

조선·해양 구조물의 용접

김대순

Welding on Ship Building and Offshore Structure

Daesoon-Kim

1. 서 언

세계 조선산업은 한국, 일본과 중국의 극동 3개국과 EU가 주도하고 있다. 그 중에서 한국은 가격 경쟁력을 바탕으로 일본과 함께 세계시장의 75%를 점유하고 있지만, 내수시장 규모는 작아 해외시장 의존도가 높고, 미래, 첨단기술개발 노력 부족, 미흡한 R&D 투자 그리고 EU와의 조선통상 문제 등으로 인하여 조선산업을 지속적으로 유지, 발전시켜 나가기 위해서는 국, 내외적으로 극복해야 할 장애요인이 산재해 있다. 이에 반해 일본은 약 50%에 달하는 튼튼한 내수시장을 바탕으로 업체통합, 건조선형 전문화, 크루즈선 등의 고부가가치에서 경쟁력을 강화하면서 TSL (Techno Super Liner, 50노트급 초고속 화물선)과 같은 차세대 선형을 업계공동으로 개발하여 한국에 빼앗긴 조선 산업 세계 1위를 탈환하고자 전력을 다하고 있다. 또한, 유럽은 세계시장 점유율은 약 15% 내외이지만 기술적 측면에서 한국과 일본이 사용하는 원천기술을 보유하고 있는 지역으로서 크루즈선, LNG선과 같은 특수선종을 특화하고 있고, 조선산업의 후발주자인 중국은 대형조선소 건설, 설비확장 그리고 저임금 노동력을 바탕으로 급속하게 세계시장을 잠식해 한국에 가장 위협적인 경쟁국가로 부각되고 있다.

최근 조선산업은 전통적으로 큰 수요를 이루었던 대형 탱커선, 벌크 캐리어 그리고 컨테이너 선에서 LNG 선, FPSO 선, RO-PAX 선 등 상대적으로 부가가치가 높은 선종 중심으로 시장이 바뀌어 가고 있다. 실제 2002년 한국 조선소의 부가가치를 한단계 상승시킨 LNG 선 시장은 2008년까지 대략 100여 척의 LNG 선 신규발주가 예상되며 향후 조선시장의 가장 큰 성장 분야가 될 것이다. 또한, 이들 LNG 시장은 천연가스 생산용 선박과도 밀접한 연관을 가진다. 현재 개발이

추진되고 있는 상당수의 심해유전은 1,000M급이다. 이 정도의 수심에서는 원유와 천연가스가 같이 존재하며, 1,500M 정도의 수심으로 내려가면 원유가 아닌 가스상태로 존재할 가능성이 높다. 따라서 현재 심해에서 FPSO가 생산한 원유를 수송하기 위해 탱커가 투입된다는 점을 감안하면 LNG 선과 함께 Fig. 1에 보인 천연가스 생산용 선박 (LNG FPSO/FSRU)이 향후 조선업체의 큰 시장이 될 가능성이 높다.



Fig. 1 LNG-FPSO의 모식도

해양, 플랜트 시장 역시 최근의 추세에 따라 심해 (Deep sea) 유전개발이 확대되면서 부유식 원유시추 해양, 플랜트 시설의 시장 규모가 급속히 증가하고 있으며 새로운 성장의 발판 역할을 할 것으로 전망된다. 해양, 플랜트시장은 고정식설비 (Fixed Platform)와 부유식 설비로 구분되며 최근의 고유가에 따른 유전개발 프로젝트가 대부분 심해 (Deep Sea) 유전개발 쪽으로 확대되고 있어 비교적 가격과 부가가치가 낮은 고정식 설비는 줄어들고 부가가치가 높은 부유식 설비의 시장은 급격한 증가세를 나타내고 있다. 부유식 설비에는 위에서 설명한 FPSO와 함께 TLP, SPAR, Drilling Rig (Fig. 2) 등으로 구성되며, 향후 FPSO 다음으로 큰 시장을 형성할 것으로 기대된다.

