

**Mg Alloy(AZ61) 마찰교반용접 조건에 따른 용접부의
온도와 기계적 특성변화**이우근^a, 김정석^{a*}, 선승주^a**Temperature and Mechanical Properties of Welded Joints Under Friction Stir
Welding Conditions of Mg Alloy (AZ61)**Woo Geun Lee^a, Jung Seok Kim^{a*}, Seung-Ju Sun^a^a New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute,
176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	7	June	2017
Revised	20	July	2017
Accepted	1	August	2017

*Keywords:*Magnesium alloy
Extrusion
Friction Stir Welding
Temperature measurement
Property**ABSTRACT**

Friction stir welding was performed using six welding conditions to evaluate the mechanical properties and microstructure of the welded zone based on its temperature change in the extruded plate of magnesium alloy AZ61. The welded zone temperature was measured using a thermocouple, and the maximum temperature ranges for the advancing and retreating sides were approximately 210-315°C and 254-339°C, respectively. Depending on the welding conditions, a temperature difference of more than 100°C was observed. In addition, the maximum yield strength and maximum tensile strength of the welded component was 84.4% and 96.9%, respectively, of those of the base material. For the temperatures exceeding 300°C, oxidation defects occurred in the weld zone, which decreased the mechanical strength of the weld zone. The microstructure and texture confirmed that fracture occurred because of the grain size deviation of the welding tool and the severe anisotropy of the texture of the welded joints.

1. 서론

마그네슘 합금은 밀도가 낮고 비강도가 높은 장점 때문에 자동차, 항공, 철도와 같은 수송기기의 경량화를 위하여 그 수요가 빠르게 증가하고 있다^[1,2]. 또한 마그네슘 합금은 가장 가벼운 상용 금속으로 전자파에 대한 차폐성과 진동흡수성이 우수하고 기계가공성과 금형 수명이 우수하다^[3]. 하지만, 산화성이 크고 폭발에 대한 위험성이 있을 뿐만 아니라 내식성 및 내열성이 떨어진다. 이러한 이유로 마그네슘 합금을 기존의 TIG, MIG 용접 방법으로는

용접부의 기계적 특성을 모재대비 절반정도의 수준을 갖는다. 반면에 Friction Stir Welding (FSW)을 사용할 경우에는 일반용접 방법에 비해 용접부의 기계특성을 모재대비(80~100%)로 월등히 높일 수 있다^[4-7]. 따라서 최근 여러 산업분야에서는 마그네슘 합금의 FSW용접에 관한 연구가 많이 활발하게 진행되고 있다^[8-11].

FSW 공법은 고상 접합 기술로 1991년 영국의 The Welding Institute (TWI)에서 개발되었다^[12]. FSW는 마찰열만을 열원으로 소재의 용점 이하의 온도에서 재료를 접합시키기 때문에 기존의 전기아크용접 방법들에 비해 용접부의 기계적 성질이 우수하다. 또

* Corresponding author. Tel.: 031-460-5663

Fax: 031-460-5299

E-mail address: jskim@krii.re.kr (Jung Seok Kim).

한, 화염이나 기공 및 용접잔해가 남지 않아 용접 후 특별한 표면 처리가 필요 없을 뿐만 아니라 레이저 용접에 비해 단지 2.5%의 에너지를 소비한다. 이러한 이유로 FSW는 매우 친환경 적이며 경제적인 공법으로 주목 받고 있다^[13,14].

Moralleb-nejad et al.^[15]은 마그네슘 합금 AZ31B의 톨 핀 프로파일에 따른 FSW 용접부 미세구조와 기계적 물성을 평가하여, 그레인 사이즈의 증가가 기계적 물성을 감소 시키는 것을 확인하였다. Wang and Wang^[5]은 마그네슘 합금 AZ31 맞대기 용접부의 미세조직, 경도, 기계적 물성을 평가하여 최적의 용접 조건을 도출하였다. 이와 같이 지난 연구들에서는 대부분 마그네슘 합금 AZ31 FSW 용접부의 인장강도, 미세조직, 경도 등을 분석하여 용접부의 특성을 평가 하고 용접조건을 도출하고 있다. 하지만 열에 민감한 마그네슘 합금의 특성상 용접부의 온도 또한 용접부 건전성에 중요한 요소라 할 수 있는데 아직까지 용접부에 발생하는 열에 대한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 기존에 많이 연구되지 않은 마그네슘 합금 AZ61의 압출 판재 맞대기 용접에 대한 용접부의 온도 변화에 따른 용접부의 기계적 특성 및 미세조직을 평가하기 위해 6가지의 용접 조건을 설정하여 마찰교반용접을 실시하였다. 시편에 열전대를 설치하여 용접시 발생하는 온도를 측정하고, 기계적 특성을 알아보기 위하여 용접부의 인장시험을 진행하였다. 또한 미세조직 관찰을 통해 용접부 온도변화에 따른 미세조직과 집합조직의 경향을 확인하였다.

2. 시편 제작 및 시험 방법

2.1 용접 조건

본 연구에서는 마그네슘 합금 AZ61 (Al 5.6 wt.%, Zn 0.78 wt.%, Mn 0.2 wt.%, balance Mg) 압출 판재를 55 mm × 300 mm × 5 mm의 크기로 가공하여 맞대기 용접을 수행하였다. 사용된 FSW머신의 회전 방향은 시계 방향이고 하중제어 방식이 아닌 변위제어 방식이다(Fig. 1). 용접조건에 따른 온도차를 뚜렷하게 구분하기 위하여 톨 회전속도 400 rpm, 800 rpm, 1,600 rpm, 용접 속도 100 mm/min, 300 mm/min을 조합한 총 6가지 조건으로 용접을 진행하였다. 톨의 재질은 SKD61이고 테이퍼에 나사산이 있는 형상으로 자세한 톨 정보는 Table 1에 나타나 있다. 솔더의 지름과 핀의 지름은 3:1의 비율로 각각 18 mm와 6 mm이다.

