

# 레이저 위빙을 이용한 Al 6k21-T4 합금의 용접 강도 향상

김병훈 · 강남현 · 박용호 · 안영남 · 김철희 · 김정한

大韓熔接·接合學會誌 第27卷 第4號 別冊

2009. 8

## 레이저 위빙을 이용한 Al 6k21-T4 합금의 용접 강도 향상

김병훈\* · 강남현\*† · 박용호\*† · 안영남\*\* · 김철희\*\* · 김정환\*\*

\*부산대학교 재료공학부

\*\*한국생산기술연구원 정밀접합팀

## A Study to Improve Weld Strength of Al 6k21-T4 Alloy by using Laser Weaving Method

Byung-Hun Kim\*, Nam-Hyun Kang\*†, Yong-Ho Park\*†, Young-Nam Ahn\*\*, Cheol-Hee Kim\*\*  
and Jung-Han Kim\*\*

\*School of Materials Science &amp; Engineering, Pusan National University, Busan 609-020, Korea

\*\*Advanced Welding & Joining Technology Team, Korea Institute of Industrial Technology,  
Incheon 333-333, Korea

†Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr, yhpark@pusan.ac.kr

(Received January 13, 2009 ; Revised April 15, 2009 ; Accepted August 18, 2009)

## Abstract

For Al 6k21-T4 alloy, linear laser welding produced the lower shear-tensile strength than the base metal. This study improved the shear-tensile strength by using the weaving laser at the optimized welding condition, i.e., 2mm weaving width and 25Hz frequency. The large weaving width increased the weld width, therefore improving the joint strength. For the specimen of low strength, the porosity was distributed continuously along the intersection between the plates and fusion line. However, for the optimized welding condition, large oval-shaped porosities were located only in the advancing track of the concave part. Regardless of the welding condition, solidification cracking was initiated at the intersection and propagated through small porosities in the weld part. furthermore, the concave part had more significant porosity in the weld and HAZ, respectively than the convex part. The continuity of porosities played a key role to determine the strength. And, the weaving width was an important parameter to control the strength.

Key Words : 3~4 Weaving laser; Microstructure; Crack; Al 6k21-T4

## 1. 서 론

최근 이산화탄소 배출규제 등 환경문제가 대두되면서 차량 경량화를 위한 알루미늄 적용 기술개발이 활발히 이루어지고 있다<sup>1)</sup>. 알루미늄 재료를 가공 및 조립하는 공정 중에서 레이저 용접은 빠른 용접속도, 깊은 용입, 적은 용접 입열량을 가지는 고품위 용접 공정이기 때문에 주목을 받고 있다. 특히 박판의 알루미늄 용접에 있어서 레이저를 이용한 방법이 많이 연구되고 있다. 아크 용접이 박판에 적용되는 경우 변형과 내부의 크랙과 같은 치명적인 결함이 발생하며, 저항용접의 경우 전극

에 알루미늄이 들어붙는 현상으로 전극소모가 심하고 용접 건전성이 열악하다는 단점이 있다. 그러므로 레이저를 이용한 알루미늄 박판 용접은 차량 경량화 및 차체 생산라인에 있어서 매우 중요한 기술이며, 앞으로도 적용되는 산업분야가 더욱 다양화될 것으로 예상되고 있다<sup>2)</sup>. 그러나 알루미늄과 같은 저용점 금속에서의 레이저 용접의 문제점은 생산성을 높이기 위하여 고밀도 열원을 사용함으로써 인하여 키흔 모드에서 불안정한 용융풀의 거동으로, 용접부 표면의 건전성이 열악해지고 기공 및 크랙이 많이 발생하여 용접강도가 떨어진다는 것이다. 아크 용접의 경우 위빙모드 연구가 진행되어 크랙과 용접강도를 개선한 연구결과가 발표되었으나,

레이저 용접의 경우에는 위빙모드를 적용한 연구 사례가 없는 것으로 판단하고 있다.