이상에서 살펴본 것처럼 조선, 해양산업에서 생존을

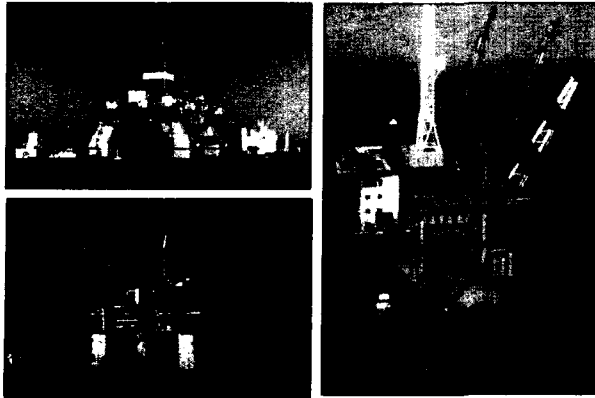


Fig. 2 부유식 해양 복합구조물 a) Semi-submersible rig ship b) tension leg platform c) spar

위해서는 통적인 컨테이너선, 벌크-캐리어, 유조선 등 일반상선과 고정식 원유생산설비에서 벗어나 새롭게 시장을 형성하고 있는 새로운 개념의 LNG (CNG : Compressed Natural Gas, PLNG : Pressurized Liquid Natural Gas) 선, 천연가스 생산용 선박 (LNG FPSO/FSRU) 그리고 원유 생산용 해양 복합 구조물 (FPSO, Drill Ship, TLP, SPAR)과 같은 고부가가치 시장에 집중되어야 할 것으로 보인다.

현재 국내 조선, 해양산업의 생산성은 90년대 대량 건조경험과 노하우 축적을 바탕으로 비약적인 향상을 보여온 것도 사실이지만 아직까지 일본이나 유럽에 미치지 못하고 있으며, 한편으로는 중국이 보다 값싼 임금을 무기로 한국을 추격하고 있는 실정이다. 이와 같은 상황에서 중국과 차별화하면서 일본과 유럽을 추월하기 위해서는 설계 및 생산기술의 일대 혁신이 필요하다. 특히, 조선, 해양산업에 있어서 용접이 차지하는 비중은 매우 크며 구조물의 품질과 직결되어 있어서 점차 치열해지고 있는 세계시장에서 살아 남기 위해서는 고능력 용접기법 개발을 통한 용접 생산성 향상과 해양 용접구조물의 엄격한 품질 요구를 만족시킬 수 있는 고품질 강재와 용접재료 개발 그리고 이에 대한 평가자료의 정립이 필수적이다.

본 보에서는 조선 구조용 강재 용접에 널리 사용되고 있는 캐리지를 이용한 FCA (Flux Cored Arc) 용접기법, 선체의 stiffener 제작에 적용되고 있는 다전극 고속필렛 용접기술과 로봇용접, 후판 강재에 사용되고 있는 양면 One run SAW 기술 그리고 블록 조립에서 사용되는 편면 EGW (Electro-gas Welding) 용접 등 분야별로 적용되고 있는 고능을 용접기법을 소개하고, 이와 더불어 최근 많은 관심을 끌고 있는 Hybrid Laser 용접기법에 대해서도 간단히 소개하고자 한다.

해양 구조물 용접에 관련해서는 용접부 저온균열을 방지하기 위한 용접재료 및 예열온도 평가방법 그리고 취성파괴 평가를 목적으로 시행되는 CTOD (crack tip opening displacement) 시험에 대해 소개함으로써 해양 구조물 제작과 관련한 소유주들의 요구사항을 소개하였다.

