

MAG 용접의 혼합가스 비율변화에 따른 STS430J1L의 기계적 특성 평가 연구

이상원

국립공주대학교 기계자동차융합전공

A Study on the Evaluation of Mechanical Properties for STS430J1L According to Changes in the Mixed Gas Ratio of MAG Welding

Sang-Won Lee

Division of Mechanical Engineering, Kongju National University

요약 본 연구에서는 보일러 제조회사들의 보일러 열교환기 생산성 증대에 필요한 MAG 용접공정에 대한 최적의 용접 조건을 도출하고 현재 주로 이용중인 TIG 용접공정과의 기계적 특성을 비교 하였다. STS430J1L 시험편을 사용하고 용가재로는 STS316L을 적용하여 MAG 및 TIG 용접공정을 이용하여 최적의 용접조건을 도출하고 기계적 특성을 평가 하였다. 인장시험 결과, TIG(Ar 100%) 용접공정의 경우 평균 항복강도는 334 MPa, 인장강도는 494 MPa로 확인되었다. MAG(Ar 50%+ CO₂ 50%) 용접조건에서 평균 항복강도는 447 MPa, 인장강도는 593 MPa로 가장 높게 확인되었다. 미세경도 시험 결과, TIG 용접공정의 경우 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 222.8로 확인되었고 MAG(Ar 50% + CO₂ 50%) 용접공정의 경우 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 243.1로 확인되었다. 미세조직을 관찰한 결과 TIG 용접공정의 경우 용착금속부와 모재간의 경계가 명확하게 구분이 되었으나 Ar 50%+CO₂ 50% 가스를 사용한 MAG 용접공정의 경우 고온에서 용융된 금속이 응고할 때 형성되는 수지상정 조직이 관찰되었다.

Abstract In this study, the optimal welding conditions for the metal active gas (MAG) welding process of boiler heat exchangers were derived, and the mechanical properties were compared with the tungsten inert gas (TIG) welding process. Using the STS430J1L test piece and applying STS316L as the filler metal, the optimal welding conditions were derived using MAG and TIG welding processes, and the mechanical properties were evaluated. The tensile test showed that in the case of the TIG (Ar 100%) welding process, the average yield and tensile strengths were 334 MPa and 494 MPa, respectively. Under the MAG (Ar 50%+ 50%) welding conditions, the average yield and tensile strengths were highest at 447 MPa and 593 MPa, respectively. The microhardness test showed that in the case of the TIG MAG (Ar 50% + 50%) welding processes, the maximum microhardnesses were Hv 222.8 and Hv 243.1, respectively, in the deposited metal parts. Observations of the microstructure showed that in the case of the TIG welding process, the boundary between the deposited metal part and the base metal was clearly distinguished, but in the case of the MAG welding process using Ar 50% + 50% gas, a resin formed when the molten metal solidified at high temperatures.

Keywords : GMAW, GTAW, Mixed Gas, STS430J1L, STS316L

*Corresponding Author : Sang-Won Lee(Kongju National Univ.)

email: sstartacw@naver.com

Received January 5, 2024

Accepted March 8, 2024

Revised February 27, 2024

Published March 31, 2024

1. 서론

용접봉 제조사에서는 STS430 계열의 강들은 용가재 로써 주로 TS430Nb-MAO를 사용하고 FACW 공정을 적용하고 있다. 플릭스코어드 와이어의 경우 용접 후에 비드 표면에 형성되는 슬래그를 제거해 주어야 하기 때문에 자동화 측면에서 어려운 점이 있다. 일반적으로 보일러 제조회사들에서 보일러 열교환기 재료로 내식성, 성형성, 용접성, 고온특성이 우수한 페라이트계 스테인리스강 STS430J1L을 사용하고 있다. 보일러 열교환기 재료인 STS430J1L은 주로 TIG 용접공정을 사용하고 있지만 TIG 용접공정은 MAG 용접공정에 비해 전자세 용접이 어렵고 작업 생산성이 떨어진다는 단점이 있다.

