

싱글모드 파이버 레이저를 이용한 Cu 와 Ni의 고속도 이종재료 용접부의 기계적 특성

이 수 진* · 김 종 도**†

*오사카대학교 접합연구소

**한국해양대학교 기관공학부

Mechanical Properties of Cu and Ni Dissimilar Welds by High Welding Speed Using Single-Mode Fiber Laser

Su-Jin Lee* and Jong-Do Kim**†

*Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan

**Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University,
Busan 606-791, Korea

†Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received June 4, 2014 ; Revised June 12, 2014 ; Accepted June 17, 2014)

Abstract

As the industrial technology has been developed, a dissimilar welding has been received huge attention in various engineering fields. To understand the mechanical properties and possibility of applications of dissimilar metals joining, the laser welding of Cu and Ni dissimilar metals was studied in this paper. Cu and Ni have differences in materials properties, and Cu and Ni make no intermetallic compounds according to typical binary phase of Cu and Ni system. In this study, lap welds of Cu and Ni dissimilar metals using single-mode fiber laser with high welding speed were tried, and mechanical properties of the welds zone were evaluated using a Vickers hardness test and a tensile shear test. To recognize the relation between hardness and tensile shear load, weld fusion zone of interface weld area were observed. And it was confirmed that the ultra-high welding speed could make good weld beads and higher hardness parts had higher tensile shear load under the all conditions.

Key Words : Cu, Ni, Dissimilar welding, Single-mode fiber laser, Hardness, Tensile shear test

1. 서 론

최근, 산업이 급속도로 발전함과 더불어 여러가지의 다양한 재료가 개발되고 있다. 이러한 다양한 재료를 보다 실용적으로 적용하기 위해서는 새로운 용접법이 개발될 필요가 있을 것으로 사료된다. 특히, 자동차나 항공기, 전기전자 분야에서는 에너지 절약과 환경보호의 관점에서 제품의 경량화와 함께 고기능화가 요구되고 있다. 그와 더불어 각종금속이나 합금의 용접기술과 가공법의 개발이 주목받고 있다.

용접법중에 레이저를 이용한 용접은 가공재료와의 비 접촉가공으로써 개발되어온 용접법중 향후 로봇화, 자동화, 시스템화 및 라인화 등에 용이하며, 각종 제품이나 구조물의 고품질, 고정밀, 고효율, 저변형 및 고속도 접합법이 가능한 전도 유망한 용접법으로 알려져 있다¹⁻³⁾.

특히, 본 연구에 사용된 싱글모드 파이버 레이저는 종래의 레이저장비와 비교하여 수배 이상의 높은 에너지밀도를 가지고 있으므로, 현재까지 가장 많이 연구되고 있던 기존의 레이저 장비(CO₂ laser, Nd: YAG laser, Disk laser, Fiber laser 등)에서는 불가능한 초고속 레이저 용접 가공이 가능하다^{4,5)}. 따라서 본 연

구에서는 새로운 용접기술 개발의 기초 연구로써 싱글 모드 파이버 레이저를 이용하여 지금까지 실현되기 힘들었던 초고속으로 용접을 실시하여 그 용접 특성을 연구하였다. 특히, 연성이 좋고 열과 전기의 전도율이 높아 전기전자 업계에서 많이 사용되는 Cu와 상온에서 안정되어 다양한 재료와 합금등에 많이 사용되는 Ni의 이종재료 겹치기 용접을 실행하였다. 이 두 재료는 합금으로써 선박, 발전소, 전자분야 및 화학분야에서 많이 사용되고 있다⁶⁾. 또한 Cu와 Cu-Ni합금의 클래딩 재료 등의 용접법이 요구되고 있다⁶⁾. 더불어 두 재료의 용접 특성에 대한 충분한 연구가 이루어지면 앞으로 더 많은 분야에서 Cu, Ni 및 Cu-Ni 합금의 적용이 가능할 것으로 기대가 된다. 따라서 선진기술을 대비하기 위한 기초연구의 일환으로써 두 재료의 겹치기 용접을 실시하고 용접시 용융금속의 거동과 용접부의 기계적 특성을 연구하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 금속재료는 연성이 좋고 열과 전기의 전도율이 금속 가운데에서는 은(Ag) 다음으로 높아 전기 전자 관련 재료로 많이 이용되는 동(Cu)과 상온에서 안정된 금속이며, 여러가지 기능성 합금에 많이 사용되는 니켈(Ni)을 사용하였으며, 그 화학적 성분은 Table 1에 기본적인 물성을 Table 2에 각각 나타내었다. 두 재료 모두 Cu와 Ni가 각각 약 99 % 이상 함유되어있는 순금속에 가까운 재료를 사용하였다. 두 재료의 용융점과 끓는점은 Ni이 Cu 보다 약 300 °C 이상 높다. 특히 열전도도는 Cu가 Ni의 약 4배 이상 높은 것을 확인 할 수 있다.

