레이저빔 용접과 마찰교반용접을 이용한 6천 및 7천계열 알루미늄 판재 접합부의 인장강도비교

천현필* · 강민정* · 윤진영* · 김철희*,†

*한국생산기술연구원 용접접합그룹

The Tensile Strength Comparison of 6xxx and 7xxx Series Aluminum Sheet Weldment using Laser Beam Welding and Friction Stir Welding Process

Jason Cheon*, Minjung Kang*, Jin-young Yoon*, and Cheolhee Kim*,†

*Joining R&D Group, KITECH, Incheon, 21999, Korea

†Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received April 4, 2019 ; Revised April 15, 2019 ; Accepted April 22, 2019)

Abstract

Due to the high thermal diffusivity and metallurgical sensitivity, the proper welding processes of the aluminum are required. The Laser beam welding and friction stir welding processes have been focused as the appropriated welding processes for aluminum. The heat treated 6xxx series and 7xxx series aluminum sheet were welded by the laser beam welding and friction stir welding processes. Also, the effects of heat input through the welding parameters were investigated. The tensile strength of weldments was evaluated respectively and compared by the processes and heat input level. The insignificant tensile strength differences were found for the 6xxx series by the welding processes. However, the friction stir welded 7xxx series weldments were shown 82~89% joint efficiency while laser beam welded weldment were shown 48~58%. Overall, the effect of heat input level was not revealed in this experiment range. The degradations in hardness of weldments tended to be in proportion to the joint efficiency loss.

Key Words : Laser beam welding, Friction stir welding, Aluminum alloy, Tensile strength, Thermal diffusivity

1. 서 론

알루미늄은 단위 질량당 강도가 높고 내식성이 우수하여 운송기기 등의 경량화를 위한 소재로서 주목 받고 있다. 그러나 알루미늄합금은 열확산율이 상대적으로 높아 용접을 위해서는 높은 입열량을 요구하고 있다. 6천 및 7천 계열의 알루미늄은 가공성, 강도, 내식성이 우수하고 용접성이 나쁘지 않으나, 용접열에 의한 연화와 용접균열 감수성이 높다^{1,2)}. 이에 상대적으로 입열량이 낮은 고밀도에너지를 이용하는 레이저빔 용접에 대한 연구^{3,4)}가 진행 된바 있으며, 알루미늄의 높은 접합효율을 구가하는 용접기법으로 검토되고 있다. 이와

함께 최근 개발된 마찰교반용접은 모재가 가지는 용융점 이하에서 용접을 수행하는 고상용접의 한 방법으로 용융부가 발생하는 기존의 용접기법의 가능성 있는 대안⁵⁾으로 주목 받고 있다. 두 기법은 아크용접 등 전통적인 용접 기법에 비해 낮은 단위입열량을 통해 용접을 한다는 공통점이 있으나, 용융부가 발생하지 않는 마찰교반용접이 좀더 우수한 접합효율을 가질 것을 예상할 수 있다.

이에 본 연구에서는 열처리형 알루미늄 6천 및 7천 계열에 대해서 레이저빔 용접과 마찰교반용접을 통해 접합부를 취득하여 각각의 인장강도를 측정하여 모재와 비교하여 접합효율을 확인하고, 강종별, 용접기법별 특성을 확인하였다.

Table 1 Chemical compositions of applied aluminium alloys [wt.%]

	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Zr	Al
Al6060-T6*	≤0.05	≤0.10	0.10-0.30	0.35-0.60	≤0.10	0.30-0.60	≤0.10	≤0.15	-	Bal.
Al6082-T6*	≤0.25	≤0.10	≤0.50	0.60-1.2	0.40-1.0	≤0.70-1.3	≤0.10	≤0.20	-	Bal.
Al7021-T7**	0.10	0.15	0.13	1.26	0.11	0.07	0.03	5.43	-	Bal.
Al7H01-T7**	0.01	0.46	0.13	12.49	0.17	0.06	0.03	4.77	0.09	Bal.
Al7075-T6*	0.18-0.28	1.2-20	≤0.50	2.1-2.9	≤0.30	≤0.40	≤0.20	5.1-6.1	-	Bal.

