

연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Hastelloy C-276의 용접특성에 관한 연구

나기대* · 유영태** · 신호준*** · 오용석****

*조선대학교 공과대학 기계설계공학과

**조선대학교 공과대학 메카트로닉스공학과

***조선대학교 일반대학원 정밀기계공학과

****조선대학교 일반대학원 첨단부품소재공학과

A Study on the Welding Characteristics of Hastelloy C-276 using a Continuous Wave Nd:YAG Laser

Gee-Dae Na*, Young-Tae Yoo**, Ho-Jun Shin*** and Yong-Seok Oh****

*Dept. of Mechanical Design Engineering, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

**Dept. of Mechatronics Engineering, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

***Dept. of Precision Mechanical Engineering, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

****Dept. of Advanced Parts and Materials Engineering, Chosun University, Gwang-ju 501-759, Korea

*Corresponding author : ytyou@chosun.ac.kr

(Received April 15, 2008 ; Revised July 10, 2008 ; Accepted September 3, 2008)

Abstract

Hastelloy C-276, corrosion resistant alloy at high temperature, is used in chemical plant and power generation industry. In this study, process parameter of laser welding for welding property in Hastelloy C-276 using a continuous wave Nd:YAG laser was studied. As the result of experiment, laser welding did not show segregation or crack at heat affected zone compared to conventional GTWA welding. The melting zone showed cell dendritic structure along with welding line. In addition, planer front solidification is occurred from welding structure, and it was progressed to cellular solidification. Optimal process parameter for butt welding was 1.2kW and 2.0 m/min for laser power and welding speed, respectively. While heat input, output density, tensile stress, and longitudinal strain was 441.98×10^3 J/cm², 29.553×10^3 W/cm², 768 MPa, and 0.689, respectively. Lap welding of the same material showed greater discrepancy in tensile property during 1 line and 2 line welding. For 1 line welding, tensile stress was about 320 MPa, and 2 line showed slightly larger tensile stress. However, strain was decreased by 20%. From this result, lap welding of the same material, Hastelloy C-276, with 2 line welding is considered to be more effective process than 1 line welding with consideration of mechanical property.

Key Words : CW Nd:YAG laser, Hastelloy C-276, Bead profile, Lap welding, Microstructure

1. 서 론

Hastelloy C-276은 니켈기 합금으로 고온에서 내식성이 요구되는 열교환기의 입구부분, 유인팬(Induced

draft fan) 등에서 필수적으로 사용되고 있다. 그러나 Hastelloy C-276과 같은 니켈기 합금강은 일반 강(steel)보다 가격이 매우 비싸기 때문에 대형열교환기와 같은 구조물에 사용하는 데는 경제적으로 많은 부담으로 작용하고 있다. 이를 해소하기 위해 열악한 환경

에 노출된 영역의 부분적인 부위를 다양한 방법으로 용접하여 재료비를 절감하고 있다. 예를 들어 박판금속 라이닝(thin-sheet metallic lining), 클래드 판 구조물(clad plate construction), 서페이싱 오버레이 용접(Surfacing overlay welding), 용사법(thermal spraying process) 등과 같은 방법이 경비절감에 활용되고 있다.

Hastelloy C-276은 가스텅스텐 아크 용접(GTAW)과 피복아크용접(SMAW)을 주로 사용하고 있다. 이것은 대부분의 용접구조물이 대형이므로 자동화 라인을 설치할 수가 없어 수동용접을 하고 있다¹⁾. Hastelloy C-276의 용접성은 우수하지만 과도한 입열량으로 용접할 때 내부식성에 대한 용접금속의 편석(segregation)이 발생하여 기공 발생과 응고 고온균열 감수성이 높은 특징이 있다. 또한 용접부 탄화물의 입자석출(grain precipitation)로 인하여 내부식성 저하가 발생하기 때문에 일반적으로 용접 후 열처리로 할 필요가 있다. 이 중에서 특히 산소아세틸렌(oxyacetylene)용접은 침탄 가능성이 있어 가급적 피하고 있다²⁾. GTAW용접한 Hastelloy C-276은 고온·부식 환경에서 장시간 사용할 때 용접부의 열영향부에서 균열이 발생하게 된다³⁻⁵⁾. 이러한 균열의 원인으로 응력-부식균열, 입계에 민화 및 수소취성 등의 다양한 균열발생 기구가 적용될 수 있다.

사용 중 손상요인 외에도 용접시 국부적인 용융과 열전도 과정에서 큰 온도구배로 인한 열응력, 열충격이 작용할 수 있다. 이것이 원인이 되어 열피로와 같은 사용 반복 응력이 손상요인으로 작용하여 용접부가 손상될 수 있다. Kim⁶⁾은 용접 열영향부에 발생한 균열은 용접으로부터 유발된 잔류응력과 사용 중의 부식 환경에 영향을 받았을 것으로 판단하여 유한요소법으로 열영향부위에서의 잔류응력 특성을 고찰하였다.

니켈기 합금의 용접에서 발생하는 결함을 줄이기 위한 방법으로 일반적인 용융용접에 비해 열원특성이 매우 뛰어난 레이저 용접이 매우 효율적인 방법이다. 아크용접과 같은 일반 용접법은 용접열원이 재료표면에 공급되고 내부의 용융은 열전도만으로 행해지므로, 중

횡비가 큰 용입(penetration depth)을 얻기가 어렵다. 그러나 레이저는 전자빔 용접과 함께 고에너지 밀도 열원을 이용하기 때문에 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되어 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 대단히 크고, 열영향부(heat affected zone ; HAZ)가 작은 용접이 가능하다. 출력밀도가 높은 레이저빔을 이용하여 매우 짧은 시간 내에 용접하기 때문에 적절한 열확산과 적은 내부응력이 형성하여 용접변형이 적어 일반용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질측면에서 모재에 거의 영향을 미치지 않아 우수한 용접평가를 받고 있다.

기술선진국에서는 중·화학 산업과 관련하여 고에너지빔 용접에 관한 수많은 연구가 행해져 왔으나 특수분야의 적용이 대부분이기 때문에 공개된 기술은 그리 많지 않다. 국내의 에너지 동력 산업에서 용접 기술 및 적용 사례 등을 살펴볼 때, 고부가가치 소재에 대한 신기술 관련 연구 부재로 인하여 다양한 용접변수와 용입특성에 대한 많은 자료가 요구되고 있다.

본 연구에서는 레이저 출력, 용접속도를 변화시켜 최적의 공정변수를 결정하고자 한다. 또한 최적의 공정변수로 용접한 용접단면의 조직과 경도분포 및 인장강도를 비교하여 Hastelloy C-276의 레이저 용접특성에 관하여 고찰하고자 한다. 그리고 최적의 용접 공정으로 용접한 Hastelloy C-276과 비슷한 니켈기 합금인 STS 304의 용접결과와도 비교 검토하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용된 실험재료는 Hastelloy C-276과 STS304로 화학성분은 Table 1과 같다. 두 시편 모두 Ni과 Cr성분이 상대적으로 다른 조성분에 비해 많이 포함돼 있다. 시편 표면의 이물질을 완전히 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후 용접 실험하였다. 본 연구에 사용한 Nd:YAG레이저는 최대출력 2.8kW, 평균유효출력 2kW급의 연속파형 레이저이다.

