

특수용접을 활용한 오스테나이트계(STS304L)의 기계적 특성

최병철*, 강민관*

*한국폴리텍대학, 석유화학공정기술교육원 석유화학공정과
e-mail:cbc6971@kopo.ac.kr

A Study on the Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Welded by Laser and TIG(STS304L)

Byoung-Chul Choi*, Min-Kwan-Kang*

*Dept. of Petrochemical Process, Korea Polytechnics

요약

스테인리스강은 내식성 및 기계적 특성이 우수하여 가전기구, 주방용품, 자동차, 원자력 산업 등의 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히, 오스테나이트계 스테인리스강은 가공성 및 용접성이 우수하며, 900 K 정도의 비교적 고온에서도 우수한 기계적 강도를 가지므로 원자력 산업 구조물의 구조재, 피복재 등에 사용되고 있다. 원자력 산업의 대형구조물은 대부분 용접을 이용하여 제작되고 있으며, 주로 SMAW, TIG 등의 아크 용접이 적용되고 있다. 아크 용접은 경제적이며, 접합 재료 두께의 제한이 없다는 이점이 있다. 그러나 열원의 에너지 밀도가 낮아서 전도형 용입부를 형성하기에 용입 깊이가 얇다. 따라서 두꺼운 재료의 용접에는 멀티 패스(Multi-pass)가 요구되며, 결과적으로 재료에 부하되는 입열량이 커지게 된다.[4] 오스테나이트계 스테인리스강은 일반적인 탄소강에 비해 열팽창계수가 약 1.5배 높고, 열전도도는 1/3배로 낮아 저입열 용접이 요구되는 재료이다. 따라서, 본 논문에서는 오스테나이트계 스테인리스강의 대표 강종인 STS304L을 사용하여, 레이저 용접과 TIG 용접을 실시하였으며, 용접부의 미세조직과 굽힘과 충격 특성을 포함하는 기계적 특성에 대하여 비교 및 분석하였다.

1. 서론

스테인리스강은 내식성 및 기계적 특성이 우수하여 가전기구, 주방용품, 자동차, 원자력 산업 등의 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히, 오스테나이트계 스테인리스강은 가공성 및 용접성이 우수하며, 900 K 정도의 비교적 고온에서도 우수한 기계적 강도를 가지므로 원자력 산업 구조물의 구조재, 피복재 등에 사용되고 있다. 원자력 산업의 대형구조물은 대부분 용접을 이용하여 제작되고 있으며, 주로 SMAW, TIG 등의 아크 용접이 적용되고 있다. 아크 용접은 경제적이며, 접합 재료 두께의 제한이 없다는 이점이 있다. 그러나 열원의 에너지 밀도가 낮아서 전도형 용입부를 형성하기에 용입 깊이가 얇다. 따라서 두꺼운 재료의 용접에는 멀티 패스(Multi-pass)가 요구되며, 결과적으로 재료에 부하되는 입열량이 커지게 된다. 오스테나이트계 스테인리스강은 일반적인 탄소강에 비해 열팽창계수가 약 1.5배 높고, 열전도도는 1/3배로 낮아 저입열 용접이 요구되는 재료이다. 입열량이 많은 경우, 용접부에 심각한 열변형 및 잔류응력이 발생할 수 있으며, 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)가 넓게 생성되어 용접부의 품질 및 강도 저하가 일어날 수 있다. 이러한 입열량의 문제를 해결하기 위하여 최근에는 레이저 용접이 각광을

받고 있다. 레이저 용접은 좁은 범위에 집중된 레이저 빔을 열원으로 사용한다. 따라서 열원의 에너지 밀도가 매우 높으며, 키홀(Keyhole) 기구로 용입이 일어날 수 있다. 키홀 기구로 용입이 일어날 경우, 열의 전도가 작게 일어나기 때문에 상대적으로 적은 입열량으로 깊은 용입을 달성할 수 있다. 따라서 열영향부가 좁은 범위에 한정되어 고품질의 용입부를 얻을 수 있으며, 또한 고속의 용접이 가능하여 생산성의 측면에서도 이점을 가질 수 있다. Yan 등은 304 스테인리스강에 TIG 용접, 레이저 용접 및 Laser-TIG 하이브리드 용접을 실시하여, 용접부의 미세조직과 인장특성을 연구하였다. 그는 레이저와 Laser-TIG 하이브리드 용접에서 비교적 미세한 조직과 우수한 인장특성을 나타낸다고 주장하였다. 이 외에도 오스테나이트계 스테인리스강의 아크 용접과 레이저 용접의 비교 연구는 많이 실시되었으며, 레이저 용접에서 우수한 기계적 특성을 나타내었다고 보고하였다. 그러나 인장특성 이외의 상세한 기계적 특성의 연구는 없다. 용접부의 건전성을 평가하기 위하여 ASME section IX에서는 인장시험, 굽힘시험 및 충격시험의 실시를 제시하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 오스테나이트계 스테인리스강의 대표 강종인 STS304L을 사용하여, 레이저 용접과 TIG 용접을 실시하였으며, 용접부의 미세조직과 굽힘과 충격 특성을 포함하는 기계적 특성에 대하여 비교 및 분석하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 실험 재료

