

MSP시험의 미세강도에 의한 FSW 최적용접설계

양성모^{*1)} · 강희용²⁾ · 정병호³⁾ · 유효선¹⁾ · 손인덕¹⁾ · 최승준¹⁾

전북대학교 기계시스템공학부¹⁾ · 전북대학교 기계설계공학부²⁾ · 전북대학교 산업정보시스템공학과³⁾

Optimal Welding Design for FSW Based on Micro Strength by MSP Test

Sungmo Yang^{*1)} · HeeYong Kang²⁾ · Byeongho Jeong³⁾ · Hyosun Yu¹⁾ · Indeok Son¹⁾ · Seungjun Choi¹⁾

¹⁾School of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 54896, Korea

²⁾School of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 54896, Korea

³⁾School of Industrial Information System Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 54896, Korea

(Received 31 December 2015 / Revised 24 March 2016 / Accepted 28 March 2016)

Abstract : The usage of Friction Stir Welding(FSW) technology has been increasing in order to reduce the weight in automobile industries. Previous studies that investigated on the FSW have focused on the aluminum alloy. In this study, Al6061-T6 alloy plates having 5 mm of thickness were welded under nine different conditions from three tool rotation speeds: 900, 1000 and 1100 rpm, and three feed rates: 270, 300 and 330 mm/min. Specimen size of Micro Shear Punch(MSP) test was 10×10×0.5 mm. The mechanical properties were evaluated by MSP test and Analysis of Variance (ANOVA). The specimens were classified by advancing side(AS), retreating side(RS), and center(C) of width of tool shoulder. The optimal welding condition of FSW based on micro strength was obtained when the tool rotation speed was 1100 rpm and the feed rate was 300 mm/min. The maximum load measured AS, RS, and C in the weldment was measured 554.7 N, 642.9 N, and 579.2 N, respectively.

Key words : Friction stir welding(마찰교반용접), Tool rotation speed(공구회전속도), Feed rate(이송속도), Micro shear punch test(미소전단시험), ANOVA(분산분석), Optimal welding(최적용접), Micro strength(미세강도)

1. 서론

마찰교반용접(Friction Stir Welding : FSW)은 매우 간단하면서도 독특한 연속공정으로서 접합모재를 고정시킨 후 이음부의 맞대기면을 따라 특수 형상을 지니고 접합모재에 비해 경한 재질을 지닌 비소모식 회전 tool의 일부분이 삽입되어 tool과 접합모재의 상대적 운동에 의해 마찰열을 발생시켜 모재의 변형저항을 낮추어 연화시키기에 충분한 온도로 인접한 접합부를 가열시킨다. 이로 인해 tool의 삽입된 부분이 접합선을 따라 이동하여 가열된 부

위가 probe의 전진측(advancing side)에서 후퇴측(retreating side)으로 압출되게 되고 마찰열과 기계적 가공의 조합에 의해 고상접합부가 만들어지므로 미소부분에 대한 강도해석이 요구된다.¹⁾

마찰교반용접의 접합 분위기는 Al의 경우 차폐가스가 필요하지 않고 용가재 역시 요구되지 않는다. 특징적인 것은 접합에 따른 변형이 없거나 있어도 용융 용접 방법에 비해 무시할 정도로 적다는 점이다. 접합 중에 흠의 발생도 없고 적외선 등의 유해광선도 발생하지 않는 환경 친화적 접합공정이다.

임성곤 등²⁾은 4종류 공구회전속도와 공구이송속도에서 마찰교반 용접된 Al 6061-T651 합금의 인장 특성과, 박종식 등³⁾은 Al6061-T6 접합부의 기

*A part of this paper was presented at the KSAE 2013 Spring Conference

*Corresponding author, E-mail: yangsm@jbnu.ac.kr

계적 특성을 연구하였으며, 박희상 등⁴⁾은 Al6061-T6 마찰교반용접시 나선형툴과 사각뿔형툴 probe 형상과 이송속도가 기계적 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

Koumoulos 등⁵⁾은 AA6082-T6 알루미늄 합금을 마찰교반용접하여 나노기계를 통하여 미세조직과 기계적 물성과, Palanivel 등⁶⁾은 AA5083-H111과 AA6351-T6 알루미늄 합금의 이중 마찰교반용접에서 공구회전속도와 probe의 효과를 관찰하였고, Liu 등⁷⁾은 Al6061-T6의 마찰교반용접 속도가 미세조직과 기계적 특성의 영향을 평가하였다.

