

오스테나이트계 스테인리스강의 레이저 용접속도에 따른 와이블 분포를 이용한 충격 특성 평가

Evaluation on Impact Property of Austenite Stainless Steel Depending on Welding Speed by Using Weibull Distribution

박인덕* · 이수진*† · 최정수* · 정성민**

In-Duck Park*, Su-Jin Lee*†, Jung-Soo Choi* and Sung-Min Jung**

(Received 07 August 2022, Revision received 18 August 2022, Accepted 18 August 2022)

Abstract : Austenitic stainless steels are used in various industrial fields that require high corrosion resistance and mechanical properties; therefore, they require low heat input during welding process. In this respect, laser technology is a suitable process for welding stainless steel. In this study, STS304L was welded at various welding speeds under a laser power of 5.5 kW. Charpy impact tests were performed on fusion area and heat affected zone of each weldment. The influence of the welding speed on the impact characteristics was studied by comparing the shock absorption energy, and the safety was evaluated by the weibull distribution analysis. As a result, welding at the speed of 1.5 m/min is most suitable for the impact characteristics when considering the shape parameter, the scale parameter, the standard deviation, the average and the coefficient of variation (COV) calculated by arithmetic statistics.

Key Words : Laser welding, Weibull analysis, High power disk laser, Austenitic stainless steel, Impact property

— 기 호 설 명 —

BM : Base metal
HAZ : Heat affected zone
FZ : Fusion zone

1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 내식성, 기계적 특성, 용접성 및 가공성 등이 우수하여 철도, 우주항공, 자동차, 원자력 등 다양한 분야에서 사

*† 이수진(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0477-7568>) : 선임연구원, 한국기계연구원
E-mail : leesj@kimm.re.kr, Tel : 051-310-8133
*박인덕(ORCID:<https://orcid.org/0000-001-0272-2392>) : 책임연구원, 한국기계연구원
*최정수(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-3755-2445>) : 기술원, 한국기계연구원
*정성민(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7714-7885>) : 연구원, (주)성우하이텍

*† Su-Jin Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0477-7568>) : Senior Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials. E-mail : leesj@kimm.re.kr, Tel : 051-310-8133
*In-Duck Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-001-0272-2392>) : Principal Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials.
*Jung-Soo Choi(ORCID:<https://orcid.org/0000-002-3755-2445>) : Engineer, Korea Institute of Machinery and Materials.
*Sung-Min Jung(ORCID:<https://orcid.org/0000-001-7714-7885>) : Researcher, SUNGWOO HITECH.

용되고 있다.^{1,2)} 특히, 오스테나이트계 스테인리스강은 저온에서 연성취성전이현상이 나타나지 않아 LNG 용기의 구조재료 적용되고 있다.³⁾

오스테나이트계 스테인리스강은 일반적인 탄소강에 비해 열팽창계수가 약 1.5배 높고, 열전도도는 1/3배로 낮으므로 용접 시 입열량의 제어가 중요하다.⁴⁾ 입열량이 과할 경우, 용합부(fusion zone, FZ)에서 고온균열 및 응력부식균열 등의 균열이 발생할 수 있으며, 열영향부(heat affected zone, HAZ)에서는 입계부식 및 결정립 조대화 등의 문제가 발생할 수 있다.^{5,6)} 이러한 관점에서 레이저 용접은 기존의 아크 용접에 비해 적은 입열량으로 깊은 용입을 달성할 수 있으며, 빠른 용접 공정의 수행이 가능하여 기존의 용접법보다 오스테나이트계 스테인리스강의 용접에 유리하다.⁷⁻¹⁰⁾

또한 구조물은 사용 중 정적 혹은 동적하중을 받게 된다. 특히, 구조물 용접 이음부는 이러한 하중에 취약해지기 쉽다. 따라서 우수한 물성을 가지는 용접부를 형성하는 것은 구조물의 안정성을 확보하는데 중요하다. 동적하중에 대한 재료의 저항력을 평가하는데 있어 재료의 인성은 중요한 판단 요소이며, 재료의 인성을 추정하기 위해 샤르피(charpy) 혹은 아이조드(izod) 충격시험을 통해 얻어지는 충격흡수에너지가 주로 이용되고 있다.¹¹⁾

본 연구는 용접속도를 달리하여 레이저 용접한 오스테나이트계 스테인리스강의 접합부의 FZ와 HAZ에 대해 샤르피 충격시험을 실시하였다. 얻어진 흡수에너지는 와이블 분포로 나타내어 안전성을 평가하였으며, 최적의 용접조건은 안전성을 고려하여 선정하였다.

