

파이버 레이저를 이용한 LNG선용 STS316L의 용접특성

김종도[†] · 이재범¹ · 이창제² · 송무근³ · 남기정⁴

(원고접수일 : 2012년 9월 17일, 원고수정일 : 2012년 10월 25일, 심사완료일 : 2012년 11월 7일)

Weldability of STS316L for LNG Carrier by Fiber Laser

Jong-Do Kim[†] · Jae-Beom Lee¹ · Chang-Je Lee² · Moo-Keun Song³ · Gi-Jeong Nam⁴

요약 : 오늘날 지구온난화, 환경오염 및 주요 에너지원인 화석연료의 고갈에 대한 우려가 높아지면서, 전세계적으로 신재생에너지 및 청정에너지에 대한 관심이 급격하게 증가하고 있다. 따라서 화석연료의 대체 및 SOX, NOX와 같은 오염물질을 적게 배출하는 청정에너지로써 LNG가 폭넓게 사용되고 있다. 그로인해 LNG의 소비는 급격하게 증가하고 있으며, 그것을 운반하기 위한 LNG선의 수요 또한 수십 년 동안 크게 증가하였다.

본 연구에서는 LNG선의 생산성을 향상시키기 위해 LNG선용 스테인리스강에 대한 용접에 고출력 파이버 레이저를 이용하였다. 사용된 재료는 탄소 함유량이 0.03% 이하의 STS316L이며 두께는 8mm이다. 최대출력 5kW의 파이버 레이저를 열원으로 사용하여 비조점거리, 겹치기 용접 그리고 맞대기 용접에 대한 실험을 진행하였다. 실험결과, 겹치기 용접의 경우 2.0m/min, 맞대기 용접의 경우 3.0m/min의 용접속도까지 접합이 가능하였다.

주제어 : 파이버 레이저, LNG선, 스테인리스강 STS316L, 겹치기 용접, 맞대기 용접

Abstract: These days, world wide interest about global warming and environmental pollution and exhausting fossil fuel which have been main energy source in all around the world. So many country have tried to find out the solution by investing new & renewable and clean energy. Therefore LNG have been widely used as a substitution of fossil fuel and clean energy that emits less pollutant like SOx, NOx. Therefore LNG consumption has been quickly raised and LNG carriers have been getting larger for decades.

In this study, high power fiber laser was used for welding of stainless steel for LNG carrier to increase its productivity. Used material was STS316L which has low carbon less than 0.03% and its thickness was 8 mm. We carried out bead, lap and butt welding by using the fiber laser which has maximum power up to 5kW. As a result, we could find out that lap and butt joint was possible at welding speed of 2.0m/min and 3.0m/min respectively.

Key words: Fiber laser, LNG carrier, Stainless steel STS316L, Lap joint, Butt joint

1. 서 론

기존의 화석연료 사용에 따른 환경문제가 부각됨에 따라서 청정에너지에 대한 국제적인 관심이

집중되고 있다. 이에 따라 1980년대 말을 기점으로 석유나 석탄과 같은 화석연료의 대체 및 청정에너지로써 취급이 곤란하였던 천연가스의 사용량이

[†] 교신저자(한국대학교 기관공학부, E-mail: jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4253)

1 STX 조선해양(주) 기술연구소, E-mail: leejb@onestx.com, Tel: 055-548-5650

2 BEST F.A 기술연구소, E-mail: lab@bestfa.co.kr, Tel: 055-286-6060

3 한국해양대학교 대학원, E-mail: moobburi@hanmail.net, Tel: 051-410-4676

4 한라이비텍 기술연구소, E-mail: gjn68@chol.com

급격하게 증가하였으며, 그것을 운반하기 위한 LNG선의 수요 또한 크게 증가하였다[1-2].