본 연구는 “MAG 용접의 혼합가스 비율변화에 따른 기계적 특성 평가”에 관한 연구로, 보일러 열교환기의 MAG 용접공정에 대한 최적의 용접조건을 찾고 현재 사용중인 TIG 용접공정과 비교하여 기계적 특성을 평가하고자 한다. 각 공정별 보호가스 혼합비율에 따라 시험편을 용접하여, 외관을 검사하고, 용접된 모재로부터 인장

시험을 실시하고 특성을 분석하였다. 보일러열교환기 용접부 인장강도 특성 결과에 대한 검증과 신뢰성의 확보를 위해 미세경도시험 및 미세조직 관찰을 추가로 실시하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 용접

본 연구에 사용된 시험편의 모재 및 용가재의 기계적 특성 및 화학조성은 각각 Table 1, 2 에 나타내었다. Fig. 1 과 같이 시험모재 STS430J1L의 두께는 3 mm, 용접선의 길이는 120 mm 이며 시험편의 폭은 각각 75 mm로 실시하였다. 실제 현장과 유사한 조건의 실험을 위해 30° 개선 후 용접을 실시하였고 루트간격은 2 mm 로 가용접 후 박판용접으로 인한 용접 중 변형 방지를 위하여 실험용 지그를 제작하여 볼트 고정 후 용접을 실시하였다.

Table 1. Mechanical characteristics of base metal and filler metal

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
STS430J1L	≥ 205	≥ 390	≥ 22	≥ 200
STS316L	≥ 175	≥ 480	≤ 40	≥ 200

Table 2. Chemical compositions of base metal and filler metal

[wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	기타
Base metal (STS430J1L)	≤ 0.025	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.04	≤ 0.03	-	16.0 ~ 20.0	Cu 0.3~0.8 N ≤ 0.025
Filler metal (STS316L)	≤ 0.03	0.4	1.2	≤ 0.045	≤ 0.03	12.8	18.5	Mo 2.3

Table 3. Optimal welding parameters

Process	TIG	MAG
Welding position	Flat	Flat
Welding current(A)	80	120
Welding voltage(V)	18	15
Feeding speed(mm/min)	400	380
Heat input(kj/cm)	2.16	2.84
Arc length(mm)	10	10
Flow(L/min)	20	20

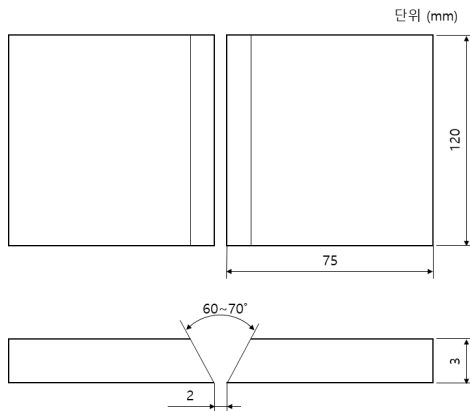


Fig. 1. Dimension of the test specimen

2.2 공정별 용접조건

용접공정으로는 TIG와 MAG의 두 가지 공정을 이용했다. TIG 용접공정의 경우 ㈜퍼팩트대대社의 아날로그 방식의 350A 용접기를 사용했다. 이 용접기는 전류의 정확한 조정이 가능하고, 용접 시 와이어의 정확한 송급 속도를 제어하기 위하여 삼진웰텍社의 OMEGA-210TF1 모델 와이어 자동송급장치를 사용했다. MAG 용접공정의 경우 ㈜프로테크社의 디지털 방식의 350A 용접기를 사용했다.

용접전류, 전압, 용접 속도, 토치간 거리 등 중요 변수를 고려하여 실시하였으며, 용접 후 이면비드가 완전히 용착된 상태로 용입부족 및 용융불량 등의 결함이 없고 비드 표면은 외관 상태가 양호하며 언더컷, 피트 등의 육안결함이 없는 조건을 최적의 조건으로 선정하여 시험편을 제작하였다[1].

