

선박용 강재로서의 TMCP강의 경제성

김 회 진*

Economic Consideration of TMCP Steel for Shipbuilding

H. J. Kim*

I. TMCP강의 개요

TMCP란 Thermo-Mechanical Controlled Process의 약자로서, normalizing 등의 열처리재에 상응되는 기계적성질을 후속 열처리 공정없이 압연상태에서 얻고자 하여 최근 개발된 일종의 제어압연 공정이다. 그런데 TMCP에 대한 정의는 아직 명확하게 정립되어 있지 않는 상태이며, 단지 다음과 같은 제조 공정들의 일부 조합이라고 통용되고 있다.

- (a) 낮은 slab 재가열 온도(950~1200℃)
- (b) 재결정이 일어나지 않는 austenite 온도영역에서의 압연
- (c) $(\alpha + \gamma)$ 의 이상온도영역에서의 압연
- (d) 변태온도 영역에서의 가속냉각

TMCP는 (d)항의 가속냉각 공정의 적용여부에 따라 가속냉각형 TMCP와 비가속냉각형 TMCP로 대별되고 있다. 이중 선급용 강재로써 특히 주목을 받고 있는 것은 가속냉각형 TMCP로써 본해설에서는 이를 TMCP라 칭하기로 하며, 이에 의해 생산된 강재를 TMCP강이라하고 그외의 다른 공정으로 생산된 강을 기존강재라 칭하고자 한다.

Fig. 1은 가속냉각형 TMCP를 도식적으로 보여주고 있는데, TMCP는 austenite 온도영역에서의 제어압연(controlled rolling), 변태온도영역($Ar_3 \sim Ar_1$)에서의 가속냉각(accelerated cooling), 그리고 자연냉각(air cooling)과정으로 구성되어 있다. 따라서 TMCP는 기존의 제어 압연공정에 가속냉각과정을 단순하게 추가한 것이라고 할 수 있으며, 가속냉각 과정에서의 냉각속도는 냉각장치에 따라 정도의 차이는 있겠지만 20mm 두께의 강재를 기준으로 약 4℃~20℃/sec. 정도이다. 이와 같은 TMCP는 각 제철소마다 그들의 가속냉각장치에 고유한 이름을 붙여 Table 1에서 보여주는 바와 같이 매우 다양하게 명명되고 있다.

TMCP강을 기존강재와 비교하여 보면 여러가지 장점이 있는데, 이를 크게 강재 maker 측면과 이를 사용하는 제작자 측면에서 살펴보면, (1) 강재 maker 측으로는 제조공정의 단순화, 즉 열처리공정에 의해 생산하던 강재를 단순한 압연상태로 생산할수 있게 되어 production lead time을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 생산원가를 저하할 수 있었고, (2) 제작자 측에서는 용접성이 향상된 강재를 사용함으로써 제작원가를 절감할 수 있는 기회가 제공되었다는 것이다. 특히 조선업계가

* 정회원, 현대중공업(주), 종합연구소

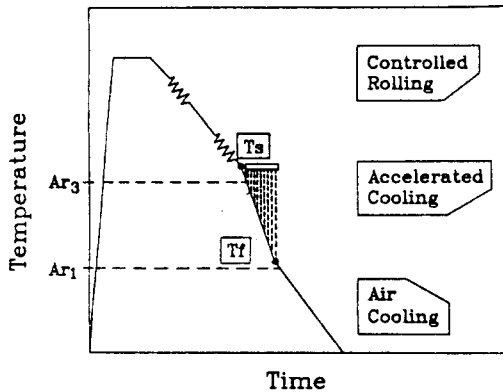


Fig. 1 Schematic drawing of accelerated cooled type TMCP.

Table 1 Various accelerated cooling processes

| Steel company | Process name |
|---------------|--|
| NSC | CLC(Continuous on-Line Control) |
| KKK | OLAC(On-Line Accelerated Cooling) |
| Kawasaki | MACS(Multipurpose Accelerated Cooling System) |
| Kobe | KCL(Kobe steel Controlled Rolling and Accelerated Cooling) |
| Sumitomo | DAC(Dynamic Accelerated Cooling) |
| POSCO | PILAC(Posco in-Line Accelerated Cooling) |

TMCP강에 관심을 가지게 된 것은 TMCP강이 기존강재보다 용접성이 매우 우수하다는 사실에 기인하는데, TMCP강의 우수한 용접성을 이해하기 위해서는 용접성이 강재의 화학조성, 예컨대 탄소당량에 크게 의존된다는 사실과, 강재의 화학조성이 강도에 미치는 영향을 제조 공정 별로 이해할 필요가 있다.

기존 강재의 강도는 주로 합금원소의 첨가량에 의존되므로 강도를 높이기 위해서는 보다 많은 합금원소의 첨가가 필요하게 되는데, 이와 같은 합금원소의 첨가는 강재의 탄소당량(carbon equivalent, CE)을 높여서 용접성을 저하시키는 결과를 초래하게 된다. 강재의 강도증가에 따른 탄소당량(CE)의 변화를 선급용 E grade 강재(-40℃에서 충격 인성치가 요구되는 강재)에 대하여 도표화한 것이 Table 2이다. Table 2에서 보여

Table 2 Relationship between carbon equivalent and strength of normalized(conventional) steel plate

| Steel Grade | Heat Treatment | Yield strength min.(kg/mm ²) | Carbon Equivalent* |
|-------------|----------------|--|--------------------|
| E | Normalizing | 24 | 0.27 |
| EH32 | Normalizing | 32 | 0.37 |
| EH36 | Normalizing | 36 | 0.41 |

* Typical value of CE.(IIW)

주듯이, 강재의 항복강도가 24kg/mm²에서 32 및 36kg/mm²로 점차 증가됨에 따라 탄소당량은 0.27에서 0.37 및 0.41로 증가하고 있어서 기존 선급용 강재는 강도가 증가할 수록 용접성은 저하될 수 밖에 없는 강재라고 할 수 있다.

그러나 TMCP강의 경우에는 강도상승이 가속냉각으로 야기되는 기지조직의 강화에 의존하기 때문에, 합금원소 첨가량이 적은 강재일지라도 가속냉각 과정을 거치게 되면 높은 강도를 얻을 수 있게 된다. Fig. 2는 인장강도 50kg/mm²급 고장력강의 탄소당량(CE)을 제조공정에 따라 비교한 것으로써, 기존의 normalizing열처리나 제어압연에 의하여 생산된 강재의 탄소당량이 약 0.4~0.42 수준인데 반하여 가속냉각형 TMCP(AcC TMCP)로 생산된 강재는 약 0.27~0.34 정도이다. 이 수치는 Table 1에서 보듯이 연강(E grade)의 탄소당량치와 비교될 수 있을 정도의 낮은 값이다. 즉, TMCP는 연강에 가까운 화학조성으로 50kg/mm²급의 고장력강을 생산할 수 있는 공정으로써 고장력강의 용접성을 향상시키는데 크게 기여한 공정이라 하겠다.

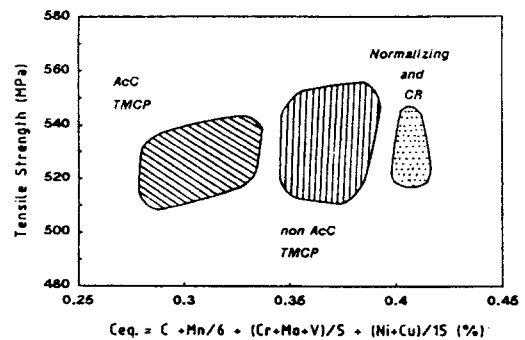


Fig. 2 Effect of manufacturing process on carbon equivalent of steel plate having 50kg/mm² tensile strength.

2. 해설 배경

최근 국내의 중공업계 및 철강업계에서 TMCP강에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이는 국내에서도 1989년 하반기부터에는 TMCP강의 상업적 생산 및 이의 사용이 가능해짐에 따라 TMCP강재를 실제 사용했을 때 예상되는 장·단점 등이 기존강재와 비교되어 여러 측면에서 비교되어지고 있기 때문이라 하겠다.