LNG(Liquified Natural Gas)는 가스상태의 천연 가스를 액화시킨 것으로, 그 부피가 기체상태일 때 보다 1/600에 불과하여 저장 및 운송이 용이하다. 하지만 천연가스의 기화온도는 약 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 액체상태를 유지하기 위해서는 신뢰성 높은 단열설비가 필요하며, 재료의 선택에 있어서도 극저온에서 충분한 강도와 인성을 유지할 수 있어야 한다. 현재 LNG선에서는 오스테나이트계 스테인리스강, 알루미늄 합금 및 인바(invar)가 사용되고 있다. 이중 오스테나이트계 스테인리스강은 멤브레인 타입의 카고탱크(cargo tank) 재료로써 LNG선 건조가 증가함에 따라서 그 사용량이 지속적으로 증가하고 있다[3-5].

현재 LNG선 카고탱크의 용접에는 아크 및 플라즈마를 이용한 용접이 주로 사용되고 있지만, 용접 속도가 분당 수 cm 정도밖에 되지 않는다. 하지만 높은 에너지밀도를 가지는 레이저를 이용할 경우에는 분당 수 m의 빠른 용접이 가능하며, 그에 따른 생산성의 향상을 기대할 수 있다[6,7].

따라서 본 연구에서는 LNG선 카고탱크에 사용되는 스테인리스강 STS316L의 용접을 위해 고출력 파이버 레이저를 이용하였다. 빠른 용접속도를 유지하면서 용접부의 기계적 성질을 저하시키지 않기 위해 다양한 매개변수를 고려하여 연구를 진행하였다.

Table 1: Chemical composition of specimen

Element(%) Material	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo
STS316L	16.85	9.95	0.027	1.49	0.65	0.023	0.004	2.15

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

LNG선 카고탱크는 극저온에 노출되기 때문에 사용되는 재료는 저온에서도 우수한 강도 및 인성을 유지할 수 있어야 한다. 또한 용접 후 열영향부에서 발생하기 쉬운 입계부식을 억제하기 위해 탄소의 함량도 제한되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 오스테나이트계 스테인리스강인 STS316L을 사용하여 용접성을 평가하였다. 실험에서 사용한 시험편의 화학조성은 분광분석을 통해 측정하였으며, 그 조성을 **Table 1**에 나타낸다. 탄소 함유량이 0.03% 이하의 저탄소 스테인리스강으로, 용접시 입계부식의 발생을 방지한다. 시험편의 두께는 8 mm이며, 150 × 50 mm의 크기로 재단하여 실험에 적용하였다.

2.2 실험방법

실험에는 최대출력 5 kW의 Yb-파이버 레이저를 용접 열원으로 사용하였다. 레이저의 파장은 1,070 nm이며, 빔 품질(beam quality)은 6 mm · rad으로 매우 우수하다. 발진된 레이저빔은 직경 150 μm인 파이버를 통해 전송되었으며, 초점거리가 300 mm인 광학계를 통해 조사되었다. 또한 반사광에 의한 파이버 커플러(fiber coupler)의 손상을 막기 위해