레이저 용접시 표면과 대기 중의 오염 물질 사이의

Table 1 Chemical compositions of Specimens (wt%)

	C	Mn	Fe	S	Si	Cu	Ni	Cr
Hastelloy C-276	0.004	0.41	5.31	0.001	0.058	0.14	58.86	15.75
		Ti	Co	Mo	P	B	W	V
	0.01	0.13	15.82	0.012	0.002	3.88	0.01	
Austenite Stainless steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	18~20	8.~10.5	Bal.

상호작용을 방지하기 위해서 Ar가스를 45°각도, 1bar의 가스압력으로 분사시켰다. 본 연구에 사용된 실험장치의 계략도는 Fig. 1과 같다.

2.2 실험방법

Hastelloy C-276의 용접특성을 고찰하기 위해 Table 2에 제시한 조건으로 비드용접 실험하였다. 최적의 비드실험을 기준으로 맞대기용접(butt welding)과 겹치기 용접(lap welding)을 실시하여 용접특성을 비교 했다.

레이저빔의 이송속도는 비드용접은 0.1 m/min, 맞대기용접은 1m/min씩 증가시키면서 입열량을 조절했다. 최적의 용접공정변수를 결정하기 위해 레이저 공정 변수의 변화에 따른 용접비드의 폭과 침투깊이 등을 측정 후 각각의 공정에 대한 입열량의 변화를 측정하였다. 본 실험 결과분석에 사용한 입열량은 아래 식(1)과 같다.

$$E = \frac{P}{V \cdot W} \text{ (J/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

위 식에서 E는 입열량, P는 레이저출력, W는 시편 위 표면의 용입폭, V는 용접속도이다. 시편의 위 표면의 용입폭으로 입열량을 계산한 것과 비교하기 위해 용접단면부의 이미지 분석을 통해 용융면적을 계산한 후 입열량과의 상관관계를 제시하였다.

레이저용접 공정변수 변화에 따른 기계적 특성을 평가 위해 시험편[KS B0801]을 제작 한 후 인장시험기(Universal Testing machine 4206, 15ton)로

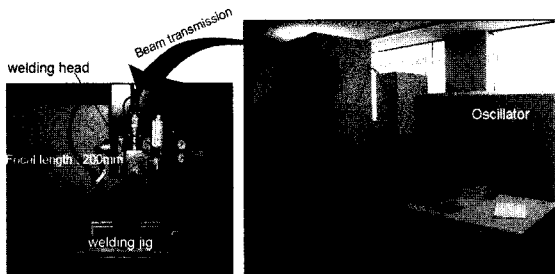


Fig. 1 Schematic diagram of laser welding

인장강도(tensile stress) 및 인장변형률(tensile strain)을 실험하였다.

용접부의 비드폭 및 침투깊이를 관찰하기 위해 STS304 용접시편을 정밀금속절단기로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 폴리싱 후 증류수(50ml)+염산(150ml)+산화크롬VI(25g)로 에칭하였다. Hastelloy C-276은 고온내부식성 니켈기 합금으로서 미세조직을 관찰하기 위해 STS 304를 에칭방법으로는 어려움이 많았다. 많은 문헌을 근거로 마이크로 및 매크로 에칭실험을 실시하였으나 에칭현상이 전혀 발생하지 않았다. 그러므로 본 실험에서는 옥살산(oxalic acid)과 전류·전압장치를 이용하여 전해에칭 했다. 에칭된 용접부 경계면은 광학현미경으로 관찰하였다. 용접부 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하여 0.3kg의 하중을 적용시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접공정에 대한 입열량 특성

레이저의 출력을 1.0kW로 하고 레이저빔의 이송속도 변화에 대한 입열량을 Fig. 2 나타내었다. 레이저빔의 속도가 느려 입열량이 큰 경우는 A로 표시 하였다.

입열량이 큰 공정 즉, 용접속도가 느린 공정에서는 용융부의 윗부분 용접중심선에 모퉁한 부분이 발생하였다.

레이저빔이 가우시안 형태와 강도분포가 유사하기 때

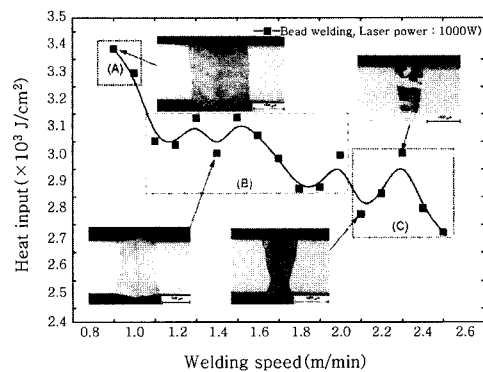


Fig. 2 Heat input variations of Hastelloy C-276 for welding speeds

Table 2 Parameter of laser welding

	Bead welding	Butt welding	Lap welding
Laser power(kW)	1.0	1.2, 1.4, 1.6	1.4, 1.5, 1.6
Welding speed(m/min)	0.9~2.4	1.0~3.0	1.0
Focal position(z)	0(f=200mm)	0mm(f=200mm)	0mm(f=200mm)
Shielding gas (Ar)	1bar, 3 l/min	1bar, 3 l/min	1bar, 3 l/min

문에 레이저빔의 중심의 에너지밀도가 높아 용융온도가 낮은 조성분 일부가 증발되었기 때문이다. 또 한편으로는 레이저빔의 주변부는 모재로의 급속한 열전달로 중심부에 비해 용융면 주변부로의 냉각에 의한 열손실량이 많아 주변부는 증발현상이 발생하지 않았다.

용접속도가 늦어 입열량이 클 경우 과입열량으로 인한 용융물이 시편의 상부에서 응집력이나 점성력 보다 중력의 영향으로 흘러내린 용융물이 시편의 아래 표면의 모재와의 응집력으로 부착되어 불룩한 용접면을 형성하고 있다. 또한 레이저 용접특성상 임계값 이상의 레이저빔이 재료의 표면에 조사되면 급격한 재료의 증발현상이 발생하고, 급속증기가 분출하는 반동력에 의해서 용융급속면에 함몰을 일으켰다. 용접속도가 1.2~2.0m/min일 때의 용접비드는 상부에 오목한 부분이 발생하지 않고, 하부에는 불룩한 부분이 발생하는 않는 모습을 B에 타나냈다. 이때의 입열량은 $3.038 \sim 2.879 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이다. 이때의 용융단면은 모래시계 모양을 하고 있다. 용융면적이 모래시계 모양을 하고 있는 이유는 레이저빔이 직접 조사되는 시편표면에서는 열전도 때문에 용융면적이 상대적으로 크다. 반면에 용융부의 중간부분은 모재로의 열전달에 의한 냉각 때문에 좁게 형성되지만 시편아래 부분은 모재와 용융부의 개면접촉 때문에 주변부로 열전달 되어 모래시계모양으로 형성되었다.