마찰교반용접부 국부조직들의 각기 고유한 기계적 특성 값과 각 조직들의 구성에 따른 이들 특성 값들의 변화를 명확히 고려하지 못하는 문제점 등을 안고 있다. 용접부의 국부조직에 대한 기계적 특성 평가 개발은 아직 해결되지 못하고 있는 실정이다. 이러한 배경 하에서 마찰교반용접부의 국부조직에 대한 기계적 미세특성을 시험하기 위하여 미소시험편을 이용한 MSP(Micro Shear Punch)시험기법에 의한 재료 평가 기술을 사용하였으며 마찰교반에서 최적용접조건을 분산분석(ANOVA)을 통하여 제시하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

현재 마찰교반용접의 가장 큰 응용분야는 경량화가 요구되는 항공기나 고속전철 동체용 알루미늄 합금의 접합 분야로 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 알루미늄합금에서 Al6061-T6 합금을 사용하였다. 이러한 이유는 Al6061-T6 합금은 Al 2000 계 보다 물성이 낮으나 용접성과 내식성이 좋으며, T4에 비해 성형성은 떨어지나 정적 강도가 우수하여 많은 기계 부품에 사용되고 있기 때문이다. Al6061-T6의 화학적 조성비와 기계적 특성을 Table 1과 Table 2에 나타냈다.

2.2 시편제작

2.2.1 마찰교반용접

용접에 사용된 판재는 두께가 5 mm인 2매를 1조로 사용하였다. 마찰교반용접에 사용된 공구는 용

Table 1 Chemical compositions of Al6061 (Wt.%)

Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Zn	Ti	Mn	Al
0.8	0.4	0.15	0.04	0.7	0.25	0.15	0.15	Bal.
~ 1.2	~ 0.8	~ 0.4	~ 0.35					

Table 2 Mechanical properties of Al6061-T6

Yield stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile stress (MPa)	Heat conduction coeff. k(W/m-k)	Density (kg/mm ³)	E (MPa)
55	25	240	0.40	2.7 ¹⁰ ⁻⁶	693.3

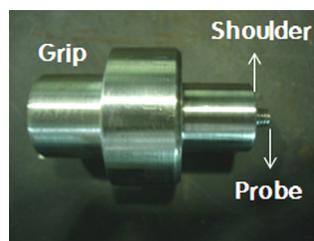


Fig. 1 Photograph of rotation tool used in friction stir welding

Table 3 Specification of the friction stir welding tool

Name	Property	Unit (mm)
Shoulder	Diameter	18
	Length	4.8
Probe	Diameter	5
	Tilting angle	0°

접성에 영향을 주는 인자로 공구의 모양에 따라 기계적 특성이 크게 영향을 받으며 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 원형나사 공구를 사용하였으며, 공구의 회전방향은 시계방향(clockwise)으로 하였다. 공구 사양은 Table 3에 나타낸 바와 같이 마찰교반용접에 대표적으로 사용되는 마찰교반용접공구이다.

마찰교반용접기는 국내 W사의 3축 스탠드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였다. 마찰교반용접기 사양은 공구회전속도 1800 RPM까지 사용이 가능하며, 이송속도는 최대 3000 mm/min까지 가능하다.

