

# 싱글모드 파이버 레이저를 이용한 SUS304와 Cu의 고속 겹치기 용접에서 접합부 및 인장시험 파단부의 특성에 관한 연구

이 수 진\* · 김 중 도\*\*·† · 카타야마 세이지\*

\*오사카대학교 접합과학연구소

\*\*한국해양대학교 기관공학부

## A Study on the Characteristic of Weld Joint and Tensile Fracture of SUS304 and Cu High-Speed Dissimilar Lap Welds by Single Mode Fiber Laser

Su-Jin Lee\*, Jong-Do Kim\*\*·† and Seiji Katayama\*

\*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 November 16, 2014 ; Revised December 9, 2014 ; Accepted December 30, 2014)

### Abstract

To develop and understand dissimilar metals joining of Stainless steel and Copper, ultra-high speed laser lap welding was studied using single mode fiber laser in this study. SUS304 and Cu have large differences in materials properties, and Cu and Fe have no intermetallic compounds by typical binary phase of Cu and Fe system. In this study, ultra-high speed lap welds of SUS304 and Cu dissimilar metals using single-mode fiber laser was generated, and weldability of the weld fusion zone was evaluated using a tensile shear test. To understand the phenomenon of tensile shear load, weld fusion zone of interface weld area and fracture parts after tensile shear test were observed using scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis system. And it was confirmed that Cu was easily melting and penetrating in the grain boundaries of SUS304 because of low melting temperature. And high thermal conductivity of copper occurred dissipate heat energy rapidly. These properties cause the solidification cracking in weld zone.

Key Words : SUS304, Cu, Dissimilar welding, Single mode fiber laser, Tensile shear test

### 1. 서 론

산업이 급속도로 발전함과 더불어 다양한 재료와 여러가지 복잡한 구조를 가진 제품이 개발되고 있다. 이러한 다양한 제품을 보다 실용적으로 개발하고 적용하기 위해서는 새로운 용접법이 개발될 필요가 있을 것으로 사료된다. 특히, 에너지 절약과 환경보호에 관련된 기술이 주목받고 있으며, 자동차, 선박, 항공기 및 전기 전자 분야에서는 그와 같은 관점에서 제품의 경량화와 함께 고기능화가 요구되고 있다. 이러한 변화에 따라

각종금속의 가공 및 용접기술의 개발이 중요시 되고 있다.

하지만, 이종재료의 용접은 재료의 기계적, 물리적 특성이 서로 다르고, 취성이 강한 금속간 화합물이 생성되어 균열을 발생하는 등의 여러 가지 문제가 있다. 이종재료의 용접에 있어서 높은 에너지밀도를 이용하는 레이저 용접에 대한 연구들이 진행되어왔다. 특히, 기존의 레이저보다 최소 6배 이상 높은 에너지 밀도를 가지고 있는 싱글모드 파이버 레이저를 이용한 연구가 진행되었으며, 아주 빠른 용접속도의 조건에서 금속간 화합물의 생성을 감소시킬 수 있다는 가능성을 확인하였다<sup>1-3)</sup>. 또한 금속간 화합물이 발생하지 않는 조건에서 아

**Table 1** Chemical compositions of materials used

Metal	Cu	SUS304
Cu	99.99 wt.%	-
Ni	-	8.06 wt.%
Fe	-	72.175 wt.%
Si	-	0.45 wt.%
Mn	-	1.12 wt.%
Others	-	Cr:18.10,C:0.06, S:0.004, P:0.031

주 양호한 이종재료 용접결과가 얻어지는 것을 지난 연구에서 확인하였다<sup>4)</sup>. 본 연구에서는 산업에서 많이 사용되고 있는 스테인레스강과 동을 용접에 대한 연구를 진행하였다. 이 두 금속은 금속간 화합물이 거의 존재하지 않지만, 용융점과 열전도도의 차이가 심하여 이종재료 겹치기 용접을 하기에 까다로운 재료로 알려져 있다<sup>5,6)</sup>. 몇몇의 연구자들에 의하여 두 재료의 이종재료 접합에 관한 연구가 진행되어 왔지만, 아직까지 충분한 기술이 확보되지 않아 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다<sup>5,6)</sup>. 이러한 스테인레스 강과 동을 이용한 이종재료 겹치기 용접을 용접속도를 변화 시키면서 실행하고 그 결과를 관찰하였다. 특히, 물성이 크게 다른 두 재료를 레이저를 이용하여 아주 빠른 용접속도로 겹치기 용접을 행할 경우의 용접특성을 확인하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

