

조선·해양 부분의 강재 개발 동향 및 용접성

한일욱·박영환·안규백·안영호

Development Trends of Steel Plates for Ship Building and Off-Shore Construction and It's Weldability

Il Wook Han, Young Hwan Park, Gyu Baek An and Young Ho An

1. 서 론

최근 세계 인구의 증가와 생활경제의 성장으로 생활 수준이 향상되고 있으며, 세계적으로 대규모의 해상활동이 급격하게 증가 하고 있는 추세이다. 선박수요 또한 눈에 띄게 증가 하고 있으며, 2008년 말 시점에서 세계 선박수주량은 42백만CGT를^{1,2)} 넘었으며, 향후 100백만CGT를 넘을 것으로 기대하고 있다³⁾.

선박은 대량의 강재가 용접에 의하여 조립된 대형 용접구조물이다. 따라서 조선소에서는 종래의 용접효율을 향상시키기 위하여 각종의 조립방법을 제안하여 적용하고 있으며, 강재측면에서도 이러한 요구에 부합하여 신강종의 개발 및 새로운 용접재료의 개발이 이루어지고 있다. 또한 최근 선박의 대형화에 따라서 고강도 극후물재가 요구되고 있으며, 최근에는 항복강도가 460MPa급인 TMCP 고강도강이 개발되어 선박건조에 적용되고 있다⁴⁾.

한편, 이러한 고강도 극후물강재의 적용에 따라서, 해상운송에 대한 안전·환경의식을 높이기 위하여 IMO (International Maritime Organization: 국제해사기관)를 중심으로 선박관련 규제가 강화 되고 있다. 이러한 환경변화와 함께 선박에 적용되는 강재에 대한 요구조건 또한 더욱 엄격하게 적용 하고 있는 것이 현실이다. 뿐만 아니라, 세계선급협회에서는 새로운 고강도강의 출현에 따른 안전성의 평가와 보다 안전한 선박의 건조를 위한 새로운 선급규정의 제정을 검토 중에 있으며, 특히 항복강도가 460MPa급인 TMCP 고강도강의 실선 적용에 따른 고강도의 파괴안전성, 피로강도 문제 등에 많은 관심을 가지고 NK⁵⁾, GL⁶⁾, ABS⁷⁾ 등의 선급협회를 중심으로 신 강재에 대한 새로운 선급규정이 만들어 지고 있다⁸⁾.

한편, 해양구조물의 경우는 최근 두 가지 측면의 환경변화에 대응해서 발전 해 나가고 있다. 첫째 근해의

석유 및 천연가스 자원의 고갈에 따른 심해저의 자원 개발이 증가하고 있다. 따라서 해양구조물의 형태가 고정식에서 부유식으로 변화하고, 이에 따라 해양구조물의 경량화 및 대형화 요구와 함께, 요구되는 강재 또한 고강도화 되어서 YS 345Mpa 급 강재뿐만 아니라 YS 420 및 460Mpa급 강재까지 사용되고 있다. 둘째 극저온 지역에서의 자원개발이 증가하고 있다. 따라서 사용되는 강재는 높은 저온 인성이 요구되며, 특히 모재의 경우는 -60℃에서, 용접열영향부의 경우는 -40℃에서의 CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 특성이 요구되고 있다. 최근에는 일부 극지방에 사용되는 강재의 경우 용접열영향부에 대해서 까지도 -60℃의 CTOD 특성을 요구하고 있다⁹⁾.

본 논문에서는 이처럼 조선 및 해양 구조물에 사용되는 강재가 사용 환경의 변화에 따라서 고인성 고강도강재가 요구되므로, 조선 및 해양구조용 강재의 지금까지 개발현황 및 최근 이슈가 되는 용접부에서 요구되는 특성에 대하여 기술하고, 다양한 강재의 개발과 함께 개발된 용접재료의 개발현황 및 요구특성에 대하여 소개하고자 한다.

2. 조선용 강재의 개발 동향

조선산업에서 사용되는 철강 소재는 선체구조용 강재, 보일러용 강재, 압력용기용 강재, 형강, 각종 강관, 주조단조강 및 비철 합금이 있으나, 선체구조용 후판의 사용량이 그림 1에서와 같이 압도적으로 많다¹⁰⁾. 선박의 운항에 있어서 선박의 안전성을 확보하기 위해서는 선체에 사용되는 강재, 특히 후판의 강도, 인성, 용접성은 중요하다고 할 수 있다. 선체구조용강의 강도 규격은 항복강도를 기준으로 235MPa급인 연강과 315, 355, 390, 460MPa급의 고장력강으로 구분되는데, 표 1에는 조선용 고강도강의 품질 요구사항⁸⁾을 나타낸

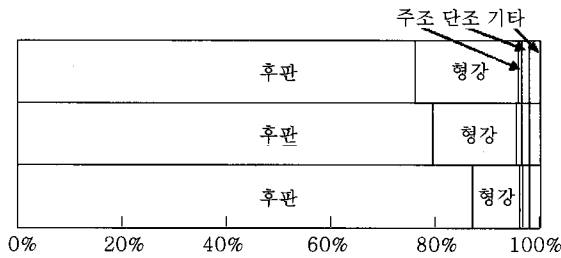


그림 1 선종별 강재 사용 비율¹⁰⁾

표 1 조선용 강재의 품질 요구사항⁸⁾

Grade	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Impact Energy 1) (average, J)
A, B, D, E	≥ 235	400~520	≥ 22	≥ 27
A32, D32, E32, F32	≥ 315	440~570	≥ 22	≥ 31
A36, D36, E36, F36	≥ 355	490~630	≥ 21	≥ 34
A40, D40, E40, F40	≥ 390	510~660	≥ 20	≥ 41
E47	≥ 460	570~720	≥ 17	≥ 46

것이다.

