

파이프 형상의 이종 주조알루미늄-고장력강의 마찰교반용접에서 확정선별설계법에 의한 인장강도 응용

최이준*, 박성환*, 이명원*, 박재하**, 최병준***, 강명창*.#

*부산대학교 융합학부, **큐앤알 코칭, ***(주)체시스

Tensile Strength Application Using a Definitive Screening Design Method in Friction Stir Welding of Dissimilar Cast Aluminum and High-Strength Steel with Pipe Shape

Lee-jon Choy*, Seong-Hwan Park*, Myung-Won Lee*, Jae-Ha Park**, Byeong-Joon Choi***,
Myungchang Kang*.#

*The Graduate school of Convergence Science, Pusan National University

Quality & Reliability Coaching, *Chasys Corporation, Ltd.

(Received 16 September 2020; received in revised form 30 September 2020; accepted 05 October 2020)

ABSTRACT

Recently, friction stir welding of dissimilar materials has become one of the biggest issues in lightweight and eco-friendly bonding technology. In this study, a lightweight torsion beam axle, which is an automobile chassis component, was used in the welding to cast aluminum material. The friction stir welding process of A357 cast aluminum and FB590 high-strength steel as well as the effects of the process parameters were investigated and optimized using a novel definitive screening design (DSD). ANOVA was used to predict the importance of the process parameters with 13 degradation experiments using the proposed DSD. Also, FSWed experiments were conducted using an optical microscope analysis to investigate the tensile strength behavior in the weld area. In addition to determining the interaction between the tool's rotational speed and the plunge speed, results indicate that the influence of the plunge depth was the most significant.

Key Words : Dissimilar Friction Stir Welding(이종 마찰교반접합), High-strength Steel(고장력강), Definitive Screening Design (DSD, 확정선별설계), Tensile Strength(인장강도), Plunge Depth(플런지 깊이)

1. 서 론

최근 자동차 산업을 비롯한 많은 산업에서 경량화, 소형화를 비롯한 환경보호와 에너지 절감이 주된 이슈이다.^[1-3] 철강소재와 경량화 소재간의 용접

성이 높은 용접기술이 필요하며, 마찰교반 접합은 두 이종소재를 접합하는데 있어 친환경성, 경제성 효과로 인하여 자동차 부품 제조에 활발하게 도입되고 있다. 또한, 마찰교반 접합의 경우 고상 상태(solid state) 접합방법으로써 열변형이 낮아 알루미늄과 철강소재간의 접합효율이 높은 방법이다.^[4]

이종 마찰교반 접합에 의한 응용연구로 Park^[5]은 각 3mm 두께의 평판 A357과 고장력강재 FB590간

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-510-7396

겹치기 접합(lap joint)으로 마찰교반 접합을 수행하여 알루미늄 모재 대비 72.8% 수준의 강도를 보고하였다. 3차원 곡면 또는 파이프 형상 적용시 비경사툴(No-Tilt Tool)을 사용하는데, 이 때 수직력의 감소로 인해 인장강도가 감소하고 내부에 보이드 등의 결함이 발생하기 쉽다.^[6] 인장강도를 증가시키고 결함을 방지하기 위해 공구의 기하학적 형상 연구와 공구회전수 및 용접속도 등 다양한 공정 변수에 대한 실험적 연구가 이루어졌다.^[7-8]

실험계획법을 활용해 특성치에 영향을 미치는 인자들에 대한 요인을 선별하거나 다구찌 기법과 반응표면법 및 박스벤젠법 등을 적용하여 기계적 성능에 대한 최적화를 수행해 왔다.^[9] 한편, 확정 선별설계법(Definitive Screening Designs : DSD)은 Jones 등^[10]에 의해 제안된 방법으로 반응에 미미한 영향을 주는 “사소한 다수”인자들로부터 중대한 영향을 미치는 “핵심적 소수”인자들을 도출하는 실험 설계이다.^[10] 어떤 요인의 효과가 급격한 곡선을 나타낼 경우 전통적인 2수준 선별실험 계획법에서는 이 효과를 무시하고 해당 인자를 지나칠 수 있다. 그러나 3수준 확정 선별 설계는 개별 인자에 대해 2차(제곱) 항을 얻을 수 있는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 파이프 형상의 주조 알루미늄과 고장력강 이중 마찰교반 접합의 인장강도에 대한 인자들의 선형 및 곡선관계의 영향을 알아보았다. 설계시 미니탭(Ver. 19, Minitab Ltd, USA)을 사용하였다. 또한 5인자와 3수준에 따른, 미세구조와 인장강도 특성을 평가하였다.