본 연구에 사용된 용접조건은 앞서 인장 실험한 최인영 등⁸⁾의 마찰교반용접 조건을 기반으로 Al 6000계열의 용접성이 우수한 용접조건에 속하는 공구회전속도 900, 1000, 1100 RPM과 이송속도는 270,

Table 4 Friction stir welding conditions for Al6061-T6

Feed rate (mm/min)	Tool rotation speed (RPM)
270	900
	1000
	1100
300	900
	1000
	1100
330	900
	1000
	1100

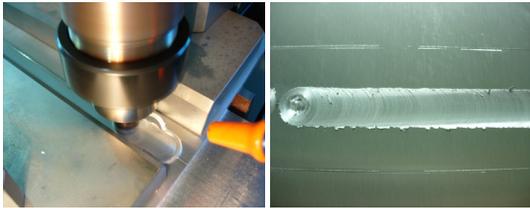


Fig. 2 Photograph of friction stir welding

300, 330 mm/min을 사용하여, 조합된 9가지 방법으로 용접을 시행하였다(Table 4). 용접 작업은 Fig. 2에 나타내었다.

2.2.2 시편제작

마찰교반용접된 9개의 용접부위를 Fig. 3과 같이 용접부의 상단표면에서 전진측(advancing side)과 후퇴측(retreating side)은 중앙(center)에서 6 mm씩 떨어진 지점에서 11×11×1(길이×폭×두께)mm로 와이어 커팅기와 다이아몬드 커팅기를 사용하여 각 조건마다 절삭하고, 5개의 시험편을 평균화 하였다. 이때 주의할 점은 전진측과 후퇴측 시편은 열영향부(HAZ)와 열-기계적 영향부(TMAZ)의 경계선이 중앙에 오도록 하였다.

절삭된 시편은 전진측과 후퇴측 시편의 HAZ와 TMAZ 경계선을 확인하기 위하여 Keller 용액(75 mlH₂O + 5 mlHNO₃ + 15 mlHCl + 5 mlHF)으로 부식하며, #320, #800, #1200, #1500, #2000 연마포를 이용하여 최종적으로 10×10×0.5 mm가 되게 연마한다. 아세톤(CH₃COCH₃) 용액에 담근 후, 초음파 세척기를 이용해 10분 이상 세척을 완료한 후 드라이기를 이용하여 완전히 건조시켜 시험편을 완성한다.

2.3 MSP시험

미소시험기법을 이용한 MSP 시험방법의 개략도는 Fig. 4에 나타내었다. 크게 상부다이와 하부다이 그리고 부하용 강구(steel ball)로 이루어진 MSP 지그와 온도 제어장치 및 데이터 획득 장치 등으로 구성되어 있다. MSP 시험은 시험편의 상부에 φ 2.4 mm의 강구를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로서 수행되며, 시간에 따른 시험편의 중앙변위(central displacement : δ)를 측정함으로써 하중의 거동을 조사하는 방법이다. 부가하중 속도에 따른 재료의 변화양상을 1 μm까지 정밀히 측정할 수 있어 값에 대한 오차율도 매우 적은 시험방법이다.^{9,10)}

본 연구에 선정된 부하속도는 0.2 mm/min 이며, 온도는 상온에서 수행하였다. MSP 시험으로부터 얻은 최대하중은 재료의 미세특성을 파악하는데 중요한 요소이다.

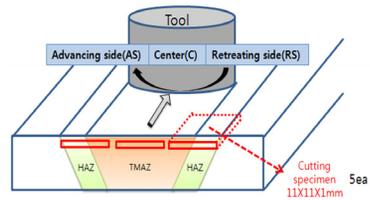
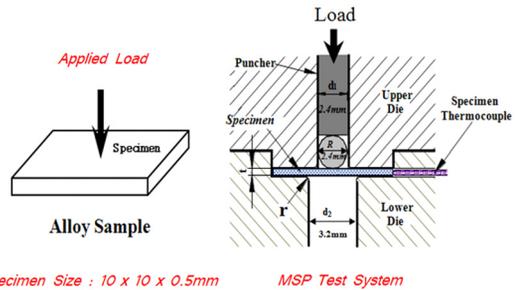


Fig. 3 Schematic illustration of cutting specimen in friction stir welded



Specimen Size : 10 x 10 x 0.5mm

MSP Test System

Name	t	d1	d2	r	R
Small punch	0.5	2.4	4	0.2	2.4

Fig. 4 Schematic diagram of the detailed MSP-jig (mm)