레이저빔의 이송속도가 증가하여 상대적으로 입열량이 작을 때는 C 구역에 나타난 것처럼 비드모양이 나사모양을 하고 있다. C로 표시한 부분의 입열량은 에너지 밀도가 작아 충분한 키홀용접이 되지 못하고 주변부 모재로 열전달 된 용융부 모양을 하고 있다. 용융단면이 나사모양으로 내부로 갈수록 작아지는 이유는 레이저빔의 이송속도가 빨라 상대적으로 흡수된 작은 에너지가 내부로 진행하면서 급격하게 냉각되기 때문이다. 입열량 계산식(1)로 계산하면 표면 용융단면을 실험결과 값으로 계산하기 때문에 그래프가 Fig. 2처럼 출력 거리는 현상을 보이고 있다. 그러나 용접속도에 따른 용융단면적을 기준으로 출력밀도로 계산할 경우 출력밀도는 용융단면적에 비례하므로 Fig 2와 같은 모순이 발생하지 않음을 Fig. 3에 나타냈다. 입열량을 계산할 때 지금까지 통상적으로 사용하고 있는 식(1)보다는 용융단면적을 중심으로 계산하는 것이 일관성이 있음을 나타내고 있다.

Fig. 4은 오스테나이트 스테인리스강인 STS304의 용접속도에 따른 종횡비의 변화를 나타낸 결과이다. 레이저빔 출력이 1.9kW, 초점위치(z)는 -0.5mm, 보호가스(Ar)는 3ℓ/min으로 고정하고 용접속도를 변화시

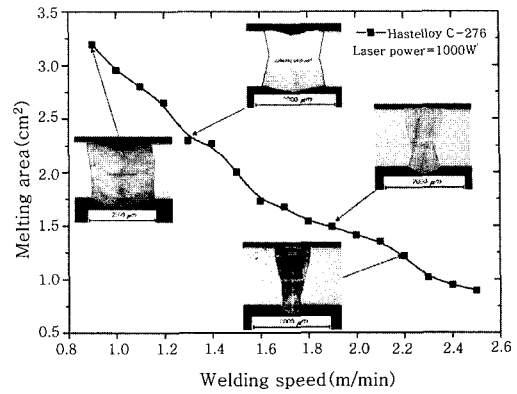


Fig. 3 Variation of melting area according to welding speed

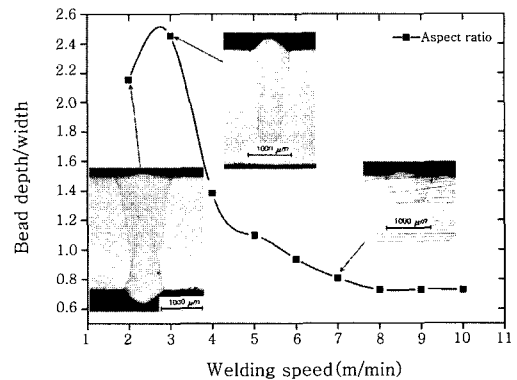


Fig. 4 The aspect ratio of STS304 steel on the welding speed

켜 실험하였다. 용접속도가 증가할수록 종횡비는 감소하였고, 5m/min 일 때 종횡비가 1에 근접한 뒤 용접속도가 증가하면 종횡비가 1이하로 감소하였다. 이는 레이저빔의 이송속도가 증가하여 입열량이 감소하면 표면에서 키홀이 잘 형성되지 않아 레이저빔이 용융물에서 다중 반사될 확률이 줄어들어 흡수 에너지양이 줄어들기 때문이다. 용접속도가 3m/min일 때는 키홀의 형성이 원활하게 진행되어 종횡비가 2.15로 가장 크게 나타났다. 종횡비가 가장 클 때 입열량은 Hastelloy C-276은 $3.038 \sim 2.879 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이고 STS 304는 $405.5 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 으로 Hastelloy C-276보다 약 10^2 배 크게 나타났다. 입열량을 Fig. 3에서 설명한 출력밀도(P/A)로 표현하면 $43.535 \sim 59.667 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 과 $112.028 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 이었다.

STS 304의 용융단면적은 Fig. 2의 B에 나타난 모양과 비슷하여 Ni과 Cr 성분이 상대적으로 많은 재료는 종횡비가 클 경우 용융단면적의 형상이 비슷하게 형성됨을 나타내고 있다. 이는 열용량, 밀도 등 다른 물리적 성질의 유사성 때문에 Hastelloy 강의 용접특성

이 오스테나이트 스테인리스강과 매우 흡사한 결과를 나타내고 있다. Hastelloy 와 STS 304와 큰 차이는 낮은 열팽창, 낮은 열전도, 높은 전기저항이다. 이와 같은 물리적 성질 때문에 응고온도가 STS 304보다 약 55℃정도 낮아 입열량이 다르게 나타났다.

3.2 맞대기 용접 특성

Hastelloy C-276의 맞대기 용접특성을 고찰하기 위해 비드용접실험 결과를 기준으로 맞대기 용접하였다. 공정변수는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 레이저 출력을 각각 1.2, 1.4, 1.6kW이며, 용접속도는 각각 1.0, 2.0 3.0m/min로 변화시켜 용접하였다. 레이저빔의 이송속도가 작을수록 또는 레이저빔의 출력이 클수록 용융폭이 증가하고 있다. 용접속도가 2.0m/min 3.0m/min 일 때는 레이저빔의 출력 증가에 대한 비드폭의 증가율은 크지 않았지만, 1.0m/min일 때의 용융폭의 증가율이 약 2배정도 컸다. 이는 레이저빔의 시편에 대한 흡수율이 출력의 증가보다는 속도에 민감함을 의미한다.

