



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

통계적 분석에 의한 이중마찰교반용접된
마그네슘합금의 특성 및 강도 평가



2016년 8월

부경대학교 산업대학원

기계공학과

이 해 진

공 학 석 사 학 위 논 문

통계적 분석에 의한 이중마찰교반용접된 마그네슘합금의 특성 및 강도 평가

지도교수 강 대 민

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.

2016년 8월

부경대학교 산업대학원

기계공학과

이 해 진

이해진의 공학석사 학위 논문을 인준함

2016년 06월 16일

주 심 공학박사 곽 재 섭 (인)

위 원 공학박사 박 영 환 (인)

위 원 공학박사 강 대 민 (인)

목 차

List of figures	iii
List of tables	iv
Abstract	v
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 동향	1
1.2 연구목적	7
2. 이론적 배경	9
2.1 마그네슘 합금의 특성	9
2.2 마찰교반용접의 원리	14
3. 실험	20
3.1 실험재료 및 실험장치	20
3.2 실험방법 및 조건	26

4. 결과 및 고찰	28
4.1 접합부 표면 및 인장강도 결과	28
4.2 경도 및 미세조직 결과	40
5. 결론	46
참고문헌	49
감사의 글	56



List of figures

Fig. 2.2.1 Conceptual diagram of FSW	14
Fig. 2.2.2 System process of FSW	15
Fig. 2.2.3 Manufacturing parameters of FSW process.	16
Fig. 2.2.4 Tool shoulder geometries(viewed from underneath the shoulder)	17
Fig. 3.1.1 Welding process state of affairs	20
Fig. 3.1.2 Machining Center Tooling System TNV400	21
Fig. 3.1.3 Equipment of FSW	22
Fig. 3.1.4 Dimension of the jig & fixture	23
Fig. 3.1.5 Geometry of the tool	24
Fig. 3.1.6 Tensile specimen (a) and wire cutting machine (b)	25
Fig. 4.1.1 Graphical illustration of the effect on rotation speed	37
Fig. 4.1.2 Graphical illustration of the effect on welding speed	37
Fig. 4.1.3 Graphical illustration of the effect on all factors	38
Fig. 4.1.4 Graphical illustration of the contribution on all factors	39
Fig. 4.2.1 Metallographic microscope	40
Fig. 4.2.2 Vicker's hardness a tester picture	41
Fig. 4.2.3 Metallographic microscope watch	42
Fig. 4.2.4 Hardness point measurement	43
Fig. 4.2.5 Hardness point measurement at welding area	45

List of tables

Table 3.1.1	Chemical composition of AZ31 alloy (Wt.%)	21
Table 3.1.2	Mechanical properties of AZ31 alloy	21
Table 3.1.3	Tool measurement used in experiment	23
Table 3.2.1	Design of experiment	26
Table 3.2.2	Factors and each levels for experiment	26
Table 3.2.3	Plate material	27
Table 3.2.4	Tooling system	27
Table 4.1.1	Factors with regard to Quality view of FSW(1000:100,200,300)	29
Table 4.1.2	Factors with regard to Quality view of FSW(2000:100,200,300)	30
Table 4.1.3	Factors with regard to Quality view of FSW(3000:100,200,300)	31
Table 4.1.4	Factors with regard to Quality view of test piece after tensile test	33
Table 4.1.5	Tensile Strength of FSW conditions	34
Table 4.1.6	ANOVA for tensile strength before pooling	35
Table 4.1.7	ANOVA for tensile strength after pooling	36
Table 4.1.8	Estimate of population for each factors	36
Table 4.2.1	Hardness measurement	44

Characteristics and Strength of dissimilar friction stir welding of magnesium alloy by statistical analysis

