

레이저 위빙을 적용한 알루미늄 합금 5J32-T4의 용접 균열 저감 및 용접강도 향상에 관한 연구

최 광 덕 · 안 영 남 · 김 철 희

Crack Susceptibility Reduction and Weld Strength Improvement for Al Alloy 5J32-T4 by using Laser Weaving Method

Kwang-Deok Choi, Young-Nam Ahn and Cheolhee Kim

1. 서 론

이산화탄소 배출규제 등 환경문제가 대두 되면서 자동차의 경량화를 위해 알루미늄 합금의 사용이 증가하고 있다¹⁾. 열전도도가 높은 알루미늄 합금의 용접에는 고밀도 에너지를 이용한 레이저용접 등이 적용되고 있으나²⁻⁵⁾, 알루미늄 합금의 용접에서는 고온균열과 같은 결함이 자주 발생한다. 알루미늄합금 용접에서 고온균열을 방지하기 위하여 결정립 구조를 제어하거나 용착금속의 화학 조성을 제어하는 방법들이 제안되어 있다¹⁴⁾. 용착금속의 화학조성을 제어하기 위해서는 모재의 화학 조성을 조정하거나 부가적인 용접와이어 공급이 필요하므로 공정 적용에 제한이 있다. Kou 와 Ye는 GTA 용접을 수행할 때 아크의 오실레이션을 적용하여 결정립 구조를 제어하였으며 이를 통해 용접강도를 증가하는 방법을 소개하였다⁶⁾. 최근 레이저용 스캐너의 적용이 활발해짐에 따라 레이저 용접에서도 레이저의 위빙방법의 적용 결과가 발표되고 있다^{5,16)}.

본 연구에서는 자동차용 알루미늄 합금인 Al 5J32-T4에 레이저 위빙을 적용하여 공정 조건에 따른 균열 감수성과 용접강도를 평가하였다

2. 실험장치

본 연구에서는 4kW급 디스크 레이저와 2축 레이저용 스캐너를 이용하여 레이저 위빙을 구현하였다. 레이저 스캐너는 6축 로봇에 고정하여 사용하였으며 스캐너의 초점거리는 450mm이다. 스캐너는 Fig. 1과 같이 2개의 미러를 고속으로 제어하여 빠른 레이저 위빙 구현이 가능하게 하였다.

적용된 재료는 1mm 두께의 Al 5J32-T4 합금으로 화

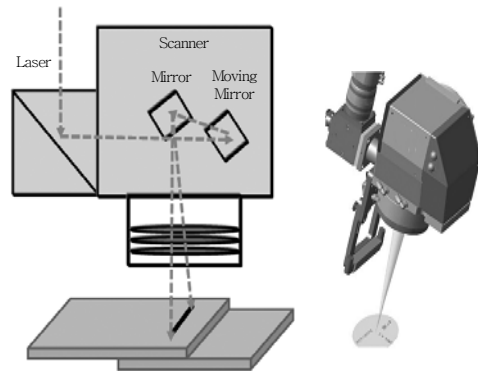


Fig. 1 Schematic diagram of laser scanner system

Table 1 Chemical Composition of Al 5J32-T4 (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.03	0.08	0.33	0.01	5.6	0.01	0.02	RE

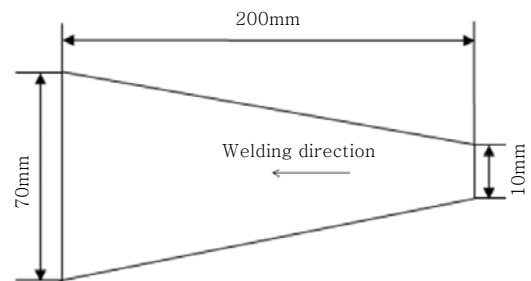


Fig. 2 Schematic diagram of solidification cracking test specimen

학 조성을 Table 1에 나타내었다.

