

解 說

大韓熔接學會
第4卷, 第2號, 1986年 9月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 4, No. 2, Sept., 1986

TMCP 강의 개발 및 적용

김 희 진*

1. 서 론

1973년 이후 석유 파동을 겪으면서 새로운 유전의 개발이 요구되고, 에너지 절약에 대한 관심이 높아짐에 따라 강재수요자들의 요구조건 또한 까다로와지게 되었다. 선박을 예로 들면, 선박의 경량화가 추구되면서 고강력강의 사용이 점차 확대되고 있고, 해양 구조물용으로는 구조물의 안정성을 높이기 위하여 인성에 대한 기준치가 더욱 까다로와지고 있다. 또 다른 한편으로는, fabricator측은 구조물의 대형화와 함께 용접의 자동화 및 내입열 용접을 확대 적용함으로써 제작비를 절감시키고자 하고 있다. 이와 같은 경향에 따라 근래 구조용 강에 추가로 요구되는 조건들을 나열하면 다음과 같다.

- 1) 구조물의 대형화에 따른 강판의 두께 증가
- 2) 중량 감소를 위한 강도 증가
- 3) 구조물의 안정성을 위한 인성 증가
- 4) 용접 균열에 대한 저항성 증가
- 5) 내입열 용접에서 양호한 용접성
- 6) 기타(내 부식성, 평평도 등)

앞에 열거한 요구에 맞추어 강재의 품질을 높이기 위해서는 이에 상응하는 가격의 상승이 뒤따르는데, 이는 유가 및 원자재 등의 가격상승과 더불어 강재 가격의 상승을 주도하였다. 이같은 가격 상승요인들을 최소화하기 위해서, steel maker는 기술개발을 통하여 노동력을 절감하고 생산성을 향상시켜서 원가를 절감하고자 노력하였다. 따라서 steel maker가 당면한 과제는 크게 두가지로 대별되는데, 이는

(1) 수요가를 위한 강재의 질적향상과 (2) 자체 생존을 위한 생산비의 절감이다.

구체적인 사항으로써, 먼저 생산비를 절감하기 위한 방편으로 continuous casting(CC, 연속주조) process

의 적용을 일반화하여, 현재 일본의 경우 특수한 강판을 제외한 거의 모든 강판의 CC process로 생산되어지고 있다. 이에 더 나아가 hot charging이나 warm charging을 실용화하여 생산비를 더욱 낮추고 있다. 이외에도 Higher-speed equipment, mechanization, automation을 통해 steel mill에서의 oil 소비는 1차 oil shock가 일어났던 1973년에 비해 44% 정도로 절감하는데 성공하였다고 한다.¹⁾

또 하나의 커다란 변화는 Thermo-mechanical control process(TMCP)의 도입으로 기존의 에너지 집약적이고 batch process인 열처리 공정을 대체해 나가고 있다. TMCP는 continuous process로써, 압연상태에서 열처리재에 상응하거나, 보다 나은 재질을 얻게 해줄 뿐만 아니라, 요구되는 기계적 성질을 보다 적은 양의 합금원소의 첨가만으로 가능케 해주므로 용접성도 향상시킬 수 있게 하여 준다. 따라서 TMCP장치는 (1) 강재 maker 측에게는 생산비의 절감을 (2) fabricator 측에는 용접성 향상에 따른 제조원가의 절감을 (3) owner 측에게는 재질향상으로 인한 신뢰성을 더욱 증대시켜 줌으로써 modern structural steel의 대표적인 것이라 하겠다.

따라서 본 논문에서는 TMCP장치의 개요 및 우수성에 대하여 논하고 이어서 이러한 강재를 사용하는 데 주의해야 할 사항에 대해 기술하고자 한다. 참고적으로 본 논문의 마지막에는 TMCP 강재의 사용 현황 및 전망에 대해 기술하여 보았다. 강재의 재질향상 측면에서는 위에서 언급한 사항 이외에도 steel making 시에 적용되는 (1) Hot metal의 예비처리와 (2) Ladle 정련방법 등이 있는데 이는 모두 강종의 불순물로 들어가는 P, S, O 및 H양을 줄이고자 행하여지는 방법으로써, 이들은 생산비를 절감하는 면이나 강재의 용접성과는 직접적인 관련이 없기 때문에 그 자세한 사항은 여기서 생략하기로 한다.

*현대중공업 용접기술연구소, 책임연구원, 정희원

2. 구조용 강판의 제조방법

2-1. 열간압연과 불림처리

TMCP의 특성을 이해하기 위해서는 먼저 기존의 압연방법 및 불림처리에 대해서 먼저 이해할 필요가 있어서 이에 대한 기술을 먼저 하기로 한다.

연속주조로 생산된 슬라브를 Fig.1의 (a)에서 보여주는 바와 같이 1100-1200℃정도로 재가열하여 최종 제품의 두께에 이를 때까지 압연을 행한 후 대기 중에 방치하여 냉각시킨 판재를 As-Rolled plate라 한다. 여기서 행하여지는 압연은 열간압연이라고 하여 austenite의 고온 영역(재결정 영역)에서 행하여 지는데, 이때 조직은 압연후 바로 재결정이 되고 재결정한 austenite 결정립은 다음 pass가 진행될 때까지 성장하게 된다(재결정 및 결정립 성장). 그러므로 여러번의 압연이 가하여져도, 각 압연 공정 사이에 재결정된 결정립이 성장할 수 있는 시간이 있어서 이 방법으로는 미세한 조직을 얻기가 어렵다. 따라서 이러한 As-Rolled상태의 강재는 조직의 조대화로 인하여 강도 및 인성이 낮기 때문에 저급강의 생산에 사용되어지고 있다(A grade). 반면에 고급강의 생산을 위해서는 고강도 고인성이 필요하게 되는데, 이를 위하여 강재 maker는 강도를 증가시키기 위해서 합금원소를 첨가하는 방법을 주로 사용하고, 인성을 증가시키기 위해서는 열간압연으로 생산된 강재에 불림처리를 하여 조직을 미세화함으로써 필요한 강도와 인성을 얻고 있다. Fig.1의 (b)는 불림처리를 보여주는 도식적인 그림으로, 최종 제품의 두께까지 열간압연으로 압연한 강판을 냉각후 다시 Ac3온도 이상으로(900-950℃) 가열한 후 공기중에 방치하여 냉각시킨 것이다. 불림처리를 하면 Fig.2에

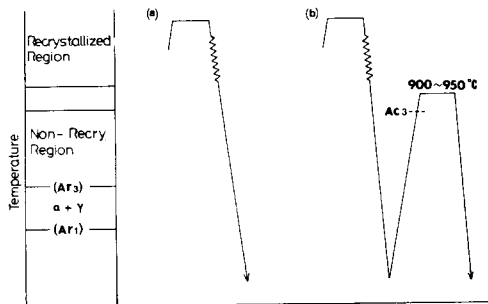


Fig. 1. Schematic drawing of plate making processes for (a) as-rolled and (b) normalized plates.