3. 하중변위거동 및 최대하중

본 장에서는 MSP 시험시 부하속도 0.2 mm/min인 경우에 시험편이 변형됨으로써 발생하는 하중 및

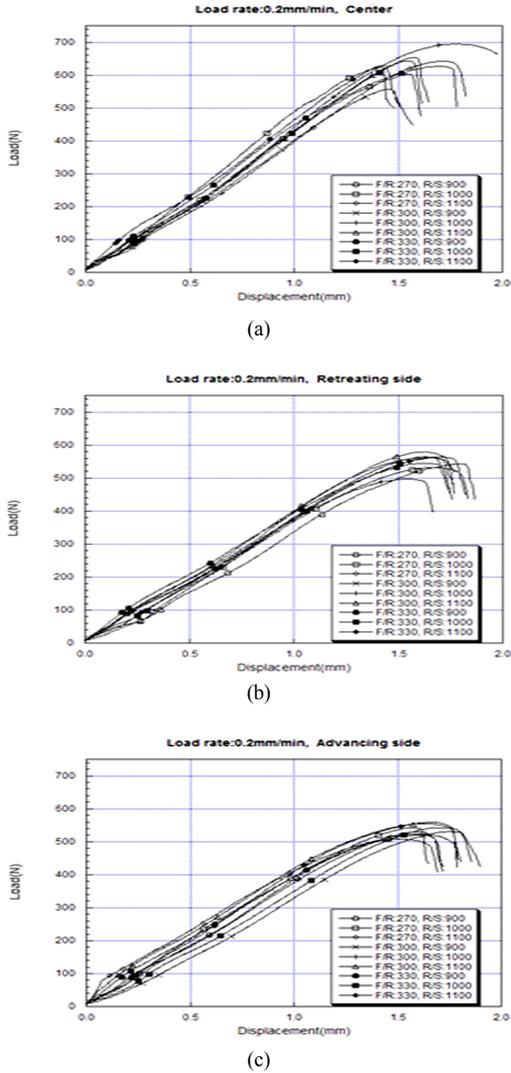


Fig. 5 Load-displacement curve used MSP test : (a) advancing side, (b) center, (c) retreating side

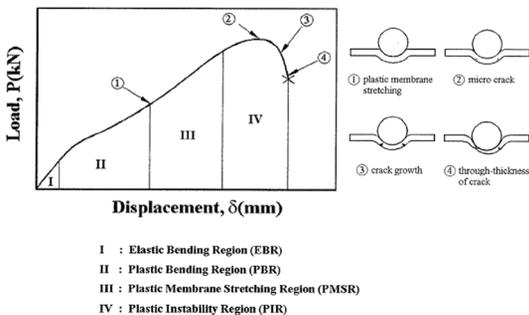


Fig. 6 The general deformation characteristics and fracture process in MSP specimen

변위를 보고자 하였다. Fig. 5는 용접부의 위치에 따라서 하중-변위로 나타낸 그래프이다. Fig. 6은 모든 용접 조건에서 4단계 파괴거동(탄성굽힘영역, 소성 굽힘영역, 소성막신장영역 그리고 소성불안정영역)을 나타낸 그래프이다. 중앙부가 큰 하중-변위 거동을 보이고 있다. 모든 부위의 이송속도 270, 330 mm/min에서 최대하중(P_{max}) 이후 매우 적은 양의 연성적인 거동을 보이고 곧 바로 파괴에 이르는 연취성적 파괴거동을 보인다. 한편, 중앙부의 이송속도 300 mm/min, 공구회전속도 1000 RPM에서 최대하중 이후 연성거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 위치에 따라서 용접조건별 P_{max} 을 나타내었다. 전진측(a)의 경우 공구회전속도 900, 1000 RPM에서 이송속도 변화에 따라 비슷한 P_{max} 을 보여주었고, 1100 RPM에서 270 mm/min인 경우 다른 이송속도에 비해 약 9% 가량의 가장 작은 P_{max} 결과를 보였다. 이송속도 기준으로 볼 때, 300, 330 mm/min인 경우 공구회전속도증가는 P_{max} 증가로 이어졌고, 270 mm/min인 경우 증가하다가 감소함을 보여주었다.

