



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 8월
석사학위 논문

2019
년

8월

석
사
학
위
논
문

LNG 탱크용 9% 니켈강의
레이저-아크 하이브리드
용접특성에 대한 연구

L N G 탱크용 9% 니켈강의
하이브리드 레이저-아크 용접특성에 대한 연구

김
동
춘

조선대학교 대학원
용접 · 접합과학공학과
김 동 춘

LNG 탱크용 9% 니켈강의 레이저-아크 하이브리드 용접특성에 대한 연구

The Study on the Weldability of Laser-Arc Hybrid Welds in 9% Ni
Steel For LNG TANK

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 동 춘

LNG 탱크용 9% 니켈강의
레이저-아크 하이브리드 용접특성에
대한 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 4월

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 동 춘

김동춘의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방한서 (인)

위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 교수 손윤철 (인)

2019년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	IV
Abstract	V
1 장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.1.1 연구 배경	1
1.1.2 연구 목적	2
1.2 레이저-아크 하이브리드 용접 특성	4
1.2.1 레이저-아크 하이브리드의 원리	5
1.2.2 레이저-아크 하이브리드의 특징	6
1.3 LNG 탱크 제작 소재의 특성	9
1.3.1 LNG 탱크 종류	9
1.3.2 LNG 탱크 제작용 강재	12
1.3.3 9% 니켈강의 용접문제점	13
2 장. 연구 방법	16
2.1 연구방법	16
2.2 실험방법	17
2.2.1 사용재료 및 와이어	17

2.2.2 용접 조건 및 장비	18
2.3 용접부 기계적 특성 평가	20
2.3.1 ISO 13919-1에 따른 품질 평가	20
2.3.2 기계실험을 위한 시편가공 형상	22
2.3.3 충격시험	23
2.3.4 인장시험	24
3 장. 연구 결과 및 고찰	26
3.1 용접공정 변수에 따른 특성	26
3.1.1 비드 온 플레이트(BOP) 용접	27
3.1.2 맞대기 용접	35
3.2 용접공정 (Laser-arc hybrid and FCAW)별 기계적 및 금속학적 특성 비교	36
3.2.1 충격시험	36
3.2.2 인장시험	38
4 장. 결론	40
참고문헌	41
감사의글	43

List of Figures

Fig. 1.1 Schematics of laser-arc hybrid welds	5
Fig. 1.2 Penetration of arc welding, laser welding, laser-arc hybrid welds	7
Fig. 1.3 The type of on-land LNG storage tank	9
Fig. 1.4 IMO classification of LNG vessels	10
Fig. 2.1 Experimental setup for CO ₂ laser-GMA hybrid welding system	18
Fig. 2.2 Specimen for destructive test	22
Fig. 2.3 Equipment for impact test	23
Fig. 2.4 Equipment for tensile test	24
Fig. 2.5 Stress-strain curve	25
Fig. 3.1 Prevention device of laser-arc hybrid welding deformation	27
Fig. 3.2 Laser-arc hybrid welded for destructive test	35
Fig. 3.3 Impact test specimen	36
Fig. 3.4 Tensile strength test specimen	37
Fig. 3.5 Comparison of tensile strength flux core arc welding and laser-arc hybrid welding	38

List of Tables

Table. 1.1 Comparison of arc welding, laser welding, laser-arc hybrid welds	6
Table. 1.2 Vibration mode of CO ₂ molecule	8
Table. 2.1 The typical chemical composition of 9% nickel steel	17
Table. 2.2 The typical chemical composition of wire	17
Table. 2.3 Welding conditions for experiments	19
Table. 2.4 EN ISO 13919-1 bead quality level	20
Table. 2.5 EN ISO 13919-1 bead quality level for imperfection	21
Table. 3.1 The effect of current on bead profiles in laser-arc hybrid welds	29
Table. 3.2 The effect of travel speed on bead profiles in laser-arc hybrid welds	30
Table. 3.3 Top bead and bottom bead view with gap in laser-arc hybrid welds	31
Table. 3.4 Evaluation of quality levels in laser-arc hybrid welds with travel speed by EN ISO 13919-1	33
Table. 3.5 Evaluation of quality levels in laser-arc hybrid welds with travel speed by EN ISO 13919-1	34
Table. 3.6 Charpy impact test result of laser-arc hybrid welds	37
Table. 3.7 Comparison of laser-arc hybrid welds & FCAW charpy impact test result	37
Table. 3.8 Tensile strength result of arc-laser hybrid welds	38

ABSTRACT

The Study on the Weldability of Laser-Arc Hybrid Welds in 9% Ni Steel For LNG TANK

Kim Dong Choon

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, the world is suffering from the rapid change of the earth due to environmental pollution. Various policies and regulations have been made to prevent global climate change, and environmental concerns are growing ever more. In accordance with this, many organizations such as IMO are strengthening more specific regulations and policies on marine environmental pollution. In particular, IMO should tighten regulations on the emission of marine vessels. In order to meet these regulations, marine vessels should be equipped with scrubber

installations, low-sulfur oil, and LNG propulsion.

There are 9% nickel, STS, AL alloys and high Mn which are the raw materials of dual LNG propulsion line tanks. 9% Nickel steel is one of the materials that exhibits unstable welding conditions such as unique magnetization phenomena and high temperature and low temperature cracks. However, it has low temperature toughness compared to other materials and has suitable physical properties for low temperature tank. In order to overcome the disadvantages of this welding, we try to compare the mechanical properties of FCAW(Flux core arc welding) welding by 9% nickel steel welding by Laser arc hybrid welding.

9% Nickel steel, 12KW CO₂ Laser Welding machine is equipped with arc, wire uses H company to apply various parameters such as arc current, voltage, l-but gap, travel speed, etc. to find suitable conditions for Laser arc welding and found that the best welding conditions were found at the speed of 12KW 250A, 25V, and 0.625m /min by conducting and finding laser welding quality evaluate according to UN ISO13919-1 Mechanical performance evaluation of Laser-arc hybrid welds showed a tensile strength of about 719 MPa. The impact strength of the weld portion of the laser arc hybrid shows a value of about 10 J higher than that of the FCAW weld at about 116 J.

Therefore, it was possible to obtain a sounder weldability than FCAW at the time of Co₂ laser-GMA hybrid welds to 9% nickel steel, and additionally apply 1 pass in comparison with the one applied for 5 pass or more at FCAW welding. It can be considered that the improvement of productivity at the time of on-site application can be obtained.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

1.1.1 연구 배경

최근 가장 이슈가 되고 있는 것 중 하나는 환경에 관한 관심이 아닐까 한다. 문명의 발전과 과학기술의 발전은 환경오염과 그로인한 많은 문제점들을 간과하고 지속되어 왔고, 그로인한 기후변화 등의 문제점이 우리 생활에 많은 영향을 주고 있는 지금은 더 이상의 발전보다는 환경을 지키고 기후변화에 대처할 수 있을 많은 방법들이 개발되고 규제가 강화되고 있다.

특히 지구의 기후환경변화를 막기 위한 해상 규제가 강화되고 있다. UN산하 전문기구인 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 해양오염방지협약(MARPOL Annex VI)을 제정하여 운영 중에 있고, 협약서에서는 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 등에 규제를 다루고 있다. 선박 연료 배출가스인 황산화물(SOx) 함유량은 2020년부터 세계 전 해역에서 3.5% 이하에서 0.5% 이하로 강화 된다.

질소산화물(NOx) 배출량을 규제하는 Tier II 규제는 2011년부터 발효되었고, 배출해역에서만 적용되는 Tier III 규제도 2016년부터 추가로 발효되었다. 이로 인해 배출 통제 해역을 통과하는 선박은 IMO 등으로부터 Tier III 엔진 인증을 받은 엔진을 선박에 장착해야 한다.

CO2 규제와 관련 하여서는 2013년 1월 이후 건조되는 선박은 EEDI(Energy Efficiency Design Index, 신조선 에너지효율 설계지수)를 적용하여 건조되도록 규정하고 있다. 이에 따라 2025년 까지 EEDI 규제치가 단계적으로 강화 될 예정이

다. EEDI는 선박이 단위 무게 화물을 단위 거리만큼 운송할 때 배출되는 CO₂양으로 표시되는 설계지수이다.[1]

본 연구는 이러한 추세에 발맞추어 가장 효과적이라고 판단되는 LNG 추진선 탱크의 재료가 되는 9% 니켈강의 가장 최신의 공법인 레이저-아크 하이브리드 용접방법을 이용하여 제작 생산성 향상에 도움이 되고자 진행하였다.

