

레이저-아크 하이브리드 용접을 이용한 SS400의 맞대기 용접 특성

김종도^{*†} · 명기훈^{**} · 박인덕^{***}

* 한국해양대학교 대학원 기관공학과, ** 한국해양대학교 기관공학부,

***한국기계연구원 부산레이저 기술지원센터

Butt Weldability for SS400 Using Laser-Arc Hybrid Welding

Jong Do Kim^{*†}, Gi Hoon Myoung^{**} and In Duck Park^{***}

* Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ.

** Graduate School, Korea Maritime and Ocean Univ.

*** Busan Laser Application Support Center, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received April 10, 2016 ; Revised May 8, 2016 ; Accepted May 30, 2016)

Key Words: Butt Welding(맞대기 용접), Laser-arc Hybrid Welding(레이저-아크 하이브리드 용접), Welding Parameter(용접 변수), Weld Properties(용접 특성), Mechanical Properties(기계적 특성)

초록: 본 연구에서는 SS400에 대해 레이저-아크 하이브리드 용접을 이용하여 맞대기 용접을 실시하였다. 맞대기 용접시 입열에 직접적으로 영향을 미치는 레이저 출력, 용접 전류 및 속도를 변화시켜 실험을 실시하였다. 이를 통해, 결함 없이 원 패스 관통 용접이 이루어지고, 미려한 비드가 형성되는 최적의 맞대기 용접 조건을 도출하였다. 용접부의 기계적 및 조직적 특성을 파악하기 위해 레이저 및 아크 영역에 대해 경도측정 및 미세조직 관찰을 실시하였다. 또한 모재와 용접 시험편의 강도를 비교하기 위해 인장강도 실험을 실시하였으며, 결과적으로 두 시험편의 인장강도 값은 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract: This study presents results of an experimental investigation of the laser-arc, hybrid, butt welding process of SS400 structural steel. Welding parameters including laser power, welding current and speed were varied in order to obtain one-pass, full-penetration welds without defects. The conditions that resulted in optimal beads were identified. After welding, hardness measurements and microstructure observations were carried out in order to study weld properties. The mechanical properties of both the base material and welded specimen were compared based on the results of tensile strength measurements. The yield and tensile strengths were found to be similar.

1. 서 론

최근 국내의 조선 산업에서는 생산성 향상 및 공정 자동화를 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이 중 레이저와 아크를 결합한 레이저-아크 하이브리드 용접이 많은 주목을 받고 있다. 하이브리드 용접은 이미 유럽을 중심으로 이루어지고 있으며, 대표적으로 이탈리아의 핀칸티에리(Fincantieri), 독

일의 메이어(Meyer Werft), 블룸 운트 포스(Blohm & Voss) 및 크베너(Kvaerner), 덴마크의 오덴세(Odense) 조선소 등 유럽 대부분의 조선소에서 레이저 절단 및 하이브리드 용접이 다양하게 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾

국내 조선소의 경우, 레이저 장치의 낮은 효율 및 비싼 가격 그리고 설비문제로 인해 적용이 이루어지고 있지 않지만 레이저-아크 하이브리드 용접에 관한 외국 학계의 연구 보고를 통해 많은 장점과 선박에 적용가능성을 알 수 있었기 때문

† Corresponding Author, jdkim@kmou.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Chemical composition of materials

Element(Wt %)	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni
Materials								
SS400	0.14	0.23	0.7	0.015	0.005	-	-	-
SM-70 (Φ 1.2mm)	0.08	0.5	1.05	0.014	0.01	-	-	-

