

해양구조물 제작 분야의 보수용접 기법 적용현황

김 대 순

Application Status of the Repair Welding in Offshore Structures

Dae-Soon Kim

1. 서 언

일반적으로 해양 구조물 용접부는 각 이음부에 대한 설계조건(응력 및 온도 등)과 모재, 용접부 물성(주로 CTOD 값)을 가지고 ECA(Engineering Critical Assessment)를 평가해서 구조물이 안정한 범위의 최대 허용가능 결함 크기를 구한다. 이런 값에 NDE 상에서의 발생할 수 있는 오차를 고려해서 각 이음부에 대한 NDE 규정이 만들어지게 된다. 그리고, 이 NDE 규정을 벗어나는 결함의 경우에는 구조물의 안정성을 위해서 결함을 제거한 후 보수 용접을 실시하도록 규정하고 있다.

용접부는 각 이음 별로 NDE 규정에 따라 외관검사나 비파괴 검사(RT, UT, MPI, PT등)를 실시하고, 검출된 결함이 적용되는 검사 규격이나 공사 사양서의 요구를 만족시키지 못하는 경우에는 결함의 종류, 발생 위치 및 결함 형태에 따라서 적절한 결함 제거 및 보수 방법을 적용한다.

용접 균열을 제외한 일반적인 결함(언더컷, 슬래그 혼입, 기공 등)은 특별한 주의 없이도 그라인딩, 가우징 또는 다른 기계적인 방법으로 결함 부위를 제거할 수 있다. 그러나, 균열의 경우에는 결함 제거할 때 발생한 응력에 의한 균열의 진전을 방지하기 위해서는 균열 양쪽 끝단부에서 50mm 이상 떨어진 건전한 용접부에서 부터 균열 방향으로 진행하면서 결함을 제거하는 것이 원칙이다. 경우에 따라서는 균열 앞쪽에 Hole을 뚫어 균열이 진전하지 못하도록 한 후 균열을 제거할 수도 있다.

제거된 결함부위는 보통 육안 검사, 자분 탐상법(Magnetic Particle Inspection) 또는 액상 침투법(Liquid Penetrant Examination)을 이용해 결함의 잔존 여부를 반드시 확인해야 한다.

결함제거 여부가 확인 된 경우에는 결함의 종류에 따

라서 그에 가장 적합한 방법을 선정해 보수용접을 시행한다. 보수 용접에 사용되는 용접재료는 일반적으로 본 용접에 사용된 용접재를 사용하는 것이 원칙이지만, SAW와 같이 본 용접에 사용된 용접재를 사용할 수 없는 경우에는 동일한 물성을 갖는 다른 용접재료를 사용해도 무방하다. 그러나, 보수 용접에 사용되는 용접재는 균열방지를 목적으로 대부분의 규정에서 저수소계 용접재를 사용하도록 추천하고 있다. 또한, 보수 용접 부위는 본 용접에 비해서 냉각 속도가 빠르고, 구속도가 크기 때문에 본 용접에서 요구하는 최소 예열온도 보다는 약50°F 정도 높여서 실시하며, 용접이 종료시 까지 예열 온도를 유지해주고 있다. 보수 용접은 보수 용접에 의해서 지나치게 변형이 발생치 않도록 주의해서 실시하며, 탄소 당량이 높은 모재를 사용할 경우에는 표면 비드 용접시에는 템퍼비드 적층법을 적용하는 것도 좋다.

보수 용접이 완료된 용접부는 본 용접에 적용되었던 비파괴 검사와 동일한 방법으로 검사를 실시한다. 또한, 용접부에 후열처리(PWHT)가 요구된 경우에는 재차 열처리를 실시하며, 만약, 열처리가 곤란할 경우에는 용접부에 대해서 CTOD와 파괴역학적인 해석(ECA)등을 통해서 구조물의 안정성이 검증될 경우는 후열처리가 면제 되는 경우도 있다.

2. 해양구조물 구조부재 보수용접

다음은 구조물에서 주로 발생하는 결함의 종류에 따른 보수 용접방법의 일례를 간략히 열거해 보았다.

- 오버랩, 지나친 여성 및 불룩 비드

과도한 용접부는 그라인딩과 같은 방법으로 제거해서 모재와 부드럽게 연결되도록 해준다. 그러나, 지나친 그라인딩으로 용접부가 모재 보다 낮지 않도록 주의해야 한다. 비파괴 검사는 보통 MPI나 PT를 적용한다.