2.2 온도측정 및 인장시험 방법

용접시 발생하는 온도 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 열전대를 삽입 할 수 있도록 시편을 가공하였다. 온도측정위치는 톨과 열전대간의 간섭을 방지하기 위해 용접선에서 12 mm 떨어지고, 두께

Table 1 FSW tool information

Tool shape	Taper pin
Tool material	SKD61
Shoulder diameter	18 mm
Probe diameter	3.4 - 6 mm
Probe height	4 mm
Rotation direction	Clockwise

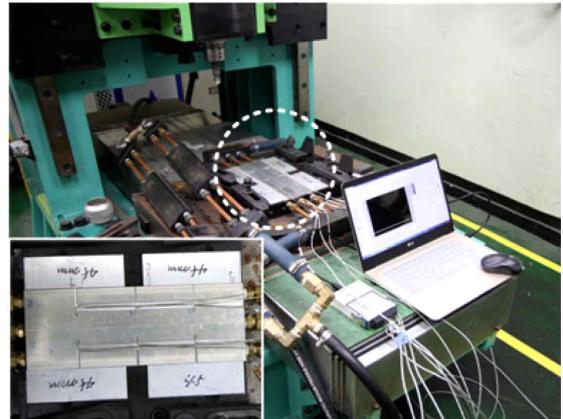


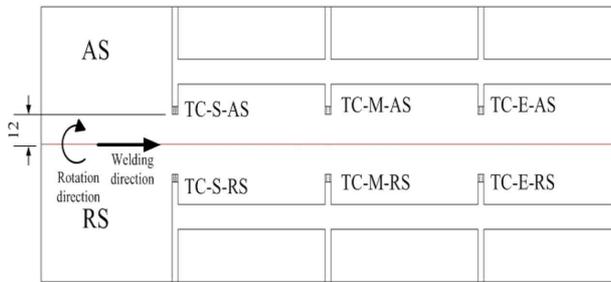
Fig. 1 Temperature measurement test of welding zone of friction stir welding

방향으로는 윗면에서 3 mm 지점에 1.5 mm의 구멍을 만들어 열전대를 설치하였다. 또한 Advancing side (AS)와 Retreating side (RS) 방향의 온도차와 용접진행 시간에 따른 온도변화를 관찰하기 위하여 AS와 RS 각각 용접의 시작, 중간, 끝 3부분의 동일한 위치에서 온도를 측정하였다. 온도측정에 사용된 열전대는(Thermocouple, TC) K 타입으로 지름 1.5 mm를 사용하였고 데이터는 샘플링은 DAQ (NI9213, National Instrument Co.)를 이용하여 10S/s로 취득하였다. 각 케이스당 3번의 반복시험을 통해 측정값의 신뢰도를 높였다.

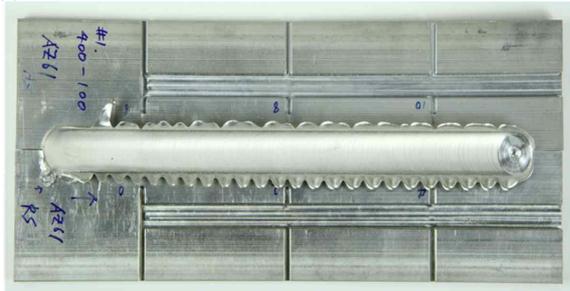
인장시편 채취용 용접시편은 은 Fig. 3(a)와 같이 수행 하였고, 용접방향의 수직 방향으로 ASTM E8에 따라 케이스별 5개씩 제작하였다(Fig. 3(b)). 정확한 인장시편의 치수는 Fig. 3(c)에 나타내었다. 인장시험은 Instron 5982 장비를 사용하여 1 mm/sec의 속도로 상온에서 진행하였다.

2.3 미세조직 관찰방법

모재와 용접부의 미세조직을 관찰하기 위해 광학현미경을 사용하였고 광학현미경은 Nikon Epiphot 200 장비를 사용하였다. 부위에 따른 국부적 텍스처의 차이를 알아보기 위해 Electron backscatter diffraction (EBSD)를 실시하였다. 장비는 Hitachi SU-6600 전계 방사형 주사전자현미경에 부착된 EBSD 검출기를 이용하였다. 미세조직관찰과 EBSD 측정은 용접방향의 수직



(a) Test specimen drawings

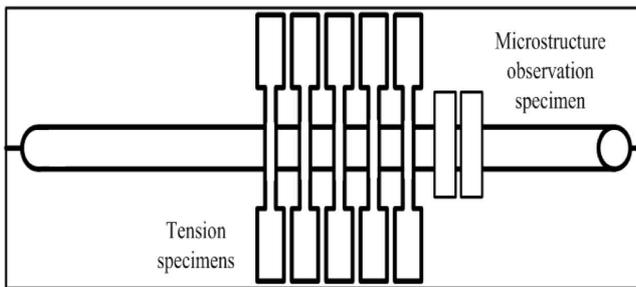


(b) Test specimen

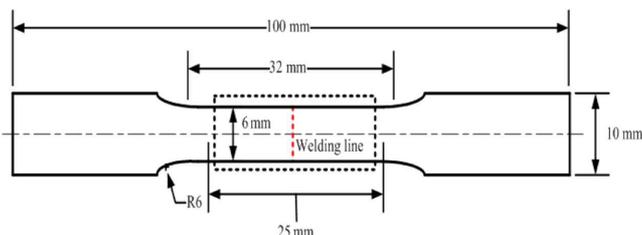
Fig. 2 Welding specimen for temperature measurement