Lee, Hae Jin

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

ABSTRACT

Science and technology rapidly develops along with the current of the times. Accordingly, various methods are developed, which enable the weight reduction of products for the reduction of energy consumption together with environmental problems by the weight reduction of machine parts, diverse equipment and so on. Weight is reduced by various types of joining and assembly. However, defects in structural volume, assemblability and the like occur. Accordingly, many products finished in the type of unit with detailed strength are developed. As a result, various welding technologies come into existence. And an effort is made to develop products satisfying weight reduction and structural strength and condition requirements by utilizing a part and various machine materials. The static strength of general welding joint depends on weld metal, part that is directly exposed to heat (heat affected zone), the mechanical properties of material, and besides,

force direction, stress concentration, stress type and characteristics, and welding joint type, shape and dimension. Moreover, welding defects are classified into structural defects and dimensional defects. And structural defects include porosity, lack of penetration, slag inclusion, under cut, lack of fusion, and crack, and so on. An effect that these defects have on weld strength is highly dependent on the type. For this reason, using friction stir welding (FSW), solid state joining that welds materials through back-formation flow inside materials by using frictional heat has characteristics of less formation of blow hole or crack and less deformation due to welding than that of fusion welding such as arc, electron beam and laser welding. Together with this, it is intended to apply a magnesium alloy excellent in strength and weight reduction among machine materials. This has strength, corrosion resistance, toughness, and low-temperature properties. So, many magnesium alloys are used in various industries. And its scope of use increases as time goes on. Magnesium having a relatively low melting point [651°C] is relatively chemically stable, and is vulnerable to corrosion especially in coastal air. Magnesium alloys have properties excellent in density, thermal conductivity, conductance, specific heat, vibration damping, impact deformation, recycling, etc. On the other hand, when contacting other metal, magnesium alloys corrode earlier. So, it is necessary to be careful in contacting different kinds of metals. Many machine parts using a magnesium alloy as main material are manufactured mostly by welding. Knowledge of fatigue behavior with regard to welding material is very important. There are numerous data on the fatigue behavior

of magnesium. However, the condition is that studies on friction stir welding have made relatively very poor progress. The scope of applying the friction stir welding to industries is infinite. And friction stir welding will settle down as core technology in manufacturing process.



1. 서 론

1.1 연구 배경 및 동향

최첨단 산업사회에서 용접기술을 활용한 기술들이 나날이 활용도가 높아짐에 따라 금속 접합의 새로운 시대에 접어들게 되었다. 이러한 부분은 급격히 변화하는 최첨단 현대 산업사회에 제품의 생산성 및 품질의 질적 향상에 크나큰 기여를 하고 있다. 세계전쟁으로 인한 공업의 발전 속도는 엄청나게 상승하였으며 군수물자의 생산기술로 사용되면서 급격한 속도로 발전하였다.

급변하는 시대흐름의 유형에 따라 근래에는 제조·생산되어지는 제품의 단가 경쟁력에 직접적인 영향을 미치게 되어 이에 따라 생산성 증가의 한 부분으로 새로운 용접 방법의 기술적 개발에 많은 노력과 연구에 박차를 가하고 있다. 최근 지구의 기상이상 현상 및 다양한 환경보전적인 부분이 대두가 되고 있어 친환경적인 부분에 많은 관심을 가지고 있는 것이 사실이다. 이러한 이유에서 소량의 에너지로도 작동이 가능한 기계적인 장치나 장비, 자동차, 항공기, 드론, 선박 등 각종 운반기기의 경량화 기술적인 개발이 활발히 진행되고 있다.¹⁾

특히 드론 부분은 새롭게 시작되는 시대에 다양하게 접목이 되고 있는데 19세기에는 군사정찰 목적으로 사용되어 왔지만, 최근 상업용 및 농업용으로 많이 활용되고 있으며, 근래 들어서는 우리 개인 생활에 아주 밀접하게 접근하고 있고 어디서든지 쉽게 다루고 사용이 가능한 장치로 부상하고 있다. 이러한 부분의 제조상 무게에 대한 규제로 인해 제한적인 구조의 문제가 있어 경량화에 대한 개발이 아주 중요하게 보이고 있다.

19세기 군사정찰 목적으로 사용되었던 드론은 최근에는 농업은 물론 택배와 같은 수송, 드라마나 영화 촬영, 개인의 취미활동에 사용될 정도로 우리 생활에 밀접해 있다고 볼 수 있다. 이런 산업에 사용되는 것이 용접산업이지만 기

존의 용접은 용접부의 조직변화 등의 문제점이 있었고 마찰 교반 용접법으로 해결이 가능하다.