2. 조선 용접기법 개발과 동향

2.1 FCA 용접기법과 간이 자동화

선박 혹은 해양구조물을 만드는 과정은 강재를 절단하고, 소조립, 대조립 그리고 도장 및 P.E (Pre-Erection) 공정을 거친 후에 도크 내에서 블록을 탑재하고 용접하여 선체를 완성시킨다. 이 과정에서 소조립, 판넬라인, 대조립, P.E 그리고 선체조립 공정에 있어서 다양한 용접이 이루어 지는데, 이중 가장 많이 사용되는 용접기법은 FCAW 이다. FCAW 기법은 용접자세에 제한 받지 않고, 용착속도를 증가시켜 용접비용을 절감할 수 있고, 캐리지 (Carriage) 같은 간단한 간이 자동화 장비를 이용하거나, 로봇과 자동화 설비를 이용해 자동용접이 가능하다. 따라서, 전 용접공정에서 FCAW 기법이 차지하는 점유율은 폭발적으로 증가해 국내 조선 5사 모두 80% 이상의 높은 점유율을 보이고 있다. 한편, 1990년 중반부터 용접사의 고령화, 노동강도 완화 그리고 생산성 향상을 목적으로 조선업체를 중심으로 개발, 적용되기 시작한 소형 캐리지는 (Fig. 3) FCAW 기법과 결합해 작은 비용으로 엄청난 생산성 향상 효과를 가져왔으며, 더욱 소형화, 경량화, 고기능화 되어 평형, 입향 등 다양한 용접자세에서 무레일 용접 및 용접선 추적까지 가능한 새로운 장비가 선보이고 있다. 따라서, 작업장에서 FCAW 기법의 적용범위는 캐리지의 사용과 함께 더욱 증가할 것으로 보인다. Fig. 4는 국내 5대 조선업체의 FCA 용접기법의 적용율을 보여주고 있다.



Fig. 3 수평 필렛용접용 캐리지

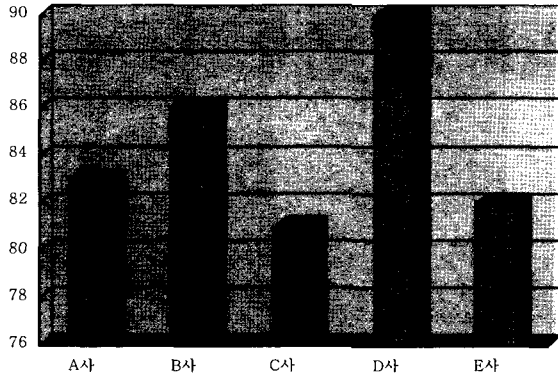


Fig. 4 국내 5대 조선업체의 FCAW 적용율

2.2 2 전극 (Tandem) 고속 필렛용접

선체조립 공정에서 필렛용접은 전체 용접장의 약 70%를 차지한다. 이에 적용되는 용접기법으로 캐리지를 사용한 FCAW 비중이 점차 증가하여 90년대 중반을 기점으로 전체 사용량의 20% 정도를 차지하고, 80년대에 30%에 이르던 중력식 (Gravity) SMAW 기법은 점차 감소하여 현재는 거의 사라져 가고 있다. 또한, 90년 중, 후반 조선업체의 공장증설 과정에서 필렛용접 고속화를 목표로 개발, 설치된 2 전극 고속필렛 용접장치는 엄청난 생산성 향상, 공기단축 효과와 함께 적용 가능한 모든 개소로 확대 적용되고 있다. 각장 4.5mm에 대한 용접속도를 비교하면 단일 전극일 때 약 50 cm/min. 정도이지만 2 전극일 때는 120cm/min. 그리고 2전극에 2.0mm 와이어를 사용할 경우 150cm/min. 까지 증가시킬 수 있다. 향후에는 200 cm/min. 이상의 초고속 필렛용접을 구현하기 위해서 3 전극 혹은 특수 전극을 사용하는 다양한 방법들이 연구되고 있다.