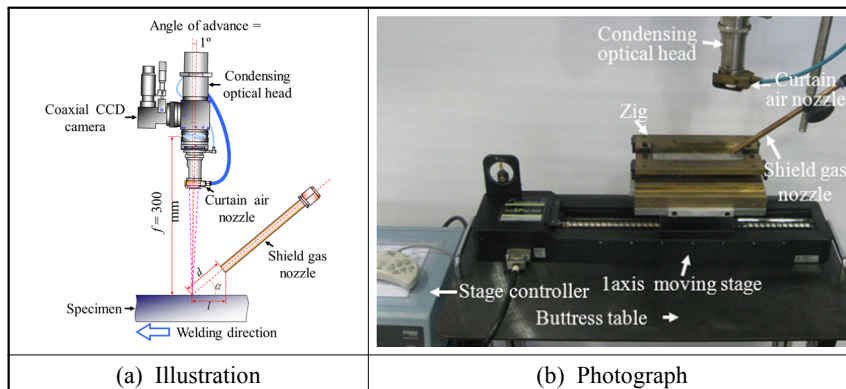


Figure 1: Setup of experimental equipment

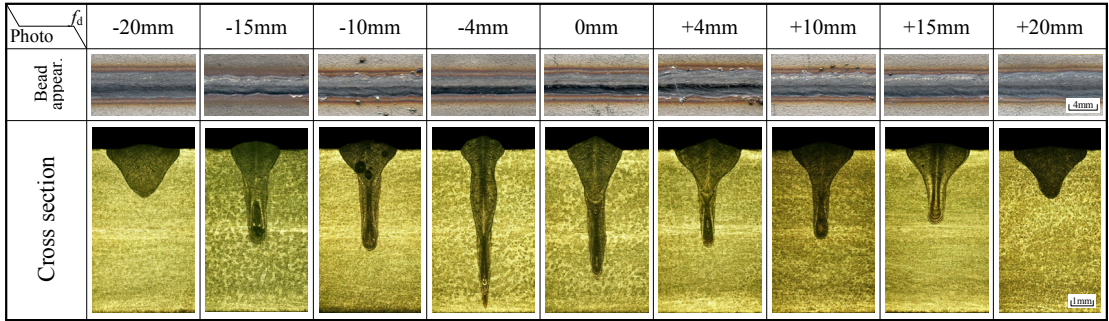


Figure 2: Bead appearance and cross section of weld with various defocused distance in STS316L bead welding by fiber laser

광학계에 1°의 전진각을 주어 실험을 진행하였다. 용접은 간이 스테이지를 이동하여 실시하였으며, 용접부의 실드를 위해 실드가스 노즐을 레이저 조사지점의 후방에 설치하였다. 이러한 실험 모식도 및 장치를 **Figure 1**에 나타낸다.

본 연구에서는 STS316L의 파이버 레이저 용접 특성을 파악하기 위해 비초점거리를 변화시키면서 비드용접을 실시하였으며, 높은 빔품질에 의해 발생하는 고압의 플라즈마가 용접에 미치는 영향이 크다고 판단하여 실드가스의 유량 및 노즐의 각도와 위치를 변수로 하여 그 특성을 비교하였다. 비초점거리 및 실드가스의 영향을 파악한 후 그 조건을 기준으로 레이저 출력 및 용접속도를 변화시키면서 겹치기 및 맞대기 용접을 시행하였다. 또한 마이크로 비커스 경도 및 인장 시험을 통하여 용접부의 기계적 특성을 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 비초점거리에 따른 용입특성

고출력 파이버 레이저의 광학계 특성을 파악하기 위해 비초점거리(f_d)를 -20~+20 mm로 변화시키면서 비드용접을 실시하였다. 이때의 레이저 출력은 4 kW, 용접속도는 2 m/min으로 고정하였다. 비초점거리에 따른 비드용접시 용접부 비드 및 단면사진을 **Figure 2**에, 그리고 그에 따른 용입깊이 (D_p) 및 비드폭(W_b)의 변화를 **Figure 3**에 나타낸다. **Figure 2**의 용접부 단면사진을 살펴보면 키홀용접이 가능한 범위가 $f_d = -15 \sim +15$ mm까지로 매우 넓게 나타났으며, 용접부의 어스펙트비가 큰 것을 알

수 있다. **Figure 3**에서 확인할 수 있듯이, $f_d = 0 \sim -6$ mm 사이에서 그 변화가 매우 컸으며, $f_d = -4$ mm에서 비드천이가 일어났다. 특히 비드천이 지점에서의 용입깊이는 초점위치에 비해 약 20% 정도 깊은 특성을 나타내었다. 또한 이 조건에서 스페터가 거의 발생하지 않는 건전한 비드를 얻을 수 있었다. 따라서 STS316L의 파이버 레이저 용접시 비초점거리는 $f_d = -4$ mm로 설정하여 실험을 진행하였다.

