

## 조선용 강재의 Arc 용접 및 Laser 용접부 특성 비교 Comparison of Welding Characteristics of shipbuilding steel using Arc and Laser

김 용\*, 류덕희\*, 김재성\*, 이보영\*\*

\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

\*\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

**Abstract** Korea holds the first rank in the world for shipbuilding industry, we should develop the welding technology which is fundamental technique in order to keep the first rank. In this study, therefore, welding characteristics of shipbuilding steel using arc and laser were compared experimentally to apply laser-arc hybrid welding system in the heavy industry including shipbuilding as next generation welding process.

### 1. 서 론

현재 우리나라의 조선 산업분야는 일본과 함께 전세계 수주량의 70% 이상을 차지할 만큼, 국가의 기반 산업이며 고부가 가치 산업이다. 또한 이 조선 산업에서 용접은 선박 제조공정의 80% 이상을 차지할 정도로 많은 비중을 차지하고 있으며, 이는 용접기술이 바로 선박 건조 기술과 즉결된다는 사실을 말하고 있다. 그러나 세계 1위의 조선강국을 유지하기 위해서는 아크 용접시 실질적으로 현장에서 가장 문제되는 과도 입열로 인한 뒤틀림의 완화, 작업속도의 향상 및 턴오버 공정의 삭제 등에 관한 끊임없는 연구가 이뤄져야 하며 이에 대한 해결방안은 고밀도의 에너지를 집중하여 사용하는 레이저 용접이 유일하다고 할 수 있다. 하지만 레이저 용접은 빠른 용접속도와 깊은 용입깊이, 그리고 적은 변형량을 기대할 수 있는 반면에 허용 gap tolerance가 작아서 이음부 관리가 까다롭우며, 시스템 도입에 따른 기술적인 한계점이 다수 존재한다.

이에 따라 본 연구에서는 아크 용접부와 레이저 용접부 사이의 장, 단점을 정량적으로 확인하기 위한 실험을 실시하였으며, 현재 전 세계적으로 활발히 연구되고 있는 레이저-아크 복합용접 공정 개발에서 아크 및 레이저 각각이 용접 품질에

미치는 인자에 대하여 규명하고자 하였다.

### 2. 실험 방법

레이저 및 아크 용접부의 정량적인 비교를 위하여 본 연구에 사용된 시편은 레이저-아크 복합용접의 용도에 따라 조선 산업에서 많이 사용되는 선체 구조용 A grade 강재로서, 소재의 조성은 Table. 1과 같다.

**Table 1** Chemical composition of base metal (Shipbuilding steel-A grade)

성분	C	Si	Mn	P	S
%	≤0.21	≤0.50	0.55	≤0.035	≤0.035

용접부를 비교하기 위하여 대표적인 아크용접은 SAW를 택하였으며, FCAW도 인장강도 비교를 위하여 선택적으로 SAW와 같이 적용되었다. 또한 레이저 용접은 후판용접에도 적용할 수 있는 용량인 12KW급의 CO<sub>2</sub> Laser 용접기가 사용되었다. 각 용접은 100×400×8t 두 장을 맞대기 용접하였으며, 용접조건은 기존의 자료를 검토하여 선정된 가장 적절한 값을 이용하였다. Table 2 및 Table 3은 SAW 및 Laser 각각의 용접조건을 나타내고 있다.

Table 2 SAW welding condition

패스	전류 (A)	전압 (V)	Gap (mm)	용접속도 (cm/min)
2 Pass	500	34	15	60

Table 3 CO<sub>2</sub> Laser welding condition

출력 (KW)	용접속도 (m/min)	Gap (mm)	보호가스 (mm)	유량 (l/min)
9	1	0	He	25

용접성을 평가하기 위하여 일반적으로 사용되는 시험법은 AWS(American Welding Society) 규격에 충실하였으며, ASME, ASTM, DIN 및 KS 규격을 참조하였다. 용접된 시편은 각각 인장강도 및 연신을 경도 특성 및 미세조직 분석에 이용되었다.

