

# 최신의 조선용 강재 개발과 용접 기술

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 김영식  
(ygskim@reseat.re.kr)

## 1. 서언

우리나라의 조선 산업은 세계적인 불황으로 크게 위축되어 있다. 그동안 세계 1위의 신조선 수주 실적은 2008년 이후 중국에 내어주고, 2016년도에는 신조선 건조 실적이 38척에 그쳐 중국, 일본 다음으로 3위에 머물러 있다. 그런 중에서도 “월간 금속 & 용접저널”에서 종합한 2017년도 1분기(1월~3월)의 국내 신조선 추정 및 수주현황을 보면 총 45척으로 나타나 2016년 동기의 수주 실적에 비하여 크게 증가한 결과를 보이고 있다. 45척 중 Gas Carrier 12척, Tanker Carrier 17척, 기타 2척을 수주한 것으로 나타났다. 이 결과는 우리나라 조선 산업이 전체적인 불황의 그늘에서 벗어나지 못하고 있으나 2016년에 비해 순조로운 출발을 하고 있는 것으로 보인다. 또한 올해 9월부터 발효될 것으로 예정된 평형수 처리장치 규제와 2020년 발효가 예정된 황산화물 규제 등의 영향을 받아 2017년 시황은 점진적으로 개선될 가능성이 높으며 해양플랜트 시장에도 긍정적인 변화가 시작될 것이라는 예상이 나오고 있다<sup>(1)</sup>.

한편 해상수송에 대한 안전과 환경규제의 강화에 따라 앞에서 언급한 평형수 처리장치나 황산화물 규제 외에도 최근 선박에 관한 여러 가지 규제가 강화되고 있다. 국내 조선 산업의 경쟁력강화를 위해서는 이러한 규제강화에 대해서 능동적으로 대처하여 조선용 강 소재의 고품질화와 선박 조립기술인 용접기술의 고도화가 필수적인 요소로 부각되고 있다. 따라서 이 해설에서는 새롭게 개발되고 있는 조선, 해양 구조물용 강재와 조선, 해양 구조물 조립에 새롭게 해외에서 적용되고 있는 용접기술에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 규제강화 대처용으로 새로이 개발된 조선용 강

### 2-1, 컨테이너선용 취성균열 어레스트(Brittle Crack Arrest)강

최근 환경부하 저감 및 수송비 절감을 목적으로 선박의 대형화와 고성능화의 요구가 커지고 있다. 특히 컨테이너선의 경우 최근에는 20,000TEU급 (TEU: twenty-foot

equivalent unit, 컨테이너 20,000개 적재)의 초대형 컨테이너선이 건조되고 있다.

컨테이너선은 컨테이너를 적재하기 때문에 큰 개구부를 필요로 하는 선박으로 개구부 주변에 설치되는 해치코밍(hatch coaming)에는 극후의 고강도강판이 이용되고 있다. 그러나 극후의 고강도 강판을 사용하는데 있어서는 내취성파괴 특성이나 용접에 대한 충분한 고려가 필요하다. 특히 취성파괴에 대한 안전성에 관해서는 취성균열의 발생방지와 함께 취성균열이 발생하였을 때 전파의 방지가 매우 중요하다.

이러한 이유에서 IACS(국제선급협회연합)는 2013년 대형 컨테이너선의 구조신뢰성을 목적으로 취성균열이 만약 발생한 경우에 이를 정지시키기 위한 어레스트 설계에 관한 IACS 통일 규칙을 제정하였다<sup>(2)</sup>. 이 규칙에서는 일반 상선의 최저 설계온도인  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 판 두께 80mm이하의 후강판에 요구되는 필요 최소 어레스트 인성(Kca값)을  $6,000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ 로 규정하였다.

한편 판 두께 80mm를 초과하는 고강도 강판의 필요 최소 어레스트 인성에 대해서는 구체적인 규정 값이 없고 각급 선급협회의 판단에 따르도록 하고 있다. 그 때문에 판 두께 80mm를 초과하는 극후 고강도 강판에 대한 필요 어레스트 인성을 명확하게 하기 위해 NK(일본해사협회)에서는 초대형 컨테이너선의 구조물 시뮬레이션을 통해 실증시험을 실시한 결과 판 두께 80mm를 넘는 극후 고강도강판에 대한 필요 최소 어레스트 인성은  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서  $8,000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ 라는 것을 밝혀냈다. 금후 이 값이 IACS 통일 규칙으로 반영될 예정이다<sup>(3)</sup>.

