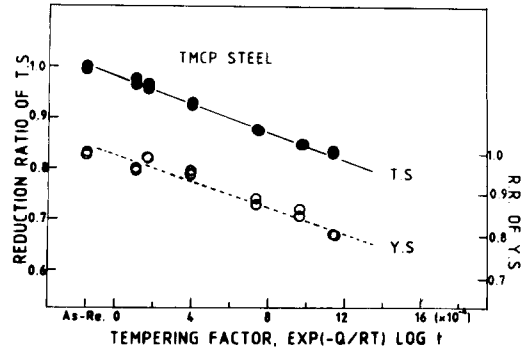


Fig. 17. Relationship between strength and Tempering Factor after heat treatments in ACC TMCP steel

이상의 결과를 요약하면, 열처리에 의한 가속냉각형 TMCP 강재의 연화현상은 강재의 두께, 화학성분 그리고 열처리 조건(온도, 시간) 등에 의하여 결정된다. 따라서 열처리후 주어진 가속냉각형 TMCP 강재의 강도확보상 열처리 조건의 합리적인 선정은 매우 중요하며, 후열처리 후의 강도변화는 Tempering Factor를 이용한 실험식에 의하여 예측될 수 있게 되었다.

3.3 용접부의 후열처리(PWHT)

가속냉각된 TMCP 강재는 열처리에 의해 연화될 뿐 아니라 용접열에 의해서도 국부적인 열영향부의 연화가 발생된다. 그런데 용접 구조물은 사용목적에 따라 후열처리가 실시되므로, 후열처리된 가속냉각형 TMCP 강재의 용접부는 용접에 의한 열영향부 연화현상과 더불어 후열처리에 의한 이차 연화현상이 우려된다. 이를 평가하고자 가속냉각형 TMCP 강재에 대하여 용접(SAW, 40KJ/cm) 및 후열처리(PWHT, 580°C, 30분)을 실시하였으며, 후열처리 전후의 용접부에 대한 경도 분포를 Fig. 18에 도시하였다. Fig. 18에서 용접에 의한 열영향부의 초기 연화현상과 후열처리에 의한 이차 연화현상을 명백히 보여주고 있다. 후열처리로 인한 이차 연화로 열영향부의 경도는 현저하게 감소되었으며, 그 연화된 영역폭도 크게 확대되었다. 이를 정량적으로 평가하기 위하여

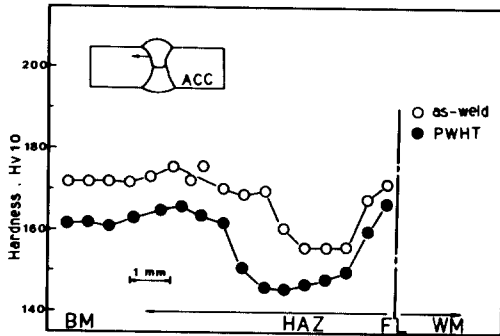


Fig. 18. Additional softening in HAZ of ACC TMCP steel after PWHT

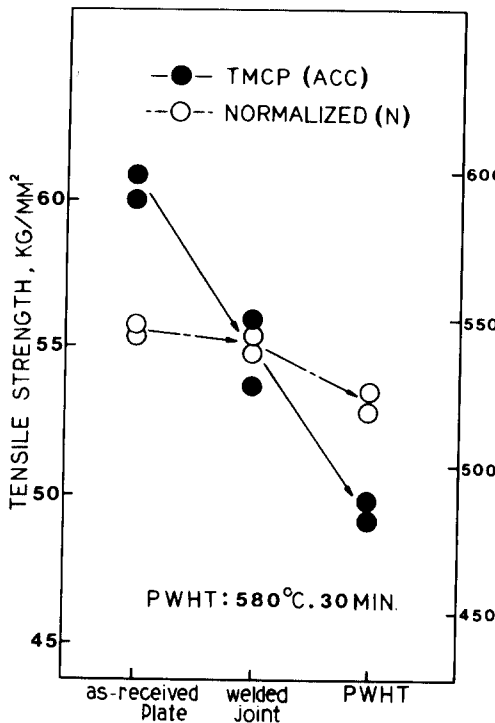


Fig. 19. Deterioration of tensile strength after welding and PWHT for ACC TMCP steel and normalized steel

인장시험을 실시하였으며, 그 결과를 normalized 강재 용접부에 대한 결과와 함께 Fig. 19에 도시하였다. Fig. 19에서 보여 주듯이 N으로 표기된 normalized 강재의 경우 후열처리, 용접 및 용접부의 후열처리 등에 의한 강도변화는 크게 발생되지 않고 있다. 그러나 ACC로 표기된 가속냉각형 TMCP 강재의 강도는 용접에 의하여 일차적으로 감소되고 있으며, 연이은 후열 처리로 인하여 현저하게 감소되어 강재의

최저 요구강도(T.S 50Kg/mm²)를 만족시키지 못하게 되었다.

따라서 가속냉각형 TMCP 강재의 용접부에 후열처리를 실시하게 되면, 용접부의 강도는 격감되어 용접구조물의 대형 사고를 유발할 수 있으므로 전술한 바와 같이 가속냉각형 TMCP 강재의 용접에 대한 후열처리는 더욱 신중하게 고려되어야 한다.

4. 맺 음 말

최근 개발된 가속냉각형 TMCP 강재의 문제점으로 평가된 연화현상(강도저하)을 보다 정량적으로 평가하고자, 연화현상에 미치는 제반 인자 즉, 내적요인인 화학성분, 강재의 두께와 외적인자(시공인자)인 용접과 후열처리 등의 영향력을 비교 검토하였다. 연화현상을 야기하는 것은 용접이나 후열처리 등의 열적처리이며, 연화정도를 결정하는 것은 내적 인자인 강재의 화학성분, 두께 및 외적 시공인자인 용접입열량, 후열처리조건(온도, 시간) 등으로 평가되었다.

용접에 의한 가속냉각형 TMCP 강재의 연화현상은 실 구조물에서는 주위 물질들의 소성구속력에 의하여 상당히 회복될 수 있으나, 후열처리에 의한 연화현상은 다시 회복될 수 없으므로 가속냉각형 TMCP 강재나 그 용접부에 대한 후열처리는 매우 신중하게 검토되어야 하겠다.

참 고 문 헌

- 1) Sumitomo metal industries technical reports. (1979).
- 2) Kawasaki steel corporation technical reports. (1983).
- 3) 김희진, 대한용접학회지, 제4권 제2호(1986), 1~11.
- 4) 신민태, 윤중근, 김희진, 대한용접학회지, 제4권 제3호(1986), 43-49.
- 5) 윤중근, 김희진, 기술현대, Vol. 7, No. 2, (1987), 16-23.
- 6) J.G. YOUN, H.J. KIM, "WELDING METALLURGY OF STRUCTURAL STEELS" ed. J. Y. Koo, Pub. AIME (1987), 157-168.
- 7) 윤중근, 김희진, Proc. of the 1st Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Oct., (19

- 87), Seoul, 179-185.
- 8) 仁藤 等, 日本造船學會論文集, 第157號(1985), 319-326.
- 9) Metal Handbook, 9th Edition, ASM, (1981), 70-84.
- 10) R. D. Stout, WRC bulletin 302, Feb., (1985).
- 11) C. D. Lundin, B. J. Kruse, M. R. Pendley, WRC bulletin 277, May, (1985).
- 12) G. Krauss, Principles of Heat Treatment of Steel, ASM, (1980), 187-227.
- 13) 윤중근, 김희진, 대한용접학회지, 제5권 제3호, (1987), 28-37.