- 오목 비드 및 언더컷

그라인딩이나 브러싱 등으로 표면을 청결히 하고 추가로 용접을 해서 부족한 부분을 메꾸어 준다. 이런 결함은 표면의 전 용접부 보다는 일부 용접부에서만 발생하기 때문에 보통 용접길이가 작다. 따라서, 강재의 종류에 따라서 급냉에 의한 경화를 방지하기 위해 일정길이 이상의 용접을 요구하거나 또는 예열을 요구할 수도 있다. 비파괴 검사는 보통 MPI나 PT를 적용 한다.

- 기공, 슬래그 혼입 및 용합 불량

가우징과 그라인딩 등으로 결함을 제거 후 용접 절차서에 따라 보수 용접을 실시한다. 적용되는 비파괴 검사는 본 용접에 적용되었던 모든 검사를 재 실시한다.

- 균열

균열이나 균열로 의심되는 경우에는 50mm 떨어진 부위부터 제거해서 균열 쪽으로 진행하면서 균열을 제거한 후 보수 용접을 실시한다. 비파괴 검사는 본 용접에 적용되었던 모든 검사를 재 실시한다.

- 아크-스트라이크

주로 매끈하게 그라인딩을 하고 외관검사 및 자분탐상 검사를 실시한다. 경우에 따라서는 보수용접을 적용하는 경우도 있다.

그루브 용접의 경우 일반적으로 루트 갭이 20mm, 또는 두 강재 중 얇은 판재 두께의 2배를 초과하는 경우는 취부전에 개선면을 원하는 루트 갭이 되도록 육성 용접을 실시한다. 육성된 표면은 그라인딩을 실시하고, MPI 및 UT로 결함여부를 검사 후 취부해서 원하는 루트 갭이 되도록 만든 뒤 본 용접에 적용되는 용접절차에 따라서 용접을 실시한다. 만약, 이 범위를 벗어나는 경우는 Owner의 사전 승인이 필요하며, 보통 절단 후 새로운 강재를 끼워서 루트 갭을 맞추고 용접하도록 요구하고 있다.

또한, 해양 구조물에서 많이 발생하는 Tubular T-K-Y와 같이 3차원 형태의 이음은 형태상 일정한 루트 갭을 유지하기 어렵거나, 부재를 떼어내서 육성 용접이 곤란한 경우에는 부재를 취부한 상태에서 육성용접(in-Situ buttering)을 하는 경우도 있다. 이런 경우 보통 용접사 기량을 검증하기 위해서 유사한 시편을 만들어서 "Butter Box" 시험을 요구하는 경우도 있다.

필렛의 경우는 루트 갭이 5mm를 초과한 경우는 육성용접 후 용접을 하며, 루트 갭이 2mm에서 5mm 사이는 육성 없이도 갭이 벌어진 만큼 각장을 보상해주면 된다.

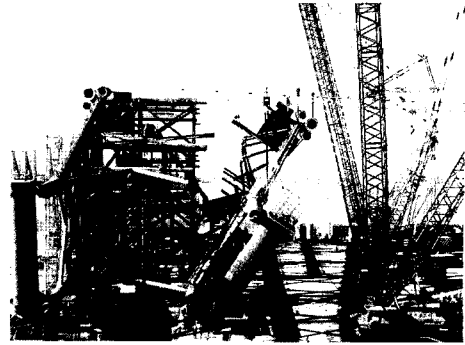


Fig. 1 해양 자켓 구조물 조립장면



Fig. 2 In-shop 용접 장면

3. 해양 배관(Piping) 수정용접

해양 구조물의 배관은 그 라인의 작동 매질이나 서비스 환경에 따라서 다양한 재질이 요구되고 있으며, 각각의 재질에 따른 용접부별 요구사항은 공사 사양서 (Project specification)나 설계조건(Design condition)에 의해 결정되지만, 공통적으로 ASME Sec. IX과 ANSI B 31.3이 적용되는 것이 일반적이다. 특히, H₂S를 포함하고 있는 Sour service 환경 하에 작동되는 배관재나 용접부의 경우 Surfide Stress Corrosion Cracking(SSCC)에 대한 저항성을 고려하여 NACE MR 0175의 규제사항을 요구하고 있다.