취성균열 어레스트 설계에 사용 가능한 조선용 고어레스트강판이 국내외 철강회사에서 개발되어 있다. 국내에서는 포스코에서 세계 최초로 인정받은 BCA(Brittle Crack Arrest) 보증 후판이 개발되어 19000TEU급 컨테이너 선박에 공급되었다. 이 강은 E40강으로 판 두께 100mm에서 Kca 값  $7000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$  이상의 값을 구현하였다<sup>(4)</sup>.

각 철강회사에서 개발된 고어레스트 강판은 TMCP 기술을 구사하여 용접성을 해치지 않는 범위의 화학성분으로 세립 화에 의한 고강도화와 고어레스트성을 실현하고 있다.

## 2-2. 조선용 내식강

### 2-2-1. 원유 탱커용 내식강

1990년대 이후 탱커의 원유 유출에 의한 해양오염이 매우 중요한 문제로 되어 국제해사기구(IMO)에서는 탱커의 국제 규격이 엄격하게 되었다. 원유탱크 내부의 부식에 대해 일본 조선협회 연구회에서 1999년부터 3년에 걸쳐 조사한 결과 원유탱크 내부의 부식형태가 탱크 밑 부분과 천장부(원유탱커의 상갑판 밑 부분)에서 다른 형태로 나타나 밑 부분에서는 피트(pit)상으로, 천정부에서는 전면부식으로 나타나는 것이 판명되었다<sup>(5,6)</sup>.

이러한 연구결과를 기초로 도장을 하지 않은 상태에서도 강재 성능에 의해 필요한 방식 성능을 확보할 수 있는 새로운 강재인 「원유탱크용 강재」가 일본에서 개발되어 장기간에 걸친 실선에서의 검증을 거쳐 그 우수한 방식성이 확인되었다<sup>(7)</sup>. 이 결과를 토대

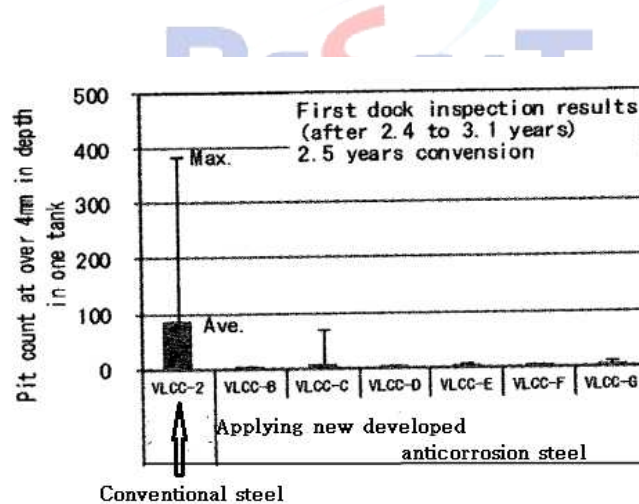
로 일본이 제안한 방식 강이 2013년에 발효된 원유탱커의 방식기준에 방식대책으로서 세계 최초로 인정되었다.

원유탱크용 내식강을 도장에 대체하여 사용함으로써 선박 건조 시의 도장, 도장용 장치 설치 등의 공수 삭감, 도료로부터의 유기휘발물질(VOC) 배출량 삭감이 기대될 수 있고 준공 후는 비용절감과 보수 기간의 단축이 기대될 수 있다.

아래에 원유탱크용 내식강(탱크 밑판용 내식강 및 상갑판용 내식강)의 내식성능, 및 실선 적용결과에 대해 소개한다.