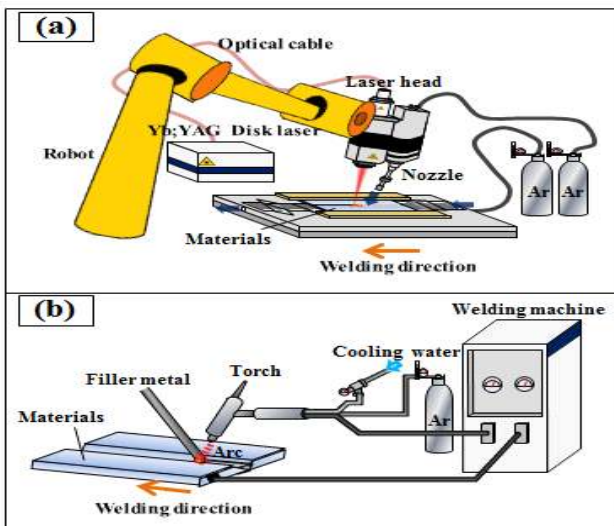
사용된 재료는 시판 중인 두께 6mm의 STS304L 강판이다. TIG 용접의 용가재는 직경 1.2 mm의 ER308을 사용하였다. ER308의 화학 조성을 표 1에 나타내었다. 여기서, L은 탄소함유량을 0.03% 이하로 제한시킨 Low carbon을 의미하며, 탄소의 제한은 용접열에 의한 입계부식이 일어나는 것을 방지하기 위한 것이다. 레이저 용접시험편의 접합면은 재료 간의 간격(Gap)을 최소화하기 위하여 밀링(Milling)을 실시하였으며, TIG 용접시험편의 접합면은 용착금속의 유입을 용이하게 하기 위하여 45°의 개선(Grove)을 실시하였다.

[표 1] 재료구성

Element [wt. %]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
STS304L	0.026	0.42	1.47	0.03	0.002	18.38	8.04	0.19	0.15
ER308	0.041	0.41	1.9	-	-	19.8	9.71	-	-

2.2 용접

용접은 맞대기 이음으로 하였다. 레이저 용접은 최대출력 16 kW 디스크 레이저(Trumpf TruDisk 16002)를 사용하였다. 시험편은 스테이지에 고정시킨 후, 레이저 빔을 이동시키면서 실시하였다. TIG 용접은 용가재를 사용하였으며, 레이저 용접과 마찬가지로 시험편을 스테이지에 고정시킨 후 아크를 이동시키며 실시하였다. TIG 용접은 HYWEL-305A를 사용하였으며, 완전 용입을 위하여 4패스를 실시하였다. 그림 1과 표 2는 용접의 모식도와 조건을 나타낸다.