해양구조물 배관의 보수 및 수정용접에 필요한 용접 시방서(Welding Procedure Specification)는 실 부재에 적용된 것과 동일한 시방서를 적용할 수 있기 때문에 보수 및 수정용접을 위한 추가적인 검증시험 (Procedure Qualification Test)은 불필요하나, 최종 용접 후 설치된 라인에 대한 보수 및 수정용접은 단품 제작에 비해서 구조물의 구속도가 크고, 냉각속도가 빠르며, 용접자세나 작업 공간이 제한되는 경우가 많아 각별한 주의가 필요하다.

모재 결함에 의한 수정 용접은 극히 제한되어 있어 발주처나 해당 설계사(Design engineer)부터 승인이 있어야만 실시할 수 있다. 반면에 용접부의 경우, 본

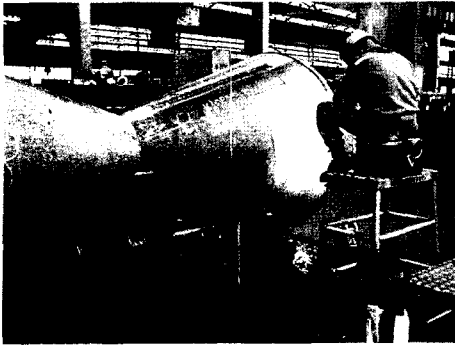


Fig. 3 해양 배관 용접장면

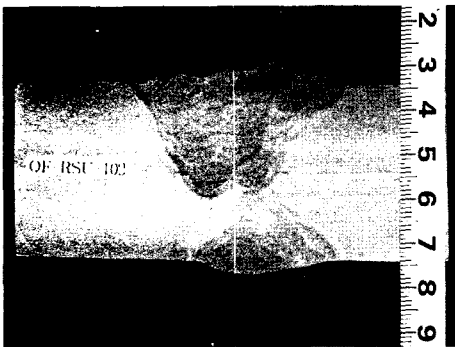


Fig. 4 배관 용접부 수정용접 단면

용접이 끝나게 되면 먼저 육안 검사(Visual Inspection)를 실시하고, 일정한 시간(24시간~48시간)이 경과한 후 비파괴검사를 실시하게 된다. 비파괴 검사에 의해 용접부 결함이 확인되면 이들의 제거 여부를 판단해야 하는데, 이때 결함의 제거 기준은 작동매질(유체의 종류)이나, 결함의 종류, 용접부에 걸리는 하중 및 용접부의 joint 종류에 따라 결정되며, 공사 사양서나 규격(Code)에서 허용하는 한계값을 기준으로 판단해야 한다. 해양 구조물 배관용접에 적용되는 ANSI B31.3의 비파괴 검사 적용 기준을 살펴보면, 결함의 종류를 비파괴검사에 의해 검출되는 균열(Crack)에서 육안 검사로 판별하는 여성고(Reinforcement)에 이르기까지 9가지로 분류하고, 종류별 측정 항목을 A에서 M까지 13가지로 기호화하고 있다. 마지막으로 구조물에 배관라인을 탑재한 후 전(全) 라인에 대한 가압 누출시험(Leak test)을 실시하게 되는데, 누출시험을 위한 압력값은 일반적으로 공사 사양서의 요구사항을 따른다. 누출시험 후 수정 용접을 해야 할 경우 수정용접에 대한 비파괴검사를 실시한 후 전과 동일한 조건에서 누출시험을 실시해야 한다.

해양 구조물의 배관에 대부분을 차지하고 있는 탄소강과 스테인리스강의 용접부 요구사항을 살펴보면, 가장 광범위하게 적용되고 있는 탄소강(carbon steel)