**(1) 밑판용 내식강**

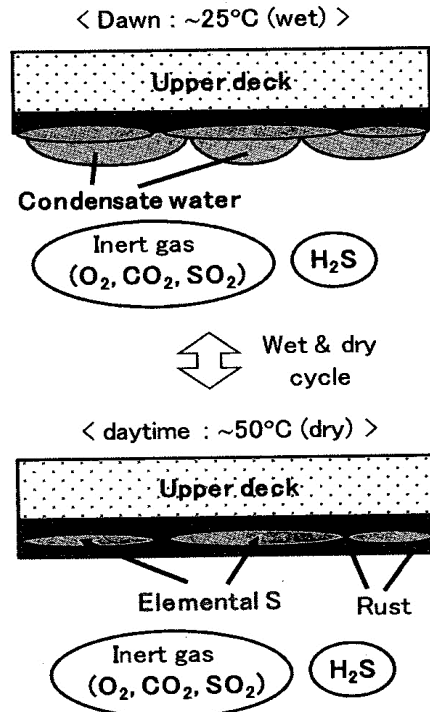
원유탱크 밑판의 부식은 국소적으로 발생하는 피트(pit)로 깊이는 최대 10mm에 이른다. 탱크 밑판은 부식을 촉진하는 요소인 물이 존재한다. 이 물은 원유 중의 함유 수분이 운반 중에 석출한 고농도의 염화물을 포함한 중성수일 것으로 추정되고 있다. 한편 탱크 내면에는 오일 코트(oil coat)라는 원유성분이 고착되어 있어서, 도장과 같은 환경 절연성을 가지고 있다. 이 때문에 피트는 오일 코트의 결함부에서 발생하는 것으로 추정된다. 새로 개발된 내식강을 원유 탱크의 밑판에 적용하여 피트 발생 상황을 재래의 강과 비교한 결과에 의하면 <그림 1>과 같이 피트발생 수가 대폭적으로 저감된 결과를 보였다<sup>(8)</sup>.



<그림 1> 원유 탱크 밑판에 재래의 강적용과 새로 개발된 내식강 적용 시의 피트 발생 비교<sup>(8)</sup>

**(2) 상갑판(탱크 천장부)용 내식강**

원유 탱크의 상갑판 뒷면에서의 부식은 강재가 거의 균일하게 부식되는 전면부식의 형태로 나타났다. <그림 2>는 원유탱크 상갑판의 부식 기구를 도시한 것이다<sup>(9)</sup>.



<그림 2> 원유 탱크 상갑판의 부식 메커니즘<sup>9)</sup>

상갑판 뒷면의 공간부에는 폭발을 방지할 목적으로 엔진 배기가스가 도입되어 있기 때문에 CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 등의 부식성 가스가 존재하고 더욱이 원유에서 유래되는 H<sub>2</sub>S도 비교적 고농도로 존재한다. 또한 상갑판 뒷면 측은 낮과 밤의 온도차에 의해 밤사이의 결로와 낮 시간의 건조가 반복되는 환경으로 결로 수는 CO<sub>2</sub>나 SO<sub>2</sub>의 존재에 의해 pH값이 2~4 정도까지 저하한다. 상갑판 뒷면 측은 이러한 약산성 결로 수의 건조 반복에 의해 부식이 진행되는 것으로 추정되고 있다.

원유 탱커의 상갑판에 새로 개발된 내식강을 적용하여 약 10년 간 부식시험을 시행한 결과 내식강의 부식에 의한 두께 감소량은 재래의 강에 비해 약 40% 저감시킨 결과를 나타내어 내식강이 양호함을 입증하였다. 또한 25년 후의 판 두께 감소율을 추정한 결과 내식강은 약 1.6mm로 IMO기준(2mm이하)을 만족시킨 결과가 보고되어 있다<sup>9)</sup>.