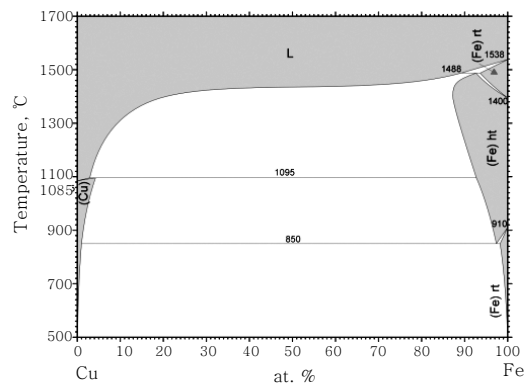
### 2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 금속재료는 높은 강도와 내부식성으로 산업에 많이 사용되는 스테인레스강 SUS304와 연성이 좋고 열과 전기의 전도율이 높은 동(Cu)을 사용하였으며, 그 화학적 성분은 Table 1에 기본적인 물성을 Table 2에 각각 나타내었다. 동은 Cu가 약 99% 이상 함유되어있는 순금속에 가까운 재료를 사용하였으며, Cr이 18.10 wt.% Ni가 8.06 wt.% 함유되어 있는 SUS304를 사용하였다. 두 재료의 용융점을 비교하면 SUS304가 Cu 보다 약 300 °C 이상 높다. 특히 열전도도는 Cu가 Fe의 약 5배 이상 높은 것을 확인할 수 있다.

또한 Cu와 Fe의 평형상태도인 Fig. 1<sup>7)</sup>에서 나타내듯이 금속간 화합물이 존재하지 않는 조합이다. 각 재료를 길이 70 mm, 넓이 30 mm, 두께 0.3 mm의 박판으로 가공하여 본 연구의 시편으로 사용하였다.

**Table 2** Physical properties of materials used

	Cu	SUS304	Fe
Melting point (°C)	1085	1430	1538
Boiling point (°C)	2562	-	2862
Density (g/cm <sup>3</sup> )	8.96	8.03	7.874
Thermal conductivity (W/m·K)	401	-	80.4
Thermal expansion (μm/m·K) (25 °C)	16.5	16.5	11.8
Vickers hardness (Kgf/cm <sup>2</sup> )	3763	-	6200
Poisson ratio	0.34	0.29	0.29



**Fig. 1** Typical binary phase diagram of Cu and Fe system

### 2.2 실험장비 및 실험방법

재료에 따른 광의 흡수율은 1060 nm의 파장대에서 Cu는 약 0.04 %의 광 흡수율을 Iron(polished)은 약 0.25-0.32 %의 광 흡수율을 가진다<sup>8)</sup>. 따라서 Cu는 레이저 광을 쉽게 반사하고, 열전도도가 매우 높아 충분한 열원을 가공부에 공급하는 것이 무척 어려우므로 레이저 가공이 어려운 재료중 하나로 알려져 있다. 과거에 많은 연구자들이 Cu를 이용한 맞대기 용접에 관한 연구를 진행하여 왔으나<sup>5,9-11)</sup> 겹치기 용접에 관한 연구자료가 매우 부족한 현실이다.

실험장비 및 실험방법은 이전 연구했던 방법과 동일하게 실행되었으며<sup>4)</sup>, 본 실험에 사용된 레이저는 최대 출력 2 kW의 싱글모드 파이버 레이저 장비이다. 레이저 광은 파이버를 이용하여 레이저 헤드로 전송하며 사용된 레이저 빔의 직경은 약 28 μm이다. 이 집광된 빔은 시편 표면에 초점위치 조건으로 조사되었다. 레이저 헤드는 약 10도의 입사각을 주어 고정하여 실험을 진행하였다. 또한, 레이저 흡수율 및 재료 위치에 따른 용접특성을 관찰하기 위하여 SUS304와 Cu의 위치를 바

꾸어 레이저 조사부에 변화를 주며 겹치기 이종재료 용접을 실시하였다. 용접속도는 5 ~ 50 m/min로 변화시키면서 용접을 실시하였다. 용접공정 후 용접부는 SEM (scanning electron microscopy) 및 EDX(energy dispersive X-ray spectroscopy) 장비를 이용하여 관찰되었으며 인장시험을 통하여 기계적 특성을 평가하였다. 또한, 인장시험후 파단된 파단면의 조성을 관찰하여 용접부의 재료적 거동을 확인하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 용접속도에 따른 Cu와 SUS304의 이종용접 비드면의 관찰

에너지 밀도가 아주 높은 싱글모드 파이버 레이저를 이용하여 고속도 SUS304-Cu 이종재료의 겹치기 용접을 실시하였다. 두 재료의 고속도 겹치기 용접은 레이저 출력 1 kW, 레이저 초점거리 0 mm, 아르곤 실드 가스 유량 30 l/min으로 고정하고 용접속도를 변화시키며 용접을 실시하였다. 같은 조건으로 시료의 겹치기 위치를 변화시킴으로써 레이저 조사부에 변화를 주어 용접을 실시하였다. 용접된 시료의 표면과 이면의 비드를 관찰한 사진을 Fig. 2 에 나타내었다.