배관재의 경우 서비스 온도에 따라 저온용 탄소강(Low Temperature Carbon Steel)과 저온용 탄소강을 제외한 일반 탄소강(General carbon steel)으로 구분된다. ANSI B31.3에 따르면 용접 후 부재의 두께가 19mm를 초과하는 용접부에 대하여 용접에 의한 잔류응력을 완화시키고 용접 열영향부의 연화 및 연성확보를 목적으로 후열처리(Post Weld Heat Treatment)를 요구하는데, 후열처리는 593℃~649℃ 온도 범위에서 부재 두께가 25mm를 초과하는 경우 두께 25mm당 1시간, 최소 1시간 이상 유지하도록 요구하고 있다. 후열처리 유지시간은 Branch 용접이나, Fillet 용접을 제외하고, 두 부재중 두꺼운 부재를 기준으로 하고, 최종 비파괴 검사는 후열처리 완료 후에 수행하는 것을 원칙으로 한다. 후열처리의 지속적인 반복은 재질 및 용접부에 악영향을 미칠 수 있으므로, ASME Sec. IX에서는 검증시험(Procedure Qualification Test) 시 후열처리에 따른 열이력(Total heating cycle)에 대한 물성을 보증하기 위해서 PQ 후열처리 유지시간을 요구되는 온도(593~649℃)에서 후열처리 후 수정용접을 고려한 총 유지시간의 0.75배 이상 유지한 뒤 용접부 기계시험을 실시하도록 요구하고 있다.

후열처리는 요구되는 온도가 제어 가능하고, 가열시에 피가열물에 유해한 영향을 주지 않고, 산화 및 불꽃이 가열부에 접촉되지 않는 가열로 내에서 행하는 것이 기본이나, 노내 열처리가 불가능한 거대하고 복잡한 현장 구조물에 배관라인 탑재 시 적용되는 현장 용접이나 수정 및 보수 용접의 경우 국부가열 후열처리를 실시하는 것이 일반적이다. 국부가열 후열처리 시 가열로에 대한 요구사항 외에 가열부와 비가열부와의 온도구배를 완만하게 하고, 용접부의 주위에 규정된 가열 폭 및 보온 폭을 설정하고, 적절한 보온을 유지할 수 있도록 대책을 수립하는 것이 중요하다.

한편, 해양 배관라인 중 극저온인성과 Sour service 환경에 따른 고(高) 내식성이 요구되는 Gas 및 Chemical 라인의 경우 주로 스테인리스강(Stainless steel)이 적용되고 있으며, 전통적으로 AISI 300 series의 오스텐나이트계 스테인리스강(Austenitic stainless steel)이 사용되어 왔다. 그러나 최근 300시리즈 계통의 오스텐나이트 스테인리스강에 비해 강도와 CI SCC (Chloride Stress Corrosion Cracking) 및 공식(Pitting corrosion)에 대한 저항성이 우수한 이상 스테인리스강(Duplex Stainless Steel)의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 업계 관련자료에 따르면, 수퍼 이상 스테인리스강(Super duplex stainless steel)을 포함한 이상 스테인리스강(Duplex stainless steel)의

경우 그 사용량이 지속적으로 증가하여 2005년까지 연간 6%이상의 신장을 보일 것으로 예상하고 있으며, 2005년의 연간 총 사용량은 180kton 이상 이를 것으로 내다보고 있다.

스테인리스강 용접 시 규격(Code)에서 요구하는 특이 사항은 없으나, 공사 사양서에 내식성을 평가를 위한 부식시험을 요구하고 있으며, 탄소강 용접과는 달리 용접 시공 시 용접열에 의해 이면 비이드 표면에 형성되는 고온 크롬산화물(Chromium oxide) 생성을 억제하기 위해서 퍼징담(Purging dam)내의 산소량을 규제하고 있는 것이 일반적이다. 용접 후에 내부식성을 높이기 위해 산이나 알칼리로 표면을 세척한 뒤 정해진 산화 조건에서 표면에 산화피막을 형성시키는 부동태화(Passivation) 처리를 하는 경우도 있으나, 환경오염을 유발함으로써 규제하고 있는 추세이다. 구조물내에 설치된 배관라인의 보수 및 수정 용접 시 가장 대두되는 점은 바로 퍼징에 따른 경제적인 문제이다. 라인 전체에 대해 퍼징을 실시할 경우 소모되는 퍼징 가스에 따른 경제적 손실은 무시할 수 없다. 따라서 구조물에 탑재 및 조립 작업시 사전 작업 순서를 계획하고 수정 용접에 따른 퍼징 범위에 대한 대책을 수립하는 것이 바람직하다.