### 2-3. 충돌 안전성이 탁월한 조선용 강판

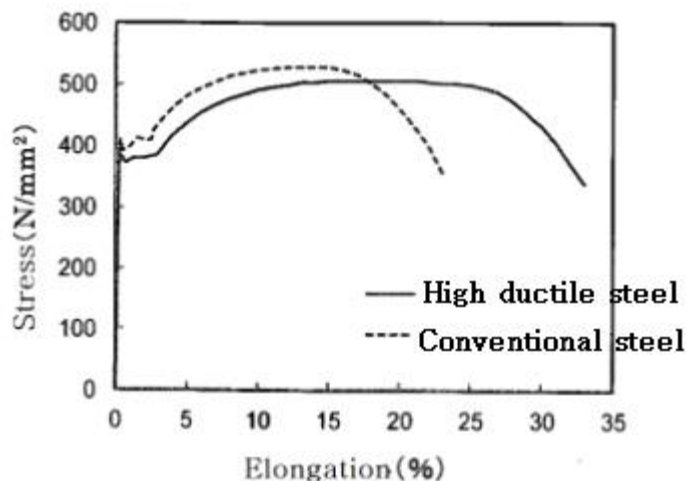
선박의 충돌이나 좌초에 의한 손상과 침몰은 귀중한 인명과 자원을 상실하는 것 외에도 심대한 해양환경오염을 일으킬 가능성이 높다. 따라서 사고 발생에 대비하여 피해의 경감책을 세우는 일이 대단히 중요하다. 이러한 사항을 고려하여 각 철강회사에서는 철강 특성을 향상시켜 선박충돌 시의 안전성을 높이기 위해 새로운 강판을 개발하고 있다. 강판의 충돌에너지 흡수능을 높이기 위해서는 강도와 연성의 양쪽이 우수해야 한다. 새로이 개발된 고연성강은 재래의 선체용 압연강재와 동등한 강도와 인성을 갖추면서도

연신율을 크게 향상시킨 강재이다.

<표 1>에 고연성강의 기계적 성질의 예를, <그림 3>에 응력-변형률 곡선의 예를 나타내었다<sup>(9)</sup>.

<표 1> 고연성강의 기계적 성질의 예<sup>(9)</sup>

Steel	Thickness (mm)	Tensile properties		
		Yield point (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
A	11	410	517	30
B	18	389	508	33
C	26	384	509	32
D	35	381	505	33
NK KD36	10-40	≥355	490-620	≥16



<그림 3> 고 연성강과 재래 강의 응력-변형률 곡선<sup>(9)</sup>

<표 1>과 <그림 3>을 통해 고연성강은 재래의 강과 비교해서 현저히 큰 연성을 갖고 있음이 입증되고 있다.

벌크 화물선(bulk carrier)에 고연성강을 적용했을 시 그 충돌 안전성을 재래의 강 적용 시와 시뮬레이션을 통해 비교한 결과에 의하면 흡수 에너지는 약 3배로 향상하고 한계 충돌 속도는 1.75배로 향상됨이 증명되었다. 또한 VLCC(Very Large Crude Oil Carrier)에 고연성강을 적용 했을 시의 효과도 검증된 바 있다<sup>(10)</sup>.

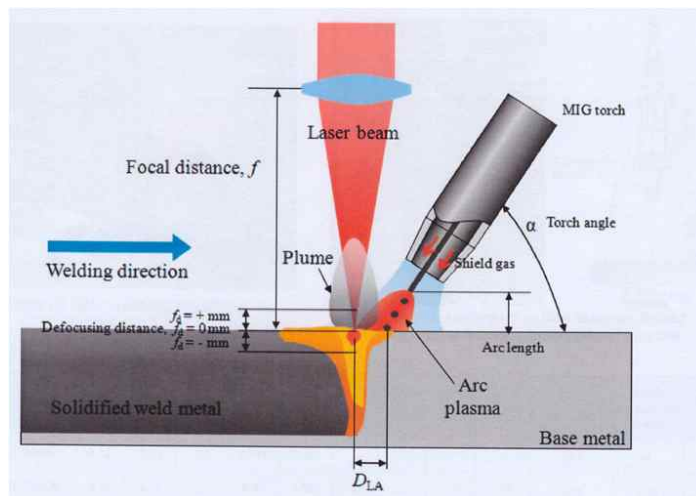
일본 NK에서는 충돌이나 좌초에 대한 에너지흡수에 효과가 있는 고연성 강재를 적용한 선박에 클래스 노테이션(class notation)을 부여하고 있다. 2016년 10월에는 NK에 의해 고연성강을 적용한 벌크화물선이 세계 최초로 NK에 의해 클래스 노테이션을 부여받

왔다<sup>9)</sup>

### 3. 최신의 조선 용접기술

#### 3-1 레이저-아크하이브리드용접

<그림 4>에 레이저-아크 하이브리드 용접의 개요를 보인다. 이와 같은 레이저-아크 하이브리드용접은 용접속도의 고속화와 심용입 용접, 저입열에 의한 용접변형의 저감이 장점으로 조선업계에서는 과거부터 많이 사용해 오던 CO<sub>2</sub> 반자동 용접이나 서브머지드 아크용접에 대신하는 용접기술로서 주목되어 있다.