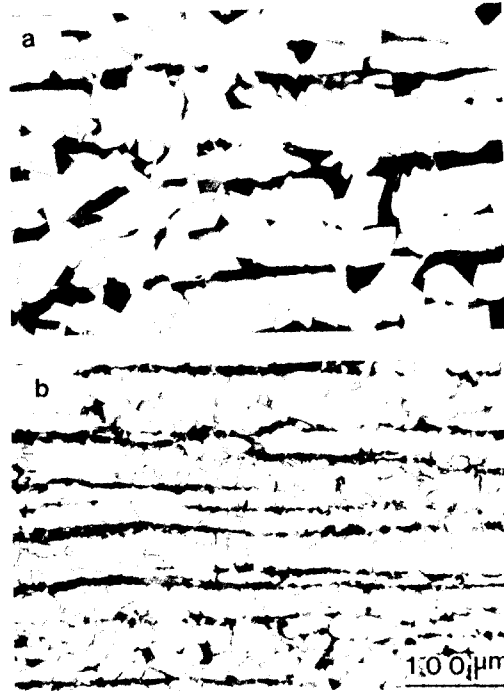


Fig. 2. Optial micrographs of (a) as-rolled and (b) normalized steel plates. Note the finer structure in the normalized plate.

서 보여주는 바와 같이 압연상태의 조직이 미세화하게 되는데, 조직이 미세화 정도에서만 차이가 있을 뿐, 상에 있어서는 차이는 없다. 즉 압연 및 불림처리 후 냉각은 모두 공냉이므로 상온에서의 조직은, ferrite와 pearlite의 혼합조직을 보여준다. 이때 pearlite는 Fig.2에서 보여주는 바와 같이 band를 따라 집중적으로 형성되어지고 있다. 이와 같이 잘 발달된 band structure는 As-Rolled 및 Normalized 강재에서 가장 잘 나타나는 특징으로써 다음에 기술하고자 하는 가속냉각된 TMCP 강재와는 커다란 차이를 보여 준다.

2-2. TMCP 제어압연 방법

불림처리를 생략하면서도 그에 상응하는 또는 그보다 좋은 재질을 압연상태에서 얻고자 하여 개발된 것이 제어압연 방법이다. 이 방법은 1969년에 Trans-Alaska Pipeline System에 사용된 500,000ton의 강재를 생산하여 최초로 적용됨으로써 상업화되어 1970년 말기부터는 선박, 해양구조물, 저장용 탱크 등에

다양하게 사용되어지면서 현재에 이르고 있다. 현재 일본 steel maker가 강제 생산에 적용하고 있는 제어압연 방법을 보면 Fig. 3에 보여 주는 바와 같으며 이들을 Table 1에서는 각 steel maker들이 붙인 process 이름들과 대응시켜 보았다. Fig. 3에서 보듯이 모든 제어압연은 압연이 austenite 영역내에서 그 단계에 걸쳐 행하여지고 있는데, 각각의 압연을 행하여지고 있는 온도 영역을 Austenite의 재결정 온도 영역과 비교하여 살펴보면 다음과 같다.

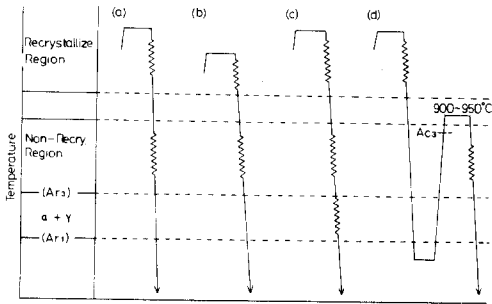


Fig. 3. Schematic drawing of various controlled rolling processes.

Table 1 Controlled rolling practices used by Japanese steel companies(2)

Company	Process Name	Type(See Fig. 3)
Nippon Steel	NIC	(b)
Nippon Kakan K. K	NCT type I	(c)
Kawasaki Steel	SCR	(a)
	KTR	(c)
Kobe Steel	KontRoll	(a) or (c)
Sumitomo Metal Ind.	SHT	(d)
	SSC	(a)

Austenite 온도 영역은 압연후 재결정이 일어나는 상태에 따라 3가지 영역으로 나누어지는데, 온도가 높은 순으로 (1) 완전한 재결정이 일어나는 온도 영역(complete recrystallization) (2) 재결정이 부분적으로 일어나는 온도영역(partial recrystallization) 그리고 (3) 재결정이 일어나지 않는 영역(non-recrystallization)으로 나뉘어진다. 이와 같은 구분을 놓고 볼 때, 첫번째 압연은 austenite가 압연 후 바로 재결정되는 재결정영역에서 행하여지고, 두번째 압연은 강재가 어느 정도 냉각된 후 재결정이 일어나지 않는 온도영역에 이르러 행하게 된다. 따라서 모든 제어압연은 재결정이 부분적으로 일어나는 온도영역에서는 압연을 행하지 않고 있는데 그 이유는 다음

에 설명하기로 하고 여기서도 2차에 걸쳐 행하여지는 압연의 역할을 각각에 대해 살펴보기로 한다. 처음에 행하는 압연은 Fig. 1(a)에서 보여준 바와 같은 열간압연으로써 압연 후 재결정되어 성장된 austenite 결정립을 얻게 되는데, 이를 재결정이 일어나지 않는 온도영역(약 900°C 이하)에서 2차로 압연을 행하면 austenite 결정립이 압연방향으로 길게 늘어나서 단위 부피당 입체면적이 증가된다. 이때 압연으로 인한 압연량이 많으면 많을수록 austenite 결정립은 더욱 늘어나서 입체면적을 증가시키게 된다. 이와 같이 하여 연신된 austenite 결정립에서 변태되어 생성되는 ferrite 결정립은 극히 미세하게 되는데 이는 austenite 입체가 ferrite 변태시 가장 우선적인 핵생성 site가 되는데 기인된다. 따라서 austenite 결정립이 길어질수록, 즉 재결정이 일어나지 않는 영역에서의 압연량, 즉 2차 압연량이 많을수록 미세한 ferrite 조직을 얻을 수 있게 된다.³⁾ 만일 부분적으로 재결정이 일어나는 온도영역에서 압연을 행하게 되면 재결정이 일어난 부분과 안일어난 부분이 함께 존재하여 최종 조직 또한 불균일하여지기 때문에 이 온도영역에서는 압연작업을 피해야 한다. 그러기 위해서는 강관이 부분적으로 재결정이 일어나는 영역을 완전히 통과할 동안 압연기상에 방치하여 냉각시켜야 하므로 생산성이 떨어지게 된다. 이로 인한 생산성 저하를 최소화하기 위하여는 방치시간을 줄여야 하는데, 이를 줄여야 하는 이유로는 다음에 기술하는 바와 같은 또 다른 이유가 있다.