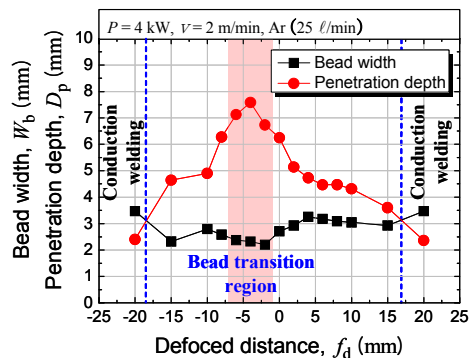


Figure 3: Variation of penetration with defocused distance in STS316L bead weld by fiber laser

3.2 실드가스 변수에 따른 용입특성

3.2.1 실드가스 노즐 각도의 영향

파이버 레이저는 빔 품질이 좋기 때문에 레이저 조사지점에 매우 좁은 키홀이 형성되어 고압의 플라즈마가 분출된다. 그러므로 이러한 플라즈마의 제어가 용접품질에 큰 영향을 미친다고 판단하여 실드가스의 매개변수들에 대한 용입특성을 파악하

였다. 레이저 출력 $P=4\text{ kW}$, 용접속도 $v=2\text{ m/min}$ 에서 비초점거리를 $f_d=-4\text{ mm}$ 로 설정하고, 실드가스의 종류를 Ar가스로 하여 실드가스 노즐각도(α)를 변화시키면서 그 영향을 조사하였다. 이때의 용입특성을 Figure 4에 나타낸다. 그림에서와 같이 각도에 따른 영향은 일부 보이지만 그 차이가 미미한 경향을 나타내고 있다. 하지만 상대적으로 각도가 높거나 낮은 경우에는 비드의 심(seam)이 약간 불안정해지고 표면산화가 발행하는 경향을 나타내었다. 이는 실드가스의 분사각이 높을수록 플라즈마의 높은 분출압력으로 인해 실드가스가 용융부까지 충분히 미치지 못하기 때문이며, 너무 낮은 각도에서는 오히려 실드가스가 용융금속의 유동에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 또한 노즐각도가 40° 를 제외한 나머지 각도에서는 용융부 하단에 기공이 발생하였다. 이는 노즐각도가 작을 경우에 표면부의 용융금속이, 클 경우에는 키희내벽의 용융금속이 실드가스에 영향을 받아 키희내부에서 발생한 금속증기가 외부로 배출되지 못하고 트랩(trap)되었기 때문으로 생각된다. 이로부터 노즐의 각도를 40° 로 설정하는 것이 적당함을 확인하였다.

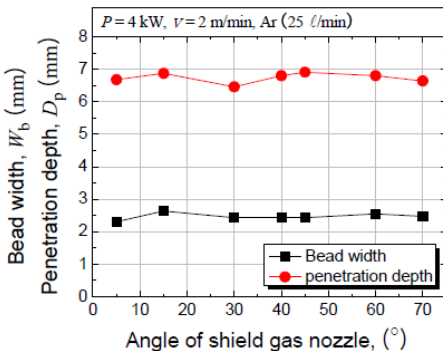


Figure 4: Variation of penetration with angle of shield gas nozzle

3.2.2 실드가스 노즐 거리의 영향

Figure 5는 실드가스 노즐거리(d)에 따른 용입의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 용입깊이 및 비드폭에 미치는 노즐거리의 영향은 크지 않았으나, 실드가스 노즐의 거리를 5~15 mm로 설정한

경우에는 상대적으로 비드의 심이 균일하지 않고, 단면에서는 기공이 발견되었다. 특히 $d=5\text{ mm}$ 에서는 비교적 많은 스패터가 표면에 부착되었으며, 내부에도 큰 기공이 발생하였다. 이러한 불규칙한 비드형상과 기공형성은 노즐의 거리가 증가함에 따라 점차 감소하여 $d=20\text{ mm}$ 이상의 조건에서는 비드의 표면과 폭이 균일해지며, 기공이 거의 없는 비드가 형성되었다. 이것은 노즐의 거리가 가까울수록 실드가스가 키희에 직접적으로 작용하여 표면 가까이에 존재하는 용융금속에 영향을 주어 불안정한 유동을 야기시키기 때문인 것으로 판단된다. 반면 거리가 멀어질수록 실드가스의 차폐효과가 감소하여 표면에 산화를 발생시켜 불규칙한 비드가 형성되었다. 따라서 기공이 발생하지 않고 양호한 비드표면을 얻을 수 있는 실드가스 노즐의 최적거리를 20 mm로 설정하였다.

