

Nd:YAG 레이저를 이용한 냉연강판과 스테인레스강판의 용접

이철구⁺, 이우람*, 백운학⁺⁺

(논문접수일 2009. 7. 31, 심사완료일 2010. 3. 10)

A Study of Nd:YAG Laser Welding in Cold-reduced Carbon Steel and Stainless Steel Sheet

Chul-ku Lee⁺, Woo-ram Lee*, Un-Hak Baek⁺⁺

Abstract

We have studied on welding dissimilar materials of cold-reduced carbon steel sheet and stainless steel sheet together by using laser beam. It is well known that stainless steel is so strong against rust and heat, while cold-reduced carbon steel is widely used in various parts of industry. In this research we have performed some experiments to know the possibility of welding dissimilar materials using laser beam by adjusting the power output of 3kW laser. Other conditions of the experiments were as follows : the welding speed was varied in the range between 2m/min and 7m/min, argon gas and helium gas were used as shield gas, the flow value of shield gas was ranged between 10ℓ/min and 30ℓ/min, and the gap of two materials was ranged between 0mm and 0.3mm. In order to ascertain of the welded surface, we have done the tensile strength testing, the hardness testing and the microscope observation. As a result, we have found that tensile strength was the highest at the condition of the welding speed of 4, the flow value of 20ℓ/min, the gap of two materials 0, and the use of helium gas.

Above testings have also showed that the tensile strength was generally satisfactory since the penetration of welding was almost complete due to the thinness of the materials. In addition, the formation of the welded area was excellent when it had the highest tensile strength.

Key Words : Nd: YAG Laser(Nd:YAG 레이저), Cold-reduced Carbon Steel(냉연강판), Stainless Steel Sheet(스테인리스강판), Shield gas(보호가스)

+ 서울산업대학교 기계공학과

* 교신저자, 서울산업대학교 NID 융합기술대학원 (wooramlee@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉동 172번지

++ 서울산업대학교 산업대학원

1. 서론

레이저(LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)는 1917년에 A. Einstein이 그의 논문에서 에너지 준위에 있는 양자가 자연 방출이 아닌 유도방출에 의해서 광자, 즉 레이저가 나온다고 이론적으로 주장하였고⁽¹⁾ 최초의 레이저는 1960년에 미국 휴즈사의 T. Maiman이 루비를 매질로 하는 Ruby laser를 최초로 발표하였다.⁽²⁾ 이후 새로운 매질을 사용하여 여러 파장대의 레이저가 발표되었다. 1960년 12월에는 A. Javan 등이 He-Ne레이저를, 1963년에는 C. Kumar 등이 CO₂레이저를, 1964년에는 J. Geusic 등이 Nd:YAG 레이저를 개발하여 세상에 내놓았다. 1971년에는 kW급 CO₂ 레이저가 개발되어 산업용에 본격적으로 사용되기 시작하였고, 1990년대 들어서 Nd:YAG 레이저도 kW급이 출시되어 그 응용 범위가 확대되었다.^(3,4) 레이저는 열가공의 열원으로써 모든 산업에 광범위하게 이용되고 있다.

일반적으로 레이저에 의한 열가공법은 용접(welding), 절단(cutting), 천공(drilling), 마킹(marking), 열처리(heat-treatment) 등에서 실용화 되고 있다. 일반적인 용접에 대하여 레이저 용접은 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- ① 레이저가 관성이 없기 때문에 빠른 출발과 정지를 시킬 수 있고, 용접 속도가 높다.
- ② 고밀도 열원으로 용입 깊이가 깊고 비드 폭이 좁다.
- ③ 열 용입량이 적어 가공물의 열변형이 적고, 열영향부가 작아서 금속 결정 성장을 감소시킨다.
- ④ 비접촉가공기술과 보호가스의 사용으로 균질한 용접을 할 수 있다.
- ⑤ 이종 재료 용접과 접근이 곤란한 부분의 용접, 가공 후 재료의 후처리가 불필요하고 용접크기를 줄일 수 있어 부품 설계 능력이 향상된다.
- ⑥ 출력 제어가 우수하기 때문에 여러 작업을 한 레이저로 동시에 가능하고 로봇과 함께 자동화를 할 수 있다.

