유한요소법에 의한 AZ31마그네슘 합금의 마찰교반용접시 유동 및 강도 해석

Thermal and mechanical analysis on friction stir welding of AZ31 magnesium alloy by the finite element method

강대민*† · 박경도** · 정영석***

Dae-Min Kang*, Kyoung-Do Park**, Yung-Suk Jung***

(접수일 : 2012년 07월 04일, 수정일 : 2013년 02월 06일, 채택확정 : 2013년 04월 22일)

Abstract: In this paper, finite element method was used for flow and strength analysis of AZ31 magnesium alloy under friction stir welding. The simulations were carried out by SYSWELD s/w, and the modeling of sheet was done by unigraphics NX3 s/w. Welding variables for analysis were rotating speed and welding speed of tool. Also two-way factorial design method was applied to confirm the effect of welding variables on maximum temperature and stress of material used. From these results, the increaser welding speed of tool the decreaser maximum temperature, but the increaser maximum stress. Also the increaser rotating speed of tool the increaser maximum temperature, but the decreaser maximum stress. In addition the increaser welding speed of tool and the decreaser rotating speed of tool, the narrower heat effect zone. Finally rotating speed of tool influenced on maximum temperature more than welding speed of tool, and welding speed of tool influenced on maximum stress more than rotating speed of tool from the variance analysis.

Key Words : Friction stir welding, Magnesium alloy, Design of experiment, Finite element method

1. 서 론

영국의 TWI(The welding of institute)에서 1991년 최초 특허 출원된 마찰교반용접기술은 친환경적, 에너지 절약형 용접 공정으로 자동차나 항공기, 조선과 같은 수송기계 산업뿐만 아니라 최근 건축, 토목, IT 산업 분야에서도 각광받고 있다. 하지만

TWI의 최초 특허는 이 기술의 원리와 개념만을 정의한 것으로 구체적인 용접인자나 기기의 구성, 그리고 각종 응용 기술에 대해서는 TWI가 주관한 심포지움과 국제학회, 국내학회 등을 통해 많은 연구 결과들이 발표되고 있다.¹⁻²⁾

국내에서는 장비 사용의 로열티 문제로 인해 실험적인 연구의 접근이 어려운 환경이었으나, 최근

*† 강대민(교신저자) : 부경대학교 기계공학과
E-mail : dmkang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6134
**박경도 : 부경대학교 생산자동화공학과 대학원
***정영석 : 부경대학교 기계자동차공학과

*† Dae-Min Kang(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Pukyung National University.
E-mail : dmkang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6134
**Kyoung-Do Park : Department of Mechanical Engineering, Pukyung National University.
***Yung-Suk Jung : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyung National University.

에 장석기³⁾ 등이 용접 공구의 지름 및 길이, 솔더부의 지름을 변화시켜가며 AI합금에 대한 마찰교반용접을 실시하였고, 용접부의 인장 강도를 측정하여 인장 강도를 최대로 만드는 마찰교반용접의 용접 조건을 찾는 연구를 하였다. 또한 원시태⁴⁾ 등은 마찰교반용접된 철도 차량용 A6005 압출재의 기계적 성능 향상을 위한 최적 공법 설계에 관한 연구를 하였으며, 구병준⁵⁾ 등은 마찰교반용접 열원의 유한 요소 모델링에 관한 연구와 Al6061-T6 판재의 마찰교반용접 3D 유한요소해석에 관한 연구를 하는 등 국내에서도 마찰교반용접 기술의 연구가 일부 행해지고 있으나 매우 불충분한 실정이다.

본 논문에서는 용접해석의 대표적인 전용프로그램인 SYSWELD 소프트웨어를 이용하여 AZ31마그네슘 합금판재의 마찰교반용접시 공구의 회전속도와 이송속도 변화에 따른 해석결과를 분산분석을 실시하여 용접변수가 해석결과에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 해석 방법

2.1 모델링

Fig. 1은 마찰교반용접 유한요소해석에 사용된 공구의 모델링 형상이다. 마찰교반용접시 공구는 판재와 접촉하여 마찰열을 발생시키므로 공구의 솔더하단 면과 핀 외형 면으로 모델링 하였고 공구의 솔더지름은 12mm, 핀 지름은 3.5mm 및 핀 길이는 1.5mm로 하였다.

Fig. 2는 2D 및 3D 요소 분할을 VISUAL MESH

Fig. 1 Tool modeling and 2D mesh geometry

소프트웨어를 이용하여 나타낸 것이다. 2D 요소는 총 47,930개를 생성하였고 3D 요소는 8개의 절점을 갖는 육면체 요소를 사용하여 131,042개의 3D 요소와 34,954개의 절점을 생성하였다.

또한 마찰교반용접은 공구의 길이방향을 따라 공구의 회전이 이루어지므로 요소는 공구의 중심부위에서는 조밀하게 나누고 가장자리로 갈수록 커지도록 분할하였다. 공구는 길이방향과 수직하게 이송하며 진행방향의 70% 지점이 공구의 최종 위치가 되도록 설정하였다.

