

알루미늄 합금재의 마찰교반용접 유한요소해석에 관한 연구

이대열*, 박경도*, 강대민**,#

*부경대학교 기계공학과 대학원, **부경대학교 기계공학과

A Study on the Finite Element Analysis in Friction Stir Welding of Al Alloy

Dai Yeal Lee*, Kyong Do Park*, Dae Min Kang**,#

* Graduated school, Dept. of Mechanical Engineering, PKNU,

** School of Mechanical Engineering, PKNU

(Received 22 June 2015; received in revised form 21 July 2015; accepted 27 July 2015)

ABSTRACT

In this paper, the finite element method was used for the flow and strength analysis of aluminum alloy under friction stir welding. The simulations were carried out using Sysweld s/w, and the modeling of the sheet was executed using Unigraphics NX6 s/w. The welding variables for the analysis were the shoulder diameter, rotating speed, and welding speed of the tool. Additionally, a three-way factorial design method was applied to confirm the effect of the welding variables on the flow and strength analysis with variance analysis. From these results, the rotating speed had the greatest influence on the maximum temperature, and the maximum temperature was 578.84 ± 12.72 at a confidence interval of 99%. The greater the rotating speed and shoulder diameter, the greater the difference between maximum and minimum temperature. Furthermore, the shoulder diameter had the largest influence on von Mises stress, and the von Mises stress was 184.54 ± 12.62 at a confidence interval of 99%. In addition to the increased shoulder diameter, welding speed, and rotating speed of the tool increased the von Mises stress.

Key words : Friction Stir Welding(마찰교반용접), Aluminium Alloy(알루미늄 합금), Welding Variable(용접변수), Variance Analysis(분산분석), Three-way Factorial Design Method(삼원배치법)

1. 서론

최근 증가하는 환경오염 문제와 이에 따른 국제적인 환경규제의 강화와 에너지 절약문제가 대두되면서 자동차, 항공기, 철도차량, 선박 등 각종 수송기계의 경량화를 위한 기술 개발이 국내외에서

활발히 진행되고 있다. 특히 미국, 유럽, 일본 등에서는 차체 경량화를 통한 연비 향상 기술 개발에 적극적인 투자를 하고 있다.^[1-2]

한편 영국의 TWI(The welding of institute)에서 1991년 최초 특허 출원된 마찰교반 용접기술은 친환경적, 에너지 절약형 용접 공정으로 자동차나 항공기, 조선과 같은 수송기계 산업은 물론 건축, 토목, IT 산업 분야에서도 각광받고 있다. 국내에서는 장비 사용의 로열티 문제로 인해 실험적인 연구의 접근이 어려운 환

Corresponding Author : dmkang@pknu.ac.kr
Tel:+82-51-629-6134

경이었으나, 최근에 S. K. Jang^[3] 등이 용접 공구의 지름 및 길이, 솔더부의 지름을 변화시켜가며 Al 합금에 대한 마찰교반 용접을 실시하였고 용접부의 인장강도를 측정하여 인장강도를 최대로 만드는 마찰교반 용접의 용접조건을 평가하는 연구를 하였다. 또한 S. T. Won^[4] 등은 마찰교반 용접된 철도 차량용 A6005 압출재의 기계적 성능 향상을 위한 최적 공법 설계에 관한 연구를 하였으며 B. C. Goo^[5] 등은 마찰교반 용접열원의 유한요소 모델링에 관한 연구와 Al6061-T6 판재의 마찰교반용접 3D 유한요소 해석에 관한 연구를 하는 등 국내에서도 마찰교반용접 기술의 연구가 일부 행해지고 있으나^[6-7] 매우 불충분한 실정이다.

본 논문에서는 용접해석의 대표적인 전용 프로그램인 시스웰드(Sysweld) 소프트웨어를 이용하여 Al 합금판재의 마찰교반 용접시 공구의 솔더지름, 회전속도와 이송속도 변화에 따른 온도와 응력을 구하고 이러한 값을 분산분석을 실시하여 용접변수가 해석 결과에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 해석 방법