2. 실험준비 및 설계 방법

2.1 마찰교반접합 피접합 재료

본 실험에 사용된 파이프는 주조 알루미늄인 A357과 고장력강재 FB590을 사용하였다. 각 재료에 대한 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.^[5] 시험편의 크기로서, A357은 외경 111mm 길이 155mm, 접합부 두께 3mm, 비접합부 두께 6mm, 고장력강 FB590은 외경 105mm, 길이 110mm, 3mm 두께로 제작하였다. 두 소재는 겹치기 방법으로 접합하였으며, 그 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

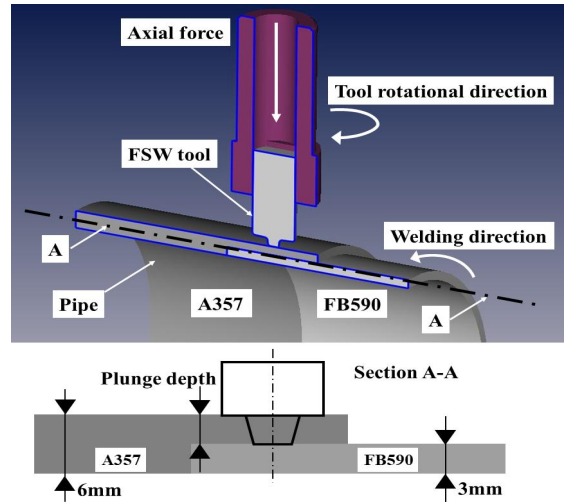


Fig. 1 Schematic illustration of FSW experimental configuration

Table 1 The chemical composition of FB590(High Strength Steel) and A357(Cast Aluminum) pipes^[5]

Material	C	S	Mn	P	S	Cr	Ni
FB590	0.076	0.094	1.472	0.013	0.001	0.019	0.008
Material	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Ti
A357	6.937	0.507	0.034	0.017	0.181	0.007	0.116

마찰교반 접합용 공구의 소재는 중합금(Heavy alloy)의 일종인 W-Ni-Fe 합금을 이용해 제작하였다. 공구의 프로브는 원뿔형(cylindrical taper)으로 나사산(threaded)이 있는 형태로 가공하였고 Z축 수직력을 증가시키기 위하여 툴의 솔더는 중심부가 오목한 형상(Concave type)과 나선형(spiral)형상으로 가공함으로써 접합과정에서의 마찰열과 교반력을 향상시켰다.^[5,11]

2.2 확정선별 실험설계 및 분석

확정 선별실험의 설계표는 Table 2와 같이 m개 인자의 경우 m개의 폴드 오버 쌍과 전체 중심점을 추가해서 $2m + 1$ 개의 런이 있다. 각 런 (전체

중심점 제외)에는 정확히 하나의 요인 수준에 중심점이 있고 다른 모든 요인 수준은 꼭지점에 설계된다. Table 2의 설계구조를 이용하여 $m=5$ 개의 인자로 13회의 런(i)으로 실험설계를 하였다.

Table 3은 확정 선별실험을 위한 인자와 수준수를 나타낸 표이다. 마찰 교반용접 공정 인자 중 공구회전수를 1700~1900 rpm, 파이프의 용접속도를 0.3~0.5 rpm, 플런지 속도를 5~9 mm/min, 체류시간 (Dwell time)을 3~7초, 플런지 깊이를 3.76~3.96 mm으로 하였다.