TMCP강 분야의 선두주자격인 日本의 경우에서 있어서는, 이미 1981년에 NKK의 OLAC system이 가동되어 TMCP강이 생산되기 시작하여 초기에는 line pipe용으로만 사용되다가 1983년에는 선급승인을 득하여 조선용 강재로써 적용되기 시작하였다. 그후 조선용 강재로써 TMCP강의 사용량은 급속히 증가되어 현재는 日本에서 사용되고 있는 조선용 고장력 강 전체가 모두 TMCP 강재로만 사용되어지고 있다고 한다. 한편 1985년경부터는 TMCP강이 해양구조물에도 적용되기 시작하여 그 우수성을 인정받았고, 최근에는 저온용 및 압력용기용 강재에 까지 그 적용이 시도되고 있다. 국내에서는 1984년경에 선급용 강재로써 일부 수입되어 drilling rig 및 barge선 건조에 사용되었고, 1985년도 이후에는 해양구조물용으로 사용되면서 이에 관한 평가 연구가 심도있게 수행되어 국내에서도 그 우수성을 인정받게 되었다.

이와 같이 TMCP강의 생산 및 적용이 국내·외에서 급속히 진행될 수 있었던 것은, 앞에서 언급한 바와 같이, TMCP강이 기존강재보다 용접성이 우수하여 수요가의 선호도가 높았기 때문이라고 생각되는데, 특히 조선업계에 TMCP강이 소개될 때는 그 우수한 용접성이 더욱 중점적으로 홍보되었다. 즉, 기존의 normalizing 열처리에 의해서 생산된 강이나 제어압연에 의해 생산된 강등과 비교하여 보면 새로 개발된 TMCP강은 용접성이 매우 우수함으로, 조선업계가 기존 강재를 TMCP강으로 대체·사용할 경우 생산성이 크게 향상될 수 있다는 것이 홍보의 주된 요점이었다. 그런데 이러한 홍보는 조선업계가 TMCP강을 사용하게 되면 선박건조 비용이 크게 절감될 수 있을 것이라는 내용으로 받아들여졌다.

그러나 선박 건조의 현실을 살펴보면, 위와 같은 인식이 꼭 합당하다고는 볼 수 없다는 것이 본

저자의 견지이다. 다시말해서 비록 TMCP강의 용접성이 우수하다고 할지라도, 선박건조에 있어서만은 TMCP강의 적용으로 생산성이 향상되는 바가 거의 없다는 것이며, 오히려 TMCP강이 가지는 문제점으로 인하여 생산 공정에 문제를 야기할 수 있기 때문에 TMCP강에 대한 기대치는 일반적인 평가에 의해 결정되기 보다는 용도에 따른 전문적인 평가가 필요하다는 것이다. 따라서 본 해설에서는 일반 선박 건조 목적으로 TMCP강이 사용되었을 때 TMCP강의 우수한 용접성이 실질적인 생산성 향상 및 원가절감에 어느 정도 기여할 수 있는가에 대해 기술하고자 한다.

3. 선박용 강재

일반 선급(ship classification societies)에서 선급용 강재(hull structural steel)로 규정하고 있는 강재들은 인장강도가 40kg/mm²급인 연강(mild steel)과 인장강도 50kg/mm²급인 고장력강(high tensile steel, HT steel)으로 대분되며, 고장력강은 다시 항복강도에 따라 32kg/mm²급과 36kg/mm²급으로 세분된다. 또한 선급용 강재들은 인성요구치에 따라 보다 세분되게 되는데, 연강은 A, B, D와 E급으로, 고장력강은 AH, DH, EH급으로 구분된다. 이들 강재에 요구되는 기계적 성질을 Table 3에 도표화 하였는데, 고장력강으로 구분된 AH급은 0°C에서, DH급은 -20°C에서, 그리고 EH급은 -40°C에서 3.5kg·m의 충격인성값이 요구된다. 그러므로 고장력강 중에서도 EH급이 가장 고급강이라 할 수 있으며, AH급은 가장 저급강이라 할 수 있다.

이상과 같이 선급용 강재는 강도 및 충격치 요구 정도에 따라 10여가지 등급으로 구분되어 있지만 실제 선박에 사용되는 주요강재는 시대적 요구 및 설계능력 등에 따라 변화되어 왔다. 즉 1970년대 초까지는 선급용 강재의 대부분이 연강이었는데 반하여 그 이후에는 선박의 경량화 및 대형화가 추진되면서 고장력강이 적용되기 시작하였다. 즉 석유파동 이후 선박에 대한 시대적 요구는 연료비가 적게드는 경제선의 제작이었으며, 이를 위한 방안의 하나로 추진된 사항이 바로 선박의 대형화 및 경량화이었다. 선박경량화를 위한 재료측면에서의 기여는 연강을 사용해던 부위를 고장력강으

Table 3 Various steel grades for hull structural steel designated by ABS

| Steel grade | Yield Strength (kg/mm ²) | Tensile Strength (kg/mm ²) | Impact Energy* (kg · m) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------|
| Ordinary strength Steel(Mild Steel) | A | 24 min. | None |
| | B | | 2.8 at 0°C |
| | D | | 2.8 at -10°C |
| | E | | 2.8 at -40°C |
| Higher-strength Steel(HT Steel) | AH32 | 32 min. | 3.5 at 0°C |
| | DH32 | | 3.5 at -20°C |
| | EH32 | | 3.5 at -40°C |
| | AH36 | 36 min. | 3.5 at 0°C |
| | DH36 | | 3.5 at -20°C |
| | EH36 | | 3.5 at -40°C |

* Minimum value required in thickness of 51mm and under

로 대체 적용함으로써 가능할 수 있었는데, 이러한 추세는 1980년대에 와서 보다 본격적으로 추진되었다. 현대중공업에서의 고장력강 사용 추세를 년도별로 살펴보면(Fig. 3), 1980년대 초기부터 사용하기 시작하였으며 그 사용량은 매년 증가하였으며, 1985년에 이르러서는 전체소요강재중 고장력강의 사용비율이 약 40%를 차지하게 되었다. 이러한 추세는 국내 모든 조선소에서도 비슷하게 진행되어 온 것으로 생각되는데, 이의 진행과정을 살펴보기 위하여 국내 조선 4사의 고장력강 사용 실적을 종합하여 Fig. 4에 도시하였다. 조선 4사의 경우에 있어서도 1985년에는 고장력강의 사용비율이 현대중공업의 경우와 유사하게 전체 사용강재의 약 40%정도였음을 보여주는데, 이는 이후에도 계속 증가하여 1988년에는 약 55%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

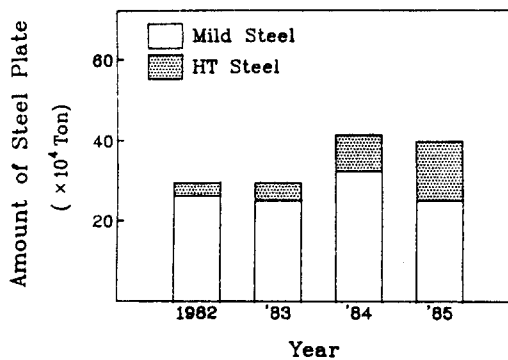


Fig. 3 Amount of steel plates used in Hyundai Heavy Industries Co. for shipbuilding.

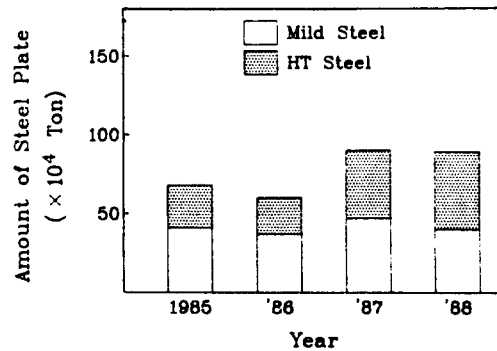


Fig. 4 Amount of steel plates used in the four big shipbuilders in Korea.

고장력강이 차지하는 비율은 특히 대형 선박에서 높은데, 최근에 건조된 200,000 DWT의 Bulk Carrier의 경우에는 약 65%에 이르고 있다. 본 선박에 사용된 강재를 보다 세분하여 보여주는 것이 Fig. 5와 Table 4인데, Fig. 5는 사용강재를 두께별로 도식화한 것이고, Table 4는 사용강재를 grade 별로 도표화 한 것이다.