또한 Cu와 Ni은 두 재료의 평형상태도인 Fig. 1⁷⁾에서 나타내듯이 금속간 화합물이 존재하지 않는 조합으로서 취성이 강한 금속간 화합물이 존재하는 재료의

Table 1 Chemical compositions of materials used

Metal	Cu	Ni
Cu	99.99 wt.%	0.02 wt.%
Ni	-	99.717 wt.%
Fe	-	0.02 wt.%
Si	-	0.04 wt.%
Mn	-	0.2 wt.%
Others	-	C:0.001,S:0.001 Mg:0.001

Table 2 Physical properties of materials used

	Cu	Ni
Melting point (°C)	1358	1728
Boiling point (°C)	2835	3186
Density (g/cm ³)	8.96	8.908
Thermal conductivity (W/m·K)	401	90.9
Thermal expansion (μm/m·K) (25 °C)	16.5	13.4
Vapor pressure(°C) (1kPa)	2362	2683
Vickers hardness(Mpa)	369	638
Poisson ratio	0.34	0.31

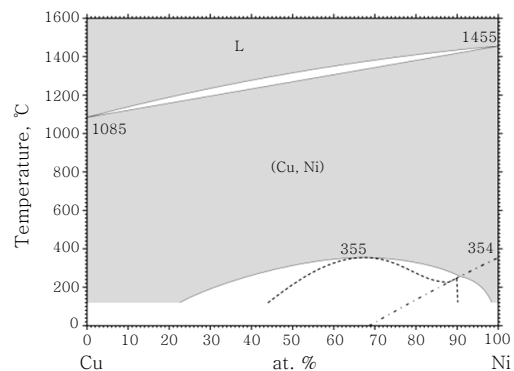


Fig. 1 Typical binary phase diagram of Cu and Ni system

조합보다 보다 확실한 두 재료간의 용접부 특성 및 용접금속의 거동을 관찰하는 것이 가능 할 것으로 사료된다. 그러므로 물성이 다른 두 재료를 레이저를 이용하여 고속도 겹치기 용접을 행할 경우의 용접특성을 확인하는 것을 본 연구의 목적으로 한다. 각 재료는 길이 70 mm, 넓이 30 mm, 두께 0.3 mm의 박판으로 가공하여 사용하였다.

2.2 실험장비 및 실험방법

문헌에 따르면 1060 nm의 파장대에서 Cu는 약 0.04 %의 광 흡수율을 Ni은 약 0.15-0.35 %의 광 흡수율을 가진다⁸⁾. 따라서 Cu은 레이저광을 쉽게 반사하므로 재료 표면에 레이저를 조사하여 용접하는 것이 무척 어렵다. 더불어, 열전도도가 매우 높아 충분한 열원을 용접부에 공급하는 것이 무척 어렵다고 알려져 있다. 과거에 많은 연구자들이 Cu재료를 이용한 레이저 용접에 관하여 연구를 진행해 왔으나 위와 같은 단점으로 인하여 레이저를 이용하여 재료를 관통시켜 용접하는 것이 매우 어려웠다. 따라서 재료의 일부를 용접하거나, 열원을 다른 재료에 조사하여 용접이 가능한 맞대기 용접에 관한 연구는 다수 진행해 왔으나⁹⁻¹¹⁾ 겹치

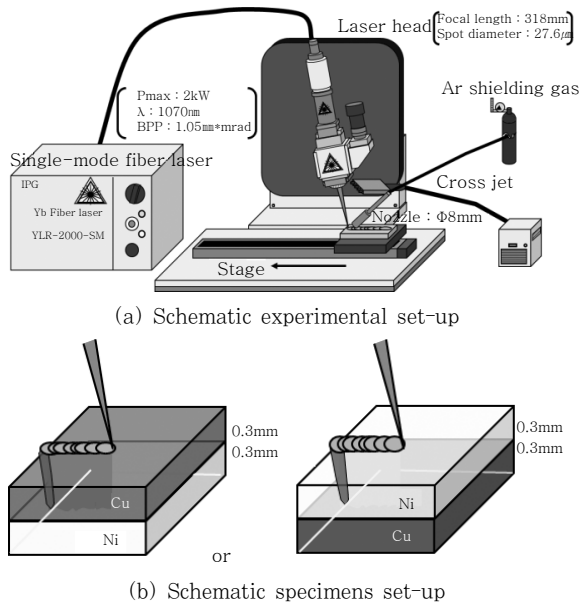


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up for 2 kW single-mode fiber laser welding of Cu and Ni dissimilar metals

기 용접은 매우 곤란하였으므로 관련된 자료가 매우 부족한 현실이다. 하지만 본 실험에서는 에너지 밀도가 다른 레이저들에 비해 약 6배 이상 높은 싱글모드 파이버 레이저를 이용하여 겹치기 용접에 관한 연구가 가능하게 되었다.

Fig. 2는 실험장비 및 실험방법을 모식도로 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 레이저는 최대출력 2 kW의 싱글모드 파이버 레이저로 약 14 µm 직경의 파이버를 이용하여 레이저 광을 레이저 헤드로 전송하고 광학렌즈를 통하여 레이저 빔의 직경을 약 28 µm로 집광시켜 시편 표면에 초점위치 ($f_d=0\text{mm}$) 조건으로 조사되었다. 시료에 집광된 빔의 품질을 나타내는 BPP는 약 1.05 mm·mrad 이다. 레이저 헤드는 약 10도의 입사각을 주어 고정한 후 실험을 실시하였다. 시편두께 0.3 mm의 시편은 Fig. 2(b)에서 나타내듯이 레이저 조사 부의 레이저 흡수율 및 재료 위치에 따른 용접 특성을 관찰하기 위하여 Cu와 Ni의 위치를 바꾸어가며 겹치기 이종재료 용접을 실시하였다. 용접속도는 5 ~ 50 m/min로 변화 시키면서 용접을 실시하고 용접공정 후 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해서 비커스 경도기를 사용하여 용접부 단면의 경도를 측정하였다. 또한 같은 조건에서 5세트의 인장전단실험을 실시하고 가장 높은 수치와 낮은 수치를 제외한 3세트의 평균 인장전단하중을 이용하여 용접부의 기계적 특성을 관찰하였다.