5개의 중요 인자에 대한 수준수를 3개로 선정하고 확정선별 실험계획법으로 13회의 표준 런 횟수로 실험하여 접합부의 미세구조와 인장강도 특성을 평가하였다. 접합부의 조직관찰과 기계적 특성 평가를 위하여 와이어 가공을 통해 인장시험편과 미세조직 관찰용 시험편을 제작하였다. 인장시험편은 ASTM E8 규격으로 제작하였으며 인장시험기(AGS-X SHIMADZU)를 통하여 인장강도를 측정하였다. 그리고 미세조직 관찰용 시험편은 폴리싱 과정을 거쳐 광학현미경(KH-8700, HIROX, JAPAN)을 통해 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이중 마찰교반접합부 인장강도 특성

A357 알루미늄과 FB 590 파이프의 마찰 교반 특성에 중요한 영향을 미치는 공구는 사전실험을 통해 선정되었고 공구 외 중요한 영향을 미치는 공정 변수 중 선행 연구자들이 실험계획으로 선정하지 않은 인자를 포함하여 공구회전수, 용접 속도, 플런지 속도, 체류시간, 플런지 깊이에 대한 5개의 인자를 3수준으로 하였다. 확정 선별설계는 마찰 교반 용접을 위한 이중 재료의 인장 강도에 영향을 미치는 인자를 선별하는데 사용하였다.

Table 4는 이중소재 마찰교반 접합 후의 인장하중의 결과로서, 주조 알루미늄 원소재(A357)의 경우 최대 인장하중은 7912 N으로 나타났다.

공정 조건별 마찰교반 접합부의 최대 인장하중을 측정한 결과, 공구회전수 1800 rpm, 용접속도 0.4rpm, 플런지 속도 9 mm/min, 체류시간 7초, 플

Table 2 General design structure for m factors^[9]

Foldover pair	Run (i)	Factor levels				
		$x_{i,1}$	$x_{i,2}$	$x_{i,3}$...	$x_{i,m}$
1	1	0	± 1	± 1	...	± 1
	2	0	∓ 1	∓ 1	...	∓ 1
2	3	± 1	0	± 1	...	± 1
	4	∓ 1	0	∓ 1	...	∓ 1
3	5	± 1	± 1	0	...	± 1
	6	∓ 1	∓ 1	0	...	∓ 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
m	$2m-1$	± 1	± 1	± 1	...	0
	$2m$	∓ 1	∓ 1	∓ 1	...	0
Center point	$2m+1$	0	0	0	...	0

Table 3 Process parameter(Factors) and their levels

Factors	Tool speed (rpm)	Welding speed (rpm)	Plunge speed (mm/min)	Dwell time (sec)	Plunge depth (mm)
-	1700	0.30	5	3	3.76
0	1800	0.35	7	5	3.86
+	1900	0.40	9	7	3.96

Table 4 Experiment level with run order

No	Tool speed (rpm)	Welding speed (rpm)	Plunge speed (mm/min)	Dwell time (sec)	Plunge depth (mm)	Tensile strength (N)
Symbol	A	B	C	D	E	TS
1	1700	0.3	9	7	3.76	3685.59
2	1700	0.4	9	3	3.86	3728.74
3	1800	0.4	9	7	3.96	4520.09
4	1900	0.3	9	5	3.96	3806.86
5	1900	0.4	5	3	3.96	3963.54
6	1700	0.35	5	7	3.96	4188.17
7	1900	0.3	5	7	3.86	3516.47
8	1900	0.4	7	7	3.76	3485.66
9	1700	0.3	7	3	3.96	4252.81
10	1700	0.4	5	5	3.76	4030.80
11	1800	0.3	5	3	3.76	3384.68
12	1900	0.35	9	3	3.76	3885.72
13	1800	0.35	7	5	3.86	4023.77

플런지 깊이 3.96 mm의 조건에서 4520 N으로 가장 높은 최대 인장하중을 보였다. 또한, 공구 회전수 1800 rpm, 용접속도 0.3 rpm, 플런지 속도 5 mm/min, 체류시간 3초, 플런지 깊이 3.76 mm 조건에서 3385 N으로 가장 낮은 인장하중을 보였다.