먼저 Fig. 5에서 지적되어야 할 사항은 크게 두 가지인데, 첫째는 강재두께가 10~20mm인 강재가 전체 소요강재의 72%를 차지하고 있다는 사실이고, 둘째는 강판의 두께가 두꺼워질수록 고장력강이 차지하는 비율이 높아지고 있다는 사실이다. Table 4에서 주목되는 것은 본 선박 건조에 사용된 강재의 65.6%가 고장력강이며, 특히 AH36 grade 강재가 차지하는 비율은 전체 사용 강재의 57.3%일 뿐만 아니라, 전체 고장력 강재의 87%를 차지하고 있어서 선급용 강재의 1/3을 이루고 있다

는 사실이다. 이상과 같이 일반 선박 건조에 사용되는 고장력강은 AH, DH 및 EH로 구분되어 있지만, 실제 사용되는 강재는 그 대부분이 AH36 grade이고, 이 보다 고급강이라 할 수 있는 DH36 및 EH36 grade 강재는 전체 강재의 7% 정도로 극히 소량만이 사용되고 있다.

이와 같이 경향은 국내 조선 4사의 고장력강 사용 실적을 보여주고 있는 Table 5에서도 유사하

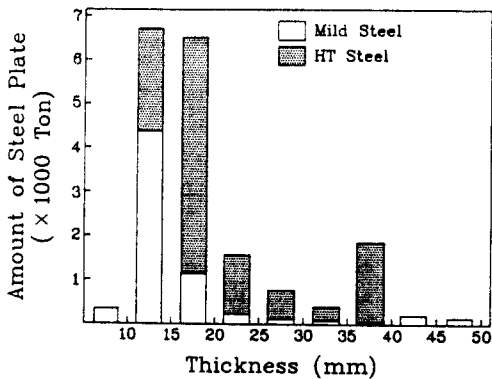


Fig. 5 Thickness classification of steel plates used for 200,000 DWT bulk carrier.

Table 4 Amount of steel plate used for 200,000 DWT Bulk Carrier

| Steel Grade | | Weight, ton(%) | |
|-------------|-----------|----------------|--------|
| Mild steel | A | 6310 | (33.9) |
| | B | 25 | (0.14) |
| | D | 22 | (0.12) |
| | E | 37 | (0.20) |
| | Sub total | 6394 | (34.4) |
| HT steel | AH32 | 236 | (1.27) |
| | AH36 | 10657 | (57.3) |
| | DH32 | 0 | (0.0) |
| | DH36 | 943 | (5.1) |
| | EH32 | 32 | (0.2) |
| | EH36 | 334 | (1.8) |
| Sub total | 12202 | (65.6) | |
| Total | | 18596 | (100) |

Table 5 Amount of high tensile steel plates used in 1988 by four big shipbuilding companies in Korea

| HT Grade | AH32 | AH36 | DH32 | DH36 | EH32 | EH36 | Total |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| weight (1000 ton) | 351 | 104 | 18 | 9 | 2 | 2 | 486 |
| percentage (%) | 72 | 21 | 4 | 2 | 0.5 | 0.5 | 100 |

게 나타나고 있다. 즉, AH grade(AH32 및 AH36)가 전체 고장력강의 93%로써 그 대부분을 차지하며, DH 및 EH grade는 7% 정도에 머무르고 있는 실정이다.

4. TMCP강의 경제성 검토

지금까지 본 해설은 선박 건조측면에서 TMCP강의 장점을 고찰하는데 필요하다고 생각되는 여러가지 사항에 대해 기술하였다. 선박 건조 측면에서의 TMCP강의 장점이란, TMCP강이기 때문에 자연스럽게 언급되는 장점이 아니라, 현실적으로 선박건조에 TMCP강이 대체 사용되었을 때 조선소 측면에서 얻을 수 있는 생산성향상 및 원가절감을 의미하는 것이다. 만약 TMCP강이 대체 사용되어 생산성이 크게 향상되고 원가절감에 기여하는 바가 크다면 그 대체 사용을 적극 권장하여야 하겠으나, 그 기여정도가 미약하거나 거의 없다면 TMCP강이 좋다고 하더라도 굳이 대체 사용을 주장할 필요가 없을 것이다.

그러면 여기서 기존의 고장력강을 동급의 TMCP강으로 대체 사용하였을 때, 생산성 향상에 기여하는 사항이라 하여 자주 거론되는 것들을 열거하여 보면 다음과 같다.

- (1) 용접 예열기준의 완화.
- (2) 비저수소계 용접봉의 사용 가능.
- (3) 대입열 용접기법의 적용 가능.

이외에도 short bead 규정의 완화 및 line heating 규정의 완화 등이 거론되고 있으나 이들은 완화된다고 하더라도 생산성향상에 기여하는 정도가 미약하므로, 본 해설에서는 위의 세가지 사항에 대해서만 집중적으로 검토하여 보고자 한다. 즉 위의 세가지 사항이 완화되거나 가능하진다고 하였을 때 이들이 현재의 선박 제작공정을 어느 정도 개선할수 있으며 이로 인한 생산성 향상은 어느 정도인지를 살펴보고자 하는 것이다.

4.1. 용접예열

예열(preheating)은 용접時 저온균열의 발생을 방지하고자 용접전에 또는 용접하는 동안에도 수행되는 가열작업으로, 강재가 저온균열에 민감할수록(즉, 탄소함량이 높을수록 그리고 탄소당량이 높을수록) 예열온도는 높아지게 된다. 그런데 TMCP강은 기존강재보다 탄소함량 또는 탄소당량이 낮기 때문에 저온균열에 대한 저항성이 높아져서, 예열을 생략하거나 예열온도를 저하시킬 수 있으므로 생산성향상에 크게 기여할 수 있다는 것이 일반적인 견해이다. 문제는 이러한 일반적인 견해가 선박건조측면에서도 그대로 적용될 수 있는가 하는 것인데, 이를 확인하기 위해서는 용접예열을 규정하고 있는 몇가지 code 및 rule을 살펴볼 필요가 있다.

먼저 AWS D1.1 Structural Welding Code에서는 모든 선급용 고장력강을 grade에 관계없이 Group II로 지정하여, Table 6과 같이 강재의 두께에 따라 예열온도를 규정하고 있다. 전기된 Fig. 5로부터 현재 많이 사용되고 있는 고정력강의 최대 두께가 약 40mm임을 감안할 때, 선박건조시 요구되는 최저 예열온도는 10°C임을 알 수 있다.

Table 6 Minimum preheat and interpass temperature specified by AWS for the high tensile steels of hull structural steels

| Thickness mm | Minimum temperature | |
|-----------------|---------------------|------|
| | °C | °F |
| up to 19 | None | None |
| 19~38 | 10 | 50 |
| 38~64 | 66 | 150 |
| over 64 | 107 | 225 |

한편 선박 건조에 있어서 전 세계적으로 가장 많이 적용하고 있는 5대 선급규정(ABS, DNV, Lloyd's, NK, BV)에는 예열에 관한한 이에 대한 규정이 명기되어 있지 않다. 따라서 예열의 적용 여부 및 예열 온도의 선정은 각 조선소가 자체적으로 규정하여 적용하고 있는 형편이다. 이러한 상황에서 일본조선학회에서는 Table 7과 같은 예열 규정을 JSQS(Japanese Shipbuilding Quality Standard)로 제정하여 자국의 조선소들이 참고할 수 있도록 하였다. JSQS에 따르면 여강 및 고장

Table 7 Preheating requirement by JSQS

| Steel Grade | Preheating Condition | Preheating Temp. °C |
|-------------|--------------------------|---------------------|
| Mild steel | Air temp. less than -5°C | 20°C min. |
| HT steel | Air temp. less than 5°C | 20°C min. |

력강은 grade 및 두께에 관계없이 대기온도가 각각 -5 및 5°C 이하인 경우 예열을 행하며 예열온도는 20°C 이상이 되도록 추천하고 있다.