1.1.2 연구 목적

해상 환경 규제를 충족을 위한 관련 업계의 대응으로 저유황유 사용, 황산화물 저감장치인 스크러버 설치, LNG 추진선박 운용 등 3가지가 있다. 저유황유 사용은 다른 추가 투자비용 발생 없이 해상 환경 규제를 충족시킬 수 있다. 하지만 현재에도 선사들 부담이 있을 정도로 저유황유 가격이 고유황유보다 50%정도 고가인 상태이다. 환경 규제가 강화되는 2020년 이후 수요 증가에 따른 가격 상승 가능성이 높아 선주들의 부담 가중이 예상된다.

선박에 설치되어 엔진에서 배출되는 배기가스 중 SO_x를 물로 씻어 내리는 장치인 스크러버 설치도 주목받고 있다. 하지만 장치 특성 상 선박 내 비교적 큰 설치공간이 필요하고 소형 선박에는 설치가 어려운 것으로 알려져 있다. 현재 유지비 등에 대해서는 검증되지 않은 상황이나 15년 이상 고령 선박에서는 스크러버 장착이 경제성이 없다고 알려져 있다.

LNG는 황산화물 등 유해물질 배출량이 현저하게 적고 저유황유보다 가격이 저렴하여 선주들의 선박연료로 사용하는 방안에 대한 관심이 증가하고 있다. LNG 선박 연료 사용은 중유와 비교하여 NO_x는 85%~95%, CO₂는 20%, SO_x는 100% 까지 낮출 수 있어 IMO 환경규제(EEDI등)을 충족시킬 수 있다.

LNG추진선은 선박 연료로 LNG를 사용하여 추진력을 얻기 때문에 대표적인 친환경 선박이나 연료탱크, 연료공급시스템 등의 고가부품이 필요하여 일반선박에 비해 20~30% 선가가 높은 편이다.[2]

따라서, 본 연구에서는 LNG 저장탱크 운반선에 사용되는 9% 니켈강에 대해 기존 아크 용접시 발생하는 자화현상 등의 문제점을 보완하고 생산성 향상에 장점을 가진 신 용접법 레이저-아크 하이브리드 용접 실험수행으로 기존 많이 사용되고 있는 FCAW 와의 기계적 특성을 비교하고 생산성 향상에 대한 영향을 살펴보고자 한다.

1.2 레이저-아크 하이브리드 용접 특성

레이저-아크 하이브리드 용접은 두 가지의 기능 모두를 혼용하여 레이저 용접이나 아크용접의 단점 등을 보완하여 사용하는 방법으로 유망한 접합공정 방법으로 주목을 받고 있다. 레이저 용접의 깊은 용입(Deep penetration)특징과 아크용접의 우수한 갭브리징(Gap bridge ability) 능력을 서로 상호 보완하며 우수한 용접부를 얻을 수 있다. 레이저 용접은 고품질의 고정밀, 고성능, 고속의 우수하고 유연성을 가지고 변형이 낮아 유망한 접합 기술로서 큰 인기를 얻었으며 로봇과의 결합이 쉽고 광범위한 적용으로 완전자동화와 체계화 생산라인 등 여러 방면에서 레이저 용접에 대한 응용이 증가하고 있다.

레이저의 큰 단점으로 레이저 장비의 고비용과, 고반사율로 열전도율이 높은 금속의 용융이 어렵고, 갭 공차가 작고 깊게 관통한 용접 융합 구역의 다공성과 같은 용접 결함 등이 형성되기 쉽다. 아크용접은 장비금액이 싸고 조작이 쉽고 용접공정 자체가 매우 안정적이고 효과적이기에 접합 작업에 널리 사용되고 있다. 아크용접에서 대부분의 경우 용접 비드의 얇은 침투, 느린 용접속도, 고속 용접시 오버용접비드 형성이 쉽다. 반면에 CO₂, YAG, 다이오드, 디스크 또는 Fiber Laser 와의 하이브리드 용접 및 TIG, MAG, MIG, 플라즈마 또는 다른 아크열원은 더 깊은 관통, 더 높은 용접속도, 넓은 허용공차, 더 나은 용접 비드 표면 외관 및 용접결함 감소 등 여러 가지 많은 장점들을 가지고 있으므로 상당한 주목을 받고 있다.[3]

하이브리드 레이저 아크 용접의 기본원리를 이해하고 현상과 아크 플라즈마 특성과 레이저 유도, 레이저 빔 간의 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 하이브리드 용접 프로세스를 적절하게 활용하는데 도움을 줄 수 있다.

1.2.1 레이저-아크 하이브리드 용접의 원리

레이저 아크 하이브리드 용접은 레이저와 전기 아크의 조합을 사용하여 용접을 하는 것으로 두 개의 열원의 상호작용으로 각각의 문제를 완화시켜 품질의 향상과 효율적인 용접이 가능한 방법이다. 일반적으로 레이저 아크 하이브리드 용접은 그림 Fig 1.1에서 보는 바와 같이 레이저열원과 전기아크를 결합시키는데, 모재와 MIG 용접 와이어 사이에서 아크를 형성시키면 아크열에 의해 모재의 표면 및 와이어가 용융되며 용융풀이 형성된다. 집속 광학렌즈에 의해 용융지에 집속된 레이저빔에 의해 키홀(Keyhole)이 형성되어 깊은 용입이 만들어진다. 고에너지인 레이저와 아크 열원을 결합하면서 레이저의 고속 용접, 깊은 용입 및 저입열과 아크열원의 저렴한 원가 및 갭 브릿지 효과가 서로 영향을 미쳐 고속 용접 및 저변형, 깊은 용입 용접이 된다.[4]

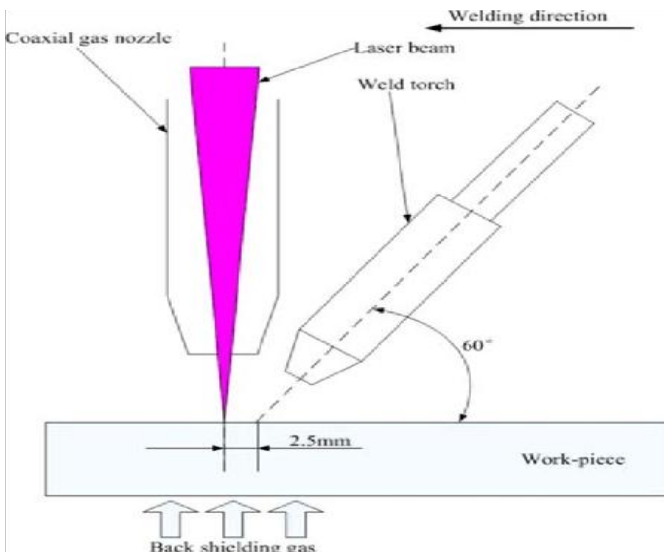


Fig 1.1 Schematics of laser-arc hybrid welds

1.2.2 레이저-아크 하이브리드 용접의 특징

레이저 아크 하이브리드 용접은 레이저와 아크의 장점을 융합한 용접방법이다. 아크용접과 레이저용접 그리고 레이저-아크 하이브리드 용접의 세 가지의 용접법에 대해 용입영역, 갭 브리징, 입열량, 잔류응력과 변형, 용접속도, 생산성, 냉각비율 등을 비교하여 Table 1.1 로 나타내었다.

Table. 1.1 Comparison of arc welding, laser welding, laser-arc hybrid welds

	Arc welds	Laser welds	Hybrid welds
Fusion zone	Wide	Narrow	Wide
Gap bridging	Good	Poor	Good
Heat input	High	Low	Low
Residual stress and distortion	High	Low	Low
Welding speed	Low	High	Relatively high
Productivity	Low	High	High
Cool rate	Low	High	Relatively high

Fig 1.2는 아크 용접, 레이저용접 그리고 레이저-아크 하이브리드 용접의 용입 영역을 볼 수 있는 매크로사진 이다.

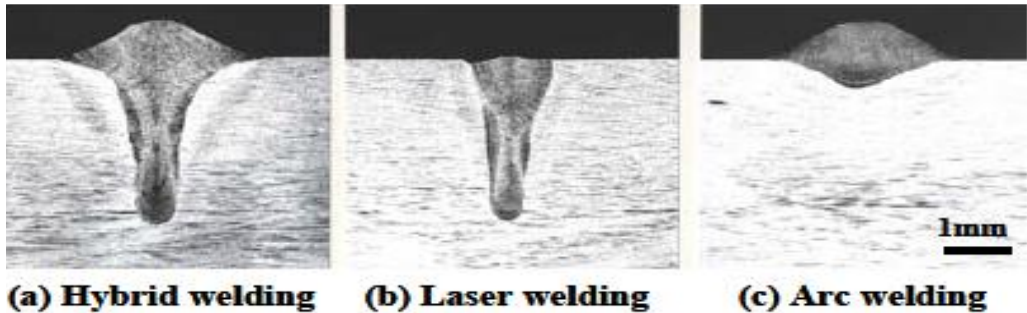


Fig 1.2 Penetration of arc welding , laser welding and laser-arc hybrid welds

레이저-아크 하이브리드에서 레이저 용접에 쓰는 CO₂ 레이저는 CO₂ 분자의 진동 에너지 준위를 이용하여 10.6um의 적외선을 발진시킨다. 이러한 연속발진에서의 출력은 수백 KW에 이르고 금속 가공, 절단 등 산업용으로 널리 쓰이고 있다.