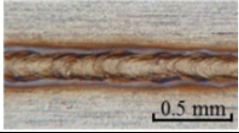
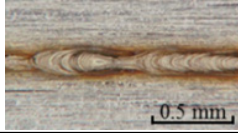
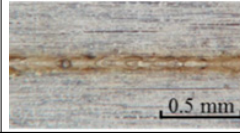
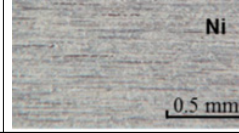
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접속도에 따른 Cu와 Ni의 이종용접 비드면 및 용접부 단면의 관찰


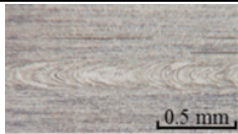
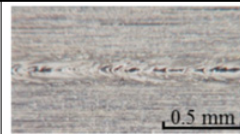
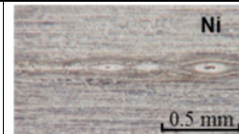
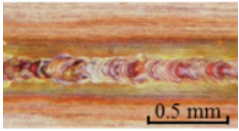
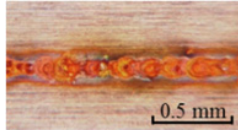
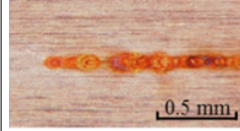
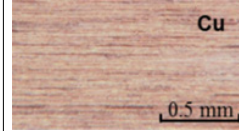
에너지 밀도가 아주 높은 싱글모드 파이버 레이저를 이용하여 고속도 Cu-Nii종재료의 겹치기 용접을 실시하였다. 본연구에서 이용한 이종재료겹치기용접의 조건은 다음과 같다. 레이저 출력 1 kW, 레이저 초점거리 0 mm, 아르곤 실드가스 유량 30 l/min으로 고정하고 용접속도와 시료의 겹치기 위치를 변화시키며 용접을 실시하였다. 용접된 시료의 표면과 이면의 비드를 관찰한 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3 (a) Cu(upper) - Ni(lower)의 비드사진을 보면 10 ~ 50 m/min 용접속도의 모든 조건에서 상하부 비드측에 균열이 발생하지 않은 양호한 용접비드를 확인할 수 있다. 용접속도가 50 m/min의 경우를 제외하고 모든 조건에서 관통 용접이 이루어 졌다. 용접비드의 폭은 용접속도가 증가함에 따라 좁아지는 것이 확인되었다. Fig. 3 (b) Ni(upper) - Cu(lower)의 용접 비드면을 관찰한 결과 Cu(upper) - Ni(lower) 조건의 경우와 마찬가지로 용접속도가 증가함에 따라 용접 비드 폭이 좁아지며 용접속도 30 m/min의 조건에서 부분적으로 부분관통이 되어 Cu시료가 아래에 있는 쪽이 위에 있는 경우 보다 관통용접이 어려웠다.

Fig. 4는 Cu-Nii종재료 용접부의 단면사진 및 Cu와 Ni원소로 EDX mapping 분석한 결과를 각각 나타낸다. 단면사진에서 알 수 있듯이 용접속도나 Cu-Ni의 위치에 관계없이 모든 조건에서 용접금속 내부에 균열이나 기공이 형성되지 않은 양호한 용접부가 확인된다. 각원소로 분석된 EDX mapping 사진에 나타나듯이 5 m/min의 용접속도의 경우 재료의 위치와 관계없이 Cu원소는 Ni측으로 Ni원소는 Cu측으로 유입된 것이 확인이 되며, 그 정도는 Cu원소가 Ni측에 더 많은 양이 혼합된 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 용접속도가 빨라짐에 따라 줄어들었다. 특히 재료의 위치는 용융금속의 혼합에 큰 영향을 미치지 않았으나 전반적으로 Ni-Cu의 접촉면 근처의 용접부에 Cu의 농도가 Cu-Ni 조건의 접촉면측 용접부 보다 조금 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 이후의 기계적 특성에도 영향을 미칠 것으로 사료된다. Cu-Ni의 재료위치 조건중 용접속도 50 m/min의 경우 관통되지 않은 부분 용접이 일어났으므로 용융부의 혼합이 다량 일어났으며, Ni-Cu의 경우 아래쪽에 있는 Cu에 의해 열원이 부족하여 용융부가 Cu-Ni보다 적었기 때문에 Ni 원소의 매우 적은량 Cu 재료쪽으로 혼합된 것을 알 수 있다.