*As received, **Measured

2. 사용 재료

열처리형 알루미늄 중 6천계열 2종과 7천계열 3종을 선택하여 실험 및 평가를 진행하였다. 대상 강종과 화학조성은 Table 1과 같다. Al7021-T7과 Al7H01-T7 은 주문제작품으로 화학조성비는 측정치를 표기 하였으며, 나머지는 상용재⁽⁶⁾를 활용하였다. Al7075-T6 는 2 mm의 두께를 가지며, 나머지는 모두 3.3 mm의 두께를 가진다. 용접부 인장강도에 대한 평가의 기준으로 활용하기 위하여 사용재료의 압연방향 인장 강도를 ASTM E8⁽⁷⁾을 준수하여 측정하였다. 측정횟수는 3회이며 평균값을 대표 값으로 하였다. 측정 결과는 Fig. 1과 같다.

3. 실험 방법 및 측정 방법

3.1 레이저빔 용접

비드 온 플레이트(Bead On Plate, 이하 BOP)레이저빔 용접(Laser Beam Welding, 이하 LBW) 에서 사용한 레이저는 최대 출력 3 kW의 Yb:YAG 파이버 레이저(YLS-3000, IPG)이며, 파이버의 직경은 200 μm ,

Fig. 1 Results of tensile test

초점거리는 200 mm, 초점의 직경은 245 μm 이다. 빔은 전진각 3°가 되도록 설정하였으며, 모재의 표면에 빔이 조사되도록 위치를 조정하였다. N₂ 보호가스를 용접부 상면과 배면에 15 l/min으로 공급하였다. 실험환경은 Fig. 2(a)에 도시하였다.

단위입열량은 레이저빔 출력을 용접속도로 나눈 값으로 단위길이당 입열량을 의미하며, 동일한 용접 공정간의 모재에 투입된 에너지의 상대비교를 위해 사용하였다. 단위입열량에 따른 인장강도의 비교를 위하여, 출력을 2.5 kW로 고정하고 용접속도를 변수로 하여 용락 없는 완전용입 공정영역을 확보하였다. 제작된 시험편을 대상으로 3회 반복하여 인장강도를 측정하였다.

3.2 마찰교반용접

마찰교반용접(Friction Stir Welding, 이하 FSW)에 사용한 마찰교반용접기(F1300, 화천)는 최대 스핀들 속도 6000 rpm, 모터출력 25 kW의 성능을 가진

Fig. 2 Experimental setup of (a) LBW and (b) FSW process, (c) tool shape of FSW process

다(Fig. 2(b)). FSW용 톨은 SKD61 공구강으로 제작되었으며 14 mm의 솔더 직경을 가지는 concave 형상으로, 마찰력증대를 위해 솔더에는 나사산형상을 가진다(Fig. 2(c)).

완전용입된 LBW 용접시편과의 상대적인 비교를 위하여 FSW의 목표공정조건은 BOP에서 스타트 영역(Stirred Zone, 이하 SZ)이 모재의 배면까지 생성될 수 있도록 하는 것이다. 이를 만족하기 위하여 톨 삽입 깊이를 위치제어를 통해 결정하였다. 톨 회전축의 각은 3°를 유지하였다. 고정된 출력에서 용접속도의 조절로 유의미한 단위입열량을 결정할 수 있는 LBW와 달리 FSW는 결함 없는 품질을 달성할 수 있는 이송속도 영역이 좁고, 단위입열량의 대부분이 톨의 회전속도에 의해 결정된다⁸⁾. 따라서 이송속도를 1.0 m/min와 0.8 m/min으로 고정하고, 결함이 발생하지 않는 3수준의 톨의 회전속도로 용접한 시편을 평가 하였다.

3.3 측정방법

인장강도 측정을 위한 LBW와 FSW 시편은 모재의 측정기준인 ASTM E8을 준수하였다. 각 강종별, 공정조건당 3회의 반복측정을 하였으며 평균값을 대표 값으로 선택하였다. 용접부 단면경도는 미소 비커스 경도시험기를 통해 측정하였으며 0.05 kgf의 가압을 10초간 유지하였다. 단면경도 측정은 용접부 두께 방향 중심을 폭 방향으로 관통하는 분포를 취하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 공정가능영역 및 비교공정조건

LBW의 강종별 공정가능영역을 Fig. 3(a)에 열확산율^{6,9,10)}과 함께 도시하였다. 열확산율은 열전도계수를 밀도와 비열로 나눈 값으로 재료가 겪는 온도구배에 대해 얼마나 열을 빨리 손실할 것인가를 의미한다. 만약, 재료별 용융열의 차이가 크지 않다면, 열확산율이 높은 재료는 완전용입을 위해서 많은 단위입열량을 요구하게 될 것이다.