중앙부(b)의 경우 공구회전속도 1000 RPM에서 300 mm/min에서 695 N으로 가장 큰 값을 보여주었으며, 대체적으로 1000 RPM이 다른 공구 회전속도에 비해 높게 나타났다. 공구회전속도 900, 1000 RPM의 경우 이송속도 변화에 따라 P_{max} 이 큰 폭으로 변화하였다. 이송속도 기준으로 볼 때, 300, 330 mm/min의 경우 공구회전속도 증가는 P_{max} 하중이 증가하다가 감소하는 결과를 보여주었고, 270 mm/min의 경우 공구회전수의 증가는 P_{max} 에 긍정적인 영향을 주었다.

후퇴측(c)의 경우 전진측과 유사한 P_{max} 을 보여주었으며, 중앙부처럼 이송속도와 공구회전속에 따라 큰 폭으로 변화하였다. 이송속도 기준으로 볼 때, 270, 300 mm/min에서 공구회전수가 증가할수록 P_{max} 가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보여주었으며, 300 mm/min의 경우에는 공구회전수가 증가할수록 P_{max} 가 증가하였다.

4. 분산분석

2절의 실험재료 및 실험방법에서 설명한대로 실

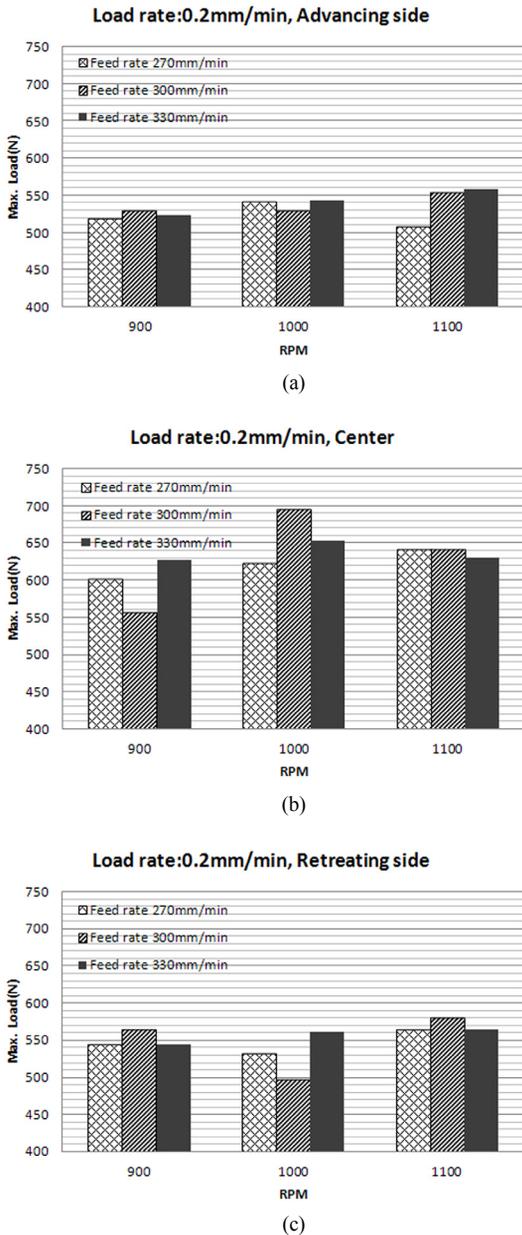


Fig. 7 The maximum load for each conditions : (a) advancing side, (b) center, (c) retreating side

험은 두 인자 공구회전속도(TRS)와 공구이송속도 (FR)의 세 가지 수준에 대하여 실험하였다. 즉, 인자 공구회전속도는 900, 1000, 1100 RPM의 세 수준, 공구이송속도는 270, 300, 330 mm/min 세 수준의 9가지 실험조건에서 실험하였다. 즉 반복이 없는 이원 배치 실험이 이루어졌다. 관심 있는 특성치는 전진