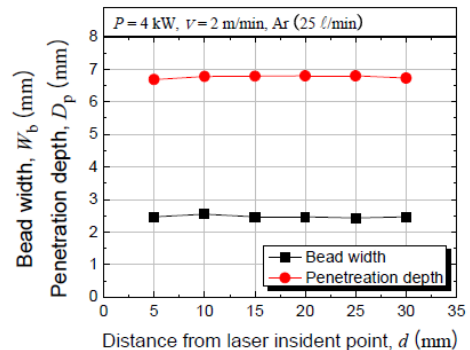


Figure 5: Variation of penetration with distance of nozzle and laser incident point

3.2.3 실드가스 유량의 영향

가스 유량의 변화에 따른 용입특성을 Figure 6에 나타낸다. 우선 실드가스를 사용하지 않은 경우에는 용입깊이와 비드폭이 실드가스를 사용할 때 보다 작게 나타났는데, 이는 실드가스에 의한 차폐효과가 없을시 키희내에서 증발한 증성원자가 대기 중의 산소나 질소와 만나 엄청난 양의 폼(fume)이나 수트(soot)를 형성하여 레이저빔의 경로를 차단하기 때문이다. 또한 실드가스 미사용시 비드 표면부근의 네일헤드(nailhead)부를 제외한 재료내부의 용융부 폭이 실드가스를 사용하는 경우에 비해 다

소 넓게 형성되었는데, 이는 산화에 의한 발열에너지의 영향으로 보이며, 실드가스가 5 ℓ/min으로 증가하면서부터 용입깊이가 증가하였다. 또한 실드가스를 사용하지 않은 조건에서는 다수의 스패터(spatter)가 발생하는 불안정한 특성을 나타내었다. 비드의 형상은 실드가스의 유량이 증가하면 점차 안정된 형상을 보였으며, 20 ℓ/min 이상에서 균일한 비드폭이 얻어졌다. 따라서 용입깊이와 실드가스의 소모를 고려할 때 실드가스의 최적유량은 25 ℓ/min 인 것으로 판단하였다.

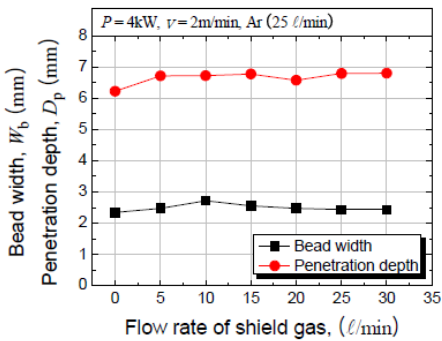


Figure 6: Variation of penetration with flow rate of shield gas

3.3 겹치기 용접시의 용입특성

두께 8 mm의 STS316L에 대하여 레이저출력 $P = 1 \sim 5$ kW, 용접속도 $v = 0.5 \sim 3.0$ m/min의 범위에서 겹치기 용접을 실시하였다. 레이저 출력 및 용접속도에 따른 용입특성을 살펴본 결과, 용접속도가 감소함에 따라 키홀 끝단의 용융경계면이 부드럽고 둥그스름한 형태로 변화한 것을 알 수 있었는데, 이는 용접속도가 감소할수록 열전도에 의한 용융부의 형성이 증가한 것으로, 이로 인해 어스펙트비가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 용접속도가 감소함에 따라 단위면적당 입사 에너지가 급격하게 증가하는데 반하여 키홀의 깊이증가는 크지 않기 때문이다. 한편, 용접속도가 증가할수록 점차 안정적인 비드형상을 나타냈으나 스패터의 양이 증가하는 경향을 보였다. 용접속도가 증가할수록 스패터가 증가하는 이유는 키홀의 폭이 좁아짐에 따라 플라즈마의 상대적인 분출압력도 더 크

게 되어 키홀내벽의 용융금속을 강하게 비산시키기 때문이라고 생각된다.