2. 실험 방법

시험에 사용된 재료는 범용 오스테나이트계 스테인리스강인 6 mm STS304L이다. 여기서 L은

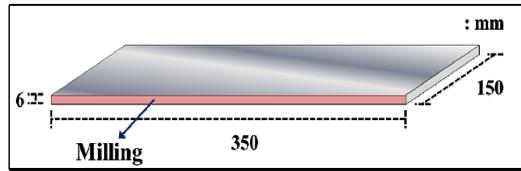


Fig. 1 Model of welding materials

탄소를 0.03% 이하로 제어한 것을 의미하며, 저탄소의 목적은 용접 중 입계부식이 일어나는 것을 방지하기 위함이다. 재료의 두께는 6 mm이며, 재료의 조성은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1은 용접 시 사용한 재료의 형상을 나타낸 것이다. 시험편은 150 × 350 mm로 가공하였으며, 접합부에 밀링(milling)을 실시하여 용접 시 재료 간 간격(gap)을 최소화하였다.

실험에는 최대 출력 16 kW의 디스크 레이저(Trumpf TruDisk 16002)를 사용하였으며, 레이저빔의 파장은 1,030 nm이다. 용접은 맞대기 이음으로 실시하였으며, 시험편을 지그에 고정시킨 후, 레이저를 이동시키면서 진행하였다. 용접 공정의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 광학렌즈와 시험편까지 초점거리는 233 mm이며, 초점에서 레이저빔은 200 μm의 직경을 가진다. 레이저의 출력과 빔의 초점 위치는 예비실험을 통하여 미려한 용접부를 형성하는 조건인 5.5 kW와 표면에서 2 mm 아래로 설정하였다. 레이저 헤드는 반사광에 의한 광학계(optics)의 손상을 막기 위하여 10°의 전진각을 주었다. 용접속도는 1.0, 1.5, 2.0 m/min로 실시하였다. 용접 시 용접부의 전면(face)과 후면(root)은 아르곤(Ar) 가스를 사용하여 보호하였으며, 전면(face)과 후면(root)에 주입한 Ar 가스의 유량은 각각 21 및 15 l/min이다.

Table 2에 용접 조건을 나타내었다. 용접부의 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 용접부에 존재하는 페라이트 측정기(ferrite scope FMP30)를 이용하여 페라이트의 함량을 조사하였다.

Table 1 Chemical composition of materials

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Wt %	0.026	0.42	1.47	0.03	0.00	18.38	8.04	0.19	0.15

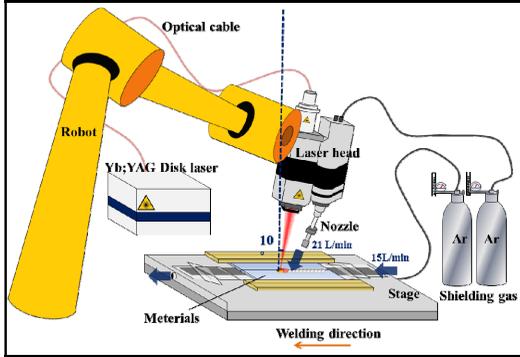


Fig. 2 Laser welding process of welding materials

Table 2 Welding parameter used in the experiment

Laser (Trumpf TruDisk 16002) spec	
Maximum power	16 kW
Wavelength	1030 nm
Beam Quality	16 mm•mrad
Focal Distance	233 mm
Spot size	300 μ m
Welding parameter	
Power	5.5 kW
Welding speed	1.0, 1.5, 2.0 m/min
Defocus	-2 mm
Incidence angle	10°
Shielding	
Front	21 l/min Ar
Root	15 l/min Ar