(a) Test specimen



(b) Test specimen drawings



(c) Tensile test specimen drawings

Fig. 3 Welding Specimen for Tensile Testing and Specimen dimensions

단면에서 수행되었다. 광학현미경 관찰을 위한 시편은 3 g picric acid + 10 ml acetic acid + 10 ml distilled water + 100 ml ethanol의 에칭액을 사용하였다. EBSD 는 1 μm 의 스텝 사이즈로 측정하였고, pole figure계산과 inverse pole figure 는 스캔면적 490 $\mu\text{m} \times 650 \mu\text{m}$ 의 범위에서 스캔된 것을 토대로 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 측정

Fig. 4는 각각 시간에 따른 측정위치별 온도변화를 나타내고 있다. 용접속도의 변화는 톨 회전수변화에 비해 용접부 온도 상승에 민감하게 나타났다. 동일한 톨 회전수에서 용접속도 100 mm/min의 결과가 용접속도 300 mm/min의 결과보다 온도가 모두 높게 측정되었다. 또한 용접속도가 빨라질수록 톨 회전수에 따른 온도의 변화폭은 줄어들었고, 용접진행 시간이 지날수록 톨의 온도 상승으로 인해 측정온도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 용접부의 길이가 증가했을 때 균일한 건전성 확보에 중요한 요인이므로 향후 더 긴 시편의 온도 테스트를 통해 온도 상승 정도를 파악해 일정한 용접온도를 유지하는 방안에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

Table 2은 용접조건별 3번씩 실시한 온도측정 실험을 통해 TC-S (Thermocouple start), TC-M (Thermocouple middle), TC-E (Thermocouple end) 세 지점에서 얻은 최고온도의 평균을 보여준다. 온도측정시험 결과 마찰교반용접시 발생하는 최고 온도의 범위는 AS에서 약 210°C~315°C로 용접 조건에 따라 약 100°C가 넘는 차이를 보였다. 또한 RS에서는 약 254°C~339°C 용접 조건에 따라 약 85°C의 차이로 AS보다 편차는 적게 측정되었지만 최고온도평균이 AS보다 약 30°C 높게 측정되었다. 오직 400 rpm-100 mm/min의 용접조건 TC-M와 TC-E에서만 AS의 최고온도평균이 RS의 평균온도보다 약 1~6°C 높게 측정되었다.

앞선 연구에서는 AS의 온도가 RS보다 높게 측정되었고^[16], 이론 적으로도 회전 방향과 진행방향이 동일한 AS에서 더 많은 에너지가 발생하기 때문에 온도가 높게 발생하게 된다. 하지만 본 연구의 결과는 반대로 RS에서 AS보다 온도가 높게 측정되는 경향을 보였다. 그 이유로는 AS와 RS에 발생하는 burr형상의 차이 때문 이라고 할 수 있다. Fig. 2(b), Fig. 3(a)와 같이 AS 방향의 burr는 일자모양으로 용접 방향(welding direction)으로만 발생하였는데 RS 방향의 burr는 물결모양으로 용접방향뿐만 아니라 용접방향의 수직방향으로도 발생하면서 RS 방향의 온도를 상승시킨 것으로 사료된다.