고온균열을 평가하기 위해 Fig. 2와 같은 자기구속형 균열 평가방법을 이용하였다^{12-14,17)}. Fig. 2는 실험에 사

Table 2 Welding conditions of solidification cracking test

Weaving width (mm)	Weaving frequency (Hz)	Laser power (kW)	Welding speed (mm/s)
2	2.5	1.92	50
	5	1.92	
	7.5	1.92	
	15	1.92	
	20	1.92	
4	1	1.92	50
	2.5	1.92	
	5	1.92	
	7.5	1.95	
	15	2.02	
20	2.09		
linear	linear	1.92	50

Table 3 Welding conditions for lap welding

Weaving width (mm)	Weaving frequency (Hz)	Laser power (kW)	Welding speed (mm/s)
2	2.5	3.1	50
	5	3.1	
	7.5	3.1	
	15	3.12	
	20	3.12	
4	1	3.1	50
	2.5	3.1	
	5	3.12	
	7.5	3.13	
	15	3.27	
20	3.33		
linear	linear	3.07	50

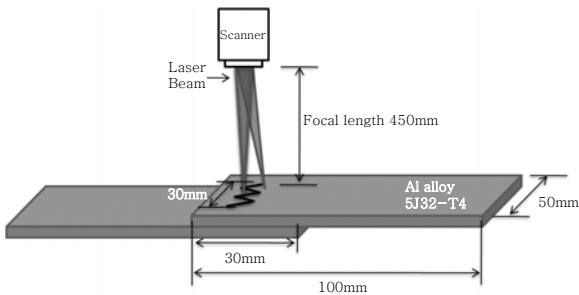


Fig. 3 Schematic diagram of laser lap welding

용한 사다리꼴 시험편의 형상을 나타내고 있으며 용접은 좁은 면에서 넓은 면으로 진행된다. 이때 균열은 용접시작점에서 시작되며 용접방향으로 균열이 진전된다. 레이저 용접 속도는 50mm/s로 고정하였으며, 레이저 출력, 위빙 폭, 위빙 주파수를 변화시켜 용접을 수행하였으며, 용접공정변수는 Table 2와 같다. 발생한 균열의 길이는 X-ray 시험을 통해 측정하였다.

전단인장강도는 겹치기 용접을 수행한 시험편을 이용하여 평가하였으며, 가로길이, 세로길이, 두께가 각각 100mm, 50mm, 1mm인 박판재를 이용하여 Fig. 3와 같이 시험편을 제작하였다. 이 때, 레이저 용접속도는 50mm/s로 고정하였으며, 레이저 출력, 위빙 폭, 위빙 주파수를 변화시켜 겹치기 용접을 수행하였으며 Table 3은 각 실험에 사용한 용접공정변수를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 고온균열의 거동

위빙 폭과 주파수에 따른 고온균열 실험결과를 Fig. 4

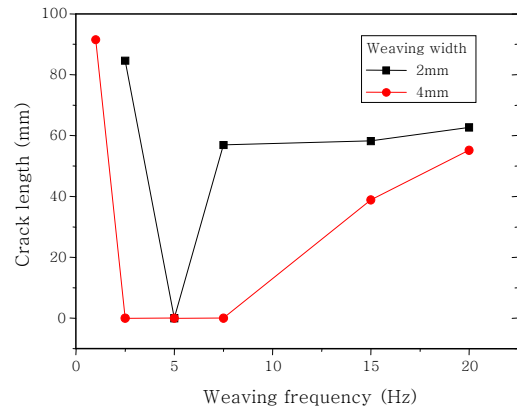


Fig. 4 Measured crack length

에 나타내었다.

