

공 학 석 사 학 위 논 문

AA3003 알루미늄 합금의
마찰교반용접시 인장강도에 미치는
공정변수의 영향



2020년 2월

부경대학교대학원

기계공학과

강 나 영

공 학 석 사 학 위 논 문

Influence of Control Parameter on Tensile strength in friction stir welding of AA 3003 aluminium alloy

지도교수 박 영 환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2020년 2월

부경대학교대학원

기계공학과

강 나 영

강나영의 공학석사 학위 논문을 인준함

2020년 2월 21일



주 심 공학박사 김 태 완 (인)

위 원 공학박사 이 창 용 (인)

위 원 공학박사 박 영 환 (인)

목 차

List of figures	iii
List of tables	v
Abstract	vi
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 연구동향	1
1.2 연구목적	3
2. 마찰교반용접 이론	4
2.1 마찰교반용접의 원리 및 특성	4
2.2 AA3003 알루미늄 합금의 특성	8
2.3 삼원배치법 및 분산분석	10
3. 마찰교반용접 실험	13
4. 결과 및 고찰	23
4.1 용접비드표면 관찰	23
4.2 인장시험	28
4.3 분산분석	37
4.3.1 분산분석표	37
4.3.2 공정 내 최적조건 산출	39

4.4 미세조직 관찰 및 경도시험	43
4.4.1 시험방법 및 장비	43
4.4.2 공정변수별 내부결함 영향	48
4.4.3 미세조직 관찰 및 경도시험	52
5. 결론	57
참고문헌	59



List of figures

Fig. 2.1 Schematic of the friction stir welding process

Fig. 2.2 Various microstructure regions in the transverse cross section of a friction stir welded material. (A) base metal, (B) heat-affected zone, (C) thermo-mechanically affected zone, (D) stir zone.

Fig. 2.3 Process of friction stir welding

Fig. 3.1 Machining center tooling system

Fig. 3.2 Exclusive use jig of FSW

Fig. 3.3 Basic experiment graph for FSW of shoulder diameter 12mm

Fig. 3.4 Basic experiment graph for FSW of shoulder diameter 16mm

Fig. 3.5 Basic experiment graph for FSW of shoulder diameter 20mm

Fig. 3.6 Joint surface for FSW of shoulder diameter 16mm

Fig. 4.1 Schematic of tensile specimen(mm)

Fig. 4.2 Tensile strength test machine

Fig. 4.3 Relationship between tensile strength(MPa) of 12mm

Fig. 4.4 Relationship between tensile strength(MPa) of 16mm

Fig. 4.5 Relationship between tensile strength(MPa) of 20mm

Fig. 4.6 The main effect plot for tensile strength (rotation speed)

Fig. 4.7 The main effect plot for tensile strength (feed speed)

Fig. 4.8 The main effect plot for tensile strength (shoulder diameter)

Fig. 4.9 Response plots for tensile strength

($A \times C$: rotation speed $\times$ shoulder diameter)

Fig. 4.10 Response plots for tensile strength

($B \times C$: feed speed $\times$ shoulder diameter)

- Fig. 4.11 Observation site of specimen
- Fig. 4.12 Specimen cutting results
- Fig. 4.13 Mounting press machine and polisher
- Fig. 4.14 Optical microscope
- Fig. 4.15 Hardness test
- Fig. 4.16 Micro vickers hardness tester
- Fig. 4.17 Scanning electron microscope
- Fig. 4.18 Internal defects with respect to rotation speed(rpm)
- Fig. 4.19 Internal defects with respect to feed speed(mm/min)
- Fig. 4.20 Internal defects with respect to shoulder diameter(mm)
- Fig. 4.21 Hardness measurement result of
 $A_1B_2C_2$ (1500rpm, 300mm/min, 16mm)
- Fig. 4.22 Hardness measurement result of
 $A_2B_2C_2$ (2000rpm, 300mm/min, 16mm)
- Fig. 4.23 Stir zone - Thermo mechanically affected zone
macrostructure of $A_1B_2C_2$ (1500rpm, 300mm/min, 16mm)
- Fig. 4.24 Grain size result of stir zone
- Fig. 4.25 Hardness measurement result of thermo mechanically affected zone

List of tables

Table 2.1 Chemical composition of AA3003-H14(wt.%)

Table 2.2 Mechanical properties of AA3003-H14

Table 2.3 Three-way factorial design

Table 2.4 Three-way ANOVA

Table 3.1 Basic experiment conditions for FSW

Table 3.2 Process control parameters of FSW

Table 4.1 Weld bead for FSW of shoulder diameter 12mm

Table 4.2 Weld bead for FSW of shoulder diameter 16mm

Table 4.3 Weld bead for FSW of shoulder diameter 20mm

Table 4.4 Tensile strength(MPa) of each conditions

Table 4.5 Three-way ANOVA results ($\alpha = 0.05$)

Influence of Control Parameter on Tensile strength in friction stir welding of AA 3003 aluminium alloy

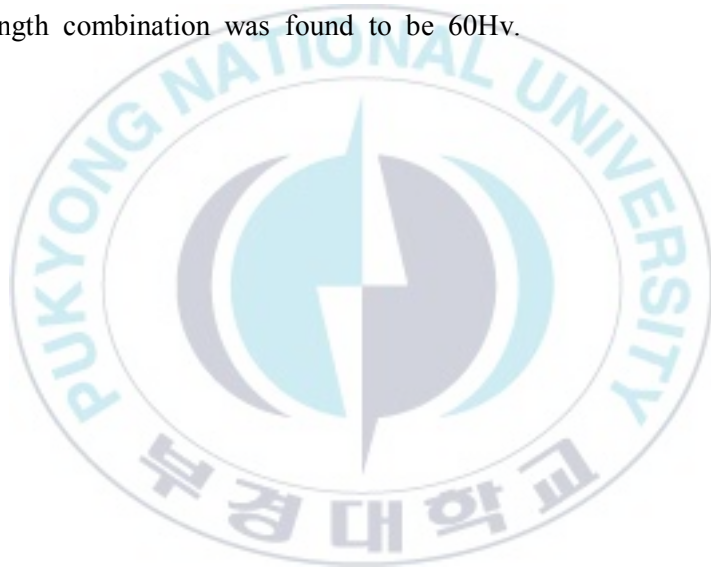
Kang, Na Yeong

*Department of Mechanical Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

ABSTRACT

Recently, as interest in energy efficiency and environmental issues is increasing around the world, research on welding technology is becoming important. In this study, friction stir welding (FSW) was applied to AA3003 aluminum alloy to investigate the effect of process variables on mechanical properties. The material used in the experiment was 2t x 100mm x 150mm and friction stir welding was performed by the butt welding method, and the process variables were selected as rotation speed, feed speed and shoulder diameter. The friction stir welding was performed in three levels, and a total of 27 experiments were performed three times. In order to quantitatively analyze the tensile strength results, a three-way factorial design was used. Variance analysis showed the correlation of process variables with tensile strength and the optimal process variable combination. As a result of the analysis of variance, all the parameters selected in the experiment affected the weld tensile strength, and partly the interaction was detected. The effect of

process variables on the tensile strength of the weld was confirmed in the order of shoulder diameter, rotational speed, and feed speed of the tool. In addition, internal defects were found to have a large influence on the feed rate. As a result of the main effect and interaction analysis, it was estimated that the highest tensile strength was obtained when the shoulder diameter level was 2, the rotation speed level was 1, and the feed speed level was 2. Finally, the SZ hardness of the optimum level combination through main effects and interactions was 75Hv. And the SZ hardness of the maximum tensile strength combination was found to be 60Hv.



1. 서 론

1.1 연구배경 및 연구동향

마찰교반용접(friction stir welding, FSW)은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 용접 방법으로, 재료의 용융점 이하에서 용접이 이루어지므로 용접에 따른 변형이 적고, 유해가스나 유해 광선이 발생하지 않아 작업환경이 친환경적이며 비소모성 공구로 용접이 이루어지기 때문에 별도의 용가제, 열원 등이 필요하지 않아 용접 과정의 자동화가 용이한 기술로 주목을 받고 있다. 하지만, 알루미늄 합금은 다른 강판에 비해서 열전도도 및 비열이 높고, 전기저항이 낮아 발열하기가 어려우면서도 열이 방출되기가 쉬워 기존의 용접기술로 용접하는 경우 고전류, 고가압력, 단시간의 용접이 필요하고, 알루미늄 합금의 표면상에 존재하는 산화피막과 전극과의 반응에 의하여 전극수명이 저하되는 문제점 등이 발생하였다. 그러나 마찰교반용접 특성 상 저용점에서 교반이 이루어지는 용접방식이기 때문에, 기존의 용융 용접법에 비하여 용접부의 특성과 품질이 뛰어나, 알루미늄과 마그네슘 합금 등 저용점소재에 특히 뛰어난 특징을 가지고 있다.¹⁻²⁾

현재 선진국에서는 각종 환경규제와 원가절감 등의 문제에 대응하기 위하여 친환경적이고 고효율인 용접기술을 연구하고 있으며, 알루미늄, 마그네슘 및 플라스틱 등의 경량소재를 적극적으로 채택하여 기존 철강소재 비율을 줄여, 기존의 철강소재를 적용한 부품을 고강도강, 알루미늄 및 복합소재로 대체하고, 장기적으로는 제조원가 절감, 용접방식, 재활용 기술 개발을 통하여 부품의 중량을 감소시키는 것을 목표로 하고 있다.³⁾

그러나 대부분의 구조재료를 실제 제품에 적용할 경우, 두 가지 이상의 재료가 사용되며 이들 간의 접합이 필수불가결이기 때문에 알루미늄합금과 마그네슘합금 간의 접합, 알루미늄기지 금속복합재료와 기지합금 간의 접합과 같은 이중 알루미늄합금 간의 접합, 물성 차이가 큰 알루미늄과 철강소재 간의 접합 등, 서로 기계적 성질과 화학조성의 차이가 크더라도 이중소재 간의 접합방식의 연구의 필요성은 커지고 있으며, 점차 이중재료간의 접합방식의 연구가 필요하게 될 것이다. 그렇지만 이중소재 간의 접합 이전에 동종재료 간의 접합 인자에 대한 프로세스 연구가 요구되며 동종재료 간의 접합 인자를 충분히 연구한 뒤에 이중재료의 접합에 대한 연구가 이루어지는 것이 일반적이다.⁴⁾ 이러한 연구와 함께 마찰교반용접은 최적공정이 설계된다면 기술 특성 상 용접의 자동화가 쉽게 이루어지기 때문에, 현재에도 마찰교반용접이 실제 적용할 수 있도록 각국에서는 조건의 규격화하는 노력을 진행하고 있다.⁵⁻⁷⁾

1.2 연구목적

알루미늄의 마찰교반용접에 대한 연구로서는 AA6061, AA5083 등 Al-Mg계 알루미늄합금 간의 마찰교반용접 공정의 인자에 대해서는 많은 논문이 발표되고 있지만, 우수한 용접성과 성형성 및 내식성을 가져 탱크, 배관, 4000계 합금을 클래드하여 자동차용 열교환기 등에 쓰이는 Al-Mn계 AA3003 알루미늄합금을 이용한 마찰교반용접에 대한 연구는 다른 용접기술에 비해 조건의 규격화와 인자에 대한 고찰이 비교적 적다. 3000계 Al-Mn 알루미늄 합금은 열처리과정에서 나타나는 결정립 성장으로 인하여 기계적으로 내식성이 좋지 않은 현상이 생기게 된다. 따라서 일반적으로 열처리가 가능하지 않으며, 이러한 특성 때문에 합금의 강도를 향상시키는 방법으로 냉간가공을 통한 변형경화를 사용하고 있다.⁸⁾ 한편 알루미늄 합금은 철강에 비하여 비열 및 열전도도가 크기 때문에 단시간에 높은 온도를 끌어올리기 위해서는 높은 온도의 열원이 필요하며 AA3003-H14의 경우 용융점이 약 654°C에 반해 알루미늄의 산화피막의 용융점은 2050°C이기 때문에 금속아크용접(GMAW)용접 같은 경우 표면전처리 작업을 하여 산화피막을 제거하여야 하는 단점이 있다. 하지만 고상용접인 마찰교반용접인 경우 고상선 아래에서 행해지는 용접이기 때문에 전처리 과정이 필요하지 않기 때문에 알루미늄 용접에 있어서 마찰교반용접은 매우 가치가 있는 기술이라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 경량화 소재인 알루미늄 합금에서 Al-Mn 3000계열인 AA3003합금의 마찰교반실험을 진행하여 마찰교반용접의 입열량 식을 바탕으로 중요한 인자인 이송속도, 회전속도, 스퀸더지름을 공정변수로 두고 맞대기 용접에서의 각 공정변수들의 변화가 용접부의 조직, 기계적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 고찰하고, 접합 시 발생하는 결함과 접합조건 간의 관계를 연구하고자 한다.