최근 선박의 대형화에 따라서 항복강도 460MPa급의 새로운 고강도강이 등장하게 되었으며, 고강도 극후물화에 따른 용접부의 피로와 취성과파괴 등의 문제점이 제기되고 있으며, 이러한 문제점들을 규명하기 위한 연구가 한국 및 일본 연구자들을 중심으로 활발하게 진행되고 있다¹²⁾. 선박구조물의 파괴안전성을 확보하기 위해서 모재 및 용접부에서는 정의된 시험온도에서 일정 값 이상의 충격인성 특성이 요구된다. 고강도강의 적용은 선체구조의 경량화 등에 유리하다고 할 수 있지만, 고강도화에 따른 위험요인과 단점이 있기 때문에 피로강도 확보를 위한 설계기술, 파괴인성확보, 강재비용등을 종합적으로 고려하여 판단해야 한다.

조선용 강재에서는, 연강을 제외하고는 항복강도가 320MPa급 이상의 강재를 고강도강(Higher Tensile Strength Steel)이라고 부른다. 고강도강은 1960년대 중반 이후 Microalloying기술을 시작으로 고강도강의 사용이 시작되었으며, 1980년대에 TMCP (Thermo Mechanical Control Process: 열 가공제어) 기술이 개발된 이후 고강도화가 급속히 진행되어 최근에는 고강도강의 비율이 60~80% 정도에 이르렀다^{8,13)}. 이것은 연강에 비하여 가공성, 용접성이 우수하기 때문에 조선용 강재에 있어서 단시간에 고강도화가 진행 되었

다고 생각된다. 따라서 본 논문에서는 여러 종류의 조선용 강재 중에서 조선산업의 발전에 크게 기여한 TMCP기술의 적용에 의해 개발된 고강도강에 대하여 중점적으로 기술 하고자 한다.

2.1 TMCP 기술의 개발

TMCP기술은 일본에서 처음 개발된 기술로 1970년대 후반부터 개발이 진행되어 1980년대 한국과 일본의 제철소에서 후판이 TMCP 기술로 생산되기 시작 되었다⁴⁾.

TMCP기술은 주로 열처리와 추가적인 합금 첨가 없이 후판 제조과정에서 상변태와 미세조직을 제어함으로써 강도와 인성을 동시에 향상시키는 기술이다. TMCP의 경우는 원하는 오스테나이트 조직을 얻기 위해서 가열온도와 압연온도를 정밀하게 제어하는 한편 압연 후에 냉각을 정밀하게 제어함으로써 목적하는 미세조직과 물성을 얻게 된다. 즉 TMCP기술은 목적하는 물성과 조직을 얻기 위해서 가열, 압연, 냉각의 전 과정을 통하여 오스테나이트 조직과 상변태를 제어하는 야금학적인 기술이다. 이러한 과정에 의하여 생산된 TMCP강재는 열처리에 의해서 제조된 강재에 비해서 낮은 온도에서 충격인성이 매우 우수하며, 이는 TMCP에 의해서 매우 미세한 조직을 얻은 것에 기인한 결과이다. 그림 2는 항복강도 360MPa 급 EH강재에 대한 열처리 강재와 TMCP강재의 충격전이 온도를 비교한 것이다⁸⁾. TMCP기술은 합금첨가와 열처리 없이 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있으며, 결과적으로 용접성과 인성이 우수한 후판을 제조할 수 있었기 때문에 20여 년 전부터 TMCP강이 실선에 적용되어 조선산업 발전에 크게 기여 하였다고 할 수 있다.

2.2 TMCP강의 특징

TMCP강은 그림 3에 나타낸 프로세스 변화에 의하여 생산된다¹⁵⁾. 종래의 후판제조방법에서는, 강재의 강

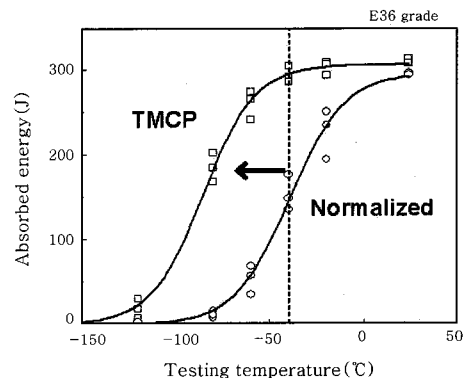


그림 2 TMCP와 normalizing의 충격전이 비교⁸⁾

도는 Ceq(Carbon Equivalent: 탄소당량)로 대표되는 화학 성분에 의해서 거의 결정되었다. 그러나 TMCP 기술에서는 제어압연에 계속되는 가속냉각에서 강도를 상승시키는 것이 가능하고, 동일한 강도의 강판을 낮은 Ceq로 제조 하는 것이 가능하게 되었다. 일반적으로 강재의 용접성은 Ceq의 증가에 따라서 저하하기 때문에 종래의 고장력강에서는 소입열 용접 시에도 최고 강도가 상승하거나, 예열처리가 필요 하였다. 그러나 TMCP형 고강도 강에서는 낮은 Ceq로 제조 가능하기 때문에 이러한 문제는 발생하지 않는다. 이러한 TMCP형 고강도강은 강도, 인성이 우수하고 예열 없이 용접이 가능하므로, 조선소의 용접시공효율 향상에 크게 공헌 하였다고 생각 한다. 또한 TMCP형 고강도강은 높은 용접입열량에서도 용접부의 충격인성 열화가 적기 때문에 용접 입열량을 크게 높일 수 있다. 따라서 TMCP로 제조된 고강도 후판은 일반적 제조공정에 의해서 제조된 후판에 비해서 용접 Pass수를 줄임으로써 용접생산성 측면에서도 상당한 진보를 가져왔다¹⁶⁾.

조선용 강재에서는, 모재뿐만 아니라 용접부의 인성도 보증하지 않으면 안 된다. 일반적으로, 용접부의 인성은 모재의 요구온도 보다 20℃고온 이기 때문에 D grade강재에서는 0℃, E grade강재에서는 -20℃에서 인성이 요구된다. 용접부의 HAZ는, 용접시의 열에 의하여 1450℃ 정도까지 고온으로 되기 때문에 조직이

조대화 되어서 인성이 떨어지기 쉽다. 또한, 용접입열이 크게 되고 더욱 낮은 온도에서 인성을 요구하게 된다면, HAZ부에서의 인성확보는 더욱 어렵게 된다. 이러한 문제점에 대하여 한국, 일본 등의 각국의 제철소에서는 TMCP강의 성분설계의 최적화를 실시하고 HAZ의 조직 조대화 방지를 위하여 TiN의 활용, Ti-B강의 채용 등 여러 가지 대책이 제안되고 있으며, 활발하게 연구가 진행 중에 있다.