bare 상태 강재에 2 전극 고속 필렛용접을 적용하는 데에는 용접상에 별 문제가 없다. 그러나, 선체 제작용 강재는 프라이머 (primer)가 전처리되어 있어 Fig. 5에 보인 블로우-홀(blow hole) 혹은 피트 (pit)가 발생하기 쉽다. 이 같은 용접결함은 프라이머에서 열분해된 가스가 이탈하는 과정에서 미처 빠져 나가지 못해 용착금속에 응고되어 발생하며, 발생경향은 여러 가지 변수에 영향을 받고 있지만 프라이머 특성과 두께 그리고 용접재료 특성이 가장 중요한 요인이 된다. 따라서, 고속 필렛용접에서 용접결함 문제를 해결하기 위해서는 우수한 내피트성 (Pit-resistance)을 가진 프라이머와 용접재료 (메탈-코어드 와이어)를 개발 적용하여야 하고, 도장방법 및 시설을 개선하여 균일한 프라이머 두께를 유지하여야 한다. 이외에도, 용접결함을 완전히 해결하기 위한 방법으로 필렛용접이 이루어지는 용접라인에서 프라이머를 완전히 제거하는 장치가 검토되고

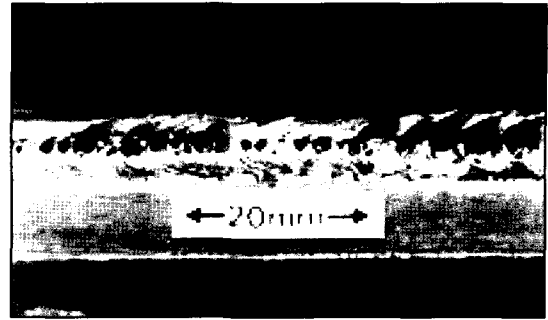


Fig. 5 필렛용접부의 블로우-홀

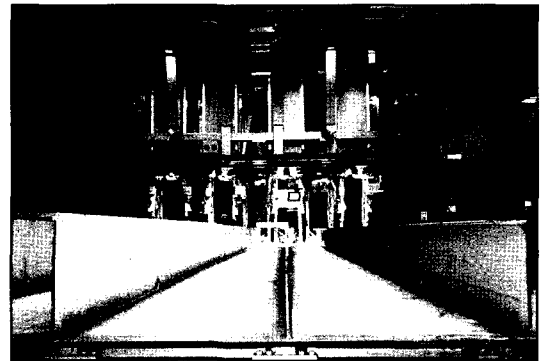


Fig. 6 다전극 고속필렛 자동용접장치

있으며, 실질적으로 용접결함을 제거하는데 가장 확실한 방법이 될 수 있다.

2.3 양면 One run SA (Submerged Arc) 용접 기법

양면 One run SA 용접기법은 블록 판계용접에 사용되는 용접기법으로 동일한 작업시간에 용착속도를 극대화하기 위해 대전류 혹은 다전극 용접기술을 도입하고, 동시에 열영향부에 요구되는 제반 물성 확보 및 고온균열 방지를 위해 TMCP 강을 사용하는 기법이다. Fig. 7이 보여 주듯 SA 용접에서 용착속도는 전류가 증가할수록 증가되며, 동일한 전류에서 다전극화 될수

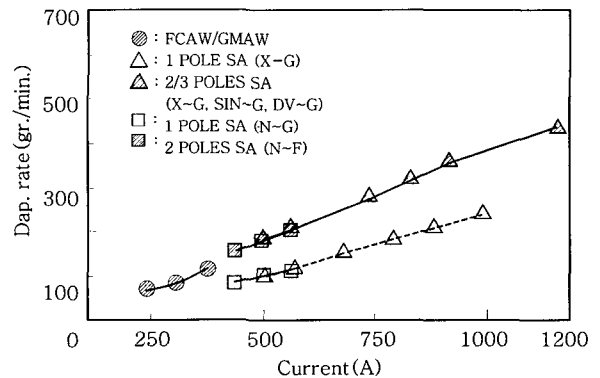


Fig. 7 용접전류 및 전극수별 용착속도

록 용착속도는 더욱 증가하게 된다. 이러한 개념하에서 1000amp. 이상의 대전류를 사용하여 I 혹은 Y (편면 혹은 양면) 용접개선을 양면 1 패스로 용접 완료하는 관통(Punch-Through) 용접이 그 특징이다.