앞에서 기술한 바와 같이 제어압연은 austenite를 재결정이 일어나지 않는 온도영역에서 압연을 많이 행할수록 미세한 조직을 얻을 수 있으므로 이러한 효과를 최대화하기 위해서는 (1) 재결정이 일어나지 않는 온도영역에서의 냉각속도를 늦추어 압연횟수를 늘리거나, (2) 재결정이 일어나지 않는 영역을 확장시켜 압연횟수를 늘릴 수 있도록 하는 방법 등이 있다. 이 중에서 (1)의 방법은 압연중 가열을 해야 하므로 적용이 거의 불가능하여 거의 모든 steel maker는 (2)의 방법을 따르고 있다. 즉 Nb, V 또는 Ti등을 첨가하여 재결정 종료온도(recrystallization stop temperature)를 높여서 재결정이 일어나지 않는 온도영역을 확장시키고 있다. 이러한 목적을 위해서는 Nb이 특히 유익함은 잘 알려져 있다.³⁾

지금까지 기술한 2단계 압연을 이용한 전형적인 제어압연 방법은 Fig. 3의 (a)에서 보여 주고 있으며 Fig. 3의 (b), (c), (d)의 방법방법은 이를 조금씩 개조한 것으로 그 특징을 살펴 보면 다음과 같다.²⁾

N/C process, Fig. 3의 (b)는 Ti-Ca 처리한 slab를 이용하여 1000°C 정도의 낮은 온도로 가열한 후 압연을 행하는 것이 특징이다. 이는 가열 온도를 낮게 유지함으로써 austenite 결정립의 성장을 억제하면서, 나아가 TiN 석출물을 생성시켜 재결정 결정립의 성장을 최대로 억제하여 미세한 조직을 얻고자 한 것이다. Ca의 첨가는 유화물의 구상화를 목적으로 첨가한 것으로 이로 인하여 강재의 이방성이 감소하고 Lamellar tear에 대한 저항성이 증가하게 된다(Z-plate). Fig. 3의 (c)방법은 (a)방법에 two-phase rolling이 첨가되어 압연이 모두 3차에 걸쳐서 행하여지고 있는 것이 특징이다. two-phase rolling을 행하면 변태되지 않은 austenite내에 ferrite의 핵생성장소를 생성시켜 조직을 더욱 미세화시킬 뿐만 아니라 ferrite를 강화시켜 주는 역할 등 장점이 있는 반면, 이로 인하여 기계적 성질의 이방성이 심하게 나타나고 파면에서 압연면에 평행하게 갈라지는(splitting) 현상을 유발하며,⁴⁾ 특히 관두께방향으로의 성질이 극히 나빠지게 되므로 이러한 two-phase rolling은 극히 제한되어 사용되어지고 있다. 마지막 (d)에 보여 주는 CR방법은 Sumitomo Metal Ind. 에서 적용되는 SHT(Sumitomo High Toughness) process로써, 1차 압연 후 강재를 Ar1(변태 종료온도) 이하까지 냉각시킨 다음 Ac3 온도이상(약 930°C 정도)으로 재가열하여 austenite로 변태시킨 다음 재결정이 일어나지 않는 영역에서 2차 압연을 행하는 것이다. 따라서 이 방법은 불림과 제어압연을 함께 적용하는 방법으로써 강재의 기계적 성질이 극히 우수한 반면 다른 제어압연 방법에는 없는 재가열 공정이 있으므로 생산비가 증가하게 된다.

2-3. 제어압연 공정후 가속냉각 방법의 적용

지금까지 기술한 As-Rolled, Normalizing 처리 및 CR process는 최종 압연 후 강판을 공기중에 방치하여 냉각하게 되는데 여기서 기술하고자 하는 가속냉

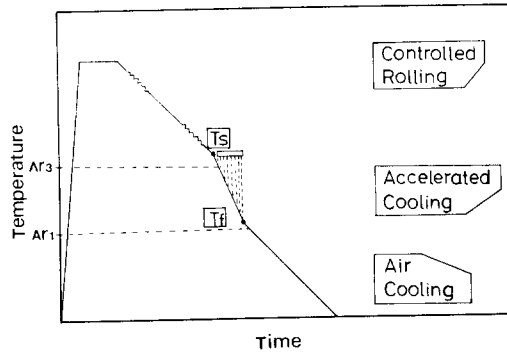


Fig. 4. Schematic drawing of TMCP process equipped with accelerated cooling system.

각법은 최종 압연 후 가속냉각장치를 이용하여 냉각속도를 증가시킨 방법이다. 일반적으로 가속냉각(accelerated cooling)은 Fig. 4에서 보듯이 제어압연 공정에서 2차 압연이 끝난 직후 그리고 Ar3 온도 바로 위에서부터 물 분사장치를 이용하여 변태가 끝나는 온도, 즉 Ar1에 도달할 때까지(보통 800°C에서 500°C까지) 적용되어지고 있으며, 그 이하의 온도영역에서는 공냉을 하게 된다. 이와 같이 CR 후 가속냉각을 적용하면 CR 후 공냉시킨 기존의 제어압연 방법에 비하여 다음과 같은 변화 및 효과를 얻을 수 있게 된다.

급속화적인 관점

제어압연은 이미 언급하였듯이 austenite를 재결정이 일어나지 않는 온도영역에서 압연하여 단위 부피당의 입계 면적을 증가시키고, 결정립 내부에는 deformation band를 형성시켜서 ferrite의 핵생성 자리를 증가시킨다고 하였다. 이러한 CR 후 가속냉각을 시키면 냉각속도가 빨라져서 변형된 austenite가 회복이 일어난 시간적 여유가 없게 된다. 이로 인하여 기존 핵생성 site의 potential이 더욱 높아질 뿐만 아니라, 공냉할 때에는 핵생성 site로 되지 못하였던

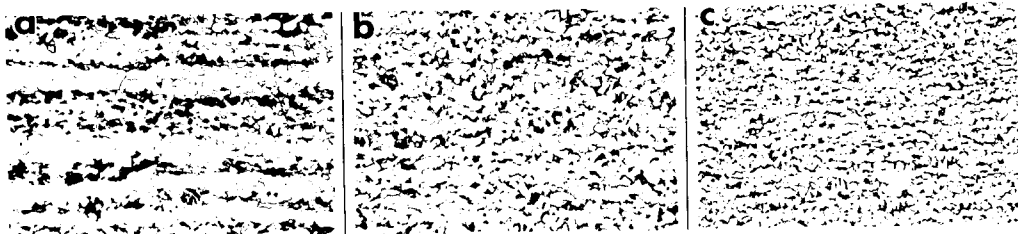


Fig. 5. Microstructures of plates under various cooling rates: (a) air cooled, (b) accelerated cooled at 4°C/sec and (c) accelerated cooled at 10°C/sec. Note the finer microstructure and more finely distributed second phase with faster cooling rate.⁵⁾

하부조직에서도 핵생성이 가능하여 공냉했을 때 보다 더욱 미세한 조직을 얻게하여 준다(Fig.5). 조직의 미세화외에도 냉각속도가 빨라짐에 따라 상의 변화를 가져오는데 이를 살펴보면 다음과 같다. 공냉을 하면 austenite가 ferrite와 pearlite로 변태되고, 이때 pearlite는 압연방향으로 band형상을 보여서 band structure가 된다고 Fig.2를 통하여 보여 주었다. 이러한 조직이 냉각속도가 증가됨에 따라 pearlite의 band 형상이 없어지면서 ferrite 내에 pearlite가 분산되어 존재하게 되는데 이와 같은 조직의 변화를 Fig.5의 (a)와 (b)에서 보여 주고 있다. 이어 냉각속도가 더욱 증가하면 조직은 더욱 미세화되면서 동시에 pearlite의 생성이 억제되면서 대신 bainite가 생성하게 되어 결국 ferrite와 bainite의 복합조직으로 나타나게 된다. 이와 같은 조직의 변화를 Fig.5의 (b)와 (c)에서 보여주고 있다.