4. 해저 pipeline 보수용접

4.1 해저 pipeline의 보수용접의 특징

- 해저 pipeline의 용접은 제한된 길이의 lay barge 상에서만 실시되고, 용접작업이 컨베이어 작업과 같이 일관공정이다. 용접 및 기타 모든 작업이 일정간격으로 배치되어 있는 working station에서 이루어지며, 각 working station에서 작업이 끝나면 다음 working station으로 pipeline을 보내게 된다(실제로는 lay barge가 이동한다). 그러므로, 어느 station에서건 일처리가 지연되면 모든 station이 정지하게 된다. 뿐만 아니라, 공장이라고 할 수 있는 barge 자체가 진행하지 못하므로 관련된 모든 승선인원, 연락선, 자재공급선, anchoring 선 등이 다같이 정지하여 막대한 금전적 손실이 발생한다. 그러므로, defect가 발생하지 않도록 용접하는 것이 매우 중요하다.
- 결함이 발생하였을 때는 위와 같은 이유로 신속하게 보수해야 한다. 보수 용접을 최소화하기 위하여, 특히 소요시간이 긴 root 결함의 보수를 줄이기 위하여, root pass 용접 후 보수 용접사가 즉시 pipe 안으로 들어가서 확인하고 상황에 따라 보수 용접을 한

다. 그러나, 이것은 pipe의 직경이 사람이 들어갈 수 있을 정도로 클 경우에만 한정된다.

- Pipeline 부설 중에는 pipeline의 형상과 barge의 움직임에 따라 barge 위의 pipeline에 큰 bending 및 buckling 하중이 걸리게 된다. 그러므로 pipeline을 팽팽하게 당기고 위치를 고정하기 위하여, barge에 있는 2개의 tensioner로 pipeline을 고정하고 anchor 선을 winch로 당겨 균형을 이루게 된다. 그런데, 보수 용접의 위치가 tensioner 사이, 때로는 두 번째 tensioner 후에서 이루어지게 되므로 보수 용접 시 상당한 크기의 하중이 작용하게 된다. Open root repair와 같이 용접부 전체를 제거할 때 결합 제거 부위가 크면 pipe가 우그러지든지 찢어질 수 있으므로 결함의 크기는 결함의 발생 위치에 따라 stress analysis를 하여 허용 크기를 정하지만 대개 원주길이의 1/3 이하로 규정한다.
- 결함이 그보다 클 경우에는 pipe를 절단하고 재 용접해야 한다. 또, 보수용접이 반복되면 pipe의 품질을 해치므로 보수용접을 단 1회로 제한하는 경우가 많다. 이럴 경우에도 pipe를 절단하고 재 용접해야 한다. Barge 후미에서 pipe를 절단하면 pipeline을 고정할 방법이 없으므로 선 공정에 있는 3~4개의 조인트를 하나씩 절단하면서 barge가 거꾸로 이동하여 재 용접할 부위가 tensioner 이전으로 오도록 해야 한다. 실제로는 groove 가공을 위하여 pipe facing machine이 있는 첫 station까지 오게 된다. 이렇게 되면 공정에 막대한 지장을 주게 되므로 주의하여야 한다.

4.2 보수 방법

- 보수환경은 이와 같이 다르지만 보수방법은 통상적인 방법과 같다. NDE 후 defect가 검출되면 즉시 marking하고 gouging 및 grinding하여 결함을 제거하고 MPI로 결함의 제거를 확인하고 용접을 한 후 다시 NDE를 실시한다.
- 예열/층간온도
구속이 크므로 균열을 방지하기 위하여 보수 용접시의 예열온도는 본 용접 시보다 50°C 이상 높게 한다.

4.3 보수 용접법

- 보수용접은 국부적인 용접이고 재 보수를 허용하지 않는 경우가 많으므로, 가장 잘 사용되는 용접방법은 SMAW이다. 용접사는 매우 우수한 기량의 용접사여야 pipe를 절단하는 불행한 사태를 방지할 수 있다.

저수소계 피복봉으로 vertical-up 용접을 많이 한다. 셀룰로오스계의 vertical-down은 root gap이 좁아도 잘 용접할 수 있으므로 본 용접에는 많이 사용되지만, gouging 및 grinding에 의한 불균일한 root gap 때문에 보수용으로는 그다지 사용되지 않으며, 셀룰로오스계를 사용하더라도 vertical-up으로 시공한다. Wall thickness가 두껍거나 고강도일 경우에는 높은 구속력을 감안하여 셀룰로오스계의 사용을 금지하기도 한다.

