

마찰교반 용접변수에 따른 알루미늄 압출판재의 인장특성 평가

임병철¹, 김영문¹, 김원섭¹, 박상흠^{2*}

¹공주대학교 일반대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Evaluation on Tensile Characteristics of Extruded Aluminum Panel Joints by Friction Stir Welding Parameters

Byung-Chul Lim¹, Young-Moon Kim¹, Won-Seop Kim¹, Sang-Heup Park^{2*}

¹Division of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

²Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

요약 Al 6061-T6를 사용하여 마찰교반 용접 시 회전 톨 숄더의 너비부의 넓이와 회전 속도, 이동속도의 변화에 따른 물성의 변화에 대하여 평가되었다. FSW 공정의 집합 변수에 따라 인장시험을 수행하기 위하여 KS B 0801 5호에 따라 시험편을 제작하여 마찰교반 용접을 시행하였다. 마찰교반 용접이 된 시험편의 기계적 특성을 평가하기 위해 Instron 인장시험기를 사용하여 1mm/min의 시험 속도로 인장시험을 시행했다. 평가결과, 인장강도는 회전 속도가 증가함에 따라 증가 하였다. 톨 숄더의 이동 속도가 빠를수록 톨 유형에 관계없이 인장강도는 감소하였다. 톨 숄더 직경 12 mm (TSD12)의 인장 강도 값은 일반적으로 8mm 보다 높게 나타났다. 이동 속도와 회전하는 속도가 한계 값을 초과하면 재료의 특성에 영향을 주지 않고 안정화 단계에 도달한다. 톨 숄더 직경 8mm (TSD8)는 TSD12 유형의 공구와 비교하여 재료 특성이 감소하고 용접 영역에서 재료가 완전히 혼합되지 않는다. 인장 강도 값은 모든 회전 속도 1500 rpm에서 상대적으로 감소한다. 이동 속도가 낮을수록 같은 회전수에서 재료의 혼합될 수 있는 양이 많으므로 인장강도값이 높게 나타난다. 결과적으로 용접 영역에서 재료를 완전히 혼합하고 전이 온도에 도달하기 위해서는 임계값을 초과하는 회전 속도가 필요하다.

Abstract The changes in the mechanical properties according to the width of the tool shoulder, rotation speed and moving speed in friction stir welding (FSW) are evaluated using Al 6061-T6. The results indicated that the tensile strength value increases with increasing rotation speed. The higher the moving speed of the tool shoulder, the lower the tensile strength, regardless of the tool type. A higher tensile strength value was generally obtained with a tool shoulder diameter of 12mm (TSD12) than with 8mm. When the moving and rotation speeds exceed a limiting value, a stabilization stage is reached, in which (the tool shoulder diameter?) no longer affects the material properties. At a tool shoulder diameter of 8mm (TSD8), the material properties are decreased and the mixture of material in the welding area is incomplete in comparison with the tool type of TSD12. The tensile strength value is decreased at a rotation speed of 1500 rpm. As a result, a rotation speed higher than the threshold value is needed in order for and the transition temperature to be reached, which allows the complete mixing of the material in the welding area.

Keywords : Al 6061-T6, Friction Stir Welding, FSW, Tensile strength, Tool Shoulder

1. 서론

마찰교반용접은 2개의 물체를 마찰시켰을 때 발생하

는 발생열을 이용한 마찰접합의 일종으로 1991년 영국의 (The Welding Institute, TWI)에서 특허 출원한 이후 항공이나 조선과 같은 수송기계 산업분야의 적용에 그

본 논문은 산업통상자원부, 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행 되었음. (no. 20161520101490)

*Corresponding Author : Sang-Heup Park(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9283 email: weldpark@kongju.ac.kr

Received August 30, 2017

Revised (1st January 16, 2018, 2nd February 28, 2018)

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

Table 1. Mechanical characteristics of base metal

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Al 6061-T6	≥335	≥359	≥10	≥125

Table 2. Chemical compositions of base metal and filler metal [wt%]

	Si	Mn	Mg	Cu	Cr	Fe	Al
Al 6061-T6	0.58	0.12	1.1	0.22	0.20	0.35	Bal.