Cu(0.3mm ^t), Ni(0.3mm ^t), P : 1kW, f _a : 0mm, Ar : 35 ℓ/mm				
Welding speed	10 m/min	20 m/min	30 m/min	50 m/min
Top surface appearance of Weld bead (Cu-Ni)				
Bottom surface appearance of Weld bead (Cu-Ni)				

(a) Cu(upper)-Ni(lower)

Cu(0.3mm ^t), Ni(0.3mm ^t), P : 1kW, f _a : 0mm, Ar : 35 ℓ/mm				
Welding speed	10 m/min	20 m/min	30 m/min	50 m/min
Top surface appearance of Weld bead in Ti(Ni-Cu)				
Bottom surface appearance of Weld bead in Al(Ni-Cu)				

(b) Ni(upper)-Cu(lower)

Fig. 3 Photos of top and bottom surfaces of Cu and Ni dissimilar welds made at different welding speeds using single-mode fiber laser

이상의 결과로부터 Cu와 Ni의 이종재 겹치기용접은 어떠한 용접 조건에서도 용접이 가능하였으며, 두 재료의 혼합정도가 용접 속도에 따라 변화하는 것이 확인되었다.

3.2 고속도 겹치기 이종재료 용접부의 경도특성

금속간 화합물이 존재하지 않는 조합의 이종재료 고속도 겹치기 용접의 용접부 특성을 확인하기 위하여 용접부의 단면을 연마한 후 비커스 경도기를 이용하여 용접부 및 모재의 경도를 측정하였다. Fig. 5는 경도측정 후 관찰한 SEM 사진 및 경도측정 결과의 그래프를 각각 나타내고 있다. Fig. 5 (a)에서 확인할 수 있듯이 경도는 Cu-Ni 및 Ni-Cu조합을 용접속도 5 m/min, 30 m/min 및 50 m/min의 조건에서 고속도 겹치기 용접후 용접된 시편의 횡방향으로 Cu부와 Ni부를 각각 경도측정하였다.

용접부 중심을 기준으로 0.1 mm의 간격을 주어 모재부가 3포인트 측정이 가능하도록 하였다. (b), (c) 및 (d)는 각각 용접속도 5 m/min, 30 m/min 및 50 m/min조건인 용접부를 측정된 결과이다. 세로축은 비커스 경도를 가로축은 측정위치를 용접부 중심을 기준으로 지시한다. 그래프에 표시된 삼각형은 Cu-Ni 재료

위치 조건의 경도측정 결과를 사각형은 Ni-Cu의 재료 위치 조건의 측정결과를 각각 지시하며, 도형내부가 채워져 있는 것은 상부재료의 경도값을 도형내부가 비워져 있는 것은 하부재료의 경도값을 각각 나타낸다. Ni 모재의 경도는 약 175 Hv, Cu모재의 경도는 약 75 Hv로 확인 되었다. 용접부의 경도는 Ni측은 저하되고 Cu측은 높아지는 것이 확인되며 용접부의 경도는 Cu와 Ni의 경도값의 중간치인 약 125 Hv에 접근 하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 용접속도가 50 m/min으로 아주 빠른 경우 Ni측 용접부 경도는 저하 하지만 Cu측 용접부의 경도는 거의 변화하지 않았다. 경도값의 변화 폭은 용접 속도가 느릴 수록 넓은 것이 확인 되며 이는 용접속도가 감소함에 따라 용접비드폭이 넓어 지는 현상과 연관성이 있는 것이 확인 되었다.

Fig. 6은 속도변화에 따른 용접부 중심부의 경도변화 그래프와 측정부의 모식도를 나타내고 있다. 그래프의 세로축은 비커스 경도값을 가로축은 용접속도를 지시한다. 거의 모든 조건에서 약 125에서 130 Hv의 경도를 가지고 있으며 용접속도 50 m/min의 조건에서 용접부 중심에 Cu의 함유량이 Ni보다 많아 경도가 약 120 Hv로 저하된 것을 알 수 있다. 또한, Cu-Ni의 조합이 Ni-Cu의 조합보다 경도가 높은 것이 확인 되었다. 이는 Cu와 Ni의 이종재 용접의 경우 금속간 화합물이 생

Cu(0.3mm ^t), Ni(0.3mm ^t), P : 1kW, f _a : 0mm, Ar : 35ℓ/mm			
Welding speed	5 m/min	30 m/min	50 m/min
Cross section (Cu-Ni)			
EDX mapping (Cu)			
EDX mapping (Ni)			
Cross section (Ni-Cu)			
EDX mapping (Ni)			
EDX mapping (Cu)			

Fig. 4 Cross-sectional and EDX mapping images of weld beads made in Cu and Ni dissimilar lap sheets using single-mode fiber laser at different welding speeds