따라서 본 연구에서는 고밀도 열원을 이용한 레이저 용접에 위빙 모드를 적용하여 기공과 크랙의 문제를 개선하고자 알루미늄 겹치기 용접부의 용접특성을 평가하였다.

### 2. 실험 방법

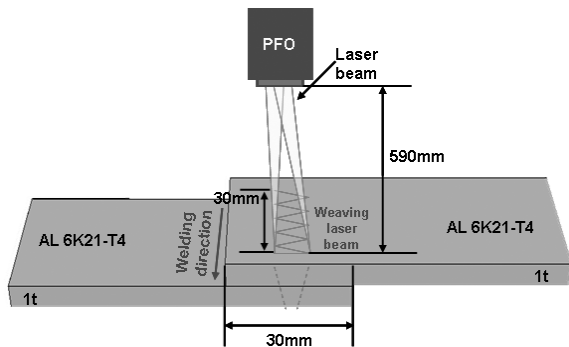
레이저 광학장치는 프로그램 포커싱 옵틱(PFO)을 사용하였으며 레이저 초점 거리는 590mm이다. 레이저 헤드는 6축 로봇에 연결하여 조정하기 용이하도록 사용하였다. 레이저 용접기는 4kW급 디스크 레이저를 사용하였으며 1축 테이블을 이용하여 용접을 진행하였다.

박판 겹치기 용접을 위하여 가로길이, 세로길이, 두께가 각각 50mm, 100mm, 1mm인 6K21-T4 시편을 사용하였으며, 겹침 여유를 30mm로 하였다. Table 1에는 6K21-T4 알루미늄 합금의 화학적 조성을 나타내었으며, Fig. 1에는 위빙 레이저 용접에 대한 모식도를 보여주고 있다.

레이저 출력과 용접속도는 각각 3kW와 3m/min으로 고정하고, 비드 폭 및 주파수를 변화시켜 6K21-T4 시편을 Fig. 1과 같이 겹친 후 직선 및 위빙 용접하였다. Table 2는 각기 다른 위빙용접 공정변수를 적용한 시편을 나타낸다. 용접 공정 후 각 시편에 대해 전단인장 시험을 실시하였다. 직선 레이저 용접 시편도 제작하여 위빙 용접의 영향에 대해 연구하였으며, 위빙용접 조건에 따른 용접부 크기, 결함 및 용접 강도 등에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

**Table 1** Chemical composition of Al 6K21-T4

Base metal	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Wt%	1.04	0.16	0.01	0.07	0.57	0.01	0.01	0.01	Bal.



**Fig. 1** Schematic diagram of weaving laser welding

**Table 2** Process conditions of weaving laser welding

Specimen no.	Weaving width(mm)	Frequency(Hz)
1	1	25
2		30
3		35
4		40
5	2	25
6		30
7		35
8		40

**Table 3** Etching solution for welding specimen

Etching type	Etchant	Ratio
Micro	Kellers etchant	H <sub>2</sub> O 190ml HNO <sub>3</sub> 5ml HCl 3ml HF 2ml
Macro	Tuckers etchant	H <sub>2</sub> O 25ml HNO <sub>3</sub> 15ml HCl 45ml HF 15ml

각 용접조건에서 전단인장 강도의 차이가 큰 시편(No. 1, 5, 8)을 선정하여 직선 용접 시편과 함께 비교파괴 3차원 엑스선 촬영을 통해 시편 내부의 결함을 확인하였고, 각 용접시편의 미세조직 관찰을 위해 Table 3와 같은 에칭법을 사용하였다.

### 3. 실험 결과 및 토의

#### 3.1 위빙용접 변수에 따른 전단인장 강도의 거동

위빙 폭 및 주파수에 변수를 둔 Table 2의 위빙 용접 시편 1~8번에 대해 전단인장시험을 수행한 결과 전단인장 파단은 모든 시편의 열영향부(HAZ)에서 동일하게 발생하였으며, 강도값은 Fig. 2에 나타내었다. 비드 표면은 모든 위빙 조건에서 언더컷 또는 용접 중심부의 고온 균열 없이 건전성을 확보하고 있었다. 위빙 폭을 1mm, 주파수를 25Hz로 하여 실험한 1번 시편에서 최소 인장 강도값이 나왔고, 위빙 폭을 2mm, 주파수를 25Hz의 조건으로 용접한 5번 시편에서 최대 인장 강도값을 획득하였다. 전반적으로 위빙 폭이 1mm 보다는 2mm로 큰 경우 높은 전단인장 강도값을 얻었으며, 주파수는 전단인장 강도에 있어서 변수로 크게 작용하지 않았다.