샤르피 V-노치 충격시험은 시험편의 두께를 고려하여 3.3 mm의 Sub size 시험편을 제작하여 실시하였으며,¹¹⁾ Fig. 3은 충격 시험편의 형상을 나타낸다. 샤르피 충격시험은 실온에서 10회씩 실시하였으며, 실험값인 충격흡수에너지는 2-parameter 와이블 분포로 나타내어 안정성을 평가하였다.¹²⁾ 충격 파단면은 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

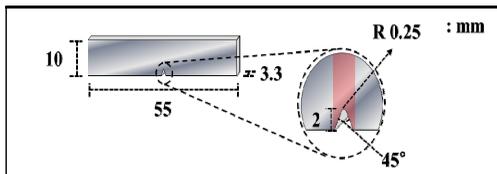


Fig. 3 Model of sub-size Charpy impact test specimens

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 4는 각 용접부의 FZ와 BM의 미세조직을 나타낸다. 모든 조건의 FZ는 BM보다 미세한 결정립이 나타났다. 이것은 레이저 용접의 특징인 낮은 입열에 의한 빠른 응고속도에 기인하는 것으로 생각된다. 또한 용접속도가 증가할수록 FZ의 결정립은 미세하였으며, 이는 용접속도가 증가함에 따라 냉각속도가 증가하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 결정립의 크기를 고려하였을 때 2.0 m/min 용접속도가 가장 우수한 충격특성을 나타낼 것으로 추정된다.

페라이트 측정기를 이용하여 용접부에 생성된 δ -페라이트의 함량을 측정하였다. ASME Section III을 따라서 6회 측정하여 평균을 사용하였으며,¹³⁾ 그 결과는 Table 3에 나타내었다. 스테인리스강에서 δ -페라이트의 생성량은 Creq/Nieq와 냉각속도의 영향을 받는다.^{6,14,15)} Kim 등¹⁴⁾은 STS304는 약 10⁴°C/sec 이하의 냉각속도에서는 냉각속도가 증가함에 따라 δ -페라이트의 함량이 증가하지만, 그 이상의 냉각속도에서는 반대로 냉각속도가 증가함에 따라 δ -페라이트의 함량이 감소하는 경향을 보인다고 주장하였다. Kim 등¹⁴⁾은 STS304 스테인리스강을 CO₂레이저를 사용하여 용접하였으며, 용접 시 10⁴°C/sec 이상의 응고속도가 나타났다.

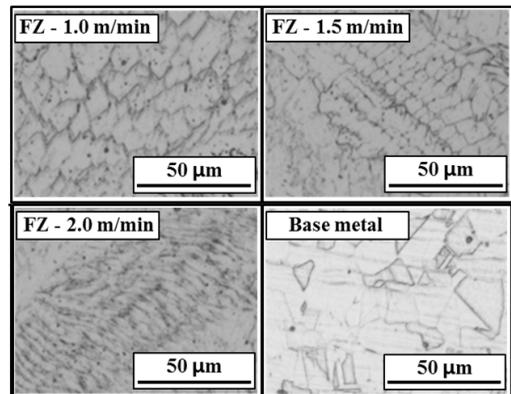


Fig. 4 Microstructures of base metal and fusion zones depending on welding speed

Table 3 Ferrite number in weldment according to welding speed

Welding speed	Ferrite number, FN
1.0 m/min	4.4
1.5 m/min	3.6
2.0 m/min	2.9
Spot size	300 μm

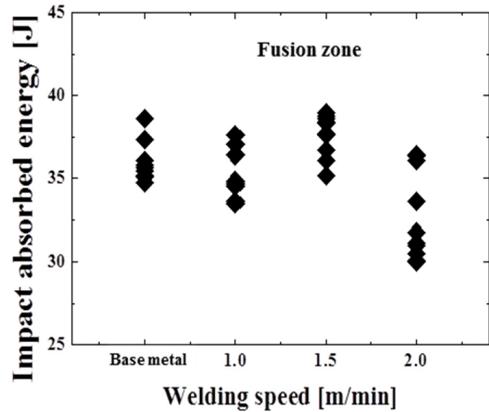
본 연구에서는 냉각속도가 증가함에 따라 δ -페라이트의 함량이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 Kim의 연구와 일치하였다.