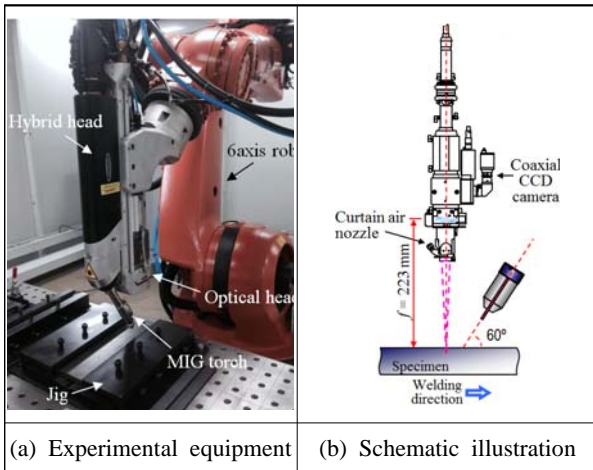


Fig. 1 Setup of experimental equipment

에 중공업을 비롯한 국내 업체에서 실제 선박에서의 적용을 위해 관련 연구를 진행하고 있다. 하이브리드 용접의 적용을 위해서는 무엇보다도 여러 매개변수에 대한 면밀한 검토가 필요하지만 현재 중공업 및 업체에서는 이런 변수에 대해 체계적으로 연구할 수 없는 실정이기 때문에 많은 어려움이 존재한다.⁽⁴⁻⁷⁾

따라서 본 연구에서는 레이저-아크 하이브리드 용접을 이용한 SS400강재의 맞대기 용접을 실시하여 용접특성을 조사하였으며, 용접부의 조직적, 기계적 특성을 파악하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에 사용된 재료는 일반 구조용 압연 강재인 SS400이다. 실험은 실제 조선용 강판 AH36의 적용을 목적으로 SS400을 사용하여 실시되었으며, SS400은 용접성과 가공성 및 경제성 등으로 인해 주요부품을 제외한 건축용 자재, 자동차용, 선박용, 해양 구조물, 건축 교량용과 같은 기계 및 구조물의 보조 부재로 흔히 사용되고 있으며 그 활용도가 높은 강종이다. 실험에 사용된

P=5kW, v=2.0m/min, Ar+CO ₂ 20l/min							
Current	180A	210A	240A	270A	300A	330A	
2.0	Front bead						
	Back bead						
	Cross section						

Fig. 2 Bead appearance and cross section with current

판재의 크기는 200×50×8 mm³이며, 와이어는 직경 1.2 mm의 SM-70을 사용하였다. 모재와 와이어의 화학적 조성을 Table 1에 나타낸다.

2.2 실험 방법

용접 열원으로는 최대출력 6.6 kW의 CW 디스크 레이저와 펄스 파형의 MIG를 사용하였다. 실험은 비초점 거리(f_d) -3 mm, 레이저-아크간 거리(D_{LA}) 3 mm, 전면 실드가스 유량(G_s) 80% Ar + 20% CO₂ 20 l/min, 이면 실드가스 유량(G_{sb}) Ar 15 l/min의 조건에서 전류 및 속도를 변화시켜 맞대기 용접을 실시하였으며, 용접시의 상황과 모식도를 Fig. 1에 나타낸다. 맞대기 용접시에는 맞대기 면을 밀링처리하여 갭(gap)의 영향을 최소화함으로써 형상인자가 용접에 미치는 영향을 배제하고자 하였다. 또한 용접부의 기계적 성질을 파악하기 위하여 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 용접부 경도를 측정하였으며, 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하고, 인장강도 시험을 통하여 모재와 용접 시험편의 강도를 비교하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 맞대기 용접 특성

레이저 출력 $P=5$ kW의 조건에서 전류 $I=150 \sim 330$ A, 속도 $v=2.0 \sim 2.75$ m/min으로 변화시켜 맞대기 용접을 실시하였으며, 대표적으로 속도 2.0 m/min일 때의 비드외관 및 용접부 단면을 Fig. 2에 나타낸다. 전류가 증가함에 따라 비드폭이 증가하고 열영향부가 넓어졌으며, 전류는 와이어 용융량과 비례하므로 덧살높이 또한 높아졌다. 이면 비드폭의 경우, 전류가 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 전류가 증가함에 따라 레이저 빔의 흡수율이 더욱 높아지기 때문에 이면비드에서의 플라즈마 형성이 더욱 격