모재의 인장 강도 시험 결과 7.3kN의 값을 나타내었고 직선 레이저 용접 시편의 전단인장 강도값은 3.4kN, 위빙 레이저 용접 시편의 경우는 평균 3.9kN의 값을 가졌다(Fig. 2, Table 4). 각각의 전단인장 강도값을 비교했을 때, 모재에 비해 용접부의 전단인장 강도값이 낮음을 알 수 있었다. 하지만 위빙 용접과 직선 용접을 비교했을 경우, 위빙 용접시의 전단인장 강도값이 직선 용접시의 값에 비해 다소 높음을 알 수 있었다. 이를 토대로 봤을 때 위빙 용접 프로세스가 용접 강도 향상에 도움이 되는 것으로 판단된다.

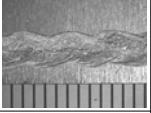
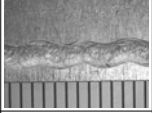
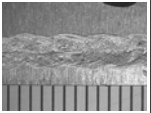
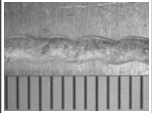
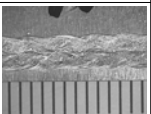
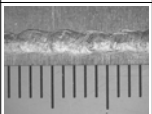
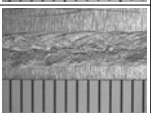
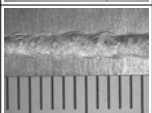
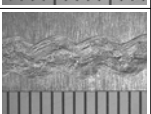
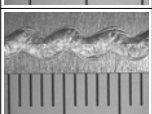
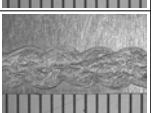
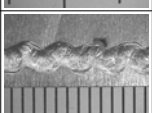
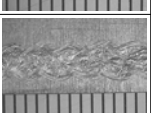
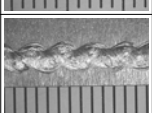
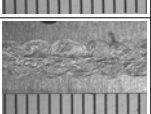
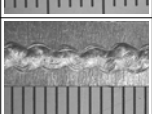
Specimen no.	Bead	Back bead	TS(kN)
1			3.5
2			3.9
3			3.9
4			3.8
5			4.4
6			4.2
7			4.0
8			3.8

Fig. 2 Welding beads and tensile strength of weaving laser welding specimens

Table 4 Tensile strength of linear welding and no welding specimens

Specimen	TS (kN)
Linear laser weld	3.4
Substrate with no weld	7.3

### 3.2 위빙용접 변수에 따른 기공의 거동

용접 시편에 대해 3차원 엑스선 비파괴 검사를 시행하여 Figs. 3, 4에 나타내었다. 위빙 조건에 상관없이 모든 시편에서 기공이 관찰되었으며 위치는 용접 비드와 모재의 겹치기 경계부에서 주로 관찰되었다. 5번 시편을 제외한 시편에서 비교적 작은 크기의 기공이 연속적으로 분포되어 거시적으로 연결된 모양을 가지고 있었으며, 이러한 기공의 연속성은 직선용접에서 가장 뚜렷하게 나타났다. 5번 시편이 최대 전단인장 강도값을 가지는 것을 보면 기공의 연속성이 전단인장강도 특성을 저하시키는 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

5번 시편을 자세히 분석하면 기공의 연속성보다는 용접방향에 따라 기공의 분포 및 크기가 일정한 경향성을 가지고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 용접방향과 기공의 위치와의 연관성을 규명하기 위하여 Fig. 5와 같이 시편 표면을 매크로 에칭하여 용접방향을 파악하였다. 그 결과 위빙이 오목하게 들어왔다가 볼록한 부분으로 옮겨 가는 부분, 즉 용접 입열이 중첩되어 가장

