

熔接技術 應 用

海洋 構造物의 熔接

최승면 · 박동환

現代重工業(株) 産業技術研究所

1. 序 言

1973년 사우디 아라비아의 주베일(Jubail)산업항 건설 프로젝트의 해상 철구조물을 제작하기 시작한 이래, 당사는 30여개의 해양 구조물 공사를 수주, 이 분야에 있어 상당한 경험을 갖게 되었다.

해양 구조물은 육상 구조물에 비하여 가혹한 환경 중에 설치되는 관계로 설계나 제작에 있어 보수적인 경향이 강하다. 다시 말하면, 발주자의 시각에서 본 새로운 설계 개념이나 제작공법등이 쉽사리 적용되지 않으며, 전통적으로 안전하다고 여겨지는 방법만을 고집하는 경우가 허다한 것이다.

이러한 와중에서도 엔지니어들은 자신들의 경험과 지식을 밑바탕으로 좀더 적극적 방법을 모색하고자 하였으며 그러한 노력은 오늘날에도 계속되고 있다.

본고는 해양 구조물 용접의 일반적 現像에 대하여 기술하고 今後의 나아갈 바에 대하여 고찰코자 한다.

2. 海洋 構造物用 鋼材

2.1. 강재의 사양

주요 구조용 강재의 특징은 ASTM, API, 또는 BS 등의 비교적 널리 사용되는 표준 사양에 기초를 두고, 이에 더하여 발주처가 정하는 사항을 추가하는 형식이 되는 경우가 많다. 발주처가 추가로 요구하는 사항은 대개 화학성분(탄소당량 또는 P_{CM} 포함)과 저온 충

격치가 대종을 이루며 경우에 따라서 두께 방향의 신율(Z-property), HAZ의 CTOD 등이 추가되기도 한다. 두께 방향의 신율은 뒤에 설명하는 Node 등의 critical member에 대하여 요구되며, CTOD는 지정된 입열로 용접을 행한 후 열영향부에서 시험을 하게 된다. 인장강도는 대개 50Kg/mm^2 급과 41Kg/mm^2 급이 많이 사용되며 경우에 따라서 55Kg/mm^2 급도 사용된다.

당사에서 수행한, 노르웨이의 Norsk Hydro사가 발주한 한 project에 사용되는 강재의 사양을 참고로 아래에 나타내었다.

화학성분 (ladle, max. wt%)

C : 0.11	Si : 0.50	Mn : 1.00-1.65	S : 0.005
P : 0.015	Cu : 0.20	Ni : 1.00	Cr : 0.20
Mo : 0.10	V : 0.050	Pb : 0.005	Sn : 0.015
B : 0.005	(Nb+V) : 0.055		Al(Sol)/N ≥ 2

$$P_{CM} \leq 0.20$$

$$(P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B)$$

$$C_{eq} \leq 0.43 \quad (t \leq 40\text{mmt.})$$

$$0.44 \quad (40 < t \leq 75)$$

$$0.45 \quad (75 < t \leq 150)$$

$$(C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5})$$

Mechanical Properties (transverse to roll direction)

$$YS \text{ (MPa)} \quad T \leq 16\text{mm} \quad : \quad 355$$

(상향복점 또는 0.5% proof stress, total extension)	$16 < T \leq 40\text{mm}$: 345
	$40 < T \leq 63\text{mm}$: 340
	$63 < T \leq 100\text{mm}$: 325
	$100 < T \leq 120\text{mm}$: 315

TS : 490 ~ 620 MPa

EL : 20% ($5.65\sqrt{S_0}$) (S_0 = 시편의 단면적)

Charpy V-notch : 50J @ -40°C

2.2. Steel prequalification

Steel prequalification이라 함은 발주처가 steel mill에 대하여 시행하는 일종의 인증절차라 할 수 있으며, steel mill은 자사의 제품이 발주처의 사양에 합당함을 보여주고, 인정을 받게 되는 것이다.

그 방법은 발주처에 따라 조금씩 다르기는 하나, 소정의 용접입열로 하였을 때 steel의 열영향부의 fracture toughness를 평가하는 것이라는 점에서는 대동소이하며 fracture toughness의 시험 방법으로는 CTOD와 Charpy V-notch test가 이용된다.