3.2 확정선별 모형 및 주효과도

Table 5의 모형 요약표는 설명변수들에 의한 모형이 관측된 반응의 변동을 얼마나 잘 설명하는지를 나타내는 것으로 R-제곱, R-제곱(수정)은 72.47%, 52.81 %의 모형 설명을 나타낸다.

Table 6의 분산분석표는 반응변수에 대한 모형항들의 영향력을 나타내는 것으로 F-통계량과 P-값으로 통계적 유의성이나 영향력을 판단한다. 적합한 인장강도 모형은 유의수준 10 % 하에서 오차를 작게 하는 계층구조 모형으로써 선별 단계의 실험 계획법으로 중요 인자를 선별하였다. 인장 강도에 대한 인자의 영향도는 코드화된 계수의 T-통계량과 P-값, ANOVA의 F-통계량과 P-값을 사용하여 판정하였다.

코드화되지 않은 단위의 인장강도(Tensile strength: TS)값의 회귀방정식은 식 (1)과 같다.

Table 5 Model summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
225.494	72.47%	52.81%	0.00%

Table 6 Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	937102	187420	3.69	0.059
Linear	4	807766	201941	3.97	0.054
Tool rotational speed	1	150763	150763	2.97	0.129
Welding speed	1	117163	117163	2.30	0.173
Plunge speed	1	29522	29522	0.58	0.471
Plunge depth	1	510318	510318	10.04	0.016
2-Way Interactions	1	129337	129337	2.54	0.155
Tool rotational speed * Plunge speed	1	129337	129337	2.54	0.155
Error	7	355932	50847		
Total	12	129303			

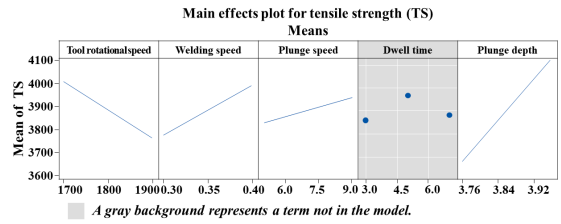


Fig. 2 Main effect plots for tensile strength (Means)

$$TS=4435-5.68*A+2165*B-1117*C+2259*E+0.636*A*C \quad (1)$$

여기서, A: Tool rotational speed, B: Welding speed, C: Plunge speed, E: Plunge depth 이다.

Fig. 2는 주 효과도를 나타내며 인장강도가 최대가 되는 수준은 공구회전수 1700 rpm, 용접속도 0.4 rpm, 플런지 속도 9 mm/min, 플런지 깊이 3.96 mm 일 때이다. 이 결과는 Qixian Zheng^[12]의 이중 소재의 플런지 깊이가 조인트 전단 강도에 중요한 역할을 하며 최대 파손하중이 증가한다는 연구 결과와 일치한다. 또한, Gao hui Li^[13]의 연구에서 체류시간이 짧으면 불충분한 열 입력으로 미세균열이 발생하며 체류 시간이 길어지면 경도가 약간 감소할 수 있지만 인장강도에는 큰 영향을 미치지 않는다는 결과와 일치한다. Baskoro 등은 AI 박판 용접시 플런지 속도가 적을수록 전단강도가 증가한다는 다른 결과를 제시하였다.^[14] 이는 단일소재와 이중 소재 간의 차이와 맞대기 용접과 겹치기 용접의 차이에서 기인하는 것으로 생각된다.

3.3 확정선별설계 인자간 특성

Fig. 3은 교호작용도를 나타내며 공구회전수와 플런지 속도(A*C)간 교호작용이 존재함을 보여주며, 유의한 교호작용을 동시에 고려하여 요인 선별시 체류시간(D)은 모형에서 제외된 것이어서 Fig. 2의 주 효과도에서 회색으로 표시되었다.