따라서 가속냉각은 금속학적인 측면에서 (1) 강재의 조직을 미세화 시켜 주고 (2) pearlite의 band상을 없애 주면서 (3) ferrite와 bainite의 복합조직을 얻게 하여 주는 효과가 있다. Fig.5는 냉각속도가 증가함에 따라 조직이 미세화되면서 제2상(pearlite 또는 bainite)이 더욱 미세하게 분산되어 존재함을 잘 보여 주고 있다.

기계적 성질의 관점

Fig.5에서 보여주는 조직의 미세화 및 상의 변화는 기계적 성질의 변화를 가져오는데 이를 Fig.6에서 보여주고 있다. 이 그림에서 보면 냉각속도가 증가함에 따라 강도는 증가되는 반면, 이에 따른 인성의 저하는 볼 수가 없다. 일반적으로 재료의 강도가 증가하면 인성이 감소하게 되는데 Fig.6에서 본 가속냉각은 인성의 저하 없이도 강도를 향상시키고 있음을 보여준다. 이와 같이 일반적인 개념을 벗어난 가속냉각의 효과는 가속냉각에 의한 조직의 변화를 바탕으로 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 가속냉각에 의한 강도의 향상은 그에 의한 조직의 미세화, bainite 체적분율의 증가, 고용강화 등에 기인함을 쉽게 알 수 있다. 그러나 인성의 측면을 보면 조직의 미세화는 인성의 향상을, 그 외에 강도에 기여하는 인자는 모두 인성을 저하시키는 요인이 되므로 그에 대한 설명이 쉽지 않다. 단지 Fig.6에서 보여 주고 있는 결과를 토대로 추측하여 보면 이들의 영향이 합하여져 서로 상쇄되는 것이라 생각된다. 따라서 냉각속도는 인성의 저하만 없다면 최대 강도를 얻기 위하여 증가시킬 수 있겠지만 실제로 있어서는 한계

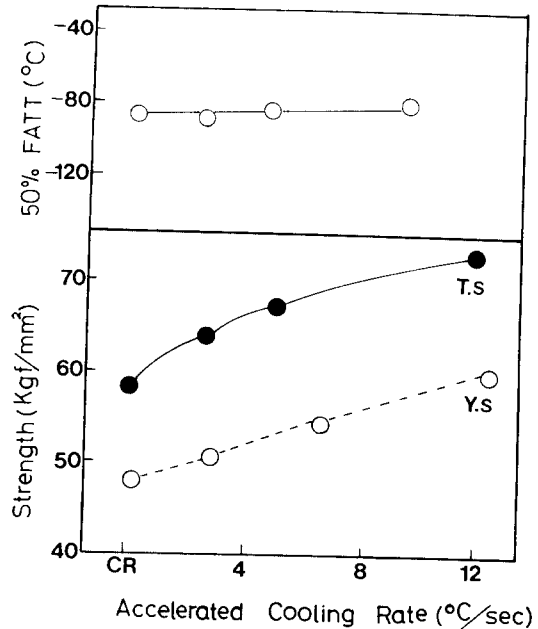


Fig.6. Effect of cooling rate on strength and toughness. 5)

가 있는데 이는 냉각속도를 증가시키기에 따라 강재를 균일하게 냉각시키기가 어렵기 때문이다. 일반적으로 사용되어지고 있는 냉각속도는, 화학성분에 따라 다르겠지만, 약 10°C/sec 정도이다.

기계적 성질을 좌우하는 인자로서는 냉각속도 이외에도, Fig.4에서 보듯이, Ts(가속냉각이 시작하는 온도) 및 Tf(가속냉각이 끝나는 온도) 등이 있다. Ts는 가속 냉각의 효과를 충분히 얻기 위하여 Ar3 온도 이상이어야 한다. 따라서 가속냉각법을 적용할 때는 Fig.3의 (c)에서 3번째 압연에 해당하는 two-phase rolling을 적용할 수 없게 된다. Tf는 낮을수록 강도의 향상을 가져오지만 너무 낮으면 다량의 low-temperature product가 생성되어 인성의 저하를 가져오므로 일반적으로 500°C 정도로 규정되어지고 있다. Tf에 대한 규정은 균일한 냉각속도를 얻기 위하여도 필수적인 것으로 이에 대해서는 공학적인 관점에 대해 기술한 다음 장에서 다시 논하기로 한다.

용접성 측면

가속냉각에 의한 강도의 향상은 그 증가폭이 탄소당량(CE)가 높ی짐에 따라 더욱 커짐을 Fig.7에서 알 수 있다. 따라서 가속냉각을 이용하면 특히 고강력강에서 CE를 크게 절감시킬 수 있다는 결론에도 달게 된다. 이를 보다 확실시키기 위하여 제조과정

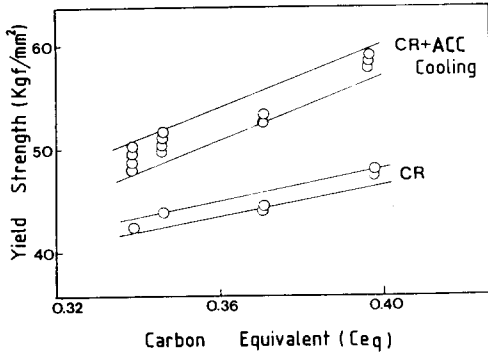


Fig. 7. Increase of yield strength with carbon equivalent in the controlled rolled and the accelerated cooled steels. ⁵⁾

에 따른 50kg/mm²급 강재의 CE를 살펴보면 다음과 같다.

제조방법	탄소당량(CE)
불림처리	0.38-0.43
제어압연(TMCP)방법	0.34-0.38
제어압연 + 가속냉각(TMCP)방법	0.30-0.36

가속 냉각법(ACC)에 의한 CE의 감소는 용접부에서의 저온균열에 대한 민감성을 감소시키고, 필요 예열온도를 낮출 수 있거나 생략할 수 있게 해주는 등 강재의 용접성을 전반적으로 향상시켜 제작비를 절감시킬 수 있게 하여 준다. 또한 저온균열에 대한 저항성의 증가는 short bead에 대한 제한이나 용접봉에 함유된 수소 함량에 대한 제한 등을 크게 완화시킬 수 있도록 하여 준다. 이외에도 CE의 감소로 대입열 용접을 가능케 하여주며, 제2상의 분산으로 수소 유기균열(HIC)에 대한 민감도를 감소시켜 준다. ⁶⁾ 이와 같은 제반성질의 향상으로 인하여 fabricator가 가속냉각된 강재를 선호하게 되는 것은 당연한 귀결이라 하겠다.