FZ 내에 δ -페라이트가 FN 15 이상이 되면 오스테나이트의 감소로 인하여 내식성, 인성, 연성 등의 저하가 일어날 수 있다. 하지만 소량의 δ -페라이트를 함유시키는 것은 응고 균열의 발생을 방지하는데 효과적이다. 이는 δ -페라이트가 오스테나이트보다 응고 균열을 일으키는 S, P에 대한 고용도가 높기 때문이다. 또한 $\gamma+\delta$ 의 2상 조직은 γ 단상의 경우보다 복잡한 입계를 가진다. 균열의 잠정적 경로인 입계의 복잡화는 강도 및 인성 향상에 유리하게 작용할 수 있다.

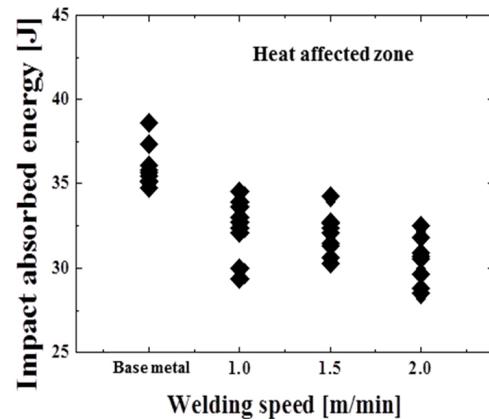
본 연구에서는 모든 FZ에서 소량의 δ -페라이트가 측정되었으며, 이를 고려하였을 때 δ -페라이트의 함량이 가장 많은 1.0 m/min 용접속도가 가장 우수한 충격특성을 나타낼 것으로 추정된다. 결정립의 크기를 고려했을 때의 인성의 추정과 반대되는 결과가 나타났다. 충격 특성에 대한 결정립 크기와 δ -페라이트 함량의 영향은 충격시험을 결과를 통해 종합적으로 판단하고자 한다.

3.2 충격시험

시험편의 두께를 고려하여 3.3 mm의 sub-size 시험편을 제작하였으며, BM 및 1.0, 1.5, 2.0 m/min의 속도로 용접한 시험편의 FZ 및 HAZ에 노치를 가공하여 실온에서 샤르피 충격시험을 실시하였다. Fig. 5는 측정된 충격흡수에너지를 나타낸다. 실험값은 용접속도에 따라서 약간 다른 산포를 나타내는 것을 알 수 있다. 재료의 기계적 특성에 있어서 평가 정도의 향상을 위하여 산포를 고려한 확률론적 평가는 중요시되고 있으며,



(a)



(b)

Fig. 5 Impact absorbed energy according to welding speed for (a) FZ and (b) HAZ

시험에서 얻어진 충격흡수에너지 또한 확정치가 아닌 통계적으로 변동하는 값을 나타내고 있다. 이러한 관점에서 해석의 편의성과 최약 링크 가설을 고려하여 2-parameter 와이블 분포를 적용하여 해석을 실시하였다.¹²⁾

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad x \geq 0 \quad (1)$$

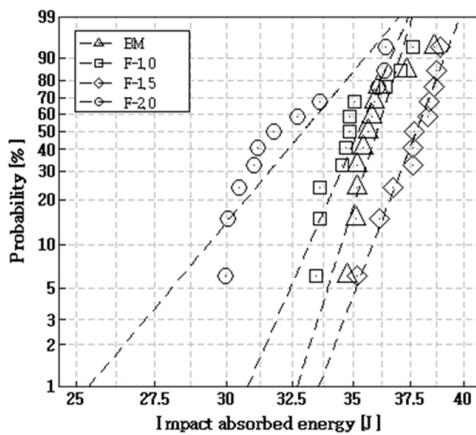
와이블 분포에 사용된 식은 식 (1)과 같다. 여기서 α 는 확률변수의 변동성을 의미하는 형상모수(shape parameter)를 의미하며, β 는 파괴확률이

63.2%가 되는 특성 수명을 나타내는 척도모수 (scale parameter)를 의미한다.