<그림 4> 레이저-아크하이브리드 용접의 개요<sup>(18)</sup>

최근에는 이 용접 법에 관한 많은 연구가 진행되어 맞대기 용접에서는 이미 일반 상선의 거주 구획이나 기관실 구조에 적용되고 있다. 일본해사협회에서는 2009년 12월에 주로 맞대기용접에 관한 「레이저-아크 하이브리드용접 가이드라인」을 발행하였고 이어서 2015년 1월 동 가이드라인 제2보로 완전 용입 T이음에 관한 것이 추가로 발행되었다<sup>(11)</sup>.

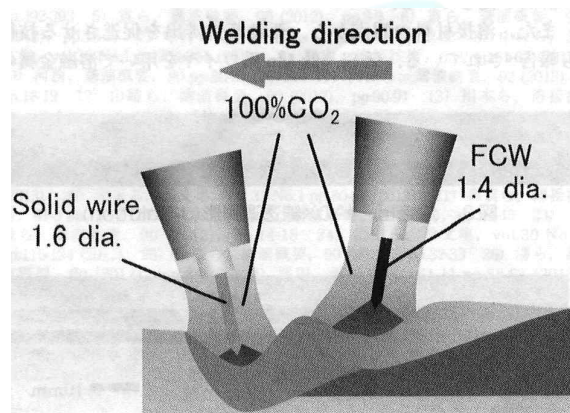
부분용입 T이음 (보통의 필릿 용접 이음)에 관해서는 검사방법 및 강도평가 방법이 아직 충분히 확립되어 있지 않아 검토가 진행되고 있다.

용접용 레이저 광원으로 파이버레이저는 급속히 고출력 화하여 최대출력 100kW의 연속 발전형 파이버레이저 장치 (형식;YLR10000; BPP(Beam Parameter Product)=25mm\*mrad, IPG사 제)가 개발되어 있다. 이 장치는 직경 0.3mmφ의 피딩 파이버(feeding fiber)와 0.5mmφ의 프로세스파이버(process fiber)로 50m 전송되어 초점거리  $f_c : 1m$ 의 가공 헤드(head)에 의해 약 1mm의 스폿에 집광될 수 있다. 파

이버레이저는 또한 이상적인 싱글 모드 발진의 10kw의 고출력의 기기도 시판되고 있다. 디스크레이저는 1kw로 직경 50 $\mu\text{m}\phi$ 의 파이버가 이용 가능한 것(BPP; 2mm\* $\text{mrad}$ )과 직경 0.2mm $\phi$ 의 파이버로 전송되는 최대 출력 16kw의 것(BPP; 8mm\* $\text{mrad}$ )이 시판되고 있다. 또한 반도체레이저는 전기-광변환 효율이 가장 높은 레이저로 직경 2mm $\phi$  파이버로 전송될 수 있는 최대 출력이 25, 40 및 50kw(200mm\* $\text{mrad}$ )의 기종이 시판되고 있다<sup>(12)</sup>. 한편 YAG레이저는 효율과 빔 품질 면에서 떨어져 최근에는 제조 판매되지 않는다.

### 3-2 하이브리드 탄뎀(hybrid Tandem) MAG 용접법

고능률의 MAG 용접법으로 탄뎀 MAG 용접법이 있다. 탄뎀 MAG 용접법은 용입의 개선, 전극간의 아크 간섭에 의해 증가하는 스패터 발생량의 억제가 과제이다. 하이브리드 탄뎀 MAG용접법은 탄뎀의 선행 전극에는 솔리드 와이어의 CO<sub>2</sub> 용접, 후행전극에는 플렉스 코어드 와이어 (이하 FCW)의 MAG 용접 또는 CO<sub>2</sub> 용접을 채용하고 있다. 하이브리드 탄뎀 MAG용접법의 개요를 <그림 5>에 보인다<sup>(13)</sup>.