시험 용접입열은 mill에서 보증할 수 있는 입열 중 최대치를 선정하게 되어 있으며 (경우에 따라 최소 입열도 시험한다), 판의 두께는 해당공사의 최대 판 두께, 또는 Mill이 보증할 수 있는 최대 판두께 (최대 C_{eq} 또는 P_{CM})를 선정한다. 후열처리가 필요할 경우에는 후열처리를 실시한 후 test하게 된다. HAZ의 CTOD test는 매우 까다로운 시험으로서 BS7191에 규정되어 있다. Notch는 grain coarsened HAZ에 위치해야 하며 이를 위하여 notch는 fusion line에서 0.5mm이 내에 있어야만 valid test로 간주된다.

예를들어 50KJ/cm의 입열조건으로 steel prequalification을 받았다면, 제조사 입장에서는 50KJ/cm이내의 용접입열로만 시공해야 하며, 그 이상의 입열로 시공코자 하면 prequalification 절차를 다시 밟아야 하는 것이다.

이러한 방식은 유럽의 북해 유전을 개발코자 하는 oil 회사들이 특히 즐겨쓰고 있다.

2.3. TMCP강

제작업체가 제작중에 겪어야 할 큰 어려움 중의

하나가 바로 예열이다. 판의 두께가 두꺼워질수록 예열온도는 상승하기 마련인데, 그럴 경우 예열을 하는 것 자체도 많은 시간이 소요될 뿐 아니라, 그 온도를 용접중 계속 유지한다는 것은 용이한 일이 아니다. Gas burner를 사용하여 예열을 하는 경우에는 가열이 불균일할 뿐 아니라 온도를 적정하게 유지하도록 관리하기가 매우 어려워진다. Electric heater를 사용하면 온도 관리는 매우 용이해지나 장비의 설치 이동 등이 번거로우므로 널리 사용하기는 어렵다.

따라서 제작자는 예열을 덜하든가 또는 안해도 되는 방안을 모색하게 되는데 그것이 즉 C_{eq} 또는 P_{CM} 이 낮은 TMCP 강재의 적용이다. TMCP 강의 적용은 조선분야에서는 이미 일반화되어 있는 것이나, 해양 구조물에는 80년대 중반까지는 전무하다가 그 이후 조금씩 사용 되어지고 있기는 하나 아직도 그 적용율은 높지 않은 편이다. TMCP 강재를 쓰므로써 얻을 수 있는 또 하나의 잇점, 즉 높은 허용입열은 이미 증명이 되어 있으며 조선 분야에는 실용화되어 있으나, Offshore 분야에는 대개 실제적으로 받아들여지지 않고 있다.

TMCP 강재를 사용함으로써 예열을 극소화하고, 입열을 극대화 함으로써 높은 생산성을 달성하는 것은 제작자로서 필히 성취해야 할 과제이므로, 향후 해양 구조물의 강재를 선정함에 있어 하나의 지표가 될 것으로 보인다.

3. 熔接法 및 熔接材料

3.1. 구조물의 제작방법

해양 구조물이라 함은 여러가지가 있겠지만, 여기서는 채유시설을 위한 고정식 platform을 위주로 설명코자 한다.

이 platform의 구조를 크게 양분하면 하부는 상부 구조물을 지지하기 위한 구조물로서 Jacket이라 불리는 tubular structure와 그 tubular의 속으로 들어가 海底면 깊숙히 박히는 긴 pile로 이루어져 있고, 상부 구조물은 사각형상의 steel frame (Column, Girder, Beam)이 건물의 철골 구조와 같이 이루어져 있다.

따라서 하부구조는 원통형이 기본 단위가 되고 상부구조는 box column과 H-beam이 기본단위가 된다. Platform의 일례를 그림1에 나타내었다.

3.2. 부위별 용접기법

3.2.1. 원통제작

Longitudinal 및 Circumferential Seam 공히 SAW로 용접된다. 용접기는 1전극, 2전극 및 3전극이 사용된다.