레이저 용접은 단점을 가지고 있다.

- ① 작은 크기의 빔이 좁은 갭 사이를 지나야 하므로 정밀한 피팅이 요구되며 정밀한 클램프 장치가 필요하다.
- ② 금속은 레이저 빔의 흡수율이 낮고 가공시 발생하는 플라즈마에 의하여 빔의 흡수 및 산란에 영향을 받는다.
- ③ 장비 가동 시 안전 차단막, 레이저 공진기의 광학적 안정성 등 안전이 요구된다.
- ④ 장비의 가격이 비싸다.^(5,6,7)

최근 출력밀도에 대하여 용접속도, 용융 풀의 형상 및 흐름에 대한 연구가 이루어지고 있고, 레이저 용접 시 발생하는 금속증기는 플라즈마화한 것으로 빔의 흡수, 산란을 유발시키고 이런 상태에서 비드의 형성과정을 조사하기 위한 연구들이 시도되고 있다.

본 연구에서 재료는 우리 생활과 밀접한 자동차, 가전제품, 건축자재 등에서 광범위하게 사용되는 냉간압연강판의 한 종류인 SCP1-S와 표면이 미려하고 녹이 슬지 않는 스테인레스강판을 선택하였다. 성형성과 비용 면에서 우수한 SCP1-S 강판과 고온 산화성이 적고 뛰어난 내식성으로 인해 산, 알칼리 등의 부식에 내식성이 우수한 스테인레스강판을 레이저용접으로 접합하고자 한다. 이런 서로 다른 금속들 간의 이종용접 방법은 물리적인 성질에 대한 영향을 고려해 주어야 한다. 레이저 빔에 의한 용접은 일반적인 용접방법에 비하여 가열 및 냉각 속도가 매우 크고 또한 열영향부가 적다. 이러한 급속한 가열 및 냉각이 철강재의 용접에 적용되는 경우에는 노치 민감도를 증가시킨다. 따라서 철강재의 레이저용접은 저탄소강, 저합금고강도강, 스테인레스강에 사용되는 것이 유리하다.

본 연구에서는 오스테나이트계인 STS304, 페라이트계인 STS430와 냉연강판인 SCP1-S와의 이종금속 레이저 용접을 실시하여 두 금속간의 용접성을 실험하고자 한다. 따라서 본 실험에서는 실험 데이터를 최적화하기 위해서 출력은 3kW로 고정하였고, 입열량에 따른 영향을 살펴보기 위해 2~7m/min까지 1m/min 단위로 속도를 증가시켜가며 용접 후 비드 외관 및 단면 형태를 관찰하여 여러 가지 변수들을 복합적으로 고려하여 설정하였다.

금속학적 특성을 조사하기 위하여 각 용접부의 조직을 광학현미경으로 관찰하였고 용접부의 신형성을 평가 하였다. 또한 경도시험, 인장시험을 통하여 용접부의 기계적 특성을 규명하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

본 실험에서 Lamp-Pumped 여기방식의 CW(continuous wave) Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 본 장치의 최대 출력은 4kW로 빔 품질(beam quality)은 25mm·mrad이며 6개의 공진기(cavity)를 가지고 있다. 발전기의 최대 효율을 사용하기 위해 최대 출력인 3kW로 고정하여 실험하였다. 레이저 헤드는 YASKAWA 6-axis 로봇에 장착하여 사용하였

으며 초점위치는 재료 상부표면에 일치하도록 하였다. 용접의 위치를 제어한 후 프로그램을 이용하여 자동 용접하도록 구성하였으며, 이를 통해 맞대기용접 또는 BOP 용접을 실시하였다. 또한 보호가스에 따른 용접성에 대해 확인하기 위해 직경 4mm의 구리 노즐을 장착하였으며, 포커싱 위치 바로 뒤에서 60°의 각도로 레이저빔을 따라가도록 공급하였다.

2.2 실험 재료

본 연구의 목적은 스테인레스강관과 냉연강관의 이종금속 용접성을 확인하는 것으로서 냉연강관은 SCP1-S이며, 스테인레스강관은 오스테나이트계인 STS304와 페라이트계인 STS430을 사용하였다. 실험 판재는 120(mm)×70(mm) 사이즈로 두께는 1.2(mm)이다. 맞대기용접 실험 시 버(burr)의 영향을 최소화하기 위해 용접 이음면을 밀링 정삭가공을 하였다.