성되지 않으므로 새로운 상에 의한 급격한 경도의 변화는 없이 Cu와 Ni의 함유량에 따라 경도가 변화했기 때문으로 생각할 수 있다. 특히, 50 m/min의 조건에서 확인되는 것 처럼 재료의 위치조건에 큰 영향을 받지 않고 유사한 경도 특성을 가지는 것이 확인 되었다. 재료 위치에 따른 경도 특성을 보다 자세하게 관찰하기 위하여 용접부를 상면비드에서 이면비드까지 수직방향으로 경도를 측정하여 재료위치 및 용접 속도에 따른 경도 변화를 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. 세로축은 비커스 경도값을 가로축은 측정된 위치를 상부 비드를 기준으로 나타내고 있다. 또한 그래프는 용접속도 5, 10, 20, 30, 40 및 50 m/min를 각각 빨간색, 주황색, 노란색, 녹색, 파란색 및 검은색으로 지시한다. 모든 조건에서 Cu 재료측이 낮은 경도를 Ni 재료측이 상대적으로 높은 비커스경도값을 가지는 것을 알 수 있다. 속도 변화에 따라 소량의 변화가 있지만, 용접속도 5 m/min의 조건에서 Cu측의 경도가 상승된 것을 알

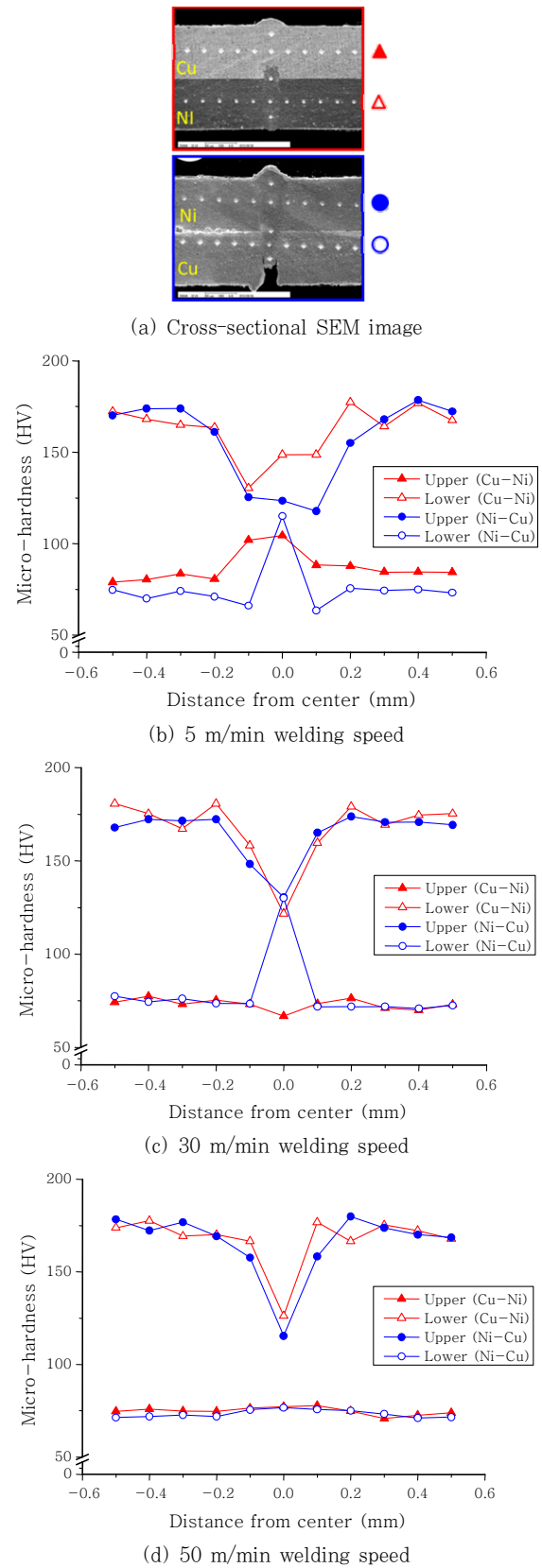


Fig. 5 Results of longitudinal hardness distribution of Cu-Ni and Ni-Cu dissimilar lap welds produced with single-mode laser

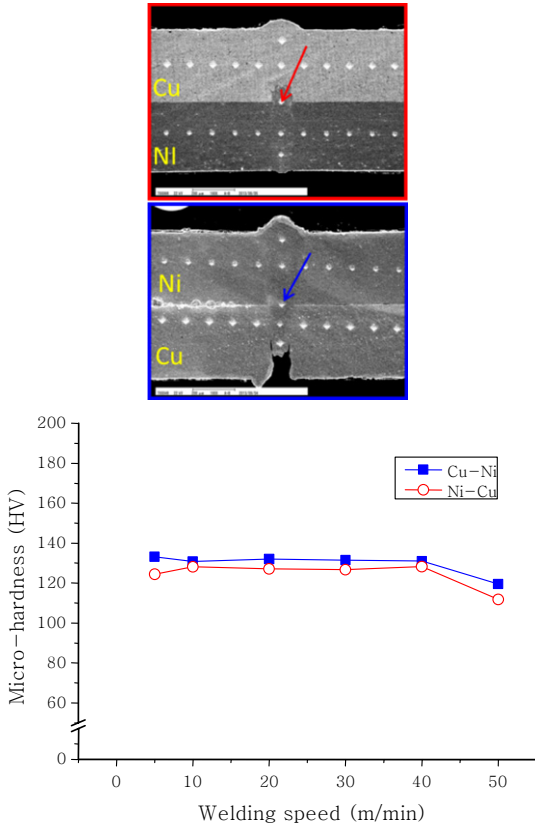


Fig. 6 Hardness of center of Ni-Cu and Cu-Ni dissimilar welds zone by various welding speed

수 있다. 이는 비교적 낮은 속도에서는 용융부의 재료 혼합이 다량 일어났기 때문으로 예측이 가능하다.