Al7H01-T7의 경우 열확산율을 확인할 수 없어 별도로 표기 하였다. 실험에 사용한 강종의 체적당 용해열의 범위는 1.06~1.11 J/mm³으로 유의차가 크지 않은 반면, 열확산율은 넓은 범위를 가지며, 공정이 가능한 단위입열량의 범위는 열확산율과 비례하는 경향을 보인다. 이는 알루미늄에 대한 LBW 공정에서 유의미한 양의 에너지가 열전도를 통해 소모되며, 강종이 가지는 열확산율에 비례하여 필요 단위입열량이 결정됨을 의미한다. 공정가능 단위입열량과 열확산율의 비례관계

Fig. 3 (a) Thermal diffusivity of material vs. heat input per unit length range for target condition of LBW (b) FSW target condition range of Al7075-T6

를 볼 때, Al7H01-T7의 열확산율은 Al7021-T7과 Al6082-T6사이의 값(59~66 mm²/s)을 가지는 것으로 추정된다.

Al7075-T6의 경우 2.5kW 출력에서 다량의 스패터가 발생하면서 표면에서의 언더필이 심하게 형성되어, 2 kW 출력조건으로 목표 공정조건을 달성하였다. 이와 유사한 경향은 FSW 공정에서도 발생하였다. Al7075-T6을 제외한 모든 강종에서 2000 rpm 회전속도에서 목표공정이 가능하였으나, Fig. 3(b)와 같이 Al7075-T6은 1500 RPM 이상에서 모재용융이 발생하였다. 이는 Al7075-T6이 가지는 낮은 열확산율로 인한 열의 누적에 기인하는 것으로 보인다.

상술한 공정가능영역을 기반으로 LBW와 FSW의 시편 인장강도를 비교하기 위한 3수준 공정조건은 Table 2와 같이 설정하고 해당 조건의 결과를 평가 하였다. 일부 강종에 대한 용접시편의 단면을 Fig. 4에 도시하였다.

4.2 용접시편의 인장강도

알루미늄합금의 O재는 판재를 제조한 상태를 어닐링하고 재 결정시킨 것을 의미한다. 기계적 강성을 향상

Table 2 Experimental conditions for LBW and FSW process comparisons

LBW			Material (thickness) [mm]	FSW		
Power [kW]	Lv.	Welding speed [m/min]		Travel speed [m/min]	Lv.	Rotational speed [rpm]
2.5	1	1.25	Al6060-T6 (3.3)	1.0 0.8	1	2000
	2	1.50			2	1500
	3	1.75			3	1000
	1	1.50	Al6082-T6 (3.3)		1	2000
	2	1.75			2	1500
	3	2.00			3	1000
	1	3.25	Al7021-T7 (3.3)		1	2000
	2	3.50			2	1500
	3	3.75			3	1000
	1	2.50	Al7H01-T7 (3.3)		1	2000
	2	2.75			2	1500
	3	3.00			3	1000
2	1	4.25	Al7075-T6 (2.0)	1.0	1	1200
	2	4.5		0.8	2	1000
	3	4.75		0.6	3	800

Fig. 4 Cross-sections of Al6060-T6 and Al7075-T6 weldments

시킬 목적으로 열처리를 진행하는데, 6천계열 및 7천계열의 T6재는 고용화처리후 인공시효한 것을 의미하며, T7재는 고용화 처리후 과시효를 통해 안정화 처리 한 것을 의미한다. 열처리를 통해 상승한 기계적 강성의 상승분의 일부 혹은 전부는 용접공정을 통해 소실되기 때문에, 용접시편의 인장강도는 O재의 인장강도와 비교의 대상이 된다.