본 논문에서는 마찰교반 용접의 유한요소 해석을 위해 용접해석 전용 프로그램인 시스웰드를 이용하였다. 시스웰드 프로그램은 기본적으로 각 공정 조건에 대한 입력 데이터로부터 열-야금학 모듈로서 온도와 상 변태에 대한 연성해석을 수행하여 온도와 상분포를 구하고, 이로부터 역학 모듈로 휨 및 잔류응력을 계산한다. 마찰교반 용접에 대한 지배방정식은 식 (1)과 같이 노트의 법칙을 이용하여 해석을 수행하였다.

$$\sigma = K(T) \cdot \dot{\epsilon}^{m(T)} \dots\dots\dots (1)$$

2.1 모델링

Fig. 1은 마찰교반용접 유한요소 해석을 위해 Ugraphics NX6을 이용하여 두께 2mm의 판재와 공구의 모델링 형상이다. 마찰교반 용접시 공구는 판재와 접촉하여 마찰열을 발생시키므로 공구의 솔더 하단 면과 핀 외형 면으로 모델링하였고 공구의 형상과 크기는 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 두께 방향으로

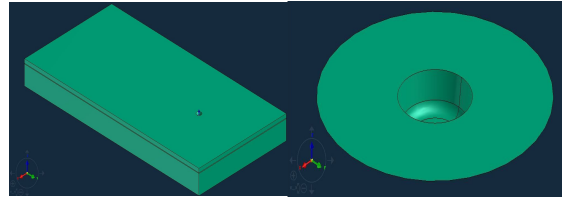


Fig. 1 Sheet and tool for FSW

Table 1 Tool dimensions

Item	Dimension
Shoulder diameter (mm)	9, 12, 15
Pin root diameter (mm)	3
Pin length (mm)	1.5
Shoulder-tool R (mm)	0.5
Pin taper angle (°)	10

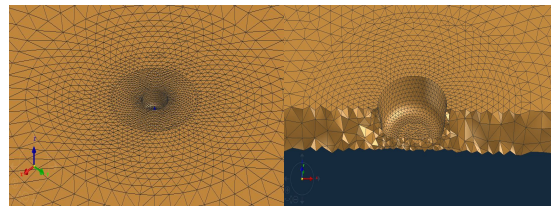


Fig. 2 Modeling and mesh geometry

는 3개의 요소로 분할하여 두께 방향으로 온도와 응력의 분포를 관찰할 수 있도록 2D 메쉬(Mesh)생성 후 8개의 절점을 갖는 육면체 요소를 사용하여 3D 메쉬를 생성한 모습이다. 메쉬작업은 비주얼 메쉬 프로그램을 이용하였으며 마찰교반 용접공구의 진행방향은 y축이며 진행방향의 70% 지점에 공구의 최종위치를 설정하였다. 또한 z축을 따라 회전이 이루어지므로 요소는 중심 부위에서는 조밀하게 나누고 가장자리로 갈수록 커지도록 분할하였다.

2.2 해석조건

Table 2는 해석에 사용된 인자와 수준을 나타낸 것이다. 인자는 마찰교반 용접시 공정의 중요한 용접변수인 공구의 솔더지름, 회전속도, 그리고 이송속도로 하였다. 해석 조건은 Table 3과 같이 해석 결과치에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대표적인 실험계획법인 삼원배치법의 원리를 적용하여 배치하였다.

Table 2 Factors and each levels for experiment

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Shoulder diameter (mm), (A)	9	12	15
Travels speed (mm/min), (B)	100	300	500
Rotation speed (rpm), (C)	1000	1500	2000

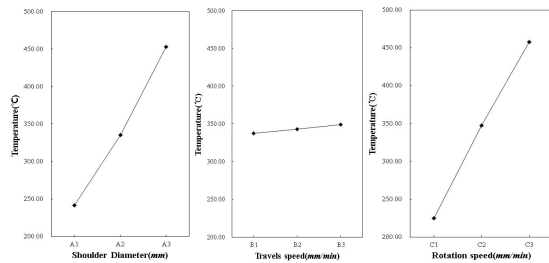


Fig. 3 Temperature results of welding factors

또한 유동 및 구조해석에 사용한 열 팽창계수, 비열, 밀도, 탄성계수 등의 물성 값은 시스웰드 소프트웨어 내에 정해진 값을 사용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

Table 3에서 삼원배치법을 이용하여 유동해석과 강도해석을 행한 결과를 나타내었다. 각각의 값은 평균치를 특성값으로 선정하여 총 27회 해석을 수행하였다. 여기서 A는 공구의 솔더지름, B는 이송속도, C는 회전속도를 나타낸다.