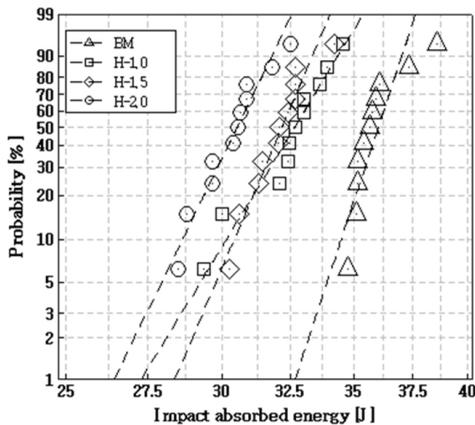
Fig. 6은 Fig. 5의 용접속도에 따른 충격흡수에너지에 와이بل 확률지에 나타난 것이다. 시험 조건은 노치의 가공 위치와 용접 속도에 따라 각각 BM, F-X, H-X라고 명명하였다. 여기서, F와 H는 각각 FZ와 HAZ를 의미하며, X는 용접 속도를 의미한다. 모든 조건의 실험값은 와이بل 확률지상에서 직선으로 표현되고 있으므로 와이بل 확률분포에 잘 따르고 있다고 볼 수 있다.

Table 4 The estimated Weibull parameters for shear stress for BM, FZ and HAZ

Position of notch	Shape parameter	Scale parameter	Std/Mean/COV
BM	40.9	36.4	1.12/35.9/0.031
F-1.0	29.6	35.5	1.38/35.1/0.039
F-1.5	33.6	38.2	1.26/37.7/0.033
F-2.0	15.5	33.7	2.69/32.7/0.082
H-1.0	22.1	33.2	1.65/32.5/0.051
H-1.5	31.7	32.6	1.17/32.1/0.036
H-2.0	27.6	30.9	1.26/30.4/0.041



(a)



(b)

Fig. 6 Weibull probability distribution of impact absorbed energy according to welding speed for (a) FZ and (b) HAZ

Fig. 6 (a)는 FZ에서 얻어진 분포이다. F-1.5에서 BM보다 다소 큰 충격흡수에너지의 분포를 나타내고 있으나, F-1.0 및 F-2.0에서는 BM보다 낮은 분포를 보였다. 이를 통해 용접부의 인성을 확보하기 위해 용접 시 입열량의 제어가 중요하다는 것을 알 수 있다. 분산의 경우, BM에서 가장 적은 분산이 나타났다. 모든 FZ에서는 BM보다 큰 분산이 나타났으며, 그 정도는 모두 비슷하였다. 이는 FZ의 조직적 균일성이 BM보다 낮기 때문이라고 판단된다.

Fig. 6 (b)는 HAZ에서 얻어진 분포이다. HAZ의 경우, 모든 조건에서 BM보다 낮은 충격흡수에너지의 분포가 나타났으며, 분산의 정도가 크게 나타났다. 레이저 용접의 HAZ는 매우 좁은 범위에 생성되며, 이로 인해 충격시험편에 노치가 BM과 FZ의 경계를 관통하여 가공될 수 있다. 노치 내에 존재하는 상의 경계는 취약하여 균열이 진전하기 쉬우며, 낮은 충격인성은 이에 의한 것으로 판단된다. 용접속도에 따른 용접시험편의 충격흡수에너지에 대하여 추정된 와이بل 분포 함수의 형상모수 및 척도모수를 Table 4에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 표준편차(standard deviation, Std), 평균(mean) 및 변동계수(coefficient of variation, COV)도 함께 나타내었다.