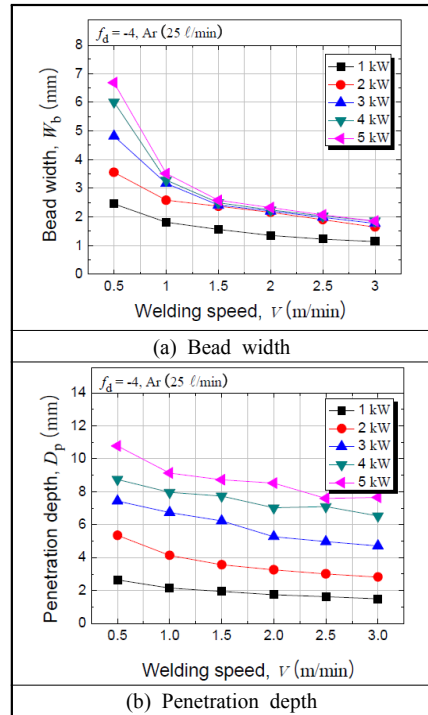


Figure 7: Variation of weld zone in STS316L lap welding by fiber laser

Figure 7은 용접부의 비드폭 및 용입깊이의 변화를 나타낸다. (a)의 비드폭 변화를 살펴보면 $P = 1$ kW를 제외한 출력에서 용접속도 $v = 1.5$ m/min 이상의 조건에서는 출력의 변화에 관계없이 비드폭이 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 용접속도가 빨라지면 가공재 표면에 레이저빔이 머무르는 시간이 감소하며, 더불어 높은 파워밀도에 의해 빔이 조사된 부분만을 용융시키므로 용접속도에 따른 비드폭의 차이가 미미한 것으로 판단된다. 따라서 그래프에서 보듯이 용접속도 $v = 1.5$ m/min 이상에서는 용접속도가 증가하여도 비드폭의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

Figure 7(b)는 출력과 용접속도에 따른 용입깊이의 변화를 표시하고 있다. 용접속도가 일정할 때 출력에 따른 용입깊이의 변화는 크게 나타나는 반면, 출력이 일정할 때에는 용접속도가 증가할수록

용입깊이가 거의 직선적으로 감소하고 있다. 이것은 파이버 레이저의 빔 수축성이 우수하여 집광된 빔의 파워밀도가 높아 용접속도가 빠른 경우에도 키홀이 충분히 형성될 수 있기 때문이다. STS316L의 겹치기 용접결과, 레이저출력 $P=3\text{ kW}$ 까지는 어떠한 용접조건에서도 접합이 불가능하지만, $P=4\text{ kW}$ 에서는 $v=1.0\text{ m/min}$, $P=5\text{ kW}$ 에서는 $v=2.0\text{ m/min}$ 의 용접속도까지 접합이 가능하였다.

3.4 맞대기 용접시의 용입특성

8mm^t STS316L의 맞대기 용접은 겹치기 용접의 결과를 바탕으로 관통용입이 이루어지도록 레이저출력 $P=5\text{ kW}$ 에서 용접속도를 $v=1.0\sim 3.5\text{ m/min}$ 으로 변화시키면서 용접을 실시하였다. Figure 8은 용접속도에 따른 비드외관 및 용접부의 단면형상을 나타낸 것이다.

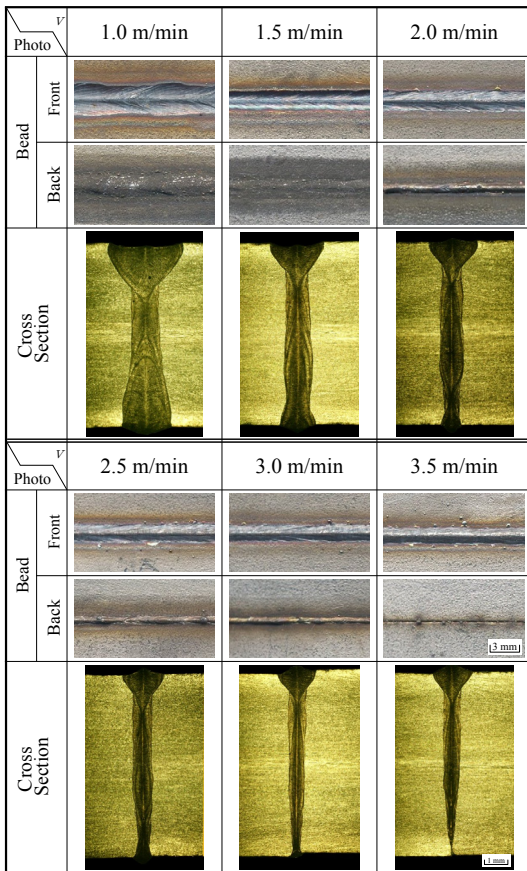
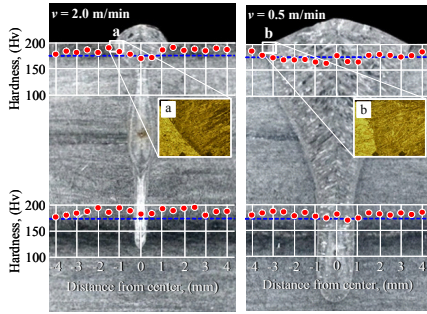