마찰교반용접기술이 기존의 용융용접법의 한계를 극복할 수 있는 새로운 고상접합기술로서 인식됨에 따라 IWJC(International Welding/Joining Conference)³⁾와 같은 국제회의뿐만 아니라 각 선진국의 용접관련 학술대회에서도 최고의 이슈로 부각되고 있다. 그에 따라 기초연구를 비롯한 다양한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

마찰 교반 용접법(FSW)은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발이 시작되었으며, 지금은 국제적인 (연구의 동향을 살펴보면) 유럽, 미국, 일본 등에서 TWI와 연계된 마찰교반용접에 사용되어지는 용접 공정설계, 기기 개발, 공구 개발 및 설계와 같은 전반적 기술개발이 활발히 진행 중이다.

미국의 플로리다에서 1999년 개최된 국제학회²⁾에서 처음 언급된 이후, 해마다 마찰교반용접관련 학회가 개최되고 있으며, 각개의 분야에서 많은 인원이 참가하고 있고, 인원 역시 급증하고 있는 추세이다.⁴⁻⁵⁾

일본의 경우 7000계 신칸센의 패널에 마찰교반용접 기술을 적용, 상용화하여 세계 최초로 실용화에 성공하였으며, 철도차량을 중심으로 빠르게 발전을 이루고 있다.⁶⁾ 금속재료의 경량화의 요구가 넓어짐에 따라 자동차 산업도 부품에 마찰교반용접기술을 적용하여 상업화에 성공했다. 항공우주산업에서도 항공기의 연료탱크와 제트기의 내부 패널 조립에 기존의 리벳 방식을 마찰교반용접기술로 대체, 상업적 생산에 적용했으며, 해양 조선 산업에서도 적용하고 있다.

2006년 12월 기준, 일본의 Hitachi Ltd.는 마찰교반용접 기술에 관련하여 등록된 특허 중, 유럽특허(EUPA) 196건 중 100건을, 미국특허(USPA) 415건 중 162건을, 그리고 한국 특허(KUPA) 59건 중 29건을 특허출원을 하였다. 이로써 2001년 이후에 등록된 마찰교반용접 기술의 특허 유럽, 미국, 한국의 1,059건 중 37%를 점유하고 있다.

Lee¹⁰⁾ 등은 A365합금에 대해, Liu⁹⁾ 등은 A2017-T351합금에 대해, Mahoney⁸⁾ 등은 A7075-T654합금에 대해, 마찰교반용접을 적용 후 기계적 특성을 모재와 비교하여 마찰교반용접 된 부분의 성능을 평가하였고, Moreira⁷⁾ 등은 A6061-T6와 A6082-T6에 대해 GMAW 및 마찰교반용접을 적용하여 용접부의 인장강도, 경도 및 미세구조를 모재와 비교했다.

마찰교반 용접설비를 최초 개발한 (주)원젠의 경우, 개발하여 적용한 것이 이제 약5~6년 정도 밖에 되지 않았으며, 장비가 개발되어 시장에 유통된 것도 이제 3년에 불과하다. 마찰교반용접 기술을 연구하는 연구 및 교육기관 역시 RIST, 생산기술연구원, 부산대와 성균관대, 경북대등 일부 대학을 포함하여 약 열 개 정도이다. 특히 마찰 교반 접합의 원천적인 특허문제로 국내에서 마찰 교반 접합을 사용할 경우, 영국 TWI에 (상업적 용도의) 특허를 구매해야 하는 문제가 발생한다. 이에 산업 적용 및 연구 개발이 많은 어려운 실정에 처해있다.

국내 연구개발 활동은 외국에 비해 전반적으로 미약한 수준이다. 소수의 연구기관과 소수의 교육기관에서 진행하고 있을 뿐 이어서, 기본적인 연구개발이 한정되어 있다.

하지만 점진적으로 연구 활동이 증가하고 있다. 최근 교육기관 및 연구기관에서 마찰교반용접 기술에 대한 체계적인연구 개발 필요성을 느끼고 있으며, 미국이나 일본 등 국외에서 마찰교반용접 기술 관련연구로 박사학위를 취득하고 돌아온 우수한 인재들이 해당 전문기관에 채용되면서 마찰교반용접의 산업 발전의 기대를 모으고 있다.¹¹⁾

임성곤¹⁵⁾ 등은 여러 알루미늄 합금으로 마찰교반용접을 적용한 후 접합부의 미세조직과 인장특성을 비교했고, 김홍주¹⁶⁾ 등은 이방 재료의 모재에 마찰교반용접을 적용 접합하여 접합부의 기계적 특성을 분석했다. 방한서¹⁷⁾등은 Al6061합금에 대한 마찰교반용접 접합부의 열적 거동을 분석했다. 김상식¹⁸⁾ 등도 같은 합금에 대하여 마찰교반용접 접합부의 응력 부식 균열 거동에 대해

분석하였고, 또한 마찰교반용접 조건 변화에 따른 접합부의 기계적 성능 변화에 대한 연구도 많이 수행되었다.