<그림 5> 하이브리드 탄뎀 MAG용접법의 개요<sup>(13)</sup>

이 용접법에서 선행아크의 역할은 매몰아크에 의해 용적이행을 스프레이화 하여 용입을 깊게 하는 것이며 후행 아크의 역할은 선행아크에서 볼록(凸)하게 되는 비드를 억제하는 것이다. 아크의 간섭도 작고, 스패터 발생량을 재래의 탄뎀 아크용접과 비교해서 60% 줄일 수 있다는 것이 보고되어 있다<sup>(13)</sup>. 또한 이 용접법은 선행 아크로 용입 깊이를, 후행아크로 각장을 각각 독립해서 제어할 수 있다는 것이 큰 특징이다.

한편 조선 교량분야에서 블록 제작과정에서 방청목적으로 강판표면에 슛 프라이머 (shot primer)가 도포된다. 이러한 슛 프라이머가 도포된 강판을 아크 용접하는 경우, 아크열에 의해 도막이 열분해하고 증발하여 가스화 한다. 이러한 가스는 응고

과정에서 용접금속에 갇히게 되어 기공이나 피트(pit) 발생으로 연결된다.

하이브리드 탄뎀 MAG 용접법은 선행 아크의 매몰아크화로 용입을 깊게 함으로서 기공이나 피트의 발생을 억제할 수 있음이 밝혀져 있다<sup>(14)</sup>. Yuan은 선행전극의 토치각도를 최소 20°로 하고 후행전극의 토치각도를 45°로 하는 하이브리드 탄뎀 MAG 용접법을 개발하여 내 기공성과 심용입, 비드외관이 미려한 고능률, 고품질의 용접부를 얻었음을 보고하였다<sup>(14)</sup>.

### 3-3 컨테이너 선 용접 용 2전극 일렉트로 가스 용접 (Electro - Gas Welding, 이하 EGW)

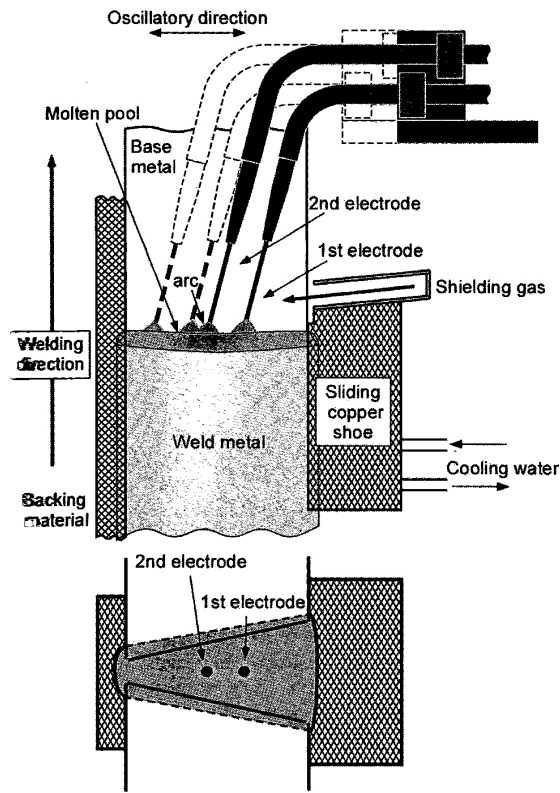
컨테이너선의 대형화와 더불어 사용되는 강판의 후육화에 대응하여 고능률 용접법인 EGW의 채용이 증대해 가고 있다. EGW 용접법의 장점은 입향 이음을 1 패스로 용접이 가능하고 이음부의 각 변형이 작다는 것이며, 또한 반자동용접과 같이 높은 기량을 필요로 하지 않는다는 것이다. 한편 대입열 용접이기 때문에 모재열영향부의 기계적 성질을 열화 시키기 때문에 용접 시는 강재의 특성을 충분히 확인할 필요가 있다. 또한 단 전극 EGW에서는 판 표면과 이면에서 완전 용입이 어려운 문제가 있다.