3. 실험분석 및 결과

3.1 인장시험

인장시험은 KSB 0801의 5호 인장시험 편으로 제작

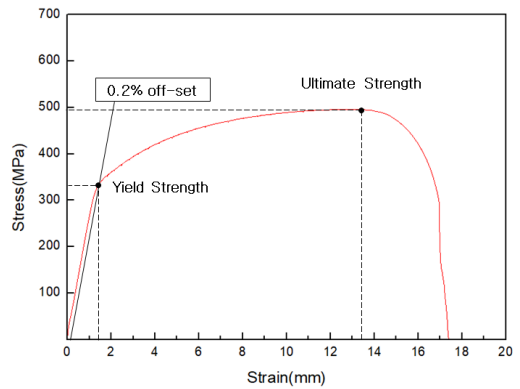


Fig. 2. Strain-stress curves of TIG specimen for Ar 100%

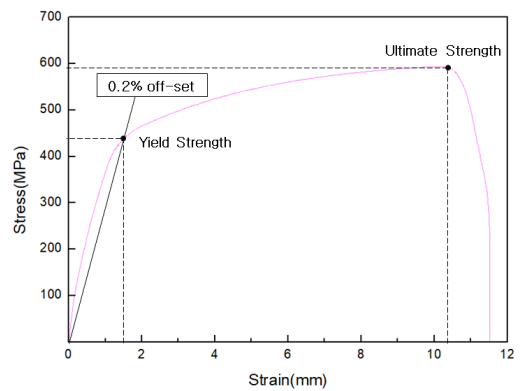


Fig. 3. Strain-stress curves of MAG specimen for Ar 50% + CO₂ 50%

하였고 Fig. 4 와 같이 시험 파단부 관찰 결과 소성변형을 동반하지 않고 불안정한 균열이 발생되어 파괴되는 취성파괴가 일어났다. Table 4는 각 공정별 혼합가스의 비율에 따른 항복강도 및 인장강도의 결과 값을 나타내었다. Fig. 2는 TIG(Ar 100%)용접공정의 인장강도 그래프를 나타내었고 Fig. 3은 MAG(Ar 50% + CO₂ 50%)용접공정의 인장강도 그래프를 나타내었다. 두 공정 모두 용접부의 경화현상으로 연성이 아닌 취성파괴가

Table 4. Comparison of results for each process and mechanical properties of filler metal

Process	TIG (Ar 100 %)	MAG (Ar 75 % + CO ₂ 25%)	MAG (Ar 50 % + CO ₂ 50%)	MAG (Ar 25 % + CO ₂ 75%)
Yield strength (MPa)	334	430	447	421
Tensile strength (MPa)	494	586	593	568

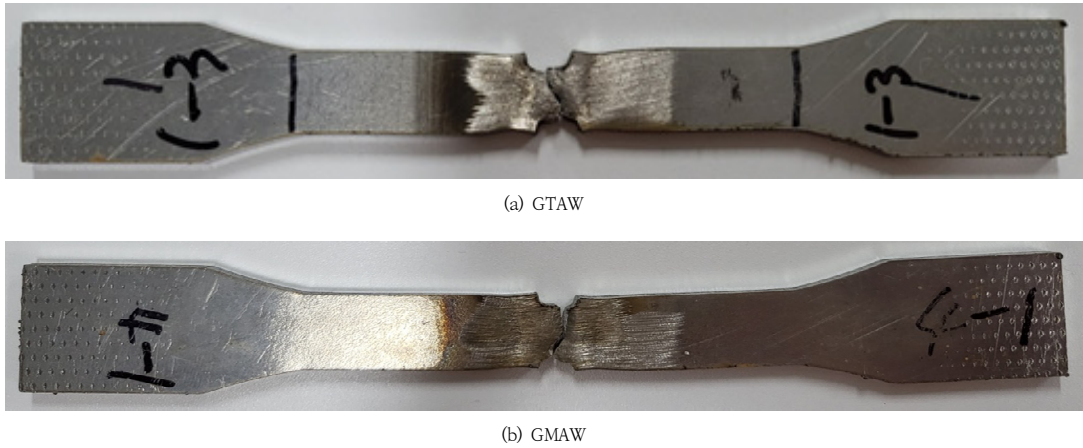


Fig. 4. Fractured specimen configuration after tensile test

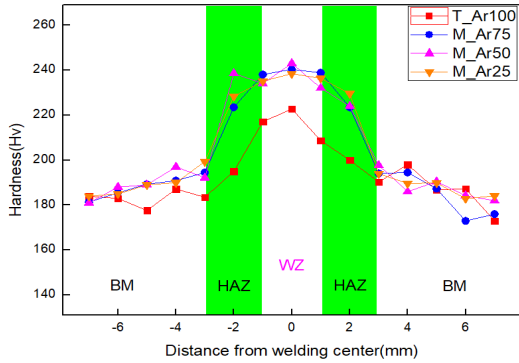


Fig. 5. Micro hardness with distance from welding center

일어났고 뚜렷한 항복점이 확인되지 않았다. 응력-변형률 선도 상에 곡선의 초기 선형 부분에 평행하지만 표준화된 변형률 만큼 0.2% 옴셋된 선을 표시하고 이 옴셋선과 응력-변형률 곡선의 교차점에 항복응력으로 정의하였다[2].