레이저 용접변수에 따른 용접부 단면을 광학현미경을 활용하여 Fig. 6에 나타냈다. 레이저 출력이 1.6kW이고 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min, 2.0m/min, 3.0m/min일 때 모두 두께가 2mm인 시편이 관통용접됐다. 맞대기 용접에서도 BOP 용접특성을 나타낸 Fig. 2에 설명한 현상과 같은 결과가 출력 1.6kW, 용접속도를 1.0m/min, 2.0m/min, 3.0m/min으로 변

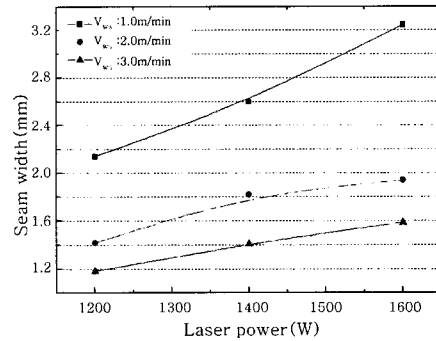


Fig. 5 Variation of seam width for laser powers and laser transverse speeds

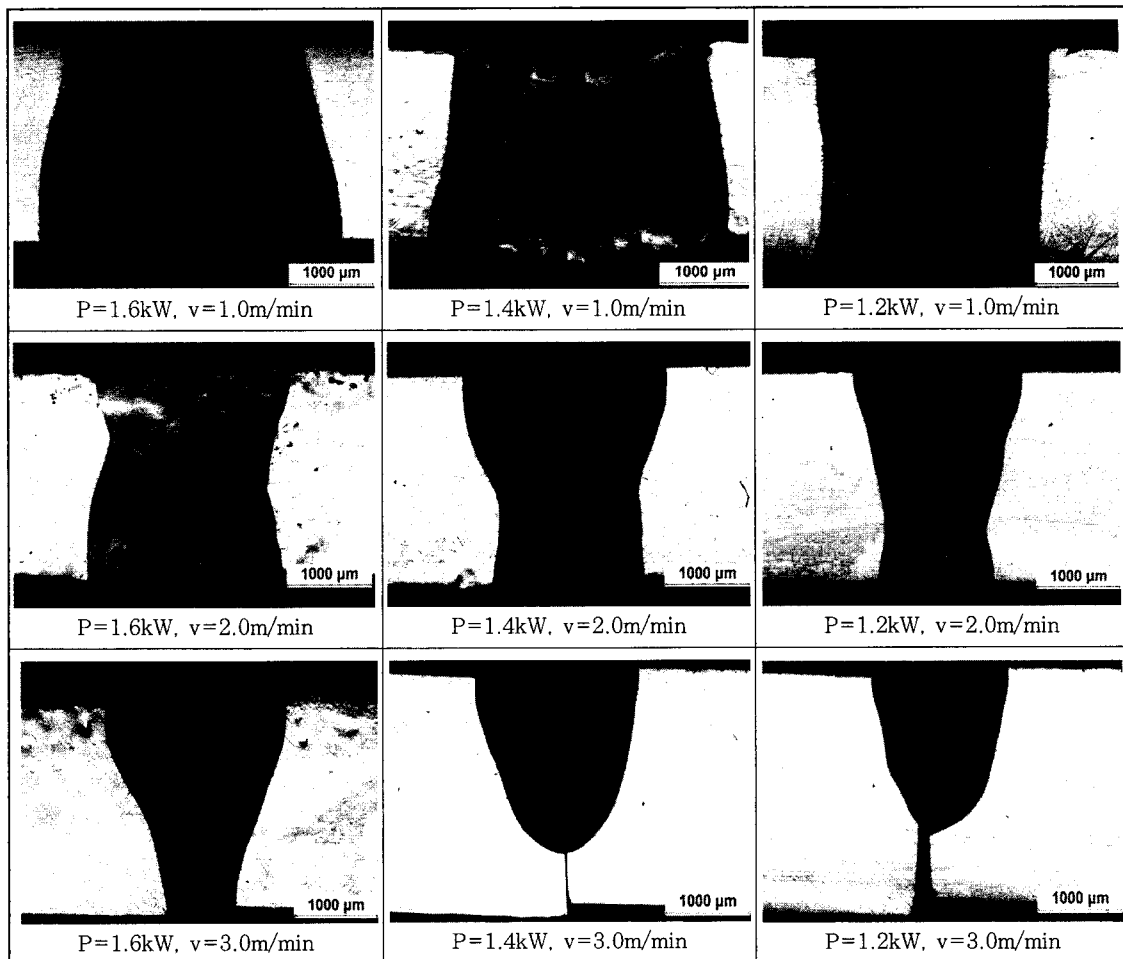


Fig. 6 Cross sectional area of welding according to variation of laser powers and traverse speeds (Hastelloy C-276)

화 시켰을 때 Fig. 6과 같이 뚜렷하게 나타는 것을 볼 수 있다. 레이저 출력이 1.4kW와 1.2kW일 때는 용접 속도가 3.0m/min부터는 관통용접이 불가능하였다.

용융부 중심으로부터 양쪽 모재로 급냉각하면서 열이 용출되어 관통용접된 용융단면의 용접선 중심부에서 모재방향으로 수지상조직이 관찰됐다.

Hastelloy C-276과 비슷한 니켈기 합금인 STS304 강의 용접단면결과를 비교하였다. 용접조건은 Hastelloy C-276과 동일한 조건으로 실험하였다. STS 304의 맞대기 용접한 용접단면을 Fig. 7에 나타냈다. 레이저 출력이 1.6kW와 용접속도가 1.0m/min으로 동일한 용접 공정조건일 때 STS 304가 Hastelloy C-276을 맞대기 용접한 것보다 종횡비가 크게 나타났다. Fig. 7에 나타낸 실험결과와의 출력밀도는 $44.506 \times 10^3 \text{W/cm}^2$ 이고 Fig. 6에 나타낸 Hastelloy C-276의 출력밀도는 $20.343 \times 10^3 \text{W/cm}^2$ 이었다. STS304는 Fe-Cr-Ni의 3원계 합금으로서 용융온도가 1535°C인 Fe 성분이 주성분이다. 반면에 Hastelloy C-276은 용융온도가 1455°C인 Ni성분이 가장 많이 포함되어 있다. 용융온도가 Fe 보다 낮은 Ni 성분이 용융되어 모재양면으로

전달되면서 용융면적이 STS304보다 Hastelloy C-276이 더 크게 형성되었다.

Hastelloy C-276은 고용체 강화형 합금으로 Nickel γ 상을 Cr, Mo, W 등으로 강화하는 것으로 Cr을 많이 함유시켜 내산화성이 뛰어나다. 그러므로 Hastelloy C는 Cr을 첨가하여 환원성 뿐 아니라 산화성 환경에 대해서도 우수한 내식성을 갖고 있어 부식성이 강한 화학공장에 많이 활용되고 있다. 그러나 이 합금도 용접 열영향부에서의 입계부식을 일으키는 결점이 있다. 이 결점을 개선한 것이 Hastelloy C-276이며 현재 Hastelloy C는 주조재료만 쓰이고 있다. Hastelloy C-276은 염화물 중에서의 SCC(stress corrosion cracking: 응력부식균열)에 강하고 공석, 입계 부식의 염려가 없는 것이 특징이며 거의 모든 장치의 중요기에 쓰이고 있다. 이 합금은 부식환경이 변할 때 또는 2종류의 다른 환경에 노출될 때에 유리하다⁴⁻⁶⁾. 이와 같은 특성을 지닌 Hastelloy C-276의 용접특성을 분석하기 위해 Fig. 8에 레이저용접부의 미세조직을 나타냈다.