Figure 8: Bead appearance and cross section in butt welding for STS 316L at P = 5 kW

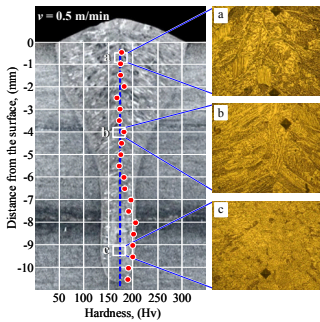
을 나타낸 것이다. $v=1.0\sim 1.5\text{ m/min}$ 의 낮은 용접속도에서는 이면비드의 폭이 크게 증가하면서 전면비드에서 언더필이 발생하였다. 용접속도가 느릴수록 이면으로 분출된 금속증기의 양이 증가하여 폼에 의한 오염이 크게 나타났다. 이러한 이면비드 폭의 확대는 초점을 지나서 다시 확산하는 빔과 열전도경로가 적은 이면의 표면에서 용융금속에 의한 과입열의 영향으로 생각된다. 용접속도가 $v=3.0\text{ m/min}$ 에서는 부분적으로 완전용입이 이루어지지 않은 부분이 존재하지만, $v=2.5\text{ m/min}$ 의 용접속도에서는 완전한 접합이 이루어졌다. 그러나 $v=2.5\text{ m/min}$ 에서는 이면비드가 고르지 못하고 이 속도 이상에서 전면에 스패터가 다량 발생하였다. 따라서 스패터가 거의 없고 전면과 이면비드 모두 안정적으로 형성되는 $v=2\text{ m/min}$ 을 최적의 용접속도로 설정하였다.

3.5 용접부의 기계적 성질

Figure 9은 레이저 출력 $P=5\text{ kW}$ 의 조건에서 겹치기 용접한 시험편의 경도분포 및 미세조직을 나타낸 것이다. (a)는 용접속도 $v=0.5\text{ m/min}$ 과 2.0 m/min 일때의 용접부와 용접부 주변의 경도를 나타낸 것으로, 그림에서와 같이 용융부의 중심에서는 모재의 경도와 유사하고 용융경계면에 가까울수록 경도가 높아지는 경향이 나타나고 있다. 또한 깊이 방향의 경도분포를 나타내는 (b)에서는 용융부의 아래쪽으로 갈수록 경도가 증가함을 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 재료가 저탄소 강종이므로 탄소에 의한 경도의 변화는 극히 적다고 판단된다. 따라서 이러한 결과는 응고속도의 영향으로 볼 수 있는데, 응고속도가 가장 느린 용융부의 중심에서 조직이 상대적으로 조대해짐에 따라 경도가 낮은 반면, 열영향부 쪽으로 갈수록 빠른 속도로 냉각되어 미세한 조직을 형성하기 때문이다. Figure 9(a)의 a와 b 미세조직을 비교하면 경도가 높은 a의 조직이 더 미세한 것을 알 수 있었으며, 또한 Figure 9(b)의 a, b, c를 비교하여도 경도가 높은 아래쪽으로 갈수록 조직이 미세해지는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Horizontal hardness distribution and microstructure



(b) Vertical hardness distribution and microstructure

Figure 9: Microstructure and hardness distribution in lap welding of STS316L at P = 5 kW