### 3. 결과 및 고찰

각 용접부의 인장강도 및 연신율을 확인하기 위한 인장시험 결과는 Table 4와 같다. 조선용 A grade 강재의 일반적인 기계적 성질은 항복강도가 235MPa 이상이며, 인장강도 400~520MPa, 그리고 연신율은 22% 이상으로 규정되어 있는데, 실험에 적용된 소재는 시험결과 규정치를 만족하였다. Table 4에서도 알 수 있듯이 아크 용접 후에는 인장강도가 모재보다 높아지는 반면 연신율은 약간 감소하는 경향을 보인다. 이와 반면에 레이저 용접된 소재의 인장강도 및 연신율은 Base metal보다 감소된 결과를 나타내었다.

Table 4 Tension test results

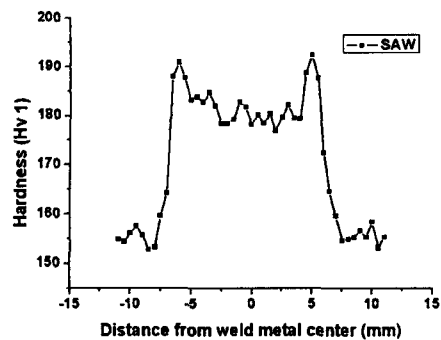
용접공정	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)
Base metal	310	452	32.5
SAW	326	458	30.3
FCAW	325	458	28.9
CO <sub>2</sub> Laser	288	446	27.7

Fig.1은 SAW와 Laser 용접 후에 각각의 경도 측정을 실시한 결과이다. 레이저 용접부는 아크 용접부에 비해 매우 급격한 가열 및 냉각과정을 거치므로, 열영향부를 포함한 용접 금속부의 경도 값은 매우 높게 나타난다. 실험에 사용된 강재의

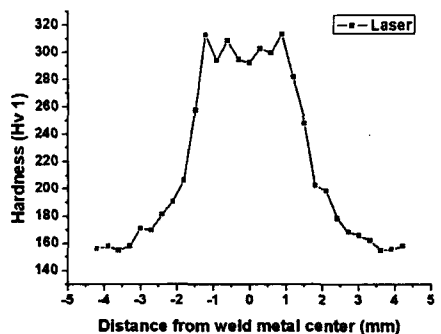
일반적인 경도값은 155Hv 전후였는데, 열영향부 및 용착금속의 경도는 300Hv 정도로 급격히 변화되었다.

(a)는 SAW 용접부의 경도분포를 나타내고 있는데, 여기서는 용착금속에서의 국부적인 경도증가 부위를 제외하고는 그 경향성이 이미 알려진 바와 같이 용융선 근처에서 195Hv 정도의 최고 경도값을 나타내고 있다. 이는 용융금속부와 열영향부 사이의 용융선이 A3 변태점 이상의 가열과 이어지는 냉각을 하게 됨에 따라 Ferrite로 완전한 상변태를 하지 못하고 약간의 Bainite 조직이 생성되기 때문으로 사료된다. 이에 반해 (b)를 보게 되면, 미세조직 검사에서도 알 수 있듯이 용융금속부는 전량 Martensite로 변하게 되고 그에 따라 아크 용접부보다 높은 경도값을 갖게 된다. 여기서 특이점은 아크 용접부에서와 같이 CGHAZ 부근에서 최고 경도값을 갖는 것이 아니라 용융금속부 전체에서 최고 경도값이 유지된다는 것이다(최고 Hv 311).

이상과 같은 경도분포에서 알 수 있듯이 레이저 용접부는 아크 용접부와 크게 다른 점이 발견되었고 열영향부의 크기도 매우 좁다(0.3~0.5mm)