3.2 미세경도시험

가로 20mm × 세로 10mm(용접선)의 크기로 경도시험편을 제작 하였고 Mitutoyo 社의 1kg급 비커스 경도시험기(Model : HK-54)를 사용하였다. 하중은 0.5kgf, 압입유지시간은 10sec 스테인리스강 용접부의 중앙으로부터 좌우로 7mm까지 1mm간격으로 측정 한 결과는 Fig. 5 에 나타내었다. 두 공정 모두 열영향부와 용착금속부에서의 미세경도는 모재부 보다 높게 확인되었다[3]. 일반적으로 STS430J1L과 STS316L 계열 스테인리스강의 미세경도 값은 Hv 200 이하로 보고되어 있다. TIG 용접공정의 경우 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 222.8로 확인되었다. MAG 용접공정의 경우 보호가스 Ar 75% + CO₂ 25% 조건의 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 240.4로 확인되었고 Ar 50% + CO₂ 50%의 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 243.1로 확인되었으며 Ar 25% + CO₂ 75%의 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 238.5로 확인되었다.

Table 5. Result of vickers hardness on weld zone

Test Area	Process			
	TIG	MAG		
	Ar 100%	Ar 75% + CO ₂ 25%	Ar 50% + CO ₂ 50%	Ar 25% + CO ₂ 75%
Weld zone	217.1	238.1	234.1	235.1
	222.8	240.4	243.1	238.5
	208.7	238.9	232.1	236.4
Avg.	216.2	239.1	236.4	236.7