2.3 분석방법

Fig. 1과 같이 시험편을 지그에 장착한 후에 용접 길이는 양 끝단 5mm 씩을 제외한 110(mm)를 용접하였다. 초점위치는 시험편 표면을 기준으로 하였으며, 출력은 3kW로 고정하였다. 우선 입열량에 따른 영향을 살펴보기 위해 2~7m/min 까지 1m/min 단위로 속도를 증가시키며 용접 후 비드 외관 및 단면 형태를 관찰하였다. 또한 보호가스에 따른 영향을 확인하기 위하여 레이저용접 시 주로 사용되는 불활성가스인 He 또는 Ar을 이용하여 용접하였다. 각각의 보호가스는 노즐 직경 4mm로 레이저빔을 뒤따라가도록 공급하였고 그 유량은 10~30ℓ/min으로 10ℓ 기준으로 변화시키며 용접하였다. 용접 전 이물질 및 불순물에 의한 불량 가능성을 최소화시키기 위해 시험편 전체를 아세톤으로 세척을 하였으며, 이음부 관리를 통해 No gap 상태를 최대한 유지하였다. 그리고 1.2mm 두께의 강관 맞대기용접 시 허용 gap 수준이 어느 정도인지 파악하기 위해 인위적 gap 실험도 실시

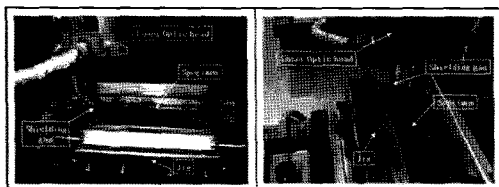


Fig. 1 Experimental setup for butt welding

하였으며 그 수준은 0.1~0.3mm로 0.1 단위로 변화시켜가며 용접하였다. Fig. 2는 맞대기용접(butt welding)의 모식도이다. 이종금속 재료의 레이저용접 용접성을 평가하기 위해 용접이 완료된 시험편을 Fig. 3과 같이 4부분으로 나누어 인장 시험 부분은 KS B 0801의 판재 인장시험규격 13B 호에 따라 와이어커팅 가공하여 인장시험을 실시하였다. 나머지 부분의 시험편은 초경팁 원형톱을 이용하여 절단하여 시험편을 채취하였다.

인장시험기는 MTS(社) 810 series로 수행되었으며, 최대 100KN의 용량을 갖는 hydraulic type의 만능재료시험기이다. 시험절차는 KS B 0802에 명시된 절차를 준수하였으며 시험방식으로는 변위제어방식을 사용하였다. 이때의 시험 속도는 5.0mm/min로 하였다. 레이저용접 후 용입 형상의 마크로 및 마이크로 분석을 위해 용접방향에 수직으로 비드 단면을 절단기로 절단한 후 마운팅(hot mounting) 하였다. 마운팅된 시편의 비드의 절단면을 샌드페이퍼로 #100, #400, #1000 및 #2000번의 순서로 연마 후 최종적으로 Diamond suspension 입도 6μm으로 마무리 연마하였다.