Fig. 2 Mesh geometry of plate for analysis

2.2 해석 조건

Table 1은 해석에 사용된 인자와 수준을 나타낸 것이다. 인자는 마찰교반용접시 공정의 중요한 용접 변수인 공구의 회전속도와 이송속도로 하였고 해석결과치에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대표적인 실험계획법인 이원배치법의 원리를 적용하여 배치하였다. 또한 유동 및 구조해석에 사용한 열팽창계수, 비열, 밀도, 탄성계수 등의 물성값은 SYSWELD 소프트웨어 내에 정해진 값을 사용하였다.

Table 1 Factors and each levels for simulation

	Level 1	Level 2	Level 3
Rotation speed (rpm), (A)	1000	1100	1200
Welding speed (mm/min), (B)	200	300	400

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 용접 조건에 따른 온도 분포

Figs. 3-4 등은 유동해석을 수행하여 얻은 온도분포 형상이다. 전반적으로 모든 해석 조건에서의 온도분포는 200℃ 안팎으로 AZ31 마그네슘 합금의 재결정온도에 근접하였지만 용융온도에 비해서는 다소 낮게 나타났다. 또한 공구는 시계방향으로 회전하여 솔더 부위의 후방에서 높은 온도 분포를 나타내었다.

Fig. 3 Result of thermal analysis

Table 2는 해석조건이 온도분포에 어떤 영향을 미치는가를 파악하기 위하여 대표적인 실험계획법인 2원배치법을 사용하여 수행된 공구의 회전속도

Fig. 4 Result of thermal analysis for tool

와 이송속도 변화에 따른 용접부의 최대온도를 나타낸 것이다. 공구의 이송속도가 증가할수록 최대온도는 감소하는 경향을 나타냈으며 회전속도가 증가할수록 최대온도는 증가하는 경향을 나타냈다.

Table 2 Maximum temperature of welding conditions

No.	Factors		Maximum Temperature (℃)
	Rotation speed (rpm),(A)	Welding speed (mm/min),(B)	
1	1000	200	208.53
2	1000	300	193.28
3	1000	400	177.50
4	1100	200	223.16
5	1100	300	210.57
6	1100	400	197.30
7	1200	200	238.26
8	1200	300	228.33
9	1200	400	218.47

Figs. 5-6 등은 각각 공구의 회전속도 및 이송속도를 변화시켜 얻은 9개의 온도분포 결과를 공구의 수직인 평면 방향과 공구의 진행 방향으로 나타낸 것이다. 공구의 회전속도가 일정할 때 공구의 이송속도가 증가할수록 공구 주변의 온도분포가 감소하는 경향을 나타냈으며, 공구의 이송속도가 일정할 때 공구의 회전속도가 증가할수록 공구 주변의 온도분포가 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 3은 해석 변수들이 특성치인 최대 온도 값에 미치는 영향을 알아보기 위해 통계적 분석 방법인 분산분석을 실시한 결과이다.

여기서 A는 해석을 위해 선정한 공구의 회전속도, B는 공구의 이송속도, E는 오차, T는 A, B, E 변수들의 변동의 합을 나타낸다. 또한 SS는 각 변수의 변동, Φ 는 자유도, MS는 각 변수들의 변동을 자유도로 나눈 값, F0는 MS를 오차의 변동으로 나눈 값을 나타낸다.

Fig. 5 Temperature distribution by analysis
(orthogonal direction of tool length)

Table 3 ANOVA for maximum temperature

	SS	Φ	MS	F_0	$F_{(0.05)}$	$F_{(0.01)}$
A	1864.21	2	932.10	117.70**	6.94	18.00
B	980.12	2	490.06	61.88**	6.94	18.00
E	31.68	4	7.92			
T	2876.01	8	1430.08			

분산분석 결과, 공구의 회전속도와 이송속도 모두 신뢰구간 99% 유의수준에서 유의하며, 즉 공구의 회전속도 변화와 공구의 이송속도 변화에 따라 특성치로 선정된 최대 온도 값에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 공구의 회전속도와 공구의 이송속도가 마찰교반용접 유동 해석시 용접부의 최대 온도 값에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 본 해석에서 선정한 공구의 회전속도(A)의 기여도가 65%로서 공구의 이송속도(B)의 기여도 34%보다 최대온도 값

Fig. 6 Temperature distribution by analysis(tool length direction)

에 더 큰 영향이 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 7 Contribution of welding variables to maximum temperature

Fig. 8 Maximum temperature vs. levels of factors

Fig. 8은 각 변수의 수준별 모평균을 추정한 결과를 나타낸 것이다. 공구의 회전속도는 3수준에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 공구의 회전속도가 높을수록 최대 온도 값은 증가하였다. 그리고 공구의 이송속도는 1수준에서 가장 높은 값을 나타냈으며 공구의 이송속도가 높을수록 최대온도 값은 감소하였다.

3.2 용접 조건에 따른 응력 분포

Fig. 9는 응력해석을 수행하여 얻은 Von-Mises 응력분포 형상이다. 전반적으로 모든 해석 조건

에서의 응력분포는 공구의 핀 부위와 솔더 부위의 진행 위치에 집중되는 경향을 나타내었다.