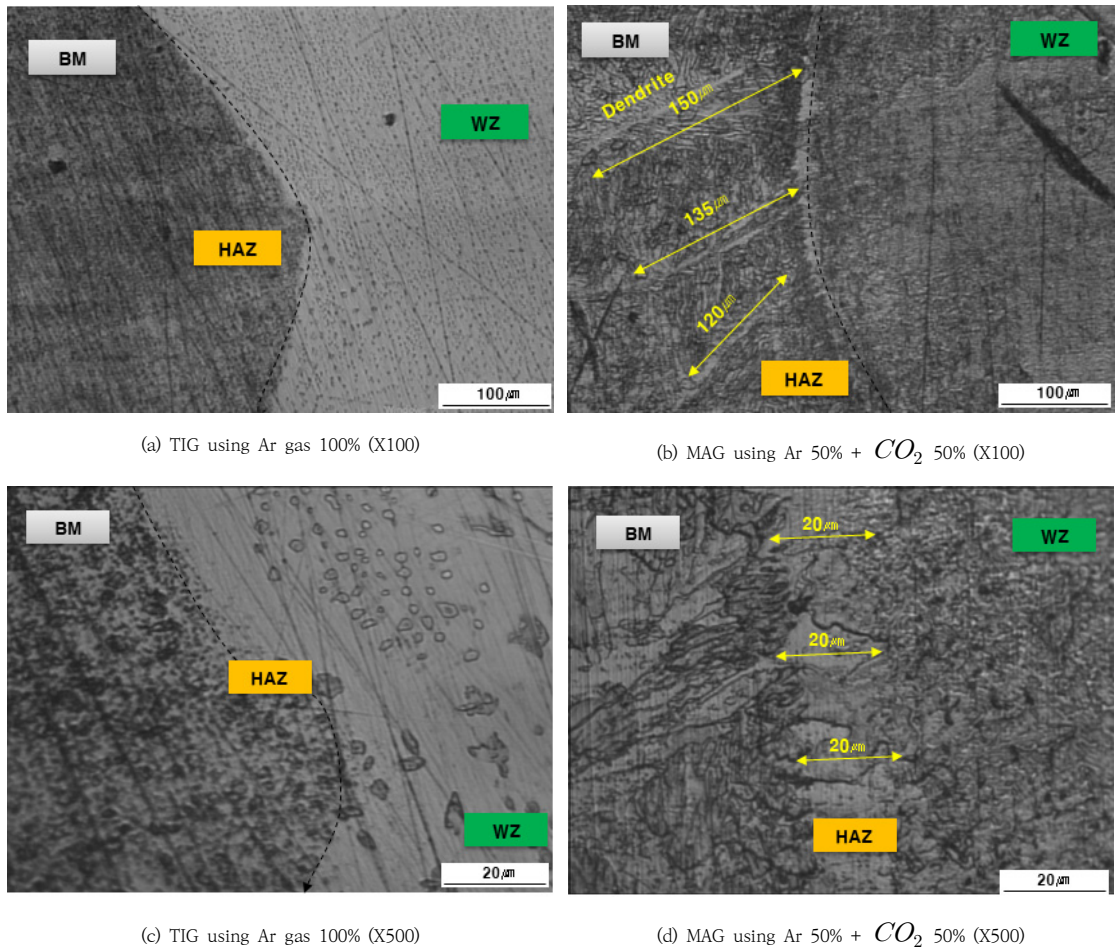


Fig. 6. Micro structure in heat affected zone

MAG 용접공정의 최대 미세경도 값은 TIG 용접공정 대비 약 9.11% 높게 확인되었다. MAG 용접공정의 경우 TIG 용접공정의 경우 보다 용착금속부 및 열영향부에서 경도증가 현상이 더 크게 확인되었다. 일반적인 스테인리스강의 경우 아크용접 공정을 이용할 경우 미세경도는 용착금속부 보다 열영향부의 미세경도 값이 좀 더 높게 형성된다. 보호가스로 Ar 100%를 사용하며 비소모성의 텅스텐 전극봉을 전극으로 사용하는 TIG 용접공정의 경우 산화나 질화 등이 민감한 재질의 용접에 주로 사용되며 열의 조사범위가 MAG 용접공정과 비교하여 집중도가 높아 정밀한 용접에 주로 사용된다[4]. 반면, 솔리드 용접와이어를 소모성전극으로 사용하는 MAG 용접공정에서 보호가스로 Ar 100%를 사용하는 경우 스테인리스강 표면의 부동태피막으로 인해 전극 형성이 되지 않아

용접이 진행 되지 않는다. 스테인리스강 표면에는 크롬 산화물로 구성된 부동태피막이 존재하며 화학반응에 의한 녹, 부식을 억제하는 역할을 한다. 표면의 부동태피막을 제거하기 위해서는 순수 Ar 100%가 아닌 CO_2 및 O_2 가스를 혼합하여 산화크롬 화학반응이 이용하게 된다. CO_2 가스의 산소는 용접시 산화의 원인이 되기도 하지만 동시에 아크집중성 개선과 용접입열을 높여 용착속도를 높여주는 역할을 하며 산화반응으로 인해 아크가 발생되게 된다[5].

3.3 미세조직 관찰

가로 20mm × 세로 10mm(용접선)의 크기로 절단, 냉간 마운팅, 미세연마, 경면연마 및 에칭을 수행하였고

광학 현미경(OLYMPUS 社, Model : GX41)을 사용하여 100배율과 500배율로 각각 관찰하였다. Fig. 6 과 같이 각 공정별 열영향부 및 용착금속부를 100배율과 500배율로 관찰하였다. 일반적으로 아크용접부는 모재부(base metal, BM), 열영향부(heat affected zone, HAZ), 용착금속부(weld zone, WZ)로 분류된다.

열영향부의 100배율과 500배율 관찰한 결과 본드부(bond zone)에서 Ar가스 100%를 사용한 TIG 용접공정의 경우 용착금속부와 모재간의 경계가 명확하게 구분이 되었으나 Ar 50% + CO₂ 50% 가스를 사용한 MAG 용접공정의 경우 본드부 경계선이 명확히 구분되지 않았고 용가재와 모재가 혼재되어 있는 형태로 확인되었다. 100배율 관찰에서 MAG 용접공정의 경우 고온에서 용융된 금속이 응고할 때 형성되는 길이 약 120~150 μm 크기의 수지상정 조직이 관찰되었다. MAG 용접공정은 용접 밀도가 높아 냉각속도가 빠르면 동시에 발생하는 가지가 많고 성장하는 결정립은 작게 형성된다[6].

MAG 용접공정은 소모성 와이어를 용가재로 사용하는 원리를 이용하는 특성상 용착금속에 대한 열적 집중도가 높은 것으로 판단되며 텅스텐봉을 전극으로 사용하는 TIG 용접공정과 비교하여 용가재와 모재가 혼입된 영역이 더 크게 확인되었다. 혼합가스를 사용한 MAG 용접공정의 경우 CO₂ 가스에서 O₂ 가스의 영향으로 인해 산화반응이 일어났고 경도 값이 상승된 요인이라 판단된다[7].