Table 5 Results of two-way ANOVA with respect to mean strength

Two-way ANOVA: P versus TRS(RPM), FR(mm/min)

Source	DF	SS	MS	F	P
TRS(RPM)	2	1050.14	525.070	9.55	0.030
FR(mm/min)	2	284.01	142.004	2.58	0.190
Error	4	219.83	54.957		
Total	8	1553.97			

S = 7.413 R-Sq = 85.85% R-Sq(adj) = 71.71%

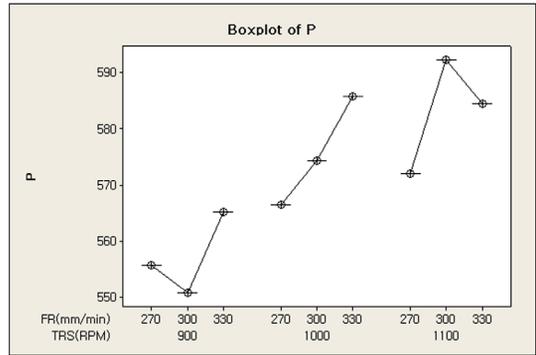


Fig. 8 Boxplot of mean strength by two-way ANOVA

측, 중앙, 후퇴측 등 세 군데의 측정위치에서 강도 측정치들을 이용하여 분산분석¹¹⁾을 실시하였으며 분석 결과를 요약하면 Table 5와 같다.

분산분석에서 세 측정 위치의 측정치 평균과 편차를 대상으로 실험 조건에 따른 차이가 있는지 분석하였다. 전체적인 용접 강도는 세 측정 위치 강도의 평균으로 대표된다는 점에서 세 측정 위치 강도의 평균에 대한 분산분석을 실시하였다. 그 결과는 Table 5와 같다. 분석 결과 공구이송속도는 강도 평균에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나왔다. 다만 공구회전속도 인자는 $p=0.030$ 으로 상당히 유의한 영향을 미치는 것으로 나왔다. Fig. 8에서 보듯이 공구회전속도 1100 RPM, 공구이송속도 300 mm/min에서 평균 강도가 가장 높게 나타나고 있으나 공구이송속도가 유의한 영향을 주지 않기 때문에 공구이송속도의 조건은 의미가 없다 하겠다.

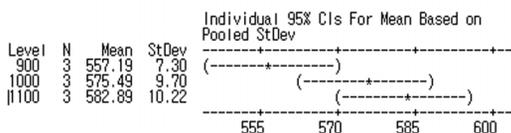
따라서, 공구회전속도만을 고려한 분산분석해본 결과를 Table 6에서 보여주고 있다. 이 역시 $p=0.030$ 으로 유의한 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 공구회전속도 1100 RPM에서 평균 강도가 가장 높게 나타나고 있으며 특히, 900 RPM과 1100 RPM 두 경우는 95% 유의수준에서 평균 강도에 유의한 차이가 있다는 것을 보여준다.

Table 6 Results of two-way ANOVA with respect to mean strength

One-way ANOVA: P versus TRS(RPM)

Source	DF	SS	MS	F	P
TRS(RPM)	2	1050.1	525.1	6.25	0.034
Error	6	503.8	84.0		
Total	8	1554.0			