레이저 발진 효율을 높이기 위한 매개물질로 N₂ 와 He을 첨가하여 사용한다. YAG-Laser hybrid 보다 고효율으로 보다 깊은 용입을 구현할 수 있다. [6]

CO₂ 분자는 한 개의 탄소원자와 두 개의 산소원자로 이루어져 있다. 그리고 가장 낮은 전기에너지 준위상태에서 세 가지의 진동모드를 가진다. 첫 번째,대칭진장모드는 탄소원자를 중심으로 산소원자와 대칭 진동한다. 두 번째, 굴곡모드는 탄소원자와 산소원자가 반대방향으로 이동하며 분자는 휨 상태가 된다. 세 번째 비대칭진장모드는 두 개의 산소원자가 같은 방향으로 이동하며 탄소원자는 반대로 운동한다. Table 1.2에 3가지 모드에 대해 나타내었다. [7]

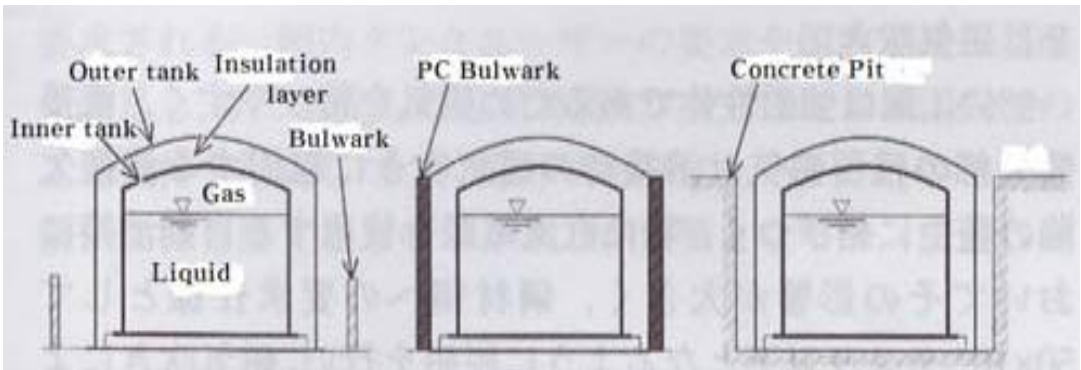
Table 1.2 Vibration mode of CO₂ molecule

MODE	대칭신장모드 (Symmetric STretching Mode)	굴곡모드 (Bending Mode)	비대칭신장모드 (Asymmetric STretching Mode)
내용	탄소원자 중심-산소원자 대칭 진동	탄소원자, 산소원자 반대방향 이동-분자 회전상태	두 개 산소원자 같은방향-탄소원자 반대운동

1.3 LNG 탱크 제작 소재의 특성

1.3.1 LNG 탱크 종류

육상의 고정식 LNG저장탱크에는 지상식 및 지하식으로 구별되나, 최근 건설되고 있는 것은 주로 지상식으로 Figure 1.3과 같은 형식을 갖는다



(a) Double wall type (b) PC-Bulwark type (c) Pit in type

Fig 1.3 The type of on-land LNG storage tank

금속 2중벽식 저장탱크는 LNG를 저장하는 저온용강재의 내부탱크와 그것을 둘러싼 보냉재, 그리고 보냉재를 둘러싸고 있는 외부탱크로 구성되어 있는 평저 원통형 탱크이다. 탱크의 주위는 만일의 경우에 LNG가 누설될 경우를 대비해서 콘크리트제의 방액벽이 설치되어 있다. 최근에는 과거의 금속 2중벽식 저장탱크 대신에 PC 외부탱크 일체식 저장탱크가 증가 추세이며 이것들의 대형화가 추진되고 있다.

해상의 부유식 저장탱크로 IMO(International Maritime Organization: 국제해사기구) 규격으로 규정된 LNG 저장탱크의 종류를 아래 Fig 1.4 에 나타내었다.

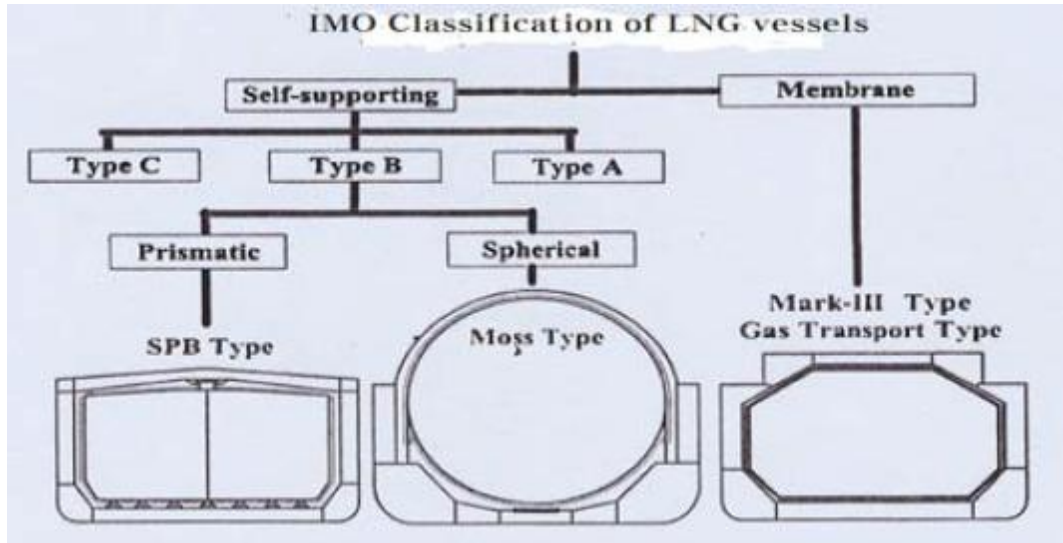


Fig 1.4 IMO classification of LNG vessels

LNG 선박이나 FSRU 또는 FPSP에 탑재되는 부유식 LNG 저장탱크는 독립형 (Self-supporting type)과 멤브레인(Membrane)형의 2가지로 나뉘어진다. LNG는 -162℃의 극저온상태에서 취급되기에 선체와 접촉하면 선체 균열을 발생하여 중대 손상을 초래할 위험성이 있기에 LNG 누설 대비한 완전 2차방벽이 필수이다.

독립형 Type A는 허용응력 기준의 일반적인 강도계산에 의해 설계되었고, Type B는 정밀한 강도해석 및 피로 파괴 해석에 의해 설계되었다. 고도의 해석기법에 기초하여 설계되어 신뢰성이 보장된 탱크로 만일 균열 발생하더라도 누설량은 적고 탱크의 대형 파괴에 이르지 않도록 보장된다.

또 다른 Type B형에 구형(Spherical)인 MOSS탱크가 있다. 노르웨이 MOSS Maritime 의 특허로 LNG에 접촉되는 탱크 바깥쪽에 두꺼운 단열층이 있고, 그 바깥에 얇은 질소가스층이 채워져 LNG누설을 감지할 수 있는 구조로 되어 있다. Type C는 압력탱크와 같은 설계방법으로 주로 소용량 탱크에 적용한다.

멤브레인 형으로 TGZ(Technigaz) MarkIII 탱크가 있다. 멤브레인은 탱크가 냉각될 때에 그 수축에 대응하도록 주름을 가지는 스테인레스 강재로 구성된다. 1차 격벽은 직접 LNG에 접촉하는 격벽으로 약 1.2mm 두께의 주름이 있는 스테인레스 강재이고, 그 바깥에 1차 단열층이 존재한다. 그 위에 금속 박막과 글라스 울 시트를 압착하여 만든 2차 격벽이 덮여 있다. 이것은 다시 2차 단열층으로 덮여 있고, 이 단열층은 선체구조에 지지되어 있다.[8]

1.3.2 LNG 탱크 제작용 강재

가. 9% 니켈강

육상의 고정식 LNG 저장탱크 소재로써 9% 니켈강은 강도상으로는 680MPa급 고장력강에 해당하며, 보통 퀘칭 템퍼링의 열처리 상태로 LNG 탱크 등 사용온도가 -150℃ 이하의 용도에 사용된다.