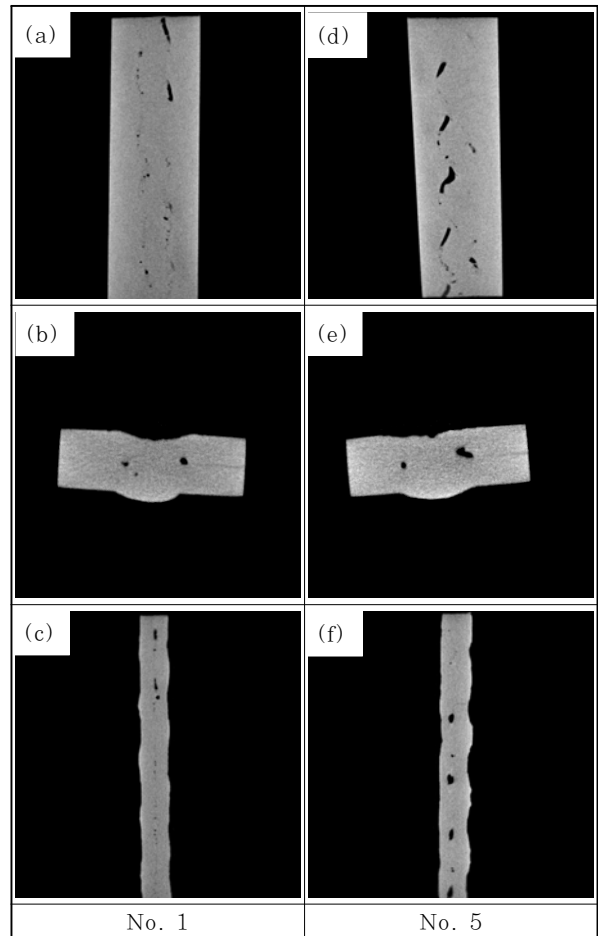
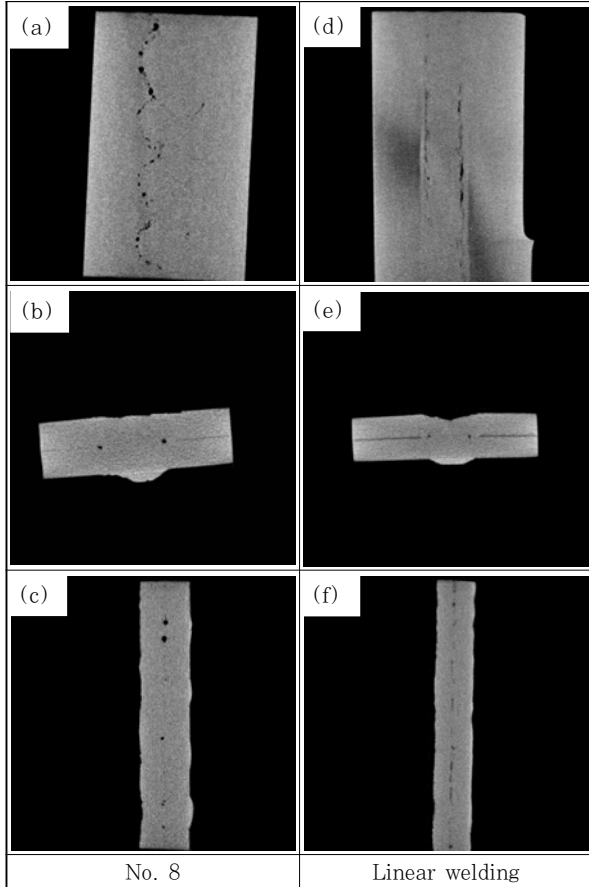
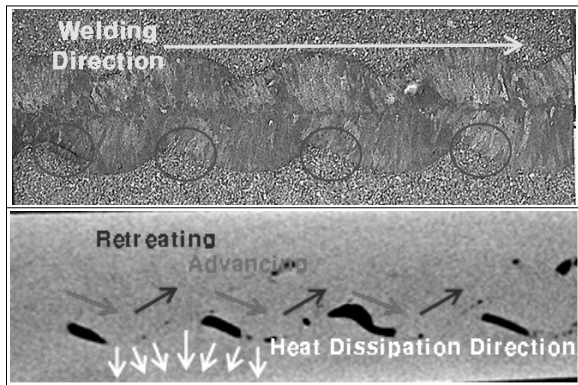