2. 마찰교반용접 이론

2.1 마찰교반용접의 원리 및 특성

마찰교반용접기술은 Fig 2.1에서 나타낸 바와 같이 회전하는 비소모성의 공구를 회전속도를 주어 두 사이의 판재에 삽입한 후, 공구의 이송으로 회전하는 공구와 재료의 경계에서 발생되는 마찰열과 유동에 의하여 용접이 이루어지는 방식이다. 공구는 핀과 솔더로 구성되어 있으며, 공구의 회전방향과 진행방향이 같은 부분을 전진측(advancing side, AS)이라 하며, 공구의 회전방향과 진행방향이 반대인 부분을 후진측(retreating side, RS)이라 한다. 회전방향과 진행방향의 차이는 재료의 흐름, 열전달 및 용접부의 기계적 특성 등에 영향을 미치고, AS부와 RS부의 비대칭성을 발생시킨다. 마찰교반용접은 두 판재의 접합 시 공구의 진행에 따라서 주변 재료가 마찰열에 의해 온도가 증가하여 조직이 연화됨에 따라서 재료의 유동을 발생시키고, 주위에 소성구역이 형성되면서 교반력에 의해 용접이 되는 원리이다. 마찰교반용접 진행과정은 Fig 2.3에 나타내었다. 또한, Fig 2.2와 같이 마찰교반용접의 접합부 형상은 그림에서 보이는 것과 같이 용접의 단면부가 비대칭적 형상을 띄며, 미세조직에 따라서 교반부(stir zone, SZ), 열기계적영향부(thermo-mechanically affected zone, TMAZ), 열영향부(heat-affected zone, HAZ), 모재부(base metal, BM)로 구분되어있다.⁹⁻¹⁰⁾

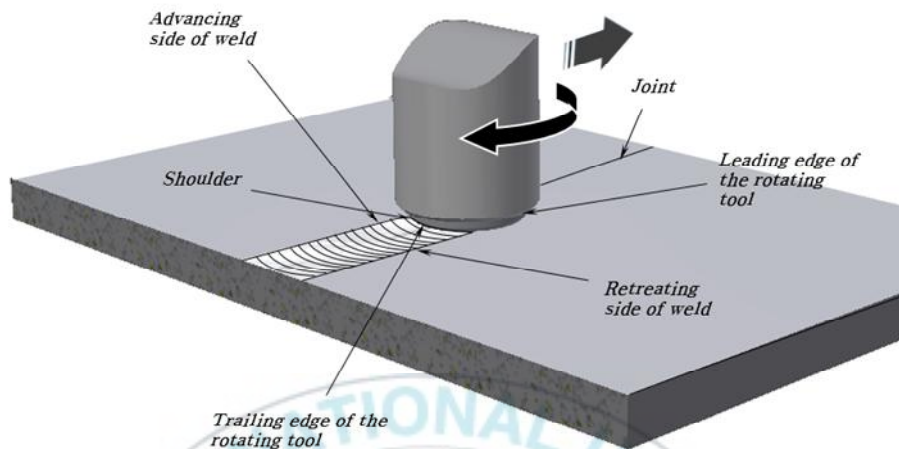


Fig. 2.1 Schematic of the friction stir welding process

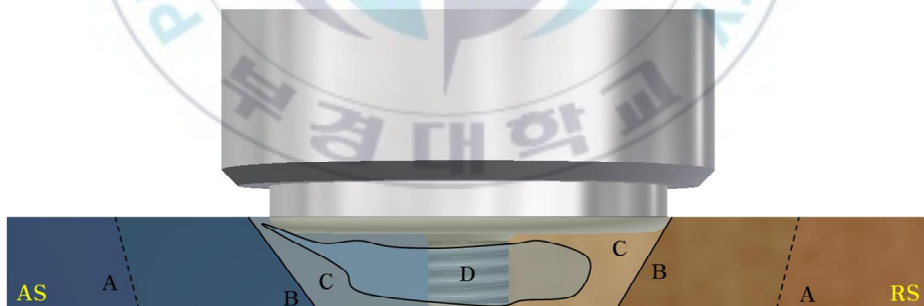


Fig. 2.2 Various microstructure regions in the transverse cross section of a friction stir welded material. (A) base metal, (B) heat-affected zone, (C) thermo-mechanically affected zone, (D) stir zone.

Fig. 2.3은 마찰교반용접이 이루어지는 과정을 나타낸 것으로 공구를 두 판재사이에 삽입하기 전에 회전속도를 주어 회전하고 있는 공구를 판재사이에 삽입하여 공구와 판재사이에 마찰열을 발생시켜 재료를 유지시간 (dwell time)을 주어 두 판재를 연화시킨다. 그다음 공구에 이송속도를 주어 공구의 이동에 따라서 소재 내부에 소성 유동이 발생하며 두 판재가 서로 혼합이 되어 용접이 된다.¹¹⁾

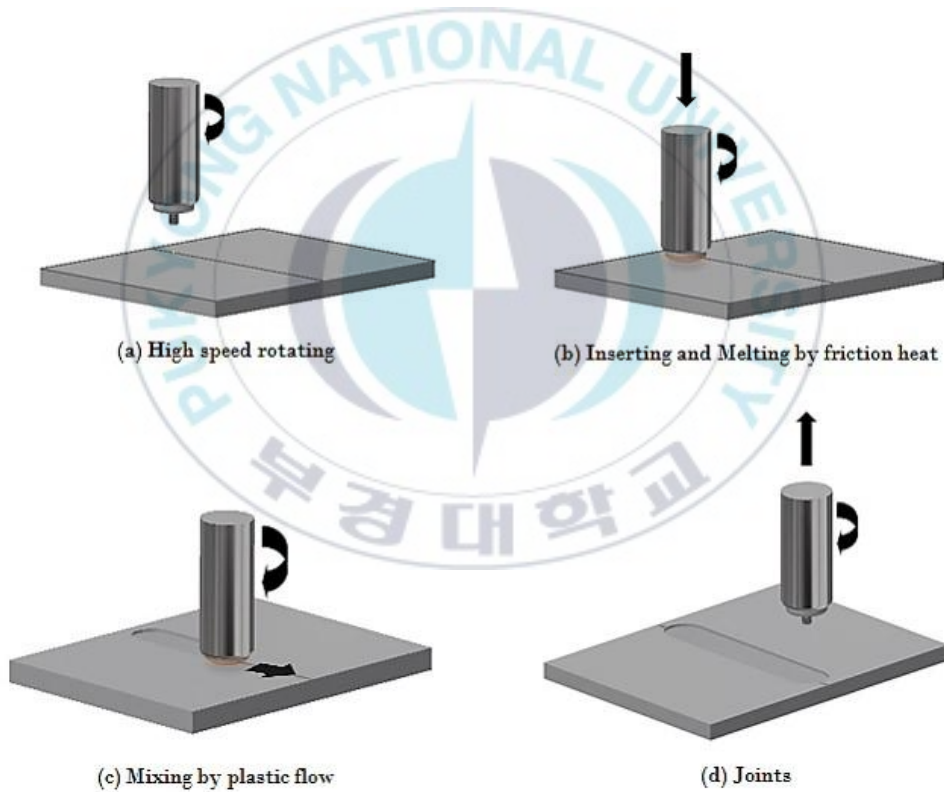


Fig. 2.3 Process of friction stir welding

마찰교반용접 시 제어할 수 있는 변수로는 공구의 회전속도, 이송속도, 솔더지름, 용접 깊이에 따른 공구 축 방향 하중, 공구 형상 등이 있으며, 제어할 수 없는 인자로는 스펀들 토크 및 파워, 입열량이 있다. 또한, 마찰교반용접은 공구와 재료 사이의 마찰열과 공구의 이동에 따른 소성 유동을 거치며 용접이 되기 때문에 재료의 유동과 소성 변형이 포함되어 있어 복잡한 열 기계적 용접과정을 거친다. 일반적으로는 용접부의 기계적 성질과 미세조직은 공구의 회전속도와 이송속도에 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다.¹²⁻¹³⁾

공구의 회전은 삽입된 공구의 부위에서 연화되고 있는 재료를 혼합시키는 역할을 하며, 회전속도가 빨라질수록 마찰열이 커지며 재료가 연화되는 속도가 증가하므로 동적 재결정화에 의한 결정립의 미세화가 일어나게 된다.¹²⁾ 공구의 이송은 회전에 의하여 혼합되고 있는 재료를 공구의 뒤쪽에서 앞쪽으로 운반을 하며 유동시키는 역할을 한다. 이송속도가 높아질수록 용접 생산성이 높아지지만, 재료의 유동이 충분히 이루어지지 못할 가능성이 생기므로 충분한 실험을 통한 프로세스의 규격화가 필요하다.

일반적으로 마찰교반용접은 용융점 아래에서 접합되는 고상용접방식으로 용접 중 유해가스, 소음이 거의 발생하지 않는 친환경적인 기술이며 용접에 따른 용접부의 변형과 잔류 응력이 낮다. 또한 비소모성 공구로 용접하기 때문에 자동화에 용이하며, 별도의 숙련자를 요하지 않는다. 하지만 용접부재를 고정시킬 수 있는 지그의 설계 및 제작이 필요하며, 용접하고 난 뒤 공구의 핀 형상이 남고, 버(burr)의 처리를 위한 후처리가 필요하다는 단점이 있다.

2.2 AA3003 알루미늄 합금의 특성

알루미늄의 결정구조는 일반적으로 면심입방체 (FCC)의 결정구조를 가지고 있으며 비중은 2.7으로 구리와 철에 비교하면 약 1/3정도로 가볍다. 이러한 장점으로 마그네슘 합금 등과 같이 알루미늄 합금은 항공기, 자동차, 등의 경량화를 요하는 분야에서 철강 소재의 대체할 수 있는 비철금속속에서 공해절감, 연비향상에 크게 기여할 수 있는 금속소재로 각광받고 있다. 한편, AA3003 알루미늄 합금은 Al-Mn계 알루미늄 합금으로 1~2%의 망간의 첨가는 고용강화 현상과 미세 석출물 분산효과에 의해 Al의 강도가 A1100합금보다 10%정도 높아지며 순 알루미늄의 성형성과 내식성, 또한 합금의 강도를 향상시켜주는 중요한 역할을 한다. 또한 순 알루미늄에 Mn원소를 소량 첨가하면 석출물 입자의 크기와 균일 분산 정도를 쉽게 제어할 수 있다는 장점이 있어 기계적 특성, 미세조직 등을 다양하게 조절할 수 있다. AA3003 알루미늄합금에서 제2상 석출물인 Al_6Mn 상은 알루미늄 기지의 전기화학적 안정성을 저하시키지 않기 때문에 AA3003 알루미늄합금이 내식성을 충분히 유지하면서도 적당한 강도를 나타내게 하는 역할을 하고 있다.¹⁴⁻¹⁷⁾

AA3003-H14 알루미늄 합금의 화학적 성분은 망간이 약 1.5wt.%, 실리콘이 약 0.6wt.%, 철이 0.7wt.% 등으로 주로 복사기드럼, 선박용재, 차량내장 등의 저 응력부품 구조체에 쓰이고 있다. 또한 비열처리한 냉간가공경화 합금이기 때문에 어닐링 열처리만 적용되므로 결정립의 회복-재결정-결정립 성장의 과정을 거치게 된다. 가공경화가 된 합금은 Hxx로 표시되고, A3003합금은 온도에 따라서 H112, H12, H14, H16, H18, H19 등이 있으며, 마찰교반용접에 사용된 합금의 AA3003-H14합금의 화학적 특성과 기계적 특성을 Table 2.1, 2.2 등에 나타내었다.

Table 2.1 Chemical composition of AA3003-H14(wt.%)

Material	Mn	Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Cr	Ti	Al
AA3003-H14	1.5	0.05	0.6	0.7	0.2	0.1	0.05	0.05	-

Table 2.2 Mechanical properties of AA3003-H14

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
AA3003-H14	140	115	5	40

2.3 삼원배치법 및 분산분석

실험계획법(Design Of Experiment, DOE)은 효율적인 실험계획과 실험으로부터 얻어진 데이터를 보다 정량적으로 분석할 수 있는 계획법으로 실험의 설계를 보다 효율적으로 나타내고, 인자들과 교호작용 효과 등을 실험 목적에 부합되는 인자들의 최적조건을 보다 논리적이고 신뢰성 있게 결과를 이끌어낼 수 있는 통계적 방법이다. 본 연구에서는 실험계획법의 종류 중 하나인 요인배치법을 사용하였고, 요인배치법은 변수의 개수에 따라 일원배치법, 이원배치법, 다원배치법으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 삼원배치법(three-way factorial design)을 채택하였다. Table 2.3은 실험에 사용된 반복이 있는 삼원배치법의 모형을 나타낸다. 수준이 3이고, 인자가 3개인 3^3 요인설계에서 보다 정확한 실험결과를 위해 반복을 3회 추가하여 반복이 있는 삼원배치법을 토대로 설계하였다. 여기서 A , B , C 는 각각의 인자를 나타내며, 각 수준별 조합이 x_{lmnr} 일 때 l , m , n 은 인자간의 수준, r 은 반복횟수를 의미한다.

Table 2.3 Three-way factorial design

Experiment Number	Factor		A_1	A_2	A_3
1	B_1	C_1	x_{1111}	x_{2111}	x_{3111}
2			x_{1112}	x_{2112}	x_{3112}
3			x_{1113}	x_{2113}	x_{3113}
4		C_2	x_{1121}	x_{2121}	x_{3121}
5			x_{1122}	x_{2122}	x_{3122}
6			x_{1123}	x_{2123}	x_{3123}
7		C_3	x_{1131}	x_{2131}	x_{3131}
8			x_{1132}	x_{2132}	x_{3132}
9			x_{1133}	x_{2133}	x_{3133}
10	B_2	C_1	x_{1211}	x_{2211}	x_{3211}
11			x_{1212}	x_{2212}	x_{3212}
12			x_{1213}	x_{2213}	x_{3213}
13		C_2	x_{1221}	x_{2221}	x_{3221}
14			x_{1222}	x_{2222}	x_{3222}
15			x_{1223}	x_{2223}	x_{3223}
16		C_3	x_{1231}	x_{2231}	x_{3231}
17			x_{1232}	x_{2232}	x_{3232}
18			x_{1233}	x_{2233}	x_{3233}
19	B_3	C_1	x_{1311}	x_{2311}	x_{3311}
20			x_{1312}	x_{2312}	x_{3312}
21			x_{1313}	x_{2313}	x_{3313}
22		C_2	x_{1321}	x_{2321}	x_{3321}
23			x_{1322}	x_{2322}	x_{3322}
24			x_{1323}	x_{2323}	x_{3323}
25		C_3	x_{1331}	x_{2331}	x_{3331}
26			x_{1332}	x_{2332}	x_{3332}
27			x_{1333}	x_{2333}	x_{3333}

Table 2.4는 분산분석표로, SS 는 제곱합, DF 는 자유도, MS 는 평균제곱, F 는 해당되는 표본에서 산출된 모집단 분산의 추정치의 비를 뜻한다. 본 연구는 유의수준 α 를 0.05로 두어 신뢰수준 95%에서 각 인자간이 인장강도에 미치는 영향을 검토하였다.