공학적인 관점

위에서 기술한 가속냉각법은 TMCP의 한 방법으로 제어압연과 함께 연구되어 그 우수성은 잘 알려져 있었으나 그 실용화면에서는 제어압연 보다 10여년 후인 1980년부터 상업적 제품이 생산되었다. 이는 가속냉각법을 압연공정중 채택하여 실용화하는 데는 다음과 같은 두 가지 문제점이 있었기 때문이다.

- (1) CR+가속냉각법에 대한 신뢰성 결여
- (2) 가속냉각을 위한 system 개발 첫번째 문제는

CR 강재가 생산되어 수년간 사용되면서 fabricator 측으로부터 호응을 받아 대중화되면서 해결의 실마리를 찾았다. 이에 steel maker는 TMCP방법 자체에 대하여 자신감을 갖게 되었고, 이와 동시에 fabricator 측은 고장력강의 일반화와 함께 기존의 CR강재보다 용접성이 좋은 강재를 요구하고 나섬에 따라 steel maker는 가속냉각법의 실용화를 추진하게 되었다. 그러나 이를 위한 공학적인 측면의 문제점들, 즉 가속냉각을 위한 system 개발, 즉 대형판재를 가속냉각시킬 수 있는 장치를 개발하여 정상가동한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니었다. 우선 가속냉각system이 갖추어야 할 필요조건들을 열거하여 보면 다음과 같은 것들이 있다. (1) 강판 전체가, 즉 판의 상단부와 하단부, 폭방향의 중앙부와 양단부 및 길이 방향으로의 양단부 등이 균일하게 냉각되어야 하며, (2) 가속냉각에 의하여 필연적으로 생기는 잔류응력 및 변형을 최소화하여야 하며 (3) 강재의 기계적 성질에 절대적인 영향을 미치는 냉각속도, 냉각개시온도 및 종료온도를 정확히 조절할 수 있어야 한다.

Steel maker가 위에서 열거한 모든 요구조건들을 commercial scale에서 충분히 충족시킬 수 있는 장치를 개발한다는 것은 공학적 측면에서 극히 어려운 과제였다. 냉각의 균일성만을 예로 들더라도, 압연기를 빠져나온 강판자체가 판재의 폭 방향으로 어느 정도의 온도 편차를 가지고 있어 균일한 냉각속도를 얻기 어려운 데다가, plate의 bottom surface를 흘러 내리면서 edge부분의 냉각을 가속시킴을 감안할 때 전체를 균일하게 냉각시킨다는 것이 얼마나 어려운 문제인가를 쉽게 이해할 수 있다. 이와 같은 문제점들은 냉각속도를 증가시키고자 하면 할수록 그 해결이 더욱 어려워질 것이라는 것도 쉽게 유추할 수 있다. 이러한 어려움에도 불구하고, 강재의 냉각이 균일하지 못하면 조직의 불균일에 따른 재질의 변화가 따르게 되고, 냉각 후 판재가 휘게 되거나, 휘지는 않더라도 잔류응력이 남아서 제품의 제작단계에 커다란 문제를 야기시키게 되므로 균일한 냉각을 얻을 수 있는 장치 개발이 무엇보다도 선행되어야 하였다. 따라서 일본의 각 steel maker는 기존의 압연공장에 설치 가능하면서도 가장 균일한 냉각을 얻을 수 있다고 생각하는 가속냉각system을 독자적으로 개발하여(Table 2에 보여주는 바와 같이) 각 회사마다 제각기 특이한 명칭을 이용하여 부르게 되었다. 이를 보면 같은 목적을 위해서도 각각의 system은 그 세부사항에 있어서 다음과 같은 커다란 차이가 있는

Table 2. Accelerated Cooling Equipment in Japan(7)

Company		NSC	NKK	KSC	SMI	KSL
Name		CLC	OLAC	MACS	DAC-1	KCL
Type		progressive closed	simultaneous open	simultaneous open	progressive open	simultaneous open
Dimension (m)		4.7×19.8	4.5×44	5.35×40	4.7×27	4.7×39.1
Max. Water (T/min)		190	140	200	135	195
Zozzle	Top	slit jet or flat spray	laminar	rod like nozzle	slit laminar	jet or pipe laminar
	Bottom	ditto	spray	jet nozzle	spray	spray
Edge Mask		top & bottom	top	top	top	top
Distance From Finishing Mill(m)		79.8	26	19	25	53
Location		after HL*	before HL	before HL	before HL	before HL
Cooling Rate For 25mmt (°C/S)		3-35	3-10	4-14	5-13	3-20
Direct Quench		possible	available in OLAC- II	separate equipment after MACS	separate equipment after DAC-1	possible

HL* : Hot Leveller

것을 알 수 있다. (1) simultaneous cooling vs. progressive cooling; progressive cooling type는 NSC의 CLC 및 SMI의 DAC에서 보는 바와 같이 냉각 system의 길이가 continuous type에 비해 매우 짧은 것이 특징이다. (2) nozzle의 형태; 상부와 하부의 냉각효과가 틀림으로 해서 냉각수를 공급하는 nozzle 자체도 각 system마다 다르다. (3) 냉각 system과 hot lever의 상대적 위치 및 (4) Direct quenching 설비의 유무 등에서도 차이가 있다. 냉각 속도면에서 보면, 가장 먼저 설치된 NKK의 OLAC System(1980년 Fukuyama Works에 설치)이 다른 system들(1983년 설치)에 비하여 늦을 뿐만 아니라 Direct Quenching도 할 수 없게 되어 있는데, 이를 보완하여 NKK에서는 1985년에 Keihin Works에 OLAC-II라 하여 냉각능력(max, cooling water 190 T/min.)을 기존의 OLAC보다 크게 하여 설치 완료 하였다. 또한 system마다 차이는 있지만 균일한 냉각 및 distortion을 최소화하기 위하여 computer control을 최대로 활용하여 강판 상하의 냉각수량을 조절하고, edge masking장치를 붙여서 plate edge부의 과냉각을 방지하며, plate의 길이방향으로의 냉각 수량을 조절하여 길이방향의 온도편차도 최대로 줄이고 있다. 그리고 모든 system에 있어서 냉각 종료

온도, Tf, 를 500°C 정도로 하고 있는데 이는 앞에서 설명했듯이 재질의 향상면에서도 중요하지만 온도편차를 최대한 줄일 수 있다는 점에서 특히 중요하다. 500°C 이하의 온도에서는 냉각기구가 틀려져서 기존의 냉각장치로는 온도편차가 심하게 나타난다고 알려지고 있다. 따라서 이와 같은 모든 사항을 적절히 조절하기 위해서는, computer control system이 절대적으로 필요하며, 이에 무수한 data를 입력시켜서, plate마다 혹은 때 heat마다에 따른 성분 변화를 냉각과정에서 냉각속도 및 냉각 종료온도, Tf, 를 조절함으로써 최종 제품에서는 오히려 균일한 재질을 갖도록 시도하고 있다.