Fig. 3 3D X-ray scans of porosity for no. 1 and 5 specimens: measured on (a, d) x-y plane, (b, e) y-z plane, and (c, f) x-z plane



**Fig. 4** 3D X-ray scans of porosity for no. 8 and linear welding specimens: measured on (a, d) x-y plane, (b, e) y-z plane, and (c, f) x-z plane



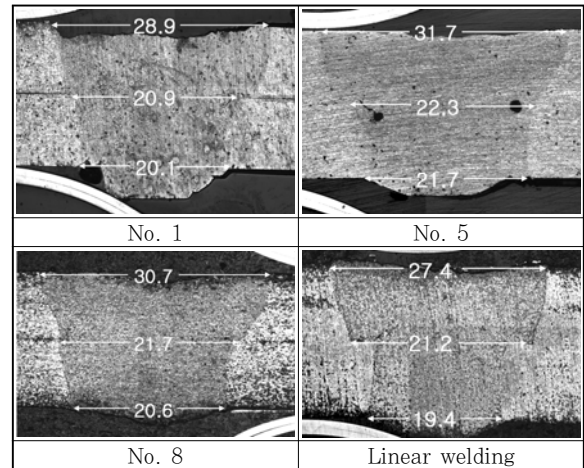
**Fig. 5** Tendency of porosity location as a function of welding direction (No. 5)

높은 입열량을 가지는 곳에서 큰 크기의 기공이 발생함을 알 수 있었다. 기공이 발생하는 부분은 Fig. 5의 매크로 용접부 표면 사진에서 붉은 색 원으로 표기되어 있다. 용접 입열이 크다는 것은 곧 냉각이 다른 부분에 비해 상대적으로 느리다는 것을 의미한다. 그러므로 기

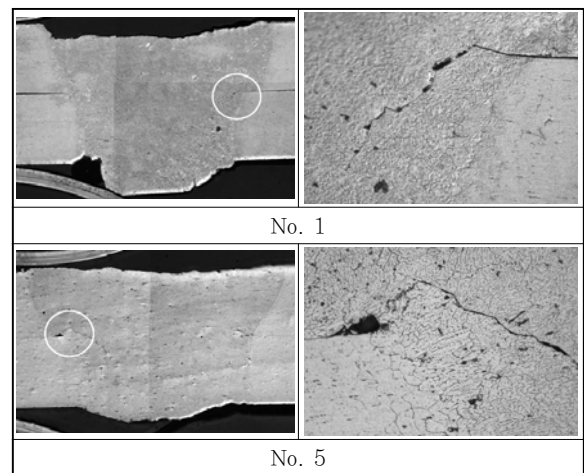
공 발생은 용접 열원에 의해 동시에 용해된 모재 중 냉각 속도가 늦어 가장 늦게 응고된 용접부 부근, 즉 위빙의 오목한 부분에서 더욱 용이하게 발생하는 것으로 판단된다.

### 3.3 위빙용접 변수에 따른 용접부 폭 및 단면 미세조직의 거동

각 시편 용접부의 단면을 상단, 중단, 하단으로 나누어 그 폭을 측정된 결과는 Fig. 6과 같다. 실험 결과 전단인장 강도값이 가장 큰 5번 시편의 용접부 폭이 가장 크게 나타났고, 전단인장 강도값의 순으로 8번 시편의 용접부 폭이 그 다음으로 큰 값을 나타내었으며, 전단인장 강도값이 가장 낮은 1번 시편과 직선용접 시편의 용접부 폭이 가장 좁은 것으로 나타났다. 따라서 전단인장 강도값은 위빙용접 변수에 따라 생성된 용접부의 폭에 비례하는 것으로 판단된다.