한편 STS316L 시험편의 맞대기 용접 시험편에 대한 인장시험을 실시한 결과, 파단은 용융부 및 모재에서 일어났다. 하지만 인장시험에서 시험편의 파단 부위 및 경로가 일정하지 않는 경향을 나타내었지만 인장값은 거의 유사한 결과를 보였다. 최적의 조건에서 용접된 시험편은 강도 및 연신률의 감소를 나타내지 않으면서, 오히려 모재의 인장강도 620 MPa에 비해 약간 증가하면서 625 MPa의 인장값을 나타내었다. 이는 입열량이 적은 레이저 용접의 특성상 용융액이 급냉되어 미세한 조직이 형성됨으로써 용접부의 강도가 상대적으로 증가되었기 때문이라고 판단할 수 있다.

4. 결 론

고출력 파이버 레이저를 이용한 LNG선용 스테인리스강 STS316L의 레이저용접을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 파이버 레이저는 우수한 범용성을 가지고 있기 때문에 키홀용접이 가능한 비초점거리의 범위

와 비드천이구간이 넓으며, 동일한 조건에서도 어스펙트비가 큰 용융부를 얻을 수 있다.

(2) 파이버 레이저 용접시 최적의 실드가스 조건을 설정하기 위한 실험을 실시한 결과, Ar 분위기에서 유량 $Q = 25 \text{ l/min}$, 분사노즐의 각도 $\alpha = 40^\circ$ 그리고 레이저 입사지점에서 노즐까지의 거리 $d = 20 \text{ mm}$ 에서 가장 용입이 깊고 결함이 없는 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 접지기 용접시 접합조건은 $P = 4 \text{ kW}$ 에서 $v = 1.0 \text{ m/min}$ 이하의 속도, 그리고 $P = 5 \text{ kW}$ 에서 $v = 2.0 \text{ m/min}$ 이하의 용접속도이며, 유효한 접합길이를 얻기 위해서는 $P = 5 \text{ kW}$ 이상의 출력이 필요하다고 판단된다.

(4) 맞대기 용접시 최적의 조건은 용접속도와 비드의 형상을 고려하여 레이저출력 $P = 5 \text{ kW}$, 용접속도 $v = 2.0 \text{ m/min}$ 으로 설정하였다.

(5) 용접부의 기계적 성질을 측정된 결과, 경도 값은 모재에 비해 용융경계면에서 약간 상승하였을 뿐 거의 유사한 값을 나타내었다. 또한 인장강도 값은 모재에 비해 약간 상승하면서 대체적으로 우수한 기계적 특성을 나타내었다.

참고문헌

[1] Y. S. Lee and D. H. Rho, "Innovation technology development & commercialization promotion of R&D performance to domestic renewable energy", Journal of Korea Echnology Innovation Society, vol. 12, no. 34, pp. 788-818, 2009 (in Korean).

[2] K. S. Kim, S. H. Boo, C. Y. Park, Y. G. Cho and J. S. Lee, "An experimental study on the Tensile and fatigue strength of SUS304L lap weld at the cryogenic temperature", Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 22 no. 3 pp. 96-102, 2008.

[3] J. H. Kim, Understanding of LNG Ship, Dasom Pub., 2006 (in Korean).

[4] D. S. Lee, "A developing tendency of liquefied natural gas carriers", Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety, vol.

15 no. 3, pp. 269-274, 2009.

- [5] Y. J. Kim, S. D. Yeo and S. I. Kim, "Construction of GAZ transport & techniga membrane(Mark-III) type LNG ship", Bulletin of The Society of Naval Architects of Korea, vol. 33 no. 6, pp. 42-49, 1996 (in Korean).
- [6] J. H. Moom, D. R. Yoon, D. C. Kim, D. W. Lee and T. W. Jang, "Influence of lap weld shapes on shear strength by plasma arc welding of SUS 304L", Proceedings of The 2004 Spring Annual Meeting of The Korean Welding and Joining Society, pp. 129-130, 2004 (in Korean).
- [7] The Korean Welding and Joining Society, Handbook of Welding and Joining, 2007 (in Korean).