관심이 매우 높아지고 있다[1]. 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)이란 나사산 형태의 돌기(probe)를 가지는 비소모성 공구(tool)를 고속으로 회전시키면서 피 접합재에 삽입하면 공구와 피 접합재간의 상호마찰에 의해 열이 발생하며, 이러한 마찰열에 의해 공구 주변의 재료는 연화되며 공구의 교반에 의한 재료의 소성유동으로 접합면 양쪽의 재료들이 강제적으로 혼합되는 원리로 피 접합재의 용접이 이루어지는 것을 말한다[2]. 따라서 이에 대한 대안으로 강선에 비하여 비강도가 높아 경량화에 의해 고속화가 가능하며, 추진용 연료의 절감, 높은 내식성에 의한 유지 보수가 용이하고 폐선 시 재활용이 가능하여 환경 친화적인 재료로 알루미늄 합금에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다. 지금까지 마찰교반용접 기술에 관한 연구는 틀 설계와 같은 공정에 관한 연구가 주로 이루어져 왔으나, 최근들어 접합된 재료의 기계적 특성이나 부식 특성 등에 관한 관심이 고조되고 있다 [3][4]. 그러나 아직까지 교반속도나 용접속도와 같은 접합조건에 따른 최종 접합재의 기계적 특성에 관한 연구는 절적 또는 양적으로 많은 보고가 이루어져 있지 않다.

본 연구에서는 고강도 시효 경화재인 알루미늄 6061-T6 합금 압출판재를 사용하여 마찰교반 용접 시 회전 틀 솔더 폭, 회전속도 및 이동속도의 변화에 따른 물성의 변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 고강도 시효 경화재인 알루미늄 6061-T6에 대한 기계적특성과 화학조성은 Table 1 과 Table 2에 각각 나타내었다. 합금 압출판재를 마찰교반 용접 시, 회전 틀의 솔더 폭의 넓이를 변화에 따른 물성치의 변화를 측정하고자 틀 솔더 폭(tool shoulder diameter) 12mm (TSD12)와 8mm(TSD8)로 제작하였

다. Fig. 2는 2가지의 틀 Shape의 제작도면을 나타내었다. FSW 공정의 접합 변수에 따라 인장시험을 수행하기 위하여 KS B 0801 5호에 따라 시험편을 제작하였다. 마찰교반용접이 된 시험편의 기계적 특성을 평가하기 위해 Instron 4206 인장 시험기를 사용하여 1mm/min의 시험 속도로 인장시험을 행하였다.



Fig. 1. Tool shape of FSW

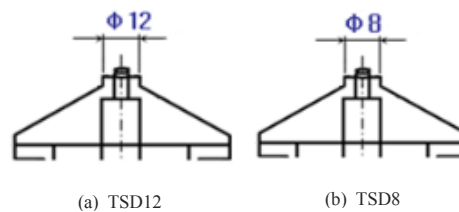


Fig. 2. Two types of tool shape

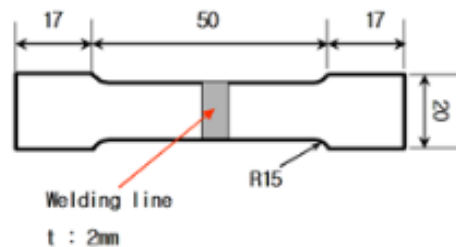


Fig. 3. Tensile specimen

Table 3. TSD12 Moving Speed Y-Axle 50rpm Condition - Tensile Strength

rpm	Tensile Test Results (MPa)			
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.
1500	103	135	105	114.3
1800	164.7	163.6	156.2	161.5
2000	155	175.5	184.3	171.6
2300	167.5	159.1	152.9	159.8
2500	202.1	195.3	193.6	197.0

Table 4. Tensile Test Result Of Tool Rotating Speed 2600rpm & Different Moving Speed

speed (rpm)	TSD12 Tensile Test Results (MPa)				TSD8 Tensile Test Results (MPa)			
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.
250	202.2	183.4	201.11	195.6	171.7	167.8	174.6	171.4
300	194.5	180.9	181.3	185.6	161.4	180.2	172.6	171.4
350	182.5	179.6	191.8	184.6	174.3	172.2	162	169.5
400	149.7	174.4	184.8	169.6	116	98	152	122.0