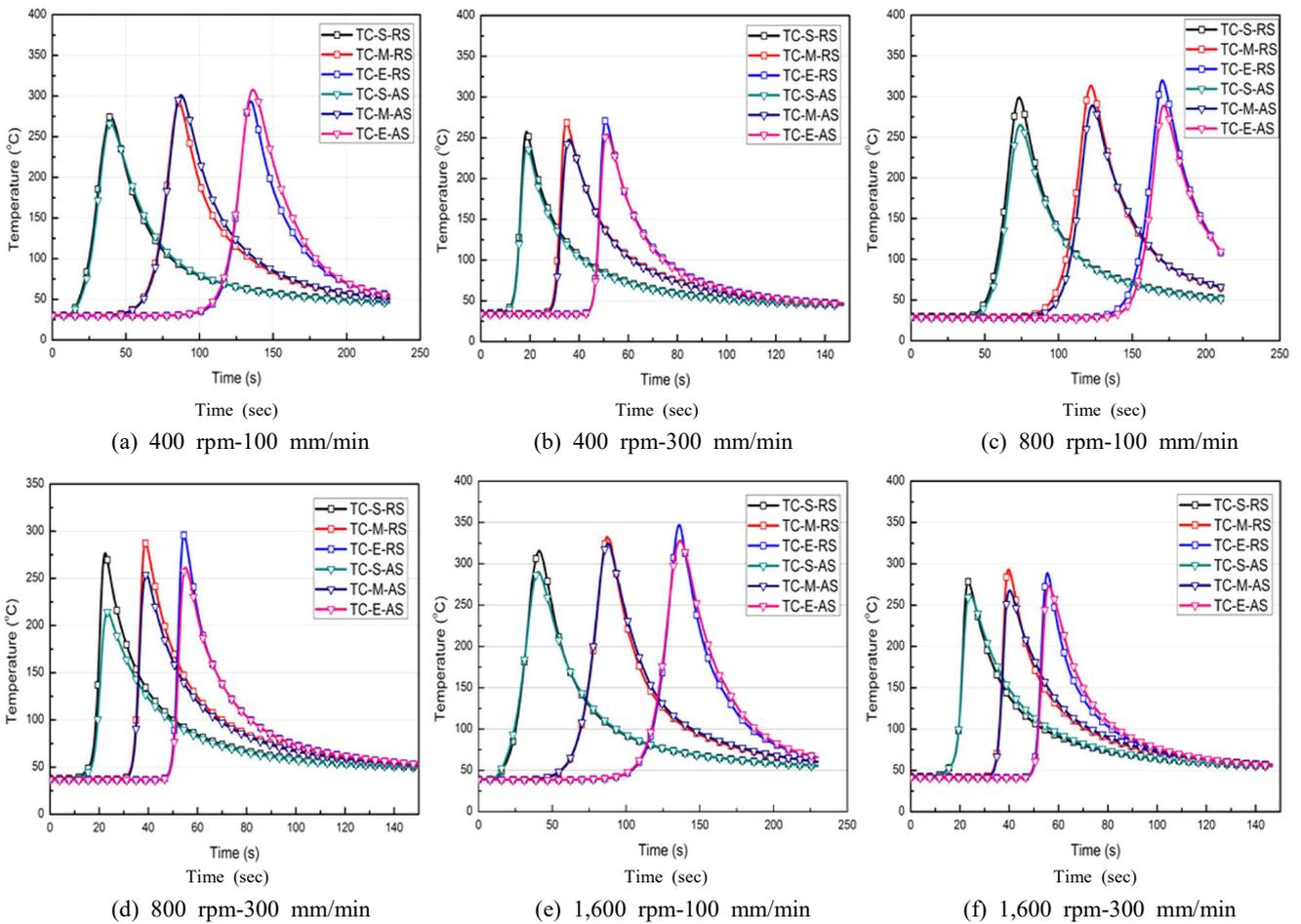


Fig. 4 Results of temperature measurement using thermocouple

AS방향에서의 최대측정온도는 모두 1,600 rpm-100 mm/min 조건에서 발생하였고, RS방향에서는 800 rpm-100 mm/min 조건에서 발생하였다. 최대측정온도가 방향에 따라 조건이 다르게 나타났는데 이 역시 burr 형상에 따라 차이를 보이는 것으로 사료 된다.

3.2 인장 시험

Table 3에는 용접부의 인장시험 결과인 항복 강도, 인장강도, 연신율이 나타나 있다. 용접부의 항복강도와 인장강도는 모재대

비 최대 약 84.4%, 96.9%로 기존 용접방법에 비해 높게 측정되었지만 연신률은 모재대비 최대 약 49.1%로 50% 이상 성능이 저하되는 결과를 보여준다. 또한 항복강도 기준으로는 400 rpm-300 mm/min의 조건이 가장 높게 나타났지만 인장강도와 연신률은 800 rpm-300 mm/min 조건에서 가장 높게 나타났다. 시험 결과 인장강도와 연신률은 비례하는 경향을 보였고 인장강도와 항복강도는 비례하지 않았다. 용접 온도가 처음부터 300°C 이상으로 높게 측정된 1,600 rpm-100 mm/min과 800 rpm-100

Table 2 Temperature measurement result

Welding condition (rpm-mm/min)	TC-S(°C)		TC-M(°C)		TC-E(°C)	
	AS	RS	AS	RS	AS	RS
(a) 400-100	261.3	273.8	298.1	292.4	306.8	305.2
(b) 400-300	236.1	252.2	254.7	269.4	258.0	270.8
(c) 800-100	273.7	309.3	305.6	333.5	314.2	339.0
(d) 800-300	210.2	254.3	249.2	271.6	254.2	266.9
(e) 1600-100	276.4	304.1	307.3	311.9	315.3	321.9
(f) 1600-300	255.5	273.4	257.8	290.1	266.7	292.8

Table 3 Tensile test result of weld zone

Welding condition (rpm-mm/min)	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
Base metal (AZ61)	196.5	310.6	24.5
(a) 400-100	156.36	262.98	5.90
(b) 400-300	166.62	272.11	6.34
(c) 800-100	141.96	291.29	9.86
(d) 800-300	148.26	301.05	12.04
(e) 1600-100	127.46	146.85	1.00
(f) 1600-300	153.24	282.71	8.18

mm/min에서 항복강도가 낮게 측정되었고, 1,600 rpm-100 mm/min는 항복강도뿐만 아니라 인장강도와 연신률도 가장 낮게 측정되었다.

Fig. 5는 용접 조건에 따른 인장시편 파단부의 단면을 보여주고 있다. Fig. 5(a), (b)의 경우 AS 방향의 열기계적영향부(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)과 교반부(Stir zone, SZ)의 경계에서 파단이 일어났고, Fig. 5(c), (d), (f)는 SZ에서 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다. TMAZ와 SZ의 경계면에서 파단이 일어난 조건들(Fig. 5(a), (b))에서는 용접부의 교반이 적절하게 이루어지지 않아 인장강도와 연신률이 작게 측정된 것을 확인할 수 있다. 반면에 SZ에서 파단이 일어난 조건에서는 교반이 잘 이루어져 인장강도와 연신률이 크게 측정된 것을 확인 하였다. Fig. 5(e)는 모든 물성이 가장 낮게 측정된 1,600 rpm-100 mm/min 조건의