(a) Hardness test result for SAW



(b) Hardness test result for CO<sub>2</sub> Laser

Fig 1. Hardness distribution across the weld metal

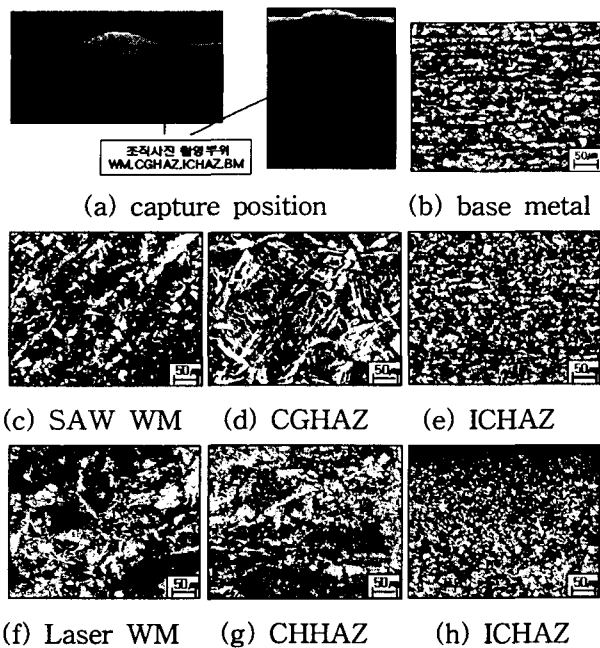


Fig 2 Microstructure for each zone (×200)

Fig 2는 조선용 강재의 모재부 조직사진 및 SAW 용접부와 Laser 용접부를 용착금속과 CGHAZ, 그리고 ICHAZ를 광학현미경에서 200배로 촬영한 것이다. fig.2의 (a)는 조직사진 촬영 위치를 나타낸 것이며, (b)는 조선용 강재의 일반 모재부의 미세조직을 나타낸다. 모재부는 0.18%의 탄소가 함유된 압연강으로, 압연된 방향을 따라 Ferrite(흰색)와 Pearlite 띠(검은색)의 구조로 이루어진 것을 볼 수 있다.

(e) 및 (h)는 각 용접에서의 ICHAZ 부위(최고 가열온도가 A1~A3 사이로 상승되었던 영역)를 보여주고 있는데, 이 영역에서는 Pearlite만이 조직 변태를 일으켰으며, Ferrite의 평균 결정립 크기는 모재보다 미세해진 것을 확인할 수 있다.

(d)는 SAW 용접부의 용융선 근처 부위를 나타내며 Ferrite side plate와 전(prior) Austenite 결정립계에서 생성되어 결정립 내부로 평행하게 성장된 적층 판상구조를 가지는 Bainite 조직이 혼재하는 것을 볼 수 있으며, (g)와 같이 Laser 용융부 근처의 CGHAZ에서는 Martensite lath 조직과 Bainite 조직이 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 이는 아크 용접과 레이저 용접에서 용융 및 응고 시간의 차이로 인해 레이저 용접부는 Austenite로 변태하였던 조직이 응고되면서 Ferrite로 완전히 변태되는 시간이 아크 용접부에 비해 부족했기 때문이다.

SAW에서 용착금속 부위는 (c)와 같이 전 Austenite 결정립계에서 다량의 grain boundary ferrite가 형성되어 있으며, 결정립 내부는 acicular ferrite도 존재하는 것을 볼 수 있다. 그러나 레이저 용접부의 경우, 일반 아크 용접부에서는 비교할 수 없을 정도로 냉각속도가 빨라서 용접과정 중 고온 용융지에서 형성된 Austenite는 거의 전량 Martensite로 상변태한 모습을 (f)에서 확인할 수 있으며, 이는 아크 용접부보다 더 높은 경도값을 가지는 이유가 된다.

#### 4. 결 론

기존 아크 용접과 레이저 용접의 용접부를 동일 강재를 사용하여 적절한 용접 조건에서 용접을 실시한 후 기계적 특성 및 미세조직을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 아크 용접과 레이저 용접 모두 용접후에 연신율이 모재보다 감소하지만, 아크 용접의 경우에는 인장강도가 모재보다 우수해지는 반면에 레이저 용접부의 인장강도는 낮아지는 경향을 보인다.
- 2) 용접부의 경도분포는 아크용접의 경우 용융선 근처에서 약 200Hv 값을 나타내는데 반해, 레이저 용접부는 용접부 전체가 300Hv 정도의 최고 경도치를 나타내는데 이는 아크용접과 달리 레이저 용접부는 급격한 가열 및 냉각시간에 의해 오스테나이트가 Ferrite로 변태하기에 충분한 시간을 갖지 못하여 Martensite로의 조직변태가 그 원인이 된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 2010 생산기반혁신 기술 개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. POSCO. 철강규격집. 2000.
2. Samuels L. E., Optical Microscopy of Carbon Steel, ASM, Metals Park, Ohio, 1980, P.247
3. Sindo Kou, Welding Metallurgy, 2002, 2nd ed. P232-239.