Table 2.4 Three-way ANOVA

Source	SS	DF	MS	F
A	SS_A	$l-1$	MS_A	SS_A/MS_E
B	SS_B	$m-1$	MS_B	SS_B/MS_E
C	SS_C	$n-1$	MS_C	SS_C/MS_E
$A \times B$	$SS_{A \times B}$	$(l-1)(m-1)$	$MS_{A \times B}$	$SS_{A \times B}/MS_E$
$A \times C$	$SS_{A \times C}$	$(l-1)(n-1)$	$MS_{A \times C}$	$SS_{A \times C}/MS_E$
$B \times C$	$SS_{B \times C}$	$(m-1)(n-1)$	$MS_{B \times C}$	$SS_{B \times C}/MS_E$
$A \times B \times C$	$SS_{A \times B \times C}$	$(l-1)(m-1)(n-1)$	$MS_{A \times B \times C}$	$MS_{A \times B \times C}/MS_E$
E	SS_E	$lmn(r-1)$	MS_E	
T	SS_T	$lmnr-1$		

3. 마찰교반용접 실험

AA3003-H14, 두께 2mm의 A3003 알루미늄 합금 판재를 압연방향이 같게 100mm×150mm의 크기로 절단하여 실험하였으며, 맞대기용접방식으로 마찰교반용접을 수행하였다. 마찰교반용접용 공구는 열간금형용강인 SKD61 재료를 이용해 설계 및 제작하였으며, 공구 수명 향상을 위한 진공열처리를 하였다. 마찰교반용접 실험은 Fig. 3.1~3.2 등에 보이는 것과 같이 TNV 400 기종의 MCT(Machining Center Tooling system)장비를 사용해 진행하였다. 기초실험은 마찰교반용접 시 접합이 가능한 조건을 구하기 위하여 실시하였다. 기초실험은 실험계획법의 하나인 삼원배치법을 사용하여 회전속도, 이송속도, 솔더지름을 공정변수로 채택하여 회전속도 6수준, 이송속도 8수준, 솔더지름 3수준으로 설정하였으며 기초실험을 진행한 조건을 Table 3.1에 나타내었다. 진행하였다. 이렇게 하여 진행된 기초실험 결과는 Fig 3.3~3.5에 나타내었다. 기초실험 과정 중 솔더지름 12, 16, 20mm 별로 그룹을 나누었고 회전속도 500~3000 rpm, 이송속도 50~400mm/min에서 마찰교반용접 실험 시 외관상으로 보았을 때 용접비드가 깨끗하며 크랙(crack)이 생성되지 않은 조건을 success, 교반이 원활하게 진행되지 않아 두 판재 사이에 크랙이 생성된 조건을 fail로 구분하여 Fig 3.3~3.5에서 그래프로 나타냈다. 기초실험 결과에서는 솔더지름 12, 16, 20mm 기준에서 회전속도 500, 1000rpm과 이송속도 50, 100mm/min 조건에서 공통적으로 용접이 되지 않는 양상을 나타냈다. 이러한 이유는 마찰교반용접 시 이송속도가 낮은 조건은 입열량이 높아 버(burr)의 두께가 굵어졌으며, Fig 3.6은 Table 1의 마찰교반용접에 관한 기초실험 중 솔더지름 16mm에서 회전속도 1000, 1500, 2000rpm과 이송속도 100mm/min 조건에서의 대표적인 마찰교반용접의

불량형상의 결과와 1500rpm, 300mm/min 조건 비드표면형상을 나타낸다.

Table 3.1 Basic experiment conditions for FSW

Factors	Rotation speed(rpm)	Feed speed(mm/min)	Shoulder Diameter(mm)
A ₁ B ₁ C ₁	500	50	12
A ₁ B ₂ C ₁	500	100	12
A ₁ B ₅ C ₁	500	350	12
A ₁ B ₆ C ₃	500	300	20
A ₂ B ₁ C ₁	1000	50	12
A ₂ B ₂ C ₁	1000	100	12
A ₂ B ₃ C ₁	1000	150	12
A ₂ B ₂ C ₂	1000	100	16
A ₂ B ₈ C ₂	1000	400	16
A ₂ B ₂ C ₃	1000	100	20
A ₃ B ₂ C ₁	1500	100	12
A ₃ B ₃ C ₁	1500	150	12
A ₃ B ₅ C ₁	1500	250	12
A ₃ B ₇ C ₁	1500	350	12
A ₃ B ₂ C ₂	1500	100	16
A ₃ B ₃ C ₂	1500	150	16
A ₃ B ₄ C ₂	1500	200	16
A ₃ B ₅ C ₂	1500	250	16
A ₃ B ₆ C ₂	1500	300	16
A ₃ B ₇ C ₂	1500	350	16
A ₃ B ₂ C ₃	1500	100	20
A ₃ B ₃ C ₃	1500	150	20
A ₃ B ₈ C ₃	1500	400	20
A ₄ B ₂ C ₁	2000	100	12
A ₄ B ₈ C ₁	2000	400	12

(Continue)

$A_4B_2C_2$	2000	100	16
$A_4B_3C_2$	2000	150	16
$A_4B_4C_2$	2000	200	16
$A_4B_5C_2$	2000	250	16
$A_4B_8C_2$	2000	400	16
$A_4B_4C_3$	2000	200	20
$A_5B_3C_1$	2500	150	12
$A_5B_5C_1$	2500	250	12
$A_5B_7C_1$	2500	350	12
$A_5B_3C_2$	2500	150	16
$A_5B_4C_2$	2500	200	16
$A_5B_5C_2$	2500	250	16
$A_5B_2C_3$	2500	100	20
$A_5B_3C_3$	2500	150	20
$A_5B_6C_3$	2500	300	20
$A_5B_8C_3$	2500	400	20
$A_6B_3C_1$	3000	150	12
$A_6B_8C_1$	3000	400	12
$A_6B_5C_2$	3000	250	16
$A_6B_8C_3$	3000	400	20



Fig. 3.1 Machining center tooling system



Fig. 3.2 Exclusive use jig of FSW

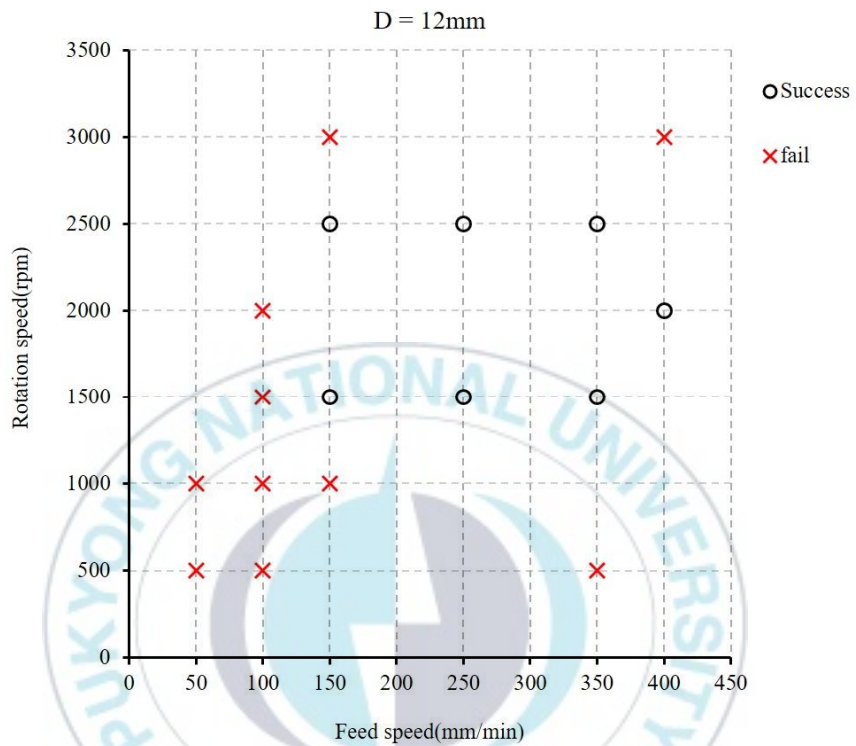


Fig. 3.3 Basic experiment graph for FSW of shoulder diameter 12mm

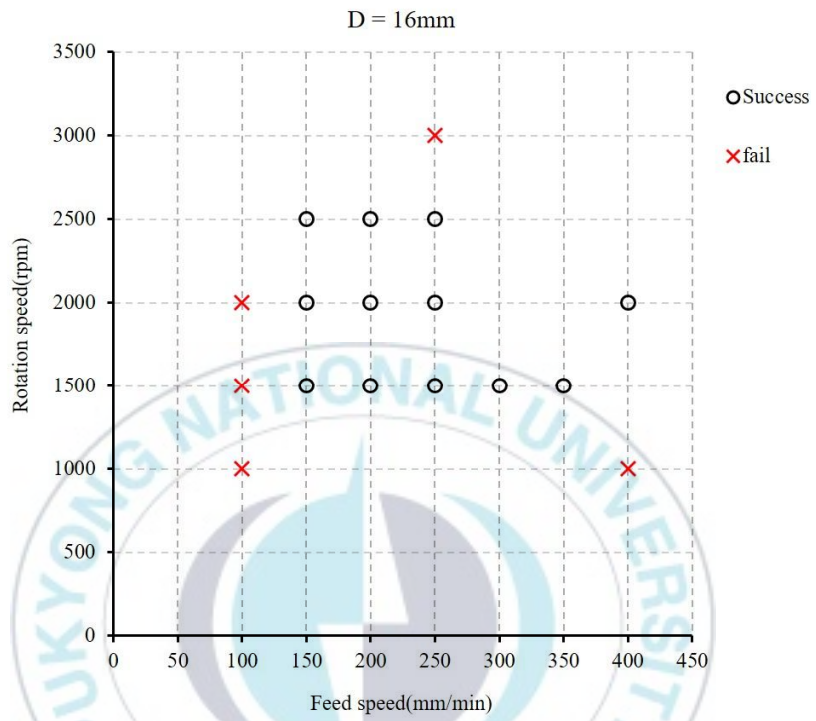


Fig. 3.4 Basic experiment graph for FSW of shoulder diameter 16mm

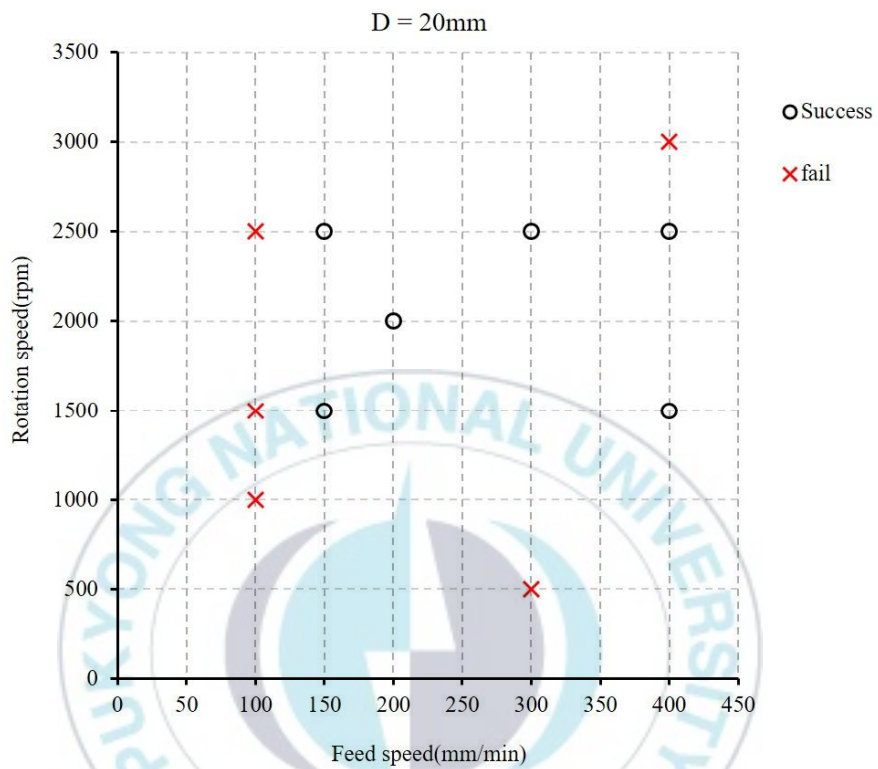
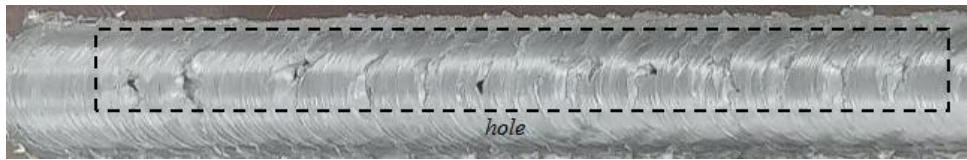


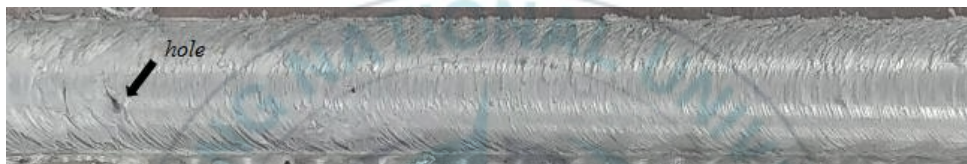
Fig. 3.5 Basic experiment graph for FSW of shoulder diameter 20mm



(a) 1000rpm, 100mm/min



(b) 1500rpm, 100mm/min



(c) 2000rpm, 100mm/min



(d) 1500rpm, 300mm/min

Fig. 3.6 Joint surface for FSW of shoulder
diameter 16mm

여기서 그림(a)는 낮은 이송속도와 회전속도로 교반이 원활하게 진행되지 않아 전체적으로 용접표면에 큰 홀이 생성되었으며, (b)와 (c)에서는 용접 진행 초반부에서 (a)대비 작은 홀이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 또한 (b)조건은 RS부에서 교반부 가까이에 아주 얇은 터널결함이 관찰되었다. (c)조건에서 미세한 표면박리형태가 용접비드표면에 관찰되었으며 (a), (b), (c)에서 회전속도가 조건 당 500rpm이 차이가 났지만 세 조건 모두 공통적으로 용접비드표면이 거친 것을 확인할 수 있었으며 용접표면 모두 공구의 이송속도 100mm/min이하인 조건에서 거친 표면을 형성한 것으로 확인되었다. 또한 이송속도 150mm/min 이상인 조건에서 깨끗한 용접비드가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 기초실험 결과를 바탕으로 실험계획법 종류 중 하나인 삼원배치법을 사용하여 본 실험을 설계하였으며 실험 조건은 Table 3.3에 보이는 것과 같이 솔더지름 12mm, 16mm, 20mm 기준으로 회전속도 1500, 2000, 2500rpm과 이송속도 200, 300, 400mm/min으로 설정하여 각 인자 간 동일하게 3수준을 주어 실험횟수 27회와 반복횟수 3회를 더해 총 81번의 실험 모두 수행하였다.