Fig. 2 SUS304(upper) - Cu(lower)의 비드사진을 보면 10 ~ 50 m/min 용접속도의 모든 조건에서

상부 비드측에 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다. 균열의 크기와 발생빈도는 용접속도가 상승함에 따라 줄어들며, 용접비드의 넓이 또한 용접속도가 빨라질수록 좁아지는 것을 알 수 있다.

특히 30 m/min 이상의 용접속도에서는 부분적으로 관통되지 않은 이면비드가 확인 된다. 이러한 경향의 이유는 Cu가 레이저광의 반사도가 높고 열전도도가 높아 용접공정에 많은 에너지가 필요하지만 충분한 열원이 공급되지 않았기 때문으로 사료된다.

반면, Fig. 2 Cu(upper) - SUS304(lower)의 용접 비드면은 SUS304(upper) - Cu(lower) 조건의 경우와 마찬가지로 용접속도가 증가함에 따라 용접 비드 폭이 좁아지며 용접속도 30 m/min의 조건에서 부분적으로 부분관통이 생성된다. 하지만 부분관통의 용접 정도는 SUS304(upper) - Cu(lower) 조건의 이면비드에서 관통되지 않은 부분이 더 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 Cu가 에너지 밀도가 높은 레이저 빔의 초점 위치에서 직접적으로 조사되는 편이 플러스 초점위치인 SUS304시편의 아래에서 SUS304의 용융부로부터 전달된 열과 입사된 레이저 광 열원으로부터 받은 에너지가 적기 때문에 Cu 시료가 아래에 있는 쪽이 위에 있는 경우 보다 관통용접이 어려웠다고 사료된다. 또한, Cu (upper) - SUS304(lower)의 이면비드인 SUS304측을 관찰한 결과 용접속도 10 m/min 과 20 m/min에

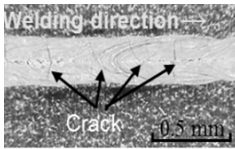
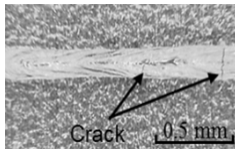
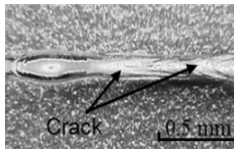
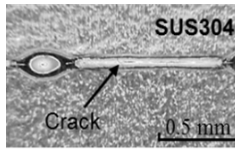
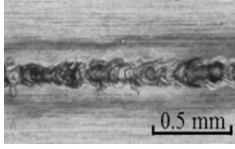
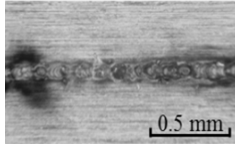
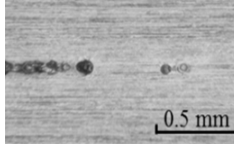
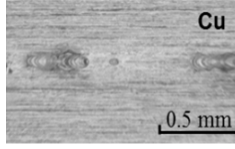
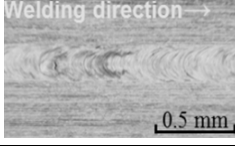
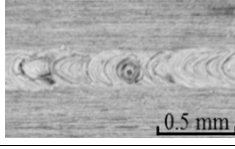
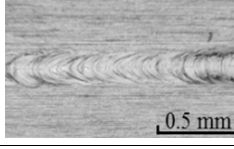
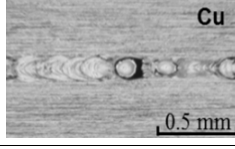
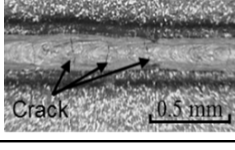
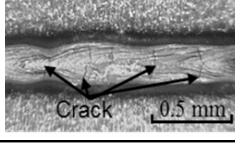
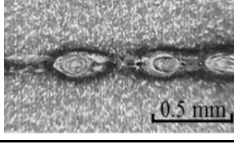
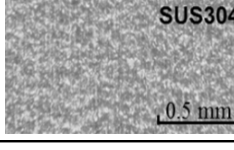
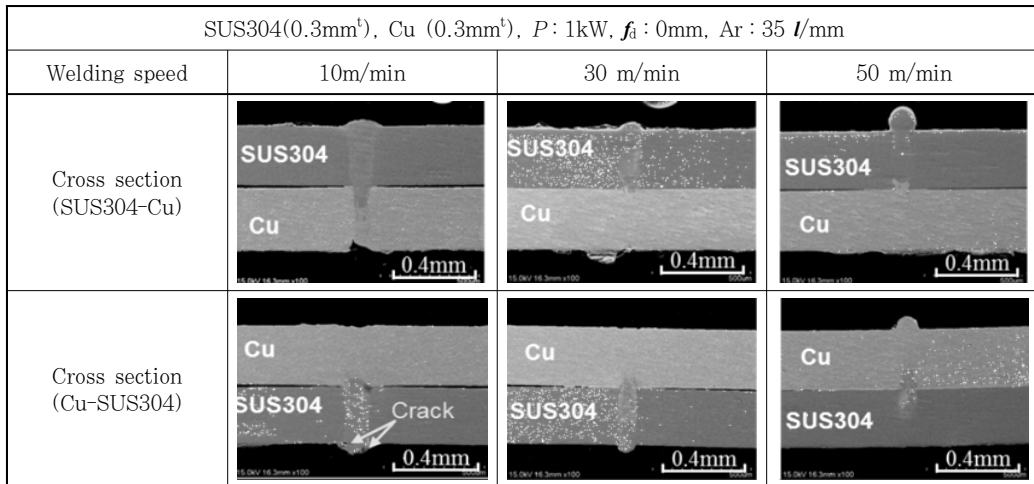
SUS304(0.3mm <sup>t</sup> ), Cu (0.3mm <sup>t</sup> ), P: 1kW, f <sub>a</sub> : 0mm, Ar: 35 l/mm				
Welding speed	10m/min	20 m/min	30 m/min	50m/min
Top surface appearance of weld bead (SUS304-Cu)				
Bottom surface appearance of weld bead (SUS304-Cu)				
Top surface appearance of weld bead (Cu-SUS304)				
Bottom surface appearance of weld bead (Cu-SUS304)				