현재 1 전극인 경우에는 32mm까지, 2~3 전극인 경우에는 50mm 두께의 강재를 양면 1 패스에 용접할 수 있다. 이 기법의 가장 큰 장점은 기존 SAW에 비하여 용착속도를 크게 증가시킬 수 있으며, 초층 용접부에 적용되던 이면 가우징 (Gouging) 작업을 배제할 수 있다는 것이지만, 현업적용에 대한 성공여부는 적절한 용입 확보와 고온균열 (Fig. 8) 방지에 있다. 따라서, 용접조건과 개선형상 설계 그리고 강재 및 용접재료 선정에 신중을 기해야 한다.

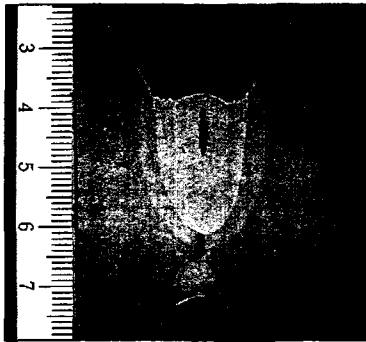


Fig. 8 양면 Y 용접부의 고온균열

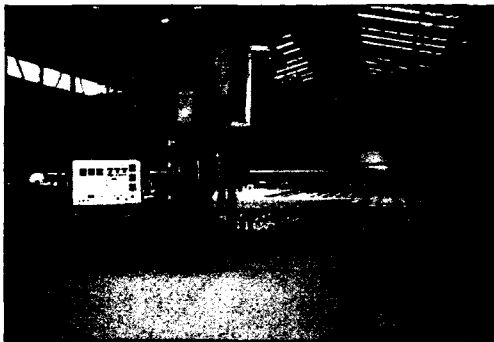


Fig. 9 양면 one run SA 판계용접장치

24 EGW 용접기법

블록이 대형화되면 조립용접에 여러 가지 문제점이 발생되는데, 블록 조립공정에서 별도의 위버 (Weaver) 를 장착하지 않고 1 패스 용접으로 시공하는 EGW (Electro-gas Welding) 기법은 강종에 따라 용접 가능한 입열조건이 제한되어 있다. 그러나, 최근 500 kJ/cm까지 대입열 용접이 가능한 TMCP 강이 개발되어 1 패스에 용접할 수 있는 두께범위가 확대되고 있으며, 이와 더불어 EGW 용접재료도 대입열 용접에서 충



Fig. 10 EGW 용접장치

분한 충격인성을 확보할 수 있는 1.5% Ni 첨가된 와이어가 개발되어 있다. 대입열화된 EGW 기법은 입향상진 용접비용을 획기적으로 절감하여 건조 및 탑재공수의 절감은 물론, 제작시간의 단축에 의한 Dock 회전율을 높이는데 일조 할 것이다.

25 로봇용접

국내 조선산업에서 로봇을 이용한 구조물 용접이 점차 증가하고 있는데, 이는 3D 직종 회피에 따른 용접사 부족, 고령화 그리고 안정된 용접품질을 확보할 수 있다는 복합요인에 기인한 것으로, 주로 구조가 복잡하지 않고 항상 동일 용접형상을 가지는 선체 중앙의 필렛용접에 적용되고 있다. 예컨대, 일본의 ARIAKE 조선소는 순수 로봇과 수치제어 로봇용접이 전체 용접물량의 60% 이상을 처리하고 있다. 용접용으로 적용되는 로봇기종은 직교형, 다관절형 및 양자의 조합으로 구성된 것이며, 용접기법은 대개 FCA 혹은 GMA 용접기법이 적용되고 있다. 로봇용접은 일반적으로 Off-line teaching 방식을 채택하여 제어되며, 주어진 용접부재에 용접조건을 입력하여 로봇용접의 진행과정을 컴퓨터의 CRT 상에서 재현 시킬 수 있다. 로봇용접에 있어 가장 핵심적인 기술은 용접부재에 발생할 수 있는 형상 변화 예컨대 루트-면, 갭 그리고 개선각도 변화를 감지하는 기능과 이에 대응하여 용접조건이 변화되는 Auto-feed back 기능이다. 아직 로봇용접이 생산성 측면에서 큰 장점이 없으나 안정된 용접품질의 확보 및 부족한 용접기능자를 대처할 수 있기 때문에 채택이 되고 있으며, 적용범위를 확대하기 위해서는 로봇용접장치의 소형화, 경량화, 소프트웨어 개발이 시급히 따라 주어야 한다. Fig. 11은 선각블록에 적용되고 있는 로봇용접장치를 보여주고 있다