Table 3.2 Process control parameters of FSW

Factors	Rotation Speed (rpm)	Feed Speed (mm/min)	Shoulder Diameter (mm)
A ₁ B ₁ C ₁	1500	200	12
A ₁ B ₂ C ₁	1500	300	
A ₁ B ₃ C ₁	1500	400	
A ₂ B ₁ C ₁	2000	200	
A ₂ B ₂ C ₁	2000	300	
A ₂ B ₃ C ₁	2000	400	
A ₃ B ₁ C ₁	2500	200	
A ₃ B ₂ C ₁	2500	300	
A ₃ B ₃ C ₁	2500	400	
A ₁ B ₁ C ₂	1500	200	16
A ₁ B ₂ C ₂	1500	300	
A ₁ B ₃ C ₂	1500	400	
A ₂ B ₁ C ₂	2000	200	
A ₂ B ₂ C ₂	2000	300	
A ₂ B ₃ C ₂	2000	400	
A ₃ B ₁ C ₂	2500	200	
A ₃ B ₂ C ₂	2500	300	
A ₃ B ₃ C ₂	2500	400	
A ₁ B ₁ C ₃	1500	200	20
A ₁ B ₂ C ₃	1500	300	
A ₁ B ₃ C ₃	1500	400	
A ₂ B ₁ C ₃	2000	200	
A ₂ B ₂ C ₃	2000	300	
A ₂ B ₃ C ₃	2000	400	
A ₃ B ₁ C ₃	2500	200	
A ₃ B ₂ C ₃	2500	300	
A ₃ B ₃ C ₃	2500	400	

4. 결과 및 고찰

4.1 용접비드표면 결과

실험 진행은 실험계획법의 원리 중 하나인 랜덤화의 원칙에 의거하여 무작위로 실험이 진행되었다. 또한 인장강도와 항복강도시험 시 재료의 압연방향이 하중방향간의 각도가 다를 때 결과가 달라진다는 연구결과가 있으므로 맞대기 용접 시 판재의 압연방향과 마찰교반용접 진행방향은 0° 로 압연방향과 동일한 방향으로 용접을 진행하였다. 마찰교반용접은 삽입 시 공구의 초기 온도를 고려하여 처음 공구가 두 판재 사이에 접합되었을 때 마찰열로 공구의 온도를 올려 소성유동을 원활하게 이루어내기 위해서 약 1~10초 간 유지시간(dwell time)을 주는 것이 일반적이다. 본 실험에서는 모든 조건의 실험에서 유지시간을 3초로 설정하였고 공구의 핀 지름은 동일하게 4mm로 두었다. 또한 용접진행 길이는 각 조건 당 100mm씩 공구를 시계방향으로 회전하여 마찰교반용접을 수행하였다. Table 4.1~4.3은 마찰교반용접한 용접비드 형상을 솔더지름 12, 16, 20mm별로 나누어서 촬영한 표면사진결과이다. 용접비드는 외관상으로 모든 조건이 대체적으로 깨끗하였으며, 용접진행 시 공구의 회전방향과 이송방향이 반대인 RS부에 버가 형성된 것으로 추측된다.¹⁸⁻¹⁹⁾

Table 4.1 Weld bead for FSW of shoulder diameter 12mm

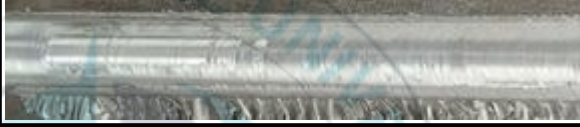
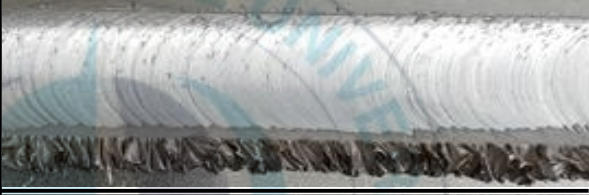
Factors	Condition	Weld Bead
A ₁ B ₁ C ₁	1500rpm	
	200mm/min	
	12mm	
A ₁ B ₂ C ₁	1500rpm	
	300mm/min	
	12mm	
A ₁ B ₃ C ₁	1500rpm	
	400mm/min	
	12mm	
A ₂ B ₁ C ₁	2000rpm	
	200mm/min	
	12mm	
A ₂ B ₂ C ₁	2000rpm	
	300mm/min	
	12mm	
A ₂ B ₃ C ₁	2000rpm	
	400mm/min	
	12mm	
A ₃ B ₁ C ₁	2500rpm	
	200mm/min	
	12mm	
A ₃ B ₂ C ₁	2500rpm	
	300mm/min	
	12mm	
A ₃ B ₃ C ₁	2500rpm	
	400mm/min	
	12mm	

Table 4.2 Weld bead for FSW of shoulder diameter 16mm

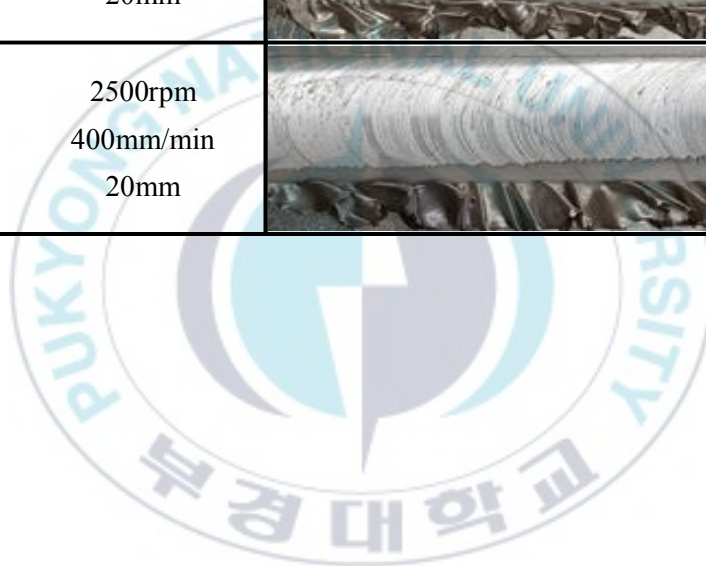
Factors	Condition	Weld Bead
$A_1B_1C_2$	1500rpm 200mm/min 16mm	
$A_1B_2C_2$	1500rpm 300mm/min 16mm	
$A_1B_3C_2$	1500rpm 400mm/min 16mm	
$A_2B_1C_2$	2000rpm 200mm/min 16mm	
$A_2B_2C_2$	2000rpm 300mm/min 16mm	
$A_2B_3C_2$	2000rpm 400mm/min 16mm	
$A_3B_1C_2$	2500rpm 200mm/min 16mm	
$A_3B_2C_2$	2500rpm 300mm/min 16mm	
$A_3B_3C_2$	2500rpm 400mm/min 16mm	

Table 4.3 Weld bead for FSW of shoulder diameter 20mm

Factors	Condition	Weld Bead
$A_1B_1C_3$	1500rpm 200mm/min 20mm	
$A_1B_2C_3$	1500rpm 300mm/min 20mm	
$A_1B_3C_3$	1500rpm 400mm/min 20mm	
$A_2B_1C_3$	2000rpm 200mm/min 20mm	
$A_2B_2C_3$	2000rpm 300mm/min 20mm	
$A_2B_3C_3$	2000rpm 400mm/min 20mm	

(Continue)

Factors	Condition	Weld Bead
$A_3B_1C_3$	2500rpm 200mm/min 20mm	
$A_3B_2C_3$	2500rpm 300mm/min 20mm	
$A_3B_3C_3$	2500rpm 400mm/min 20mm	



4.2 인장시험

마찰교반용접의 본 실험을 시행한 후 시편 용접부의 인장강도를 알아보기 위하여 인장시험을 진행하였다. Fig. 4.1에 보이는 것과 같이 인장시편 규격은 판재의 인장 시험에 사용하는 한국공업규격의 KS B 0801를 기용하였으며, 인장시편의 치수는 너비가 12.5mm, 표점 거리 50mm, 평행부의 길이 60mm, 어깨부의 반지름 20mm, 물림부의 너비 25mm로 인장시편을 제작하였다. 인장시험편은 27개의 모든 실험 조건에서 반복 3회를 더한 81개의 시험편 모두를 동일한 위치에서 제작하였으며, 인장시험에 사용된 장비는 Fig. 4.2의 SHIMADZU사의 UH-300kNI 모델을 사용하여 총 81개의 시편 모두 인장시험 하였다.

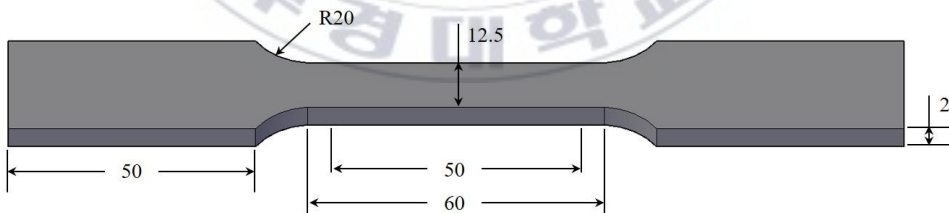


Fig. 4.1 Schematic of tensile specimen(mm)



Fig. 4.2 Tensile strength test machine

Table 4.4은 앞에서 언급된 삼원배치법의 조건인 솔더지름 12, 16, 20mm와 회전속도 1500, 2000, 2500rpm, 이송속도 200, 300, 400mm/min 등의 조건 당 3회, 총 81번의 개별 인장강도 값, 인장강도 평균값과 표준편차를 나타낸 표이다. 3회의 인장시험을 수행한 결과를 Bartlett-Box의 등분산 검정을 통해 분산의 동질성에 대한 가설 검정을 수행하여 표준편차를 각 조건에 대한 인장강도 평균값과 표준편차 등의 결과로서 유의수준 α 를 0.05로 하여 등분산 검정을 수행하였고 Bartlett-Box의 등분산 검정은 아래 식 (4.1)과 같이 정의된다.

$$s_p^2 = \sum_{i=1}^g (n_i - 1) s_i^2 / \sum_{i=1}^g (n_i - 1) \quad (4.1)$$

여기서 n_i 은 각 모집단의 크기, s_i^2 은 표본분산, s_p^2 은 합동분산추정량 (pooled variance estimator)으로, 검정 통계량의 F 값 결과가 57.93, P 값이 0.00으로 나타났으므로 95% 신뢰수준에서 인장시험 결과 값의 등분산 가정이 충족되었기 때문에 본 연구의 인장시험의 결과가 신뢰성이 있다고 판단하여 공정변수 별 인장강도 결과 값에 대하여 분산분석을 시행하였다.

Table 4.4 Tensile strength(MPa) of each conditions

Factors	Condition	Tensile strength(MPa)			Average (MPa)	Standard deviation
A ₁ B ₁ C ₁	1500rpm 200mm/min 12mm	120.05	121.1	119.65	120.27	0.74889
A ₁ B ₂ C ₁	1500rpm 300mm/min 12mm	121.76	123	124.67	123.14	1.46029
A ₁ B ₃ C ₁	1500rpm 400mm/min 12mm	127.09	133.86	130.6	130.52	3.38577
A ₂ B ₁ C ₁	2000rpm 200mm/min 12mm	100.07	102.58	103.54	102.06	1.79177
A ₂ B ₂ C ₁	2000rpm 300mm/min 12mm	104.61	110.6	117.69	110.97	6.54770
A ₂ B ₃ C ₁	2000rpm 400mm/min 12mm	105.35	123.76	120.05	116.39	9.73638
A ₃ B ₁ C ₁	2500rpm 200mm/min 12mm	85.24	93.8	90.6	89.88	4.32518
A ₃ B ₂ C ₁	2500rpm 300mm/min 12mm	96.86	92.8	98.2	95.95	2.81186
A ₃ B ₃ C ₁	2500rpm 400mm/min 12mm	110.25	98.25	100.6	103.03	6.35931

(Continue)

Factors	Condition	Tensile strength(MPa)			Average (MPa)	Standard deviation
A ₁ B ₁ C ₂	1500rpm 200mm/min 16mm	112.59	114.05	113.34	113.33	0.73009
A ₁ B ₂ C ₂	1500rpm 300mm/min 16mm	123.23	126.87	124.44	124.85	1.85376
A ₁ B ₃ C ₂	1500rpm 400mm/min 16mm	110.12	109.45	100.3	106.62	5.48640
A ₂ B ₁ C ₂	2000rpm 200mm/min 16mm	118.59	120	119.6	119.40	0.72666
A ₂ B ₂ C ₂	2000rpm 300mm/min 16mm	130.11	128.46	132.5	130.36	2.03126
A ₂ B ₃ C ₂	2000rpm 400mm/min 16mm	116.17	115.5	117.88	116.52	1.22729
A ₃ B ₁ C ₂	2500rpm 200mm/min 16mm	116.6	115	116.8	116.13	0.98658
A ₃ B ₂ C ₂	2500rpm 300mm/min 16mm	121.81	125.31	124.5	123.87	1.83222
A ₃ B ₃ C ₂	2500rpm 400mm/min 16mm	114.75	111	112.8	112.85	1.87550

(Continue)

Factors	Condition	Tensile strength(MPa)			Average (MPa)	Standard deviation
$A_1B_1C_3$	1500rpm 200mm/min 20mm	111	114.75	114	113.25	1.98431
$A_1B_2C_3$	1500rpm 300mm/min 20mm	121.88	120.7	121.5	121.36	0.60026
$A_1B_3C_3$	1500rpm 400mm/min 20mm	122.75	123.14	122.58	122.82	0.28447
$A_2B_1C_3$	2000rpm 200mm/min 20mm	110	108.05	110.12	109.39	1.16202
$A_2B_2C_3$	2000rpm 300mm/min 20mm	116.24	112.5	111	113.25	2.69862
$A_2B_3C_3$	2000rpm 400mm/min 20mm	119.63	115.5	117	117.38	2.08780
$A_3B_1C_3$	2500rpm 200mm/min 20mm	116.63	114	115.15	115.26	1.31595
$A_3B_2C_3$	2500rpm 300mm/min 20mm	120	117	118	118.33	1.52753
$A_3B_3C_3$	2500rpm 400mm/min 20mm	120.38	121.13	120	120.50	0.57291