Fig. 2 Photos of top and bottom surfaces of SUS304 and Cu dissimilar welds made at different welding speeds using single-mode fiber laser



**Fig. 3** Cross-sectional SEM photos of weld beads made in SUS304 and Cu dissimilar lap sheets using single-mode fiber laser at different welding speeds

서 균열이 관찰되었다. 하지만 30 m/min 이상의 용접 속도에서는 균열을 발견하기 어려웠다.

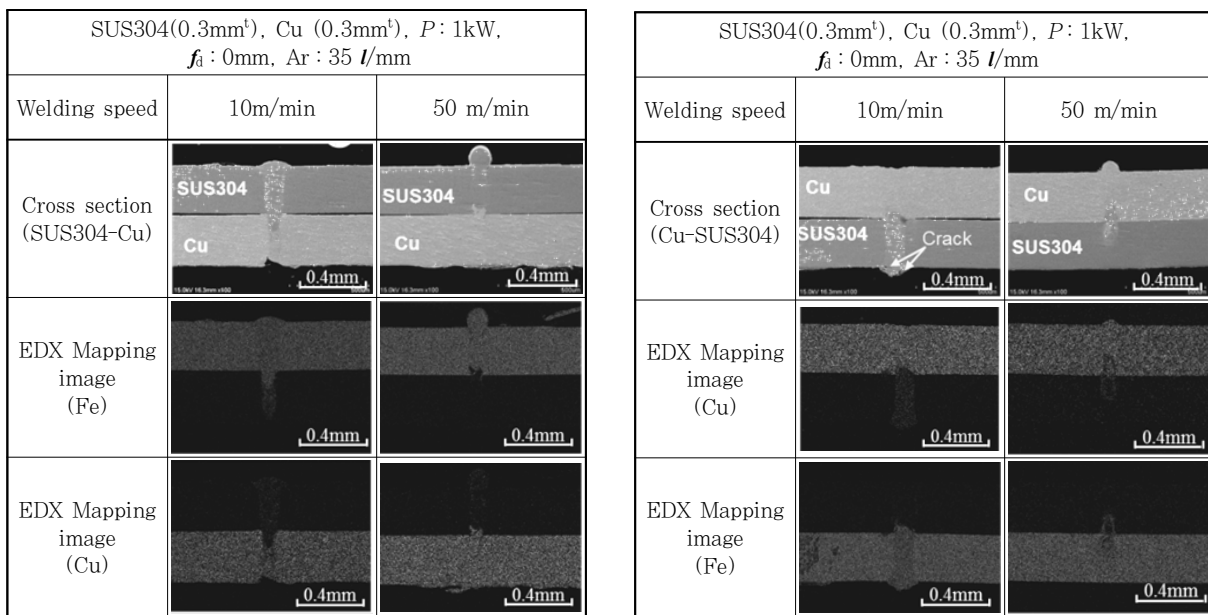
### 3.2 용접속도에 따른 Cu와 SUS304의 이종재료 용접부의 단면관찰

Fig. 3은 SUS304-Cu 이종재료 용접부의 단면사진을 나타낸다. 단면사진에서 알 수 있듯이 용접속도나 SUS304 및 Cu의 위치에 관계없이 모든 조건에서 두 재료의 경계면 부근의 용접부에서는 균열이나 기공이 형성되지 않은 양호한 용접부가 확인된다. 하지만 10 m/min

의 용접속도, Cu-SUS304 시편의 용접결과 이면비드 측에 균열이 발생되어 있는 것을 확인 하였다.