**Fig. 6** Measurement of welding width as a function of weaving conditions (mm)



**Fig. 7** Crack propagation on weld cross-section

Fig 7은 전단인장 시험 전 용접부 단면을 마이크로 에칭하여 관찰한 것으로서, 용접부 중단 부분의 모재-용접부 경계면에서 기공 및 크랙을 발견할 수 있었다. 고배율에서 관찰하여 보면 모재의 겹치는 부분에서 응고균열로 판단되는 크랙이 최초로 발생하여 용접부 내의 작은 기공을 따라 크랙이 전파하고 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 6K21-T4 알루미늄 합금의 겹치기 용접부의 용접특성을 평가하기 위하여 모재 및 직선 용접, 위빙 용접 시편의 전단인장 강도를 측정 비교하였다. 위빙 용접 시 위빙 폭 및 주파수를 공정 변수로 하여 이에 따른 전단인장 강도의 변화를 파악하기 위해 3차원 엑스선 비파괴 검사 및 용접부 단면 검사를 통하여 기공 및 크랙을 관찰하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인장강도 측정 결과, 용접부의 인장강도가 모재에 비해 현저하게 낮은 값을 가졌다. 그러나 직선 용접과 위빙 용접을 비교하면 위빙 용접의 경우 더욱 높은 인장강도 결과를 보였다. 위빙 폭 및 주파수에 따라 최적의 용접조건을 구하였으며, 동일 주파수에서는 위빙 폭이 큰 시편이 전단인장 강도특성이 우수하였고, 동일 위빙 폭에서는 주파수에 따라 전단인장 강도값의 뚜렷한 경향을 찾을 수 없었다.

2) 기공 관찰 결과, 전단인장 강도값이 높은 시편에서 기공의 연속성, 즉 기공 발생 빈도가 감소하는 경향이 관찰되었다. 또한 레이저 위빙 시 오목한 부분, 즉 입열량이 가장 큰 부분에서 큰 크기의 기공이 두드러지게 관찰되었으나, 볼록한 부분에는 기공이 없는 건전한 용접부가 생성되어 전반적으로 기공의 연속성이 감소하였다. 결론적으로 위빙 용접 조건을 최적화하여 용접부 폭이 넓어지면 전단인장 강도값이 증가하는 결과를 나타내었다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

1. Hyunsuk Yang, Yong Kim, Kiyoung Park, Gyungdon Lee and Wonho Choi : Overlap Welding Characteristics of 6K21-T4 aluminum Alloy by Nd:YAG Laser, Summary Book of KWS (2007), 171-173 (in Korean)
2. G. Mather : The Welding of Aluminum and its Alloy. Woodhead Publishing Ltd. 2002
3. Hyunsik Lim, Jungho Jo, Cheolhee Kim and Junghan Kim : A Study on the Welding Characteristics of Disk Laser for Aluminum Alloys, Summary Book of KWS (2007), 193-195 (in Korean)
4. Olcay Ersel Canyurt, Hang Rae Kim and Kang Yong Lee : Estimation of Laser Hybrid Welded Joint Strength by using Genetic Algorithm Approach, Mechanics of Materials, **40-10** (2008), 825-831
5. B.E. Peddle and C.A. Pickles : Carbide and Hardness Development in the Heat-Affected Zone of Tempered and Postweld Heat-treated 2.25Cr-1Mo Steel Weldments, Journal of Materials Engineering and Performance, **9-5** (2000), 477-488
6. Y. Kim and H. Park : A Study of Heat Input Distribution on the Surface during Torch Weaving in Gas Metal Arc Welding, International Journal of Korean Welding Society, **4-1** (2004), 23-29
7. Byungsik Ahn, Dongwon Oh and Gwangsu Kim : Effect of Weaving Width in FCAW on the Weld Metal Mechanical Properties, Summary Book of KWS (1988), 115-117 (in Korean)