Fig. 9 Result of mechanical analysis

Table 4는 해석조건이 응력분포에 어떤 영향을 미치는가를 파악하기 위하여 대표적인 실험계획법인 2원배치법을 사용하여 수행된 공구의 회전속도와 이송속도 변화에 따른 용접부의 Von-Mises 최대 응력 값을 나타낸 것이다. 공구의 이송속도가 증가할수록 최대응력은 증가하는 경향을 나타냈으며 회전속도가 증가할수록 최대온도는 감소하는 경향을 나타냈다.

Table 4 Maximum von mises stress of welding conditions

No.	Factors		Maximum von mises stress (MPa)
	Rotation speed (rpm)	Welding speed (mm/min)	
1	1000	200	126.24
2	1000	300	126.75
3	1000	400	127.51
4	1100	200	126.23
5	1100	300	126.78
6	1100	400	126.96
7	1200	200	125.31
8	1200	300	125.57
9	1200	400	126.98

Fig. 10 Von-Mises stress distribution by analysis
(orthogonal direction of tool length)

Figs. 10-11 등은 각각 공구의 회전속도 및 이송속도를 변화시켜 얻은 9개의 응력분포 결과를 공구의 수직인 평면 방향과 공구의 진행 방향으로 나타낸 것이다. 공구의 이송속도가 증가할수록 공구 주변의 응력분포가 감소하지만 Von-Mises 최대 응력 값은 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 5 ANOVA for maximum von mises stress

	SS	Φ	MS	F_0	$F_{(0.10)}$	$F_{(0.05)}$
A	1.30	2	0.65	6.31*	4.32	6.94
B	2.30	2	1.15	11.14**	4.32	6.94
E	0.41	4	0.10			
T	4.01	8	1.90			

Table 5는 해석 변수들이 특성치인 최대 온도 값에 미치는 영향을 알아보기 위해 통계적 분석 방법인 분산분석을 실시한 결과이다.

분산분석 결과, 공구의 회전속도와 이송속도 모두 신뢰구간 90% 유의수준에서 유의하며 특성치로 선정한 Von-Mises 최대 응력 값에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 각 변수의 모평균을 추정한 결과를 나타낸 것이다. 공구의 회전속도는 3수준에서 가장 낮은 응력 값을 나타냈으며, 공구의 회전속도가 높을수록 최대 응력 값은 감소하였다. 또한 공구의 이송속도는 1수준에서 가장 작은 응력 값을 나타냈으며 공구의 이송속도가 높을수록 최대 응력 값이 증가하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 용접해석의 대표적인 전용프로그램인 SYSWELD 소프트웨어를 이용하여 AZ31마그네슘 합금판재의 마찰교반용접시 공구의 회전속도와 이송속도 변화에 따른 해석결과를 분산분석을 실시하여 유동 및 강도특성을 파악한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 공구의 이송속도가 증가할수록 최대 온도 값

Fig. 11 Von-Mises stress distribution by analysis(tool length direction)

Fig. 12 Graphical illustration of the effect on all factors

은 감소하는 경향을 나타냈으며 회전속도가 증가할수록 최대 온도 값은 증가하였다.

2) 공구의 회전속도 및 이송속도를 변화시켜 얻은 마찰교반용접시 발생하는 열 영향부 형상을 관찰한 결과 용접시 열영향부는 공구의 이송속도가 증가할수록, 그리고 공구의 회전속도가 감소할수록 좁아지는 경향을 나타내었다.

3) 공구의 이송속도가 증가할수록 최대 응력 값이 증가하는 경향을 나타냈으며 공구의 회전속도가

증가할수록 최대응력 값은 전반적으로 감소하였다.

4) 분산분석 결과, 변수로 선정한 공구의 회전속도 및 이송속도가 특성치로 선정한 최대 온도 값과 최대 응력 값에 모두 유의함을 나타내었다. 또한 공구의 회전속도가 이송속도에 비해 최대 온도 특성치에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 공구의 이송속도가 회전속도에 비해 최대 응력 특성치에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음

References

1. C. O. Kim and S. J. Kim, 2011, "Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15(2), pp. 61-68.
2. C. O. Kim, H. J. Sohn and S. J. Kim, 2011, "Effects of Welding Condition on Hardness and

- Microstructure of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 58-64.
3. S. K. Jang and S. H. Shin, 2001, "A Development of Optimizing Tools for Friction Stir Welding with 2mm Thick Aluminum using a Milling Machine", The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 91-96.
 4. S. T. Won, W. K. Kim and B. C. Goo, 2010, "Mechanical Properties of Joints according to Welding Methods and Sensitivity Analysis of FSW's Welding Variables for A6005 Extruded Alloy of Rolling Stock", The Korean Society for Railway, Vol 13, No. 2, pp. 131-138.
 5. B. C. Goo and H. S. Jung, 2011, "Finite element modeling of frictional heat in friction stir welding", The Korean Welding and Joining Society, Vol 55, pp. 154-154.