S = 9.164 R-Sq = 67.58% R-Sq(adj) = 56.77%



Pooled StDev = 9.16

다음은 전진측과 후퇴측의 강도 편차가 전체 강도에 연관된다는 점을 고려하여 두 위치의 강도차에 대한 분산분석을 실시하였으나 공구회전속도(p=0.844), 공구이송속도(p=0.520) 모두 두 위치 강도 차이에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 전진측과 후퇴측 각 위치의 강도에 대한 분산분석 역시 실시해 보았으나 모두 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 다만 Fig. 7에서 공구회전속도와 공구이송속도 두 인자 사이에 교호작용이 존재할 것으로 보인다는 점을 보여주고 있기 때문에 교호작용 검출을 위해 반복 실험을 해볼 필요가 있다는 점을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 많은 기계부품에 사용되고 있는 Al6061-T6합금을 9가지의 용접조건으로 마찰교반 용접하여, 공구회전방향을 중심으로 전진측과 중앙부 그리고 후퇴측에 미소시험편을 제작하여 MSP 시험을 하였다. 최대하중의 기계적 특성을 평가하고 분산분석을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 공구이송속도는 강도 평균에 유의한 영향을 미치지 않으나 공구회전속도는 p=0.030으로 상당히 유의한 영향이므로 교반용접시 공구 RPM관리가 필요하다.
- 2) 평균강도가 가장 높은 최적용접은 공구회전속도 1100 RPM, 공구이송속도 300 mm/min에서 나타났다. 전진측 554.7 N, 중앙 642.9 N, 후퇴측 579.2 N 이었다. 향후 공구회전속도와 공구이송속도 두 인자 사이

에 교호작용이 존재하므로 교호작용 검출을 위해 추가적인 반복 실험이 필요가 있다고 사료된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A1A2055125).

References

- 1) Y. J. Lee, Establishment of Optimal Friction Stir Weldment Condition for Al6061-T6 by Small Punch Test, M. S. Thesis, Chonbuk National University, Jeonju, 2014.
- 2) S. G. Lim, S. S. Kim, C. G. Lee and S. J. Kim, "Tensile Behavior of Friction Stir Welded Al 6061-T651," J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol.42, No.1, pp.29-36, 2004.
- 3) J. S. Park, S. K. Jang, S. J. Kim and D. C. Lee, "Mechanical Characteristic on Friction Stir Welded Joints with 6061T6 Aluminium Alloys," KOSME Symposium, pp.361-362, 2008.
- 4) H. S. Park, Y. H. Lee, W. D. Choi and J. B. Ko, "A Study on the Effect That Pin Shape and Welding Speed have an Influence on Mechanical Strength in Friction Stir Welding Al6061-T6," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.17, No.4, pp.22-28, 2008.
- 5) E. P. Koumoulos, C. A. Charitidis, N. M. Daniolos and D. I. Pantelis, "Nanomechanical Properties of Friction Stir Welded AA6082-T6 Aluminum Alloy," Materials Science and Engineering B 176, Vol.176, No.19, pp.1585-1589, 2011.
- 6) R. Palanivel, P. Koshy Mathews, N. Murugan and I. Dinaharan, "Effect of Tool Rotational Speed and Pin Profile on Microstructure and Tensile Strength of Dissimilar Friction Stir Welded AA5083-H111 and AA6351-T6 Aluminum Alloys," Materials & Design, Vol.40, pp.7-16, 2012.
- 7) H. J. Liu, J. C. Hou and H. Guo, "Effect of Welding Speed on Microstructure and Mecha-

- nical Properties of Self-reacting Friction Stir Welded 6061-T6 Aluminum Alloy,” *Materials & Design*, Vol.50, pp.872-878, 2013.
- 8) I. Y. Choi, Y. J. Kang, A. Kim and K. S. Ahn, “Development of the Two-piece Aluminum Wheels Using the Friction Stir Welding,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol.22, No.4, pp.700-707, 2013.
- 9) I. S. Hwang, H. A. Kang, Y. J. Lee, H. S. Yu and S. M. Yang, “Analysis on Maximum Load and Fracture Energy Corresponding to the Load Speed of 6061-T6 Al Alloys by Small Punch Test,” *Proceeding of the KSME Annual Meeting*, pp.1-5, 2013.
- 10) Y. J. Lee, J. H. Song, K. J. Kim, H. S. Yu and S. M. Yang, “Evaluation for Fracture Energy on Friction Stir Welded Joint with 6061 Al Alloys by SPtest,” *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.1737-1742, 2013.
- 11) S. H. Park, *Experimental Design and Analysis*, Minyoungsa, Seoul, 1998.