6천계열에 대한 용접기법 및 조건별 인장강도의 결과는 Fig. 5에 도시하였다. Al6060-T6 의 경우 파단은 LBW에서 용융부 (Fusion Zone, 이하 FZ), FSW에서 SZ 및 열영향부 (Heat Affected Zone, 이하 HAZ)에서 발생하였다. LBW와 FSW 모두 모재의 60% 수

Fig. 5 Tensile test results of (a) Al6060-T6 and (b) Al6082-T6 by welding process and condition

준의 인장 강도를 달성하였으며 이는 Al6060-O재 수준의 인장강도⁶⁾와 동일하다.

아울러 최대 단위입열량 조건이 최소 단위입열량 대비 40%가 많으나, 단위입열량 수준에 따른 인장강도의 경향성은 확인되지 않았다. 이는 선택한 공정 조건에서 열처리로 향상시킨 인장강도의 향상량이 용접공정을 통해 모두 제거되었으며, 선택한 공정 조건의 최소 단위입열량으로도 열처리의 효과가 모두 제거되었다는 것을 의미한다. 아울러, FZ를 가지는 LBW와 그렇지 않은 FSW가 유사한 결과를 보인 것은 FZ의 연화량이 FSW 공정에서 발생하는 연화 정도와 상응하는 수준임을 의미한다.

Al6082-T6에 대한 LBW 용접시편은 FZ 및 HAZ에서 파단이 발생하였으며, 단위입열량이 높은 1.5 m/min에서는 HAZ에서만 파단이 되었다. 전체적인 인장강도는 FSW보다 LBW가 높은 값을 기록하였으나 차이는 15 MPa 수준으로 역시 유의미하다고 볼 수는 없다. Al6060-T6와 동일하게 단위입열량에 의한 인장강도의 경향은 확인되지 않았다. 반면, O재 수준으로의 인

Fig. 6 Tensile test results of (a) Al7021-T7, (b) Al7H01-T7 and (c) Al7075-T6 by welding process and condition

장강도 하강은 발생하지 않았다.

7천계열에 대한 측정결과는 Fig. 6에 도시하였다. 7천계열은 모두 파단이 LBW는 FZ에서, FSW는 SZ 및 HAZ에서 발생하였다. 세 강종 모두 LBW는 모재대비 48~58% 수준의 인장강도를 달성하였으나, Al7H01-T7을 제외하고는 O재 보다 높은 인장강도가 확보되었다. 반면, FSW는 모재대비 82~89% 수준의 인장강

도를 달성하였다. 7천계열 역시도 단위입열량 수준에 따른 인장강도의 경향성을 확인 할 수 없었다.

위치별 연화 정도를 확인하기 위하여 LBW는 2수준(Lv. 2) 시편의 단면경도를, FSW는 이송속도 0.8 m/min에서 2수준(Lv. 2) 시편의 단면경도를 측정하여 Fig. 7(a)와 (b)에 각각 도시하였다.

Al6060-T6는 연화영역(FZ, SZ, HAZ)에서 두 용접기법 모두 유사한 경도의 하락이 관찰되었으며, LBW의 FZ에서, 그리고 FSW의 HAZ에서 조금 더 낮은 경도가 측정되었다. Al6082-T6의 경우에도 유사한 경도 하락을 확인 할 수 있었는데, LBW의 경우 HAZ에서 가장 낮은 경도를 기록하였으며, 이것이 HAZ에서의 파단이 원인으로 판단된다. 전반적으로 Al6060-T6의 경도하락보다, Al6082-T6의 경도하락폭이 낮은 편인데, Al6082 소재에 포함되어 있는 Mg, Si와 같은 강화상 형성 원소의 양이 상대적으로 높기 때문으로 판단된다.

반면 7천계열의 경우 LBW의 FZ에서 상대적으로 큰 경도하락을 기록하였다. FSW의 SZ와 HAZ에서는 LBW의 HAZ의 경도 값과 유사한 수치를 기록하였다. FZ에서의 경도가 하락이 가장 큰 Al7075-T6가 동일시편(4.50 m/min)에서 가장 낮은 47%의 접합효율을 보였으며, 상대적으로 낮은 경도하락을 기록한 Al7021-T7의 시편(3.50 m/min)에서 가장 높은 55%의 접합효율을 보였다. 본 연구에서 적용한 두 용접기법과 강종에서의 접합효율은 경도하락 수준과 유의미한 상관관계를 가지는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 열처리형 6천계열 알루미늄 2종과, 7천계열 알루미늄 3종에 대해서 각각 레이저빔 용접과 마찰교반용접을 수행하고 각 용접시편이 가지는 인장강도를 측정하여 비교하고 평가 하였다. 실험에 사용한 소재에 대해 아래와 같이 결과를 정리 할 수 있다.