26 Hybrid Laser 용접

선박제조에 사용되는 용접공정은 초기 수동용접에서

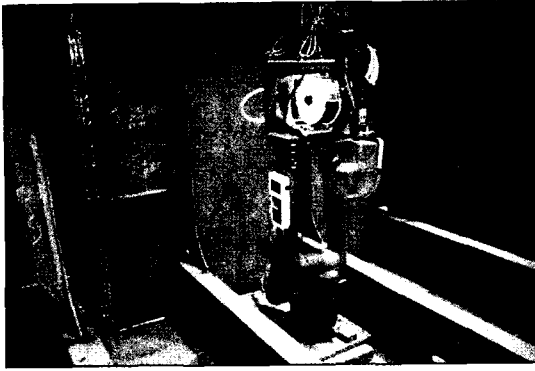


Fig. 11 로봇용접장치

부터 자동화가 진척되어 생산성의 큰 향상을 가져왔다. 그러나 현재 사용하고 있는 용접기술은 열변형과 그에 따른 용접부재의 뒤틀림 그리고 양면용접에서 필수적으로 수반되는 턴-오버 (Turn-over) 공정의 수반이라는 큰 문제를 안고 있다. 따라서, 조선산업의 부가가치를 향상시키고 고부가가치 선박의 제조를 위해서는 새로운 용접기법의 적용이 크게 고려되고 있고 이러한 관점에서 현재 선박용접공정에 레이저용접과 아크용접을 접목시킨 하이브리드 레이저 (Hybrid Laser) 용접에 대한 연구가 수행되고 있다. 하이브리드 레이저 용접은 레이저 용접 단독으로 적용될 경우 선박 제조공정의 특성상 핏업 (fit-up) 조건을 만족시킬 수 없어 발생하는 언더-필 (under fill), 용입불량 (lack of penetration) 및 기공 (porosity) 등 여러 가지 용접품질 문제를 해결할 수 있는 것으로 알려져 있다. 실제, 독일의 마이어 (Meyer Werft) 조선소에서는 이 용접기법을 아시아의 조선소들과 경쟁에서 이길 수 있는 선도기술로 결정하고 크루즈선과 같이 고부가가치 선박의 제조에 직접 적용하여 생산성 및 품질 향상에 효과를 보고 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 향후 국내 조선산업의 대외 경쟁력을 유지, 향상시키기 위해서는 하이브리드 레이저 용접기술을 적극 개발하여 조선산업에 적용하는 일이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

하이브리드 혹은 복합 용접이란 말은 두개 이상의 열원을 이용하여 용접하는 방법을 일컫는 말이다. 용접에서 사용되는 독립된 열원, 예를 들면, 아크나 레이저, 플라즈마의 에너지를 결합하여 용접하는 방법으로 서로 다른 용접열원의 상호작용을 이용한 시너지 효과를 얻어 각 용접법의 단점을 보완하고 장점을 극대화 시키는 용접방법이다. 일반적으로 하이브리드 용접은 레이저와 *GMAW 용접, 레이저와 GTAW 용접, 레이저와 프라즈마 용접를 이용하여 용접하게 된다. Fig. 12는 레이저와 GMAW 용접열원을 이용한 하이브리드 용접을 도

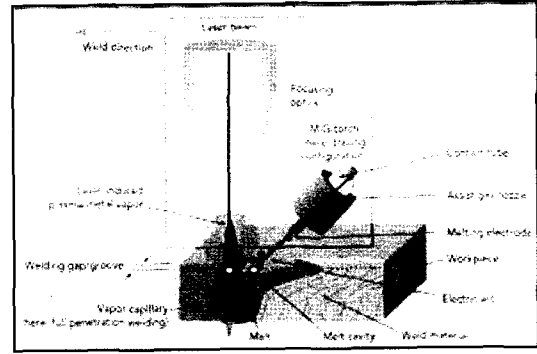


Fig. 12 하이브리드 레이저 용접의 개념도

식화한 것이다.