3. TMCP강의 사용상의 유의점

지금까지 TMCP강재, 특히 가속 냉각법에 의한 강재가 우수한 기계적 성질 및 응집성에 대하여는 하였는데, 이러한 제반 성질의 향상에도 불구하고 fabricator가 가속냉각법으로 생산된 강재를 사용할 때 주의해야 할 사항들이 있다. 이러한 사항들은 가속냉각이라는 방법을 사용함으로써 생기는 사항으로써 기존의 Normalized 또는 CR 강재에서는 볼 수 없었던 사항들이기 때문에 주의를 요한다.

(a) Hot Forming

가속냉각에 의한 강도의 증가가 2-3항에서도 기술한 바와 같이 불안정한 상(bainite 및 hardened ferrite)의 생성에 기인하므로, 가속냉각된 강재를 가열하게 되면 조직이 안정상으로 바뀌면서 기계적 성질의 변화를 초래한다. 따라서 Ac3이상으로 가열한 후 공기중에서 냉각되면 이는 바로 normalized강재가 되므로, 강도는 전적으로 합금 원소량에 의존하고, phase에 의하여 향상된 강도만큼의 감소가 일어난다. 이로 인한 강도의 저하로 Hot forming 후에는 재료의 강도를 맞추기가 불가능하므로 Hot forming process는 결코 사용할 수 없다. 단 판재의 변형을 잡기 위하여 사용하는 선상가열은 단시간의 가열이고 냉각속도가 무척 빠르므로 이의 사용은 허용된다.

(b) 열처리후의 연화현상

가속냉각은 재료의 조직을 불안정하게 한 것이므로, 응력이완 열처리 또는 용접 후열처리와 같은 열처리를 행하면 모재의 상이 안정화되면서 강도가 감소하게 된다. 가속냉각된 강재(ACC강재)를 620°C에

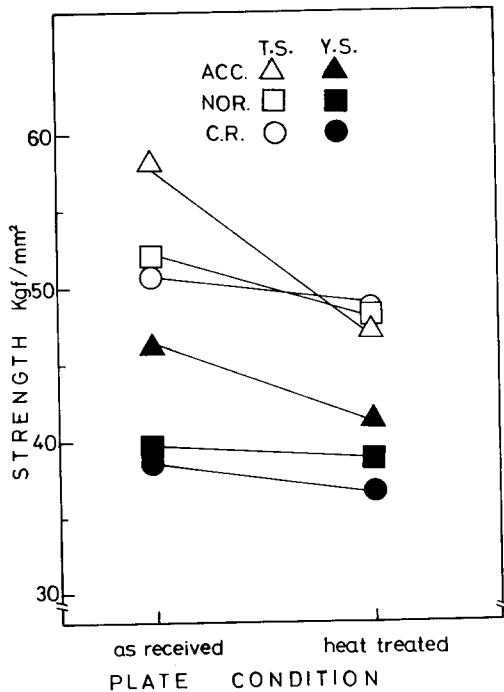


Fig. 8. Effect of plate making process on the strength variation occurred after the heat treatment at 620°C for 2 hrs.

서 2시간 열처리한 후 일어난 강도 감소 현상을 Fig. 8에서 기존의 강재와 비교하여 잘 보여 주고 있다. Normalized나 CR강재도 열처리 후에 강도 감소가 조금은 있지만 감소폭이 작아서 감소 후에도 material specification을 만족하고 있지만, ACC 강재는 강도, 특히 인장강도의 감소가 극심하여 열처리 후에는 재료의 요구조건을 만족시키지 못하고 있다. 따라서 제작 도중에 열처리가 요구되는 부위에 가속냉각된 강재를 사용할 때에는 열처리 온도를 낮게 조절을 하던가, 강도감소를 예측하여 이에 해당하는 강도를 미리 갖도록 steel maker측에 요구하여야 한다. 이러한 요구에 따라 steel maker는 열처리 후 강도감소를 줄이기 위하여 (1) 합금원소의 첨가를 증가시키면서 Tf(냉각 종료온도)를 높게 조정하는 방법을 적용하던가 (2) ACC process 후에 뜨임처리를 하기도 하므로 열처리가 요구되는 강재에 대하여서는 사전에 steel maker측과 이 사항에 대해 충분한 협의를 거쳐야 할 것이다.

(c) 용접 열영향부의 연화현상

실제 용접부의 HAZ에서는 용접입열에 의한 열영향을 받게 되므로 위의 (a) 및 (b)에서 언급한 바와 같은 이유로 연화현상이 일어난다. 이와 같은 연화현상은 HAZ에서의 경도치 감소로 나타나는데 이를 Fig. 9에 Normalized 및 CR강재의 경도변화와 비교하

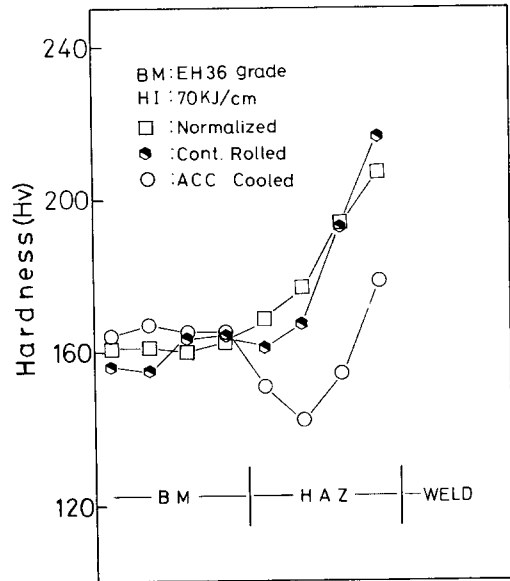


Fig. 9. Effect of plate making process on the HAZ hardness.

여 보여주고 있다. Normalized 및 CR 강재는 HAZ에서 경도치 감소를 보여주지 않는 반면 가속냉각된 강재는 HAZ에서 최초의 경도치를 보여 줌으로써 이 부위의 강도가 모재의 강도보다 저하하고 있음을 보여주고 있다. 이를 확인하기 위하여 각각의 강재를 용접하여 용접부에 대하여 transverse 방향으로 인장 실험한 결과를 모재의 성결과 비교하여 Fig.10에 보여주고 있다. 파단 위치에 있어서도 Normalized 강재는 모재에서 파단이 일어난 반면 가속냉각된 강재는

파단이 HAZ 부근에서 일어나고 있어서 용접부의 강도 감소를 고려하여 specification에 규정된 강도이상으로 상당히 높은 강도를 갖도록 생산되어지고 있다. 그러나 HAZ에서의 연화는 입열량이 클수록 또한 시험 시편의 폭이 작을수록 현저히 나타나므로 이에 대한 검토도 미리 해 두어야 한다.