3.1 용접조건에 따른 유동해석

Table 4는 유동해석을 통해 얻은 온도값을 특성치로 선정하여 통계적 분석방법인 분산분석을 실시한 결과를 나타낸다. 분산분석 결과 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동해석시 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 공구의 회전속도가 온도 특성값에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며, 솔더지름, 이송속도 순으로 영향을 끼치는

것으로 나타났다. 또한 각 변수들 간의 교호작용 모두 온도 특성치에 유의한 것으로 나타났다.

Table 3 The analysis results of three-way factorial design

Run	Factors			Temperature (°C)	Von Mises stress(Mpa)
	A	B	C		
1	9	100	1000	148.14	76.24
2	9	100	1500	215.08	115.79
3	9	100	2000	302.74	132.88
4	9	300	1000	175.25	89.69
5	9	300	1500	237.07	121.00
6	9	300	2000	314.05	141.86
7	9	500	1000	199.65	101.15
8	9	500	1500	257.07	122.13
9	9	500	2000	324.49	151.75
10	12	100	1000	200.75	120.59
11	12	100	1500	317.89	175.33
12	12	100	2000	476.91	174.53
13	12	300	1000	220.49	122.71
14	12	300	1500	319.46	181.36
15	12	300	2000	465.86	173.31
16	12	500	1000	238.47	123.66
17	12	500	1500	323.36	189.85
18	12	500	2000	456.06	174.97
19	15	100	1000	279.07	145.24
20	15	100	1500	491.87	172.93
21	15	100	2000	607.30	169.84
22	15	300	1000	278.84	147.71
23	15	300	1500	485.75	173.51
24	15	300	2000	590.92	171.67
25	15	500	1000	283.62	154.03
26	15	500	1500	477.73	172.52
27	15	500	2000	582.20	194.10

Table 4 ANOVA of maximum temperature

Factors	SS	df	MS	F ₀	F _(0.10)	F _(0.05)	F _(0.01)
A	202165.6	2	101082.82	4948.53	3.11	4.46	8.65
B	588.98	2	294.49	14.42	3.11	4.46	8.65
C	244352.2	2	122176.13	5981.15	3.11	4.46	8.65
A×B	1917.66	4	479.41	23.47	2.81	3.84	7.01
A×C	28573.78	4	7143.45	349.71	2.81	3.84	7.01
B×C	1162.53	4	290.63	14.23	2.81	3.84	7.01
E	163.41	8	20.43				
T	478924.2	26	231487.36				

Table 5 Estimated temperature for each factors

Factors	Point estimation	Confidence interval	+	-
A1	241.52	7.05	248.52	234.46
A2	335.47	7.05	342.53	328.42
A3	453.03	7.05	460.09	445.98
B1	337.75	7.05	344.80	330.70
B2	343.09	7.05	350.14	336.06
B3	349.18	7.05	356.24	342.13
C1	224.92	7.05	231.97	217.87
C2	347.25	7.05	354.31	340.20
C3	457.85	7.05	464.90	450.80
90%	578.84	7.05	585.90	571.79
95%	578.84	8.74	587.59	570.10
99%	578.84	12.72	591.56	566.12

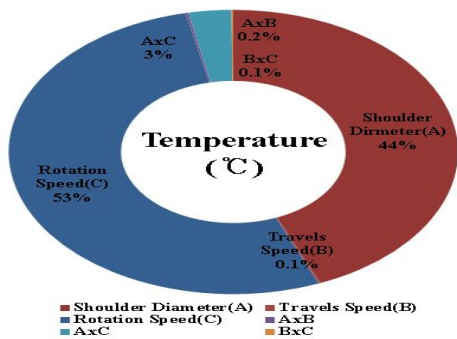


Fig. 4 Contribution on temperature of welding factors

Table 5는 각 변수들의 모평균 및 구간추정을 실시한 결과이다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동해석시 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 모두 온도와 비례하는 경향을 나타냈으며, 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 가장 높은 온도 값을 나타내는 조합은 A3B3C3 조건으로 90% 신뢰구간에서 578.84±7.05, 95% 신뢰구간에서 578.84±8.74, 99% 신뢰구간에서 578.84±12.72로 알루미늄 합금의 재결정 온도와 용융점 사이인 것으로 나타났다. Fig. 3은 각 용접변수들에 대한 온도의 모평균을 나타낸 것으로 공구의 솔더지름이 증가할수록 온도 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 15 mm에서 가장 큰 온도 값을 나타내었다. 공구의 이송속도와 회전속도 역시 증가할수록 온도 값이 증가하