나. 7% 니켈강

LNG 탱크소재로 새로 개발된 7% 니켈강 소재는 LNG탱크의 파괴안전성을 확보하기 위해서는 -162℃의 극저온에서 모재 및 용접부에서 소정의 강도와 내취성파괴 특성을 갖도록 하는 것이 대 전제가 되어야 한다.

다. 오스테나이트계 스테인리스 강

LNG의 저장과 수송설비에 사용되는 오스테나이트계 스테인리스강은 STS304 및 304L을 사용한다. STS304 및 304L의 저온에서의 기계적 성질은 LNG 온도에서는 신축성이 약간 떨어지지만 인장강도는 현저하게 증가한다. 저온재료의 특성 가운데 중요한 것은 저온 충격성으로 오스트나이트계 스테인리스강은 저온충격 특성이 우수하다.

라. 인바(Invar) 강

LNG 운반선의 멤브레인형 탱크소재로 사용되었던 재료로 36% 니켈강으로 TIG 용접이나 플라즈마 용접 외에 저항용접도 가능한 재료이다. 불변강으로 불리어지고 있으며, 선팽창계수가 스테인리스강의 약 1/10로 작아서 변형을 흡수하는 콜리게이션이 거의 필요하지 않다.[9]

1.3.3 9% 니켈강의 용접문제점

가. 9% 니켈강의 용접방법

LNG 관련제품을 개발하고 공급하는 세계적인 기업들은 LNG 저장탱크 운반선에 대해서 9% 니켈강 소재를 활용하기 위한 실무적 혹은 학술적 연구를 활발하게 하고 있다. 9% 니켈강을 이용한 LNG 탱크 제작 시 사용되는 용접방법으로 SAW(Submerged arc welding), GTAW(Gas tungsten arc welding)등이 사용되고 있다.

일본에서는 2003년부터 육상의 Prestressed concrete LNG 탱크구축에 1토치 2전극방식의 고능률의 GTAW가 개발되어 현장에 적용되고 있는데, 이 용접방법은 용접속도의 고속화와 고용착화가 가능하여 Upward 용접에서도 안정적인 용입을 얻을 수 있으며, 판상 전극의 채용으로 좁은 갭 용접에도 적용이 가능하다.

중국의 경우는 스테인리스강에 관련한 용접연구 많은 비중을 차지하고 있으며, 이 외에 육상의 LNG 기지 건설용 9% 니켈강의 소재 관련 용접연구가 있다.

우리나라의 경우 LNG 기지 건설용 고정식 탱크 소재인 9% 니켈강의 용접에 관한 연구를 보면 용접부의 강도와 건전성 검증에 치우쳐 있고, 용접공정의 효율화와 생산성 향상을 위한 연구개발이 미진한 상태이기 때문에 이 분야의 공정개선 노력이 요구되는 상황이다.[10]

나. 9% 니켈강의 용접 시 문제점

9% 니켈강을 용접하는데 있어서 다층용접이 9% 니켈강 모재의 용접금속 성능에 미치는 영향, 용접금속의 고온 균열과 용접 열영향부로 인한 내부균열, 9% 니켈강 모재의 희석에 따른 용접금속 성능에 미치는 영향, Ni계 합금의 용입 부족에 따른 용입 불량, 9% 니켈강 용접의 아크솔림 등으로 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 9% 니켈강 용접성 문제점으로 용접금속의 고온균열, 저온균열, 용합불량, 슬래그 혼입, 기공, 열영향부의 균열, 용입 부족, 아크솔림, 예열 및 후열처리 등을 용접 공정에 반영해야 한다. [11]

1) 9% 니켈강과 Ni계 합금은 용접과정에서 직전 pass의 잔존 열에 대한 영향을 받기 때문에 다층용접(Multi pass welding)이 9% 니켈강 모재의 용접금속 성능에 큰 영향을 미친다.

2) 용접금속의 고온균열은 Ni계 합금은 오스테나이트 조직이기 때문에 기본적으로 고온균열이 발생하기 매우 쉬우며, 용접전류, 운봉비가 높을수록 내부 균열이 발생하는 문제가 있다.

3) 용접열영향부의 균열은 고니켈 합금(인코넬)으로 9% 니켈강을 용접하고 있으며, 용접금속중의 수소함유량을 현저히 줄인 것으로 사용 전에 건조 (35~400℃/hr) 상태를 유지시켜야 한다. 건조된 용가재로 용접한 열 영향부에 균열이 발생할 가능성은 거의 없지만 흡수한 용접재료를 사용한 경우에는 열영향부에 저온균열이 발생할 가능성이 있다.

4) 성분의 희석은 9% 니켈강과 Ni계 합금은 화학성분이 크게 상이하기 때문에 9% 니켈강 모재의 희석이 용접금속 성능에 큰 영향을 미친다.

5) 용입부족은 Ni계 합금은 9% 니켈강에 비하여 용융점이 150℃ 정도 낮기 때문에 탄소강의 용접에 비해 용입량이 작아 용입불량을 일으키기 쉽다.

6) 아크솔림은 Ni steel은 연강에 비해 자장의 영향으로 자성을 띄기 쉬어 9% Ni steel 용접에 있어서는 아크솔림이 문제로 발생한다.[12]

제 2 장 연구방법

2.1 연구방법

LNG 저장탱크용 9% 니켈강에 사용되고 있는 용접방법에는 SAW(Submerged arc welding), SMAW(Shielded metal arc welding), GTAW(Gastungsten arc welding)등이 적용되고 있다. 9% 니켈강 용접의 경우 수동방식이 주로 적용되고 있다. 저장탱크의 대형화에 따른 9% 니켈강의 내부재료의 두께가 두꺼워지므로 용접 소요시간 증가 및 이로 인한 용접 결함발생 가능성이 높아 용접품질 향상을 위한 연구의 필요성이 증가되고 있다.

LNG 저장탱크 운반선 9% Ni Steel의 신용접법인 레이저-아크 하이브리드 용접에 실험연구가 미흡하게 수행되었기 때문에 본 연구에서는 9% 니켈강에 대해서 레이저-아크 하이브리드 용접법의 적용성을 검토하고 이에 대한 용접기술을 개발하고자 한다.

1) 용접공정 변수 변화에 따른 용접특성(용입량, 비드특성, 비드모양)등을 비교 평가 하였다.

2) 용접부에 대해 레이저 용접 관련 품질 평가 기준인 ISO13919-1 규정을 적용하여 품질평가를 실시하였다.

3) 용접부에 따라 기계적 및 금속학적 특성을 평가하였고, 기존 FCAW 용접법과의 용접성을 비교 검토함으로써 용접 건전성을 확보하고자 하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 사용 재료 및 와이어

본 연구에서는 9% 니켈강 1형 맞대기 용접(butt weld)으로 용접부 계면부분에 밀링을 하였으며, 각각 12(t) X 200mm(L) X 200mm(W) 의 9% 니켈강을 CO₂ 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 실시하였다. Table 2.1 에 9% 니켈강에 대한 성분조성비율을 나타내었다.

Table. 2.1 The typical chemical composition of 9% nickel steel

Material	Element (Maximum weight%)							
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Fe
9% Ni	0.13	0.15-0.35	1.00	0.040	0.035	8.00-10.00	-	Bal

사용된 와이어는 H사의 CMT-08 CODE AWS A 5.14 ERNiMo-8 , JIS Z3334 SNi1008(NiMo19WCr) EN ISO182274 Ni1008(NiMo19WCr) 이고, 인장강도 725 MPa , 연신률 38% , 충격치(-196℃) 176 kgf·m 이다. 와이어에 대한 성분은 아래 Table 2.2에 나타내었다.

Table. 2.2 The typical chemical composition of wire

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	W
0.014	0.012	0.01	0.002	0.001	70.2	2.0	19.4	0.01	2.62

2.2.2 용접 조건 및 장비

본 연구를 수행하기 위해 9% 니켈강에 대해 판 두께 12mm(t)에 대해 레이저-아크 하이브리드 용접을 실시하였다. 레이저 용접기는 독일T사의 12KW CO₂ 레이저 장비를 사용하였으며, 아크 용접기는 국산 W사의 500A급 GMAW 장비를 혼합하여 사용하였다. Fig 2.1 에 CO₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접기를 나타내었다.