Fig. 4(a)는 공구회전수와 플런지 속도에 대한 인장강도의 등고선도(Contour plot)를 나타내며 교호작용 효과로 곡선을 나타내며 나머지 인자들의 등고선도는 교호작용이 없어 직선으로 나타난다. Fig. 4(b)는 공구회전수와 플런지 속도에 대한 인장강도

의 표면도(Surface plot)를 나타내며 2 인자 교호작용 효과로 접힘(Folded)현상이 나타나며 점선으로 표시되었다. 나머지 인자들의 표면도는 교호작용이 없어 접힘없는 평면으로 나타났다. Fig. 5는 반응 최적화 도구의 만족도(desirability) 함수를 이용하여 하한값 [4,000 N]과 목표값 [4,550 N]을 만족하면서 인장강도를 최대화하는 인자의 최적 조건을 도출하였다. 반응을 최대화하는 개별 만족도 함수 d_i 는 다음과 같다.

$$d_i = 0, \quad \hat{y}_i < L_i \quad (2)$$

$$d_i = \left(\frac{\hat{y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right)^{r_i}, \quad L \leq \hat{y}_i \leq T_i \quad (3)$$

$$d_i = 1, \quad \hat{y}_i > T_i \quad (4)$$

여기서, d_i 는 i 번째의 개별 만족도, \hat{y}_i 는 i 번째 반응의 예측값, T_i 는 i 번째 반응의 목표값, L_i 는 i 번째 반응에 허용 가능한 최소값, r_i 는 i 번째 반응의 만족도 함수의 가중치를 나타낸다.

종합 만족도 함수 D는 식 (5)와 같다.

$$D = \left(\prod (d_i)^{w_i} \right)^{\frac{1}{W}}, \quad \sum w_i = W \quad (5)$$

여기서, w_i 는 i 번째 반응의 중요도를 나타내고 W 는 w_i 의 합을 나타낸다. 반응변수가 1개인 경우 식 (5)와 같이 중요도를 1로 두게 되면 개별 만족도와 종합 만족도는 동일하다. 반응 최적화 분석에서 종합 만족도 0.7496를 최대화하는 인장강도의 평균 추정치 4412.28 N을 만족하는 4인자의 도출된 반응 변수의 최대값인 최적조건은 공구회전수 1,700 rpm와 용접속도 0.4 rpm와 플런지 속도 5.0 mm/min 및 플런지 깊이 3.96 mm에서 나타난다. 그래프의 회색 영역은 하한 경계 이하의 영역을 나타내며 종합만족도의 계산에서 제외된다.^[15]

공구 회전수와 플런지 속도가 낮을수록 용접속도와 플런지 깊이가 클수록 종합만족도는 1에 가까워지며 인장강도는 증가함을 알 수 있다.

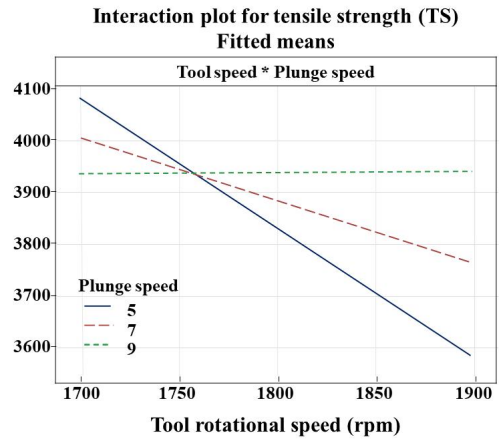
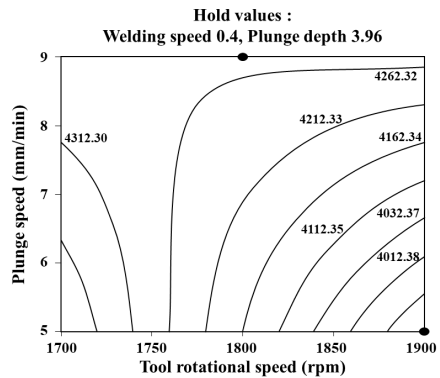
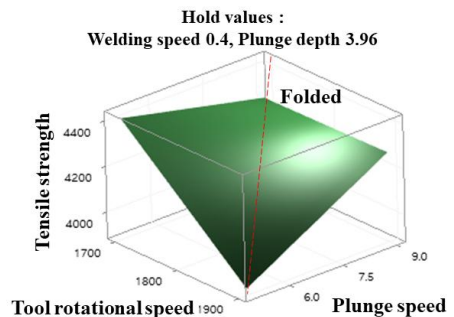