이러한 결과를 이해하기 위하여 용접속도 10 m/min와 50 m/min의 조건에서 SUS304-Cu와 Cu-SUS304의 용접부 단면을 EDX 장비를 이용하여 mapping을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 4의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. Fe 원소로 mapping한 결과를 녹색으로 Cu 원소는 주황색으로 나타내었다.

Cu의 mapping 결과에 따르면, (a)의 SUS304-Cu의 조건에서는 10 m/min와 50 m/min 두 용접속도에서 열은 주황색의 Cu 원소가 용접부 전반적으로 퍼져있



(a) SUS304-Cu

(b) Cu-SUS304

**Fig. 4** Cross-sectional SEM photos and EDX mapping images of weld beads made in SUS304 and Cu dissimilar lap sheets using single-mode fiber laser at 10 m/min and 50 m/min welding speeds

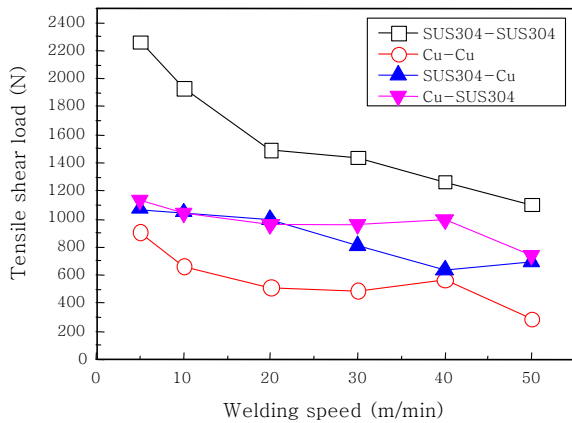


Fig. 5 Results of tensile shear test for SUS304 and Cu dissimilar welding

는 것을 확인할 수 있다. 이는 Cu 원소가 SUS304측의 용접부에 침투 하였으며 침투 농도가 열지만 비교적 균일하며 SUS304 용융금속 전체에 골고루 침투한 것을 알 수 있다. 관통용접이 이루어진 용접속도 10 m/min에는 Fe가 Cu금속 측으로 침투하였으나 침투 농도는 Cu 재료의 이면측으로 갈수록 크게 감소하였다. 반면 50 m/min에서는 Cu의 용융금속에 밀려 Cu측으로 침투하기 어려운 것을 확인할 수 있었다. (b)의 Cu - SUS304의 경우 관통 용접시에는 SUS304의 Fe 원소는 Cu 용융부에 거의 침투되지 않았으나 Cu 원소는 SUS304측의 용융금속부 전체에 골고루 침투하였다. 반면 부분관통 용접결과, 두 재료의 경계면에 위치한 용융금속부는 용접공정 중에 두 재료의 용액이 격동적으로 움직여 섞여있는 것이 확인되며, Fe는 Cu 재료측의 용융금속에 약 0.1 mm이상 침투하였다.

이러한 분석 결과, SUS304-Cu의 경우에는 모든 조건에서 SUS304 상부측에 Cu가 일정량 침투하여 응고 균열을 일으켰으므로 모든 상부비드에 균열이 발생하였으나 이면비드에는 SUS304재료가 침투하지 못하여 균열이 발생하지 않았다. 또한, Cu-SUS304의 조건에서는 Cu가 이면비드까지 침투한 비교적 느린 용접속도의 조건에서 이면비드에 침투된 Cu로 인한 응고균열이 발생하였으나 어떠한 조건에서도 SUS304가 상부비드에 침투하지 않았으므로 상부비드에는 균열이 발생하지 않았다.

### 3.3 고속도 겹치기 이종재료 용접부의 인장시험평가

3.2절에서 실시된 시험편과 같은 조건의 시료를 5세트 제작한 후 인장전단시험을 행하였으며 최고치와 최저치를 뺀 나머지의 평균을 Fig. 5에 비교하여 그래프