Fig. 2.1 Experimental setup for CO₂ laser-GMA hybrid welding system

- 1) 용접공정 변수로는 레이저 초점은 250mm, 디포커싱은 -2mm, 사용된 보호가스는 He 65%, Ar 32%, Co₂ 3% 로 유량은 20 l /Min, 레이저와 아크사이의 거리는 18mm, 와이어의 돌출길이는 3mm, 아크의 토치각도는 45 ° , 레이저 출력은 12kw 이다. 변동 조정하는 변수로 갭은 0~1mm, 이동속도는 0.5 m/min~1.0 m/min , 전류는 220A~280A , 전압은 22V~28V에서 진행하였다. 용접공정 변수에 대한 내용은 Table 2.3에 나타내었다.

- 2) 최적 용접조건을 위해 표면비드, 백비드 등에 대한 외관검사를 실시하였다. 용접부의 단면 시험은 EN ISO 13919-1 규격에 의거하여 품질평가를 실시하고 비드특성을 구분하였으며, 규격에 나타난 level에 따라 측정값으로 적절한 조건을 찾아가며 실험을 진행하였다.

Table. 2.3 Welding conditions for experiments

Welding condition	Values
레이저초점	250 mm
디포커싱	-2 mm
보호가스	He 65%, Ar 32%, Co ₂ 3%
유량	20 L / Min
레이저아크거리	18 mm
와이어 돌출길이	3 mm
토치각	45 °
레이저 출력	12kw
갭	0~ 1 mm
이동속도	0.5 M/min ~ 1.0 M/min
전류/전압	220A ~ 280A / 22V ~ 28V

2.3 용접부 기계적 특성 평가

2.3.1 ISO 13919-1에 따른 품질 평가

CO₂ 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 통한 9% 니켈강 l-joint welding 의 비드형상으로 용접의 결함가능성을 찾아내고자, 각 조건별로 용접된 시험편을 육안평가와 길이측정으로 용접적합성 여부 및 용접부 외관의 비드형상을 1차로 평가하였다. 레이저 용접의 평가방법으로 EN ISO 13919-1의 Bead Quality Level로 top bead 와 bottom bead을 측정하여 적절한 level에 위치하는 지를 판별하였다.

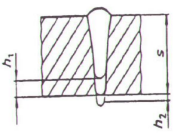
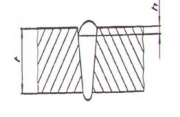
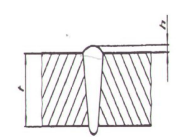
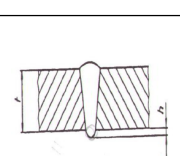
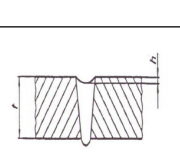
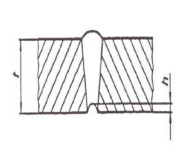
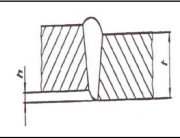
EN ISO 13919-1은 전기적이나 레이저 빔을 사용하여 용접한 Joint 의 부적합을 평가하는 가이드 이다. 이 평가 기준으로는 기준에 부합하는 조건에 따라 B, C, D 로 평가할 수 있다. 이 구분에 대해서는 Table 2.4에 나타내었다.

Table. 2.4 EN ISO 13919-1 Bead quality level

Level symbol	Quality level
D	Moderate
C	Inermediate
B	Stringent

EN ISO 13919-1 에 나타난 부적합 기준이 되는 평가 비드 형상 중에서 육안으로 수치 측정이 가능한 비드 형상을 평가 조건과 함께 table 2.5 에 나타내었다. 탑 비드 형상과 백 비드에 나타나는 부적합 형상을 기준에 맞게 측정하여 불완전 용입, 언더컷, 용접량 초과, 용입 초과, 불완전 용입, 루트부 함몰, 라인 불일치를 등급 기준으로 구별하였다.

Table. 2.5 EN ISO 13919-1 Quality levels for imperfections

No	Imperfection, designation	Limits for imperfections for quality levels			
			moderate D	intermediate C	Stringent B
1	Incomplete penetration		$h_1 \leq 0.15s$ or 1mm, whichever is the smaller	not permitted	not permitted
2	Undercut		$h \leq 0.15t$ or 1mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 0.5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.05t$ or 0.5mm, whichever is the smaller
3	Excess weld metal		$h \leq 0.2mm + 0.3t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.2t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.15t$ or 5mm, whichever is the smaller
4	Excessive penetration		$h \leq 0.2mm + 0.3t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.2t$ or 5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2mm + 0.15t$ or 5mm, whichever is the smaller
5	Incompletely filled groove		$h \leq 0.3t$ or 1mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2t$ or 0.5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 0.5mm, whichever is the smaller
6	Root concavity Shrinkage groove		$h \leq 0.3t$ or 1mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.2t$ or 0.5mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 0.5mm, whichever is the smaller
7	Linear misalignment		$h \leq 0.25t$ or 3mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.15t$ or 2mm, whichever is the smaller	$h \leq 0.1t$ or 2mm, whichever is the smaller

2.3.2 기계실험을 위한 시편가공 형상

용접된 시편으로 기계실험을 시행하기 위해 IACS W28 Test Sampling 규격에 맞추어 시편을 가공해야 한다. Fig 2.2 에 인장실험, 굽힘시험, 경도시험, 충격시험을 하기 위한 시편 가공 모양에 대해 나타내었다.

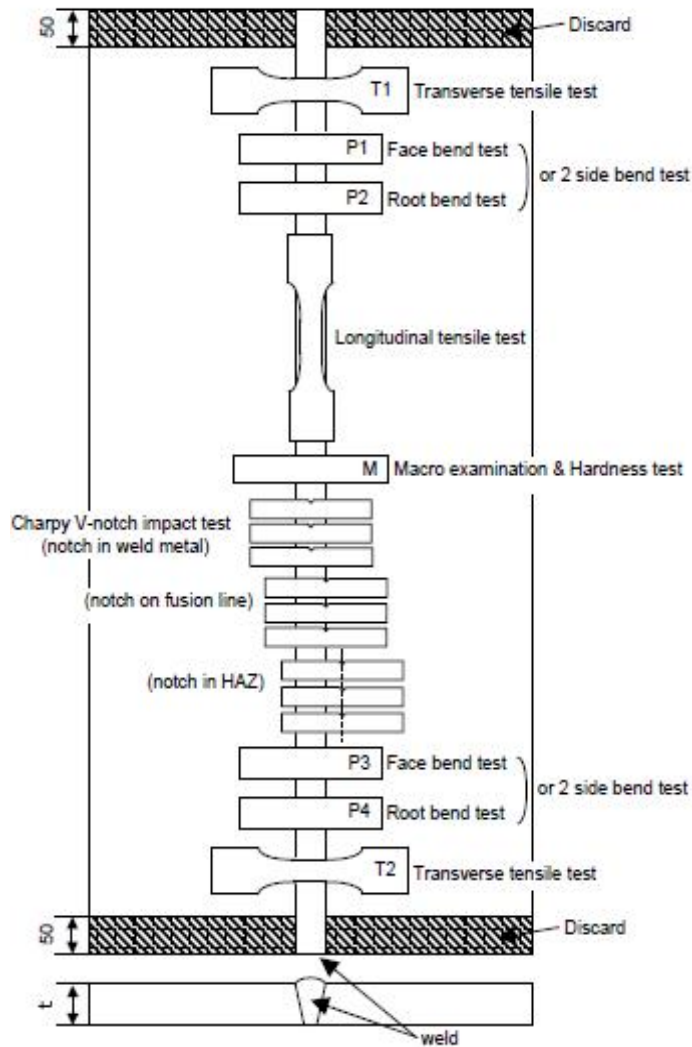


Fig. 2.2 Specimen for destructive Test

2.3.3 충격시험

재료가 충격에 견디는 저항을 인성(Toughness) 라고 한다. 충격시험(Impact test, ASTM E23, ASME SEC.VIII USC-66, UG-84)은 재료의 인성 혹은 강도를 측정하기 위하여 실시되는 것이다. 절편이 있는 시험편에 충격력을 가해서 파괴시키고 시험편이 파괴 될 때까지의 흡수 에너지를 구하여 충격치(Impact value)로 하여 이것을 위성 혹은 건성의 척도로 하고 있다.

시험 방법으로서 충격 인장, 충격 압축, 충격 휨, 충격 비틀림 등의 시험법이 있으며 이중에서 샤르피 시험법이 사용되고 있다. 재료의 충격에 대한 강도는 다른 재료 시험에서 얻어지는 것 보다 민감하며 시험 방법, 시험편의 형태나 크기께 의하여 영향을 받는다. 충격 휨 시험에서는 규격을 마련하여 시험편의 치수를 규정하고 규정의 방법으로 충격시험을 실시하여 충격치를 얻고 있다.