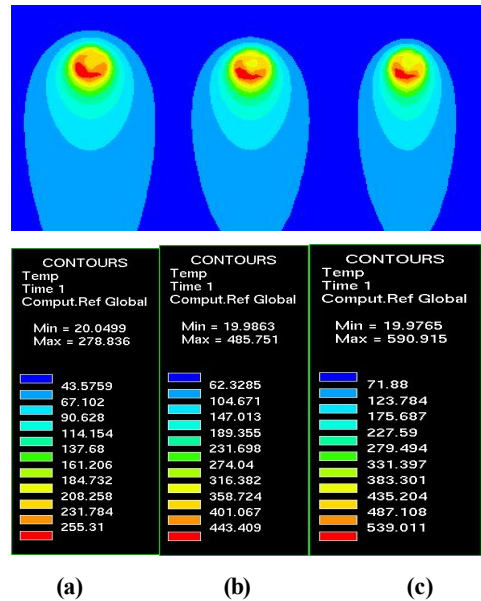


Fig. 5 Temperature distribution under various rotation

였으며 3수준인 500 mm/min 및 2000 rpm에서 각각 가장 큰 온도 값을 나타내었다.

Fig. 4는 용접 변수들인 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도가 온도에 영향을 끼치는 기여도를 나타낸 것이다. 여기서 공구의 회전속도가 약 53%로 온도 특성에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며 솔더지름이 44%, 이송속도가 각각 약 0.1%로 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 공구의 솔더지름을 15 mm, 이송속도를 300 mm/min으로 일정하게 하여 공구 회전속도를 1000(a), 1500(b) 그리고 2000(c) rpm으로 변화시킨 유동해석 결과로서 전반적으로 모든 조건에서 용접부 온도분포는 양호하게 나타났으며 회전속도가 커질수록 온도는 증가되었고 최대값과 최소값의 차이도 크게 나타났다. Fig. 6는 이송속도를 300 mm/min, 회전속도를 1500 rpm으로 일정하게 하여 공구 솔더지름을 9(a), 12(b) 그리고 15(b) mm으로 변화시킨 유동해석 결과로서 전반적으로 모든 조건에서 용접부 온도분포는 양호하게 나타났으며 솔더지름이 커질수록 온도는 증가되었고 최대값과 최소값의 차이도 크게 나타났다.