Fig. 7은 Table 3의 형상 및 척도모수를 그래프로 나타낸 것이다. ■, ● 기호는 BM을 포함한 FZ의 형상모수와 척도모수를 나타내며, □, ○ 기

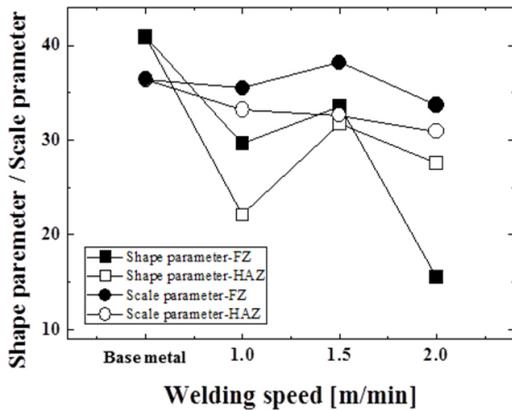


Fig. 7 Shape parameter and scale parameter of Weibull probability according to welding speed

호는 HAZ의 형상모수와 척도모수를 나타낸다.

형상모수는 BM에서 40.9로 가장 높은 값이 나타났다. BM을 제외하고 형상모수는 1.5 m/min의 용접속도에서 가장 크게 나타난 것을 알 수 있다. 1.5 m/min의 용접속도에서 FZ 및 HAZ의 형상모수는 각각 33.6과 31.7이 나타났으며, 1.0 및 2.0 m/min의 용접속도에서는 FZ는 15.5~29.6이 나타났으며, HAZ에서는 22.1~27.6이 나타났다.

한편, 척도모수는 1.5 m/min의 용접속도에서 가장 큰 값이 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 63.2%의 특성 수명을 나타내는 것으로, BM은 36.4가 나타났으며, 1.5 m/min의 용접속도의 FZ에서는 38.2가 나타났다. 1.0 및 2.0 m/min의 용접속도의 FZ에서는 BM보다 낮은 35.5와 33.7이 각각 나타났다. HAZ의 경우, 모든 조건에서 BM보다 작은 값을 나타내었다. 이는 앞에서 언급한 충격 시험편에 가공된 노치가 BM과 FZ의 경계를 관통하여 도입되었기 때문으로 판단된다.

이와 같이 특성수명은 고려하면 1.5 m/min의 용접속도가 충격특성이 가장 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 BM 및 용접속도에 따른 FZ와 HAZ에 따르는 산술평균 충격흡수에너지이다. 그림에는 표준편차를 실선으로 나타내었다. 산술평균 충격흡수에너지는 1.5 m/min의 속도로 용접한 FZ에서

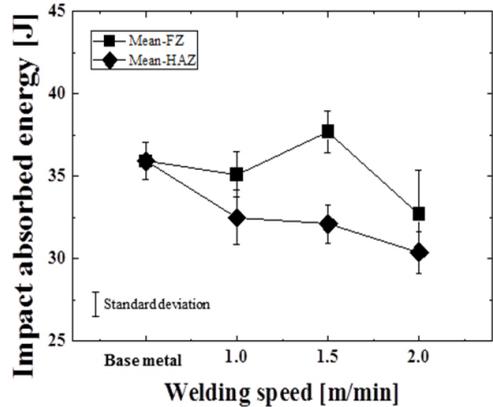


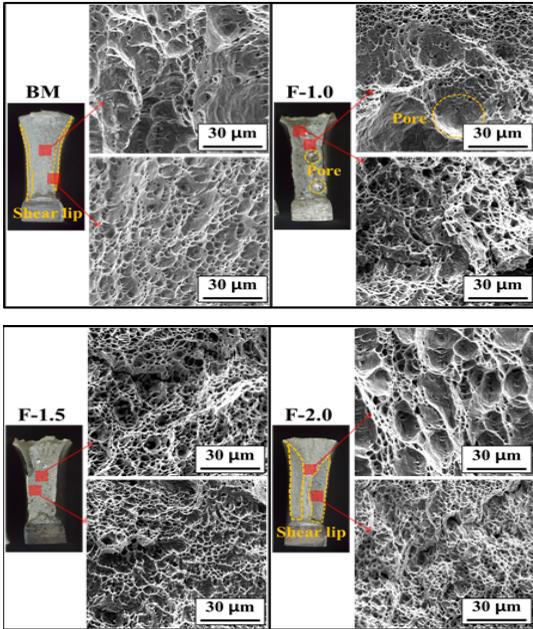
Fig. 8 Mean impact absorbed energy according to welding speed for FZ and HAZ

는 BM보다 크게 나타났다. 1.0 및 2.0 m/min의 속도로 용접한 FZ에서는 BM보다 낮은 값을 나타내었다. 실험값의 분산에 대해서도 1.5 m/min의 속도로 용접한 경우에 가장 적은 표준편차가 나타났다. 이와 같이 와이블 확률 분포, 형상 및 척도모수, 산술통계에 의한 표준편차, 평균 및 변동계수 등에 의하여 종합적으로 판단하면, 1.5 m/min의 용접속도가 우수하다고 판단된다.