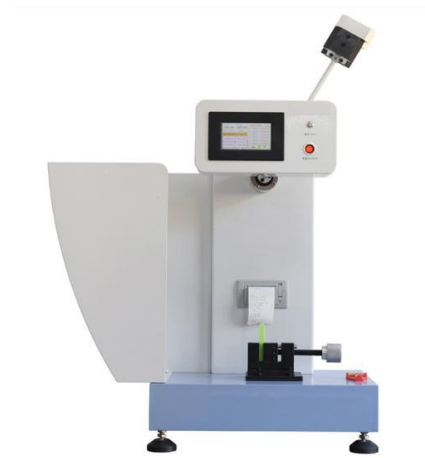


Fig. 2.3 Equipment for impact test

2.3.4 인장시험

인장시험(Tensile Test, ASTM E8/8M)은 금속이 가진 성질 중에서 인장응력(Tensile Stress)에 대한 저항성을 평가하는 것이다. 즉 당기는 힘이 얼마나 잘 저항할 수 있는 가를 확인 하는 것이다. 인장 시험에 사용되는 시편은 일정한 단면적과 거리를 측정할 수 있는 형상의 시편으로 제작되어야 한다. 이 실험을 통해 재료의 인장강도(Tensile strength), 항복점(Yield stress), 단면 수축률(Area reduction ratio), 연신률(Elongation)등이다.



Fig. 2.4 Equipment for tensile test

인장시험은 시편에 인장 응력을 가하면서 실시된다. 힘을 가해서 당기게 되면 시험편은 늘어나게 되고, 이때 하중과 변형과의 관계를 나타낸 곡선이 얻어지는데 이것을 응력-변형 선도(Stress-strain curve)라고 한다.

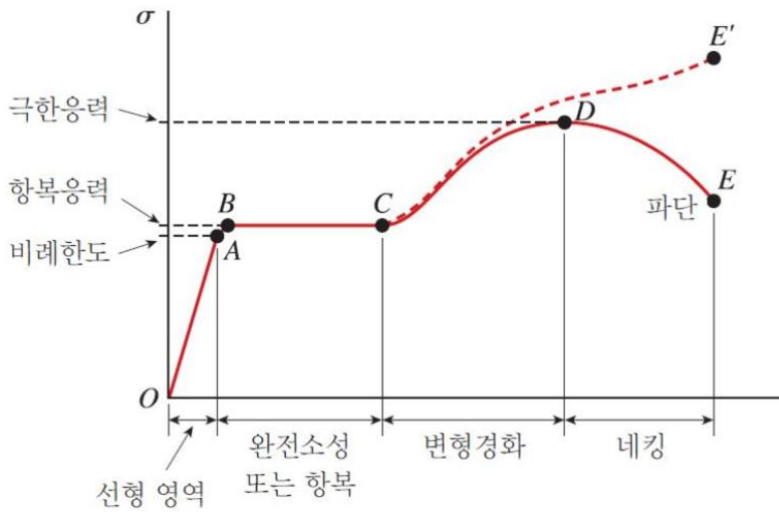


Fig. 2.5 Stress-strain curve

제 3 장 연구 결과 및 고찰

3.1 용접공정 변수에 따른 특성

CO₂ 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 이용한 9% Ni Steel 의 맞대기 용접 용입 특성을 파악하기 위해 예비 실험을 하였다. 시험편은 12mm 두께의 9% Ni Steel 200mm(W) X 180mm(L)로 상부 표면에 200mm 길이방향으로 H사의 극저온용 용접와이어를 이용해 하이브리드 용접을 실시하였다. 용접 시 열 변형을 방지하기 위해 Plate를 구속해주는 지그를 설치하였다. Fig 3.1에 지그 설치 실험을 나타내었다.



Fig. 3.1 Prevention device of laser-arc hybrid welding deformation

3.1.1 비드 온 플레이트(BOP) 용접

CO₂ 레이저-GMAW 하이브리드 용접을 이용한 9% Ni Steel 의 맞대기 용접 용입 특성을 파악하기 위해 예비 실험을 하였다.







시험편은 12mm 두께의 9% Ni Steel 200mm(W) X 180mm(L)로 상부 표면에 200mm 길이방향으로 CMT-08 와이어를 이용해 하이브리드 용접을 실시하였다. CO₂ 레이저-GMAW 하이브리드 용접으로 실험계획으로 3가지 변수를 채택하여 진행하였다.

첫째, 전류에 따른 영향 둘째, 용접속도에 따른 영향, 셋째, I-BUTT JOINT GAP 에 따른 영향으로 구별하여 EN ISO13919-1 Bead Quality level로 TOP BEAD와 BOTTOM BEAD 측정하여 최적조건을 찾는 실험을 진행하였다.

가. 전류에 따른 영향

전류의 세기에 변화를 주어 용접부에 대한 EN ISO13919-1 Bead Quality level 평가를 시행하였다. 전류의 변화는 220A, 250A, 300A 로 용접을 수행 하였으며, 각각의 전류 변화에 따른 표면 비드와 루트 비드 형상을 관찰하였다. 입열량 증가에 따라 용입성 증가로 백비드의 높이가 높아졌으며, 전류 변화에 따른 비드형상은 아래 Table 3.1에 나타내었다.

Table. 3.1 The effect of current on bead profiles in laser-arc hybrid welds





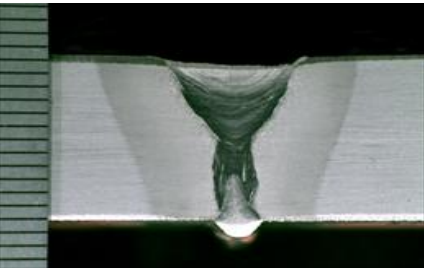
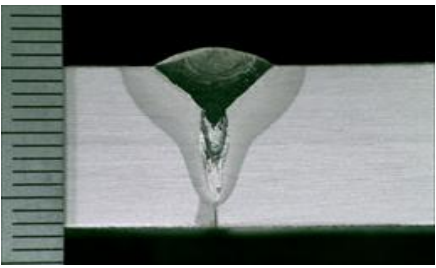
Welding current	220A	250A	300A
Top bead			
Bottom bead			

나. 이송속도에 따른 영향

이송속도에 변화를 주어 용접비드 형상을 비교하여 고찰하였다. 이송속도의 변화는 0.5m/min , 1m/min 으로 용접을 수행 하였으며, 이송속도 변화에 따른 용입 상태 및 비드형상에 대해 확인 하였다.

이송속도 0.5m/min일 때는 상대적으로 입열량이 과다하여 용입량이 많아 루트비드 쪽으로 용입이 초과되는 형상을 보였고, 1m/min 일때는 반대로 용입량이 적어 두께까지 용접이 되지 않았다. 이송속도 변화에 따른 비드형상과 단면사진은 아래 Table 3.2에 나타내었다.



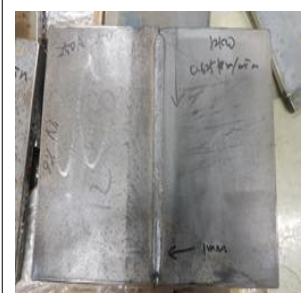


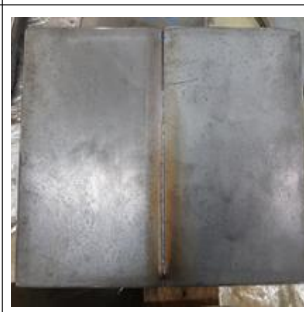
Table. 3.2 The effect of travel speed on bead profiles in laser-arc hybrid welds

Travel speed	0.5m/min	1.0m/min
Top bead	 <p>Handwritten notes on the metal surface: 12kW, 0.5m/min. An arrow points to the right along the weld line.</p>	 <p>Handwritten notes on the metal surface: 200A 25V, 12kW, 1.0m/min.</p>
Bottom bead		
Cross section		

다. Gap에 따른 영향

레이저 용접에서는 I-butt 용접에서 Joint Gap을 0mm로 하여 모재와 모재사이 열원을 주사하여 용접을 실시한다. 레이저-아크 하이브리드 용접 에서는 와이어를 사용하기에 적당한 Gap은 적절한 비드 형성에 좋은 영향을 나타내었다. 적당한 Gap을 찾기 위해 Fig 3.3(a) 0~2mm까지 사선모양의 Gap으로 실험하였고, 레이저 용접조건과 동일한 Gap인 Fig 3.3(b) 0mm, 그리고 0~2mm 실험 구간에서 가장 좋은 비드를 나타낸 1mm 구간을 확인 하고 Gap Fig 3.3(c) 1mm 실험을 진행하였다. 1mm의 일정한 Gap에서 용접을 시행하였을 때 EN ISO13919-1 Bead Quality Level 에서 B Grade로 적절한 비드가 형성되었다. Table 3.3에 Gap의 변화에 따른 비드 형상을 나타내었다.