Table 5. Tensile Strength Of Moving Speed 350rpm & Different Tool Rotating Speed Tool

speed (rpm)	TSD12 Tensile Test Results (MPa)				TSD8 Tensile Test Results (MPa)			
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.
2600	182.5	179.6	191.8	184.6	174.3	172.2	162	169.5
2800	170.8	198.7	196	188.5	155	177	187	173.0

Table 6. Tensile Strength Of Moving Speed 400rpm & Different Tool Rotating Speed Tool

Z RPM	TSD12 Tensile Test Results (MPa)				TSD8 Tensile Test Results (MPa)			
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.
2600	149.7	174.4	184.8	169.6	116	98	152	122.0
2800	160.4	172.2	189	173.9	184.7	188.9	181.7	185.1

Table 7. Tool Rotating Speed 1500rpm & Different Moving Speed

Y RPM	TSD12 Tensile Test Results (MPa)			
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Avg.
50	103	135	105	114.3
70	116.4	122.4	112.6	117.1
100	90	80.8	135.7	102.2
120	94	110	72	92.0

3. 실험분석 및 결과

TSD12를 이용하여 이동 속도를 50rpm으로 고정하고 회전속도를 1500rpm에서 2500 rpm으로 증가하였을 때 인장강도 변화를 측정된 결과 회전수가 증가할수록 인장강도 값이 증가하는 경향을 나타냈다. Table 3과 같이 1500 rpm의 경우 인장시험 시 114.3MPa로 낮은 인장강도 값이 나왔으며 2500rpm의 경우 인장시험 시 인장강도가 197 MPa로 높은 인장강도 값이 나타났다. 그리고

Fig. 4와 같이 인장시험 시편은 모두 모재에서 파단되었다. 마찰교반 용접중 피접합체에 가해지는 입열량으로 인해 가공경화 효과가 감소하여 인장강도가 떨어진 것으로 판단된다[5].

Table 4와 같이 회전수를 2600rpm으로 고정하고, 이동속도를 250rpm에서 400rpm으로 변화하였을 때 각각의 회전 톨에 대한 인장강도 변화를 측정된 결과 이동속도 증가에 따라 인장강도의 값은 두 가지 회전 톨 모두 감소하였으며, TSD12의 인장강도 값이 TSD8의 강

도에 비해 일반적으로 높게 나타났다. 이는 솔더가 접촉하는 면적이 넓을수록 모재에 보다 많은 마찰열을 공급할 수 있어 원활한 재료의 혼합을 이루어 높은 물성 값을 나타내는 것으로 알 수 있다. 그리고 이동 속도가 낮을수록 회전수에서 재료의 혼합될 수 있는 양이 많으므로 인장강도 값이 높은 것으로 판단된다.

이동 속도를 350rpm으로 고정하고 회전수를 변화시켰을 때, 회전 톨 별 인장강도의 변화를 측정하고 결과 Table 5와 같이 회전 속도 변화에는 인장강도 값에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다. 이는 속도 및 회전수가 어느 한계 값을 넘어가게 되면 모재의 혼합이 안정화 단계로 넘어가면서 물성 값에 더 이상 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

Table 6는 이동 속도를 400rpm으로 고정하고 회전수를 변화시켰을 때 물성 값의 변화를 측정하고 결과이다. TSD8이 2600rpm 회전에서 낮은 인장강도 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 이 조건에서 TSD8은 용접부에서 재료의 완전한 혼합을 이루지 못하여 물성치가 낮게 되는 것으로 유추할 수 있다. 마찰교반용접에서 이동속도와 회전수는 물성치에서 중요한 인자이며, 또한 회전 톨의 솔더부의 넓이도 중요 변수가 됨을 알 수 있다. 회전 톨 솔더부의 넓이가 너무 좁게 되면 모재에 충분한 열을 공급하지 못하게 되고, 두 모재가 서로 혼합될 수 있는 전이 온도까지 올라가지 못하게 되어 용접부의 불충분한 재료의 혼합이 이루어져 낮은 물성치를 가지게 되는 것으로 판단된다.