원통의 내부에서 작업이 가능할 때는 양면 용접을 하고 불가할 때에는 편면 용접을 한다. 양면 용접의 초층 용접시에는 Ceramic backing을 이면에 부착하고 GMAW로 2 pass 용접한 후 나머지는 SAW로 용접한다. 백 가우징은 하지 않는다. 편면용접을 할 경우에는 피복아크 용접으로 이면 비드를 형성한 후 나머지는 SAW 용접한다.

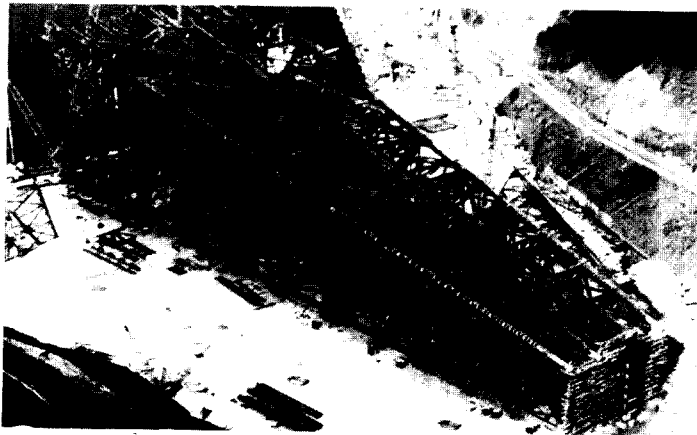
초층 용접의 다른 방법으로는 GMAW로 sealing을

한 후 SAW로 충분히 용입을 시키는 방법도 있다.

3.2.2. Tubular joint

이것은 Brace라고 하는 작은 tubular가 Node라 하는 큰 tubular의 측면에 T자나 Y자 모양으로 연결되는 것으로서 이것 역시 one side로서 완전 용입을 해야 한다. Brace와 Node가 이루는 각도가 작아질수록 heel 쪽의 개선각도가 작아지므로 용접이 어려워진다.

이 joint는 SMAW가 주 기법이 되고 root를 제외한 부분 중에서 용접자세가 쉬운 곳에는 FCAW를 쓰기도 한다. 이 부분은 assembly 단계에서 용접이 되므로 취부도 어렵고 용접자세도 어려워지므로 stub라고 하는 짧은 tubular를 미리 node에 붙여 놓고 brace를 butt 용접으로 연결하는 방식도 있다. 이 경우에는 양면 용접을 할 수 있으므로 용접 작업은 쉬워진다.



하부 구조물

상부 구조물

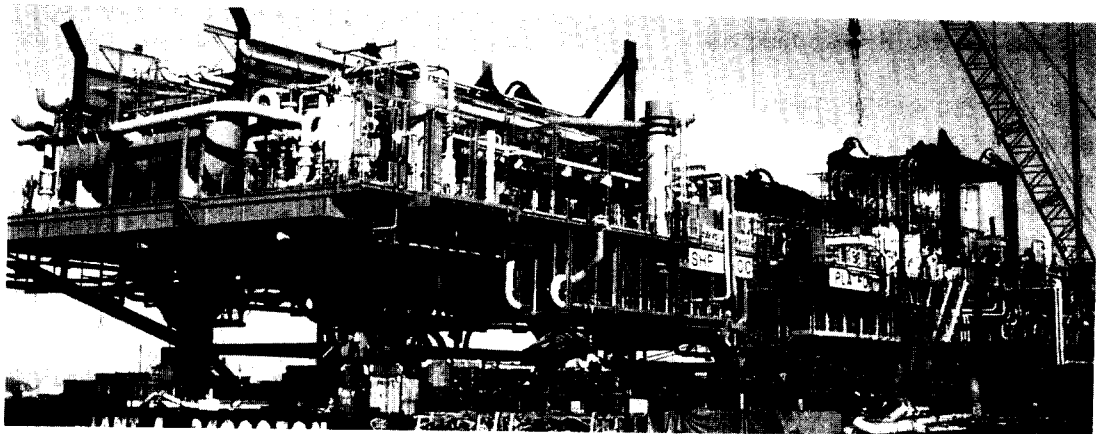


그림1. 해양 구조물



그림2. Node

Stub를 사용하는 경우는 구조물이 매우 대형이거나 후판일 경우이다.