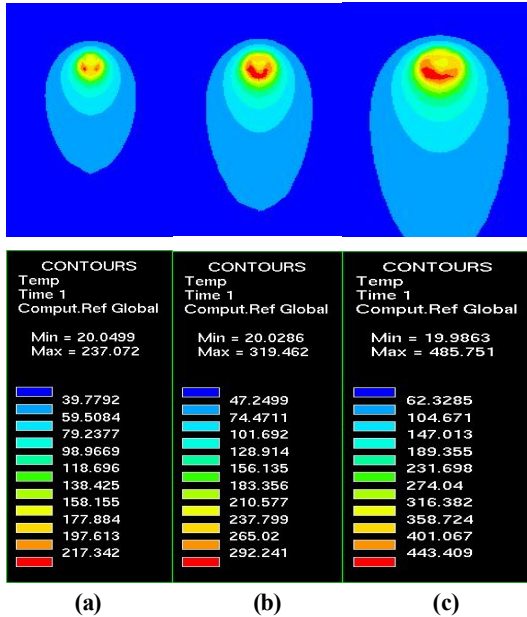


Fig. 6 Temperature distribution under various shoulder diameter

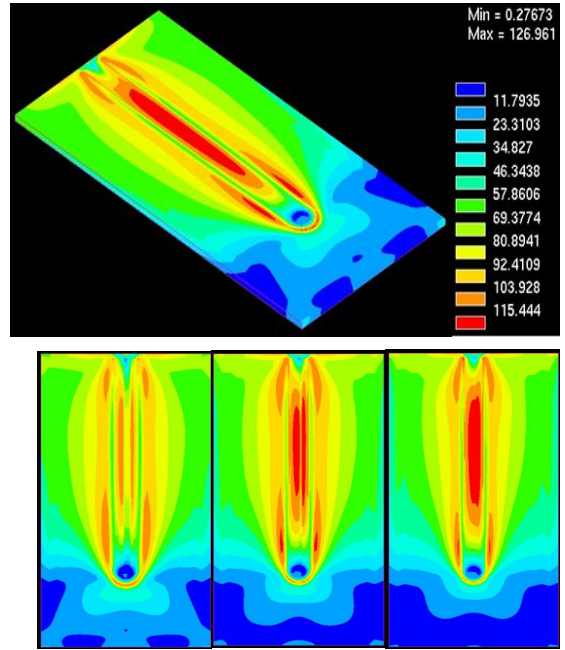


Fig. 7 Von-mises stress distribution under various travel speed

3.2 용접조건에 따른 강도해석

Fig. 7은 회전속도를 1500 rpm으로 일정하게 하여 이송속도를 100, 200, 300 mm/min으로 변화시킨 강도 해석 결과로서 전반적으로 모든 조건에서 용접부의 응력분포는 양호하게 나타났으며 이송속도가 빠를수록 응력도는 증가되었고 최대값과 최소값의 차이도 크게 나타났다. Table 6은 유동해석을 통해 얻은 온도 값을 특성치로 선정하여 통계적 분석방법인 분산분석을 실시한 결과를 나타낸다. 분산분석 결과 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수들의 조합에서 공구의 솔더지름이 응력값에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며 회전속도, 이송속도 순으로 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

또한 각 변수들 간의 교호작용 모두 응력 특성값에 유의한 것으로 나타났다. Table 7은 각 변수들의 모평균 및 구간추정을 실시한 결과이다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접 유동해석시 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 모두 온도와 비례하는 경향을 나타냈으며, 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 3가지 변수

Table 6 ANOVA of von Mises stress

Factors	SS	∅	MS	F ₀	F _(0.10)	F _(0.05)	F _(0.01)
A	13083.31	2	6541.66	188.36	3.11	4.46	8.65
B	573.12	2	286.57	8.25	3.11	4.46	8.65
C	10545.56	2	5272.78	151.82	3.11	4.46	8.65
A×B	108.70	4	27.17	0.78	2.81	3.84	7.01
A×C	1546.74	4	386.68	11.13	2.81	3.84	7.01
B×C	71.85	4	17.96	0.52	2.81	3.84	7.01
E	277.84	8	34.73				
T	26207.14	26	12567.56				

들의 조합에서 가장 높은 응력값을 나타내는 조합은 A3B3C3 조건으로 90% 신뢰구간에서 184.54±7.00, 95% 신뢰구간에서 187.54±8.67, 99% 신뢰구간에서 184.54±12.62로 나타났다. Fig. 8은 각 용접 변수들에 대한 응력의 모평균을 나타낸 것으로 공구의 솔더지름이 증가할수록 응력 값이 증가하는 경향을 나타내었으며, 3수준인 15 mm에서 가장 큰 응력값을 나타내었다.

Table 7 Estimated von Mises stress for each factors

Factors	Point estimation	Confidence interval	+	-
A1	116.94	7.00	123.94	109.95
A2	159.59	7.00	166.59	152.59
A3	166.84	7.00	173.84	159.84
B1	142.60	7.00	149.59	135.60
B2	146.98	7.00	153.98	139.98
B3	153.79	7.00	160.79	146.80
C1	120.11	7.00	127.11	113.12
C2	158.27	7.00	165.27	151.27
C3	164.99	7.00	171.99	157.99
90%	184.54	7.00	191.54	177.54
95%	184.54	8.67	193.22	175.87
99%	184.54	12.62	197.16	171.92

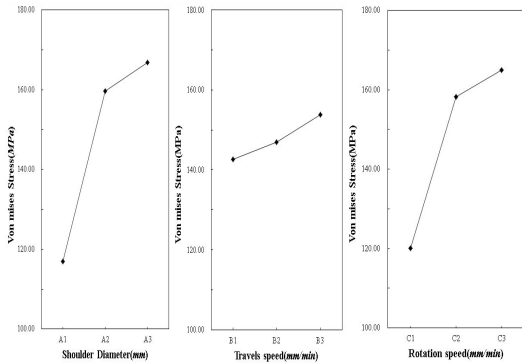


Fig. 8 Von Mises stress results of welding factors

공구의 이송속도와 회전속도 역시 증가할수록 응력 값이 증가하였으며 3수준인 500 mm/min 및 2000 rpm에서 각각 가장 큰 응력값을 나타내었다. Fig. 9는 용접 변수들인 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도가 응력특성 값에 영향을 끼치는 기여도를 나타낸 것이다. 여기서 공구의 솔더지름이 약 52%로 응력 특성 값에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났으며 회전속도가 42%, 이송속도가 각각약 2.0%로 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