이상과 같은 현황하에서, 국내 조선업체는 어떠한 예열기준을 어떻게 적용하는 것이 가장 적합할 것인가 하는 문제는 매우 어렵고도 중요한 문제이다. 예를들어 두께 20mm인 고정력 강재의 용접에 필요한 예열 및 예열온도를 결정하고자 할 때 Table 6의 AWS 규정을 따르게 되면 예열이 필요하지 않는 반면, Table 7의 JSQS를 따르면 기온이 5°C 이하인 경우에는 20°C의 예열이 요구되어지고 있다. 따라서 대기온도가 5°C 이상일 경우에는 어느 규정을 따르더라도 예열이 필요없기 때문에 차이가 없지만, 대기온도가 5°C 이하인 경우에는 어느 규정을 적용하느냐에 따라 예열 적용 여부가 틀려진다. 예를들어 국내 어느 조선소가 JSQS에 근거하여 자체 QC Manual을 제정하고 이에 따라 예열을 실시한다고 하면 그 조선소는 기온이 5°C 이하로 내려갈 때에는 예열을 실시하여야 한다. 한가지 다행스러운 것은 국내 대형 조선소 거의 대부분이 남해안 지역에 분포되어 있어 겨울철에도 5°C 이하로 기온이 내려가는 경우가 매우 드물어서 그와 같은 QC manual을 가지고 있더라도 예열의 필요성을 거의 느끼지 못하고 있다는 사실이다. 그러나 실제로는 기온이 5°C 이하인 경우에 있어서도 예열을 실시하지 않고 있는 것 또한 국내 조선소들의 솔직한 현실이다. 그럼에도 불구하고 그와 같은 상황에서 우려되는 저온균열이 크게 문제화되지 않고 있는데, 이 또한 국내 조선소가 가지고 있는 경험적 사실이다. 이와 같은 경험을 바탕으로 대부분 국내 조선소들은 그들의 quality standard를 개정하여 예열규정을 삭제하거나 처음부터 삽입하지 않았던 것 같다. 그렇기 때문에 현재 국내 선박건조에 있어서만은 예열에 대한 강제 규정은 없다고 하겠다.

결론적으로, 용접예열에 대한 강제 규정이 없을

뿐만 아니라 겨울철에도 용접예열에 대한 필요성을 느끼지 못하고 있는 국내 조선소에 대해 TMCP강을 사용하게 되면 예열기준이 완화되어 생산성이 향상된다는, 그렇기 때문에 TMCP강을 적용해야 된다는 주장은 전혀 설득력이 없는 것으로써, TMCP강을 대체·사용한다고 하더라도 예열측면에서의 생산성 향상은 전혀 없다고 하겠다.

4.2. 비저수조계 용접봉의 적용

초대형 원유 운반선인 VLCC의 경우, 전 용접장의 약 90% 정도가 fillet 용접부라고 한다. 이 중 horizontal fillet 용접부에는 고능율의 gravity 용접기법이 적용되고 있는데, 이의 용접길이는 전 용접장의 약 30%에 이르고 있다. Gravity 용접에 사용되는 gravity 용접봉은 길이가 700mm인 E6027(연강용) 또는 E7028(고장력강용)이며, 이들의 사용량은 Fig. 6에서 보여주듯이 전용접재료 사용량의 약 20%를 점유하고 있다. 그리고 최근 선박용 강재의 고장력강화로 인하여 E6027의 사용량은 감소하는 반면 그 감소량 만큼이 E7028로 대체되어 E7028의 점유율이 전체 용접재료의 약 15%에 이르고 있다.

여기서 E7028 용접재료에 대한 규정을 살펴보면 E7028은 AWS A5.1에서 저수소계 용접봉(low hydrogen electrode)로 규정되어 있다. 그렇기 때문에 E7028은 저수소계로써 요구되는 조건, 즉 coating 부의 흡습량(moisture content)이 0.6 w/o 이하이어야 한다는 조건을 만족시켜야 한다.

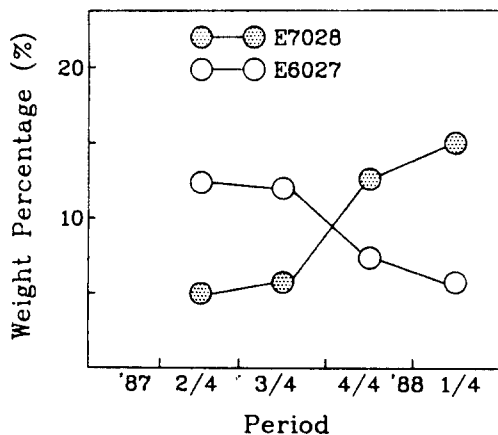


Fig. 6 Trend in usages of E6027 and E7028 gravity electrodes.

반면 일반 선급에서의 저수소계에 대한 정의는 확산성 수소량(diffusible hydrogen content, H_D)을 기준으로 하여 규정되어 있는데, 그 규제치는 용착금속 100g당 10ml이하 또는 5ml이하로 규제되고 있다. 이와 같은 규정과 함께, 미국선급인 ABS는 고장력강 용접에는 $H_D \leq 5ml$ 인 용접봉을, 연강의 용접에는 $H_D \leq 10ml$ 인 용접봉을 사용토록 규정하고 있어서 연강에 대해서 까지 저수소계 용접봉을 사용토록 규정하고 있다. 그러나 그밖에 다른 선급에서는 고장력강에 대해서만 저수소계 용접봉($H_D \leq 10ml$)사용을 의무화하고 있다. 이는 고장력강이 저온균열에 다소 민감하기 때문에 그 주 원인이 되는 수소의 유입을 막기 위한 규정이라 하겠다. 따라서 E7028이 전 선급으로 부터 저수소계 용접봉으로 인정을 받기 위해서는 확산성 수소량이 5ml 이하가 되어야 한다.

다음으로 확산성 수소량이 E7028계 gravity 용접봉의 작업성에 미치는 영향을 검토하여 보면, Fig. 7에서 보여주는 바와 같이, 확산성 수소량이 5~20ml의 범위에서는 pitting의 발생이 심하여 건전한 용착부를 얻을 수 없다는 특성을 보이고 있다. 따라서 gravity용 용접재료는 작업성 확보 측면에서 확산성 수소량이 5ml이하이던지 아니면 20ml이상이 되어야 한다는 결론이다. 그러나 확산성 수소량이 20ml이상이 되게 되면, 이는 이미 선급에서 규제하는 저수소계 용접봉의 규제범위($H_D \leq 5ml$)를 벗어나기 때문에 非저수소계 범주에 속한다고 하겠다.

따라서 저수소계 용접봉으로 규정된 E7028은 저수소계 용접봉으로써 요구하는 확산성 수소요구

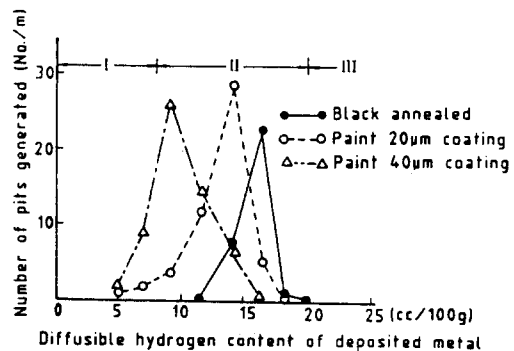


Fig. 7 Effect of diffusible hydrogen content on pit generation.

량($H_D \leq 5ml$)과 작업성 확보측면에서 필요한 요구량($H_D \leq 5ml$ 또는 $H_D \geq 20ml$)을 동시에 만족시키기 위해서는 결국 5ml이하로 제조되어야만 한다는 결론에 도달하게 된다. 그러나 gravity 용접봉은 일반 용접봉과는 달리 coating층이 두꺼워 flux양이 많을 뿐만 아니라 압출성을 향상시키기 위하여 첨가되는 flux성분이 결정수를 많이 함유하고 있기 때문에 확산성수소량을 5ml이하로 제한한다고 하는 것이 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 다시말하면 5ml이하의 용접재료를 생산하려면 용접봉의 압출성이 저하되고 이는 곧 생산성을 급격히 저하시키기 때문에 용접재료 maker로써는 이를 결코 원하지 않고 있는 실정이다. 또한 5ml이하의 용접재료를 생산했다고 하더라도, 이들 재료는 bead모양이 convex type으로 나타나거나 bead표면이 거칠어 수요가들에게 환영을 받지 못하고 있다.