그림2에 Stub를 사용하는 Node의 형상을 나타내었다.

3.2.3. 보강재류

Node의 내 또는 외부에 구멍 뚫린 원판형의 보강재가 붙는 경우, 또는 상부 구조물에 보강재가 붙는 부분이 있는데 이 때는 SMAW 또는 FCAW로 용접한다.

보강재는 하중이 집중되는 곳, 즉 후판이나 복잡한 형상을 한 부분에 부착되기 마련이므로 저온 균열이 발생하기 쉬운 곳으로서, 예/후열 및 용접순서 관리를 철저히 해야 한다.

3.2.4. Box 또는 H-beam Build-up

SAW 1전극 또는 2전극이 사용된다.

Box의 용접은 Steel backing을 대고 하는데 Backing plate에 충분한 용입이 되도록 용접 조건을 설정해 주어야 한다.

또한, Box나 H-beam 공히 변형이 발생치 않도록 용접 순서를 잘 정해 주어야 한다.

3.2.5. H-beam assembly

SMAW 또는 FCAW가 사용된다.

3.3 용접기법의 개요

3.3.1. 용접기법의 개략

주요 용접 기법과 그 적용부위를 아래 표에 나타내었다.

3.3.2. 예·후열 처리

1) 예열 및 층간온도

예열온도는 강재의 C_{eq} (또는 P_{CM}), 두께, 용접입열, 용착금속의 확산성 수소량 및 Joint의 구속도에 따라 결정된다.

예열온도의 적절한 선정은 제작자의 cost와 밀접한 관계가 있으므로 매우 중요한 점이지만, 위의 여러가지 요소를 모두 감안하여 예열온도를 정하여 관리한다는 것은 현실적으로 불가능하므로, 몇가지 유사한 경우를 묶어 포괄적으로 정하는 것이 바람직하다. 예를들면 기법별로 사용하고자 하는 최소 입열을 정하고, 강재의 가능한 가장 높은 C_{eq} 를 설정하고 확산성 수소량을 보증 최대량을 설정하면 두께별로 예열온도의 설정이 가능해진다. 여기에 구조물의 형상에 따라 구속도가 높은 joint를 미리 선정하고 해당 joint에 대해서는 약 50°C 정도 예열온도를 증가시키면 된다. 여기서 간과하여서는 안될것은 weld metal의 crack을 방지하기 위한 예열 및 층간온도이다. 이 분야는 아직 많은 연구가 되어 있지 않으므로 설

기 법	Groove 형상	입 열	비 고
GMAW + SAW	Ceramic (Butt joint)	50 KJ/cm max.	단관 용접 초층 GMAW 12φ 나머지 SAW 1 pole, 2 pole 또는 3 pole
	(T joint)	"	H-beam 제작
SAW		"	Box column 제작
		"	H-beam 제작

기 법	Groove 형상	입 열	비 고
SMAW 및 FCAW	A B C	35 KJ/cm max.	Tubular Joint 편면용접 초층 : SMAW 32φ 나머지 : SMAW 4.0φ 또는 FCAW 12φ
	A B C		
		"	Beam assembly

정하기가 쉽지 않으나, 판의 두께, joint 형상과 입열, 확산성 수소량을 검토하여 설정한다.

2) 후열처리

후판에 대하여 후열처리를 하는데, 후열처리를 해야 하는 기준 두께는 대개 50mm (또는 40mm)를 초과할 경우이다. 후열처리 온도는 강재에 따라 다르나 대개 as rolled 및 normalized steel은 620~650 °C, QT 및 TMCP steel은 580~600 °C의 온도에서 실시하는

것이 일반적이다.

후열처리는 잔류응력을 제거함으로써 fracture toughness를 증가시키는 의미가 있는데, 후열처리를 하지 않은 상태에서 CTOD test를 하여 소정의 요구치를 만족하면 후열처리를 하지 않아도 된다. CTOD라는 복잡한 test를 하는 이유는 그것이 실제 상황에서 fracture toughness를 가장 잘 simulation 할 수 있기 때문이고, 그 시험에서 requirement를 만족할 경우에는 굳이 후열처리를 할 필요가 없기 때문이다.