3. 해양구조용 강재의 개발 동향

해양구조물이란 해상 또는 해저에 설치되는 구조물을 통칭하여 사용하는 용어이나, 주로 석유 및 천연가스 등의 에너지원의 탐사와 채취 및 레저, 항만, 환경 시설 등으로 이용되는 구조물을 지칭한다. 특히, 석유 및 천연가스 등 에너지원의 탐사와 채취에 이용되는 구조물은 수심 300m 미만에서 주로 사용되는 고정식(Fixed) 구조물과 수심 300m 이상에서 사용되는 부유식(Floating) 구조물로 나눌 수 있으며, 대표적인 고정식 및 부유식 해양구조물의 기능과 강재 소요량은 표 2와 같다. 선박의 경우는 항구에 입항하는 경우를 비롯하여, 5년 1회의 전체적인 검사 및 보수가 규정화 되었던 반면, 해양구조물은 설치된 장소의 가혹한 환경에서 큰 보수 없이 20년 이상 가동을 요구하고 있기 때문에 구조물에 사용되는 강재 및 용접부는 엄격한 요구조건을 만족해야 한다.

해양구조물 중 이동식 구조물에 사용되는 강재는 주로 위에서 설명한 조선용 강재와 동일하게 각국의 선급협회 규격을 따르고 있으나, 고정식 구조물에 사용되는 강재의 경우에는 미국석유협회(API), 영국 에너지성(DOE) 또는 유럽의 EN 규격 등, 석유 및 에너지 관련 국가기관 혹은 단체의 규격을 따르고 있다. 표3은 미국석유협회(API)에서 제시하고 있는 해양구조용강을 제조법 및 항복강도에 따라 분류한 것이다¹⁷⁻¹⁹⁾. 강재의

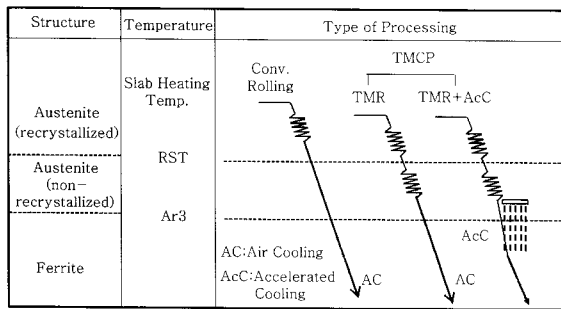


그림 3 TMCP 제조 방법¹⁵⁾

표 2 대표적인 고정식 및 부유식 해양구조물의 주요기능 및 강재소요량

수 심	Type	주 요 기 능	강재소요량(천톤)	
300M 미만	Fixed	Jack-up Rig	석유 탐사, 시추	40~60
		Jacket / CPT	시추, 생산, 정제	40~60
		GBS (Artic)	시추, 생산, 정제	8~15
300M 이상	Floating	Semi-submersible(FPU)	시추, 생산, 정제	35~50
		TLP	생산, 정제	8~15
		SPAR	생산, 정제, 저장	15~25
		FPSO	생산, 정제, 저장, 하역	27~60

표 3 제조법 및 항복강도에 따른 해양구조용강 분류 예 (API)

제조법	표기	항복강도, ksi (MPa)			
		42 (290)	50 (345)	60 (420)	
Normalizing	2H	2H-42	2H-50	-	-
QT	2Y	2Y-42	2Y-50	2Y-50T	2Y-60
TMCP	2W	2W-42	2W-50	2W-50T	2W-60

표 4 TMCP형 해양구조용강의 요구성능 예(API)

규격	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	충격인성 (J, -40℃)
API 2W-42	290~	≥ 427	≥ 24	≥ 34
API 2W-50	345~483	≥ 448	≥ 23	≥ 41
API 2W-50T	345~483	≥ 483	≥ 23	≥ 41
API 2W-60	414~586	≥ 517	≥ 22	≥ 48

제조법에 따라 API 2H는 노말라이징 열처리, 2Y는 QT(Quenching and tempering) 열처리에 의해 제조된 강재이며, 2W는 TMCP에 의해 제조되는 강재이다. 표 4는 표 3에서 분류한 해양구조용강 중 TMCP로 제조되는 강재의 항복강도 수준별 요구성능을 표시한 것이다. 표 3 및 표 4의 규격은 각 강재가 기본적으로 만족해야 하는 일반규격이며 해양구조물 제작 프로젝트의 특성에 따라 요구사항(Supplementary requirements)이 추가된다. 대표적인 추가요구사항은 -60℃ 충격인성보증, z방향인장보증, PWHT(Post Weld Heat Treatment) 물성보증 및 DWT(Drop Weight Test)보증 등이 있다.

4. 조선 및 해양용 강재의 용접재료 및 용접부 요구 특성

전장에서는 조선 및 해양용 강재의 개발현황 및 특성에 대하여 기술 하였다. 개발된 강재를 선박과 해양구조물에 적용하기 위해서는 접합에 의하여 구조물을 구성하며, 접합을 위해서는 강재의 성질과 잘 일치되는 용접재료를 필요로 하게 된다. 한편, 강재가 충분한 성능을 갖고 있다고 하더라도 적용되는 용접재료와 용접 프로세스에 의해서 구조물의 용접부에서는 충분한 성능을 나타내지 못하는 경우도 있다. 따라서 강재의 용접에 사용되는 용접재료의 성능과 강재 맞춤형 용접재료의 개발은 중요하다고 할 수 있다. 본 장에서는 조선 및 해양구조용 강재의 용접에 적용하기 위한 용접재료의 개발현황과 최근의 선박 및 해양구조물에서 요구특성 및 그것에 대응하기 위한 노력에 대하여 기술한다.