로 나타내었다. 그래프의 세로축은 인장전단하중을 가로축은 용접속도를 나타낸다. 사각형은 SUS304의 동종간 용접을 원형은 Cu의 동종간 용접부의 결과를 나타내며, 이는 이종재 용접과 같은 조건으로 실시한 후 동일하게 인장전단시험을 행한 결과이다. 파란색 삼각형과 분홍색 역삼각형은 각각 SUS304-Cu와 Cu-SUS304의 겹치기용접 조건에서 실시한 인장전단시험의 결과이다. SUS304의 동종간 용접 결과가 가장 높은 인장전단하중을 가지며 속도가 증가함에 따라 전단하중이 저하된다. 이는 용접속도가 증가함에 따라 용접면이 감소했기 때문이다. Cu의 동종용접 인장전단시험 결과가 가장 낮은 하중을 가지고 있으며, 특히 용접속도가 40 m/min의 경우 미세하게 전단하중이 증가했다가 50 m/min의 조건에서는 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 이는 레이저광의 반사율이 매우 높은 Cu에 의해 용접속도 40 m/min의 조건에서 부분관통이 이루어졌으며, 겹쳐진 접합부의 경계면 주변에서 용융금속의 흐름이 여러 방향으로 복잡하게 움직이면서 용접부의 면적이 일부 증가했기 때문에 나타난 현상이다<sup>4)</sup>. 이종재료 용접부의 인장전단시험 결과 SUS304와 Cu의 동종재료 용접결과와 사이에 해당하는 전단하중이 나타났으며, SUS304-Cu의 조건에서는 동종재료용접의 인장전단시험결과와 마찬가지로 용접속도가 증가함에 따라 용접부면적의 축소로 전단하중이 감소하였다. 반면, Cu-SUS304의 경우에는 용접속도 50 m/min의 조건을 제외하고는 용접속도가 빨라짐에도 불구하고 거의 유사한 전단하중을 나타내었다. 결론적으로, 용접속도 20 m/min 초과 40 m/min 이하의 조건에서 Cu-SUS304의 재료조합이 SUS304-Cu에 비하여 높은 전단하중을 가지며, 그 외의 조건에서는 두 이종재료의 전단하중이 유사한 것이 판명되었다.

이러한 전단하중의 경향을 이해하기 위하여 인장전단 시험편의 파단부를 관찰하였으며, 그 단면사진을 Fig. 6에 나타내었다. 인장시험결과 파단된 파단면을 관찰한 결과 거의 모든 조건에서 두 시료의 경계면측에 생성된 용접부에서 파단이 이루어졌으며, 파단부위는 속도가 증가함에 따라 용접부 면적이 감소하므로 파단부의 면적 또한 감소하였다. 용접속도 10 m/min의 Cu-SUS304의 조건에서는 예외적으로 SUS304 시편에 생성된 용융금속에서 파단이 이루어졌다. 또한 용접속도 30 m/min, Cu-SUS304 조건에서 SUS304의 용융금속 내부에서 균열이 발생하였다. SUS304-Cu의 조건에서는 용접속도 10 m/min의 경우 상부 SUS304측에 생성된 용융금속에서 아주 미세한 균열을 확인하였다. 이와같이 용융금속에서 발견되는 균열은 미세하여 확인하기 어려웠던 내부의 균열이 인장시험시 하중이 가해지면서 성장



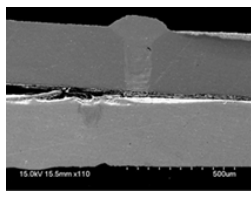
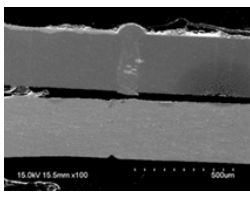
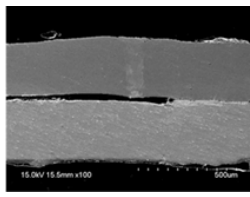
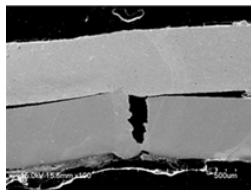
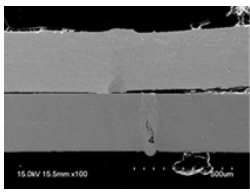
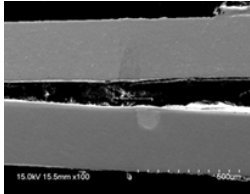
SUS304(0.3mm <sup>t</sup> ), Cu (0.3mm <sup>t</sup> ), P: 1kW, f <sub>a</sub> : 0mm, Ar: 35 l/mm			
Welding speed	10m/min	30 m/min	50 m/min
Fractural cross section of dissimilar welds (SUS304-Cu)			
Fractural cross section of dissimilar welds (Cu-SUS304)			

Fig. 6 SEM photos of cross sections of SUS304 and Cu dissimilar lap welds made with single-mode fiber laser at 5, 30 and 50 m/min after tensile shear test

하였으며, 재료의 경계면 용접부측에서 균열이 성장하여 파단하는것 보다 먼저 파단이 일어난 것으로 사료된다.

파단부의 조성을 확인하기 위하여 용접부에서 파단된 Cu-SUS304조건인 용접속도 10 m/min와 비교균으로 용접속도 30 m/min의 시편을 정밀하게 관찰하고 파단부의 성분을 EDX 장비를 사용하여 분석하였으며 SEM 단면사진과 분석결과를 각각 Fig. 7과 Table 3에 나타내었다.