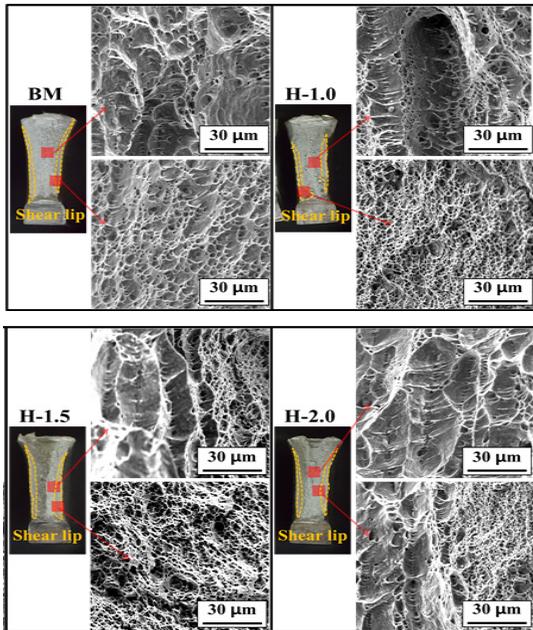
3.2 충격파면

파괴 양상을 고찰하기 위해 충격 파단면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. 관찰 결과를 Fig. 9에 나타내었으며, (a)는 BM을 포함한 FZ에 대한 파면을 나타내며, (b)는 HAZ에 대한 파면을 나타낸다. BM은 중심의 섬유상 영역과 모서리의 shear lip 영역이 선명히 구분되는 파면을 나타내었다. 섬유상 영역과 shear lip 영역은 모두 딩플을 포함하는 연성파면의 형상을 보였으며, 섬유상 영역은 shear lip 영역보다 비교적 큰 딩플을 포함하였다.

Fig. 9 (a)에서 F-1.0과 F-1.5의 파단부는 중심부와 모서리에서 비슷한 형상의 딩플이 나타내며, 섬유상 영역과 shear lip 영역의 구분이 어려웠다. F-1.0과 F-1.5의 파단부의 딩플의 크기 및 분포를 볼 때, 연성의 정도가 BM보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 FZ의 미세한 결정립과, 냉각과정 중 생성된 소량의 δ-페라이트가 입계를 복잡하게 하



(a)



(b)

Fig. 9 Macro and SEM fractography of specimens after charpy impact test; (a) Fusion zone and (b) Heat affected zone

여 충격인성의 향상에 유리하게 작용하였기 때문에 판단된다. 그러나 충격시험에서 F-1.0에서는 BM보다 낮은 충격흡수에너지가 나타났다. F-1.0의 파면에서는 기공이 관찰되었으며, 기공의 내부는 취성적인 파면이 나타났다. 이를 통해 기공이 충격인성 저하의 원인으로 작용한 것으로 생각된다.

한편, F-2.0에서는 BM과 비슷한 형상의 파면이 나타났다. 용접속도가 2.0 m/min인 경우, 응고 시 생성되는 δ-페라이트가 매우 소량이 생성되며 BM에 가까운 오스테나이트의 상률을 보였다.

F-2.0의 파단면이 BM과 비슷한 형상을 나타낸 것은 여기에 기인하는 것으로 생각된다. 또한 와이블 확률 분포 중 F-2.0에서 가장 낮은 형상모수가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 F-2.0에서 조직적 균일성이 가장 낮다고 추정할 수 있다. BM보다 낮은 인성이 나타낸 것은 여기에 기인하는 것으로 생각된다.