이러한 현실을 확인하기 위하여 당 연구소에서는 국내·외에서 7가지의 E7028계열의 용접봉을 수집하여 확산성수소량 및 수분함유량을 측정한 결과, Table 8에서 보여주는 바와 같이 제품간에 커다란 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 모든 용접봉들이 AWS에서 규정하는 수분함유량의 최대허용치인 0.6%를 충분히 만족하고 있는 것으로 평가되고 있으나, 선급규정에서 요구되는 확산성 수소량 10ml를 만족하는 재료는 단지 4개에 불과하였으며, 더우기 ABS 규정에서 고장력강용으로 규정된 5ml를 만족하는 재료는 1가지 뿐이었다. 그리고 이들 용접봉은 확산성 수소량이 5ml에 가까운 범위의 것(F1, F2, F3, D4)과 20~25ml범위 것(D1, D2, D3)으로 구분되어는데, 이와같이 두가지 범위로 크게 양분될 수 밖에 없었던 것은 우선적으로 pitting발생이 없는 용접

재료를 만들기 위함이었을 것으로 추정된다. 여기서 확산성 수소함량이 가장 낮았던 D4와 F3은 작업성이 극히 불량하여 실 제품에 대한 적용은 거의 불가능하였다.

이와 같은 현실, 즉 저수소계 E7028과 非저수소계 E7028이 혼용되어 생산 및 시판되고 있는 현실과 선급규정이 고장력강의 용접에는 의무적으로 저수소계 용접봉만을 사용토록 규정하고 있는 상황하에서, 원칙적으로 제작자는 시판되고 있는 용접재료 中 확산성 수소량이 5ml 이하이면서 작업성이 양호한 재료를 선택하여 사용하는 것이 바람직하다고 하겠다. 그럼에도 불구하고 지금까지 국내 여러 조선소에서 E7028에 관한한 저수소계인지 非저수소계인지 관여치 않고 사용해왔던 것은 非저수소계 E7028 용접재료를 사용하더라도 현실적으로 저온균열과 같은 문제점이 발생되지 않았고, 그러면서 이들 재료의 작업성이 매우 양호하였기 때문이라고 하겠다.

이러한 경험을 바탕으로 gravity 용접봉에 관한한 저수소계이어야 한다는 규정을 배제해도 되지 않겠느냐는 생각과 함께 이를 현실화하려는 움직임이 있었던 것 같다. 이와 같은 움직임을 구체화한 것이 일본선급 NK 규정으로써, 이들은 최근 TMCP type 강재이면서 탄소당량이 0.36이하인 강재에 한하여 one-pass fillet 용접용 용접재료의 확산성 수소량을 25ml이하로 규정하여 非저수소계 용접봉의 사용을 인정하였다. 따라서 TMCP 강을 사용하게 되면 非저수소계 용접봉을 사용할 수 있고, 非저수소계 용접봉을 사용하게 되면 용접봉을 건조할 필요가 없을 뿐만 아니라 용접봉 가격이 저렴해 질 수 있다는 장점이 있기 때문에 결과적으로 원가절감에 크게 기여할 수 있다는 결론이다. 이를 배경으로 非저수소계 용접봉적용 가능성은 TMCP강의 장점 中의 하나로 향시 거론되는 사항이 되었다.

그런데 NK의 규정을 자세히 살펴보면 불합리한 점을 발견할 수 있는데, 그것은 강재가 TMCP type이면서 탄소당량이 0.36이하가 되어야 한다는 二重규제사항이다. 저온균열 감수성의 척도가 되는 탄소당량을 0.36이하로 일단 규정할 이상, 이에 더불어 반듯이 TMCP강이어야 한다는 규정은 무슨 의미가 있는가? 만약 非탄소당량 0.36이하에서 저수소계 용접봉을 적용할 수 있다면 제조공정에 관계없이 적용할 수 있도록 해야

Table 8 Diffusible hydrogen contents(H_D) and moisture(H_2O) contents of various E7028 electrodes.

| Sample # | $H_D(ml)$ | $H_2O(\%)$ |
|----------|-----------|------------|
| D1 | 25.4 | 0.46 |
| D2 | 21.8 | - |
| D3 | 20.6 | 0.42 |
| D4 | 4.5 | 0.18 |
| F1 | 6.3 | - |
| F2 | 6.1 | - |
| F3 | 5.1 | - |

하는 것이 보다 합리적인 것이다. 나아가 만약 그 이상의 탄소당량에서도 사용 가능하다면 그 적용 범위를 더욱 넓혀 주어야 한다고 생각한다.

이를 증명하기 위하여, 당 연구소에서는 非저수소계 gravity 용접봉을 이용하여 기존 강재에 대하여 restraint fillet weld cracking test를 실시하였다. 이 시험은 먼저 금속된 시험편을 제작하여 여기에 평가대상의 용접재료로 fillet용접을 실시하고 48시간 동안 방치한 후 용접부에서의 crack 발생여부를 확인하는 것이다. 본 시험에서 사용된 강재는 30mm 두께의 normalized EH36 강재로써 탄소당량이 0.39이었다. 시험에 사용된 gravity 용접봉은 확산성 수소량이 24ml, 26ml인 E7028과 34ml인 E6027이었으며, 시험의 온도는 0°C로 하였다. Table 9는 restraint fillet weld cracking test의 결과를 나타낸 것으로, 어느 시험편에 있어서도 bead의 표면 뿐만 아니라 단면(cross section)에서도 저온균열은 발견되지 않았다.

Table 9 Result of restraint fillet weld cracking test

| Electrode | Bead # | Bead Surface | Cross Section | Bead Appearance |
|---------------------------------------|--------|--------------|---------------|-----------------|
| E7028, 5.5φ (H _b =24ml) | 1st | x | x | G |
| | 2nd | x | x | G |
| E7028, 5φ (H _b =26ml) | 1st | x | x | G |
| | 2nd | x | x | G |
| E6027, 5φ (H _b =34ml) | 1st | x | x | G |
| | 2nd | x | x | G |

x : No Crack, G : Good

이상의 시험 결과는 기존의 고장력강에 非저수소계 E7028을 사용하였어도 저온균열은 발생되지 않았다는 경험적 사실을 정당화시켜 주었을 뿐만 아니라 모든 선급용 강재에 대해서도 사용될 수 있음을 보여주었다. 다시말하면 非저수소계 gravity 용접봉 사용 여부는 선급강재에 관련한 강재의 제조 process에 의해 제한받을 사항이 될 수 없기 때문에, 선급용 강재라면 기존 모든 강재(32 및 36kg/mm²급 강재)에도 사용 가능하다는 것이다. 따라서 선박용 강재가 TMCP강으로 대체된다고 하더라도 gravity 용접에 관련한 용접봉 선정기준을 변경한다는 것은 무의미하며 기준 자체가 합리적이지 못하기 때문에 기존에 사용하던 재료를 그대로 사용하여도 된다고 하겠다.

결론적으로 非저수소계 용접봉의 사용으로 생산성을 높이기 위하여 TMCP강을 사용해야 한다는 주장은 정당성이 결여되어있다고 생각되며, 오히려 gravity 용접재료 및 용접기법의 특성을 이해하고 인정함으로써 기존강재에 대해서도 非저수소계 gravity 용접봉 사용을 허가해 주는 방향으로 선급규정을 현실화하는 방향이 보다 합리적인 것이라고 생각한다.

4.3. 고장력강의 대입열용접

TMCP강의 장점으로 무엇보다 가장 널리 홍보되고 있는 것이 바로 고장력강에도 대입열용접시공을 적용할 수 있다는 것이다. 그런데 이를 잘못 해석하게 되면 기존의 고장력강에는 적용될 수 없었던 대입열 용접이 TMCP강을 사용하게 되면 가능하게 되어 생산성이 크게 향상될 수 있다는 결론에 도달하게 된다. 여기서는 이와 같은 결론이 결코 정당치 못하다는 것을 보여주기 위해서 먼저 선박 건조시 사용되는 대입열 용접기법과 이에 적용되고 있는 입열범위 등에 대해서 먼저 기술하고자 한다.

선박건조에 적용되는 대입열 용접기법은 편면자동 SAW 기법(one side SAW process)과 flux cored wire를 사용하는 electro-gas(EG) 용접기법으로 대별되는데, 편면자동 SAW 기법의 경우, 용접입열량은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 강재의 두께에 따라 증가하여 25mm 두께에서는 174kJ/cm의 입열로 one pass 용접이 가능하며 이 보다 두꺼운 강재에 대해서는 다층용접을 실시하게 된다. EG용접기법의 경우는 최대 32mm두께의 강재에 대해 최대입열 151kJ/cm정도로, 그리고 37mm두께의 경우는 FCAW와 같이 적용하는 combined기법으로 196kJ/cm의 입열로 용접가능하다. 따라서 선박건조에 적용되는 대입열 용접기법은 그 입열에 있어서 약 200kJ/cm가 최대이며, 그 이상의 입열은 장비능력의 한계로 인하여 그 수행이 불가능한 형편이다. 굳이 Electro slag 용접기법과 같은 경우를 예로들면 용접입열이 약 300~500kJ/cm로 매우 높지만 실제 선박건조에는 이와 같은 용접기법이 적용되고 있지 않기 때문에, 200kJ/cm이상의 대입열 용접기법에 대한 논의는 무의미하다고 하겠다.