4.1 조선용 강재의 용접재료 개발 특성 및 현황

조선용 강재에 있어서 용접재료의 개발은 조선산업에서의 요구를 수렴하는 방향으로 진행되어 왔으며, 그 중 플럭스 코어드 아크 (Flux Cored Arc) 용접재료는 1980년대 초반 국내에 도입된 이래 현재 선박건조시 전체 용접 길이를 기준으로 80%이상을 차지하는 중요한 용접재료로 성장하였으며, 서브머지드 아크 (Submerged Arc) 용접재료의 경우도 10%대를 꾸준히 유지해오고 있다²⁰⁾. 그림 4는 플럭스 코어드 아크 용접재료에 대한 시장의 요구사항을 정리한 것으로 2000년대 이후 용접재료의 개발은 크게 고효율화(고속, 고능률화), 고성능화(고강도, 고인성화), 친환경화(저Spatter, 저Fume화)로 진행되고 있음을 알 수 있다. 최근 지속적인 선박의 건조 수량 증가에 따라 새로운 건조 공법의 개발과 고속 자동설비 등의 도입을 통한 용접생산성의 향상이 추진되어옴에 따라 고효율, 고성능의 용접재료 개발도 다양하게 요구되고 있는 실정이다. 특히 선박의 건조 공정에서 전체 용접부의 70%정도를 차지하는 프라이어 도포강판의 필렛(Fillet) 용접부에 대한 고속화, 고효율화, 고품질화를 추구하는 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 20여 년 전 단일전극의 플럭스 코어드 아크 용접재료를 이용해 800mm/min 정도에 머물렀던 용접속도가 TOP (Twin-Tandem One Pool)용접법의 적용을 통해 1,500mm/min로 약 2배 증속되었으며, 최근에는 그림 5와 같이 용접속도를 2,000mm/min이상 고속으로 수평Fillet 용접이 가능하도록 Filler Wire를 선, 후행 전극 사이에 삽입시켜 고용착및 용융지 안정화를 도모한 새로운 TOP시공법과 전용 메탈계 플럭스 코어드 와이어의 개발에 관한 연구도 보고되고 있다^{21-23,29)}. 한편, 1Pass 필렛 용접으로 상, 하부 각장이 동일한 8mm이상의 대각장 용접이 가능하도록 용융풀의 물성을 제어한 용접재료도 실용화되어 있다²⁴⁾. 또한 플럭스 코어드 아크 용접재료의 Seamless화 제조를 통해 일정한 아크의 발생과 용접 팁(Tip)의 내마모 성능향상으로 장시간의 아크 용접에서도 아크를 안정적으로 발생/유지시켜 자동화 및 로봇 용접으로 적용성능을

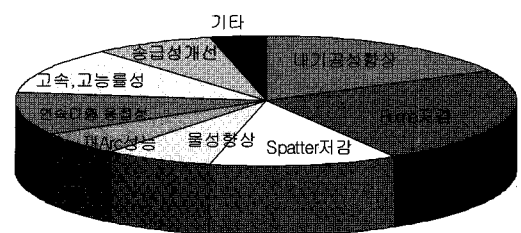


그림 4 탄소강용 플럭스 코어드 아크용접재료에대한 시장요구²⁹⁾

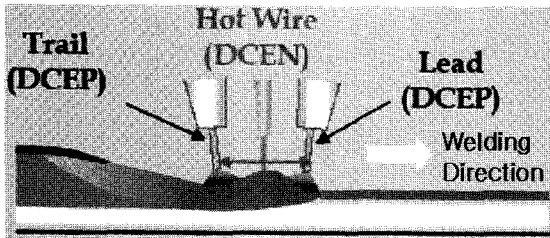


그림 5 New TOP(Twin-Tandem One Pool)법의 용접 개요²²⁾

향상시킨 Seamless 플럭스 코어드 와이어²⁵⁾와 용융금속 및 슬래그의 점성 및 표면장력을 조정하여 루트간격이 큰 접합부에 대해 고전류로 입향 상진용접이 가능하도록 내Gap성을 향상시킨 고능률 입향상진 전용 용접재료(YFW-C500R) 등의 개발로 향후 고능률화에 대한 다양한 솔루션을 제공하게 될 것으로 기대된다²⁴⁾. 한편, 컨테이너선 등 선박의 대형화와 함께 고강도 극후물화가 고려되는 부재의 용접 생산성을 높이기 위한 Single 및 Tandem용 대입열 일렉트로 가스(Electro-Gas)용접도 활발히 진행되고 있다. EH40 Grade의 대입열 용접에서 물성저하를 고려해 설계된 TMCP강재 및 용접재료가 이미 적용중에 있으며²³⁾, 최근 EH47 강재의 개발과 더불어 강재가 요구하는 고강도, 고인성의 확보가 가능한 일렉트로 가스 용접재료의 연구도 활발히 이루어지고 있다²⁶⁾. 자동 용접 프로세스인 서브머지드 아크(Submerged Arc) 용접에서는 기존의 선급용 강재에 적합한 단, 다층용 용접재료의 개량과 25mm 이상 A~EH 강재의 대조립 및 판제라인 일면 용접법인 FAB(Flexible Asbestos Backing)법, FCB(Flux Cu Backing)법에 Cut Wire 및 Iron Powder 등의 재료들을 조합해 용접이 가능하도록 설계된 용접재료들의 개발도 활발히 이루어져 오고 있다²⁷⁾.

4.2 조선용 강재의 용접부 요구 특성

최근 선박의 대형화에 따라서 고강도 극후물강재의 사용이 증가 하고 있다. 특히, 컨테이너선 벌크캐리어와 같은 대형 선박에는 YP470MPa급의 70mm 이상 강재가 적용되고 있다. 이처럼 선박의 고강도 및 극후물화가 진행됨에 따라 선체구조물의 피로문제, 파괴인성 특성에 관하여 IMO(International Maritime Organization)에서는 규제를 강화하는 것과 함께 강재에 대한 요구도 변화하고 있다. 특히, 최근 벌크캐리어의 안전문제, 탱커의 원유 유출사고를 계기로 탱커의 부식문제, 피로문제가 부각되고 있으며, 컨테이너선의 대형화에 따른 고강도강의 극후물재에 대한 취성파괴

문제 또한 큰 주목을 받고 있는 실정이다.