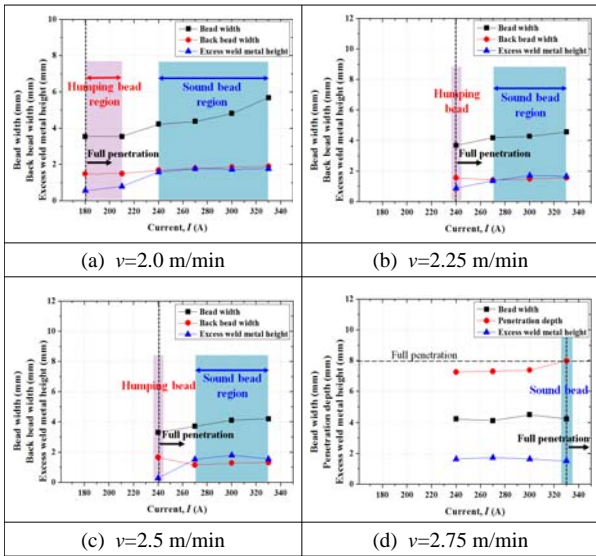


Fig. 3 Variation of penetration characteristics with welding current and speed

v \ I	2.0 m/min		2.25 m/min		2.5 m/min	2.75 m/min
	270 A	270 A	300 A	270 A	270 A	330 A
Front bead						
Back bead						
Cross section						

Fig. 4 Bead appearance and cross section under optimized condition

렬해져 이면비드의 폭이 넓어진 것으로 판단된다.

Fig. 3은 각 속도 조건에서 전류변화에 따른 용입특성을 나타낸 것으로, 모든 속도에서 미려한 이면비드가 형성되기 이전의 전류조건에서 험핑비드가 형성되었으며, 전류의 증가 혹은 속도 감소를 통해 험핑비드의 역제가 가능하였다. Fig. 4는 각 속도 조건에서 비교적 미려하게 형성된 용접부를 나타낸 것으로, $v=2.0$ m/min의 경우 과입열에 의해 전면 및 이면비드의 폭이 넓었으며, 2.5 m/min 이상의 속도에서는 빠른 용접속도로 인해 언더컷 및 불균일한 전면 및 이면비드가 형성되었다. 따라서 안정적인 이면 및 전면비드가 형성된 2.25 m/min의 270 ~ 300 A에서 최적 조건을 살펴보면, 전류가 낮을수록 열영향부의 폭이 좁아지기 때문에 270 A가 적합하다고 판단된다. 하지만 Fig. 5에 나타낸 인장시험편의 용접결과에서 300 A의

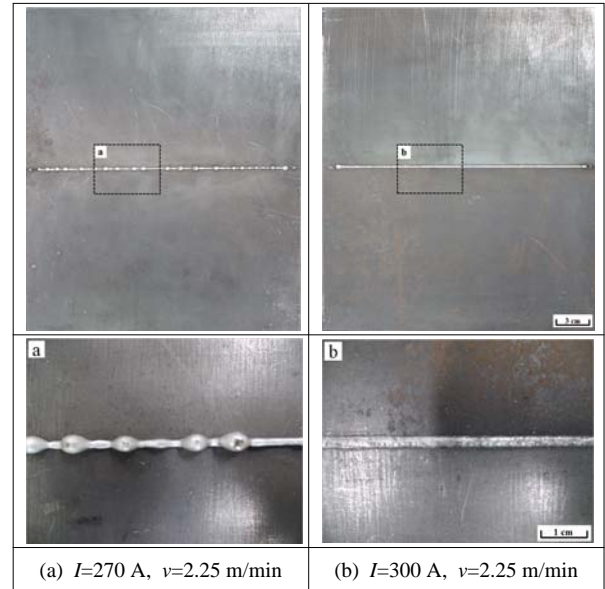


Fig. 5 Back bead appearance of tensile specimen with welding current

경우, 안정적인 이면 비드가 얻어졌으나 270 A에서 시편의 크기가 증가하면서 아크의 열전도 효과 감소로 이면에 험핑이 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서 위의 결과를 통해 맞대기 및 인장시험편 용접시 최적의 용접조건은 $P=5$ kW, $I=300$ A, $v=2.25$ m/min으로 판단된다.