Table. 3.3 Top bead and bottom bead view with gap in laser-arc hybrid welds

Gap	(a) Gap 0~ 2mm	(b) Gap 0mm	(c) Gap 1mm
Top bead			
Bottom bead			

라. EN ISO 13919-1 에 의한 품질평가

레이저-아크 하이브리드 용접시 전류와, 이송속도, 갭을 실험 변수로 하여 예비 실험을 진행한 후, 생산성을 고려하여 이 중 가장 큰 영향을 주는 이송속도에 변화를 주었다. 먼저 0.5m/min , 1.0m/min , 1.5m/min의 3가지 이송속도로 실험을 진행하였다. 각각의 시험편을 EN ISO 13919-1에 나타난 평가항목 조건에 따라 비드, 언더컷, 여성고, 불완전용입, 크랙, 어긋남 등을 평가하였다. Table 3.4에 측정 수치와 등급을 나타내었다.

이 중 모든 항목에서 전체적인 등급 B를 나타내는 시험편이 나오지 않아 B등급이 상대적으로 많이 나온 구간을 확인하여 0.575m/min , 0.625m/min , 0.75m/min의 3가지 이송속도로 실험을 진행하였다. 그리고 각각의 시험편을 위와 동일하게 EN ISO 13919-1에 나타난 조건에 따라 품질평가를 하였다. Table 3.5에 측정 수치와 등급을 나타내었다.

상기 실험 중에서 9% 니켈강 레이저-아크 하이브리드 용접실험에서 전류 250A , Gap 1mm , 이송속도 0.625 m/min 의 조건에서 모든 평가 항목에서 B 등급을 얻을 수 있었다.

Table. 3.4 Evaluation of quality levels in laser-arc hybrid welds with travel speed by EN ISO 13919-1



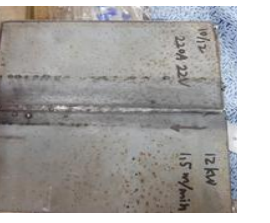



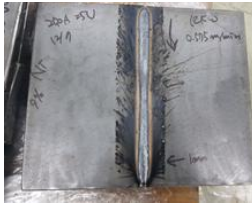


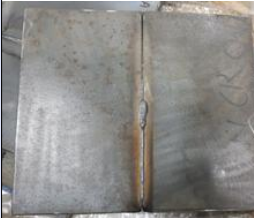
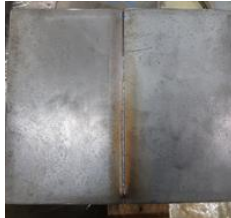

Travel Speed		0.5m/mim	1.0m/mim	1.5m/mim
Top Bead				
Bottom Bead				
Continuous under cut	h(mm)	1mm	0mm	0mm
	Level	B	B	B
Excess weld metal	h(mm)	h: 4mm	x	x
	b(mm)	b: 15mm		
Level	Level	D	D	D
	Excessive penetration	h(mm)	4mm	-2mm
Level	Level	D	D	D
	Cracks	h(mm)	0mm	0mm
Level		B	B	B
Incomplete penetration	h(mm)	x	2mm	4mm
	Level	D	D	D
Linear misalignment	h(mm)	2mm	1mm	0mm
	Level	B	B	B

Table. 3.5 Evaluation of quality levels in laser-arc hybrid welds with travel speed by EN ISO 13919-1

Travel speed		0.575m/mim	0.625m/mim	0.75m/mim
Top bead				
Bottom bead				
Continuous under cut	h(mm)	1mm	0mm	0mm
	Level	B	B	B
Excess weld metal	h(mm)	h:4mm	h:2mm	x
	b(mm)	b:15mm	b:3mm	
Level	Level	D	B	D
	Excessive penetration	h(mm)	4mm	2mm
Level	Level	D	B	D
	Cracks	h(mm)	0mm	0mm
Level		B	B	B
Incomplete penetration	h(mm)	x	0mm	3mm
	Level	D	B	D
Linear misalignment	h(mm)	1mm	0mm	0mm
	Level	B	B	B

3.1.2 맞대기 용접

앞 절에서 9% Ni Steel의 CO₂ 레이저-GMAW 하이브리드 용접으로 H사의 CMT-08 와이어를 이용하여 가장 타당한 최적조건을 찾는 예비실험을 실시하였으며, 용접 후 각각의 용접부 TOP 비드와 BOTTOM 비드를 EN ISO 13919-1 Quality LEVEL에 근거하여 평가하였다. 이 중 용접 이송속도 0.625 m/min과 Gap 1mm에서 안정된 완전용입의 EN ISO 13919-1 Quality [B] 등급임을 확인하였다.

앞서 도출된 확인된 조건으로 용접 이송속도 0.625 m/min, Gap 1mm, 250A, 25V로 기계실험 가능한 시험편으로 12mm 두께의 9% Ni Steel 400mm(W) X 500mm(L)로 상부 표면에 500mm 길이방향으로 H사의 CMT-08 와이어를 이용해 하이브리드 용접을 실시하였다



Fig. 3.2 Laser-arc hybrid welded specimen for destructive test

3.2 용접공정(Laser-arc hybrid welding and FCAW)별 기계적 및 금속학적 특성 비교

3.2.1 충격시험

레이저-아크 하이브리드 용접 시험편에 대하여 온도 -196°C 에서 충격시험을 진행하였고 실험시편은 아래 Fig.3.3에 나타내었다.



Fig. 3.3 Impact test specimen

극저온강의 충격시험은 가공된 시편을 5분 동안 극저온으로 냉각시켜 -196°C 에서 실험을 진행하여 흡수에너지를 측정한다. 가공된 시편에 2mm의 V-notch를 Weld metal, Fusion line, Fusion line +2mm, Fusion line +5mm 위치에 주고 실험하였다. Table 3.6은 레이저-아크 하이브리드 용접의 충격테스트 결과 값을 나타내었다. 충격 강도값은 평균 116J 이상을 확보할 수 있었다.

Table. 3.6 Charpy impact test result of laser-arc hybrid welds

Test temp. (°C)	Absorbed energy(J)				Notch	
	Avg. J				2mm V	
	1	2	3	Avg.	Secimen size	Test location
-196°C	113	114	115	114	10x5	Weld metal
-196°C	113	115	116	115	10x5	Fusion line
-196°C	115	116	117	116	10x5	F +2mm
-196°C	119	120	121	120	10x5	F +5mm

기존 9% 니켈강의 플럭스코어아크용접 시험편에 대한 충격값을 레이저-아크 하이브리드 용접으로 나온 실험평균치와 비교하였다. 아래 Table 3.7에서 두가지 프로세서 충격치 평균값을 비교하여 나타내었다. IACS W28에서는 극저온 강도의 Weld Metal의 Impact Strength 요구 값은 100J 이상으로 요구하고 있으며, 레이저-아크 하이브리드 용접부가 플럭스코어아크 용접부의 충격치보다 약 10J 정도 높게 나타남을 알 수 있다.

Table. 3.7 Comparison of arc-laser hybrid welds & FCAW charpy impact test result

Process	Flux core arc welding		Arc laser hybrid welding	
Energy(J)	1	108	1	115
	2	104	2	116
	3	106	3	117
	avg.	106	avg.	116

3.2.3 인장시험

레이저-아크 하이브리드 용접부에 대한 인장시험을 Fig.3.4 과 같이 가공된 시편으로 인장시험을 진행하였다.



Fig. 3.4 Tensile strength test specimen

레이저-아크 하이브리드 용접으로 실험한 시편의 인장시험 시편규격은 25mm(가로) X 7mm(세로)이다. 실험 결과 두 개의 시편 모두 용접금속부에서 파단 되었으며, 연성파괴 모드의 특성을 나타내었다. 인장시험의 결과 값은 아래 Table 3.8에 나타낸 바와 같이 평균 약 719MPa 을 나타내었다.

Table. 3.8 Tensile strength result of laser-arc hybrid welds

Test NO.	Tensile test					
	Specimen size(mm)		Area(mm ²)	Ultimate total load(N)	T.S(MPa)	Failure location&type
	w	t				
T-1	25.07	7.03	176.24	127069	721	Weld metal (Ductile)
T-2	25.00	6.96	174.00	124758	717	Weld metal (Ductile)

기존 9% 니켈강의 플럭스코어아크용접부와 비교해 보면, 레이저-아크 하이브리드 용접부가 인장강도값 약 13MPa 정도 높게 나타남을 알 수 있었다. Fig 3.4에 플럭스코어아크용접방법과 레이저-아크 하이브리드 용접에 대한 인장시험 결과치를 평균값으로 비교하여 그래프로 나타내었다. Material A553(ASTM 9% Nickel)의 Tensile Strength 요구값은 690~830 Mpa 을 만족함을 확인 할 수 있었다.