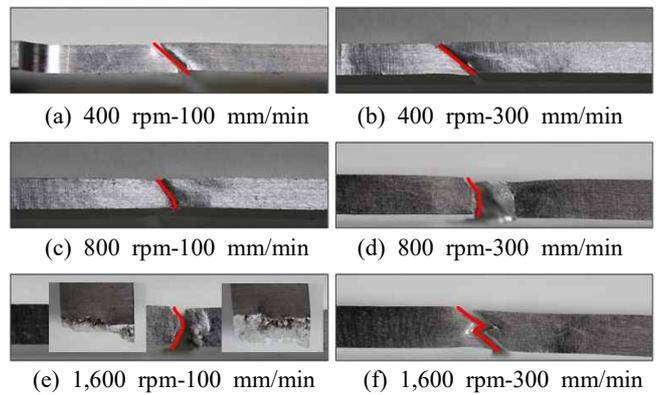


Fig. 5 Fracture of tensile specimen

파단면을 나타내고 있다. 파단면 관찰결과 높은 회전수와 느린 용접속도로 인해 용접부에 열량이 과도하게 발생하여 소재가 일부

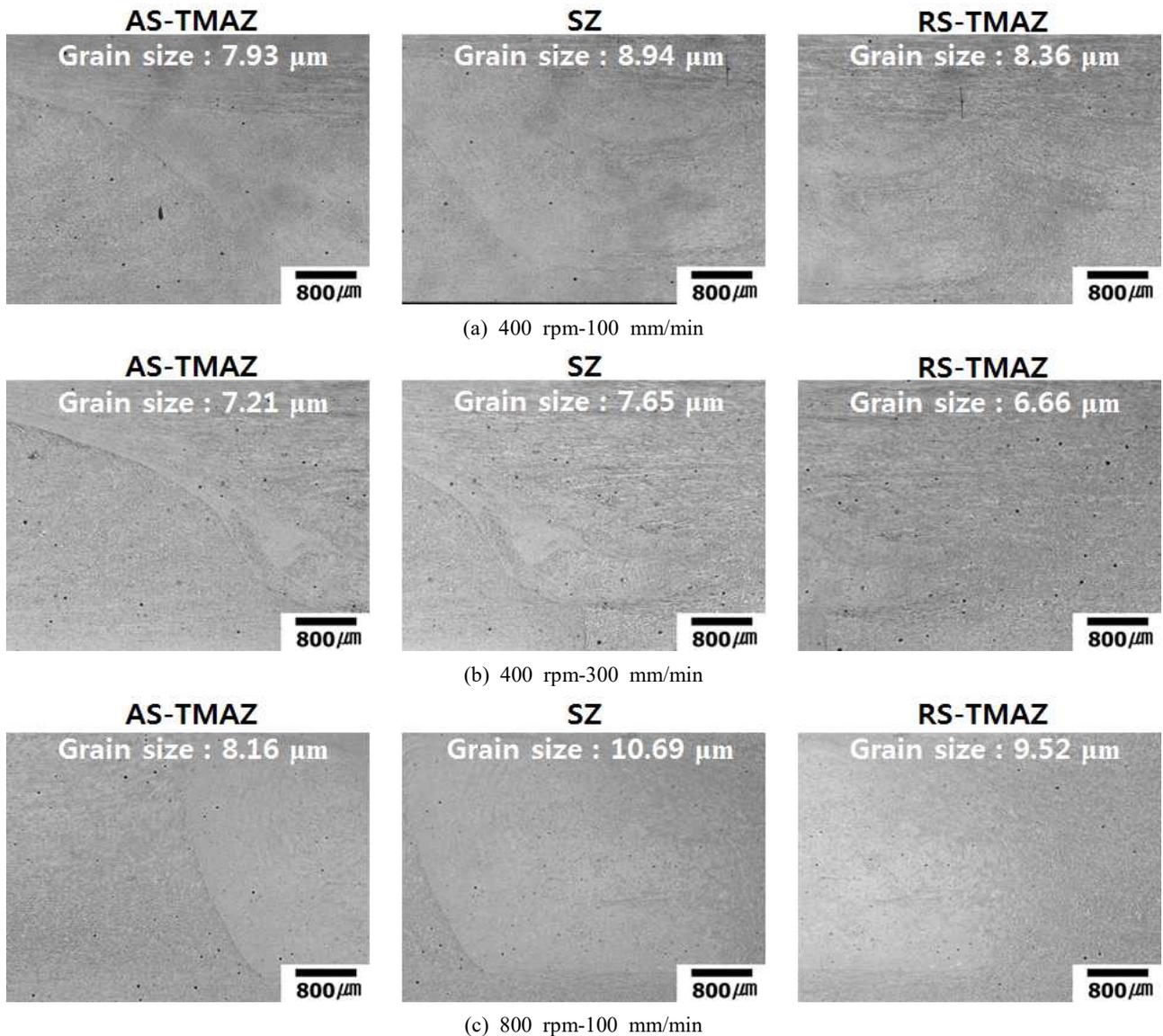


Fig. 6 Microstructure of welded section

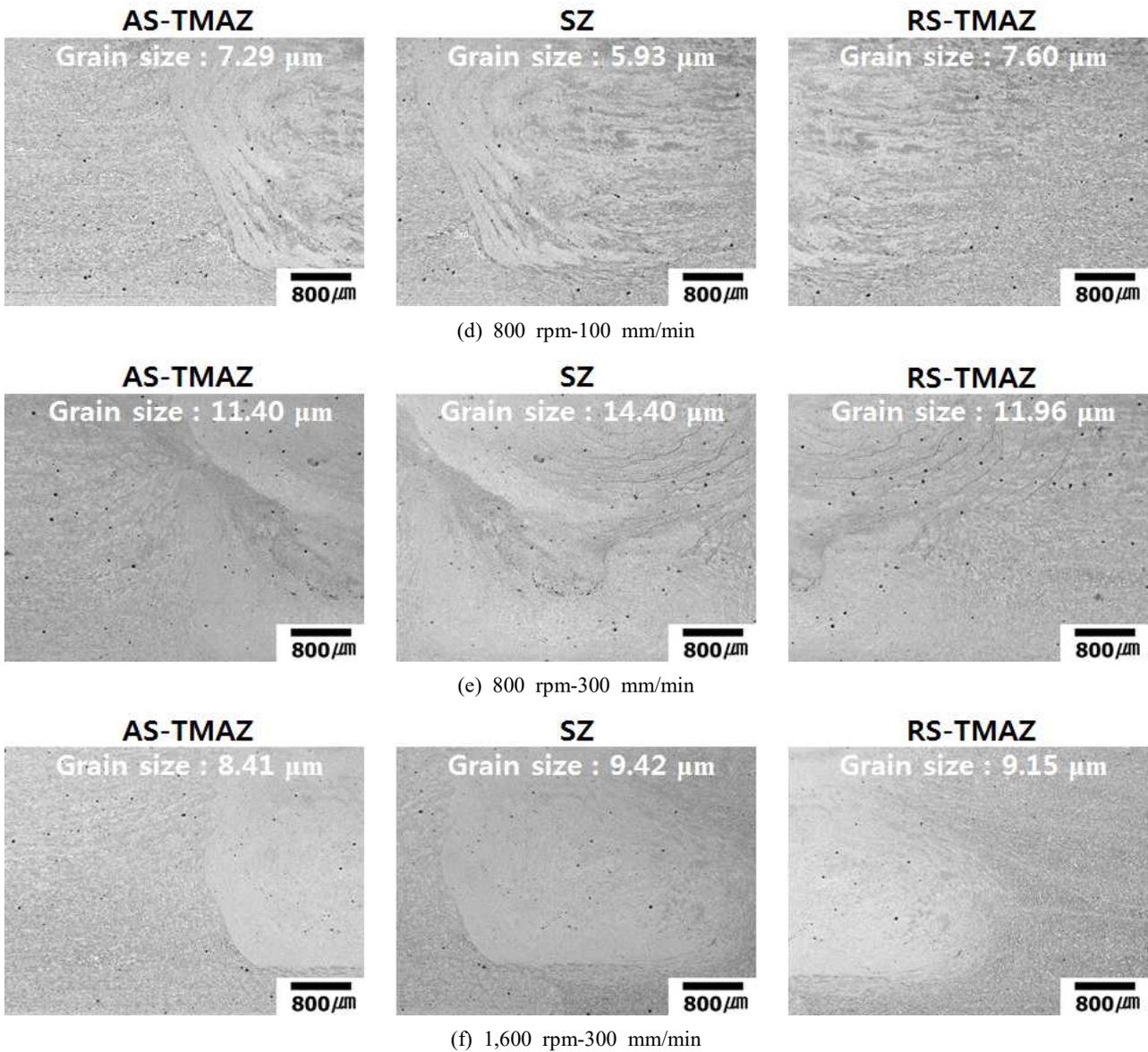


Fig. 6 Microstructure of welded section (continued)

산화되면서 기계적 물성을 저하 시켰다고 할 수 있다. 마찰교반용접시 항복강도는 용접부온도 상승에 따라 저하되는 현상을 보였고, 인장강도와 연신률은 용접부의 온도보다 교반정도에 따라 물성의 변화를 보이는 것을 확인 하였다.

3.3 미세 조직

Fig. 6은 다양한 회전속도 및 진행속도의 변화에 따른 용접부 조직의 변화를 나타낸다. 조직은 크게 3부분으로 나뉘는데 용접부 중앙인 SZ, 톨 회전방향과 톨 진행방향이 같은 AS-TMAZ, 그리고 톨 회전방향과 톨 진행방향이 반대인 RS-TMAZ 이다. 먼저 가장 눈에 띄는 것은 AS-TMAZ와 SZ의 계면에서 나타나는 조직의 변화이다. 경계부를 보면 금속의 교반흔적이 보이고,

결정립도가 차이 나는 것을 알 수 있다. 이것은 모재가 톨에 의해 용접될 때 재결정이 일어난다는 것을 말한다. 재결정이 일어나면 결정립도도 모재와 달라지고, 결정의 방향성도 달라진다. 각 용접조건에 따른 결정립도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 톨의 회전속도가 증가할수록 결정립이 커지는 경향이 있고, 톨 이송속도가 증가할수록 같은 톨 회전속도 내에서 결정립도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 단위 시간당 한 부분에 집중되는 총 열량의 차이 때문인 것으로 생각된다. 그리고 이 열량의 차이가 금속의 재결정 거동에 영향을 주고, 결과적으로 결정립 성장에도 차이를 준 것으로 보인다. 한편 각각의 용접조건 내에서 결정립도를 살펴보면 SZ의 결정립이 TMAZ의 결정립보다 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 SZ에서의 열량이 결정립이 성장하기