부식의 경우에는 선박의 수명을 결정하는 중요한 요소인데 과거에는 도장에 의한 부식을 억제하는 것이 유일한 해결 수단이었지만, 최근에는 강재의 내식성을 향상시키기 위한 노력이 이루어지고 있다. 내부식강의 개발은 도장이 어려운 부위 또는 특수한 환경에서 부식을 억제하는 방향으로 진행되고 있다. 한국과 일본의 철강사들은 각사의 고유한 방법으로 Pitting부식을 일반강의 4배 이상 억제 할 수 있는 후판을 개발진행중에 있으며, 일부는 개발 강을 실선에 적용하고 있다. 이외에도 Water Ballast Tank에 적용할 수 있는 내해수부식강 등은 향후 개발이 필요한 내식강이다.

TMCP의 발전과 함께 고강도화가 급격하게 진행되었으나, 1980년대 후반에 건조된 Single Hull VLCC에서는 피로균열손상이 발생하였다. 이것을 계기로 설계의 단계에서 피로에 대한 고려를 충분히 하게 되고, 현재에는 고강도강을 사용 시에는 고정도의 구조해석에 의한 피로강도평가가 실시 되고 있다. 일반적으로 피로균열은 용접부에서 발생하기 쉽고, 강재의 강도를 높여도 용접부에서의 피로강도는 상승하지 않는다는 것은 잘 알려졌던 사실이다. 그러므로 용접부의 피로강도 상승에는 용접비드의 형상개선을 목적으로 비드의 소거 및 종단부의 그라인딩 등의 용접시공상의 공법이 거론되고 있다. 한편, 일본의 Sumitomo금속에서 개발한 FCA (Fatigue Crack Arrest)강은 모재의 피로균열 전파속도를 감소시킨 강으로써 LNG선등의 피로 부재에 실제 적용되고 있다. 또한, 최근에는 탱커, 벌크캐리어의 구조기준에 관한 선박규칙의 통일화(CSR: Common Structural Rule)가 진행되고, 가장 열악한 조건을 갖는 북대서양에서 25년의 수명 확보가 요구되고 있다. 이것으로부터 피로강도의 요구는 점점 강화될 것으로 생각된다. 향후 선박설계, 용접시공, 강재개발을 포함한 종합적인 검토가 필요할 것으로 생각 한다.

한편, 대형 컨테이너선에서는 6,000TEU을 넘게 되면 Hatch side coaming 등에서는 일반적으로 EH40 (YP390MPa급) grade강재의 50mm를 넘는 강재가 사용되고, 극단적인 경우에 있어서는 100mm를 넘는 두께의 강재의 설계까지도 하게 된다. 이처럼 두께의 증가를 막기 위하여 최근에는 EH47(YP460MPa) grade 강재가 개발되어서 13,000TEU 급 컨테이너선의 Hatch side coaming 에 75mm의 강재가 적용될 예정에 있다. 이러한 경우에 고강도 극후물화된 강재의 용접부에 있어서는 취성균열에 대한 방지 능력을 갖지 못한다고 하는 보고들이 발표되었으며^{12,28)}, 일본(NK)⁵⁾, 미국(ABS)⁶⁾, 독일(GL)⁷⁾ 등의 선급협회에서는 새롭게

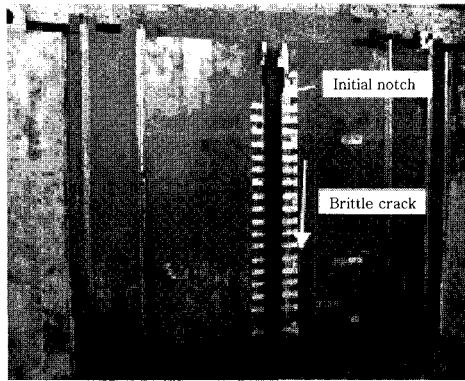


그림 6 용접부에서의 취성균열 전파 시험 결과¹²⁾

개발된 고강도강인 EH47강재(YP460MPa급)에 대한 새로운 규정의 제정에 있어서, 이러한 취성균열을 방지하기 위한 여러 가지 규정을 제정하고자 검토를 진행 중에 있다. 이에 대응하여, 한국과 일본의 조선사 및 철강사를 중심으로 취성균열 관련연구가 활발하게 진행되고 있으며, 균열정지에 대한 방안들도 제안되고 있다. 그림 6에서는 NSC에서 실시한 고강도 TMCP강재에 대한 대입열 용접부에서의 취성균열이 발생하여 전파된 시험결과이다¹²⁾. 이처럼 한번 발생된 취성균열을 정지 시키기는 어렵기 때문에 취성균열정지 성능이 우수한 강재의 개발이 제안되고 있다. 뿐만 아니라, 취성균열을 정지 시키기 위한 기술개발이 한국을 비롯하여 일본 등에서 활발하게 진행되고 있으며, 향후 지면을 통하여 소개할 기회를 갖고자 한다.

4.3 해양구조용 강재의 용접재료 개발 현황 및 특성

해양구조물의 용접에는 YP320~420MPa급, 460~500MPa급 및 690MPa급의 고강도강용 용접재료가 폭넓은 적용된다. 가혹한 환경에 사용되는 고강도강재는 해양구조물 특유의 설계요구를 만족시키기 위한 품질사양 즉, 저온인성에 대한 요구가 엄격하게 요구되기 때문에 해양구조물의 용접에는 저온인성의 확보가 가능한 용접재료가 주로 적용된다. 해양구조물용 용접재료의 대부분이 -60℃ 정도까지의 샤르피 충격 인성과 -10℃ 이하에서의 CTOD가 요구되며, 최근 -20℃, -40℃, -60℃의 저온 CTOD를 요구하는 해양공사도 증가하고 있다²⁰⁾.

이러한 고강도강재의 저온인성 확보를 위한 용접부의 기본적인 성분설계는 용접금속의 저산소화와 함께 용접금속조직의 미세화가 필요하다. 이에 대한 수단으로 표 5에서 제시하고 있는 것처럼 YP550MPa 이하에서는 주로 Ti-B 복합첨가, YP600MPa 이상에서는 주로 Ni

표 5 강도별 인성향상 수단³⁰⁾

Items	Strength level	
	YS 500MPa급 이하	YS 600MPa급 이상
Strengthening matrix	Ni 첨가	Ni 함유량 증가
Refining microstructure	Mo첨가, 산소량 감소	산소량 감소
Acicular ferrite 조직 형성	Ti, B 복합 첨가	핵생성 site첨가 (Ti-oxide)

의 첨가를 통해 조직의 미세화를 실현하고 있다.