이와 같이 시편 준비가 끝난 후 에칭액으로는 Killer's 왕

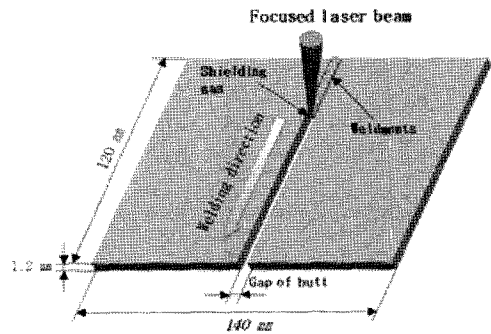


Fig. 2 Schematic illustration of butt welding

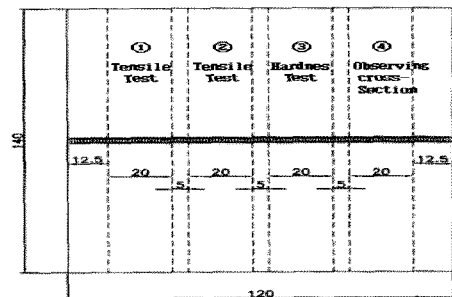


Fig. 3 Sampling of specimen in butt welding

수를 사용하였다. 교반조건으로는 CuCl_2 를 1.5g 칭량해서 에틸알콜 33ml + H_2O 33ml + 염산(36%) 33ml을 서로 교반하여 제조하였으며 에칭은 면봉을 이용하여 에칭 시간은 수 분간 지속하였다. 용입 깊이, 너비 및 gap의 실제 사이즈, 미세 조직은 광학현미경, 금속현미경을 이용하여 분석하였다. 마지막으로 각각의 이중용접 시편 및 각 재료의 BOP 용접시편에 조합에 따른 경도를 확인하였다. 경도계로는 Digital Vicker's Hardness tester를 사용하였으며, 적용하중은 1kgf(HV 1)로 설정하였다. 경도는 상판 기준 하부 0.5mm 아래에서 0.3mm 간격으로 열영향을 받지 않는 모재까지 충분한 범위를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 BOP(Bead on plate)

(1) 냉연강판 SCP1-S의 BOP 용접

Fig. 4는 용접 조건에 따라 레이저 용접하였고 육안 형상으로는 앞면에 스파터가 생겨 거칠었다. 그러나 뒷면에서는 열영향부가 뚜렷하게 검출되지 않았다. Fig. 5는 용접부의 경도값을 그래프화 한 것이다. 경도값을 보면 전체적으로 모

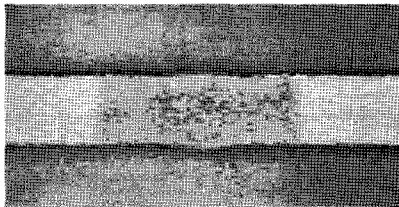


Fig. 4 Cross-section and bead shape of cold-reduce carbon steel sheet SCP1-S

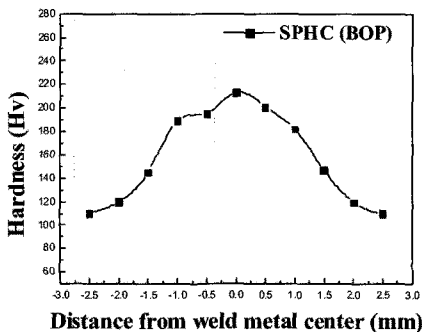


Fig. 5 Hardness distribution of Cold-reduced carbon steel sheet SCP1-S in BOP welding

재보다 높은 경도값을 가지는 것을 알 수 있었다.

탄소강은 레이저 용접을 하면 급속한 냉각속도 때문에 단단한 조직이 나타난다. 경도 분포를 보면 열영향부보다 용융 금속 쪽이 더 높은 경도를 보여 주고 있다. 따라서 조직 사진에서도 급속한 냉각 속도 때문에 단단하고 취성을 띠는 마르텐사이트 조직이 생성된 것을 볼 수가 있다. 일반적으로 경도값이 증가하는 것은 Fig. 6의 미세 사진을 보면 마르텐사이트의 생성과 입자의 미세화, C의 고용 강화 등으로 설명된다.

(2) 오스테나이트계 스테인리스 강판 STS304의 Bead on plate 용접

Fig. 7의 용접 조건에 따라 레이저 용접하였고 육안 형상으로, 외관을 보면 앞면의 비드가 거칠었다. Fig. 8은 용접부의 경도값을 그래프화 한 것이다. 경도값을 보면 전체적으로 모재보다 높은 경도값을 가졌고, 열영향부의 경도는 낮아졌다. 용접 중 용융과정을 거치면서 조직이 연화되었기 때문에 사료된다. STS304의 경우 열영향부와 모재간의 경도차가 적어 용접성이 우수하다는 것을 알 수가 있다. Fig. 9의