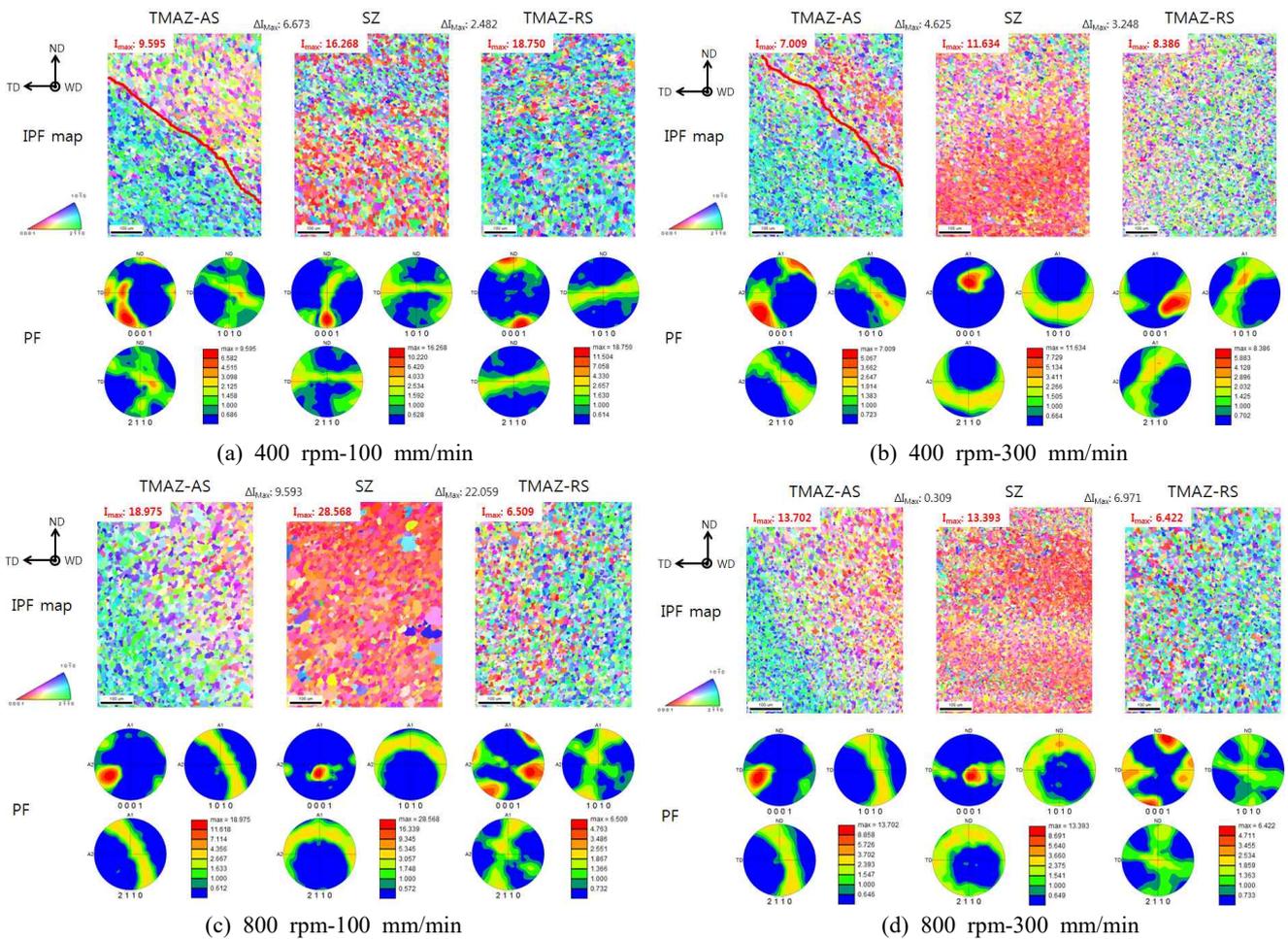


Fig. 7 EBSD analysis results

에 충분한 열량이었음을 알 수 있다. TMAZ의 조직은 SZ의 조직에 비해 상대적으로 불균일한데, 이것은 결정의 변화 후 재결정이 일어나기는 하지만 충분한 재결정 에너지가 공급되지 않았고, 이것으로 인해 국부적으로 결정립도 편차가 더 크게 나타나는 원인인 것으로 보인다.

한편 각 용접조건에서 SZ를 관찰하면, 교반이 된 정도에서도 차이가 있음을 알 수 있다. (a), (b) 조건에서는 SZ 내부의 교반 형상이 온전한 회오리 형태가 아님을 알 수 있다. (c), (d) 조건에서도 교반이 균일하게 되지 않아 보이는 형태의 SZ를 관찰할 수 있다. 그러나 (c), (d) 조건에서는 SZ의 형상이 회오리 형태로 잘 섞여있는 것을 볼 수 있다. 흔히 말하는 onion ring 형태가 잘 관찰되는데, 이 형태가 나타나는 것이 교반이 잘 된 것이라고 볼 수 있다. 따라서 각각의 용접 조건이 교반상태를 다르게 할 수 있고, 이것이 또한 용접부의 물성에 영향을 줄 것으로 예상된다.

3.4 집합 조직

용접 후의 미세조직뿐만 아니라 각 부위별 텍스처도 용접부의 물성에 영향을 줄 것으로 예상되어 일부 용접조건에 대한 용접

부위별 텍스처를 EBSD를 이용하여 관찰하였고 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 모든 방위는 용접 진행방향에 수직한 단면을 관찰한 것이다. 먼저 SZ를 보면 모재의 텍스처와는 완전히 새로운 방위를 가지는 텍스처들이 생성된 것을 알 수 있다. SZ에서 틀이 회전할 때 틀을 따라 {0001} basal texture가 생성되었고, 이것을 Inverse pole figure map과 pole figure에서 확인할 수 있다. 이 현상은 모재가 가지고 있던 방위인 ND (Normal direction)의 집합조직이 교반용접되면서 틀의 표면부에서 재결정과 교반시 생성되는 마찰열로 인해 성장이 일어나게 됨으로 나타난다. 따라서 모재와는 전혀 다른 방위의 집합조직이 생성되게 되고 이것이 각 부위에 따른 소재의 이방성을 초래하게 되는 것이다. 한 소재 안에서 서로 다른 방위를 갖는 부분이 존재하게 되면 외력이 작용할 때 서로 다른 변형을 하게 된다. 아울러 변형 시 필요한 에너지도 다르게 되고 이것이 심하게 될 경우 이방성의 차이가 큰 부분에서 파괴가 먼저 일어날 것으로 예상된다. 각 조건에 대한 IPF map을 보면, 회전속도 400 rpm의 조건(Fig. 7(a), (b))에서 텍스처의 변화가 회전속도 800 rpm의 조건(Fig. 7(c), (d))보다 더 급하게 변하는 것으로 나타났다. 이 현상은 주로 RS-TMAZ 부

분에서보다 AS-TMAZ 부분에서 더 눈에 띄게 관찰되었다. 아울러 인장시험 후의 시편 파단경향을 관찰한 결과 회전속도 400 rpm 조건의 시편은 주로 AS-TMAZ 부근에서 파단되는 반면, 회전속도 800 rpm의 조건에서는 SZ 부분에서 불규칙한 형태로 시편이 파단되는 것을 관찰하였다. 이 현상은 시편의 부분적으로 다른 텍스처들이 외력에 대해 반응하는 거동이 서로 다르고 이 다른 부분들이 맞닿아 있는 부분인 TMAZ에서 결국 파괴가 일어난 것으로 생각된다. 각 용접조건에 따른 부위별 텍스처 강도의 차이가 물성에 영향을 미칠것으로 예상하여 각 부분의 텍스처 강도를 조사하였다. 회전속도 400 rpm의 용접조건 시편은 SZ과 AS-TMAZ 부분의 텍스처 강도 차이가 SZ과 RS-TMAZ 부분의 텍스처 강도 차이값 보다 더 크게 나타난 것을 관찰하였다. 반면 회전속도 800 rpm의 용접조건 시편은 회전속도 400 rpm의 조건에 비해 이렇다 할 텍스처 강도의 차이에 대한 경향이 나타나지 않은 것으로 보인다.