싱글모드 파이버 레이저를 이용한 금속간 화합물이 생성하지 않는 조건인 Cu와 Ni의 이종재료 겹치기 용접을 실시하고 용접부의 경도값을 분석한 결과 두 재료의 혼합상태에 따라 경도특성이 변화하고 있으며 비교적 낮은 용접속도에서는 Cu모재측에 다량의 Ni이 함유되어 경도가 상승하는 효과를 확인 할 수 있다. 더불어 용접부 중심의 경도는 모든 용접조건에서 두 재료의 평균치에 유사한 경도 특성을 가지나 초고속의 용접속도인 50 m/min의 조건에서는 가장 낮은 경도특성이 확인이 되었다. 이는 재료위치에 상관없이 중심부의 Cu 함유량이 많은 것을 확인할 수 있다. 다음 절에서는 용접부의 인장전단시험을 실시하고 용접부의 경도특성과 전단강도의 특성을 비교 및 분석을 하였다.

3.3 고속도 겹치기 이종재료 용접부의 품질 평가

3.2절에서 실시된 경도시험편과 같은 조건의 시료를 5세트 작성후 인장전단 시험을 행하였으며 시험 방법을 Fig. 8 에 나타내었다. 시료를 그림과 같이 용접한 후

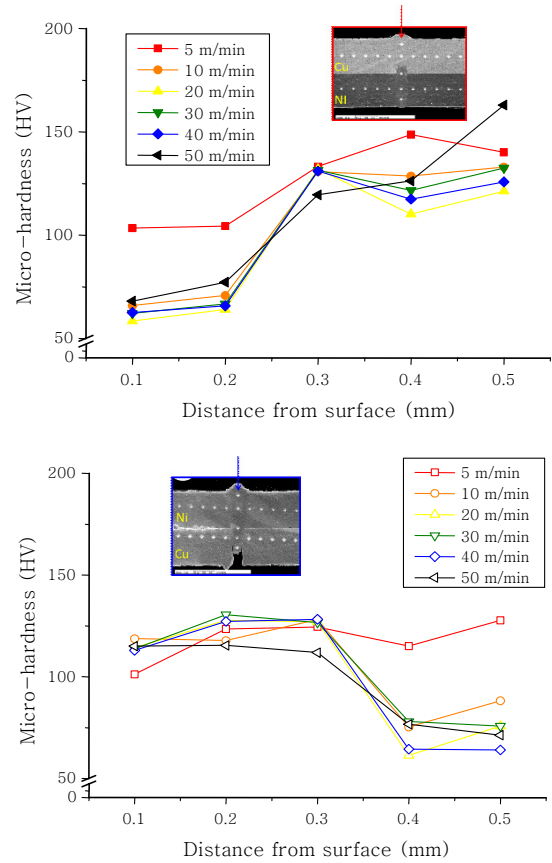


Fig. 7 Results of depth-directional distribution of Cu-Ni and Ni-Cu dissimilar lap welds produced with single-mode laser

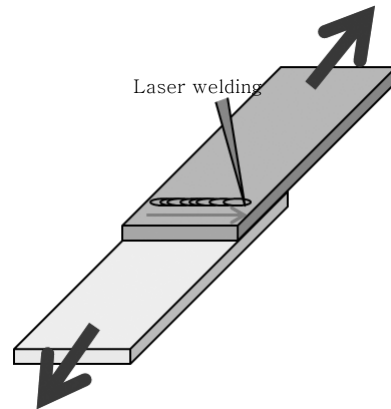


Fig. 8 Schematic diagram of tensile shear test

양 시편의 모재측 끝에서 인장시험장치로 잡아당겨 인장전단 결과를 얻었다. 파단이 일어나는 하중을 측정하여 Fig. 9 에 나타냈으며 그래프의 세로축은 인장전단 하중을 가로축은 용접속도를 지시한다. 사각형은 Cu의 동종간 용접을 원형은 Ni의 동종간 용접 이종재 용접과 같은 조건으로 실시한후 동일하게 인장전단시험을 행한 결과를 나타내며 삼각형과 역삼각형은 각각 Cu-Ni과