이와 같이 연화된 용접부에 PWHT를 행하면, (b)항에서 기술한 바와 같이 모재의 강도도 저하되므로 전체 용접부의 강도는 더욱 저하하게 된다(Fig.10). 따라서 TMCP 강재에 대한 PWHT는 되도록 피해야 하며, PWHT가 요구될 경우에는 사전에 이에 대한 test가 선행되어야 할 것이다.

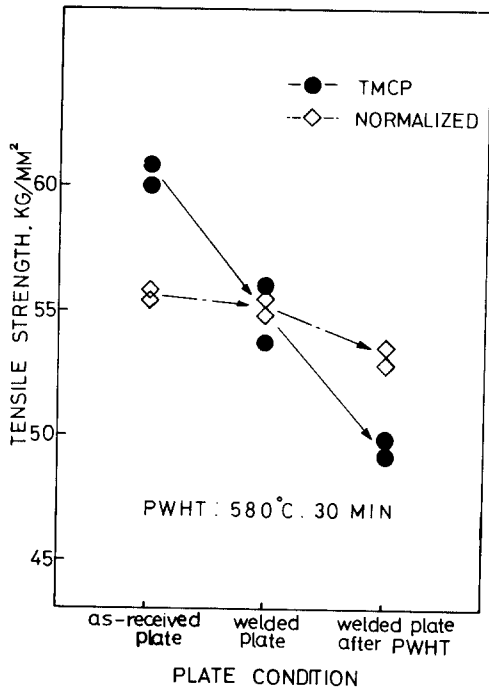


Fig.10. Effect of plate making process on the strength of plates in various condition.

(d) 강판의 절단후 수반되는 변형문제

강재의 냉각을 아무리 균일하게 한다고 하여도 엄밀한 의미에서, 정도의 차이는 있겠으나, 불균일성은 결코 배제할 수 없다. 이러한 불균일 냉각은 강재의 flatness를 해치게 되므로 이를 교정하기 위하여 모든 가속냉각 system에는 Table 2에서 보여 주는 바와 같이 Hot Levellr(HL)를 설치하고 있다. 이러한 냉각 및 교정의 과정을 거치는 동안 강판내에는 잔류응력(Residual stress)이 남게 되는데, 이로 인하여 강판을 압연방향으로 절단하면 Fig.11에서 보여주는 바와 같이 longitudinal member가 잔류응력의 이완과 함께 휘게 된다. 이때 최대 휘는양을 Fig.11-(b)에서 보여주는 바와 같이 길이로 표시하여 Camber, δ , 라 부르고 있다.

이와 같은 camber는 절단부위에 존재했던 잔류응력이 이완되면서 그 차이로, 즉 $\sigma_1 - \sigma_2$, 인하여 생기게 된다. 가속냉각 강재에서 생길 수 있는 camber 양에 대한 정확한 data는 알 수 없지만, 위의 식에

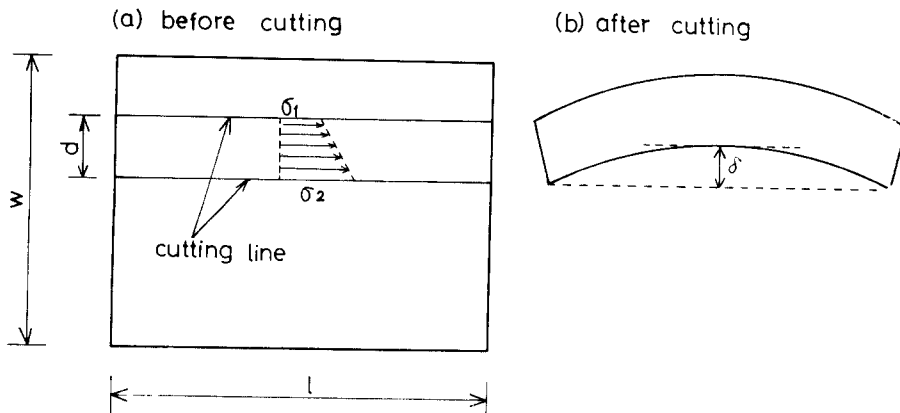


Fig.11. Schematic drawing of camber resulted from longitudinal cutting of accelerated cooled steel plate.

서 보듯이 잔류응력의 차가 클수록, 다시 말하면 냉각속도의 불균일성이 클수록, camber가 커지게 되는 것은 확실하다. 이러한 camber는 fabricator에게는 극히 중요한 문제이지만 data 정립이 특히 안된 분야로써 이에 대한 연구 및 평가는 조속히 진행되어야 할 것이다.

4. TMCP강의 적용

지금까지 기술한 바와 같이 TMCP steel은 사용시 필요한 유의사항에 주의만 하면 그 자체가 가지는 장점으로 인하여 fabricator에게는 커다란 원가절감의 효과를 주므로 그 사용이 점차 증대되어가고 있는데, 여기서는 지금까지의 적용사례를 보아가면서 규격화 동향에 대해 소개하고자 한다.

1) 선박에의 적용

선체 중량의 감소는 연료비의 절감과 함께 적재화물 중량의 증가 등으로 경제성을 현저히 향상시키는 효과가 있기 때문에 선체구조 부재로서 50kg급 고장력강의 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 선박용 50kg급 강재는 항복강도가 32 및 36kg/mm²의 2종이 있는데, 현재는 주로 32kg급의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 선체구조 부재로 사용되는 재료는 IACS(국제 선급 협회 연합)의 통일규격에 기초를 둔 주요 선급협회의 승인을 얻은 것에 한정되기 때문에 TMCP강의 실용화를 위하여 최우선적으로 각 선급의 승인을 취득하는 일이었다. 이에 따라 일본의 각 Mill maker도 일본 조선연구 SR193 위원회의 "신제조법에 의한 50kg급 고장력강의 유효 이용에 관한 연구"를 기초로 TMCP강의 일반 선박에의 실용화를 본격화하여 1983년도부터 각 선급에서의 승인을 독하게 되었다. 이후 TMCP강재의 사용은 급격히 증가하여, 일본의 경우를 볼 때, 1984년 후반기에 이르러 벌써 EH32 및 EH36 강재가 전체 사용량의 50%를 넘고 있으며, EH36 강재의 경우는 그 증가속도가 매우 빠르게 진행되고 있다. 이를 볼 때, 선급 승인 후 선박에 있어서 TMCP강의 적용이 광범위하게 확대되고 있음을 알 수 있다. 더구나 최근에는 Yield strength가 40kg/mm² 강재의 실용화가 시도되고 다시 42kg/mm² 강으로 확대되어 가는 경향이 있다. 이에 더불어 TMCP강은 이미 LPG선 및 쇄빙지원선에 적용되었으며 이후 쇄빙선에도 적용이 기대되고 있다.