또한 용접재료의 측면에서도 최대입열량은 제한될 수 밖에 없는데, 이는 모든 용접재료에서 그러

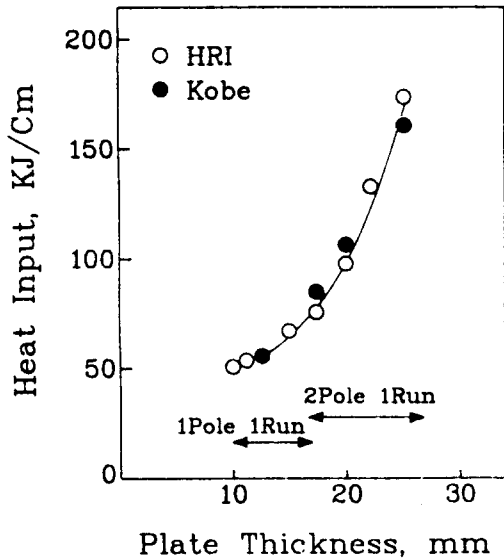


Fig. 8 Relationship between the plate thickness and the heat input required for one-side, one-pass SA welding.

하듯이 대입열 용접재료에 있어서도 입열이 증가함에 따라 용착금속의 충격인성값이 저하되기 때문에, 용착금속의 충격인성을 확보한다는 측면에서도 입열량 제한이 필요하다. 이를 실험적으로 입증하는 것이 Fig. 9로써, 용착금속의 충격인성값 확보를 위한 편면자동 SAW 용접재료의 최대 허용입열량은 약 160kJ/cm인 것을 보여주고 있다.

다시말하면 선박건조에서의 대입열이라함은 용접장비 및 기법 뿐만 아니라 용접재료에 따른 제한사항으로 인하여 최대 가능 입열이 설정되어 있기 때문에, 선박건조에 있어서의 대입열 용접기법 적용여부는 제한된 입열내에서 논의가 이루어져야 한다는 것이다. 이를 보다 구체적으로 설명하면 선박용 강재는 최대 입열 200kJ/cm 정도에서의 용접성, 즉 열영향부에 있어서의 충격인성값만 확보된다면 어떠한 종류의 강재에 대해서도 편면자동 SAW 기법이나 electro gas 용접기법 등의 대입열 용접시공이 가능하다고 할 수 있다.

이상의 검토를 토대로, 당 연구소에서는 조선용으로 가장 많이 사용하는 AH32, AH36 및 소량 사용되고 있는 DH36급 강재에 대한 대입열 용접 기법의 적용성을 평가하기 위하여 각각에 대해 대입열 용접을 실시한 후 열영향부에서의 충격인성

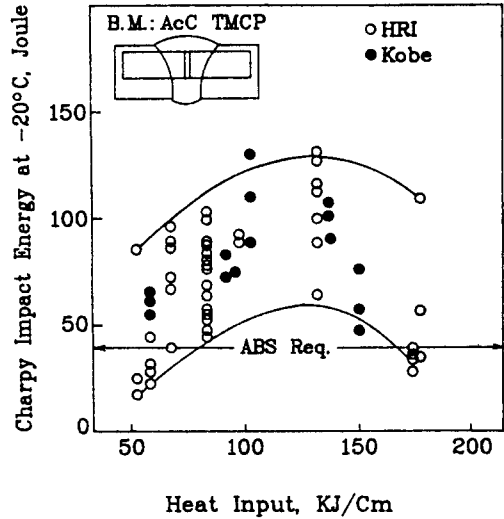


Fig. 9 Effect of heat input on impact toughness of weld metal deposited with one-side, one-pass SA welds.

값을 측정하였다.

Fig. 10은 제어압연으로 생산된 두께 22mm의 AH32 강재(탄소당량 : 0.37)를 입열 161kJ/cm로 편면 자동 용접된 용접부에서의 충격시험 결과를 보여주고 있는데, 충격시험은 DNV 규정에 따라 모재의 요구조건인 0°C에서 실시하였다. 본 결과에서 알 수 있듯이, 관심의 대상인 열영향부의 충격인성값은 선급의 규정치인 34 joule를 충분히 만족시키고 있을 뿐만 아니라 모재의 충격인성값과도 비교될 수 있을 정도의 높은 수준임을 알 수 있다. 따라서 AH32급 강재는 제조공정이 TMCP

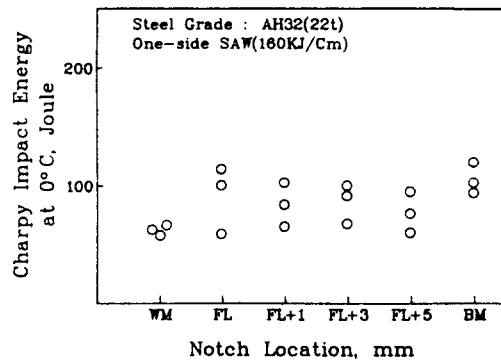


Fig. 10 Variation of Charpy impact energy in the HAZ of the high-heat-input-welded AH32 steel plate.

가 아닌 기존 강재에 대해서도 대입열 용접 기법들을 충분히 적용 할수 있다고 하겠다.

Fig. 11은 두께 25mm인 AH36급 강재의 electro-gas 용접부에 대한 충격시험 결과를 도시한 것이다. 본 시험에서는 탄소당량이 0.39인 normalized강과 탄소당량이 0.34인 TMCP강을 선택하여, 용접입열 130kJ/cm로써 동일하게 용접하여 두 강재간의 용접성 차이를 비교·평가하고자 하였다. Fig. 11에서 보여 주듯이 TMCP강의 열영향부가 normalized강의 경우에 비해 매우 높은 충격인성값을 지니고 있어, 대입열 용접에 관한한 TMCP강의 우수한 용접성을 입증하여 주었다. 그러나 본 결과에서 중요한 것은 normalized강 열영향부의 충격값이, 비록 TMCP강의 경우보다는 낮지만, 선급에서 하한치로써 규정하고 있는 충격인성값을 충분히 만족하고 있다는 사실이다. 따라서 AH36급 강재에 있어서도 강재의 제조공정에 관계없이 대입열 용접기법을 적용할 수 있다고 하겠다.

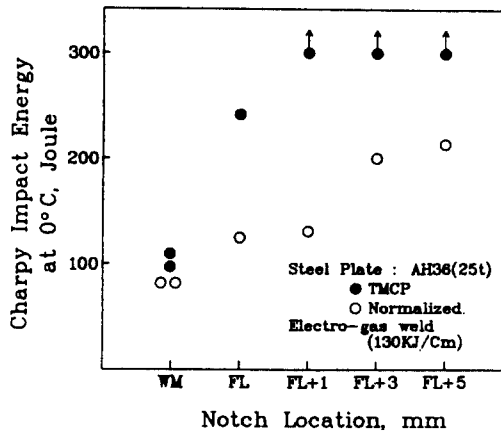


Fig. 11 Variation of Charpy impact energy in the HAZs of both normalized and TMCP type AH36 steel plates welded with high heat input.