4. 결론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫 번째는 최고 온도는 AS 약 210°C~315°C, RS 약 254°C~339°C로 용접조건에 따라 약 100°C이상의 온도차를 보였고, 용접시 발생된 burr의 형상에 의해 RS의 평균온도가 AS보다 높게 측정되었다. 두 번째로는 모재대비 용접부의 항복강도와 인장강도는 최대 약 84.4%, 96.9%로 기존 용접방법에 비해 매우 높게 측정되었다. 또한, 항복강도는 용접부의 온도 상승에 따라 저하되는 현상을 보였고, 인장강도와 연신률은 용접부의 온도보다 교반 정도에 따라 물성의 변화를 보였다. 세 번째, 결정립도의 크기는 용접부의 온도가 상승 할수록 크게 측정 되었고, 위치에 따라 다르게 나타났다. 또한, 집합조직이 교반용접 되면서 틀의 표면부에서 재결정과 교반시 생성되는 마찰열로 인해 성장이 일어나게 됨으로 나타났다. 따라서 모재와는 전혀 다른 방위의 집합조직이 생성되게 되고 이것이 각 부위에 따른 소재의 이방성을 초래하는 것을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서는 AZ61 마그네슘합금 마찰교반용접부의 온도를 측정하여 용접부의 발생온도에 따른 용접부의 기계적 특성 변화와 미세조직 변화를 평가하여 향후 마그네슘합금 적용 구조물 접합에 적합한 용접온도를 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Liao, J., Yamamoto, N., Nakata, K., 2009, Effect of Dispersed Intermetallic Particles on Microstructural Evolution in the Friction Stir Weld of a Fine-grained Magnesium Alloy, *Metall and Mat Trans A*, 40:9 2212-2219.
- [2] Yu, L. N., Nakata, K., Liao, J., 2009, Microstructural Modification and Mechanical Property Improvement in Friction Stir Zone of Thixo-molded AE42 Mg alloy, *J. Alloy. Compd.*, 480:2 340-346.
- [3] Mukai, T., Yamanoi, M., Watanabe, H., Higashi, K., 2001, Ductility Enhancement in AZ31 Magnesium Alloy by Controlling its Grain Structure. *Scr. Mater.*, A, 45:1 89-94.
- [4] Park, S. H. C., Sato, Y. S., 2003, Effect of Micro-texture on Fracture Location in Friction Stir Weld of Mg alloy AZ61 During Tensile Test, *Scr. Mater.*, 49:2 161-166.
- [5] Xunhong, W., Kuaishe, W., Kokawa, H., 2006, Microstructure and Properties of Friction Stir Butt-welded AZ31 Magnesium Alloy, *Mater. Sci. Eng.*, 431:1 114-117.
- [6] Woo, W., Choo, H., Brown, D. W., Liaw, P. K., Feng, Z., 2006, Texture Variation and its Influence on the Tensile Behavior of a Friction-stir Processed Magnesium Alloy, *Scr. Mater.*, 54:11 1859-1864.
- [7] Kannan, M. B., Dietzel, W., Zeng, R., Zettler, R., Dos Santos, J. F., 2007, A Study on the SCC Susceptibility of Friction Stir Welded AZ31 Mg Sheet, *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, 460 243-250.
- [8] Zhang, D., Suzuki, M., Maruyama, K., 2005, Microstructural Evolution of a Heat-resistant Magnesium Alloy Due to Friction Stir Welding, *Scr. Mater.*, 52:9 899-903.
- [9] Mishra, R. S., Ma, Z. Y., 2005, Friction stir welding and processing, *Mater. Sci. Eng. R-Rep.*, 50:1 1-78.
- [10] Padmanaban, G., Balasubramanian, V., 2009, Selection of FSW Tool Pin Profile, Shoulder Diameter and Material for Joining AZ31B Magnesium Alloy-an Experimental Approach, *Mater. Des.*, 30:7 2647-2656.
- [11] Commin, L., Dumont, M., Masse, J. E., Barrallier, L., 2009, Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy Rolled Sheets: Influence of Processing Parameters, *Acta Mater.*, 57:2 326-334.
- [12] Thomas, W. M., 1991, Friction stir butt welding, *International Patent Application No. PCT/GB92/0220*.
- [13] Lim, B. C., Kim, D. H., Park, S. H., 2014, Mechanical Characteristic Evaluation by Spin Tool of Different Pin Shapes in Friction Stir Welding Al6061-T6, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23:4 345-349.

- [14] Choi, I. Y., Kang, Y. J., Kim, A., & Ahn, K. S., 2013, Development of the Two-piece Aluminum Wheels Using the Friction Stir Welding, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 22:4 700-707.
- [15] Motalleb-Nejad, P., Saeid, T., Heidarzadeh, A., Darzi, K., Ashjari, M., 2014, Effect of Tool Pin Profile on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AZ31B Magnesium Alloy, *Mater. Des.*, 59 221-226.
- [16] Muhsin, J. J., Tolephih, M. H., & Muhammed, A. M., 2012, Effect of Friction Stir Welding Parameters (rotation and transverse) Speed on the Transient Temperature Distribution in Friction Stir Welding of AA 7020-T53, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7:4 436-446.