HAZ에 노치가 가공된 시험편은 용접속도에 관계없이 섬유상 영역과 shear lip 영역이 선명히 구분되는 파면이 나타났으며 BM과 비슷한 파괴상을 보였다.

4. 결 론

본 연구는 레이저 용접한 STS304L의 용접속도에 따른 용접부의 미세조직을 관찰한 후 FZ 및 HAZ에 대하여 충격특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 용접속도가 증가함에 따라 FZ의 결정립이 미세해지는 경향이 나타났다.
- 2) FZ에서 $\gamma+\delta$ 2상으로 구성된 미세조직이 나타났으며, 용접속도가 증가함에 따라 FZ 내의 δ-페라이트 함량이 감소하는 경향이 나타났다.
- 3) 충격흡수에너지는 1.5 m/min의 속도로 용접한 경우에서 가장 높게 나타났다. 실험값에 대한 와이블 분포의 형상모수와 척도모수 그리고 산술 통계에 의한 표준편차, 평균, 변동계수를 종합적으로 고려하였을 때 가장 적합한 용접속도는 때 1.5 m/min으로 판단된다.

후 기

이 논문은 산업부 스마트 특성화기반구축사업, 전기차 안전편의 부품 고도화 기술지원사업 (P0013656) 및 부산광역시 수소전기차 부품산업 육성기술지원사업(2022)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

Conceptualization, I. D. Park and S. J. Lee; methodology, I. D. Park and S. J. Lee; project administration, I. D. Park and J. S. Choi; investigation, J. S. Choi and S. M. Jung; writing—original draft preparation, I. D. Park and S. M. Jung; writing—review & editing, S. J. Lee; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

References

1. S. editor, 1992, "Stainless Steel Manual", Sehwa Editer. pp. 17.
2. J. X. Huang, 2005, "A New Application Field of Stainless Steel in China-Urban Railway Vehicles", China Metal, Vol. 15, No. 10, pp. 4-6.
3. J. D. Kim, C. J. Lee and M. K. Song, 2012, "Characteristics of Fiber Laser Welding on STS304L for GTT MARK III Membrane", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 36, No. 8, pp. 1067-1075. (<https://doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.8.1069>)
4. H. C. Yoo, 2015, "Recent Study of Materials and Welding Methods for Nuclear Power Plant", Journal of Welding and Joining, Vol. 33, pp. 14-23. (<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.1.14>)
5. S. Kumar and A. S. Shahi, 2011, "Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 304 Stainless Steel Joints", Materials and Design, Vol. 32, pp. 3617-3623.

- (<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.017>)
6. J. S. Lee and J. W. Hong, 1999, "Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds", The Korean Welding & Joining Society, Vol. 17, No. 5, pp. 10-19.
7. D. H. Kim, 2016, "Laser processing", Kyung Moon Books, Seoul, pp. 326-370.
8. F. M. Hosking, J. J. Stephens and J. A. Rejent, 1999, "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals", Welding Journal, Vol. 78, No. 4, pp. 127-136.
9. A. G. Olabi, G. Casalino, K. Y. Benyounis and M. S. J. Hashmi, 2006, "An Ann and Taguchi Algorithms Integrated Approach to the Optimization of CO₂ Laser Welding", Advances in Engineering Software, Vol. 37, pp. 643-648. (<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.02.002>)
10. Z. Sun and M. Kuo, 1999, "Bridging the Joint Gap with Wire Feed Laser Welding", Journal of Materials Processing Technology, Vol 87, pp. 213-222. ([https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00346-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00346-X))
11. ASTM E23-07, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials".
12. W. A. Weibull, 1951, "Statistical Distribution Function of Wide Applicability", Journal of Applied Mechanics, Vol. 18, pp. 293-297.
13. ASME, "Boiler and Pressure Vessel Code", 2017, American Society of Mechanical Engineers.
14. S. K. Kim, N. J. Kim, G. Shin and C. H. Lee, 1995, "Effect of Cooling Rate on the Formation of δ -Ferrite in Type 304 Stainless Steel", Korean Journal of Metals and Materials, Vol. 33, No. 9, pp. 1144-1154.
15. 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. (<https://doi.org/10.5781/KWJS.2010.28.1.010>)