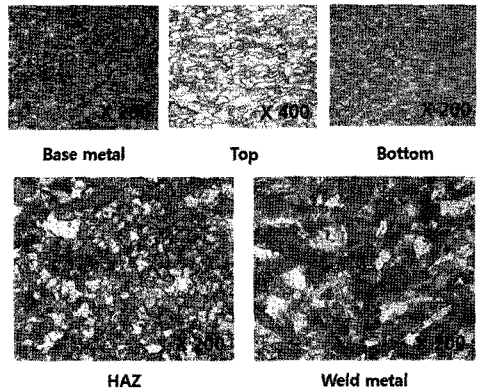


Fig. 6 Photomicrograph showing cold-reduced carbon steel sheet SCP1-S in welding

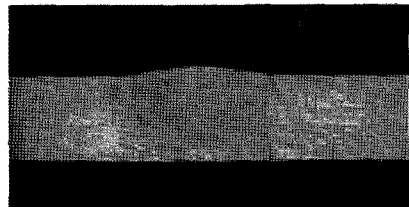


Fig. 7 Cross-section and bead shape of Austenitic stainless steel sheet STS304

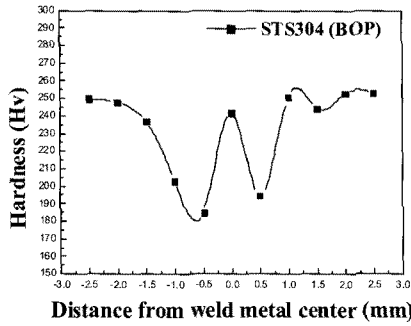


Fig. 8 Hardness distribution of Austenitic stainless steel sheet STS304 in welding

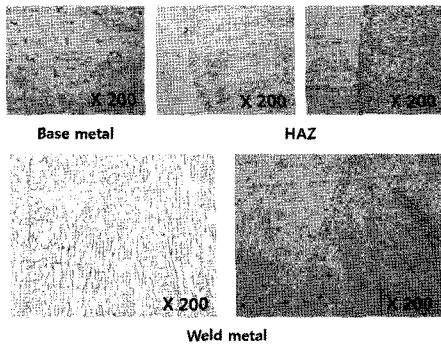


Fig. 9 Photomicrograph showing Austenitic stainless steel sheet STS304 in welding

미세 사진을모재에서 용접부로 갈수록 δ -ferrite 상이 많아지는 경향을 보이며 용접부에서는 γ -austenite 상과 δ -ferrite 상이 공존하는 형태를 나타내었다. Fig. 13의 미세 사진에서도 보면 본드부 경계에서만 조직이 약간 조대했을 뿐 구분할 정도의 열영향 구역이 보이지 않는다.

(3) 페라이트계 스테인리스 강판 STS430의 BOP용접

Fig. 10의 용접 조건에 따라 레이저 용접하였고 육안으로 외관을 보면 본드부의 구분이 확실하였다. Fig. 11은 용접부의 경도값을 그래프화 한 것이다. 경도시험에서 용융금속의 오히려 경도가 높아졌다. 탄소 함량이 많아 마르텐사이트 조직이 발생하고 열영향부는 결정립이 성장하여 경도가 높아졌다. 따라서 STS430의 용접시 문제점으로는 입자의 성장, 금속간 화합물의 석출 등이다. 페라이트계 스테인레스강은 오스테나이트계 스테인레스강에 비하여 용접성은 저하되나 레이저 용접에서는 입열량이 적으므로 다른 용접 방법에 비하여 양호하였다. Fig. 12의 미세 사진에서도 마르텐타이트

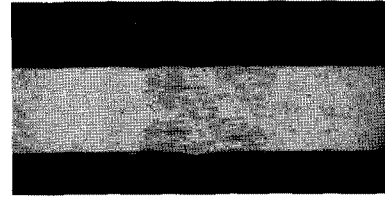


Fig. 10 Cross-section and bead shape of Ferritic stainless steel sheet STS430

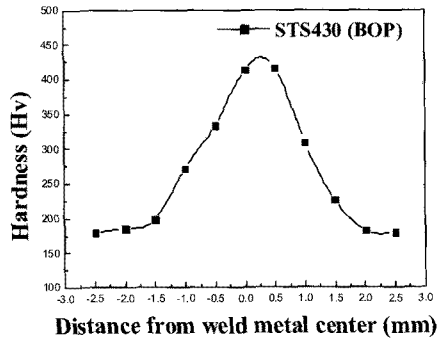


Fig. 11 Hardness distribution of Ferritic stainless steel sheet STS430 in BOP welding