1) 열처리형 6천 및 7천계열 알루미늄의 완전용입을 위한 레이저빔 용접에서 필요한 단위입열량은 해당 강종이 가지는 열확산율에 비례한다.

2) 모든 실험에서 단위입열량과 인장강도에 대한 경향성은 확인되지 않았다. 이는 실험에 사용한 가장 낮은 단위입열량에서도 충분한 재료의 열화가 발생하였기 때문으로 추측된다.

3) 6천계열의 알루미늄은 레이저빔 용접과 마찰교반용접을 이용하여 얻은 용접시편의 인장강도는 유사한 수준으로 측정되었다. 두 기법 모두 Al6060-T6는 모재대비 60%, Al6082-T6는 모재대비 87% 수준을 달성하였다.

Fig. 7 Hardness distributions on the (a)LBW weldment of 2nd level experiment condition (Lv. 2) and (b)FSW 0.8 m/min 2nd level experiment condition (Lv. 2) weldment

4) 7천계열의 알루미늄은 레이저용접을 수행하여 얻은 용접시편의 접합효율은 48~58% 수준이며, 마찰교반용접의 경우 82~89% 수준을 달성하였다.

5) 모재의 용융을 거치지 않는 고상용접인 마찰교반용접의 접합부는 레이저빔 용접 대비 7천계열 알루미늄에서만 상대적으로 우수한 인장강도를 보인다.

열처리로 기계적 강성이 강화된 6천 및 7천계열 알루미늄 판재에 대해서 모재가 용융 및 고화를 거치는 레이저빔 용접에 의한 접합효율 보다 고상접합의 한 방법인 마찰교반용접이 전체적으로 우수한 접합효율을 보일 것으로 기대하였으나, 7천계열 알루미늄에서만 마찰교반용접이 우수한 접합효율을 보이는 반면, 6천계열 알루미늄에서는 동등한 수준의 접합효율을 보였다.

ORCID: Jason Cheon: <http://orcid.org/0000-0003-2271-2511>
 ORCID: Minjung Kang: <http://orcid.org/0000-0003-1894-4301>
 ORCID: Jin-young Yoon: <http://orcid.org/0000-0001-6362-3086>
 ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>

References

1. Hu B, Richardson IM, Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminium alloys, *Mater Sci Eng A*, 429 (2006), 287-294
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.040>

2. Hu B, Richardson IM, Microstructure and mechanical properties of AA7075 (T6) hybrid laser/GMA welds, *Mater Sci Eng A*, 459 (2007), 94-100
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.094>
3. Kim C-H, Ahn Y-N, Lim H-S, Laser welding of automotive aluminum alloys, *Journal of KWJS*, 29(4) (2011), 21-26
4. Yoon J-W, Laser Welding of Aluminum Alloys, *Journal of KWJS*, 18(2) (2000), 20-26
5. Yeon Y-M, Jung S-B, Chang, W-S, Application of Friction Stir Welding to Aluminium Alloys, *Journal of KWJS*, 19(2) (2001), 23-29
6. Cuberly WH, Metals Handbook Ninth Edition - Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. *American Society for Metals*, (1979), 114-130
7. ASTM E8, Standard test methods for tension testing of metallic materials, Annu B ASTM Stand ASTM, (2001)
https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16A
8. Melendez M, Tang W, Schmidt C, et al, Tool forces developed during friction stir welding, *NASA Marshall Space Flight Center Report*, (2003)
9. KWJS, Welding and Joining Handbook, I. Steel and non-ferrous materials, *The Korean Welding and Joining Society*, (2008), 307-310
10. ASM Material Data Sheet In, Online, http://asm.matweb.com/search/Specific_Material.asp?bassnum=ma6061t6 (for Al6060-T6), http://asm.matweb.com/search/Specific_Material.asp?bassnum=MA7075T6 (for Al7075-T6) (2018)