3. 해양 용접기법 개발과 동향

해양구조물과 선체 조립공정에 적용되는 용접기법은 거의 유사하다. 그러나, 두 구조물에 요구되는 용접부 품질수준은 상당한 차이가 있다. 따라서, 본 고에서는 해양구조물의 용접부 품질 요구사항을 중심으로 기술한다. 해양구조물에서 요구되는 용접품질의 가장 큰 특징은 예비시험 (Pre-qualification test)을 통해 규정 (API RP 2Z, EEMUA 158 혹은 BS EN10225) 에서 요구하는 용접성 및 파괴인성을 만족하는 강제와 용접재료만이 구조물 제작에 사용할 수 있고, 실구조물 제작용접 또한 예비시험에서 검증된 입열 혹은 예열조건 범위에서만 제작용접이 가능하다는 것이다. 따라서, 해양구조물에서 요구되는 까다로운 품질수준을 만족하기 위해서는 용접기법 뿐만 아니라 강제, 용접재료, 입열 및 예열조건에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 한다.

3.1 용접재료의 확산성 수소 및 용접 예열

해양구조물 용접부의 저온균열을 방지하기 위해서는 강제 탄소당량, 용접재료의 확산성 수소 및 용접입열 등 다양한 변수가 검토되어야 한다. 먼저, 해양구조물에 사용되는 용접재료는 근본적으로 확산성 수소량이 5~10cc/100g (AWS A4.3, Gas Chromatography Method) 이하로 관리된다. 또한 용접재료가 대기에 노출될 경우 발생하는 흡습 문제를 고려해 특정 분위기 (300C & R.H 80%)에 방치하여 확산성 수소량이 5~10cc/100g 이하가 되는 시간을 측정하고 용접재료 개봉 후에 사용 가능한 시간을 관리하게 된다. 한편, 실구조물 용접부에서 저온균열을 방지하기 위해서는 용접예열이 필수적인데, 이를 선정하는 조건은 확산성 수소량이 가장 많은 용접재료, 탄소당량이 가장 높은 강제 그리고 현업에 적용될 가장 낮은 용접입열을 조합하

여 즉, 저온균열이 발생하기 쉬운 조건을 만들어 예열 온도 선정시험 (Y-Groove 혹은 CTS : Critical Thermal Severity)을 하고, 저온균열이 발생하지 않는 예열조건에서 실구조물 용접을 실시 하게 된다. 통상, 용접재료 확산성 수소량과 강재의 탄소당량을 관리 하지 않으면 AWS, EEMUA 혹은 BS 규격에서 추천 하는 일반적인 예열온도보다 훨씬 높은 예열이 필요하기 때문에 예열에 소요되는 시간 및 공수를 절감하기 위해서는 강재 및 용접재료 선택에 특별한 주의가 필요하다.