직선용접에서 균열이 95.4mm 발생한 것과 비교할 때 위빙을 적용한 경우 균열의 길이가 감소하였다. 위빙 폭이 4mm인 경우에는 2mm인 경우와 비교하여 모든 위빙 주파수에서 짧은 균열이 관찰 되었다. 위빙 폭 2mm인 위빙 용접에서는 위빙 주파수가 2.5Hz일 때 가장 긴 균열 길이가 측정되었으며, 위빙 주파수 5Hz의 실험에서는 균열이 발생하지 않았다. 이후 위빙 주파수가 5Hz보다 더 증가할 때 균열의 길이는 증가하였다. 위빙 폭 4mm인 경우에는 위빙 주파수가 1Hz일 때 가장 긴 균열이 측정되었으며, 이후 2.5Hz, 5Hz, 7.5Hz에서는 균열이 발생하지 않았으며 위빙 주파수가 더 증가할 경우 균열의 길이는 다시 증가하였다. 위빙 폭 2mm, 위빙 주파수 2.5Hz와 위빙 폭 4mm, 위빙 주파수 1Hz인 경우에는 용접부의 형상이 Fig. 5에서 보는 것과 같이 직선 용접부와 유사하여 균열의 길이도 직선 용접과 비슷한 값을 가진다. 위빙의 영향으로 결정립 성장방향이 제어되

Weaving width (mm)	Weaving frequency (Hz)	Top bead	Back bead	X-ray test results
2	25			
	5			
	7.5			
	15			
	20			
4	1			
	2.5			
	5			
	7.5			
	15			
	20			
linear	linear			

Fig. 5 Bead appearance and X-ray test results for crack susceptibility test

므로 특정 위빙 조건에서는 균열 진전이 결정립 구조에 의해 제한되어 균열이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 높은 위빙 주파수 영역에서는 용융지가 중첩되어 비드 폭이 증가하는 효과가 발생하면서 직선 용접부와 유사한 형태의 용접부를 형성하여 다시 균열이 증가하는 원인이 된다. 위빙 폭 4mm인 경우 위빙 폭 2mm인 경우와 비교하였을 때 용융지의 중첩이 감소하므로 균열 발생이 감소하는 것으로 판단된다.

3.2 전단인장강도

전단인장강도 시험에 앞서 각 시편의 비드 형상 사진을 촬영 하였으며, X-ray 시험을 수행하여 Fig. 6에 나

타내었고, 위빙 폭과 위빙 주파수에 따른 전단인장강도 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전단인장 시험 결과 파단은 용융선(fusion line)에서 발생하였다.

위빙 폭이 2mm, 위빙 주파수 5Hz인 경우에 최소 전단인장강도를 가지고 위빙폭 4mm, 위빙 주파수 20Hz에서 최대 전단인장강도를 가진다. 위빙 폭이 4mm일 경우 위빙 폭이 2mm인 경우에 비해 높은 전단인장강도를 가지고 있으며, 이는 Fig. 4에서 확인한 것과 같이 균열 감수성이 낮기 때문이다. 위빙 폭 4mm인 경우 위빙 주파수의 증가에 따라 전단인장강도도 증가하나 위빙 폭 2mm인 경우에는 위빙 주파수 5Hz와 20Hz에서 경향성을 벗어나는 결과를 보인다. 전단인장 시험의 파

Weaving width (mm)	Weaving frequency (Hz)	Top bead	Back bead	X-ray test results
2	2.5			
	5			
	7.5			
	15			
	20			
4	1			
	2.5			
	5			
	7.5			
	15			
	20			
linear	linear			