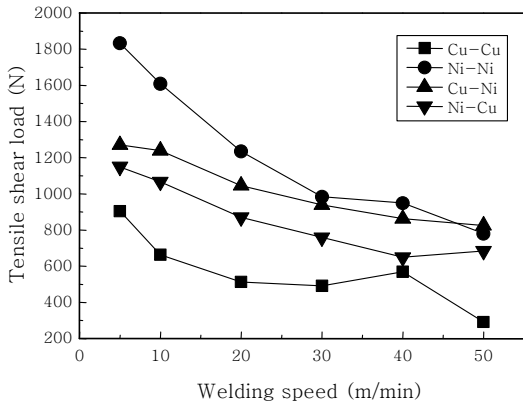


Fig. 9 Results of tensile shear test for Cu and Ni dissimilar welding

Ni-Cu 겹치기 조건에서 실시한 인장전단시험의 결과를 지시한다. Ni의 동종간 용접 결과가 가장 높은 인장전단하중을 가지며 속도가 증가함에 따라 전단하중이 저하되는 것이 확인 된다. 이는 용접속도가 증가함에 따라 용접면이 감소했기 때문이다. 이러한 경향은 모든 조건에서 확인이 된다. Cu의 동종용접 인장전단시험 결과 가장 낮은 하중을 가지고 있으며 특히 용접속도가 40 m/min의 경우 미세하게 전단하중이 증가했다가 50 m/min인 조건에서는 급격히 하중이 저하되는 것이 확인된다. 이는 레이저광의 반사율이 매우 높은 Cu의 레이저 용접결과 용접속도 40 m/min의 조건에서는 부분관통이 이루어지며 부분관통시 내부 용융금속의 흐름이 관통보다 여러 방향으로 복잡하게 움직이면서 용접부 면적이 일부 증가했기 때문에 나타난 현상이며 50 m/min 까지 용접속도를 상승시킨 경우 열원이 충분치 못해 용접부가 부족했기 때문에 나타난 인장전단하중 특성이

다. 이종재 인장전단 시험 결과 Cu와 Ni의 사이의 값이 얻어졌으며, 동종재료용접과 마찬가지로 속도가 증가함에 따라 용접부의 축소로 인한 하중저하가 확인되었다. Cu-Ni의 전단하중이 Ni-Cu보다 높은 것이 관찰된다. 따라서 앞절에서 관찰하였던 경도변화와 유사한 특성을 보인다. 결과적으로 경도특성과 인장전단하중과 비례하는 것을 알 수 있다. 특히, 30 m/min 이상의 용접속도에서 Cu-Ni의 재료위치조건의 인장전단시험의 하중값은 비교적 높은 하중을 가지는 Ni의 동종 용접결과와 유사해지는 것을 알 수 있다. 이는 비교적 용접속도가 빠르고 Cu가 위에 있는 경우 좋은 용접부의 기계적 특성을 가진다고 생각 할 수 있다.

Fig. 10의 인장전단시험 후 파단된 시편의 단면사진을 관찰한 결과이다. 파단부는 모든 조건에서 두 시료의 경계면측 용접부에서 파단되었으며, 파단부의 면적은 그림의 노란 막대에 표시된 것 처럼 속도가 증가함에 따라 감소하였다. 용접금속의 강도가 대부분 Cu와 Ni의 중간값인 약 125 Hv를 가지므로 Cu 모재의 강도보다 높으나, 두 시료 경계면의 용접부의 면적이 시료의 두께 보다 적으므로 인장전단파단이 용접부를 중심으로 이루어졌다. 또한 그림중 선으로 표시된 파단부의 면적은 전반적으로 Cu-Ni가 Ni-Cu보다 미세하게 넓은 것이 확인되었다. 따라서 파단된 용접부의 경도특성과 파단부 면적의 차이에 의하여 재료의 상하부 용접위치에 따라 용접특성이 변화된 것이 확인되었다.

4. 결 론

본 연구는 고출력 고품질의 싱글모드 파이버 레이저를 이용하여 레이저빔의 흡수율이 매우 낮아 용접하기

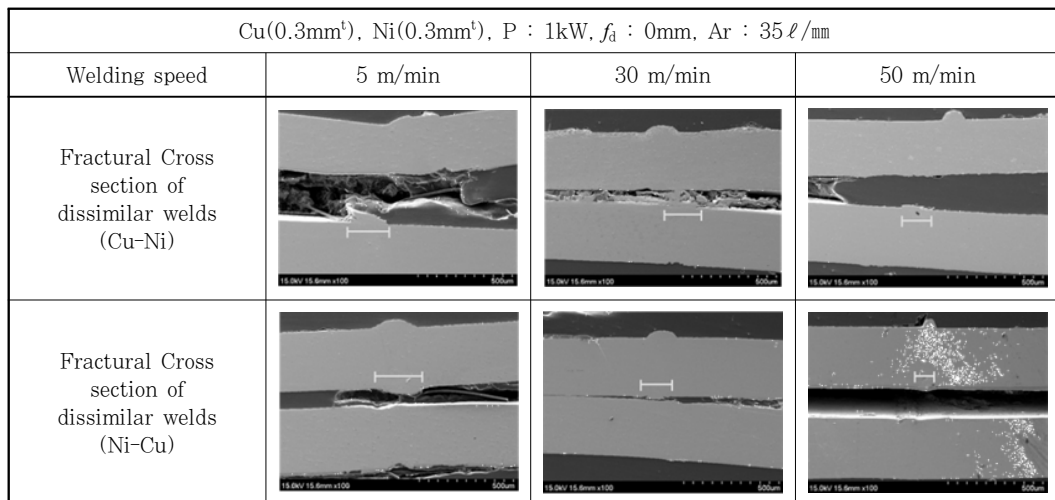


Fig. 10 SEM photos of cross sections of Cu and Ni dissimilar lap welds made with single-mode fiber laser at 5, 30 and 50 m/min after tensile shear test

어려운 Cu의 이종재료 접합의 일환으로써 금속간 화합물이 생성되지 않는 조합인 Ni을 이용한 이종재료 용접을 실시하였다. 특히 매우 작은 빔 직경을 가지고 있는 싱글모드 레이저의 특성을 살려 지금까지 실현이 어려웠던 초고속 겹치기 용접을 실시하고 재료의 위치와 용접속도에 따른 용접부의 기계적 특성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 모든 조건에서 용접부에 균열과 기공이 형성하지 않은 양호한 용접부가 얻어졌다. 50 m/min의 매우 빠른 용접 속도의 경우에는 열원의 부족으로 부분용접이 이루어졌으며, 그 외의 조건에서는 관통용접이 가능했다. 특히 반사율이 높은 Cu의 시료를 관통하여 용접할 수 있다는 것이 확인되었다.