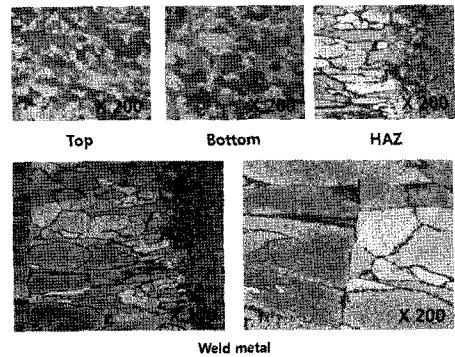


Fig. 12 Photomicrograph showing Ferritic stainless steel sheet STS430 in BOP welding

의 입도가 조대화 되었다.

3.2 냉연강판 SCP1-S와 스테인리스강판의 이중금속 용접

(1) 용접 속도의 변화에 따른 영향

Fig. 13, 14는 용접속도에 따른 영향을 나타낸 사진이다. 용접 속도가 4(m/min)일 때 인장강도가 가장 좋았다.

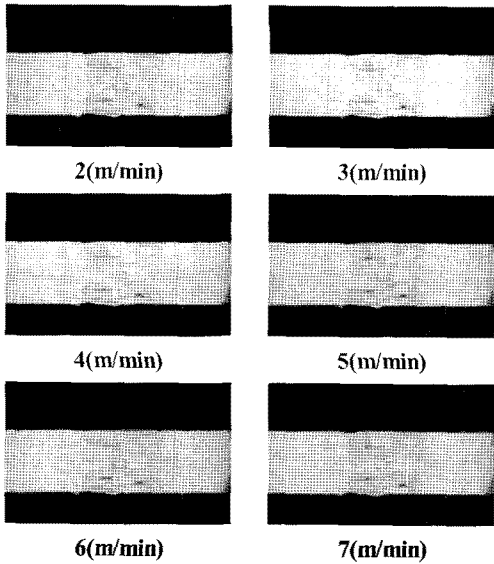


Fig. 13 Cross-section and bead shape of dissimilar STS 304 and SCPI-S

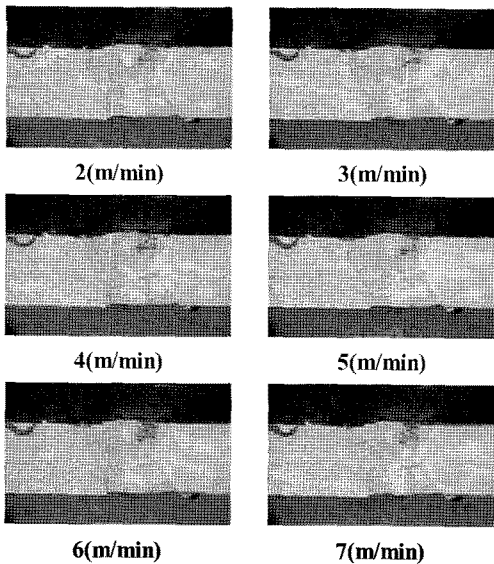


Fig. 14 Cross-section and bead shape of dissimilar STS 430 and SCPI-S

(2) 용접 속도의 변화에 따른 인장강도 비교

Fig. 15는 시편의 인장강도를 비교하여 그래프화 하였다. SCPI-S & STS304와 SCPI-S & STS430의 인장강도는 용접 속도가 4m/min일 때가 높았다. STS304의 이종재료에서