이원배¹²⁻¹⁴⁾ 등은 마찰교반용접을 적용한 마그네슘 합금의 접합에 대한 연구를 하였다.

박희상¹⁹⁾, 장석기²⁰⁾ 등은 용접 공구의 형상에 따른 이송 및 회전 속도가 접합부의 기계적 특성과 피로 성능에 미치는 영향을 분석하였고, 장석기²¹⁾ 등은 용접 공구의 지름 및 길이, 솔더부의 지름을 변경하면서 AI합금에 대한 마찰교반용접을 수행하였다. 또한 용접부의 인장 강도를 측정하여 최대인장 강도를 만드는 마찰교반용접의 조건을 찾아내었다. 백승엽²²⁾ 등은 철도차량 차체 구조 제작에 많이 사용되는 이음형태 3가지에 대하여 실험계획법을 이용한 피로시험을 실시하여 피로 성능에 가장 좋은 이음형태를 찾아냈다. 원시태²³⁾ 등은 마찰교반 용접된 철도 차량용 A6005 압출재의 기계적 성능 향상을 위한 최적 공법 설계에 대한 연구를 하였다. 박재철²⁴⁾ 등은 해수환경에서의 마찰교반 용접된 알루미늄합금의 부식에 대한 특성 비교에 관한 연구를 하는 등 또한 최원두²⁵⁾ 등은 철도차량 설계를 위한 Al6005 알루미늄 판재의 마찰교반 용접과 MIG 용접부의 피로 특성 비교 연구를 하였고, 구병춘²⁶⁾ 등은 마찰교반용접 열원의 유한요소 모델링에 관한 연구와 Al6061-T6 판재의 마찰교반용접 3D 유한요소 해석에 관한 연구를 하였다. 최근 마찰교반용접 기술의 연구가 활발하게 진행되고 있다.²⁷⁾

산업이 급격하게 발전하는 만큼 경량화 및 강도에 대한 관심이 높아져 경량 금속 중 가장 낮은 밀도($1.738 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)를 가지는 마그네슘으로 관심이 집중되고 있다.

마그네슘은 밀도(Density)가 1.74로 알루미늄 합금의 2/3, 티타늄 합금의 1/3, 철의 1/4에 해당하며 상용 금속 재료 중에서 가장 가벼운 재료이다. 따라서 마그네슘 합금을 이용하여 제품을 생산할 경우 제품 생산에 필요한 에너지를 획기적으로 절감할 수 있다.

국외 수송기계의 마그네슘합금의 적용 현황은 북미의 경우 1990년 이후 (북미지역) 자동차의 마그네슘합금 부품 적용량이 약1.2kg/1대에서 2002년 후반에는 약 4kg/1대로 연평균 20% 이상씩 증가되었고, 유럽은 1930년대부터 자동차에 마그네슘 합금을 적용하기 시작하였으며, 자동차 1대당 적용하는 마그네슘 합금의 양은 약9~20kg로 북미에 이어 두 번째로 마그네슘 합금의 수요량이 많은 지역이다.³⁴⁻³⁵⁾

중국은 31,450억 톤에 달하는 세계 1위의 마그네사이트 보유국으로서 2000년에 190,000톤의 순수 마그네슘을 생산하였고 현재 100여 개의 마그네슘 생산업체를 보유하고 있다.³⁶⁾

일본에서의 마그네슘 수요는 지난 1994년 이후 꾸준히 증가하고, 2000년 사용량은 약 32,000톤에 이르고 있다. 하지만 아직까지는 구조용 부품으로 적용되는 양은 15% 이하로 비교적 적은 편이며 약 65%가 알루미늄 합금첨가용으로 사용되고 있다. 2000년까지는 자동차에 비해 전자제품의 비율이 더 많으며, 최근 사용량이 지속적으로 확대되고 있다.