Fig. 8(A)는 레이저 출력이 1.6kW, 용접속도가

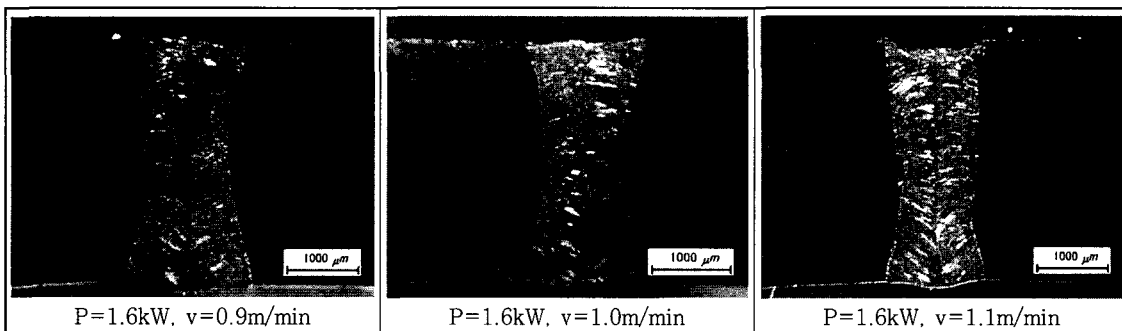


Fig. 7 Cross sectional area of welding according to variation of laser powers and traverse speeds (STS304)

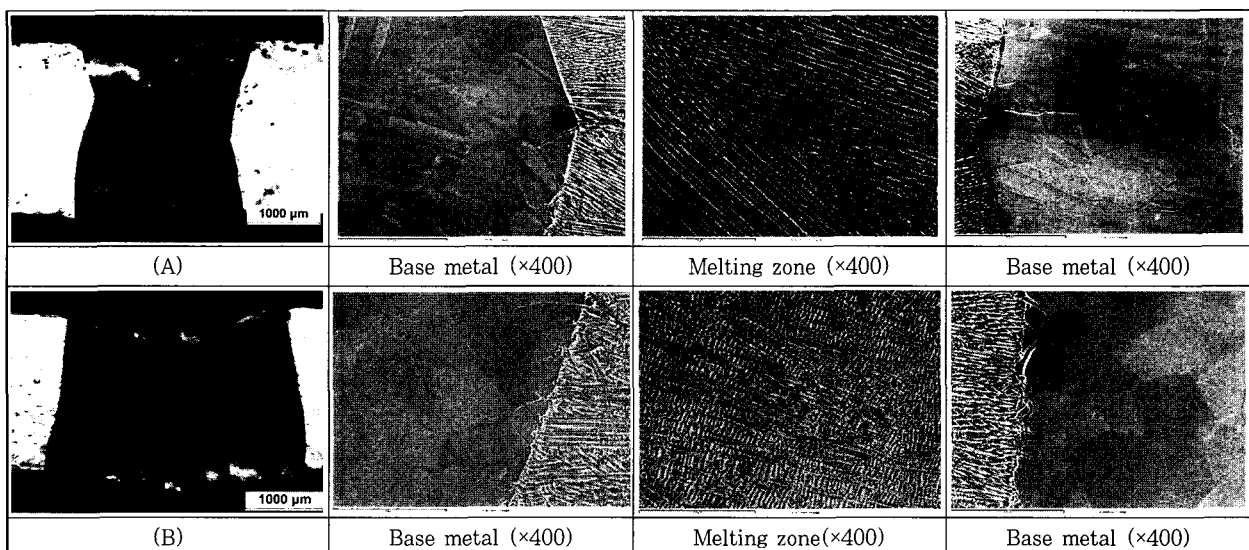


Fig. 8 Photographs of melting zone after butt welding

2.0m/min일 때 용접부이며, (B)는 레이저 출력이 1.4kW, 용접속도가 1.0m/min일 때의 미세조직이다. 각각의 시험편의 용접부와 모재부의 조직을 비교하였다. 용융부와 모재의 경계부는 급격한 과냉각현상이 발생하여 모재의 경계부에서 생성한 핵이 성장하여 용접부 중심으로 조직이 성장하여 모재의 기본구조인 등축 입자(equiaxed grains) 입계면으로 조직이 성장하였다. (A)그림 중 오른쪽 경계면에서 모재방향으로 급냉각 때문에 크랙이 발생하였다. 용융부는 용접선을 중심에서 좌·우로 셀상의 수지상조직(cellular dendrite structure)이 형성되었다. 용접부의 모재로부터 응고가 시작되면서 면선단응고(planer front solidification)가 일어난 후 cellular solidification이 진행되고, 조성적 과냉(constitutional supercooling)이 발생하였다.

응고에 대한 용해물질의 편석 때문에 Hastelloy C-276에 비교적 많이 포함 되어 있는 Mo은 용융영역의 세포 수지상 경계층(cellular dendrite)로 분리된다. 녹는점이 1907°C인 Cr과 1455°C인 Ni에 비해 Mo은 확산이 느린 성분으로 녹는점이 2630°C로 상대적으로 높기 때문이다. 비중이 7.188인 Cr과 8.854인 Ni에 비해 Mo은 비중이 10.23으로 비교적 높아 확산이 느려진다. 또한 Mo(1.38W/cm K)이 Cr(0.937W/cm K), Ni(0.907W/cm K)보다 열전도율이 크기 때문에 응고되는 시점이 다른 원소에 비해 빠르게 진행된다. Mo의 빠른 열전도에 때문에 다른 조성분에 비해 먼저 냉각되면 용융풀의 점성이 증가하여 확산이 느려져 편석의 발생 원인으로 작용한다.

높은 용융점을 갖는 재료에서 먼저 응고가 시작되고, 용융점이 낮은 원소는 온도가 충분히 내려갈 때 까지 액상으로 머무르다가 응고된다. 용액을 응고에 영향을 받지 않도록 방지하면 두 재료의 비중이 일치하여 중첩되어 실제 이용하는데 부적당하다. 그러나 레이저빔으로 용접을 하면 급가열 급냉각 되기 때문에 중첩을 막을 수 있고 두 합금 원소를 미세하고 균일하게 분포하도록 하는 장점이 있다.

레이저빔에 의해 급가열된 용융단면의 모재경계면에서 급격한 냉각이 일어나 먼저 많은 결정이 형성된다. 계속되는 냉각으로 결정이 성장하여 열의 방출과 더불어 용융부 내부로 주상결정(columnar crystal)이 형성되었다. 이미 형성된 결정의 벽이 두꺼워질수록 온도 강하가 감소되어 열방출이 서서히 일어나고, 주상결정의 성장 즉 결정성장은 중지되고 내부잔류용액은 방향성이 없는 입상결정(grain crystal)으로 채워진 모습을 보여주고 있다. 용융단면과 모재의 경계부는 원자의 계면에너지는 표면에너지 또는 표면장력효과로 나타나

로, 계면의 윤곽선은 표면장력과 평형이 이루어 생성된 모습이 보인다. Cieslak et al.⁴⁾는 아크 용융 기술에 의해 Hastelloy C-276 용접부의 공정조성(eutectic constituent)은 p상(p-phase)과 μ상(μ-phases)들의 결합될 것임을 제시하였다.