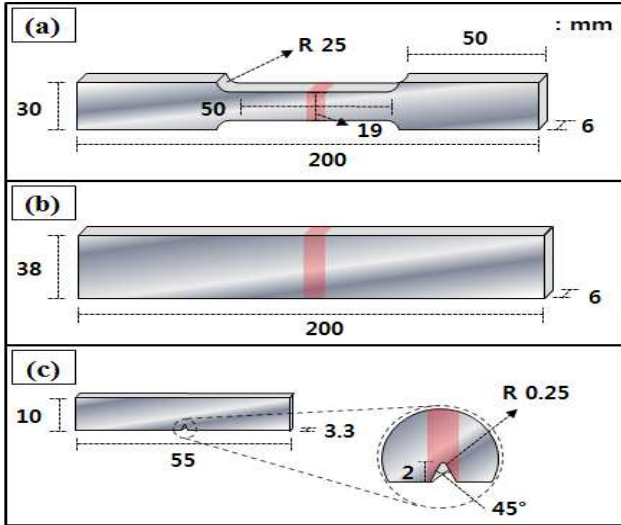
[그림 1] 용접프로세스 모델

[표 2] 용접매개변수

	Laser	TIG
Wavelength	1030 nm	-
Beam Quality	16 mm·mrad	-
Power	5.5 kW	-
Defocus	-2 mm	-
Incidence angle	10°	-
Voltage	-	DC 16 ~ 20 V
Current	-	1 st : 75 ~ 80 A 2 nd : 85 ~ 95 A 3 rd : 85 ~ 95 A 4 th : 75 ~ 80 A
Arc length	-	1.5 ~ 3 mm
Welding speed	1.5 m/min	0.06 m/min, 8-Weaving
Shielding gas	Ar	Ar
gas rate [L/min]	21 / 15 (Face / Root)	> 5 / 5~10 (Face / Root)
Improvement angle	0°	45°
Gap between materials	0 mm	3.2~3.5 mm
Filler metal	not used	1.2 mm Φ ER308

2.3 기계적 특성 평가

용접부의 기계적 특성은 경도측정, 인장시험, 굽힘시험 및 충격시험으로 평가하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도기(MMT-X, Matsuzawa)를 사용하여, 용접부의 폭 방향으로 측정하였다. 압입 하중은 200 g, 압입시간은 10 초 하였다. 인장시험편과 굽힘시험편은 각각 ASME Section IX QW-462.1(a) 및 QW-462.3(a)에 따라서 제작하였다. 인장시험은 10 mm/min로 속도로 실시하였다. 굽힘시험편은 용접부를 180°굽힘하였다. 인장시험과 굽힘 시험은 UH-F100KNX, Shimadzu를 사용하여 실시하였다. 한편, 충격시험편은 ASME Section II Part A SA370에 따라서 Charpy V-notch type을 제작하였다.[17] 노치는 모재(Base metal, BM), 용합부(Fusion zone, FZ) 및 열영향부(HAZ)에 각각 가공하였다. 충격시험은 OTC-500, Oriental을 사용하여 실온에서 실시하였다. 그림 2는 시험편의 모식도를 나타낸다.

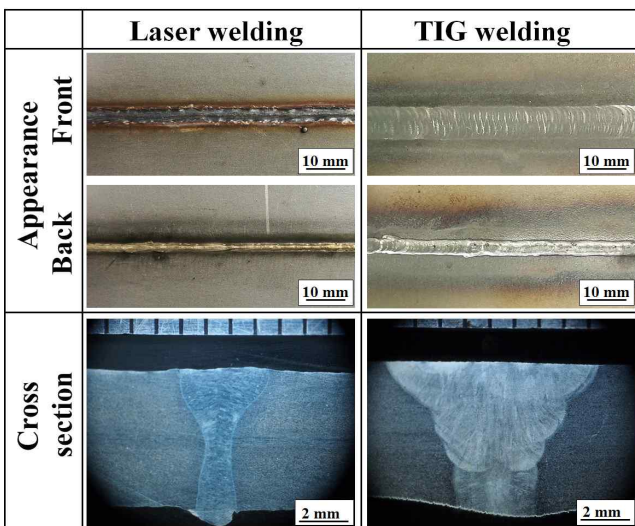


[그림 2] 표본의 모양치수

3. 실험 결과 및 분석

3.1 용접부 형상

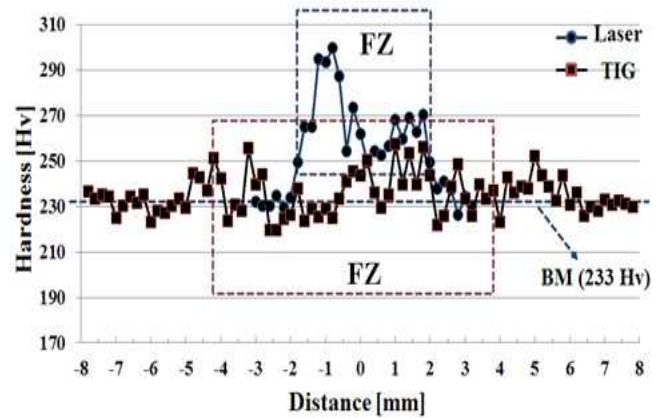
레이저 및 TIG 용접은 우수한 품질의 접합부를 형성하는 조건을 선정하여 실시하였다. 그림 3은 용접부의 외관 및 단면을 나타낸다. 레이저 용접은 용접부의 전면(Face) 및 후면(Root)에서 모재 영역의 변색이 나타나지 않았으며, 단면에서 폭/깊이 비(Ratio)가 큰 용입부가 관찰된다. 레이저 빔은 에너지 밀도가 매우 높기 때문에, 용융금속의 증발은 동반하는 키흐출 기구로 용입이 된 것으로 판단된다. 반면 TIG 용접은 용접부의 전면 및 후면 비드의 약 10mm 이내 모재영역에서 변색이 나타났으며, 열의 전도가 많은 것을 알 수 있다. TIG 용접부의 단면은 폭/깊이 비가 상대적으로 큰 반구형 용입부가 관찰된다. 아크의 에너지 밀도가 상대적으로 낮아 전도기구로 용입이 된 것으로 판단된다.