반면 국내 마그네슘 산업은 1990년대 초에 태동하여 일부 부품에 마그네슘 합금이 적용되기 시작하였으나, 본격적인 적용이 시작된 것은 1995년 이후라 할 수 있다.

미국 및 유럽의 마그네슘 부품 수요의 증가 추세에 힘입어 국내에서도 최근 수년 동안 시장규모가 급격히 확대되는 추세에 있으며 그에 따라 다이캐스팅 기계의 도입 및 부품 생산량도 점차적으로 증가하고 있다. 그러나 현재, 자동차 산업의 부품용 소재로서 마그네슘에 대한 완성차 업계의 인지도가 지금까지는 낮았기 때문에 차량 부품으로 적용된 예는 많지 않으며 현재 스티어링 휠, 에어백 하우징, 키록 하우징 등에 제한적으로 적용되고 있다.

제한적일 수밖에 없는 용접성의 성질을 살펴보면 AI의 함량이 높으면 용접은 낮아지고 고액 공존영역이 넓어지기 때문에 AZ 91, AM 50 및 AM 60등 주조재의 경우 용접시 고열에 의한 균열로 인하여 용접 강도가 우수하지 못한

다. 그러나 AZ 31 판재의 경우 TIG 아르곤 용접 후의 용접부위의 강도가 모재의 강도의 90~95%에 이를 정도로 용접성이 아주 우수하다. 용접성은 용접 봉의 선정, 모재의 예열 상태에 종속적이며, 용접이외의 다른 접합 방법으로는 마찰, 압접, 브레이징 등이 있으나 학문적으로 연구는 되고 있지만 실제 사례는 보고되지 않고 있다.

이러한 부분에 이용한 여러 마찰 교반 용접 관련 산업은 국내 국외에 있어 현재 크게 증가추세에 있으며, 고부가가치의 산업으로 연계될 수 있는 귀중한 핵심기술 중의 하나이다. 하지만 국내의 경우 그 기술 개발이 다른 선진 국가와 비추어 매우 미약한 실정으로 이러한 기술 개발은 정부 주도 차원의 육성하여 국내 산업계가 해외에서도 경쟁력을 갖출 수 있게 적극적이며 많은 지원이 절실히 필요하다.

이에 연구배경으로 마찰교반용접을 적용한 마그네슘 합금의 접합에 대한 배경과 동향을 서술하려 한다.

1.2 연구 목적

현재 여러 연구 중 다양한 재료의 요건에 따라 마찰교반용접을 진행시 용접의 조건적인 부분에서 공구의 형태에 따른 이송속도의 변화 와 회전속도를 변화 시켰을 때 해당되어지는 두 재료간의 접합부의 변화되어지는 특성적인 부분에 대한 논리적인 상호관계에 대한 연구가 아주 미약한 상태이다.

기계적인 특성적인 성향에 미치는 마찰교반용접에 대한 여러 용접변수 부분이 표현되어 있으나 세부적인 내용의 연관관계에 대한 분석은 잘 이루어져 있지 않고 있다.

마찰교반용접의 연구에 사용되는 재료 중에 알루미늄 소재에 대한 부분은 많이 사용되어지고 있다. 이는 항공기나 운송수단의 장비 등의 적용에 있어 경량화에 대한 연구가 많아지고 있기 때문이며 그 내용에 있어 본다면 최저의 에너지원으로 최대치의 출력값을 표현하기 위한 연구의 한 부분으로 보인다. 최근에는 드론산업이 부각되면서 제조되어지는 부품의 경량화에 대한 연구가 더 활발해지고 있으며 강도에 대한 내용이 대두가 되어 지는데 이러한 연유로 마찰교반용접에 마그네슘 합금의 소재 적용에 대한 것은 그 의미가 크다고 본다. 하지만 마그네슘 합금의 이종간 마찰교반용접에 대한 연구가 너무나 없어 적용사례가 아직은 많지가 않다.

또한 용접 장치 사용 부분에 있어 로열티 문제로 인한 실험시 환경이 다소 제제가 되는 부분이 너무 많아 이로 인해 많은 실험이 진행되지 않고 있는 상황이다. 다음의 유의사항은 마찰교반용접을 함에 있어 필요한 사항이다.