EGW의 능률을 더욱 개선하고 불완전 용입을 개선하기 위해 개발된 것이 2전극 EGW이다. 단(single)전극을 2전극화 함으로서 판 두께 50mm를 넘는 강판에서도 용합불량이 발생하지 않고 안정적인 용입이 얻어지게 되었다. 2전극 EGW는 2전극 모두 동시에 판 두께방향으로 습동 운동을 하는 방식과 한쪽의 전극을 그루브 이면 부근에 고정하고 또 다른 한쪽의 전극은 그루브 표면 근방에서 습동운동을 하는 방식의 두 종류가 있다.

<그림 6>은 2전극 모두 판 두께 방향으로 습동 운동을 하는 EGW의 모식도를 보인 것이다. 2 전극 EGW를 컨테이너 해치코밍 용접에 적용한 사례가 발표되어 있다<sup>(15)</sup>. EGW에 사용되는 용접와이어는 기본적으로 플럭스 코어드와이어로, 와이어를 구성하는 외피의 두께를 얇게 하여 줄(joule) 발열에 의해 와이어의 공급 속도를 높여 용착속도를 높이고 있다. 또한 대입열 용접이기 때문에 용접 후의 용접금속의 냉각속도가 느리게 되어 동일 정도의 MAG용 용접재료와 비교하여 용접금속의 합금성분이 많게 되도록 설계되어 있다. 많은 경우, 용접금속의 인성확보를 위해 Ti-B계의 용접금속으로 하여 미세한 침상 페라이트(accicular ferrite) 조직이 되도록 설계되어 있다<sup>(16)</sup>.

2전극 EGW에서는 2전극 모두 플럭스코어드와이어를 사용하는 경우와 1전극에 슬리드와이어를 사용하는 경우가 있다. 1전극에 슬리드와이어를 사용하는 경우는 용접 시에 발생하는 슬래그 량을 줄이는 효과가 있다.





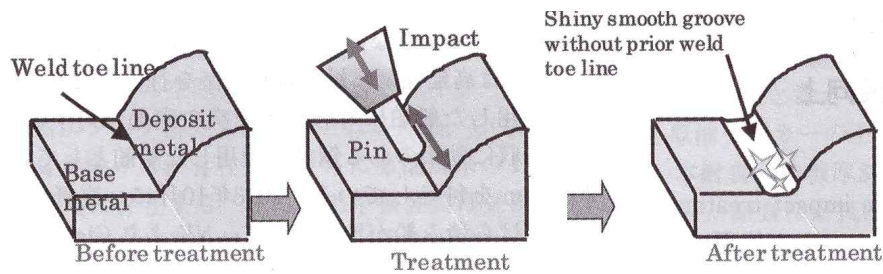
<그림 6> 2전극 EGW의 개요<sup>15)</sup>

### 3-4. 용접부의 피로강도 향상

UIT(Ultrasonic impact treatment)는 초음파 충돌장치에 의한 피닝(peening)처리의 일종으로 초음파 충격에 의한 충격력으로 대상물을 타격함으로써 대상물 표면에 소성유동을 발생시켜 타격부 부근에 압축잔류응력을 발생시키는 처리이다.

UIT는 그 편리한 시공방법과 용접 토우부의 피로개선 효과 때문에 각종 용접 구조물의 피로강도 향상 대책으로 적용이 확대되고 있다. <그림 7>은 UIT장치에 의한 용접 토우부의 피닝 공작 예를 보인 것이다<sup>9)</sup>.

조선 분야에서는 대형 광석운반선의 용접부에 적용하여 적용부위의 피로강도를 2배 이상으로 향상시킨 예나, 오래된 선박의 수명 연장 대책으로도 적용된 사례가 있다<sup>17)</sup>.



<그림 7> UIT장치에 의한 토우부의 피닝 공작<sup>9)</sup>

#### 4. 맺음말

조선용 강재는 고강도, 고인성, 용접성 개선의 방향으로 발전되고 있으며, 컨테이너선과 같이 선박의 대형화와 더불어 채용되는 강재는 더욱 후속화 하고 있다. 그리고 최근에는 선박에 관한 여러 가지 규제가 강화되고 있어서 이러한 규제 강화에 대응하여 고어레스트(high arrest)강, 내식강, 고연성강이 개발되어 조선, 해양구조물에 적용되고 있다.