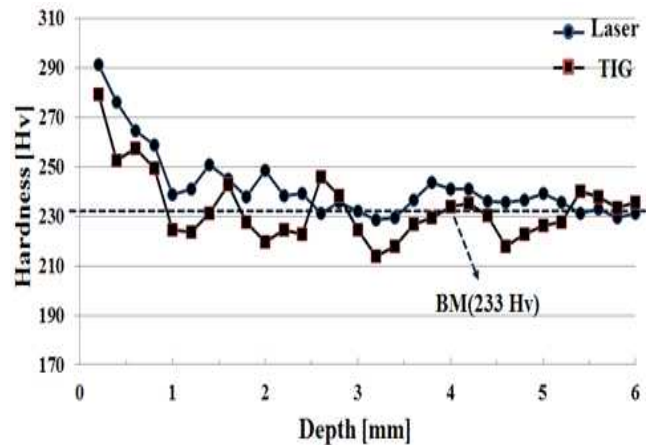
[그림 3] 비드 모양 및 용접물의 단면

3.2 용접부 경도분포

그림 4(a)는 레이저와 TIG 용접부의 폭 방향의 경도분포를 나타낸다. 두 용접부는 FZ에서 경도가 약간 높게 나타났다. 레이저 용접의 FZ는 BM의 경도(233 Hv)보다 높은 250~300 Hv의 경도분포가 나타났다. 시험에 사용된 재료는 저탄소 재료이므로 C에 의한 경도 변화는 작을 것으로 판단된다. 경도 상승은 빠른 냉각속도에 기인한 결정립 미세화의 영향으로 판단된다. BM와 FZ의 경계 영역은 경도 변화가 거의 나타나지 않았다. 이것은 HAZ가 거의 발생하지 않았음을 의미한다. TIG 용접의 FZ는 220~257 Hv 범위의 경도 분포가 나타났다. 모재의 경도와 비교했을 때 경화와 연화가 함께 나타났다고 할 수 있다. 4 패스에 의한 다수의 열이력 때문에 FZ 내에 국부적으로 연화 영역 생성된 것으로 생각된다. 그림 4(b)는 레이저와 TIG 용접부에서 깊이 방향의 경도분포를 나타낸다. 두 용접은 표면 근처에서 높은 경도를 나타내었다. 이것은 표면부의 냉각이 빠르기 때문이라 판단된다. TIG 용접의 깊이방향 경도분포는 폭 방향의 경도분포와 비슷하게 연화 영역이 나타났다.