Fig. 3 Interaction plot for tensile strength and tool rotational speed



(a) Contour plot



(b) 3D surface plot

Fig. 4 Plots of tensile strength with plunge speed and tool rotational speed

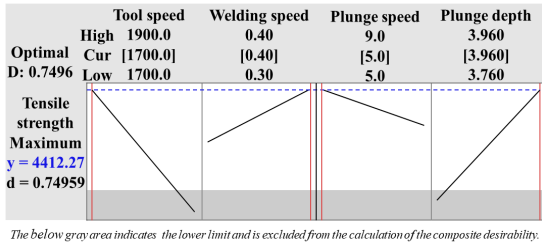


Fig. 5 Response optimization of tensile strength

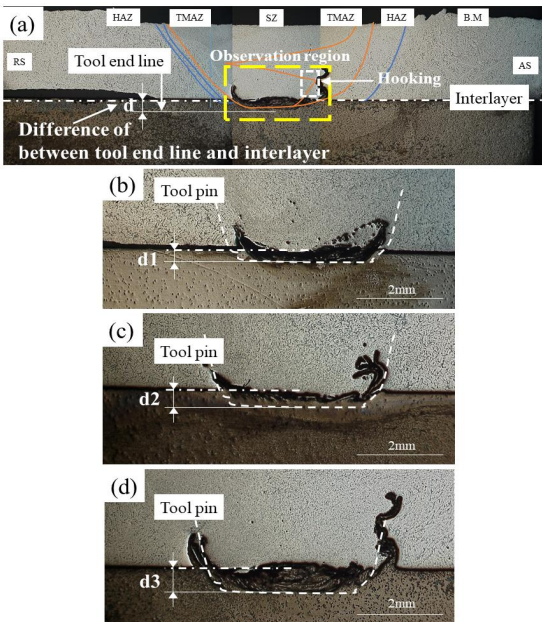


Fig. 6 (a) Optical microscope image of the cross-section of lap joints and difference between interlayer and tool end line by plunge depth (b) 3.76 mm (test no. 1), (c) 3.86mm (test no. 2) and (d) 3.96mm (test no. 3)

3.4 마찰교반접합부 미세구조 특성

Fig. 6은 A357-FB590 파이프의 겹치기 마찰교반 접합부의 미세 조직 사진과 플런지 깊이에 의한 영향을 관찰하기 위해 이중 소재 경계면 접합부 주변의 관심영역을 확대 도시하였다. 확대부의 점선은 공구 편의 형상을 나타낸 것이고 그림의 화살표 간격은 플런지 깊이에 의한 공구 끝단의 위치와 경계면 사이의 차(d)를 의미하며 경계면 아래로 내려간 끝단부까지의 깊이의 차이를 나타내고 있다. 플런

지 깊이는 해당 실험 번호 1~3에 의해 (a) 3.76 mm, (b) 3.86 mm (c) 3.96 mm인 경우의 마찰 교반 실험에서 수준을 정한 순서에 따라 실험을 수행했다. 마찰교반 용접후 접합부의 중앙에 교반부(Stir Zone, S.Z)가 있고, 그 외측에 소성유동(plastic flow)에 의해 결정립(grain)이 늘어난 열적·기계적 영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)가 존재하며, 그 외측에 소성변형은 없지만 열 영향을 받는 열 영향부(Heat Affected Zone, HAZ)가 존재한다. 이 영역은 툴의 전진부(Advancing Side, AS)에서 후진부(Retreating Side, RS)에 비해 영역의 폭이 더 넓게 관찰되었다. 후킹 영역에서는 고장력강의 일부가 갈고리모양으로 알루미늄 쪽으로 상승된 것을 관찰할 수 있어 두 소재가 물리적으로 접합되었음을 알 수 있다.