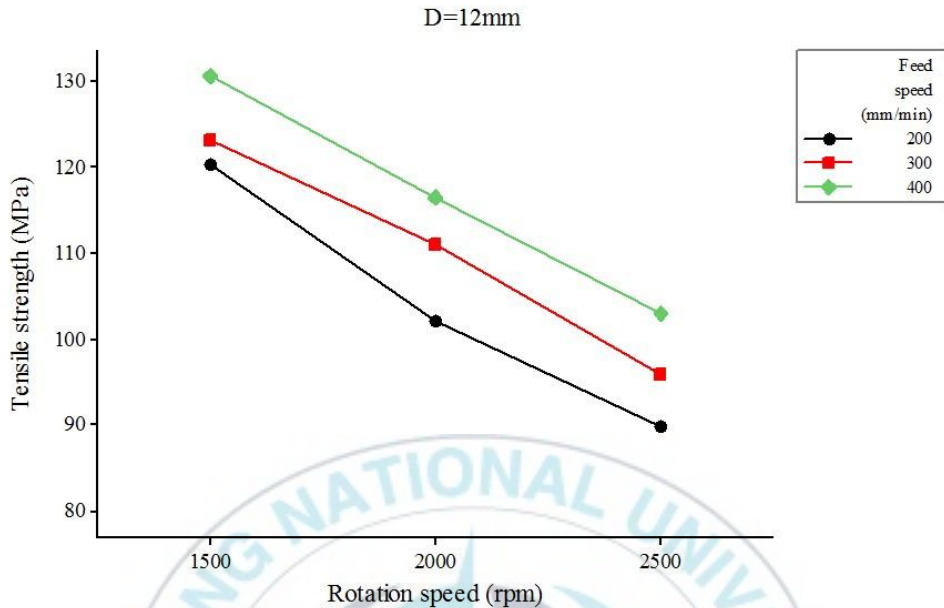


Fig. 4.3 Relationship between tensile strength(MPa) of 12mm

Fig 4.3은 솔더지름 12mm에서의 회전속도 1500, 2000, 2500rpm, 이송속도 200, 300, 400mm/min에 대한 인장강도 평균값에 대한 그래프이다. 여기서 보면 솔더지름 12mm에서 인장강도는 이송속도가 일정할 때 회전속도가 증가할수록 인장강도가 낮아졌으나 반면에 이송속도가 증가할수록 인장강도는 증가하였다. 또한 솔더지름 12mm조건에서 최고 평균 인장강도 값은 130.52Mpa로 모재대비 약 93%값을 보인 $A_1B_3C_1$ (1500rpm, 400mm/min)조건이었고, $A_3B_1C_1$ (2500rpm, 200mm/min)의 인장강도 평균값이 89.88MPa로 모재대비 약 63%로 최저 인장강도를 나타내었다.

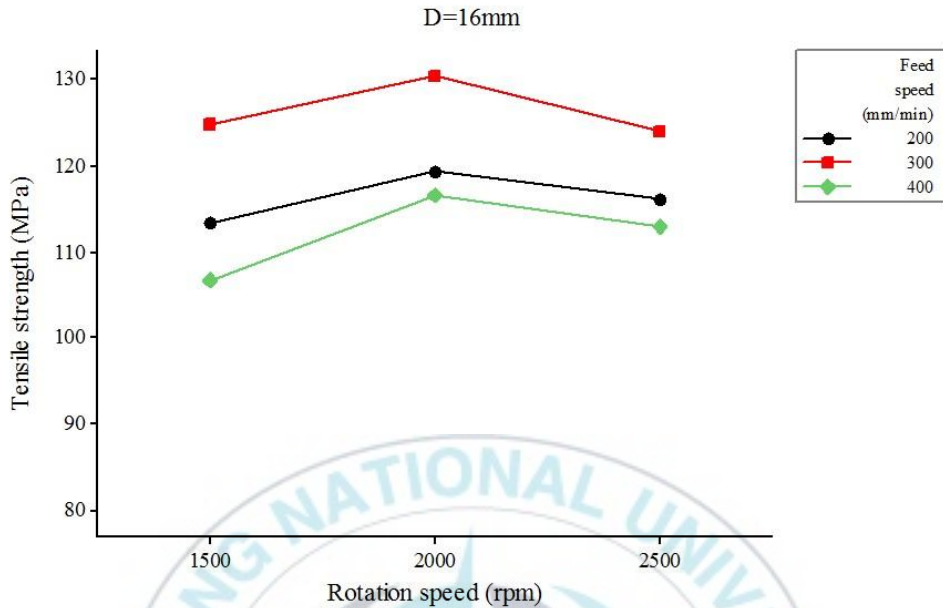


Fig. 4.4 Relationship between tensile strength(MPa) of 16mm

Fig 4.4는 솔더지름 16mm에서의 회전속도 1500, 2000, 2500rpm, 이송속도 200, 300, 400mm/min에 대한 인장강도 평균의 결과이다. 이 결과에서 솔더지름 16mm에서의 인장강도는 이송속도 200, 300, 400mm/min 조건에서 모두 회전속도 1500rpm이 최저 인장강도를 나타내었고, 2000rpm에서 인장강도가 증가하는 경향을 보이다 2500rpm에서 다시 감소하는 양상을 보였다. 또한, 최고 평균 인장강도 값은 130.36MPa로 모재대비 약 93%인 $A_2B_2C_2$ (2000rpm, 300mm/min)이고, 최저 인장강도 값은 111.08MPa로 $A_1B_1C_2$ (1500rpm, 200mm/min)조건이 모재대비 약 79%로 솔더지름 16mm에서 가장 낮은 결과 값을 보였다.

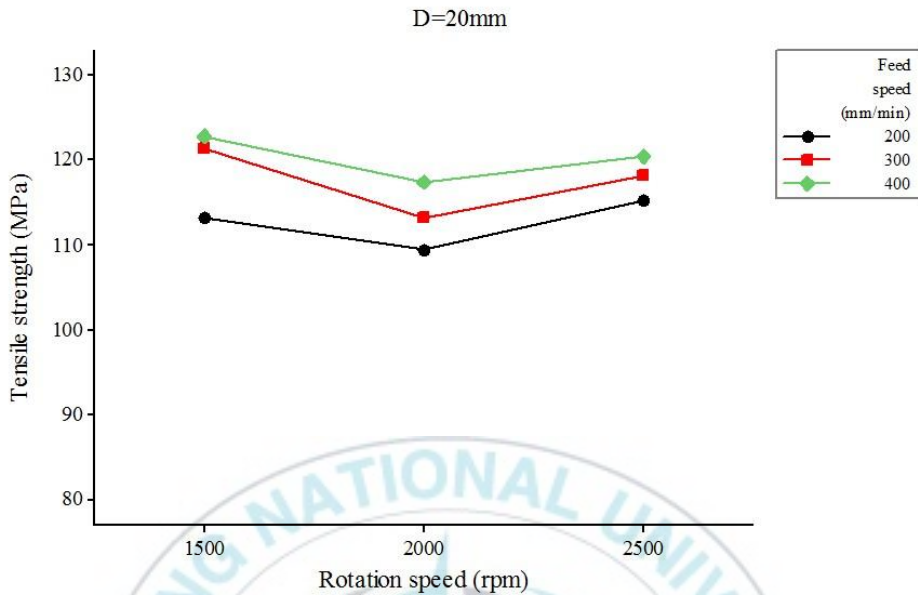


Fig. 4.5 Relationship between tensile strength(MPa) of 20mm

Fig 4.5은 솔더지름 16mm에서의 회전속도 1500, 2000, 2500rpm, 이송속도 200, 300, 400mm/min에 대한 인장강도 평균의 결과이다. 솔더지름 20mm에서 최고 평균 인장강도 값은 123MPa인 $A_1B_2C_3$ (1500rpm, 300mm/min)가 모재대비 약 88%를 나타내었으나 반면에 $A_2B_1C_3$ (2000rpm, 200mm/min)가 109.39Mpa로 모재대비 약 80%로 솔더지름 20mm조건에서 최저 강도를 나타냈다. 솔더지름 16mm에서의 인장강도는 이송속도 200, 300, 400mm/min 조건에서 모두 회전속도 1500rpm에서 인장강도가 감소하다가 2500rpm에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 이상과 같은 Fig 4.3~4.5의 결과에서 각각의 솔더 지름별 평균인장강도는 일정한 경향성을 보였으며, 이것은 마찰교반용접 시 인장강도의 영향은 회전속도, 이송속도와 솔더지름 변수 모두 인장강도에 영향을 끼치는 것으로 생각된다.

4.3 분산분석

4.3.1 분산분석표

Table 4.5은 본 논문의 마찰교반용접실험에서 선정한 공정변수들을 통계적 분석방법으로 인장강도 값에 대하여 미치는 영향과 각 인자를 정량적으로 분석하고, 교호작용이 있는가를 검토하기 위해 반복이 있는 삼원 배치법을 통한 분산분석을 95%신뢰수준에서 시행한 결과표이다.

여기서 A 는 회전속도, B 는 이송속도, C 는 솔더지름이며 $A \times B$ 는 회전속도와 이송속도의 교호작용, $A \times C$ 는 회전속도와 솔더지름의 교호작용, $B \times C$ 는 이송속도와 솔더지름 간의 교호작용, $A \times B \times C$ 는 회전속도와 이송속도, 솔더지름 세 인자에 대한 교호작용, E 는 에러, 그리고 T 는 Total을 의미한다.

표 내의 P 값은 유의수준 α 가 0.05보다 작으면 결과 값이 유의하고, 크다면 신뢰수준 95%에서 유의하지 않는다는 뜻이고 분산분석에 대한 결정계수 R^2 값이 92.37%, 수정한 R^2 값이 88.69%로 높은 값으로 나타났다. 즉, 해당 결과에 대한 변수 값의 상관관계가 매우 높다는 것을 의미하므로 이에 따른 신뢰성을 가진다고 판단하였다. 그러므로 분산분석 결과에 따라 $A \times B$, $A \times B \times C$ 으로 표시된 회전속도와 이송속도의 교호작용, 회전속도와 이송속도, 솔더지름의 교호작용을 제외한 나머지 인자들이 모두 95% 신뢰수준에서 유의한 값을 가졌다.

Table 4.5 Three-way ANOVA results ($\alpha = 0.05$)

Source	<i>SS</i>	<i>DF</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>A</i>	1075.22	2	537.86	49.75	0.000
<i>B</i>	721.50	2	360.75	33.36	0.000
<i>C</i>	979.51	2	489.76	45.30	0.000
<i>A</i> × <i>B</i>	25.81	4	6.45	0.60	0.666
<i>A</i> × <i>C</i>	2950.75	4	737.69	68.23	0.000
<i>B</i> × <i>C</i>	1237.97	4	309.49	28.62	0.000
<i>A</i> × <i>B</i> × <i>C</i>	74.95	8	9.37	0.87	0.550
<i>E</i>	583.87	54	10.81	10.81	
<i>T</i>	7650.09	80			

4.3.2 공정 내 최적조건 산출

Table 4.5의 분산분석 결과를 바탕으로 인장강도에 대하여 유의한 인자가 인장강도 결과 값에 어떠한 영향을 끼치는지를 분석하기 위해 각 인자의 주효과도를 도출하였다. Fig 4.6~4.8 등은 본 연구의 인장강도 평균값에 대한 인자 A , B , C 의 회전속도, 이송속도, 솔더지름의 주효과도를 나타낸다. 이 결과에서 회전속도가 높아질수록 인장강도 값은 감소하는 모습을 보였고, 회전속도가 변할수록 인장강도에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 반면에 이송속도와 솔더지름이 인장강도에 미치는 영향은 매우 유사하였고 이송속도가 200mm/min에서 300mm/min으로 높아졌을 때에는 인장강도 값이 대폭 증가하였다.

Fig 4.9~4.10 등은 95% 신뢰수준에서 교호작용이 유의한 값으로 나온 솔더지름과 회전속도의 교호작용, 솔더지름과 이송속도의 교호작용 간의 평균 인장강도를 등고선 플롯으로 나타내었다. 회전속도와 솔더지름의 등고선 플롯에서는 솔더지름 12mm, 회전속도 1500rpm 조건과 솔더지름 16mm, 회전속도 2000rpm이 인장강도 120~126MPa로 가장 높은 영역을 나타냈다. 이송속도와 솔더지름의 등고선 플롯에서는 솔더지름 16mm, 이송속도 300mm조건에서 인장강도 132MPa이상의 높은 영역으로 나타났으므로 두 개의 등고선 플롯에서 가장 안정적인 결과를 나타낸 솔더지름 16mm를 실험 내 최적조건의 기준으로 삼았다.

이러한 결과의 원인은 이송속도가 높아질수록 온도가 낮아지는데, 마찰교반용접 특성 상 용융점 아래에서 접합이 이루어지는 고상용접이기 때문에 일반적으로는 결정립의 조대화와 공구의 회전속도와 이송속도에 의한 동적 재결정화가 일어나기 때문으로 생각된다.²⁰⁻²¹⁾ 그러므로 마찰교반용접에서 최적조건 선정에 있어 중요한 것은 재료 간의 교반에 의해서 조성

유동이 원활하게 일어나 용접부에 결함이 없어야 하며, 동시에 낮은 입열량을 가져 결정립의 조대화가 최소화되는 공정조건을 찾는 것이 목표라고 할 수 있다.²²⁻²³⁾

즉, 이송속도 300mm/min에서 400mm/min으로 증가했을 때는 소성유동이 원활하게 이루어지지 않아 용접부 내부 결함이 형성되어 인장강도가 떨어졌을 가능성이 높으며, 솔더지름 16mm에서 소성유동이 원활하게 진행되다가 솔더지름 20mm에서는 입열량의 식에서 가장 영향이 큰 변수인 솔더지름의 증가로 인해 입열량이 높아져 결정립의 조대화가 일어나 인장강도에 영향을 준 것으로 보았기 때문에²⁴⁻²⁵⁾ 분산분석의 결과를 바탕으로 솔더지름 16mm의 A₁B₂C₂(1500rpm, 300mm/min)조건을 최적조건으로 삼아 추가적으로 용접 단면부 관찰과 경도시험을 진행하였다.