용접속도 10 m/min의 파단부 '1', '2' 및 '3'의 조성은 각각 약 55 % Fe-45 % Cu, 80 % Fe-20 % Cu,

7 % Fe-93 % Cu 이며, 응고균열이 발생되었다고 생각되는 '2'의 조성은 약 20 %의 Cu가 함유되어 있다. 반면 용접속도 30 m/min 조건 'B'의 경우 두 재료의 경계부 주변에 생성된 용융금속부에서 확인되는 색의 농도가 진한 부위 '8'의 조성은 Cu 시편측임에도 불구하고 Fe가 약 85 %로 SUS304의 용액이 Cu 시료측으로 이동한 것을 확인하였다. 용접속도 30 m/min의 파단은 두 재료의 경계층에 생성된 용접부에서 발생하였다. 파단된 '4', '5', '6'의 조성은 각각 Fe리치부(약 75 % Fe), Cu리치부(약 89 % Cu) 및 Fe리치부(약

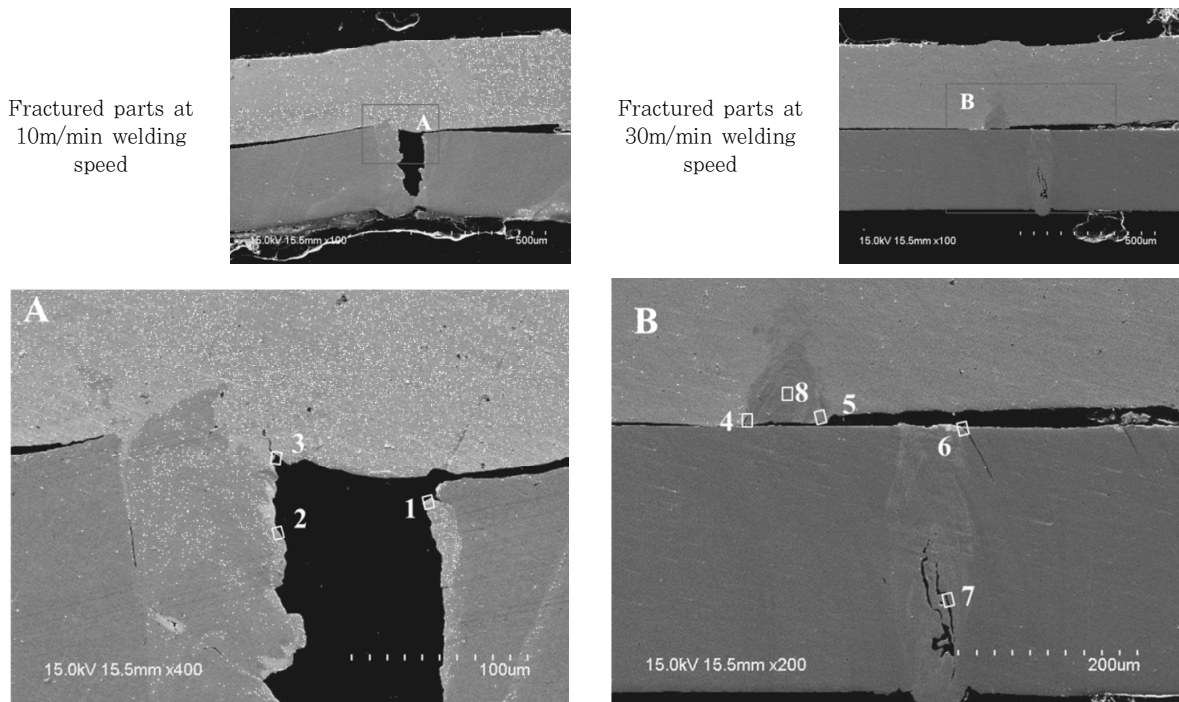


Fig. 7 SEM cross-sectional photos and areas for EDX analyses of Cu (upper sheet) and SUS304 (lower sheet) dissimilar welds at 10 and 30 m/min after tensile shear test

**Table 3** EDX analysis results (as ratio of Fe to Cu) of marked area in cross sections of SUS304 and Cu dissimilar welds made at 5 and 30 m/min after tensile shear test in Fig. 7

	Ratio of main alloy elements		Predicted phases
	Fe(%)	Cu(%)	
1	54.6	45.4	Fe + Cu
2	80.1	19.9	Fe + Cu
3	7.0	93.0	Cu + Fe
4	74.6	25.4	Fe + Cu
5	11.2	88.8	Cu + Fe
6	66.8	33.2	Fe + Cu
7	77.8	22.2	Fe + Cu
8	84.4	15.6	Fe + Cu

67% Fe)로 인장시험시 파단은 Fe리치부와 Cu리치부를 관통하면서 발생하였다. 특히, 용접부에 균열이 발생한 '7'은 약 20 %의 Cu를 함유하고 있어 용접속도 10 m/min 에서 균열 및 파단이 이루어진 조성과 가까운 것을 확인하였다. 용접시 SUS304 용융부에 일부 Cu용액이 포함되는 경우 응고점과 냉각속도의 차가 매우 크므로 응고된 Fe조직의 경계부에 Cu가 용액으로 남게 되며, 이러한 현상으로 응고 균열이 발생하기 쉬워진다.