3.4. 용접재료

3.4.1. 피복아크 용접봉

피복 아크 용접법은 가장 고전적인 용접방법으로서, 그 신뢰도는 높은 편이다. 용접봉도 특별한 경우가 아니면 국내 maker의 극저수소계 용접봉 제품으로 소화할 수 있다.

저온 충격 성능이 요구될 때에는 Nickel이나 titanium-boron-(nickel) 합금계의 용접봉을 쓰게 되는데, 특히 boron은 미량 합금원소로서 그 함량 control이 매우 중요하다.

봉경은 4φ가 주종을 이루며 아래보기 자세이면 5φ를 쓰기도 한다.

3.4.2. SAW 용접재료

대개 입열이 제한되는 다층 용접이므로 Active flux는 사용하지 말아야 한다. Active flux는 전압의 변동 및 살포된 flux의 양에 따라 용착금속의 합금원소의 양이 변화하고, 다층용접에서 층수가 많아질수록 용착금속의 Mn 및 Si의 함량이 증가하는 경향이 있어 층수가 많아 질수록 저온 균열이 발생하기 쉽기 때문이다.

용융형과 소결형 flux를 비교한다면 합금원소의 첨가가 쉬운 소결형 flux가 기계적 성질의 측면에서는 좋으나, 흡습이라는 점에서는 용융형 flux보다 열등하므로 수소 균열이 생기지 않도록 Flux를 잘 관리해야 한다.

3.4.3. Flux cored wire

Titania계의 용접재료는 작업성은 우수하나 용착금속의 저온 toughness는 열등하므로 후판 용접에는 적절치 않고, 열기성 용접재료는 fracture toughness는 우수하나 slag 제거가 잘되지 않는 등 작업성이 좋지 않은 단점이 있으므로 사용하기가 어렵다. 작업성도 우수하고 저온 특성도 비교적 좋은 것이 Lime-titania계인데 현재까지 개발된 wire로서는 후판에서의 CTOD requirement를 만족하지 못하고 있다. 저온 fracture toughness가 우수하고 작업성도 좋은 flux cored wire의 개발이야말로 제조자가 학수고대하는 것이며,

이에 대해서는 꾸준한 연구가 필요하겠다.

3.4.4. Solid wire

Flux cored wire가 요구에 부응하지 못하므로 대안으로서 Solid wire와 혼합가스의 MAG process가 검토되고는 있으나, 전자세에서 우수한 능률과 작업성을 갖고 있지 못하므로 매우 한정적으로만 사용되고 있다. 이에 대해서는 보호가스의 조성을 다양하게 변화시킴으로써 능률과 작업성을 향상시킬 수 있다는 보고가 있으나, 아직 실용화 되어 있지는 않다.

3.5. 용접재료의 선정

용접재료의 선정은 사양에 맞는 것이라야 함은 물론이고, 이를 위하여 다음과 같은 정보가 필요할 것이다.

- (1) 전용작성능 : YP, TS, EL, RA, 화학성분
- (2) Butt 용접성능 (자세 : V-up) : TS, Bend, Impact, 필요에 따라 CTOD
- (3) 작업성 : 초 아크성, 아크 안정성, 슬래그 제거성, 스패터량 등
- (4) X-ray 성능
- (5) 내균열성 : 저온균열감수성, 고온균열감수성

3.6. 용접재료의 관리

저수소계 피복봉 및 SAW용 flux는 흡습이되면 수소로 인한 delayed crack이 발생할 수 있는데, 그 원인은 수소, 응력, 경화조직의 3원소가 조합되어 발생하는 것이지만, 일반 고장력 강에서는 그중에서도 수소의 영향이 가장 크므로, 용접부의 저온균열의 일차적인 원인은 용접재료의 부실한 관리에 있다고 보아도 무방하다.