Fig. 6 Bead appearance and X-ray test results for lap joint welding

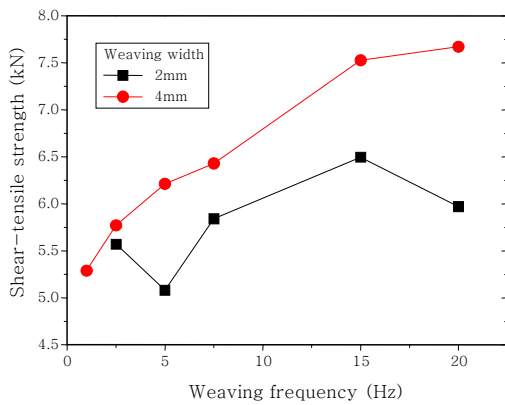


Fig. 7 Measured shear-tensile strength

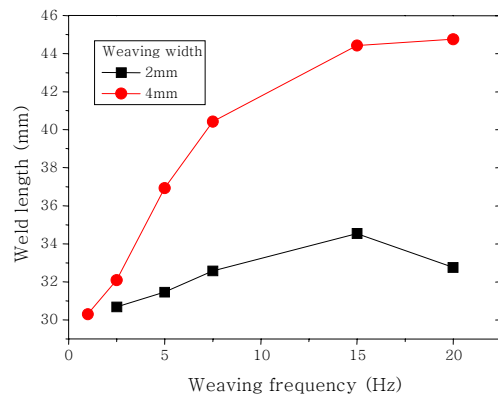


Fig. 9 Measured weld length



(a) Weaving frequency 2.5Hz



(b) Weaving frequency 20Hz

Fig. 8 Measuring weld length

경계면의 넓이의 영향을 평가하기 위해 Fig. 8과 같은 방법으로 상판 표면의 용접길이(weld length)를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 전단인장강도 결과인 Fig. 7과 같이 위빙 주파수가 커질수록 용접길이는 증가하는 경향이 있으나, 위빙 폭 2mm, 위빙 주파수 20Hz에서는 경향성을 벗어나 위빙 주파수 15Hz보다 용접길이가 감소하는 결과를 보여준다. 즉 작은 위빙 폭과 높은 위빙 주파수에서는 용융부의 중첩으로 용접길이가 감소하는 결과가 나타나므로 이에 따라 용착금속과 열영향부와의 경계면의 넓이가 감소하여 전단인장강도의 감소를 유도한 것으로 판단된다

단은 용융선에서 일어나므로 용착금속과 열영향부와의

전단인장강도 곡선에서 특이점이 존재하는 위빙폭 2mm, 위빙 주파수 5Hz 조건에서는 X-ray 실험결과에서 파단이 발생한 영역에서 기공이 관찰되었고 이로 인해 전단인장강도가 감소한 것으로 판단된다. 직선 레이저 용접의 전단인장강도 값은 4.85kN의 값을 가짐과 비교할 때 위빙 용접을 하였을 경우 직선용접보다 높은 값을 가지고 있으며 위빙 용접 프로세스가 용접강도 향상에 도움이 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 5J32-T4 알루미늄 합금 겹치기 용접부의 균열 특성 및 용접강도를 개선하기 위해 레이저 위빙을 적용하였다. 레이저 위빙 용접 시 위빙 폭 및 위빙 주파수를 공정변수로 하여 자기구속형 균열 평가방법으로 고온균열 감수성을 평가하였으며, 맞대기 용접부에 대해 전단인장강도를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고온균열 실험결과 레이저 위빙 적용 시 직선 용접에 비해 균열 감수성이 감소한 것을 확인하였다. 낮은 위빙 주파수에서는 직선 용접과 유사한 용접비드를 형성하여 균열 감수성은 유사하였으나 위빙 주파수를 증가시킬 경우 균열 감수성이 감소하여 균열이 발생하지 않았다. 위빙 주파수를 더 증가시킬 경우에는 위빙에 의해 용융지가 중첩되어 위빙의 효과가 감소하고 다시 균열 감수성은 증가한다.