Ti-B 복합첨가에 의한 인성 향상수단은 CTOD를 비롯한 고인성 요구에 대응하기 위해 1980년대 초에 개발, 실용화가 이루어져 왔으며, 현재 YP550MPa급 이하의 다양한 용접재료에서 채용되고 있다. Ti-B 복합첨가에 의한 조직미세화의 메커니즘은 고용 B의 구오스테나이트 입계에서의 편석(Segregation)에 의한 초석 페라이트(Pro-eutectoid Ferrite) 생성 억제작용과 Ti 산화물에 의한 오스테나이트 입내에서의 페라이트 핵생성에 의해 미세 페라이트를 생성하는 것에 기인한 것으로 알려져 있다³⁰⁾. 용접재료별로 살펴보면, 서브머지드 아크 용접재료의 경우 플럭스의 염기도를 증가시켜 용접금속의 산소량을 600ppm 수준에서 250~300ppm 까지 저감시킴과 동시에 Ti, B 를 플럭스에 복합 첨가하여 용접부의 고인성을 확보하고 있으며, 전 자세 용접성을 고려하여 산성계의 TiO₂, SiO₂가 주요 플럭스 성분인 티타니아계 플럭스 코어드 아크 용접재료의 경우에는 용접금속 내부에 산소가 다량 잔류하게 되어 저온인성의 확보가 어렵게 되므로 Ti, B외에 Ni을 일정량 첨가한 Si-Mn-Ni-Ti-B계로 설계하여 용접금속의 고강도, 고인성화를 달성하고 있다³¹⁾.

그림 7은 용접금속의 산소량 및 Ti량과 인성의 관계를 나타낸 것이다³¹⁾. 용접금속의 산소량에 따른 최적의 Ti량을 설정하는 것이 매우 중요한 것임을 알 수 있다. 이러한 용접금속의 미세성분의 조절을 위한 용접재료의

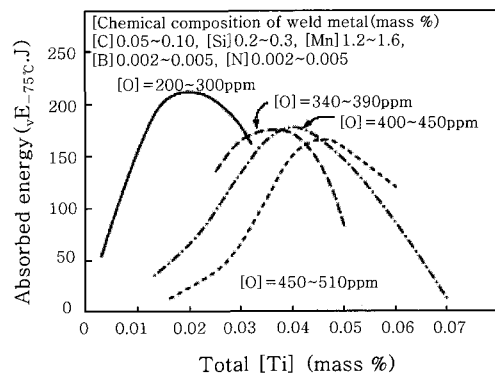


그림 7 인성에 미치는 용접금속의 Ti 및 산소량의 영향³²⁾

성분을 설계하는 것은 용접재료의 개발에 있어 매우 중요하며, 대부분의 Ti-B계 용접재료는 Ti, B를 포함한 첨가 성분들의 편석 정도와 용접금속의 산소, 질소 및 불순물 등의 반응을 충분히 고려하여 설계, 제조 되어져야 한다.

한편, YP600MPa급 이상 용접금속의 미세조직은 베이나이트~마르텐사이트이며, 페라이트 미세화 기술인 Ti-B계는 거의 적용하지 않고 있다. 용접금속 화학성분은 C-Si-Mn-2.5~3.5%Ni(-Cr)-Mo계가 채용되며, 피복 아크 용접재료와 가스메탈 아크 용접재료의 경우 저 C, 고 Ni계로 설계하여 용접금속의 고강도 및 고인성화를 시도하고 있으며, 서브머지드 아크 용접재료의 경우 용접금속중의 산소함량을 최소화하기 위해 고염기성의 소결형 플럭스와 고 Ni계 와이어가 조합하여 고강도 및 고인성화를 달성하고 있다³⁰⁻³²⁾.

고인성화와 더불어 구조물의 대형화, 고강도화 추세가 두드러진 해양강재의 용접에서는 용접 이후 용접부에 잔류하는 확산성 수소량 및 용접부 구속도와 조직의 경화도 등이 복합적으로 작용하여 HAZ 및 용착금속에 저온균열(cold crack, 수소유기 균열)을 일으키게 된다. 용접재료 측면에서는 용접재료의 저수소(Low Hydrogen)화를 적극 추진하여 후판, 고강도 용접부에서의 균열을 억제하고 예열온도를 최소화하는 연구가 진행되어 왔다. 특히 플럭스를 사용하는 용접재료인 경우, 사용 플럭스의 흡습능과 탈수소성분의 첨가 정도에 따라 용접금속의 확산성 수소량이 변화하게 되므로 피복아크 용접재료의 피복제 및 서브머지드 아크 용접용 플럭스에 대한 저흡습화 및 저수소화 설계가 동시에 시도되어 오

고 있다. 플럭스코어드 와이어의 경우 티타니아계 용접재료의 특성을 기본적으로 유지하면서 용접부의 탈수소화 설계 및 용접재료의 흡습 억제를 통해 2~3ml/100g 수준으로 용접금속의 확산성수소량을 저감시킨 인장강도 600Mpa급 이하의seamless 용접재료도 상용화되어 적용되고 있다^{25,33)}.