다음으로 Fig. 12는 87.7kJ/cm 입열로 용접된 두께 15.5mm의 normalized DH36강재(탄소당량: 0.41)에 대한 충격시험 결과를 보여주는 것으로써, 충격시험은 DNV 규정에 따라 -20°C에서 실시하였다. 이 경우에는 열영향부의 충격치가 매우 낮아서 선급규정에서 요구하는 34 joule을 만족시키지 못하고 있음을 알 수 있다. 이는 결국

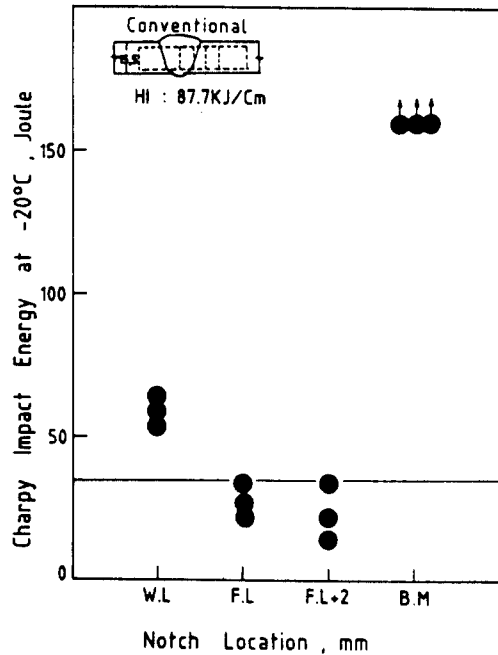


Fig. 12 Variation of Charpy impact energy in the HAZ of normalized DH36 steel plate welded with high heat input.

대입열 용접을 적용할 수 없다는 것을 의미하는 것으로써 이러한 경우에는 필히 저입열로 다층용접을 실시할 수 밖에 없다고 하겠다. 한편 TMCP형 DH36급 강재(탄소당량: 0.32)에 있어서는 Fig. 13에서 보여주는 바와 같이, 입열이 173kJ/cm인 편면자동 용접을 실시한 경우에도, 용접부 어디에서도 모두 선급규정치를 상회하는 높은 인성값을 보여 주고 있다. 결국, -20°C에서 충격치를 요구하는 DH36급 강재에 있어서는 TMCP강에 한하여 대입열 용접이 가능하다는 결론이다.

이상의 시험 결과를 종합하여 검토하여 보면, 현재 선박건조에 가장 많이 사용되고 있는 AH급 강재는 기존강재에 대해서도 대입열 용접의 적용이 가능하지만, DH36급이상의 강재는 TMCP강에 대해서만 그 적용이 가능하다는 결론에 도달하게 되었다. 따라서 TMCP강의 도입에 따라 대입열 용접이 확대 적용될 수 있는 분량은 DH36급 및 그보다 높은 grade강재의 사용량과 비례할 것으로 예상되는데 이의 사용량은, 전기된 Table 4 및 5에 나타내었듯이, 전체 고장력 강재 사용량의 약 7% 수준에 머무르고 있어서 대입열 용접량도

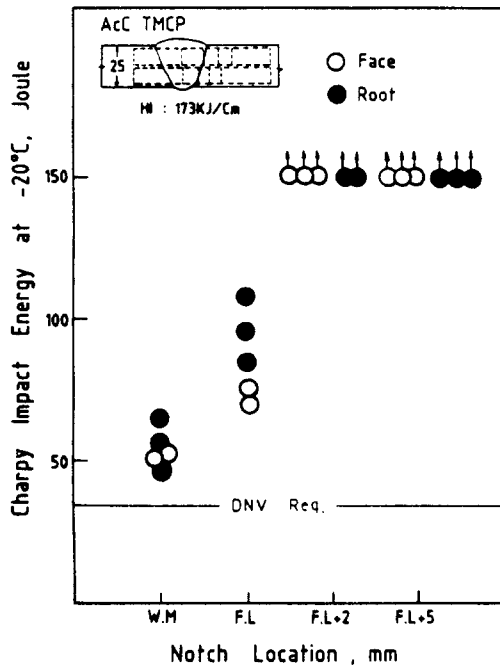


Fig. 13 Variation of Charpy impact energy in the HAZ of TMCP type DH36 steel plate welded with high heat input.

현재 상황에서 약 7%정도만이 확대 적용될 것으로 예상된다. 따라서 TMCP강의 최대의 장점으로 알려지고 있는 대입열 용접기법의 적용은 그 확대 적용 부위가 극히 미약하기 때문에 생산성 향상에 기여하는 정도 또한 미약할 것이다.

5. 선박용 TMCP강의 전망

지금까지 국내 선박건조의 현실을 중심으로 TMCP강의 경제성을 논하였는데, 결론적으로 TMCP강의 장점이 선박건조에 있어서는 경제적으로 크게 부각되지 못하고 있다는 것이다. 이는 선박건조에 사용하고 있는 강재의 주류가 아직은 AH32 또는 36급 강재에 머무르고 있는 현실에 기인되는데, 이들 강재는 TMCP형으로 대체 사용한다고 하여도 생산성이 향상되는 바가 거의 없기 때문이다.

따라서 TMCP강의 대체사용으로 생산성향상을 꾀하기 위해서는 선박건조에 있어 고급강종인 DH36 및 EH36급 강재의 사용량이 많아져야 하

는데, 불행하게도 일반선박에서는 이와 같은 고급강의 사용부위가 극히 제한되어 있어서 향후 선박설계기술이 발전한다고 하더라도 이들 강재의 사용량은 현재와 같이 7% 수준에 머무를 수 밖에 없는 실정이다. 그러나 시추선이나 barge선과 같이 특별한 용도의 선박에 있어서는 DH 및 EH급 강재의 사용량이 약 15%이상으로 비교적 높기 때문에 이들에 대한 TMCP강의 효과는 자못 크다고 할 수 있다. 그러나 이와 같은 특수용도의 선박은 그 건조건數가 작아서 소요 물량 자체가 소규모이므로 이에 크게 의존할 수도 없는 입장이다.

결국, 반복되지만, 현재로서는 TMCP강이 조선소의 생산성 향상에 획기적으로 기여할 바가 없다는 논리가 성립되는데, 과연 앞으로도 이러한 상황이 계속될 것인가 하는데에는 이견이 있다. 이에 대한 이견을 설명하기 전에 먼저 과거 선박용 강재의 변천 과정을 살펴보면, 앞에서도 언급하였듯이, 1980년 이전에는 대부분 연강을 사용하다가 이후 항복강도 32kg/mm²급으로 고장력강시대를 열면서 최근에는 36kg/mm²급으로 보다 고장력화 되었다. 앞으로도 이와 같은 고장력강화 추세는 선박의 경량화를 위하여 bulk carrier 및 container ship을 중심으로 계속될 것으로 예상되는데, 이러한 예상은 곧 항복강도가 40kg/mm²급 (YP40급: AH40, DH40, EH40) 강재의 출현 및 사용을 의미하게 된다.

AH40급 강재를 기존 강재와 같이 normalizing 열처리로 생산하고자 하였을 때 예상되는 탄소당량은 기존 강재(A, AH32, AH36)의 강도와 탄소당량의 상관관계를 참고하여 추정하여 보면 Fig. 14에서 보여주는 바와 같이 약 0.45에 이르게 되는데, 이러한 강재는 용접예열작업이 필수적으로 수반되어야 하는 강재라 하겠다. 조선업계에서 이러한 강재를 적용하고자 하면 예열에 따른 엄청난 생산성 저하로 말미암아, 비록 YP40급 강재로 설계가 이루어진다고 하더라도, 이의 적용은 현실적으로 거의 불가능 할 것이다. 이를 극복하기 위한 방안이 바로 TMCP형 YP40급 강재의 도입인데, 이는 AH40급 강을 TMCP로 생산하게 되면 탄소당량을 0.35~0.39수준으로 낮출 수 있어서 기존의 32 및 36kg/mm²급 강재의 탄소당량과 비슷한 수준에 머무르게 된다(Fig. 14). 따라

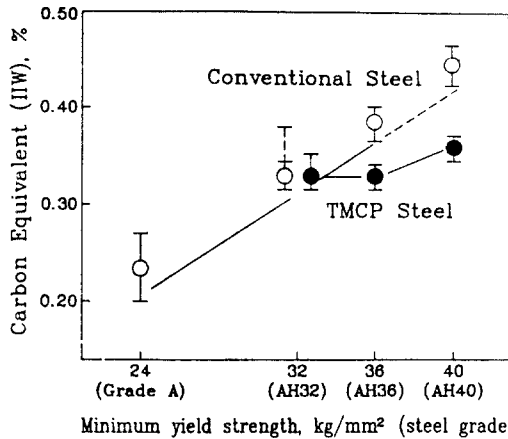


Fig. 14 Relation between the carbon equivalent and the minimum yield strength of hull structural steels.