3.2 용접부의 기계적 및 조직적 성질

3.2.1 용접부의 경도분포

경도는 맞대기 용접 시험편에 대하여 아크영역의 중심과 레이저 영역의 중심에서 횡 방향으로 200 μ m의 간격을 두고 측정하였다. 하중은 970.7 mN으로 설정하였으며 10초의 유지시간을 두었다. Fig. 6은 경도 측정 결과로, 모재 경도는 150 ~ 170 Hv, 아크 영역의 열영향부 경도는 200 ~ 260 Hv이며, 용접부의 경도는 250 ~ 270 Hv를 나타내었다. 레이저 영역의 경우, 열영향부에서 200 ~ 220 Hv, 용접부는 270 ~ 300 Hv이었다. 아크 영역과 레이저 영역에서의 열영향부 경도값은 모재보다 높은 값을 나타냈으며, 용접부 부근에서 모재 방향으로 점차 경도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 용접시 모재와 가까운 열영향부에서는 재결정이 일어나고, 용접부와 가까운 열영향부에서는 용접열에 의해 조직의 변태가 일어나기 때문으로 생각된다. 또한 레이저 영역에서는 오직 레이저만 직접적으로 작용하기 때문에 아크 영역

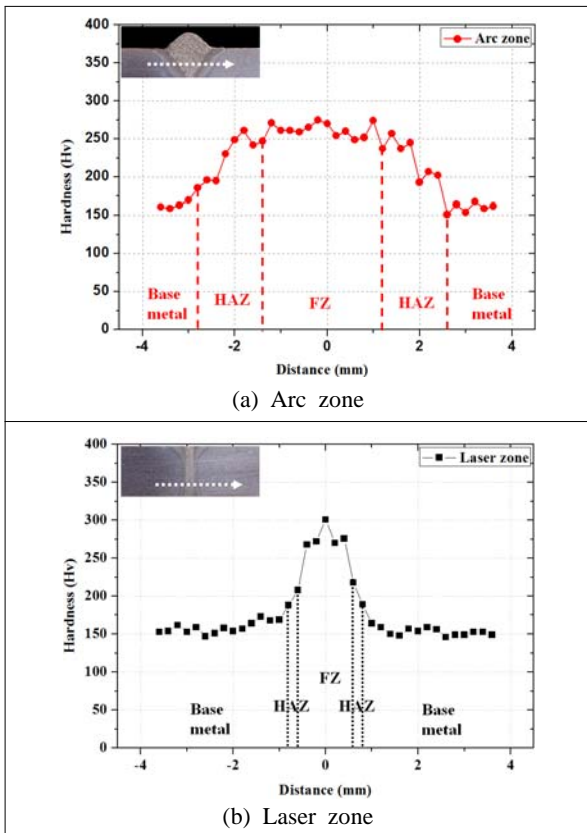


Fig. 6 Hardness distribution of SS400

보다 상대적으로 응고속도가 증가하여 결정립이 미세하게 되므로 아크 영역의 용융부에 비해 경도값이 다소 상승하는 것을 확인할 수 있다.

3.2.2 용접부의 미세조직

Fig. 7은 광학 현미경을 이용하여 용접부를 각 영역별로 관찰한 미세조직을 나타낸다. 모재는 대부분 페라이트로 구성되어 있으며 소량의 펄라이트 조직이 존재하였다. 아크 영역과 레이저 영역의 용융부에서는 열영향부와 용융부의 경계면으로부터 성장한 덴드라이트 조직을 관찰할 수 있었으며, 아크 영역에서의 덴드라이트가 레이저 영역보다 더욱 성장한 것을 확인할 수 있었다. 이는 아크의 많은 입열량으로 인해 덴드라이트가 성장할 시간이 길어지기 때문으로 사료되며, 레이저 영역에서는 아크가 직접적으로 작용하지 못하고 레이저가 주로 작용하기 때문에 응고속도가 상대적으로 빨라 덴드라이트가 크게 성장하지 못한 것으로 판단된다. 또한 용접열에 의해 용융부에서 모재방향으로 열영향부가 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 열영향부는 최고 가열 온