결론적으로, SUS304와 Cu의 레이저를 이용한 이종재료 용접에서는 약 20 % 근방의 Cu가 함유되는 SUS304측의 용접부에서 응고균열이 발생하기 쉽다는 것을 확인하였다. 또한 인장전단시험에 의하여 파단되는 경계면측에 생성된 용접부의 재료함유량을 확인한 결과 SUS304 함유량이 높은 경우에 인장시험하중이 증가하는 것을 확인하였다. Cu-SUS304의 조건에서는 일반적으로 파단이 일어나는 두 재료의 경계부에서 생성된 용접부는 아래에 위치한 SUS304 재료의 용액이 상부에 위치한 Cu로 흘러 들어가 함유량이 증가하는 반면 SUS304-Cu의 경우에는 아래의 Cu가 상부로 흘러 들어가는 가능성이 커지므로 용접속도 20 m/min 초과 50 m/min 미만의 조건에서 Cu-SUS304 시료 위치의 조건이 더 강한 전단하중을 가지는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 레이저 광의 흡수율이 매우 낮아 용접하기 어려운 Cu와 다양한 산업에서 많이 사용되는 스테인레

스강의 이종재료 접합의 일환으로써 SUS304와 Cu의 이종재료 고속도 겹치기 용접을 실행하였다. 이 재료의 조합은 금속간 화합물이 생성되지 않는 조합이지만, 두 재료의 용융점과 열전도도의 큰 차이로 인하여 그 용접이 어렵다<sup>5,6)</sup>. 기존의 연구에서는 두 재료의 용접시 두 재료의 용합되는 양을 조절하여 응고균열을 줄이는 방법으로 실험을 진행하였다<sup>5)</sup>.

하지만 본 연구에서는 매우 작은 빔직경을 가지고있는 싱글모드 파이버 레이저의 특성을 살려 지금까지 실현하기 어려웠던 초고속도 겹치기 용접을 실시하였으며, 시편의 위치와 용접속도에 따른 용접부의 특성을 평가하였다. 용접속도가 증가함에 따라 용접비드의 폭이 좁아졌으며, 용접속도 30 m/min 이상의 용접조건에서 부분관통용접이 이루어졌다.

SUS304가 상부에 있는 경우의 모든 조건에서 상부 용접비드에 미세한 균열을 확인하였다. 상부의 시편이 Cu인 경우에는 용접속도 20 m/min 이하에서 이면비드에 균열이 발생하였다. 균열은 넓은 응고온도범위에서 이루어졌기 때문에 용접시 SUS304 용융부에 일부 Cu용액이 포함되는 경우 응고점과 냉각속도의 차가 매우 크므로 응고된 Fe 조직의 경계부에 Cu가 용액으로 남았다가 응고되므로 응고균열이 발생하기 쉽다. 특히, SUS304와 Cu의 레이저를 이용한 이종용접에서는 Cu가 약 20 % 근방으로 함유되는 SUS304측에 생성된 용접부에서 응고균열이 쉽게 발생하는 것을 확인하였다.

#### Reference

1. S.J. Lee, H. Nakamura, Y. Kawahito and Seiji Katayama: Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, **19-2** (2014), 111-118
2. Su-Jin Lee, Seiji Katayama and Jong-Do Kim: Microstructural behavior on weld fusion zone of Al-Ti and Ti-Al dissimilar lap welding using single-mode fiber laser, *Journal of Korean Society of Marine Engineering*, **38-2** (2014), 133-139
3. 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 The Korean Welding and Joining Society*, **31-5** (2013), 54-61
4. Su-Jin Lee and Jong-Do Kim: Mechanical properties of Cu and Ni dissimilar welds by high welding speed using single-mode fiber laser, *Journal of The Korean Welding and Joining Society*, **32-3** (2014), 37-42
5. Shuhai Chen, Jihua Huang, Jun Xia, Hua Zhang and Xingke Zhao: Microstructural characteristics of stainless steel/copper dissimilar joint made by laser

- welding, Metallurgical and Materials Transactions A, **44A** (2013), 3690-3696
6. Rakesh Chaudhari, Riddhish Parekh and Asha Ingle: Reliability of dissimilar metal joints using fusion welding : A Review, International Conference on Machine Learning, Electrical and Mechanical Engineering (ICMLEME'2014), Jan. **8-9**, 2014 Dubai (UAE), 98-104
  7. Qing Chen and Zhanpeng Jin: The Fe-Cu System: A Thermodynamic Evaluation, Metallurgical and Materials Transactions A, **26A** (1995), 417-426
  8. John F. Ready : LIA Handbook of Laser Materials Processing, Laser Institute of America Magnolia Publishing Inc., (2001)
  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 CO<sub>2</sub> laser, Science and Technology of Welding and Joining, **10-2** (2005), 158-166