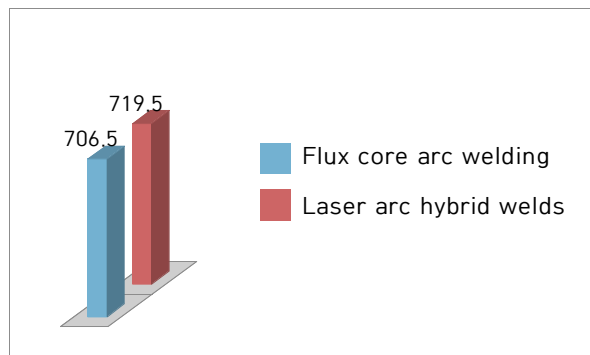


Fig. 3.4 Comparison of tensile strength in laser-arc hybrid welds and FCAW welds

제 4 장 결 론

본 연구에서는 9% 니켈강에 대한 신용접법 Co₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접 적용성을 검토하기 위해 이에 대한 용접기술을 개발하고자 하였다. 아울러 기존에 사용되고 있는 플렉스코어아크용접과 비교평가 함으로서 본 연구에서 개발된 레이저-아크 하이브리드 용접기술의 건전성을 확보하고자 하였다.

- 1) 9% 니켈강 (12mm, 두께)에 Co₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접 시 용접조건 레이저 출력 12KW, 디포커싱 -2mm, 레이저-아크간 거리 18mm, 갭 1mm, 혼합가스 He 65% + Ar 32% + Co₂ 3% , 이송속도 0.625m/min, 전류 250A, 전압 25V에서 EN ISO 13919-1 레이저 용접 품질 규정에서(언더컷, 여성고, 용입성, 어긋남, 비드높이 등) 가장 높은 등급인 B를 얻을 수 있었다.
- 2) 레이저-아크 하이브리드 용접부에 대한 기계적 성능 평가 결과, 인장강도는 약 719MPa를 나타내었다. 이는 기존 FCAW 용접부에 비해 약 13MPa 정도 높은 강도를 보이며, 또한 ASTM 요구값 690~830MPa를 만족하였다.
- 3) 레이저아크 하이브리드의 용접부의 충격강도는 약 11J로 FCAW 용접부 보다 약 10J 정도 높은 강도값을 나타내었으며, 이는 IACS 요구값 100J 이상을 상회하는 값에 해당된다.
- 4) 따라서 9% 니켈강에 Co₂ 레이저-GMA 하이브리드 용접시 기존 FCAW 보다 건전한 용접부를 얻을 수 있었으며, 아울러 기존 FCAW 용접시 5pass 이상 적용되어야 하는 것과 비교하여 1pass 적용이 가능하므로 현장 적용 생산성 향상 측면에서 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Hyong-Ho Cho, Increased order for LNG carriers and LNG bunker business, Industrial Technology Research Center Weekly KDB Report, 2018
- [2] Ji-Sun Kim, A Study on Optimization of Laser Welding Process for Cryogenic Steel (9% Nickel Steel), Mokpo University, 2018
- [3] Miriaki, Yukio, Akihide and Masanori , Development of laser-arc Hybrid Welding, NKK Technical review No.86 , 2002
- [4] Hee-Sun Bang, Jun-Hyung Kim and Han-Sur Bang, Investigation on Weldability of Aluminum Alloy by Arc, Laser, Hybrid(Laser+Mig) Welding, Chosun University, 2011
- [5] Bo-Ram Seong , A Study on the Mechanical Behavior of butt joint in STS 304L by Hybrid (CO₂ Laser+MIG) Welding, Chosun University, 2009
- [6] Jae-Ho Bank, Weldability of CO₂ Laser-GMA Hybrid Welding of Dissimilar Materials SCM440/ss275 with Different Wire Type, Chosun University, 2019
- [7] B.Ribic, T.A. Palmer and T. DebRoy, Problems and issues in Laser-arc Hybrid welding, International Materials Reviews Vol.54, No4, 2009
- [8] Young-Sik Kim, Sang-Cheol Kil, Latest welding technology for storage and transportation facilities of liquified natural gas, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.40, No.1 pp.17-27 , 2016
- [9] Duck-Hyun Ahn, Laboratory and Meta Analysis for 9% Ni steel of Liquified Natural Gas Carrier, Kongju National University , 2017
- [10] Kyue-Taek Shim, Fatigue crack growth characteristics of 9% Ni steel for LNG tank at Low temperature, Chungam National University, 2010
- [11] Wbong-Sup Park, Ki-Yeob Kang, Min-sung Chun, and Jae-Myung Lee, A comparative Study on Mechanical Behavior of Low Temperature Application Materials for Ships and Offshore Structures, Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol.48, No.3 pp.189-199, 2011
- [12] WbYoung-Woo Kim, An Experimental study for fatigue performance and fracture toughness

of 7% nickel steels at cryogenic temperature, Pusan National University, 2015

[13] International Standard ISO 13919-1, Welding- Electron and Laser-beam welded joints-Guidance on quality levels for imperfections Part1: Steel, First edition 1996

[14] ASTM E 8/E 8M-08 , Standard Test Methods for tension Testing of Metallic Materials, 2008

[15] IACS W28 ur-w28, Welding procedure qualification tests of steels for hull construction and marine structures, rev2 2012

<감사의 글>

적지 않은 늦은 나이에, 여성에, 전공도 다른 저에게 인생에 더 없을 기회를 주신 조선대학교 방한서 교수님, 방희선 교수님, 그리고 석사기간동안 열심히 지도 해 주신 모든 교수님들께 감사드립니다. 의욕만 앞서고 막막했던 대학원기간에 동기 분들과 함께 여서 너무도 영광이었습니다. 이종순 대표님, 같은 여성으로 너무 자랑스럽습니다. 함께 많이 배우고 함께여서 행복했습니다. 이정훈검사님 대학원동기로 인연 맺을 수 있어서 저에게 더없는 행운이었습니다. 함께 마지막관문에 서게 된 양창식님, 본인도 바쁘게 같이 제출할 수 있게 취합하느라 고생하신 최솔님, 실험 도와주느라 고생 많았던 너무도 고마운 쌤가이 박사과정 김종희님, 모두 정말 감사합니다.

항상 격려와 지지를 아끼지 않으시는 든든한 선배님이신 현대상호 이만섭상무님, 좋은 기회 잡을 수 있도록 많은 격려와 정보를 주신 현대상호 박성욱직장님, 업무로 많이 바쁘신데 끼꺼이 시간내어 주신 현대상호 홍석한과장님, 지금은 전 직장이 되었지만 학교에 다닐 수 있게 허락해주신 제이비아이 박상욱대표님 진심으로 감사드립니다.

처음 용접분야에 대해 관심을 갖게 해주신 DMGL 조동선검사님 진심으로 감사드립니다. CWI 같이 공부하며 좋은 인연이 되어준 DSTC 3기, 짤로 이쁜 추선희, 멋쟁이 이보람, 현실동생 전형기, 친한친구 김재춘, 동네친구 박인욱, 보기힘든친구 김현재, 선배오빠 이창현, 그 외 DSTC 3기 모두모두 감사합니다.

무슨 이 나이에 학교나며 내 앞에서 타박하시고 다른 사람들에게 딸 자랑을 한없이 늘어놓으시는 사랑하는 나의 엄마 박영자님, 정말 자랑스럽고 엄마의 딸이라 행복합니다. 사랑합니다.

나의 인생의 로또인 든든한 지원군 나의 신랑 박요섭님, 당신의 뜨거운 응원과 지지로 지금까지, 여기까지 잘 오게 되었습니다. 항상 감사하고 고맙고 사랑합니다. 엄마 학교가는 날 스스로 챙겨서 학교 잘 다녀준 나의 착하고 이쁜아들 투빈 박성빈, 박형빈 감사하고 사랑합니다.

이렇게 감사의 글을 남기려 하니 내가 하는 모든 일들에 많은 사람들의 도움과 격려가 없이는 그 어떤 일도 되지 않는다는 것을 새삼 크게 깨닫게 됩니다.

나의 삶에도 나의 생각에도 지금의 대학원 생활은 많은 영향을 주었습니다. 도전을 즐길 수 있는 긍정의 마음을 가지게 되었고, 많은 격려로 자신감을 얻었습니다. 누구보다 열심히 주어진 나의 일에 최선을 다하는 엔지니어가 되겠습니다. 모든 분들께 머리숙여 진심으로 감사드립니다.