2) 전단인장강도 측정결과 레이저 위빙의 적용에 따라 직선 용접에 비해 높은 전단인장강도의 확보가 가능하였다. 동일 위빙 주파수에서 위빙 폭이 커질수록 전단인장강도가 증가하는 경향을 보여주었다. 파단이 용융선에서 발생하므로 용접길이가 전단인장강도에 영향을 주었으며 높은 위빙 주파수에서 용융지의 중첩으로 인한 용접길이 감소가 발생할 경우 전단인장강도의 저하가 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. Inaba, K. Tokuda, H. Yamashita, Y. Takebayashi, T. Minoura and S. Sasabe : Wrought aluminum technologies for automobiles, *Kobelco Technology Review*, 26, 2005, 55-62
2. H. Zhao, D. R. White and T. DebRoy : Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys, *International Materials Review*, 44(6), 1999, 238-266
3. M. Kumagai : Recent Technological development in welding

- of aluminium and its alloys, *Welding International*, 17(3), 2003, 173-181
4. S. Ramasamy and C. E. Albright : CO₂ and Nd-YAG laser beam welding of 5754-O aluminium alloy for automotive applications, *Science and Technology of Welding and Joining*, 6(3), 2001, 182-190
5. E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner, C. Walz and G. Sepold : Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry, *Journal of Materials Processing Technology*, 115(1), 2001, 2-8
6. S. Kou and Y. Le : Grain structure and solidification cracking in oscillated arc welds of 5052 aluminum alloy, *Metallurgical Transactions A*, 16A(7), 1985, 1345-1352
7. M. Kutsuna, K. Shido and T. Okada : Fan shaped cracking test of aluminum alloys in laser welding, *Proceedings of SPIE*, 4831, 2003, 230-234
8. M. Sheikhi, F. M. Ghaini, M. J. Torkamany and J. Sabbaghzadeh : Characterisation of solidification cracking in pulsed Nd:YAG laser welding of 2024 aluminium alloy, *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(2), 2009, 161-165
9. J. H. Dudas and F. R. Collins : Preventing weld cracks in high strength aluminium alloys, *Welding Journal*, 45(6), 1966, 241-249
10. W. I. Pumphrey and J. V. Lyons : Cracking during the casting and welding of the more common binary aluminium alloys, *Journal of The Institute of Metals*, 74, 1948, 439-455
11. J. D. Dowd : Weld cracking of aluminum alloys, *Welding Journal*, 31(10), 1952, 448-456
12. J. W. Yoon : Effect of the Mg content on the solidification cracking susceptibility of the Al-Mg alloy laser welds, *International Journal of KWS*, 1(1), 2001, 63-70
13. J. W. Yoon : Solidification cracking susceptibility of Al-Mg-Si Alloy Laser Welds, *International Journal of KWS*, 2(2), 2002, 42-46
14. V. Ploshikhin, A. Prikhodovsky, A. Ilin, M. Makhutin, C. Heimerdinger and F. Palm : Influence of the weld metal chemical composition on the solidification cracking susceptibility of AA6056-T4 alloy, *Welding in the World*, 50(11/12), Doc. IIW-1758-06, 2006, 46-50
15. D. Dittrich, B. Brenner, B. Winderlich, E. Beyer and J. Hackus : Process in laser beam welding of aircraft fuselage panels, *ICALEO 2008 Conference Proceedings*, Paper No. 1804, 2008, 863-871
16. M. Schimek, D. Herzog, D. Kracht and H. Haferkamp : Local effects of bead-on-plate welding seams to increase strength and rigidity of sheet metal construction, *Proceedings of the Fifth International Conference on Laser in Manufacturing 2009*, 2009, 27-32
17. F. Matsuda and K. Nakata : A new test specimen for self-restraint solidification crack susceptibility test of electron-beam welding bead, *Transactions of JWRI*, 11(2), 1982, 87-94



- 최광덕
- 1981년생
- 한국생산기술연구원 용접접합연구부
- 용접공정해석 및 자동화
- e-mail : kdchoi@kitech.re.kr



- 안영남
- 1982년생
- 한국생산기술연구원 용접접합연구부
- 용접시공 및 공정최적화
- e-mail : dksdudsk@kitech.re.kr



- 김철희
- 1973년생
- 한국생산기술연구원 용접접합연구부
- 용접공정해석 및 자동화
- e-mail : chkim@kitech.re.kr