Fig. 9와 10은 맞대기 용접 후 KS B0801규격으로 인장시험한 결과를 나타내었다. Fig. 9은 레이저 출력을 1.6kW로 고정한 후 용접속도를 1.0m/min과 2.0m/min, 3.0m/min으로 용접한 용접시험편의 인장특성을 비교하였다. 용접속도가 가장 작은 1.0m/min일 때의 인장강도가 가장 작았다. 이와 같은 이유는 레이저 저빔의 이송속도가 작아 입열량이 많아지면 경도는 증가하나 취성성분이 모재에 비해 큰 용접부의 면적이 증가하여 인장응력이 감소하였기 때문이다. 이때 인장응력은 최대 인장응력 658MPa 보다 110Mpa 정도 작았다.

Fig. 10에 용접속도를 2.0/min으로 고정하고 레이저 출력을 각각 1.2kW, 1.6kW로 변화시켰을 때 인장특성을 비교한 결과이다. 이때의 인장강도는 768Mpa이고, 입열량은 $441.98 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 출력밀도($I=P/A$)는 $29.553 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 로 Hastelloy C-276을 맞대기

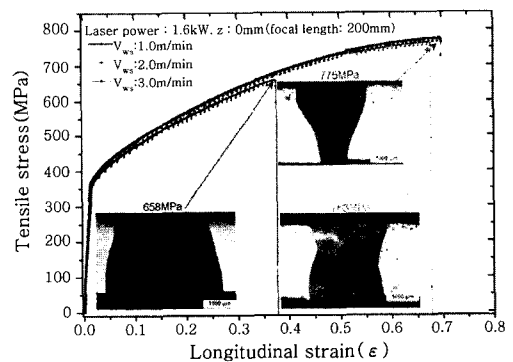


Fig. 9 The results of tensile stress for strain according to welding speeds

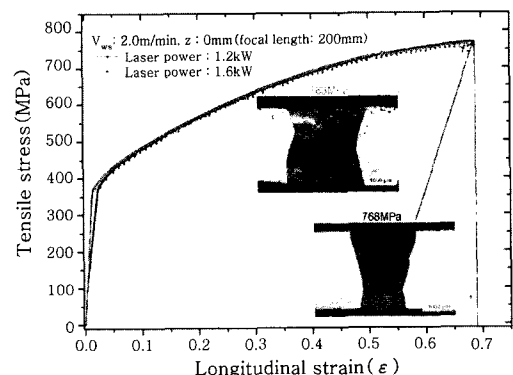


Fig. 10 The results of tensile stress for strain according to laser powers

용접했을 때 최적공정조건이다. Fig. 11는 오스테나이트 스테인리스강(STS304)의 맞대기 용접한 후 Hastelloy C-276 인장시험편과 동일하게 제작하여 인장응력과 변형률을 나타낸 것이다.

STS304 시험편의 레이저 출력을 1.6kW로 고정하고 입열량을 변화시키기 위해 레이저빔 이송속도를 0.7~1.3m/min까지 1m/min 씩 증가시켰다. 용접속도가 0.7~1.1m/min 로 증가할수록 인장응력과 변형률이 증가하여 1.1m/min일 때 최대 변형률과 인장응력값은 각각 0.807, 633MPa이었다. 1.2m/min 이상으로 용접속도가 증가하면 응력-변형률선도가 급격히 감소하였다. Hastelloy C-276과 동일한 조건하에서 인장특성을 비교했을 때 인장응력과 변형률이 각각 763MPa, 0.647로써 인장응력은 약 20.5%크지만, 변형률은 0.16 작게 나타났다.

Fig. 12는 맞대기용접 후 경도분포를 고찰하기 위해 시편 표면으로부터 200 μ m에서 마이크로 비커스 경도 측정된 결과이다. 모재의 경도값은 약 230Hv이며, 용접부의 경도값은 최대 255Hv에서 최소 245Hv정도로 모재에 비해 경도값이 큰 차이는 발생하지 않았다. 마

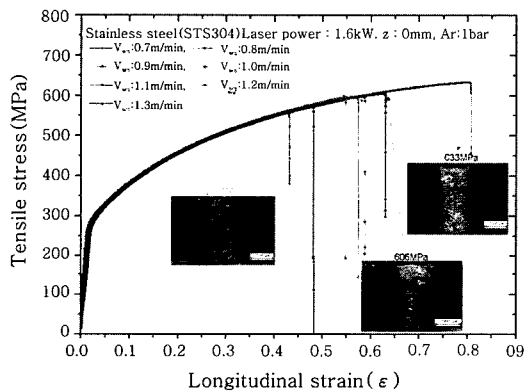


Fig. 11 The results of tensile stress for strain according to welding speeds(STS304)

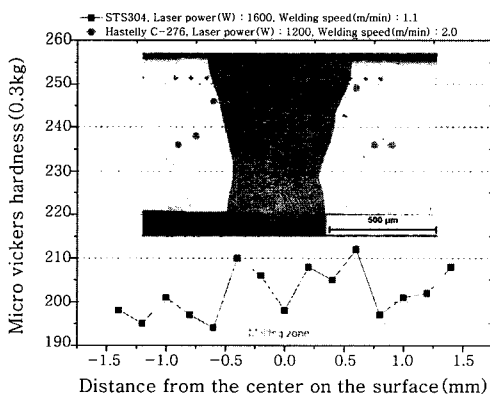


Fig. 12 Hardness profile of cross section

이크로 비커스 경도계로 최대값과 최소값의 차이가 10Hv로 이 차이는 경도계의 탐침이 입계내부와 입계 경계부위에 작용했을 때 발생 할 수 있는 차이로 생각 할 수 있다. 이는 용접부의 조직이 셀수시상조직으로 형성되면서 발생하는 특징으로 판단된다.

중탄소강을 용접했을 때 용접부위의 경도가 모재보다 약 300% 이상 증가하는 것⁷⁾과 비교하면 Hastelloy 약 9%, STS 304 약 5% 정도 증가하여 Hastelloy 용접에 의한 용접부위 경도증가는 STS 304처럼 매우 작았다.