2) 해양구조물에의 적용

TMCP강의 우수한 용접성 및 용접부 인성이 종래 강과 비교하여 충분히 인식되고 있음에도 불구하고 해양구조물에서의 TMCP강의 적용은 선박의 경우와는 달리 급진진을 보여주지 못하고 있다. 이것은 보수성이 강한 유럽, 특히 북해 연안에서의 Project에 TMCP강을 사용한 예가 단 1건(Supper CIDS, NKK manufactured) 밖에 되지 않는 것만 보더라도 분명히 알 수 있다. 그러나 최근 들어서 TMCP강을 고정되어 사용되는 해양구조물에 적용하려는 움직임이 미국에서부터 본격화되고 있으며 그와 병행하여 규격을 새로이 정하려는 협회가 API에서 진행되어지고 있다고 전한다. 이를 보면 기존의 API-2H 규격에 대하여 동일강도 및 동일 Grade를 갖는 TMCP강을 API-2Z 규격으로 구별하여 정하려는 움직임이다. 규격 원안에서는 CTOD 특성에 의한 재질의 판질이 매우 중시되고 있음이 특이한 사항이다. 영국에서도 점차 TMCP강의 채택 움직임이 일어나고 있는데, 그들의 경우는 적용성 판정을 스스로 행한 실험에 의존하고 있을 정도로 극히 신중한 태도로 임하고 있다. 그러나 이러한 구미제국의 망설임에도 불구하고 조만간 TMCP강이 종래의 불림치리한 강재를 대체해 나갈 것이라는 것을 예상하는 것은 어렵지 않다.

3) 현대 중공업의 사용실적 및 전망

본 현대 중공업에서는 85년 초부터 더욱 엄밀히 말하면 85년초 시작된 San Miguel Project에 처음 TMCP강재를 사용하기 시작하여 이후 선체 외판용 고장력강에 한하여 소량씩 사용하고 있는 실정이고, 현재 진행중인 Exxon project에는 API-2H Gr. 50 강재 전량(7000 ton)이 TMCP강으로 공급되고 있다. 따라서 현대 중공업의 경우는 TMCP강재를 선박 및 해양구조물에 거의 동시에 사용하게 되는 사례를 남겼다. 이러한 사용 과정에서 본 연구소에서도 독자적인 연구를 통하여 TMCP강재의 우수성을 체험하게 되었고, 이로 인하여 생산성 향상측면에서 TMCP 강재의 확대 적용을 추구하는 입장이다. 그러나 여기에는 몇 가지 문제가 있는데, 첫번째 문제는 위에서 언급한 바와 같이 TMCP강재의 적용에 보수적인 경향이, 특히 해양구조물의 경우, 심하다는 것이다. 이와 같은 경향은 점차 해소되어 가고 있지만 아직 극히 미미한 정도에 그치고 있다. 이러한 시점에서 EXXON과 NSC는 기존의 Normalized 강재와 NSC의 TMCP 강재(CLC 강재)를 비교 검토하여 TMCP 강재

의 우수성을 인정하여 현재 제작중인 2기의 EXXON jacket에 사용되는 API-2H Gr. 50 전량을 TMCP강재를 사용하기로 결정한 사실은 TMCP강재의 확대 적용에 커다란 계기가 될 것으로 보인다. 두번째 문제점은 국내적인 문제점으로써 현재 TMCP 강재는 일본의 5대 Steel Maker의 거의 독점 생산품목으로 국내 유일의 후관 Steel Maker인 POSCO가 아직 생산 체제를 갖추지 못하고 있다는 점이다. 따라서 일본 Steel Maker들이 계속 독점 생산을 유지할 경우(현재도 이로 인하여 세계적으로 주목과 질시를 함께 받고 있는 입장이다), TMCP강재의 확대 적용은 결국 일본 강재의 수입증가를 가져와 국산화율을 저하시키는 결과를 가져오므로 바람직하지 못하다. 이의 유일한 해결책으로써는 POSCO가 하루빨리 TMCP강재를 생산할 수 있는 설비와 know-how를 갖추어야 하는데, 이에 대한 POSCO측의 계획은 1988년에 생산을 목표로 연구 및 생산 설비 도입을 추진하고 있는 상황이다.

결론적으로 TMCP강의 확대 적용을 선박과 해양 구조물로 나누어 생각하면 선박의 경우는 확대 적용에 국내적인 문제가 있고 해양구조물의 측면에서는 국내적인 문제가 함께 있어 현 상태에서는 어려움이 있으나 TMCP강재의 사용 실적이 증가하고, 그에 대한 호의적인 평가가 일반화 되어 가면서 기존의 Normalized 강재를 대체하여 확대 적용되어 나갈 것이라는 예상은 틀림이 없을 것이다. 이러한 예상을 보다 확실히 뒷받침해 주는 사실은 일본 Steel Maker들이 TMCP강재의 생산 능력을 증가시켜 나가고 있다는 것이다. 예를 들면 NKK의 경우 1980년에 Fukuyama Works에 OLAC system을 설치하여 TMCP 강재를 생산하기 시작하여 1985년에는 Keihim Works에 보다 진보된 OLAC-II system을 설치함으로써 TMCP강재의 생산을 증가시키고 있다. 이러한 TMCP 강재 생산 설비의 증설 및 POSCO와 같은 다른 Steel Maker들의 생산계획 등은 TMCP강재 사용이 앞으로 계속 증가할 것이라는 예상을 그대로 반영하고 있는 것이다.

5. 결 론

최근 개발된 구조용강을 대표하는 TMCP강재는 가속냉각법의 도입으로 그 적용범위가 과거 2-3년 동안에 거의 모든 구조용 강재에 확산되었다. 이와 같은 확대 적용에는 생산비를 절감하려는 Steel Maker의 노력과 가속 냉각처리된 강재에 대한 fabricator측의 긍정적인 반응이 크게 작용했는데, 이는 이 강재가 같은 우수한 기계적 성질 및 용접성에 기인하고 있다. 그러나 fabricator측은 가속냉각된 강재에 대해 익숙치 않으므로 가속냉각된 강재와 기존의 강재에 대한 차이점을 충분히 인식하고, 사용시 예상되는 문제점에 대해서는 강재 주문시 Steel Maker측과 충분한 토의를 거친 후 구매하는게 바람직하다고 하겠다. 이로 인하여서만이 fabricator측은 가속냉각된 강재의 우수성을 백분 활용할 수 있을 뿐만 아니라 제작시 야기될 문제를 미연에 방지할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. H. Suzuki: Trans. ISIJ, Vol. 23, 1983, 189.
2. H. I. Mc Henry: Scientific Bulletin, Vol. 9, No. 3, 1984, 12.
3. L. J. Cuddy: Met. Trans, A, Vol. 12A, 1981, 1313.
4. J. S. Kim, J. W. Park and I. G. Moon: J. of Korean Inst. of Metals Vol. 23, No. 6, 1985, 573.
5. K. Tsukada, T. Ohkita, C. Ouchi, T. Nagamine, K. Hirabe and K. Yako: Nippon Kokan Technical Report Overseas No. 35, 1982.
6. H. Tamehiro, T. Taeda, S. Matsuda, K. Yamamoto and N. Okumura Trans. ISJI, Vol. 25, 1985, 982
7. I. Kozasu: 1985 Conference on accelerate cooling of steels, Aug. 19-21, 1985, Pittsburgh, PA, Sponsored by TMS.