서 용접에 관한한 지금 사용하고 있는 용접시공기준을 그대로 적용할 수 있을 뿐만아니라 용접재료에 있어서도 36kg/mm²급 강재에 사용하던 것들을 그대로 적용할 수 있어서, 선박의 경량화를 위하여 YP40급 강재를 사용하고자 할 때 TMCP형 YP40급 강재를 적용하게 되면 용접에 관한한 추가 제한사항이 없어서 생산성 저하없이도 선박의 경량화가 자연스럽게 추진될 수 있다는 것이다.

따라서 앞으로 선박설계에서 YP40급 강을 적용하고자 하면 TMCP강의 사용은 필수적이며, 역설적으로 TMCP강이 없으면 YP40급 강 적용은 추진될 수 없다고 하겠다. 따라서 TMCP강은 선박용 고장력강의 강도수준을 현재의 36kg/mm²급에서 40kg/mm²급으로 증가시켜서 앞으로도 선박설계분야에 있어서 선박의 경량화를 계속 추진할 수 있도록 하여 주었다는데 보다 큰 기여를 하고 있다고 하겠다. 여기서 말하는 선박의 경량화는 단순히 YP36급 강재가 YP40급 강재로 치환되어 얻게되는 경량화 뿐만 아니라, 그러한 치환이 가능해 짐에 따라 YP32급은 YP36급으로 wild steel은 YP32급으로 변경되어 얻게되는 총체적인 경량화를 의미한다.

일본 조선소에서는 20여척의 실호선에 대해 YP40급강재를 이미 적용한 실적이 있다고 하는데 그 적용 예를 Fig. 15에서 보여주고 있다. 이는 결국 TMCP강을 이미 확보하고 있던 일본과 이를 확보하고 있지 못했던 한국에서의 선박 설계

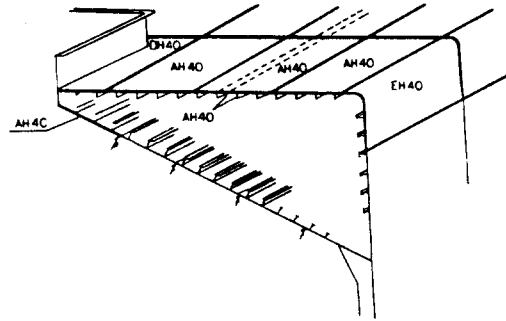


Fig. 15 Application example of YP40 grade steel plates.

능력의 차이를 결정적으로 보여주는 예라 하겠다. 마지막으로 언급하고 싶은 것은 AH32와 AH36급 강재를 TMCP로 생산하게 되면 이들은 모두 비슷한 탄소당량을 가지게 될 뿐만 아니라 (Fig. 14), 기계적 성질도 비슷하게 생산되어진다는 것이다. 다시말하면 기존강재에 있어서는 AH32와 AH36급 강재 사이에는 화학조성, 기계적 성질 및 용접성에 있어서 커다란 차이가 있었지만 TMCP 강 경우에는 AH32와 AH36급 강재가 거의 동일하다는 것이다. 따라서 앞으로 YP40급 강재가 일반화되면, 외형적으로는 32, 36 및 40kg/mm²급으로 구분되겠지만, 실제적인 용접성 및 기계적 성질은 36과 40kg/mm²급의 2가지로 대별되게 될 것이다.

6. 맺음말

최근 국내에서도 용접성이 우수하다고 알려진 TMCP강이 생산되어 선급용 강재로 적용되기 시작했기 때문에 TMCP강의 우수한 용접성이 국내 조선업계의 생산성 및 원가절감에 어느정도 기여할 수 있는가를 보다 냉철하게 고찰해 보는것은 흥미로운 과제라 하겠다.

일반적으로 TMCP강 하면 생산성측면에서 다음 세가지가 항상 거론되고 있는데,

- (1) 용접 예열기준의 완화
- (2) 非저수소계 용접봉의 사용 가능
- (3) 대입열 용접기법 적용 가능

이와 같은 사항을 국내 선박 건조 실상과 비교·고찰하여보면, (1) 용접 예열은 예열을 전혀 실시하지 않은 현재까지도 크게 문제되지 않았

고, 현재도 적용하지 않고 있는 상황이므로 완화할 대상이 없으며, (2) 비저수소계 용접봉 사용이 가능하다는 두번째 장점은 국내 조선소가, 비록 선급 규정에는 위배되지만, gravity용접에는 비저수소계 용접봉을 아무런 문제없이 사용하고 있기 때문에 장점이 될 수 없으며, 마지막으로 (3) 대입별 용접기법의 적용에 의한 생산성 향상은 DH36급 이상의 고급 강재에 대해서는 인정이 되고 있지만, 이들 강재의 소요량이 극히 미약하기 때문에 생산원가 측면에서의 기여 정도는 무시할 정도의 수준이다.

종합적으로 현재의 국내 조선소 입장에서 기존의 고장력강을 TMCP형 고장력강으로 대체 사용하였다 하더라도 조선소가 얻게되는 유형의 원가 절감 효과는 거의 없을 것으로 생각된다. 이와 같이 TMCP강 자체가 우수한 용접성을 가지고 있음에도 불구하고 조선업체가 이를 사용하였을 때 뚜렷한 유형효과를 얻지 못하는 이유는 선급용 강재가 가지는 특성, 즉 두께 20mm 내외의 AH32 및 AH36급 강재가 대부분을 차지하고 있기 때문이라고 하겠다. 따라서 TMCP강의 진가는 앞으로 조선업체가 선박의 경량화를 추진하는 과정에서 항복강도 40kg/mm²(YP40)급 및 그 이상의 고장력 강재를 적용하고자 할 때에 보다 극적으로 나타날 것이다. 그러나 현 시점에서 TMCP강의 가치를 따진다면 TMCP강 존재자체가 선박을 설계하는 사람들에게 YP40급 강재의 적용을 보다 더 적극적으로 검토케하는 촉매역할을 하고 있다는 것이다. 이와 같은 적극성은 YP40급 강재가 선급용 강재로 보편화되는 시점을 앞당기게 하여, 결국 TMCP강재의 개발이 궁극적으로 선박의 경량화를 계속추구할 수 있게 하였다는 사실에서 TMCP강의 현재 가치가 있다고 하겠다.

감사의 글

본 해설을 위하여 많은 조언을 해주신 현대중공업 구조설계부 김종률 부장님께 감사드리며, 시험을 도와주신 본연구소의 이동주, 박무룡 연구원과 원고 정리를 끝까지 해주신 이상삼 연구원 그리고 재난 양에게 심심한 사의를 포함한다.

References

- 1) K.Tsukada, T.Ohkita, C.Ouchi, T.Naganine, K.Hirabe and K.Yako: Nippon Kokan Technical Report(Oversea), No.35, (1982), pp. 1~23.
- 2) C.Shiga, K.Amano, T.Enami, M.Tanaka, R.Tarui and Kusuvara: Int. Conf. on the Technology and Applications of HSLA steels, Oct., 1983 in Philadelpha PA.
- 3) K.Bessyo, H.Takeuchi and T.Hashimoto: The Sumitomo Search NO.32, (1986), pp. 8~18.
- 4) Y.Komizo: J. of Japan Welding Soc., Vol.55, No. 3, (1986), pp. 153~159.
- 5) 김희진: 대한용접학회지, 5(2), (1986), pp. 1~11.
- 6) H.Kitada: "TMCP steel in shipbuilding", NK 초청 Seminar, 울산 현대중공업, (1987).
- 7) Isao Kozasu: "Welding Metallurgy of Structural Steels", Ed. J.Y.Koo, pub. of The Metallurgical Society, AIME(1987), pp. 63~78.
- 8) S.Yano, K.Itoh, M.Katakami, H.Nakamura and T.Kusunoki: "Welding Metallurgy of Structural Steels", Ed. J.Y.Koo, pub. of The Metallurgical Society, AIME (1987), pp. 581~614.
- 9) 김희진: 제2회 재료강도 심퍼지움 proceeding, 서울 KAIST, (1988), pp. 1~10.
- 10) Welding Research Council Buletin 334 June (1988).
- 11) Y.Nakano, K.Amano, J.Kudo, E.Kobayashi, T.Ogawa, S.Kaiharu and A.Sato: Proceedings of the 7th Int. Conf. on OMAE, Vol. 3, (1988), pp. 89~94.
- 12) TMCP 강재 Symposium, 대우조선, 대한용접학회(1990).