3.3 겹치기 용접 특성

Hastelloy C-276뿐만 아니라 Nickel기 합금강은 강(steel)보다 가격(cost)이 매우 비싸므로 열교환기와 같은 구조물에서 열악한 환경에 노출되는 부분에 재료 비 절감하기 위해서 다양한 방법으로 맞대기 용접하여 활용한다. 이와 같은 가공방법 중 여러 개의 얇은 판재를 겹쳐지게 하는 방법(Wallpaper concept)으로 산업 현장에서는 아크용접이 사용되고 있다.

본 연구에서는 이러한 개념을 접목시키기 위해 Fig. 13와 같이 한쪽에서만 용접을 하는 편측용접과 겹치기 이음부의 한쪽에서만 필릿용접하는 겹치기 용접을 각각의 공정변수에 대한 용접특성을 비교하였다.

Fig. 14는 용접속도를 1.0m/min으로 고정하고 레이저빔 출력을 각각 1.6, 1.5, 1.4kW로 변화시켜 각각 1 line과 2 line 겹치기 용접을 실험하였다. 겹치기 용접하면 레이저빔이 표면에 직접 접촉하는 부분인 용융표면의 열전달로 용융표면의 폭이 증가하고 아래시편의 모재에서 급속한 모재로의 냉각으로 와인컵(wine cup)모양을 이루고 있다.

출력이 클 경우 아래 시편으로 일부 용융물이 유동하여 시편아래 부분에 표면과의 용융물의 응집력으로 볼록한 비드모양을 형성하고 있다. 2 line 겹치기 용접은 위 시편 표면의 끝부분에서 안쪽으로 1mm 지점에 레이저빔을 조사 시켰다. 출력이 1.4 kW에서는 위쪽에 있는 시편의 일부가 용융되지 않았다. 겹치기 용접에서

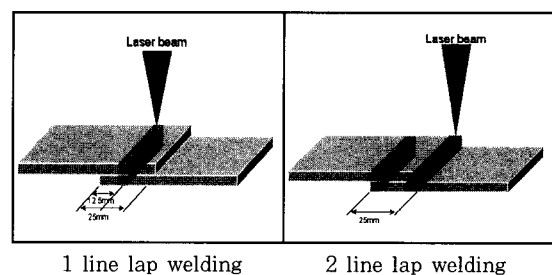


Fig. 13 Schematic diagram of lap welding

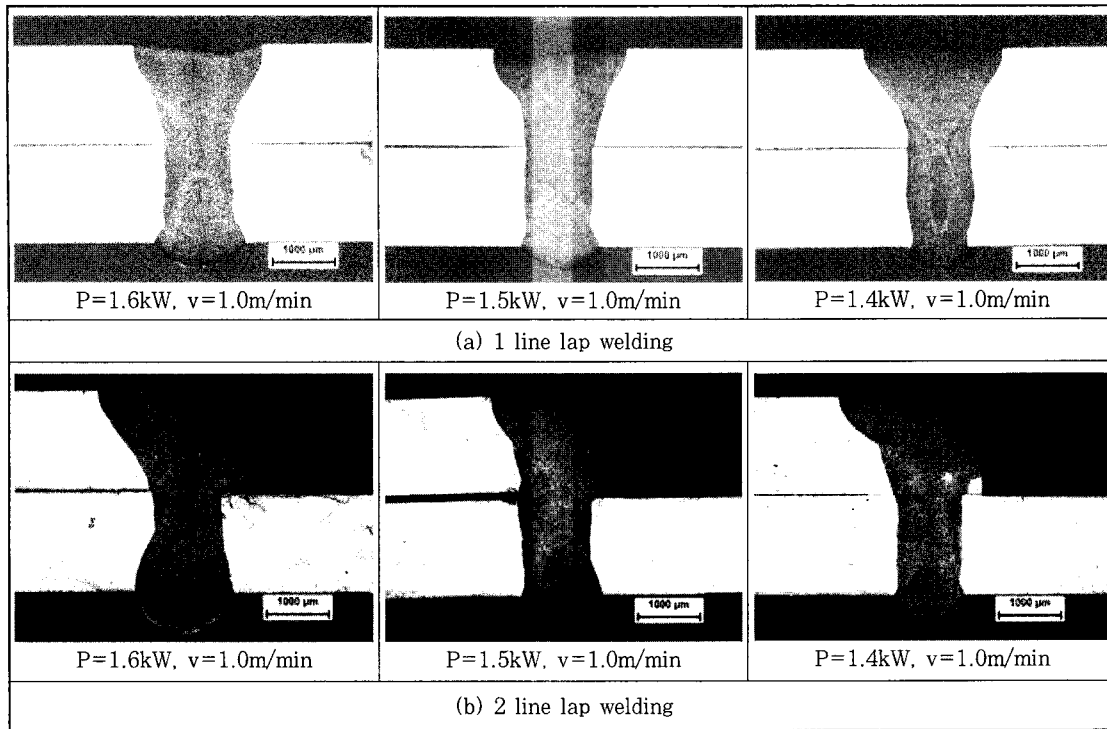


Fig. 14 Cross sectional area of weld bead after lap welding

끝부분의 영향을 받지 않는 1 line 용접과는 다르게 모서리부분의 영향을 받을 경우에는 비교적 용융풀이 크게 형성되었다. 이것은 낙취 예방으로 설치하는 피뢰침 처럼 모서리부분에 열전자 집중현상이 발생하여 용융효과가 증가하여 발생한 현상으로 생각한다.

Fig. 15, 16은 겹치기 용접 시편을 인장시험 한 결과이다. Fig. 15은 1 line 겹치기 용접한 시편편을 인장시험한 결과이다. 레이저빔 출력은 각각 1.6kW, 1.5kW, 1.4kW로 하고, 두 시편이 충분히 관통용접이 될 수 있도록 레이저빔의 이송속도는 1.0m/min로 용접한 결과이다. 레이저 출력이 1.6kW일 때 인장응력(σ)과 변형률(ϵ)이 각각 427MPa, 5%로써 가장 크게 나타났다. 맞대기 용접한 결과를 나타낸 Fig. 10의 인장응력보다 약 320Mpa정도 작았다.

Fig. 16는 겹치기 용접 line 간격을 25mm로 하여 2 line 겹치기 용접하여 인장 시험한 결과이다. 인장에 의한 절단은 용접단면보다 모재부분에서 이루어졌다. 동일한 용접 입열량 조건에서 1 line 겹치기 용접하면 맞대기 용접에 비하여 인장응력이 약 43 % 작게 나타났다. 2 line 겹치기 용접하여 인장응력 시험하면 겹치기 용접한 2 line의 용접부 경도증가로 인장력이 선형적으로 전달되지 않아 모재를 인장시험 했을 때보다 변형률(ϵ)이 약 20%정도 작았다. Fig. 17은 1 line과 2 line 겹치기 용접한 시편의 인장시험 결과이다.