4. 결론

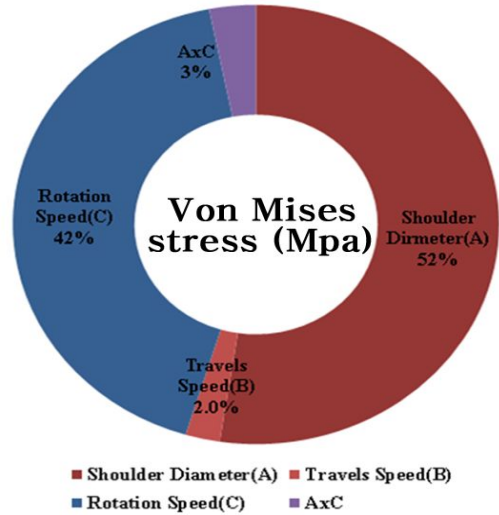


Fig. 9 Contribution on von Mises stress of welding factors

본 논문에서는 알루미늄 합금의 마찰교반 용접시 용접 공정의 중요한 변수인 공구의 솔더지름, 회전속도, 이송속도가 유동 및 강도특성에 미치는 영향을 분산분석을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 유동해석을 통해 얻은 온도 값을 특성값으로 하여 분산분석 결과 공구의 회전속도, 솔더지름, 이송속도 순으로 온도 특성값에 영향을 크게 끼치고 99% 신뢰구간에서 578.84±12.72로 나타났다.

2. 공구의 이송속도, 회전속도와 솔더지름등이 증가할수록 온도는 증가하였고 공구솔더가 15 mm, 이송속도가 500 mm/min, 그리고 회전속도가 2000 rpm에서 가장 큰 온도값이 나타났다.

3. 강도해석을 통해 얻은 응력값을 특성값으로 하여 분산분석결과 공구의 솔더지름, 이송속도, 회전속도 순으로 응력특성값에 영향을 크게 끼치고 99% 신뢰구간에서 184.54±12.62로 나타났다.

4. 공구의 솔더지름, 이송속도 및 회전속도가 증가할수록 응력값이 증가하였고 공구의 솔더지름이 15 mm, 이송속도가 500 mm/min, 그리고 회전속도가 2000 rpm에서 가장 큰 응력값이 나타났다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCE

1. Kim, H. T. and Kil, S. C., "Recent Research Trend of Friction Stir Welding Process," Spring Conference of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 49, p. 77, 2008.
2. Song, S. W., Kim, N. K. and Kang, C. Y., "Liquation Cracking of Mg and Al Alloys during Friction Stir Welding," Journal of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 28, No. 5, pp. 28-34, 2010.
3. Jang, S. K. and Shin, S. H., "A Development of Optimizing Tools for Friction Stir Welding with 2mm Thick Aluminum using a Milling Machine", Journal of The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 91-96. 7. 2001
4. Won, S. T., Kim, W. K. and Goo, B. C., "Mechanical Properties of Joints according to Welding Methods and Sensitivity Analysis of FSW's Welding Variables for A6005 Extruded Alloy of Rolling Stock," Journal of The Korean Society for Railway, Vol 13, No. 2, pp. 131-138, 2010.
5. Goo, B. C. and Jung, H. S., "Finite element modeling of frictional heat in friction stir welding," Journal of The Korean Welding and Joining Society, Vol 55, pp. 154-154, 2011.
6. Kang, D. M., Park, K. D. and Kang, C. Y., "Friction Stir Welding Characteristics of AZ31 Mg Alloy by Othogonal Array," J. KSMPE, Vol. 11, No. 6, pp. 16-21, 2012.
7. Kang, D. M., Park, K. D. and Jung, Y. S., "Friction Stir Welding Characteristics of AZ31 Mg Alloy", Proceedings of JSMPE Spring Conference 2012, p. 86, 2012.