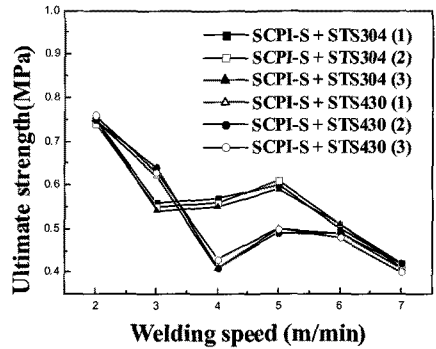


Fig. 15 Experimental results of tensile test

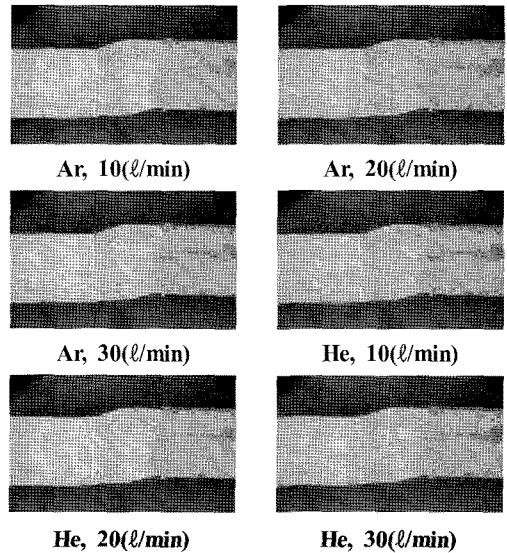


Fig. 16 Cross-section and bead shape of dissimilar material STS 430 and SCPI-S

는 속도가 2, 3m/min일 때 용접부에 기공이 발생했으며, 5m/min 이상일 때는 용융부의 결정립이 조대화 되었다. STS430의 이종재료에서는 5m/min 이상일 때 SCPI-S 쪽의 용융선 근방에서 마르텐사이트의 생성과 C의 고용강화 등으로 결정립이 조대화 되어 있는 것을 볼 수가 있다. 이종 금속의 용접성은 건설한 것으로 평가 할 수 있다.

(3) 보호가스에 따른 영향

Fig. 16은 보호가스 주입에 따른 시편의 형상을 나타낸 사진이다. 경도시험에서 He 주입 시 인장강도가 높아졌으나, Ar 주입 시 인장강도가 낮아졌다.

(4) 보호가스에 따른 인장강도 비교

Fig. 17는 각각의 보호가스에 따른 인장강도를 그래프화 한 것이다. STS304 이종 재료의 경우 Ar 가스를 사용했을 경우보다 He 가스를 사용했을 경우에 조직이 양호했으며 STS430의 이종 재료의 경우 Ar 가스, He 가스 모두 용융온도가 높은 용접 용융부 중심에서 보다 온도가 낮은 모재부분에서부터 응고가 시작되어 중심 방향으로 각 결정이 주상정으로 입자가 성장하여 형성되었다. 용융금속과 SCP1-S의 경계에서 금속간 화합물이 석출된 것을 볼 수가 있었다. Fig. 18은 파단된 시편의 형상을 나타낸 사진이다.

용접부의 경도를 보면 모재보다 경도가 큰 것을 알 수 있다. 일반적으로 경도가 증가하는 것은 STS304의 경우 오스테나이트화된 재질이 급냉 되면서 조밀한 마르텐사이트가

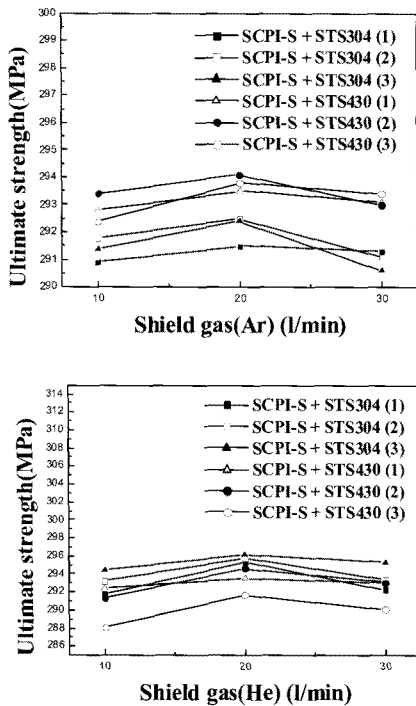


Fig. 17 Experimental results of tensile test

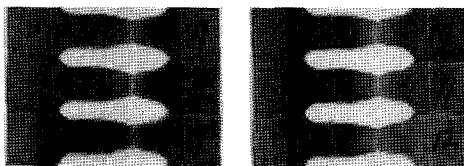


Fig. 18 Photo of fractured region in tensile test

되었기 때문에 사라진다. STS430의 경우 마르텐사이트가 석출하여 경화하면서 페라이트 결정립의 현저한 조대화에 의해의 경도가 모재보다 높다고 사려된다. 인장강도를 비교해보면 모두 SCP1-S 시편 평행부에서 파단이 일어났다. 이 종금속의 용접성이 좋은 것으로 나타났다.