셀룰로오스계는 DC를, 저수소계는 DC 또는 AC를 사용한다.

- Cellulose계/저수소계 용접의 비교

Cellulose계 용접봉은 다음과 같은 이유로 잘 사용된다.

- 용입이 깊다. 모든 피복봉 중에서 가장 용입이 깊다.
- 슬래그의 양이 저수소계보다 적고, 빨리 응고된다.
- 아크 스타트시에도 기공 발생이 없다. 저수소계는 Flux의 주성분이 Calcium carbonate이며 이것이 분해되어 CO₂ gas가 발생하여 아크를 보호한다. 그런데 이 Calcium carbonate는 700°C가 넘어야 분해되므로 아크 발생 후 용융 금속 이동이 시작될 때까지도 CO₂가 발생치 않아 아크 보호가 되지 않는 반면, Cellulose계는 유기물이 Flux의 주성분이며 이 유기물은 슬래그 형성제가 아니고 가스 발생제이며, 300°C 이하에서도 쉽게 분해되어 CO, CO₂, H₂, 및 H₂O를 발생시키기 때문이다. 또, 슬래그가 적은 대신 가스가 많이 발생하므로, 아크 길이가 길어질 때 저수소계는 아크의 보호가 불충분하여 보호가스 중으로 대기가 유입되나, Cellulose계는 아크 길이가 길어져도 저수소계에 비하여 그 영향이 적다. 이런 이유로 사용 전에 용접봉의 건조는 하지 않으며, 장시간 노출되었을 경우에는 건조해야 하지만 이 때도 70-100°C의 저온에서 30-60분간 건조시킨다.

그러나, Cellulose계는 저수소계와 달리 수소의 양이



Fig. 5 파이프라인 보수용접 비드외관(수동)

많은 고수소계 용접봉이므로 (30-40 cc/100g), 저온 균열에는 저수소계 용접봉보다 민감한 단점이 있다. 대개의 Pipeline이 20mm 이하의 두께이므로 특별히 문제가 되지는 않으나, 더 두꺼운 Pipe를 용접할 때, 높은 grade일 경우 또는 한랭 해역에서의 용접 시에는 저수소계를 사용해야 한다.

4.4 용접 품질

API STD 1104, DNV-OS-F101 및 BS4515 등과 같이 pipeline 용접에 대하여 자주 인용되는 규정을 보면 일반 구조물이나 플랜트 기기류에 대한 규정에 비해 결함 허용치는 다소 큰 편이다. 크래터 크랙 및 융합 불량 허용치는 것을 보아도 쉽게 알 수 있다. 그러나, 최근에는 이와 같이 국제적인 규격이 허용하는 범위를 인정하지 않고, 발주처가 결함의 허용치를 작게 요구하는 경향이 많다.

5. 결 언

최근 해양 구조물 분야의 추이는 고강고 고인성 강재의 사용과 심해개발로 인한 기술적 적용성에 있어서 더욱 고난이도의 기술이 요구되고 있다. 이에 따른 구조물 제작의 소요재료비 증가를 피할 수가 없으며, 구조물 제작에서 발생할 수 있는 결함을 필수적으로 안전하게 보수 하여 사용하여야 하는 당위성을 가지게 되었다. 따라서 고난이도의 재질에 대한 적정의 보수용접기법의 필요성은 계속적으로 증대 될 것이기 때문에 이에 대한 기술적인 백업 및 개발에 대한 관심을 증대시켜야 하며, 필요시 유효적절하게 적용할 수 있는 역량을 보유하고 있어야 한다. 또한 이러한 보수용접부에 대한 설계적인 요구사항을 충족시킬 수 있는 Design 개념을 가진 용접부 설계의 선행 개발이 필수적인 사항이다.

참 고 문 헌

1. AWS D1.1/Structural welding code-steel. C8
2. ASME Code for pressure piping, B31.3a-2000
3. Technical specification for material quality level 2, supplement 11
4. API standard 1104, nineteenth ed., sep. 1999



- 김대순(金大舜)
- 1958년생
- 현대중공업(주) 산업기술연구소
- 재료 접합공정, 신용접기법연구
- e-mail: drkim@hhi.co.kr