재료별로 maker가 지정하는 건조온도가 있으므로 이를 필히 준수하여야 한다. 특히 flux의 경우, flux를 oven내 tray에 수북히 쌓아두는 경우가 있는데, 수분이 방출되기 위해서는 flux의 적층 높이를 적당한 높이로 제한해야 할 필요가 있다.

용접재료의 관리 기준을 정하기 위해서는 각 용접재료의 대기중 노출시간과 용착금속의 확산성 수소량과의 상관관계를 구함으로써 정해진다. 이때 노출되는 분위기의 습도 및 온도를 일정하게 유지시켜야 한다.

4. 용접부의 품질

4.1. 비드의 외관

해양 구조물은 static 및 dynamic load를 받기 때문에 이음부의 형상을 중요시한다. 이음부에 notch가 있으면 응력이 집중되어 그곳으로 부터 파단이 생길 수 있고, 또 이음부의 피로강도의 가장 중요한 인자가 이음부의 형상이므로 이음부가 매끈하게 되어야 한다. 발주자에 따라 다르나 모재와 비드 여성 간의 각도는 135° 이상이 되어야 하고 용접부의 어느 곳 이건 직경 25mm 정도의 동전을 접촉시켰을 때 동전과 비드 사이에 1mm 이상의 간극이 생기면 안된다. Undercut은 critical 및 primary member의 경우 최대 0.25mm, secondary member의 경우 최대 0.8mm가 일반적이다.

4.2. 내부 결함

Joint의 중요도에 따라 NDE 검사율은 달라지나 critical 및 primary joint는 100% NDE를 규정에 따라 실시한다.

4.3. 기계적 성질

Welding procedure qualification test를 통하여 인장강도, bend test, 경도, 충격시험 및 CTOD 등을 실시한다. 인장강도는 모지의 인장강도 이상, bend test는 4 t 180°C, 20t 초과시에는 -40°C에서 27J 이상, CTOD는 0°C에서 0.25mm 보다 커야 하는 것이 일반적인 요구사항이다.

충격치는 반복적인 production test를 통하여 확인하는 경우가 많으므로 용접작업자 및 관리 감독자는 용접시방서를 충분히 숙지하고 준수해야 한다.

4.4. 품질관리

각 stage별로 품질표준을 정하여 작업자와 관리 감독자 및 검사자가 정해진 rule에 따라 관리해 나가야 한다. 이를 위하여 별도의 check list를 준비하거나 혹은 부재와 함께 붙여다니는 history card 등을 유용하게 사용할 수 있다. 다른 작업도 마찬가지로이지만 좋은 관리란 이론적이어서도 안되고, 비논리적이어서도 안되므로 stage별로 관리해야 할 항목을 가능한 측정하기 쉬운 수치로 정해주는 것이 바람직하다.

5. 結 言

해양 구조물의 용접법은 다양한 기법이나 매우 생산성이 높은 기법 등의 기법적인 측면에서의 개발보다는 고전적인 기법을 사용하여 품질을 제고하는 방향으로 유도되고 있는데, 이것은 발주자의 의도가 그러하기 때문이다. 많은 man power가 요구되는 작업이고 따라서 관리 point도 수없이 많다.

따라서 제작자는 정해진 시방서에 따라 작업을 하는, 즉 good workmanship이 없으면 사사건건 발주처의 참견을 받게 되고 공정의 진행에도 막대한 영향을 입게 된다. 해양 구조물의 제작에 있어 1차적으로 중요한 것은 정해진 rule을 지키는 것임은 두말할 나위가 없고, 이러한 자세가 생활화되어 있어야 한다.

여기에 더하여 발주자의 요구사항에 부합하면서도 높은 생산성을 갖는 용접기법의 적용이야말로 제조자가 가지고 있는 숙제라 할 것이다.

TMCP 강의 적용, ceramic backing재를 이용한 gouging 공정 제거 등이 당사에서 현재까지 추진된 사항이지만 아직도 미흡하며, 반자동 용접의 확대 적용, 협개선 기법이나 대입열 기법의 채용 등이 지속적으로 추진되어야겠으며, 이를 위해서는 용접재료의 끊임없는 개선, steel quality의 개선 등이 필요할 것이다.