또한 조선 용접기술은 능률 개선을 위해 CO<sub>2</sub> 자동용접의 적용확대, 로봇 채용, 강화되고 있는 규칙대응 용접재료, 탄뎀 SAW, 탄뎀 MAG 용접, 하이브리드 MAG 용접, 다전극 EGW 용접과 같은 고능률이면서도 용접결함 저감 용접법의 적용이 확대되고 있다. 그리고 레이저-아크 하이브리드용접이나 FSW용접법과 같은 새로운 공정이 대형 LNG선과 같은 특수선에 적용이 추진되고 있다. 아울러 용접부의 피로강도 향상을 위해 UIT(Ultrasonic Impact Treatment)에 의한 피닝 공작법이 개발되어 선박의 안전성 확보에 기여하고 있다.

그동안 침체기에 있던 세계의 조선 해양구조물 산업은 점진적으로 개선될 가능성이 높아지고 있다. 금후 조선 해양구조물 산업은 주로 우리나라와 일본, 중국의 세 나라가 중심이 되어 수주경쟁이 심화될 것이다.

이러한 환경에서 국내의 조선, 해양구조물 산업 경쟁력 강화를 위해서는 고강도, 고인성, 고내식, 고어레스트성 등 고성능의 조선용 강재 개발과 그 채용, 및 해외에서 새롭게 개발되고 있는 고능률, 저비용의 용접공정을 과감히 도입하여 생산성 향상노력을 적극적으로 경주해야 할 때이다.

## &lt;참고문헌&gt;

- 1) Metal & Welding Journal for Monthly, “Monthly Orders Report”, 2017, 5, (2017) pp46-53
- 2) IACS, “Requirement for Use of Extremely Thick Steel Plates”, UR, S33 (2013)
- 3) NK, Press release (2015)
- 4) Asia news agency, “포스코 세계최초 BCA 보증강 공급”. (2015) 2, 14
- 5) D. Yasunaga, K. Katoh, et.al., “Study on Cargo Oil Tank Upper Deck Corrosion of Oil Tanker”, World Marine Technology Conference, San Francisco, (2003)
- 6) K.Katoh, S. Imai, et.al., “Study on Localized Corrosion on Cargo Oil Tank Bottom Plate of Oil Tanker”, World Marine Technology Conference, San Francisco, (2003)
- 7) 古川, 鹿島,ほか, ふえらむ,20(10), (2015)pp 466-474
- 8) 伊藤, 鹿島,ほか, 新日鐵住金技報, 400, (2014), pp86
- 9) N. ODA, “New Technical Trend of Shipbuilding Steel”, Jnl. of Japan Welding Society, 86(2) (2017) pp80-84
- 10) The Society of Naval Architectures of Korea, “7th International Conference on Collision and Grounding of Ships and Offshore structures”, (2016) pp 215-223
- 11) Japan Welding Engineering Society, “Ship and Offshore Structure”, Jnl. of Japan Welding Society, 85(5) (2016) pp486-490
- 12) S. KATAYAMA, “Guideline for Development of Innovative Process -Laser Welding-”, Jnl. of Japan Welding Soc., 84(8) 2015. pp 582-590
- 13) T. ERA, “Arc Welding”, Jnl. of Japan Welding Society, 83(5) (2014) pp379-381
- 14) Y. YUAN, “Development of Hybrid Tandem GMAW Process”, Jnl. of Japan Welding Soc., 86(2) (2017). pp 90-94
- 15) k. Sasaki, “Welding Consumables for Electrogas Arc Welding Applied to Container Ships”, 86(2) (2017). pp 96-98
- 16) K. Sasaki, et al., “Development of welding materials for high heat input welding consumable with thick steel plates of 460MPa yield point class for very large container ships”, Welding in the World, Vol.54 (2010), R35-41
- 17) IHI, プレスリリース(2011)
- 18) J.D Kim, G.H Myoung, I.D Park, " Butt Weldability for SS400 Using Laser-Arc Hybrid Welding, Trans. Korean Soc. Mech. Eng.A, 40(7) (2016) pp667-672

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.