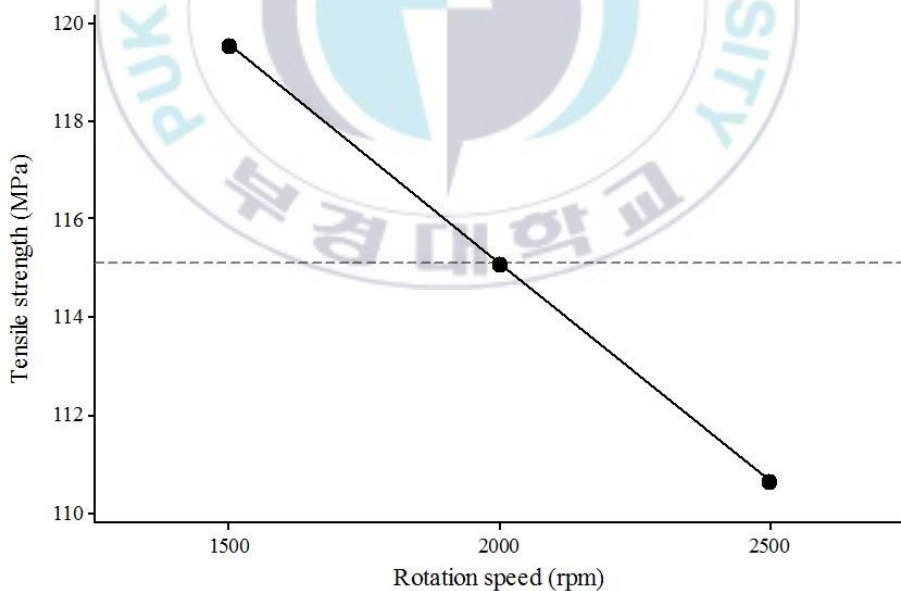


Fig. 4.6 The main effect plot for tensile strength (rotation speed)

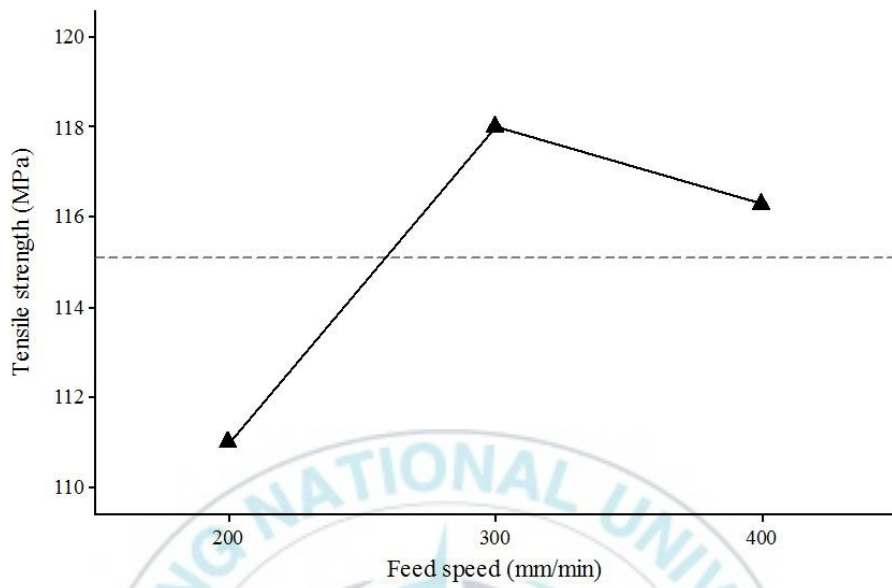


Fig. 4.7 The main effect plot for tensile strength (feed speed)

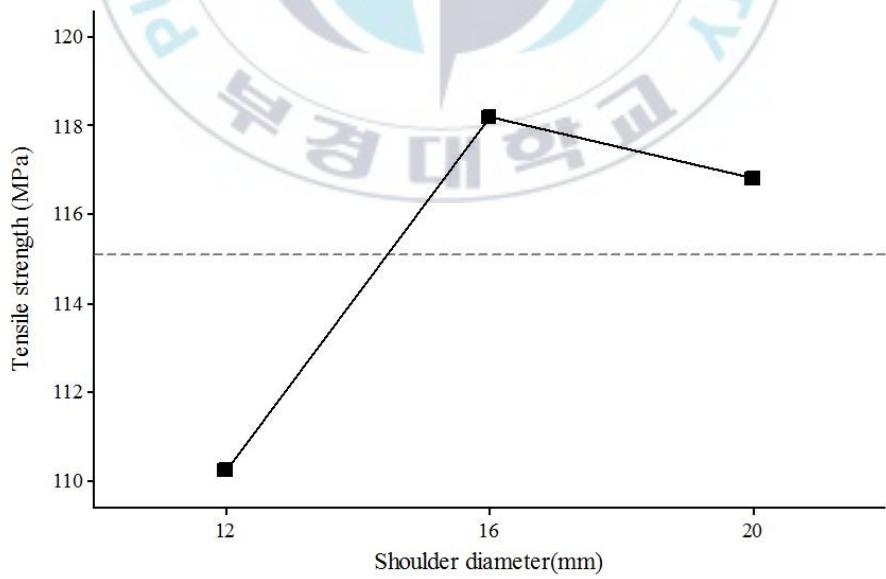


Fig. 4.8 The main effect plot for tensile strength (shoulder diameter)

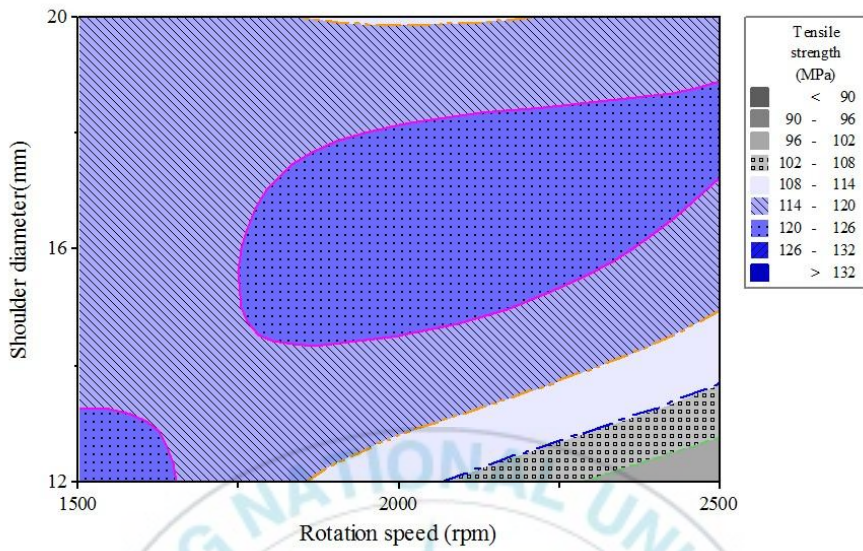


Fig. 4.9 Response plots for tensile strength
($A \times C$: rotation speed $\times$ shoulder diameter)

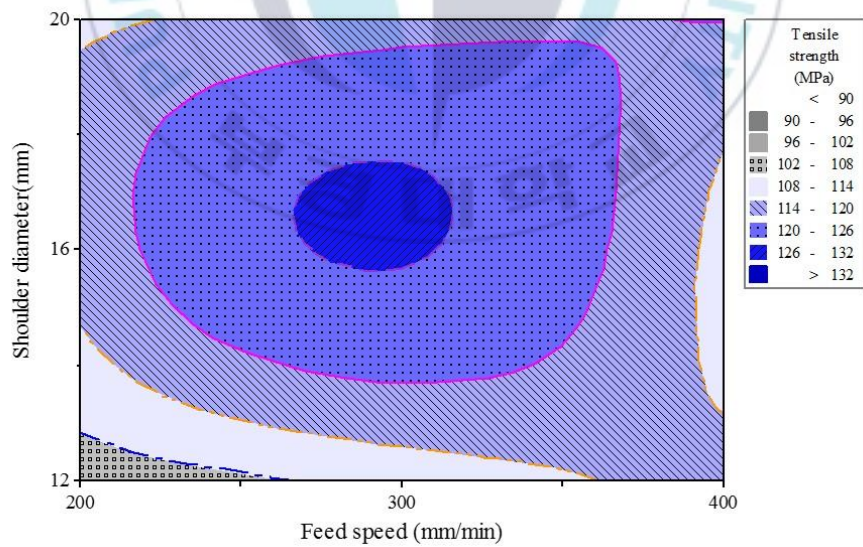


Fig. 4.10 Response plots for tensile strength
($B \times C$: feed speed $\times$ shoulder diameter)

4.4 미세조직 관찰 및 경도시험

4.4.1 시험방법 및 장비

마찰교반용접 실험 후 용접 단면부의 전체적인 형상과 결함유무 확인, 경도시험, 미세조직관찰을 위해 Fig. 4.11~4.12와 같이 인장시험편과 맞닿은 면을 기준으로 약 20~30mm으로 절단하였으며 시험편의 높이는 약 10 mm으로 절단하였다.



Fig. 4.11 Observation site of specimen

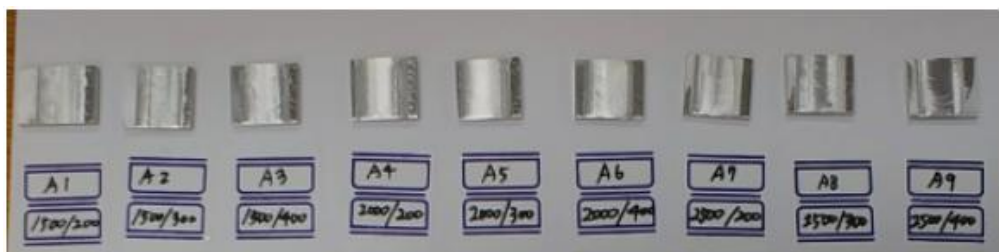


Fig. 4.12 Specimen cutting results

또한 용접 단면부, 미세조직 관찰과 경도시험을 위해 폴리싱(polishing) 과정을 거쳤으며 장비는 Fig 4.13에 나타낸 것과 같이 GLP KOREA사의 POWER PRESS-S 마운팅기에서 페놀릭 파우더(phenolic Powder)를 사용하여 지름 30mm로 마운팅한 후, GLP KOREA사의 GLP-S20/25 폴리셔(polisher)을 사용하여 80~110rpm으로 실리콘 카바이드(silicon carbide)를 사용해 220, 400, 600, 800, 1200, 1500, 2000방으로 그라인딩(Grinding)하였다. 최종연마는 알루미나 파우더(Alumina powder) 1, 0.5 μ m 입자로 연마하였다. 시편에 사용된 매크로에칭은 $H_2O(20mL)+HCl(20mL)+HNO_3(20mL)+HF(5mL)$ 을 배합하여 Keller's reagent를 만들어 30초~2분 30초에서 10초 간격으로 단면의 부식정도를 확인하며 진행되었다. 관찰한 현미경은 Olympus사의 BX60M모델로 Fig 4.14에 나타내었다. 경도시험 시편은 실리콘 카바이드로 220, 400, 600, 800, 1200방으로 그라인딩을 한 후, Fig 4.16에 제시된 Akashi사의 HM114모델인 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 0.5mm 간격으로 경도시험을 진행하였다. Fig 4.15는 진행한 경도시험을 나타낸 것이고 Fig 4.17은 용접부 결함관찰에 사용된 JEOL사의 JSM-7001F모델인 주사전자현미경(SEM) 장치를 나타낸다.



Fig. 4.13 Mounting press machine and polisher



Fig. 4.14 Optical microscope

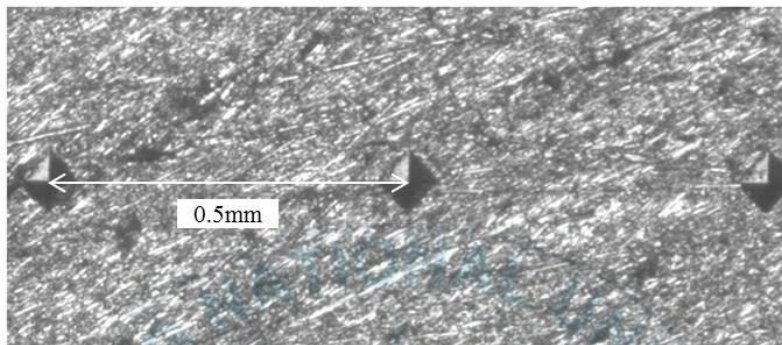
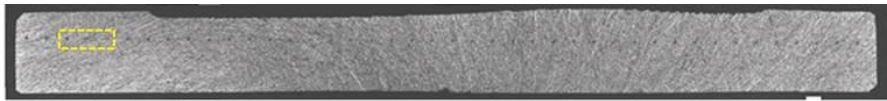