Fig. 18은 겹치기 용접(1 line 용접)시 경도분포를

측정한 결과이다. 맞대기 용접과 다르게 그래프 우측면 쪽에서 경도값이 최대 254Hv로 용접선을 중심으로 좌

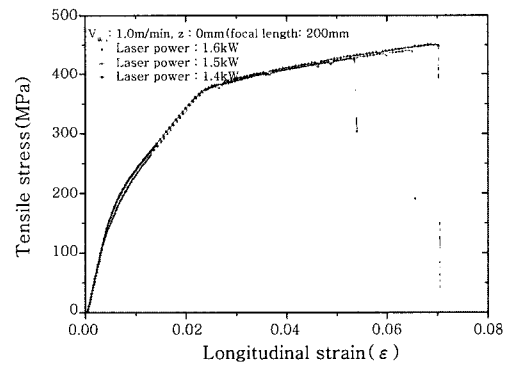


Fig. 15 Result of tensile test for 1 line lap welding

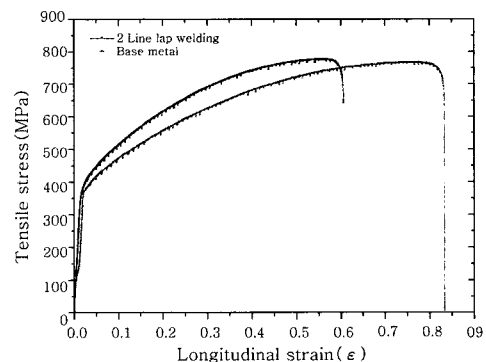


Fig. 16 Tensile stress in comparison with base metal and 2 line lap welding

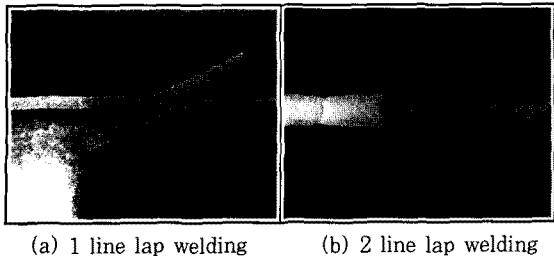


Fig. 17 Tensile specimens tested of both 1 line and 2 line lap weldment of Hastelloy-C 276

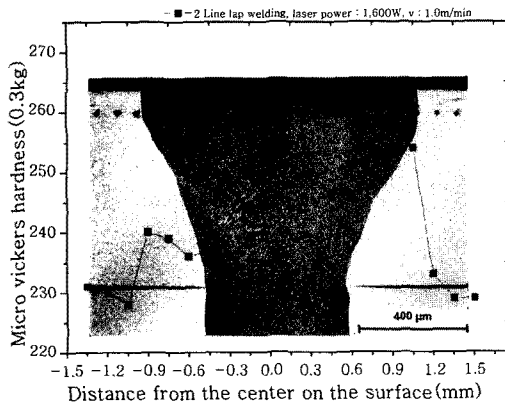


Fig. 18 Hardness profile of cross section for laser welding

측면 쪽으로 경도값이 약 10Hv 정도로 작게 형성되었다. 시편 용융표면을 관찰하면 과입열양에 의한 증발 때문에 오목하게 들어간 부분에서 경도값이 약간 높는데 이것은 이 영역에서 급가열과 급냉각의 효과가 크기 때문으로 생각된다. 또 한편으로 고려 할 수 있는 것은 정확하게 시편이 수평으로 배열되지 못해 레이저빔의 초점면이 대칭적으로 도달하지 않고 미소하게 기울어지면서 초점면의 불일치에 따른 결과를 고려 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 Hastelloy C-276의 맞대기 용접과 겹치기 용접특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Hastelloy C-276는 맞대기 용접시 입열량이 증가할수록 용융폭과 용융면적이 증가하고, 출력밀도가 약 $19 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 이상으로 증가할수록 상부 비드폭보다는 하부 비드폭이 크게 형성되었다.

2) GTAW 용접시 발생하는 열영향부의 균열은 용융점이 서로 다른 성분이 액상에서 응고되는 과정에 발생된다. 그러나 본 실험 결과 레이저 용접을 진행하였을

때는 열영향부에서 내부결함이 발생되지 않았다. 이는 레이저빔의 열원이 고밀도 에너지 열원으로서 급가열·급냉각으로 인한 용융점이 서로 다른 원소의 응고되는 시점을 중첩시켜 열영향부가 생성되는 것을 막기 때문이라 판단된다.

3) 맞대기 용접시 최적의 공정조건은 레이저빔 출력, 용접속도가 각각 1200W, 2.0m/min이다. 이때 입열량, 출력밀도, 인장응력과 변형률은 각각 $441.98 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, $29.553 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, 768MPa, 0.689이다.

4) 겹치기 용접후 용접단면은 전형적인 비드형상인 와인컵모양을 이루지고 있고, 이면비드(back bead)에 용접부가 약 300μm 융기된 현상을 볼 수 있었다.

5) 동종재질의 겹치기 용접의 경우 1 line 과 2 line 용접 시 인장특성이 크게 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 1 line 용접의 경우 인장응력이 약 320MPa 정도 작게 형성되었고, 2 line의 경우 모재보다 인장응력은 약간 크게 나타나지만 변형률은 약 20%정도 작게 형성되었다. 이 결과 Hastelloy C- 276의 동종재질의 겹치기 용접시 기계적특성을 고려한 측면에서는 1 line 용접보다는 2line 용접이 좀 더 효율적인 공정이라 판단된다.

후 기

본 연구는 조선대학교 2008년 교내학술연구비지원으로 연구하였습니다.

참 고 문 헌

1. Fabrication of Hastelloy corrosion-resistant alloys, Haynes International, Inc., (2003), 18-25
2. A.M. Tycho, G.R. David L. Francesco and G. Franz : Laser Cladding of Stainless Steel with Hastelloy, *Advanced Engineering Materials*, 3-4 (2001), 242-245
3. M. Ahmad, J.I. Akhter, M. Akhtar, M. Iqbal, E. Ahmed and M.A. Choudhry : Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276, *Journal of Alloys and Compounds*, 390 (2005) 88-93
4. M. Ahmad, J.I. Akhter, M. Iqbal, M. Akhtar, E. Ahmed, M.A. Shaikh and K. Saeed : Surface modification of Hastelloy C-276 by SiC addition and electron beam melting, *Journal of nuclear materials*, 336 (2005), 120-124
5. H.M. Tawancy : Long-term ageing characteristics of some commercial nickel-chromium-molybdenum alloys, *Journal of materials science*, 16 (1981), 2883-2889

6. J. W Kim, Byunghak Choe, Jinsun Hong and Woosik Kim : Cracking Observed in the Socket Weld HAZ of Hastelloy C-276 Alloy, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **40-2** (2002), 1016-1021
7. Y. T. Yoo and H. J. Shin : Characteristics of CW Nd:YAG laser lap welds of Nickel coated S45C steel, Journal of the Korean Welding and Joining Society, **25-3** (2007) 18-27 (in Korean)