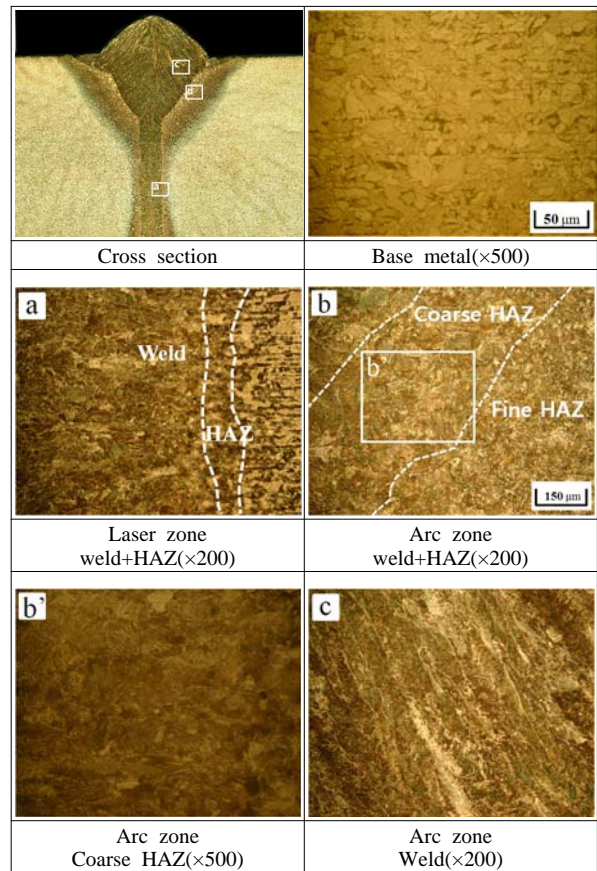


Fig. 7 Microstructure of SS400

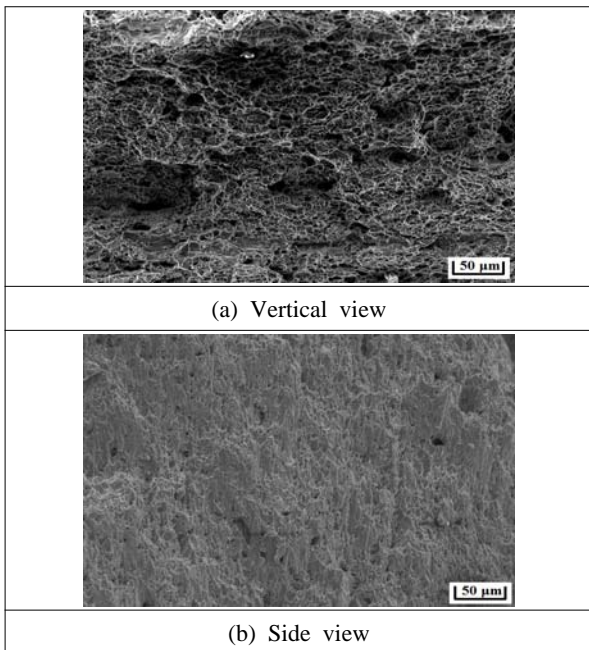


Fig. 8 Photograph of fracture shapes

도에 따라 결정립이 조대해진 영역과 미세해진 영역으로 나눌 수 있다. 아크 영역에서의 조대화 된 HAZ를 보면, 페라이트와 베이나이트 그리고 소량의 마르텐사이트로 구성된 것을 확인할 수 있었다. 또한 레이저의 높은 에너지 밀도로 인해 레이저 영역에서의 열영향부는 아크 영역보다 상대적으로 HAZ에 투입되는 입열량이 적어 결정립의 오스테나이트화가 덜 일어나기 때문에 아크 영역과 비교하여 저온상 조직의 비율이 적었다. 미세화된 HAZ에서는 결정립 미세화에 의한 강화효과로 모재보다 경도가 높았으며, 조대화 된 HAZ의 경우 마르텐사이트, 베이나이트와 같은 저온상 조직의 존재로 인해 모재보다 경도가 높고, 최대 경도값이 용접부와 유사한 것을 알 수 있었다.