인장강도가 플런지 깊이에 따른 영향을 받으며 깊이가 깊어질수록 인장강도가 크다는 결과와 교반의 영역도 커지고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 파이프 형태의 주조 알루미늄 A357과 고장력강 FB590을 겹치기 마찰교반 접합하여 5개 인자와 3수준으로 하여 확정선별실험을 통해 총 13회의 실험수행 후 인장시험 측정을 통해 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

- 1) 알루미늄과 강 of 마찰교반 결합시 선정된 공정 인자 중 플런지 깊이의 효과가 인장강도에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.
 - 2) 주 효과도에서 인장강도에 대한 모든 인자의 관계가 3수준에 의한 2차 효과를 나타내는 경향과 달리 인자의 선형관계를 확인할 수 있었다.
 - 3) 공구회전수와 플런지 속도 증가시 인장강도 증가의 효과가 상쇄되는 음의 교호작용을 확인하였고, 인자 증가 및 감소의 방향에 따라 인장강도에 서로 상충효과를 주는 것을 확인할 수 있었다.
- 확정선별 실험법을 통해 공정 인자의 영향력을 확인함으로써, 향후 모형 인자와 수준의 추가적인선정을 통하여 최적화에 활용할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부의 한국기술진흥원의 지역 경제협력권 기술개발사업(P0002238)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Joo, Y. H., et al., "The Weldability of a Thin Friction Stir Welded Plate of Al5052-H32 using High Frequency Spindle", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, No. 1, pp. 90-95, 2017.
2. Long W., et al., "Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99, pp. 1781-1811, 2018.
3. Park, J. H., et al., "Effect on Drive Point Dynamic Stiffness and Lightweight Chassis Component by using Topology and Topography Optimization", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 141-147, 2018.
4. Lee, K. J., "Recent Research & Development Trend on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing", *Journal of Welding and Joining*, Vol. 31, No. 2, pp. 26-29, 2013.
5. Park, J. H., et al., "Evaluation of Mechanical Properties with Tool Rotational Speed in Dissimilar Cast Aluminum and High-Strength Steel of Lap Jointed Friction Stir Welding", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 7, pp. 90-96, 2019.
6. Kumar, K., Kailas, S. V., "The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation", *Materials Science and Engineering*: Vol. 485, Issues. 1-2, 25, pp. 367-374, 2008.
7. Zhang, K. J., et al., "Impact of shoulder concavity on non-tool-tilt friction stir welding of 5052 aluminum alloy", Vol. 96, No. 1-4, pp. 1497-1506, 2018.
8. Barlas, Z., "Tool Influence of Tool Tilt Angle on 1050 Aluminum Lap Joint in Friction Stir Welding Process", *Acta Physica Polonica, A.*, Vol. 132, No. 3, pp. 679-681, 2017.
9. Ramachandran, K. K. & Murugan, N. & Kumar, S. S., "Performance analysis of dissimilar friction stir welded aluminium alloy AA5052 and HSLA steel butt joints using response surface method", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, Issue 9-12, pp. 2373-2392, 2016.
10. Jones, B., and Nachtsheim, C. J., "A Class of Three-Level Designs for Definitive Screening in the Presence of Second-Order Effects", *Journal of Quality Technology*, Vol. 43, pp. 1-15, 2011.
11. Zhang, Y. N. et al., "Review of tools for friction stir welding and processing", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 51, No. 3, pp. 250-261, 2012.
12. Zheng, Q., Feng, X., Shen, Y., Huang, G., & Zhao, P., "Effect of plunge depth on microstructure and mechanical properties of FSW lap joint between aluminum alloy and nickel-base alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 695, pp. 952-961, 2017.
13. Gaohui L., et al., "Influence of dwell time on microstructure evolution and mechanical properties of dissimilar friction stir spot welded aluminum-copper metals", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, pp. 2613-2624, 2019.
14. Baskoro, A. S. et al., "Effects of Dwell-Time and Plunge Speed during Micro Friction Stir Spot Welding on Mechanical Properties of Thin Aluminum A1100 Welds", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 758, pp 29-34, 2015.
15. Wang, Y. et al., "Microstructure and wear resistance of c-BN/Ni-Cr-Ti composites prepared by spark plasma sintering", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 54, pp. 98-103, 2016.