(a) 레이저와 TIG 용접부의 폭 방향의 경도분포



(b) 레이저와 TIG 용접부에서 깊이 방향의 경도분포

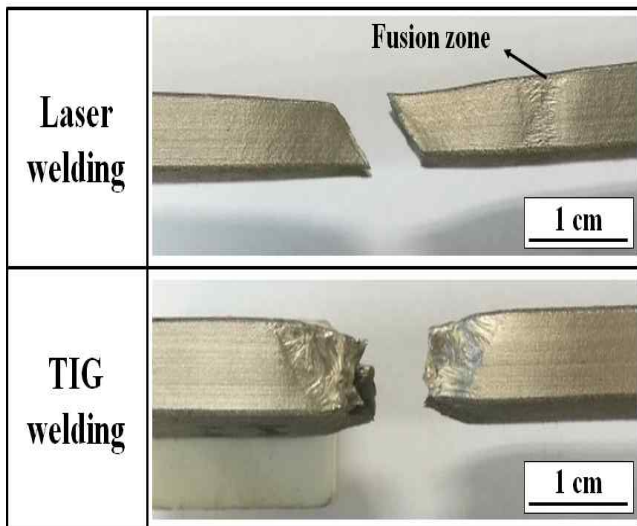
[그림 4] 레이저 및 TIG 용접의 경도 분포 특성

3.3 용접부 인장 특성

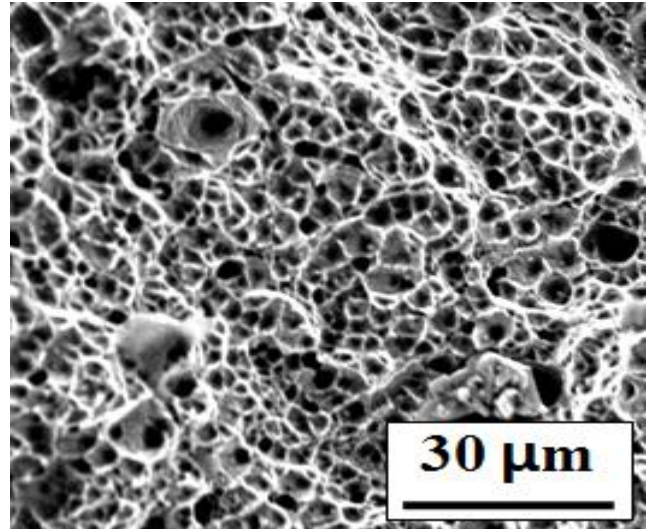
용접부의 강도를 측정하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 표 3과 그림 5는 각각 인장시험의 결과와 파단부의 형상을 나타낸다. 레이저 용접부의 인장강도는 BM의 인장강도보다 약간 높게 나타났으며, 파단부가 BM에 위치하였다. 이것은 빠른 냉각속도에 의한 FZ의 미세한 결정립이 강도의 상승은 원인이라 판단된다. 연신률은 약간 BM보다 낮은 값을 나타내었다. 이는 FZ 내의 경화 조직의 영향으로 생각된다. 반면 TIG 용접부는 BM보다 낮은 인장강도와 연신률을 나타내었으며, 파단부가 FZ에 위치하였다. HAZ 내의 조대화 결정립과 FZ내에 부분적으로 존재하는 조대결정립이 강도와 연신률 저하의 원인으로 생각된다. FZ의 조대결정립이 응력 집중부로 작용하여 균열이 발생한 것으로 판단된다. TIG 용접 파단부는 뜯겨나간 형상의 Tear ridge을 나타내며, Cup and Corn을 형성하고 있다. 또한, 그림 6은 SEM을 이용하여 관찰한 TIG 용접부의 파단면이며, 미세한 딩플을 가지는 전형적인 연성 파면을 나타내었다.

[표 3] 모재 및 용접 조인트의 인장 특성

	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
BM	637	52
Laser	650	46
TIG	627	37



[그림 5] 용접 유형에 따른 인장 시험 후 외관



[그림 6] SEM에 의한 TIG 용접 시편의 파 단면

5. 결 론

레이저 용접과 TIG 용접을 실시한 오스테나이트계 STS304L 용접부의 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였으며, 얻어진 결과는 다음과 같다.

레이저 용접은 키흔기구 용입이 일어났으며, TIG 용접은 전도기구도 용입이 일어났다. 레이저 및 TIG 용접의 용융부(FZ)는 급냉조직이 나타났다. TIG 용접과 달리 레이저 용접은 열영향부(HAZ)가 거의 나타나지 않았으며, 레이저 및 TIG 용접의 용융부(FZ)는 모재(BM)보다 높은 경도 분포를 보였다. TIG 용접의 경우, 모재(BM)보다 낮은 경도를 가지는 영역이 존재하였다.

참고문헌

- [1] Section II Part A & C, Section IX of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, American Society of Mechanical Engineers (2017)
- [2] J. S. Lee and J. W. Hong, 1999, "Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds", Journal of KWS, Vol 17, No. 5, pp. 10-19.
- [3] N. H. Kang, 2010, "Development of Alloy Design and Welding Technology for Austenitic Stainless Steel", The Korean Welding & Joining Society, Vol. 28, No.1, pp. 10-14.
- [4] Weibull, W, A, 1951, "Statistical Distribution Function of Wide Applicability", Journal of Applied Mechanics, Vol 18, pp. 293-297.