Table 2 Average tensile test result of specimen

Properties Specimen	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
Base metal	428.55	282.92	43.42
Welded Specimen	438.95	285.19	34.55

**Fig. 9** SEM image of fracture shapes

3.2.3 용접부의 인장강도 특성

용접부의 강도를 평가하기 위해 최적의 조건으로 맞대기 용접된 시험편에 대해 인장시험을 실시하였다. Fig. 8은 인장 시험에 의한 파단 형태를 나타내고 있으며, 모재에서 파단이 발생하였다. 이는 용접부와 열영향부의 경도값이 높고 유사하기 때문에 상대적으로 경도가 낮은 모재에서 파단 되었다. Fig. 9는 파단면의 수직 및 측면 방향으로 관찰한 SEM 사진을 나타내며, Table 2는 인장시험 결과를 나타낸다. 파단면의 SEM 이미지 관찰을 통해 연성 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다. 인장시험 결과 통해 용접 시험편의 인장강도 및 항복강도 값이 모재와 유사한 것을 알 수 있었다. 용접 시험편의 연신율은 34.55%로 모재보다 낮은 값을 나타내었으며, 이는 용접된 시험편의 용접부 및 열영향부에 존재하는 경한 조직으로 인해 연성이 부족하여 연신율이 낮은 값을 나타내는 것으로 생각된다. 이상의 결과로부터

용접 시험편의 강도는 모재와 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

하이브리드 용접을 이용하여 SS400의 맞대기 용접을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 맞대기 용접 결과, P=5 kW, I=300 A, v=2.25 m/min의 조건에서 미려한 전면 및 이면 비드를 가진 용접부가 형성되었으며, 기공 및 균열과 같은 용접 결함은 관찰되지 않았다.

(2) 경도를 측정 한 결과, 용융부와 열영향부의 경도는 모재보다 높았으며, 조직의 재결정 및 변태로 인해 열영향부에서 최대 경도값이 용융부와 유사한 값을 나타내었다.

(3) 용접부의 미세조직을 관찰한 결과, 아크 및 레이저 영역의 용접부는 텐드라이트 조직을 나타냈으며, 레이저 영역에서의 결정립이 더욱 미세하였다. HAZ는 조대화 된 HAZ와 미세화 된 HAZ로 구분되었으며 조대화 된 HAZ에서는 소량의 마르텐사이트가 관찰되었고, 미세화 된 HAZ에서는 재결정으로 인해 미세한 조직이 관찰되었다.

(4) 모재와 용접된 시험편의 인장강도를 측정 한 결과, 용접된 시험편의 파단은 모재에서 발생하였으며, 연성파괴가 일어났다. 용접부와 열영향부에서의 높은 경도로 인해 모재에 비해 연신율은 감소하였지만, 인장 및 항복강도는 모재와 유사한 값을 나타내었다.

참고문헌 (References)

- (1) Gerritsen, Christoph H. J. and Howarth, David J., 2005, "A Review of the Development and Application of Laser-Arc Hybrid Welding in European Shipbuilding," 11th CF/DRDC International Meeting on Naval Application of Materials Technology.
- (2) Yamaoka, 2008, Application of Laser Processing in the Heavy Industry Field, Collection of papers for the 70th Meeting of The Laser Society of Japan.
- (3) Koga, H. and Goda, H., 2010, "First Application of Hybrid Laser-arc Welding to Commercial Ships," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 36, No. 3, pp. 59~64.

- (4) Bagger, C. and Olsen, FO, 2005, "Review of Laser Hybrid Welding," *Japan Laser Application*, Vol. 1, No. 1, pp. 2~5.
- (5) Ribic B., 2009, "Problems and Issues in Laser-Arc Hybrid welding," *Int Mater Rev*, Vol. 54, No. 4, pp. 223~44.
- (6) Roepke, C., 2009, "Hybrid Laser Arc Hybrid Welding of HY-80 Steel," *Weld J*.
- (7) Roepke, C. and Liu, S., 2010, "Hybrid Laser Arc Welding Process Evaluation on DH36 and EH36 Steel," *Weld J*, Vol. 89, pp. 140~150.