Fig. 4.15 Hardness test

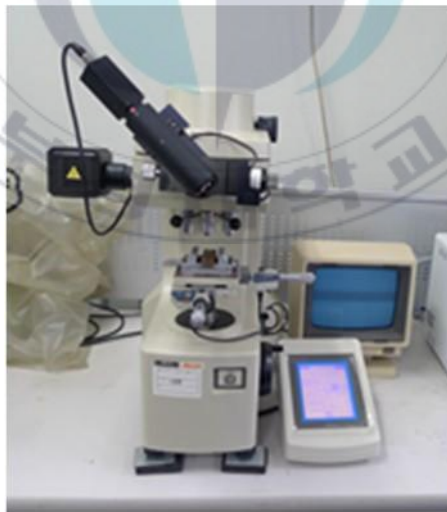


Fig. 4.16 Micro vickers hardness tester



Fig. 4.17 Scanning electron microscope

4.4.2 공정변수별 내부결합 영향

Fig 4.18~4.20은 마찰교반용접한 시편의 단면부를 회전속도, 이송속도, 솔더지름 별로 내부결합에 어떠한 영향을 끼치는 것인가에 대해 고찰하기 위하여 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 이송속도 300mm/min, 솔더지름 20mm를 고정으로 하여 회전속도가 변함에 따라서는 내부결합에 특별한 경향을 보이지 않았으며, 용접 단면부에 미세한 기공이 관찰되었다. 그러나 용접 단면부의 내부결합은 공구의 이송속도가 변함에 따라서는 큰 경향성을 보였는데, 회전속도 1500rpm, 솔더지름 12mm기준으로 이송속도가 200mm/min인 조건에서 홀이 관찰되었으며 홀 주변에는 기공과 크랙을 확인할 수 있었다. 하지만 이송속도 300mm/min에서 크랙은 관찰되지 않았으며 홀의 깊이가 얕아진 것이 관찰되었다. 실험조건에서 제일 높은 이송속도를 가지는 400mm/min조건에서는 홀은 확인되지 않았으며 깨끗한 용접 단면부를 나타냈다. 또한 회전속도 2000rpm, 이송속도 400mm/min기준으로 솔더지름 12, 16, 20mm로 변화시킨 조건에서는 내부결합에 대해서는 솔더지름 12mm에서 결함과 기공이 관찰되었으며 16mm에서 미세한 기공이 보이다 솔더지름 20mm에서는 기공이 커진 것을 확인할 수 있었다. 이것은 마찰교반용접 시 높은 온도로 인해 재료의 일부가 용융하여 국부적으로 발생한 기공으로 생각된다. 앞서 진행하였던 기초실험과 같이 이송속도가 높아짐에 따라 결함이 적어지는 경향을 보였다. 이러한 내부결합은 용접 접합부의 균열을 발생시키고 강도의 감소를 초래하기 때문에 마찰교반용접의 재료 간 소성유동은 온도의 영향뿐만 아니라 동시에 공정변수 간의 영향도 충분히 고려해야 한다는 것으로 생각된다.²⁶⁻²⁷⁾

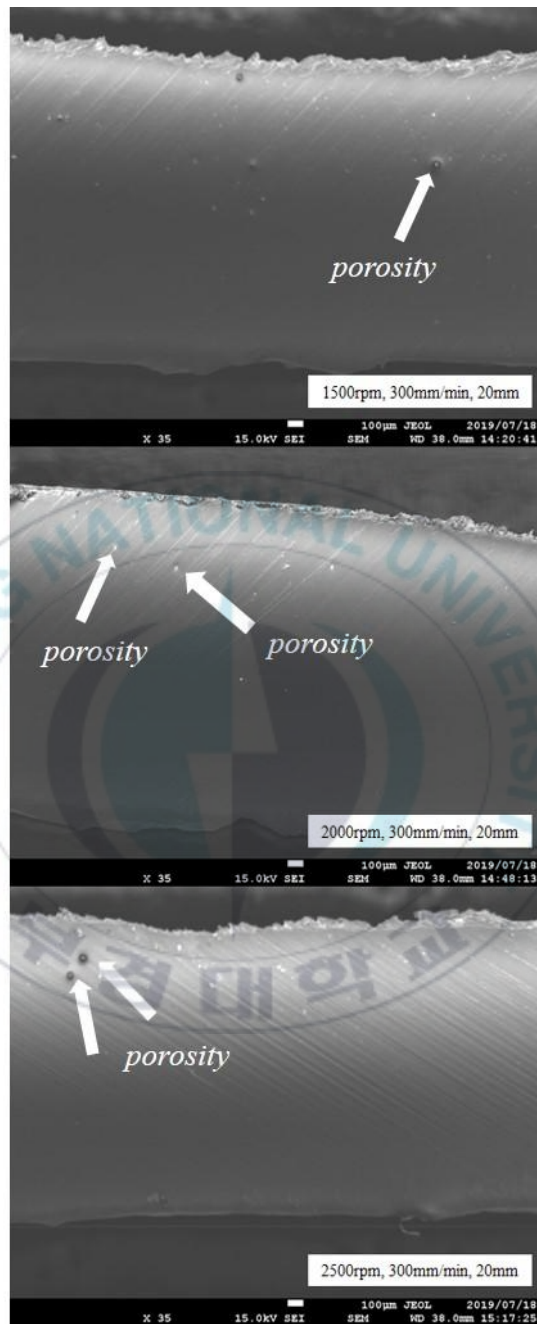


Fig. 4.18 Internal defects with respect to rotation speed(rpm)

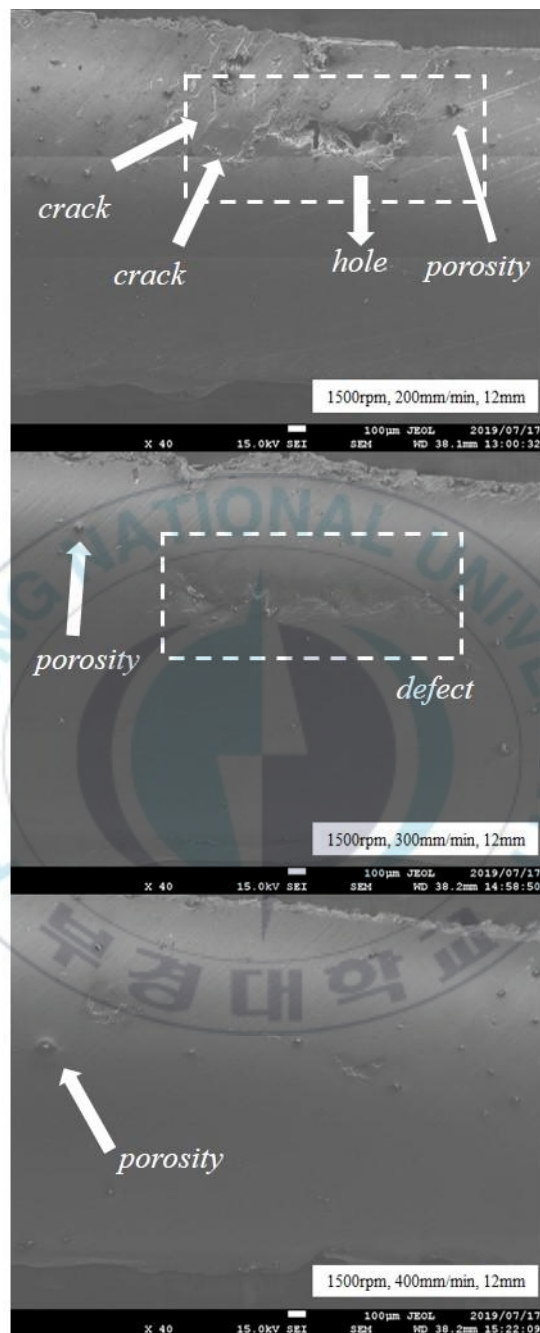


Fig. 4.19 Internal defects with respect to feed speed(mm/min)



Fig. 4.20 Internal defects with respect to shoulder diameter(mm)

4.4.3 미세조직 관찰 및 경도시험

앞서 진행한 분산분석을 통해 도출한 실험 내 최적조건인 솔더지름 16mm, 1500rpm, 300mm/min과 실험 내 최고 인장강도 평균값은 가진 솔더지름 16mm, 2000rpm, 300mm/min조건을 비교하기 위하여 경도시험을 진행한 결과를 Fig 4.21~22에 나타내었다. Fig 4.18에서 솔더지름 16mm, 1500rpm, 300mm/min조건은 교반부(SZ)는 AA3003-H14 모재의 경도 대비 비슷한 값을 나타냈으며, 열기계적영향부(THAZ)에서 결정립의 조대화로 인하여 경도가 떨어지는 마찰교반용접의 대표적인 특징을 보였다. 또한 공구의 회전방향과 이송방향이 같은 AS부에서 최고 낮은 경도를 보였으며, 이것 또한 마찰교반용접의 전형적인 특징을 나타냈으며 용접부 별 비교적 균일한 경도 값을 나타낸 것으로 보여진다.

반면에 Fig 4.22의 실험 내 최고 평균 인장강도인 솔더지름 16mm, 2000rpm, 300mm/min조건은 열영향부(HAZ)에서 교반부로 갈수록 경도 값이 떨어졌으며, 교반부의 평균 경도 값이 Fig 4.21은 약 75HV로 모재대비 93.75%에 반해서 Fig 4.22에서는 평균 경도가 약 60HV로 모재대비 75%로 18.75%의 차이를 보였다. 이러한 이유는 높은 회전속도로 인하여 입열량이 높아져 공정변수에 따른 소성유동으로 인한 동적 재결정에 따른 미세화보다도 교반부에서 높은 온도로 인해 냉각속도가 늦어져 교반부에서 결정립의 조대화가 일어난 것으로 판단된다.²⁸⁻³⁰⁾ 또한 Fig 4.23은 솔더지름 16mm, 1500rpm, 300mm/min조건에서 RS부의 교반부-열기계적영향부를 나타낸다. 교반부에서의 결정립은 미세하게 나타났으며, 열기계적영향부로 갈수록 소성유동으로 인한 결정립의 조대화가 진행된 것을 확인할 수 있었다.

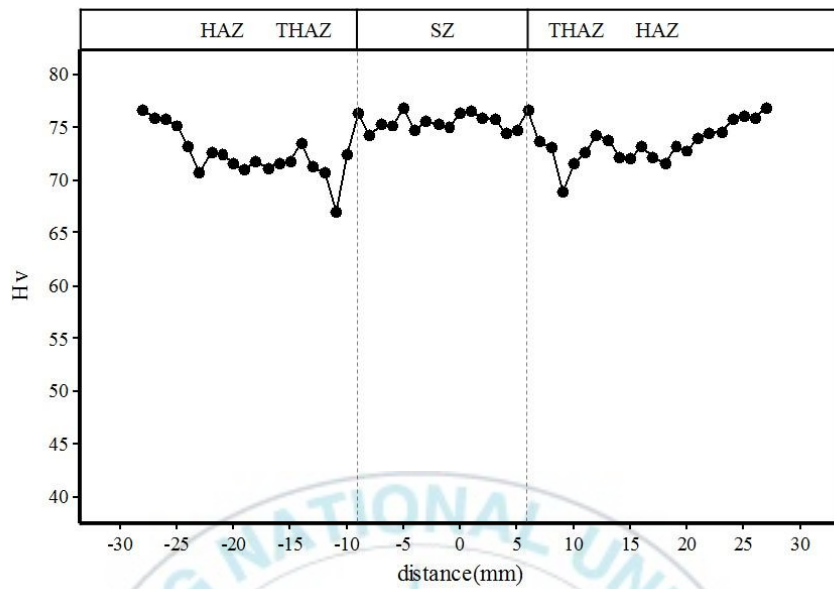


Fig. 4.21 Hardness measurement result of $A_1B_2C_2$
(1500rpm, 300mm/min, 16mm)

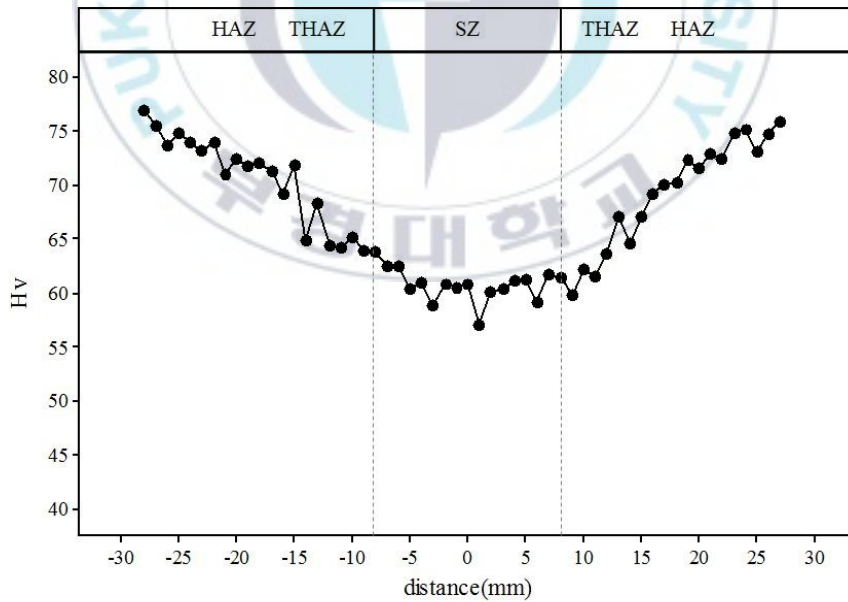


Fig. 4.22 Hardness measurement result of $A_2B_2C_2$
(2000rpm, 300mm/min, 16mm)

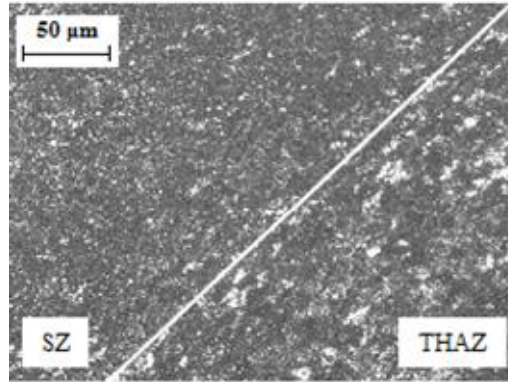


Fig. 4.23 Stir zone - thermo mechanically affected zone
macrostructure of $A_1B_2C_2$ (1500rpm, 300mm/min, 16mm)

마찰교반용접에서 교반부-열기계적영향부에서 교반부의 온도가 일반적으로 높은데도 불구하고 결정립이 작게 나타난 이유는 공정변수에 따른 교반력에 의한 소성유동 현상으로 동적재결정화가 일어났으며 열기계적영향부는 마찰교반용접에서 공정변수로 인한 입열량이 높아져 온도에 따른 결정립의 조대화가 일어난 것으로 생각된다. Fig. 4.21과 Fig. 4.22를 비교하였을 때 Hall-Petch식을 통하여 결정립의 크기와 경도 간의 관계가 반비례하다는 것을 설명할 수 있다.³¹⁻³²⁾

$$H = H_0 + K_H d^{-1/2} \quad (4.2)$$

여기서 H 는 경도를 나타내며 H_0 와 K_H 는 상수 값, d 는 결정립의 크기이다. Fig 4.24는 교반부의 결정립의 크기에 대한 분포도를 나타내며 Fig 4.25는 열기계적영향부의 결정립 크기와 분포를 나타낸다.