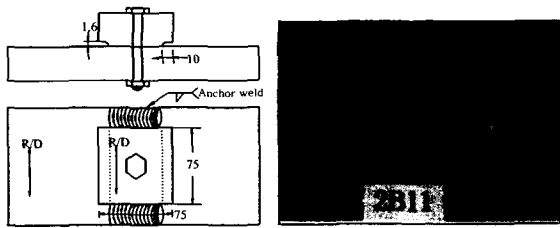


Fig. 13 CTS 시험편형상 및 용접부 매크로 형상

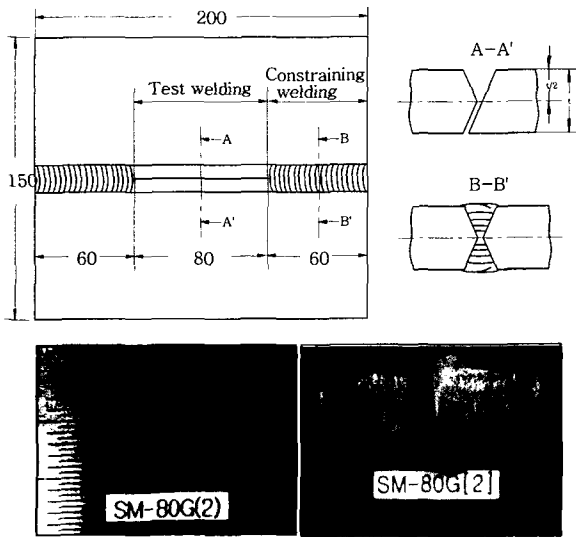


Fig. 14 Y-Groove 시험편 형상 및 용접부 매크로 형상

3.2 파괴인성 시험 (CTOD : Crack Tip Opening Displacement) 시험

석유자원 고갈과 함께 점차 극한지역으로 해양구조물 설치가 확대되고 있으며, 구조물 크기또한 생산성을 극대화하기 위하여 대형화 되고 있다. 이같이 악화된 조업조건은 대형 용접구조물의 제작에 생산성 향상을 위하여 대입열 용접이 필수적이지만 입열이 증가됨에 따른 용접부와 열영향부 파괴인성이 열화 되어 구조물의 안정성을 위협하는 문제가 있다. 따라서, 해양구조물 제작에서 대입열 용접으로 생산성을 확보하면서 구조물

의 취성파괴에 대한 안정성을 보장 받기 위한 방편으로 강재에 대해 API RP 2Z (혹은 EEMUA 158 및 BS EN10225)에 따라 15~45kJ/cm 혹은 실구조물 용접에서 적용할 용접입열 범위내에서 열영향부에 대한 CTOD 시험을 실시하여 취성파괴에 대한 안정성이 확보된 강재를 제작하게 된다. 또한, 용접구조물 제작에서는 강재의 열영향부에서 파괴인성이 검증된 용접입열 범위내에서 구조물 제작 용접을 할 수 있으며, 용접부에서도 강재 열영향부와 동일하게 CTOD 시험을 하게 된다. 용접부와 열영향부에 대한 CTOD 시험은 BS5762, 7448 또는 ASTM 1290 규정에 따라 실시하고 시험온도는 통상 구조물의 AMST (Anticipated Minimum Service Temperature) 이다.

4. 결 언

조선, 해양산업은 우리나라 중화학공업의 중추적 산업이며 일본과 더불어 세계시장을 지배하고 있는 우리의 미래산업으로 국제 경쟁력의 강화를 위해서는 새로운 신생산기술의 개발을 통한 생산원가의 절감, 설계기술과 응용기술의 개발이 지상 당면 과제임이 틀림없다. 이러한 과제를 해결함에 있어서 호황을 누리던 저임금 시대에서 특별한 대비 없이 급속히 도래한 현재의 고임금 시대는 이분야 산업의 경쟁력 약화는 물론 산업의 존폐위기를 걱정하여야 하는 지경에 이르렀다. 이와 같은 현실속에서 가장 시급한 과제는 회복불능의 고임금을 대신할 수 있는 생산설비의 자동화를 통한 원가절감만이 유일한 대안이 되고 있다. 본고에서 이미 전술한 용접기법 및 장치와 더불어 이에 대한 용접재료의 국산화도 동시에 진행되어야 할 과제이다. 이는 자동화가 용이한 용접공정인 GMAW 혹은 FCAW용 와이어가 그 대상으로써 특히 대전류 용접기법 개발과 더불어 자동화에 문제가 되는 spatter 절감을 위한 용접장비 및 용접재료의 개발도 중요한 분야임에 틀림이 없다. 전체적으로 보아 시대적인 요구사항에 부응하는 용접기술의 발전방향은 주어진 작업환경과 조건에서 최적의 자동화 시스템, 용접기기 및 용접재료 등을 선택하고 가장 경제적인 용접공정을 적용하는 것이 당면한 용접분야의 해결방향이라고 생각된다.



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