(5) 스테인리스강판의 용접성 비교

Fig. 19은 동일한 조건에서 용접한 각각의 시편에 형상을 나타낸 사진이다. Fig. 20은 각각의 시편에 인장강도를 그래프화 한 것이다. STS430의 경우 시멘타이트의 생성으로 용접부위의 경도가 높게 평가되었다. Fig. 21은 시편의 인장강도 평균 및 파단을 나타낸 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 SCP1-S 시편의 평행부 중간에서 파단 되었다.

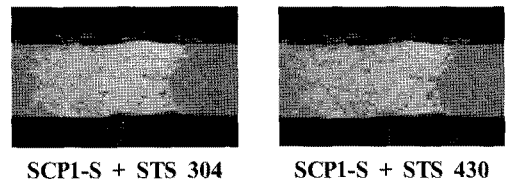


Fig. 19 Cross-section and bead shape of dissimilar material STS304, STS430 and SCP1-S

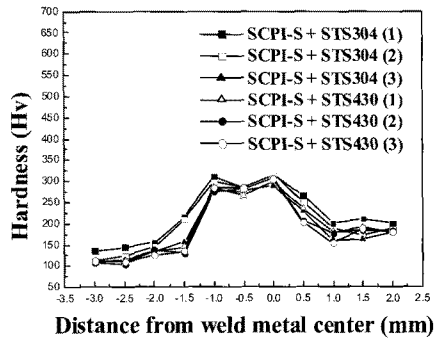


Fig. 20 Hardness distribution of dissimilar material STS304, STS430 and SCP1-S in laser welding

Material	Tensile strength (Mpa)
STS304 + SCP1-S	291.5
STS430 + SCP1-S	293.5



Fig. 21 Experimental results of tensile test

4. 결론

Nd:YAG 레이저빔을 이용하여 냉연강판과 스테인레스강판(STS304, STS430)의 이종재료의 적절한 용접조건을 찾기 위해 레이저의 용접 속도, 보호가스 종류와 유량을 변화시키면서 맞대기 용접을 하였다.

본 실험조건에서 냉연강판과 스테인레스강판의 이종용접은 레이저 출력 3kW, 용접 속도 4m/min, 보호가스가 He을 사용했을 때 최적의 용접 조건인 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Garbuny, M., 1965, *Optical Physics*, Academic Press, USA, pp. 1~10.
- (2) Wilson, J. and Hawkes, J., 1987, *Lasers Principles and Applications*, Prentice-Hall, USA, pp. 1~9.
- (3) Hecht, J., 1992, *The Laser Guidebook, 2nd ed.*, McGraw-Hill, USA, pp. 1~12.
- (4) Ready, J. F., 1997, *Industrial Applications of Lasers, 2nd ed*, Elsevier Science, USA, pp. 11.
- (5) Juvinall, R. C., 1983, *Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength*, McGraw-Hill, New York.
- (6) Son, S. W., Kim, I. S., Jung, J. W., Kim, J. S., and Na, H. H., "Control the welding quality for stainless steel weldment," *Korea Society of Machine Tool Engineers Spring Conference 2009*, pp. 285~289.
- (7) Park, C. E., Li, C. S., and Kim, I. S., 2003, "Mathematical Models for Optimal Bead Geometry for GMA Welding Process," *International Journal of Korea Welding Society*, Vol. 3, No. 1, pp. 8~16
- (8) Jang, K. B., Kim J. H., and Cho, S. M., 2002, "Finite Element Analysis and Measurement on the Release of Residual Stress and Non-linear Behavior in Weldment by Mechanical Loading(I) -Finite Element Analysis," *International Journal of Korea Welding Society*, Vol. 2 No. 1, pp. 29~32.