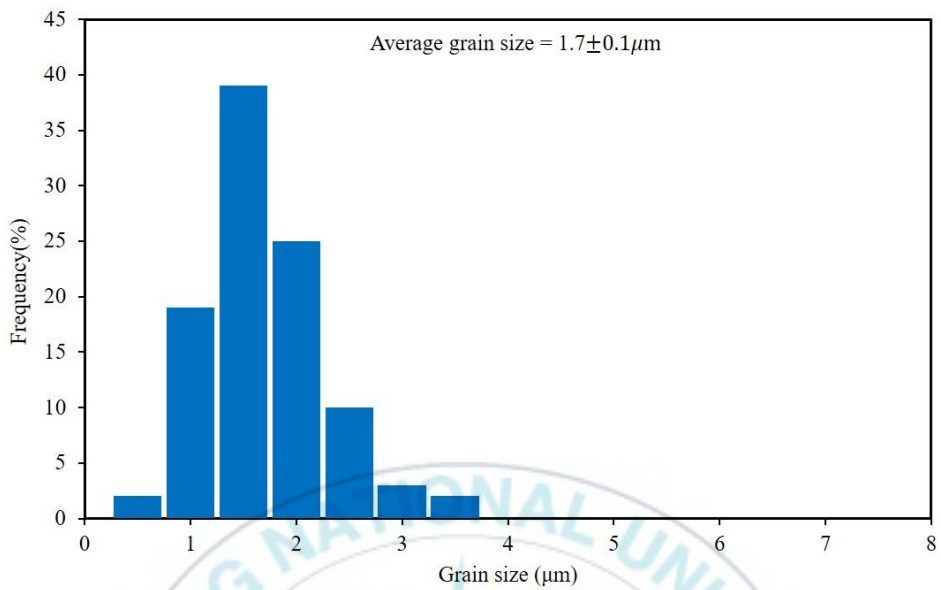


Fig. 4.24 Grain size result of stir zone

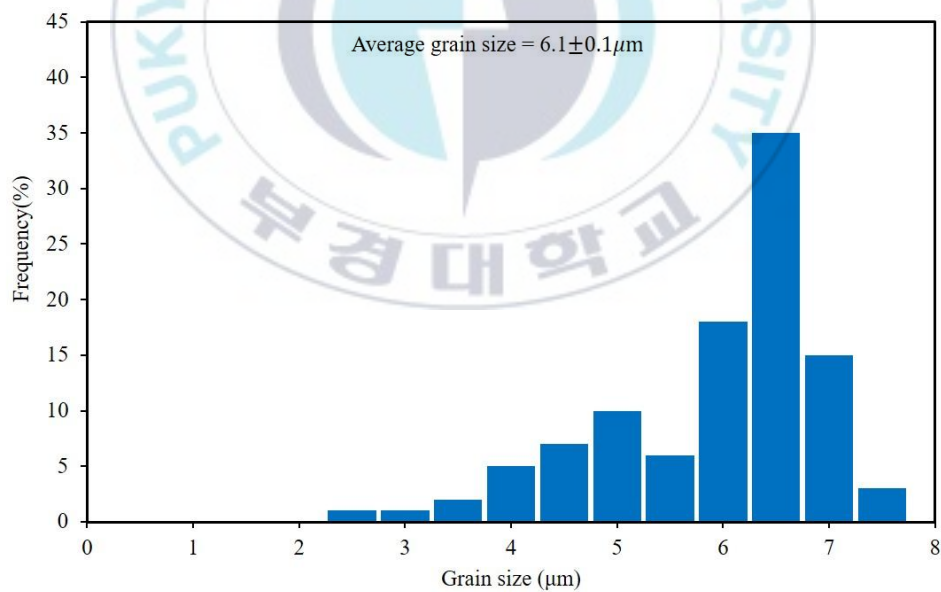


Fig. 4.25 Hardness measurement result of
thermo mechanically affected zone

분산분석을 통해 얻어낸 최적조건인 $A_1B_2C_2$ 조건에서 교반부의 결정립 크기는 평균 $1.7 \pm 0.1 \mu\text{m}$, 결정립 크기 분포는 $0.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 으로 형성되었으며 대체적으로 균일한 크기의 입자가 생성되었으며 열기계적영향부에 근접할수록 결정립의 조대화와 함께 결정립의 크기가 불균일하게 나타났다. 열기계적영향부의 평균 결정립의 크기는 $6.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 이었으며, 결정립의 크기는 $2.5 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 로 교반부의 조건에 비해 폭넓게 나타났다. 이러한 결과는 공구의 회전속도와 이송속도에 의한 동적재결정으로 결정립이 미세화되었으며 재결정으로 인해 결정립이 균일하게 나타난 것을 설명해준다. 또한 공구의 회전속도와 이송속도의 영향을 직접적으로 받지 않는 열기계적영향부로 갈수록 온도에 의한 결정립의 조대화가 진행이 되었으며, 상대적으로 냉각속도가 열기계적영향부보다 빠른 열영향부에 비해 냉각이 늦어져 열기계적영향부에서 경도가 급격하게 감소한 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 Al-Mn 3000계열인 AA3003합금에 있어 이송속도, 회전속도, 솔더지름을 공정변수로 두고 마찰교반용접을 행하여 인장시험과 미세조직관찰, 그리고 경도측정한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 솔더지름 12mm에서 최고 인장강도의 조건은 회전속도 1500rpm, 이송속도 400mm/min조건이었으며 최저 인장강도의 조건은 회전속도 2500rpm, 이송속도 300mm/min인 조건으로 나타났다.
2. 솔더지름 16mm에서 회전속도 2000rpm, 이송속도 300mm/min조건이 최고 인장강도로 나타났으며 접합부에는 회전속도 1500rpm, 이송속도 400mm/min조건이 최저 인장강도로 나타났다.
3. 솔더지름 20mm에서 최고 인장강도 조건은 회전속도 1500rpm, 이송속도 400mm/min조건이었으며 회전속도 2000rpm, 이송속도 200mm/min조건이 최저 인장강도를 나타냈다. 또한 솔더지름 12, 16, 20mm 공통적으로 회전속도 1500rpm에서 최고 인장강도를 나타내었다.
4. 반복이 있는 삼원배치법을 사용하여 마찰교반용접실험을 진행하여 95% 신뢰수준에서 분산분석을 시행한 결과 회전속도와 솔더지름에 대한 교호작용, 회전속도, 솔더지름, 이송속도, 이송속도와 솔더지름에 대한 교호작용 순으로 영향이 큰 것으로 나타났으며 회전속도와 이송속도에 대한 교호작용과 회전속도, 이송속도와 솔더지름에 대한 교호작용에 대한 인장강도 영향은 나타나지 않았다.
5. 분산분석을 통한 주효과 그래프와 교호작용도에서 솔더지름 16mm, 회전속도 1500rpm, 이송속도 300mm/min가 최적조건으로 산출하였다.
6. 내부 결함 발생유무는 이송속도가 높아질수록 결함이 작아졌고 회전속

도와 솔더지름에서는 특별한 경향을 보이지 않았다.

7. 실험 내 인장강도의 최적조건과 인장강도의 최대조건을 경도시험으로 비교해본 결과 교반부에서 교반력에 의한 소성유동 현상으로 최적조건인 솔더지름 16mm, 회전속도 1500rpm, 이송속도 300mm/min에서 동적재결정이 일어나 평균 경도가 75Hv로 모재대비 93.75%로 경도가 높아졌으며 최대 인장강도의 조건인 솔더지름 16mm, 회전속도 2000rpm, 이송속도 300mm/min에서는 높은 온도로 교반부에서 결정립의 조대화로 인하여 평균 경도가 약 60Hv로 모재대비 75%로 나타났다.
8. 교반부의 결정립 크기는 평균 $1.7 \pm 0.1 \mu\text{m}$, 결정립 크기 분포는 $0.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 으로 형성되었으며, 열기계적영향부의 평균 결정립의 크기는 $6.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 이었다. 결정립의 크기 분포는 $2.5 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 로 교반부의 조건에 비해 폭넓게 나타났다.

참고문헌

1. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P., & Dawes, C. J. 1991. GB Patent application no. 9125978.8. International patent application no. PCT/GB92/02203.
2. Record, J. H., Covington, J. L., Nelson, T. W., Sorensen, C. D., & Webb, B. W. 2004, Fundamental characterization of friction stir welding. In 5th International Friction Stir Welding Symposium, Metz, France, TWI(CDROM).
3. Burford, D., Widener, C., & Tweedy, B. 2006, Advances in friction stir welding for aerospace applications. In 6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO) p. 7730.
4. Eberl, I., Hantrais, C., Ehrstrom, J. C., & Nardin, C. 2010, Friction stir welding dissimilar alloys for tailoring properties of aerospace parts. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(8), p.p 699-705.
5. Van Haver, W., Stassart, X., De Meester, B., & Dhooge, A. 2008, Friction stir welding of aluminium high pressure die castings: Parameter optimisation and gapbridgeability. *Welding in the World*, 52(9-10), p.p 20-29.
6. Lombard, H., Hattingh, D. G., Steuwer, A., & James, M. N. 2008, Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(3-4), p.p 341-354.
7. Rajakumar, S., & Balasubramanian, V. 2012, Establishing relationships between mechanical properties of aluminium alloys and optimised friction stir welding process parameters. *Materials & Design*, 40, p.p 17-35.
8. TOTTEN G E. 2003, Handbook of aluminum (alloy production and materials manufacturing) [M]. Vol. 2. New York: Marcel Dekker.
9. Reynolds, A. P. 2008, Flow visualization and simulation in FSW. *Scripta materialia*, 58(5), p.p 338-342.
10. Schmidt, H. N. B., Dickerson, T. L., & Hattel, J. H. 2006, Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3. *Acta Materialia*, 54(4), p.p 1199-1209.
11. Fukuda, T. 2001, Friction stir welding (FSW) process. *Welding international*, 15(8), p.p 611-615.

12. McNelley, T. R., Swaminathan, S., & Su, J. Q. 2008, Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys. *Scripta Materialia*, 58(5), p.p 349–354.
13. Ceschini, L., Boromei, I., Minak, G., Morri, A., & Tarterini, F. 2007, Micro structure, tensile and fatigue properties of AA6061/20 vol.% Al₂O₃p friction stir welded joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(4), p.p 1200–1210.
14. Huang, H. W., & Ou, B. L. 2009, Evolution of precipitation during different homogenization treatments in a 3003 aluminum alloy. *Materials & Design*, 30(7), p.p 2685–2692.
15. Li, Y. J., & Arnberg, L. 2003, Quantitative study on the precipitation behavior of dispersoids in DC-cast AA3003 alloy during heating and homogenization. *Acta Materialia*, 51(12), p.p 3415–3428.
16. Alexander, D. T. L., & Greer, A. L. 2002, Solid-state intermetallic phase transformations in 3XXX aluminium alloys. *Acta Materialia*, 50(10), p.p 2571–2583.
17. Li, Y. J., & Arnberg, L. 2003, Evolution of eutectic intermetallic particles in DC-cast AA3003 alloy during heating and homogenization. *Materials science and engineering: A*, 347(1–2), p.p 130–135.
18. Cavaliere, P., Campanile, G., Panella, F., & Squillace, A. 2006, Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1–3), p.p 263–270.
19. Akinlabi, E. T. 2012, Effect of shoulder size on weld properties of dissimilar metal friction stir welds. *Journal of materials engineering and performance*, 21(7), p.p 1514–1519.
20. Murr, L. E., & Pizana, C. 2007, Dynamic recrystallization: the dynamic deformation regime. *Metallurgical and materials transactions A*, 38(11), p.p 2611–2628.
21. Mężyk, J., & Kowieski, S. 2013, The application of thermal imaging method for monitoring the FSW processes. In *International Symposium on Measurement and Quality Control ISMQC*.
22. Benavides, S., Li, Y., Murr, L., Brown, D., & McClure, J. 1998, Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum.
23. Flores, O. V., Kennedy, C., Murr, L. E., Brown, D., Pappu, S., Nowak, B.

- M., & McClure, J. C. 1998, Microstructural issues in a friction-stir-welded aluminum alloy. *Scripta Materialia*, 38(5).
24. Rhodes, C. G., Mahoney, M. W., Bingel, W. H., Spurling, R. A., & Bampton, C. C. 1997, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta materialia*, 36(1).
 25. Etter, A. L., Baudin, T., Fredj, N., & Penelle, R. 2007, Recrystallization mechanisms in 5251 H14 and 5251 O aluminum friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, 445, p.p 94-99.
 26. Asadi, P., Givi, M. K. B., & Akbari, M. 2016, Simulation of dynamic recrystallization process during friction stir welding of AZ91 magnesium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), p.p 301-311.
 27. Song, M., and R. Kovacevic. 2003, "Thermal modeling of friction stir welding In a moving coordinate system and its validation." *International Journal of machine tools and manufacture* 43.6, p.p 605-615.
 28. Lee, D. G., Kim, S., Lee, S., & Lee, C. S. 2001, Effects of microstructural morphology on quasi-static and dynamic deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(2), p.p 315.
 29. Fratini, L. 2006, et al. "Material flow in FSW of AA7075-T6 butt joints: continuous dynamic recrystallization phenomena." *Journal of Engineering Materials and Technology* 128.3 p.p 428-435.
 30. Jata, KVa, and SLa Semiatin. 2000, Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. No. AFRL-ML-WP-TP-200, p.p 3-441.
 31. Park, S. H. C., Sato, Y. S., & Kokawa, H. 2003, Microstructural evolution and its effect on Hall-Petch relationship in friction stir welding of thixomolded Mg alloy AZ91D. *Journal of materials science*, 38(21), p.p 439-4383.
 32. Sato, Y. S., Urata, M., Kokawa, H., & Ikeda, K. 2003, Hall - Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 354(1-2), p.p 298-305.