4.4 해양구조용 강제 용접부 요구 특성

해양구조용 강재는 가혹한 해양 환경에 장기간 노출되어 사용되며, 주로 후물재의 강재가 사용되기 때문에 요구되는 모재 및 용접부의 품질기준도 다른 일반 후판 강재에 비해 매우 까다로우며, 특히 용접부의 취성과파괴에 대한 높은 저항성을 요구하고 있다. 그림 8은 대표적인 부유식 구조물인 TLP(Tension Leg Platform)

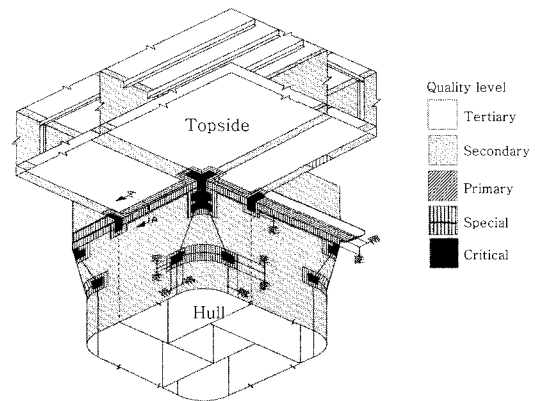


그림 8 TLP(Tension Leg Platform)의 Topside와 Hull의 연결부위의 요구품질 등급(예)

표 6 해양구조물의 부위별 Quality Level에 따른 인성 요구치(예)

Quality Level	인성 요구치			
	구분	Base Metal	Weld Metal	F. L & HAZ
Tertiary	CVN (J)	X	≥27(-10oC)	X
Secondary	CVN (J)	≥50(LAST-10)	≥50(LAST-10)	≥50(LAST)
Primary	CVN (J)	≥50(LAST-20)	≥50(LAST-20)	≥50(LAST-10)
	NDT (°C)	< LAST	-	-
Special	CVN (J)	≥50(LAST-30)	≥50(LAST-30)	≥50(LAST-20)
	NDT (°C)	< LAST-28	-	-
	CTOD (mm)	≥0.38(LAST-20)	X	X
Critical	CVN (J)	≥50(LAST-30)	≥50(LAST-30)	≥50(LAST-20)
	NDT (°C)	< LAST-28	-	-
	CTOD (mm)	≥0.38(LAST-20)	≥0.38(LAST)	≥0.38(LAST)

FPU : Floating Production Unit LAST : Lowest Anticipated Service Temperature
 NDT : Null Ductility Temperature (in DWT test) CTOD : Crack Tip Opening Displacement

의 Topside와 Hull의 연결부위의 요구품질 등급의 일 예를 나타낸 그림이다. 여기서 각 부분의 구분은 표 6에 나타낸 바와 같이 구조물의 응력집중 정도와 국부 파괴 발생시 전체 구조물의 파손에 미치는 영향도를 고려하여 5가지의 등급으로 구분하여 나타낸다. 특히 중점관리(Special) 및 특별관리(Critical) 부분은 표 6에 나타낸 바와 같이 충격인성 뿐만 아니라, 모재 및 용접부에 대한 저온 CTOD(Crack Tip Opening Displacement) 특성 등을 엄격히 요구하고 있다.

해양구조물에서 일반적인 파괴 양상은 용접 접합부에 있는 용접 결함으로부터 피로균열이 발생하여 어떤 임계크기로 전파한 후 취성파괴가 일어난다. 그 전형적인 예가 1980년 북해 Ekofisk에서 가동 중이던 반잠수식 해양구조물 Alexander L Kielland의 전복 사고이다. 용접부 결함은 고온 균열, lamellar tearing 및 저온 균열이 있다. 고온 균열은 용접재료에 의해서 크게 영향을 받으며 과전류를 피하고 용접속도가 매우 빠르지 않으면 피할 수 있는 것으로 알려져 있다. 한편, lamellar tearing은 비금속 개재물과 중심 편석에 의해서 발생되지만 현재는 탈황 기술과 개재물과 편석제거 기술이 상당한 수준에 있으므로 크게 문제되지 않고 있다. 저온균열은 수소량, 용접구속 응력 및 HAZ 경화 조직의 3가지 조건이 충족되면 발생한다. 따라서 수소 함량이 적은 용접재료의 사용, 개선각 개선에 의한 구속응력 감소 및 용접예열 등에 의해서 억제할 수 있다. 그러나 보다 근본적인 해결 방법은 강의 성분을 조절함으로써 용접 HAZ 부에서 경화조직인 마르텐사이트를 억제하는 것이다. 특히, C_{eq} 가 정성적 정량적으로 저온 균열 감수성과 매우 밀접한 관련이 있기 때문에 API 규격에서도 C_{eq} 상한치를 규제하고 있다. C_{eq} 상한 규제에 부가하여 API-RP2Z에서는 저온균열 감수성을 보증하기 위해서 CTS(Controlled Thermal Severity) 시험과 Y-groove 시험을 요구하고 있다. 용접재료의 확산성 수소량이 3~5ml/100g이고 입열량이 CTS 1kJ/mm, Y-groove 1.7kJ/mm인 조건에서 50mm 이하의 최고 두께의 강판에 대해서 CTS는 80°C와 Y-groove는 130°C에서 균열이 발생하지 않아야 한다^{34,35)}.

몇 건의 취성파괴에 의한 해양구조물의 파손사고 이후, 용접부 파괴인성치의 개선 요구는 라멜라 티어링(Lamellar Tearing)과 용접부 저온균열 방지와 함께 해양구조용 강재에 대한 주요 쟁점이었다. 특히 1980년대 HAZ의 낮은 CTOD를 경험한 후 성분, 용접조건, 최고가열온도 및 다중용접에서 취성영역의 분율과

크기 등이 HAZ CTOD에 미치는 영향에 대해서 광범위하게 연구가 이루어 졌다. 중요한 결과 중의 하나는 Intercritical Coarse Grain Heat Affected Zone (ICCG-HAZ)가 벽개파괴가 일어나기 쉽다는 것이다^{36,37)}. ICCG-HAZ는 조대한 베이나이트 또는 마르텐사이트의 Coarse Grain (CG-HAZ)가 후속의 용접 열이력에 의해서 2상역 온도로 가열될 때 생기는 조직이다. ICCG-HAZ의 특징은 2상역에서 형성된 오스테나이트에 C등의 합금원소가 농축되고 빠른 냉각에 의해서 마르텐사이트가 형성됨으로써 Martensite-Austenite (M-A) constituent라 불리는 매우 취성적인 제2상이 분산된 조직이다. M-A constituent에 의한 인성저하는 잘 알려진 사실이며 또한 M-A constituent에 의한 취성파괴의 가능한 기구들이 제안되었다. 따라서 Local Brittle Zone(LBZ) 문제는 ICCG-HAZ에 국한하여 생각할 수 있을 정도로 ICCG-HAZ의 중요성은 깊이 인식되어 왔으며, ICCG-HAZ의 인성에 미치는 합금원소의 영향 및 조직제어에 대한 많은 연구가 이루어 졌으며, 이를 바탕으로 저온 파괴인성이 우수한 강재 개발이 이루어지고 있다³⁸⁻⁴⁰⁾.