TSD12 회전 톨을 이용하여 비교적 낮은 회전수인 1500rpm에서 이동속도에 따른 인장강도의 변화를 측정하고 결과 회전수가 1500rpm일 경우 이동속도가 증가함에 따라 인장강도의 값이 감소하는 결과를 나타냈다. 회전수가 1500 rpm에서는 Table 7과 같이 모든 속도에서 비교적 낮은 인장강도 값을 나타내었다. 이는 낮은 회전수에서는 충분한 마찰열이 발생되지 않아 용접부에 재료의 혼합이 잘 이루어지지 않아 낮은 인장강도 값으로 나타나는 것으로 판단된다. 회전수가 어느 이상이 되지 않을 경우 충분한 재료의 혼합 시간을 주기 위해 이동속도를 낮추어도 인장강도 값을 올리지 못함을 알 수 있다. 용접부의 재료가 충분히 혼합되기 위한 전이 온도 이상이 되기 위해서는 어느 임계값 이상의 회전수가 필요함을 유추할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 6061-T6 합금 판재를 사용하여 마찰교반 용접시 회전 톨 솔더의 너비부의 넓이와 회전속도, 이동속도의 변화에 따른 물성의 변화에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 회전 톨의 솔더부의 넓이가 넓을수록 모재에 보다 많은 마찰열을 공급할 수 있어 Tip 회전 시 원활한 재료의 혼합을 이루어 높은 물성 값을 나타내었다.
- 2) 이동 속도가 낮을수록 같은 회전수에서 재료의 혼합될 수 있는 양이 많으므로 인장강도 값이 높다.
- 3) 회전수가 높을수록 인장강도 값은 증가하였으나, 1800rpm을 넘어가면 안정화 단계로 가면서 물성 값에 더 이상 영향을 주지 않는다.
- 4) 회전 톨 솔더부의 넓이가 너무 좁게 되면 모재에 충분한 열을 공급하지 못하게 되고, 두 모재가 서로 혼합될 수 있는 전이 온도까지 올라가지 못하게 되어 용접부의 불충분한 재료의 혼합이 이루어져 낮은 물성치를 가지게 된다.
- 5) 낮은 회전수에서는 충분한 마찰열이 발생되지 않아 용접부에 재료의 혼합이 잘 이루어지지 않아 낮은 인장강도 값으로 나타난다.

References

- [1] H. I. Dawood, K. S. Mohammed, M. Y. Rajab "Advantages of the green solid state FSW over the conventional GMAW process", *Advances in Materials Science and Engineering*, pp. 1-10, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/105713>
- [2] Friction Stir Welding - Process variants and developments in the automotive industry, By W M Thomas, S W Kallee, D G Staines and P J Oakley, TWI Ltd Paper presented at 2006 SAE World Congress, 3-7 April 2006, Cobo Center, Detroit, Michigan, USA.
- [3] K. P. Mehta, V. J. Badheka "Influence of tool design and process parameters on dissimilar friction stir welding of copper to A6061-T651 joints", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, no. 9-12, pp. 2073-2082, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7176-1>
- [4] K. P. Mehta, V. J. Badheka "Effects of tool pin design on formation of defects in dissimilar friction stir welding", *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 513-518, 2016. process. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protec.2016.03.057>

- [5] A.A.M da Silva, E. Arruti, G. Janeiro, E. Aldanondo, P. Alvarez, A. Echeverria, "Materials flow and mechanical behavior of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminum alloys," *Materials and Design*, vol. 32, no. 4, pp. 2021-2027, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.059>

임 병 철(Byung-Chul Lim)

[준회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (박사과정)

<관심분야>

육성용접, 레이저용접

김 영 문(Young-Moon Kim)

[준회원]



- 2010년 2월 : 군산대학교 전기전자제어공학 (공학사)
- 2015년 3월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (석사과정)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 범한정수선임 연구원

<관심분야>

플랜트 시공 및 용접, 비파괴 검사

김 원 섭(Won-Seop Kim)

[준회원]



- 2018년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2018년 2월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

육성용접

박 상 흠(Sang-Huep Park)

[정회원]



- 1984년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 단국대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

용접시공 및 용접 자동화, 비파괴 검사