2) EDX mapping 결과 5 m/min의 용접속도의 경우 재료의 위치와 관계없이 Cu원소는 Ni측으로 Ni원소는 Cu측으로 유입된 것이 확인이 되며, 그 정도는 Cu원소가 Ni측에 더 많은 양이 혼합되었다. 이러한 경향은 용접속도가 빨라짐에 따라 줄어들었으며 전반적으로 Ni-Cu의 경계면 용접부에 Cu의 농도가 Cu-Ni 용접의 경우보다 조금 더 높은 것이 확인되었다. 이는 기계적 특성에도 영향을 미친다.

3) Cu와 Ni의 겹치기 이종재료 용접시 생성된 용접부의 비커스경도를 측정된 결과 경도가 높은 Ni의 비커스 경도값 약 175 Hv보다는 낮고 경도가 낮은 Cu의 75 Hv보다 높은 경도 특성을 가지는 것이 확인되었다. 특히 용접부의 중심부로 갈수록 두 재료의 평균 경도인 약 125 Hv에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

4) 인장전단시험을 실시한 결과 용접속도가 빨라짐에 따라 인장전단하중이 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 이종재료의 전단하중은 높은 전단하중을 가지는 Ni의 동종재료 용접결과와 Cu의 동종재료 용접결과 사이에 위치하는 것이 알 수 있다. 특히, Cu(upper)-Ni(lower)의 전단하중값이 Ni(upper)-Cu(lower)의 전단하중값보다 높은 것을 알 수 있다.

5) 위의 경도 특성과 인장전단하중을 비교한 결과 경도 특성과 하중의 변화는 유사한 현상을 가지는 것이 관찰되었다. 더불어 용접부의 면적이 재료 위치의 변화에 따라 Cu가 상부에 있을 경우가 더 넓은 용접부를 가지는 것이 확인이 되었으며 이러한 현상이 인장전단 특성에 영향을 미친 것이 확인되었다.

6) 또한 인장전단시험시 파단된 파단부의 면적이 Cu-Ni가 Ni-Cu보다 전반적으로 미세하게 넓은 것이

확인되었다. 따라서 파단된 용접부의 경도특성과 파단부 면적의 차이에 의하여 재료의 상하부 용접위치에 따라 용접특성이 변화된 것이 확인되었다.

결과적으로, 본 연구에서는 Cu와 Ni의 겹치기 용접의 가능성을 확인하였으며, 용접부의 재료의 함유량에 따른 경도특성과 인장전단하중의 관련성을 확인하였다.

Reference

1. S. Katayama : Laser Welding, Journal of the Japan welding society, **78-2** (2009), 124-138 (in Japanese)
2. S. Katayama: New development in laser welding, New developments in advanced welding, ed. By Ahmed N, Cambridge England, Woodhead Publishing Limited, (2005), 158-197
3. M. Naeem, R. Jessett and K. Withers : Fiber laser welding of dissimilar materials, Industrial Laser Solutions, <http://www.industrial-lasers.com/articles/2012/03/fiber-laser-welding-of-dissimilar-materials.html>, (2012)
4. Geoff Shannon: Processing Advantages of Single-Mode Fiber Lasers, <http://weldingdesign.com/processes/processing-advantages-single-mode-fiber-lasers>, (2013)
5. Su-Jin Lee, Seiji Katayama and Jong-Do Kim: Weldability of SUS304 and Ti Dissimilar Welds with Various Welding Speed using Single Mode Fiber Laser, Journal of KWJS, **31-5** (2013), 54-61 (in Korean)
6. Richard E. Avery : Joining Copper-Nickel Alloys, http://www.copper.org/applications/marine/cuni/txt_joining_CN_alloys.html#welding
7. D. J. Chakrabarti, D. E. Laughlin, S. W. Chen, Y. A. Chang: "Binary Alloy Phase Diagrams", ed. by Thaddeus B. Massalski, ASE International, Materials Park, Ohio, **2** (1990), 1442-1446
8. John F. Ready : LIA Handbook of Laser Materials Processing, Laser Institute of America Magnolia Publishing Inc., (2001), 181-183
9. S. D. Meshram, T. Mohandas and G. Madhusudhan Reddy: Friction welding of dissimilar pure metals, Journal of Materials Processing Technology, **184** (2007), 330-337
10. Z. Sun and R. Karppi : The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview, Journal of Materials Processing Technology, **59** (1996), 257-267
11. G. Phanikumar, P. Dutta and Chattopadhyay : Continuous welding of Cu-Ni dissimilar couple using CO₂ laser, Science and Technology of Welding and Joining, **10-2** (2005), 158-166