5. 맺 음 말

지금까지 조선/해양 분야의 강재 개발현황 및 최근 이슈가 되는 용접부 요구 특성에 대하여 기술하고, 전용 용접재료의 개발현황 및 요구특성에 대하여 살펴보았다. 조선산업에서는 선박의 대형화, 해양 환경보호, 선박의 장수명화 등의 해운환경 변화에 대응하여 강재는 고강도, 극후물화 및 고기능화 되어가고 있으며, 해양산업에서도 에너지와 자원 개발이 극지와 심해로 확대됨에 따라, 해양구조용강은 고강도화 및 극후물화와 함께 극저온에서의 파괴인성 보증 요구가 커질 것으로 전망되며, 실제 이러한 강재들이 널리 사용될 시기가 가까워 오고 있다. 향후, 국내 조선 및 해양 산업의 세계적 수준의 경쟁력을 유지 발전시키기 위해서는 조선 및 해양 산업을 지원할 수 있는 강재의 개발과 함께 용접재료 개발에도 끊임없는 연구와 노력이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. The Korea Shipbuilder's Association: Shipbuilding statistics in 2008 year (2009)
2. Clarkson: World Shipbuilding statistics in 2008 year (2009)
3. S. Imai: Recent development and future trend of shipbuilding steel, Journal of the Japan Welding Society, **76** (2007), 19

4. K. Hirota: World's first development and application of HSS(high tensile strength steel with yield stress of 47kgf/mm² to actual ship hull structure, Mitsubishi heavy Industries, Ltd. Technical Reivew, **44-3** (2007), 1
5. Nippon Kaiji Kyokai: Guidelines of the application of YP47 steel for hull structures of large container carriers (2008)
6. Gremanischer Lloyd: Supplementary rules for application of steel with yield strength of 460N/mm² (2008)
7. American Bureau of Sping: Higher-strength hull structural thick steel plate in container carrier (2008)
8. K. K. Um, High performance steel plate for shipbuilding applications, ISOPE (2008)
9. Dillinger Offshore Letter (2005)
10. 서인식: 조선용 후판 산업 및 개발동향, 부품·소재 Special Report, 부품·소재 진흥원 (2008) 32
11. International Association of Classification Societies
12. T. Inoue: Long crack arrestability of heavy-thick shipbuilding steels, ISOPE (2006), 132
13. S. Imai: Advances in steel plates for shipbuilding, Steel today & tomorrow, **145** (1999), 1
14. Yoshie: The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engeering, **885** (2005), 49
15. N. Shikanai: Recent development in microstructural control technologies through thermo-mechanical control process(TMCP) applied for JFE steel's high performance plates, JFE Giho, **18** (2007) 1
16. S. Imai: Genral properties of TMCP steels, ISOPE, **2002 -YAT-08**, (2002)
17. API Specification 2H, 8th Edition (1999)
18. API Specification 2Y, 3rd Edition (1994)
19. API Specification 2W, 4th Edition (1999)
20. 용접접합 편람: 산업분야별 용접기술 (2008)
21. F. Koshiishi: Welding Technology, 56-1(2008), 66
22. H. Yukinori: Arc welding, Japan Welding Society, **77-5** (2008), 70
23. S. Keiichi: Welding material, Japan Welding Society, **77-5** (2008), 65
24. Chung-Yun Kang : Journal of The Korean Welding and Joining Society, **24-6** (2006), 9
25. R. Shimura: Progress of seamless flux cored wire, NSSW (New bead), **21** (2008), 9-11
26. M. Sasaki: Welding consumable for EH47, NSSW (New bead), **25** (2009), 7
27. Sang Rok Kim, Recent stage and trands of high performance welding consumables, Symposium of steel technology, **48** (2008), 168
28. T. Ishikawa: Fracture toughness in welded joints of high strength shipbuilding steel plates with heavy-thickness, ISOPE, **HWJ-04** (2007)
29. T. Morimoto: Developments in flux-cored wire for gas shielded arc welding, Kobe Steel Engineering Reports, **55-2** (2005) 61
30. K. Suenaga: Improved toughness in welding consumables for low-temperature service high-strength steel, Kobe Steel Engineering Reports, **54-2** (2004), 39
31. G. M. Evans,: Metallurgy of Basic Weld Metal, TWI, (1997), 315
32. K. Suenaga: Welding consumables for offshore structures, Kobe Steel Giho, **53-2** (2003), 87
33. Hee Jin Kim: Development of welding consumable for controlling the cold cracking in steel deposited metal, Journal of The Korean Welding and Joining Society, **20-3** (2002), 4
34. Shell Offshore Inc.: Supplement 16: Material Quality Level 1, Carbon and Low Alloy Steel Weldable Structural Plate Requirements 50-80ksi SMYS, Shell Offshore Inc. (1994)
35. API RP 2Z: Recommended Practice for Pre-Production Qualification for Steel Plates for Offshore Structures, American Petroleum Institute (1998)
36. T. Haze: Tetsu-To-Hagane, **74-6** (1998), 1105
37. M. Nakanishi: Japan Welding Society. **4-2** (1986) 447
38. J. M. Gray: International Conference on Advances in Welding Technology Joining of High-Performance Materials, Columbus, Ohio, 6-8 (1996)
39. T. Haze: Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Proceedings, 7th International Conference, Houston, USA (1988), 515-523
40. R. Kinaka: Kawasaki Tech. Report. **17** (1987), 56



- 한일욱(韓一煜)
- 1963년생
- POSCO 기술연구소
- 용접야금
- e-mail : elookhan@posco.com



- 안규백(安圭栢)
- 1970년생
- POSCO 기술연구소
- 용접 파괴 및 구조
- e-mail : gyubaekan@posco.com



- 박영환(朴永桓)
- 1972년생
- POSCO 기술연구소
- 용접야금
- e-mail : parkyh@posco.com



- 안영호(安玲鎬)
- 1960년생
- POSCO 기술연구소
- 용접야금
- e-mail : yhan@posco.com