4. 결론

스테인리스강 STS430J1L의 맞대기 이음에서 TIG용접공정과 MAG 용접공정의 기계적 특성 평가와 미세조직을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) TIG 용접공정과 MAG 용접공정의 항복강도와 인장강도 측정 결과를 비교하면 TIG(Ar 100%) 용접공정의 경우 평균 항복강도는 334 MPa, 인장강도는 494 MPa로 확인되었다. MAG(Ar 50%+CO₂ 50%) 용접공정에서 평균 항복강도는 447 MPa, 인장강도는 593 MPa로 가장 높게 확인되었다.
- 2) 미세경도 시험 결과 각 공정에서 모두 경도 증가 현상이 확인되었다. TIG 용접공정의 경우 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 222.8로 확인되

었다. MAG(Ar 50% + CO₂ 50%) 용접공정의 경우 최대 미세경도 값은 용착금속부에서 Hv 243.1로 확인되었으며 TIG 용접공정 대비 약 9.11% 높게 확인되었다.

- 3) 미세조직 실험결과, 100배율 관찰에서 MAG 용접공정의 경우 고온에서 용융된 금속이 응고할 때 작은 핵을 중심으로 하여 금속이 규칙적으로 퇴적되어 수지상의 골격을 형성한 120~150 μm 크기의 수지상정(dendrite)조직이 관찰됐다[8].
- 4) MAG 용접공정은 소모성 와이어를 용가재로 사용하는 원리를 이용하는 특성상 용착금속에 대한 열적 집중도가 높은 것으로 판단되며, 텅스텐봉을 전극으로 사용하는 TIG 용접공정과 비교하여 용가재와 모재가 혼입된 영역이 더 크게 확인되었다. 혼합가스를 사용한 MAG 용접공정의 경우 CO₂ 가스에서 O₂ 가스의 영향으로 인해 산화반응이 일어났고 경도 값이 상승된 요인이라 판단된다[9].
- 5) 보일러용열교환기 재료인 STS430J1L의 맞대기 용접 실험결과 MAG 용접공정이 TIG 용접공정보다 우수한 기계적 특성을 확인하였고 대체 가능하다고 판단된다.

References

- [1] J. H. Lim and C. G. Woo, "Study on Characteristics of V-type Butt Welding Using MAG Depending on Variations in the Protrusion Length of Wire Electrode", *J. Korean Soc. Mech. Technol.*, Vol. 15, No. 4, pp 533-538, 2013
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.15.4.201308.533>
- [2] H. S. Lee, B. C. Lim and S. H. Park, "A Study on Welding Characteristics of Laser Beam Coatings by Fe-Based Bulk Metallic Glass", *IJMUE*, Vol. 11, No. 4, pp 313-322, 2016
DOI: <https://doi.org/10.14257/ijmue.2016.11.4.31>
- [3] J. Y. Lim, M. J. Yoon, T. H. Kim, S. Y. kim and T. G. Kim, "A study on the mechanical properties of structure rolled steel and stainless steel for the CO₂ welding", *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, Vol. 23, No. 4, pp 207-212, 2013
DOI: <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2013.23.4.207>
- [4] S. Y. Kim, G. J. Seo, W. H. Ju and S. M. Cho, "A Study on Process Robustness of Lap Joint Fillet Welding in GTAW Using C Type Filler", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 37, No. 5, pp 469-476, 2019
DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.5.6>

- [5] D. W. Huh and S. H. Rhee, "A Study on Anti-Oxidation of Stainless Steel Spot Weld", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 29, No. 5, pp 556-560, 2011
DOI: <https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.5.556>
- [6] D. H. Jang and others 6, "Evaluation of Mechanical Property for Welded Austenitic Stainless Steel 304 by Following Post Weld Heat Treatment", *Korean J. Met. Mater.*, Vol. 55, No. 9, pp 664-670, 2017
DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2017.55.9.664>
- [7] S. H. Jeon, T. W. Kim, Y. W. Lee and Y. C. Kim, "Study on the Improvement of TIG Welding Productivity through Analysis of ArcTig Welding Properties", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 39, No. 6, pp 632-640, 2021
DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.6.8>
- [8] D. H. Jang and others 6, "Evaluation of Mechanical Property for Welded Austenitic Stainless Steel 304 by Following Post Weld Heat Treatment", *Korean J. Met. Mater.*, Vol. 55, No. 9, pp 664-670, 2017
DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2017.55.9.664>
- [9] S. H. Jeon, T. W. Kim, Y. W. Lee and Y. C. Kim, "Study on the Improvement of TIG Welding Productivity through Analysis of ArcTig Welding Properties", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 39, No. 6, pp 632-640, 2021
DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.6.8>

이 상 원(Sang-Won Lee)

[준회원]



• 2024년 2월 : 공주대학교 기계자
동차융합전공 (석사)

<관심분야>

이종재료, 선박용접, 공정최적화, 플랜트시공 및 검사