공구의 교반작용으로 인한 금속재료의 유동성이 생성이 되기 때문에 공구의 회전속도 와 이송속도 및 삽입의 깊이와 공구의 각도 및 형상에 따른 여러 가지 형태의 용접부가 발생한다. 영역별 나누어 본다면 마찰교반용접에 생성된 용접부는 우선은 공구에 의한 교반작용으로 소성유동이 발생한 SZ(stir zone)그리고 아무 영향을 받지 아니한 모재의 영역, 공구와의 마찰에 의한 열의 영향

을 받는 HAZ(Heat affected zone) 그리고 이러한 부분에 SZ와 HAZ 관계에 발생되어지는 소성변형 및 열영향으로 인해 형성되어지는 TMAZ(Thermomechanically affected zone) 으로 4가지의 영역으로 분류 되어진다.

용접결함이 거의 없는 것으로 알려져 있는 마찰교반용접은 용접조건적인 부와 재료에 따른 최대의 적절치 못한 값이 사용된다면 용접결함이 발생하게 된다.

마찰교반용접에서 볼 수 있는 전형적인 용접시 발생되어지는 결함으로는 산화물의 혼입, 용입부족(kissing bond), 경로의 결함, 기공과 과도한 플래쉬(flash) 생성으로 인한 결함 등이 있다.

이와 같은 결함을 방지하기 위하여 각각의 재료에 최적의 용접변수를 사용하여 작업하여야 한다.

현재 본 논문에서는 AZ31/AZ61 마그네슘합금의 이중 간의 마찰교반용접시 사용되어지는 조건 중 공구의 기본 이송 및 회전속도에 요인을 두고 용접 특성상 해당되는 작업시 발생되는 용접강도의 영향을 확인하기 위해 이원배치법을 사용한 실험을 하여 통계적 분산 방법을 활용한 분산분석을 각각의 용접변수에 분석을 시행하였다. 또한 이러한 부분에 있어 같은 조건상의 용접으로 작업되어진 실험결과 값과의 비교 분석하여 마찰교반용접시 적용되는 공정상 도출되는 실험결과치에 대한 유형에 대한 방향성을 파악하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 마그네슘 합금의 특성

마그네슘은 차폐성 및 전자파의 흡수가 여러 금속 중에서 비교 해보면 아주 높은 편이다. 그리고 진동의 흡수력이 높은 편으로 외부의 힘이 계속적으로 사용되는 부분에 적용되어 기계적으로 변형 및 파괴를 저해 할 수 있다.

그 외에도 비강도가 높고 절삭 가공성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 그러나 그 뛰어난 성능에도 마그네슘은 많은 분야에서 사용되고 있지 못한 실정이다. 그 이유 중 하나가 바로 마그네슘이 조밀육방 격자구조(HCP)의 구조적 형태를 보이기 때문인 것이다. 이로 인해 상온에서의 성형성이 많이 떨어지는 실정이다.²⁸⁾

마그네슘 합금 판재는 인장과 압축 시 상이한 초기 항복 응력과 항복 이후 응력 비대칭 거동을 보이는 비대칭성의 거동을 보인다. 또한 상온에서 다른 금속 판재와 다르게 슬립, 쌍정 (twin), 역쌍정(untwin)과 같은 특이 거동이 나타나고, 판재의 이방성도 다른 재료에 비해서 상당히 크며 하중 제하 시 스프링백도 크게 발생한다. 하지만 어느 적정 온도 이상에서는 이러한 특이거동이 사라지고 다른 금속 재료들과 유사한 거동을 보인다.

마그네슘 합금의 온도 관련하여 상온에서의 인장은 슬립모드에 의한 변형이 주된 변형기구로 작용하기 때문에 철강이나 알루미늄 소재와 같은 경화거동을 보인다. 반면 압축에서는 쌍정 모드의 변형으로 아래로 볼록한 형태를 가지며 변형이 지속되면 응력 변화가 급격하게 상승하는 지점이 발생하는데 이는 초기 압축 시 활성화 되지 못했던 슬립계가 쌍정에 의한 변형을 지속적으로 받으면서 응력이 급격하게 상승하는 것이다.

그리고 재 인장에서는 역쌍정 모드의 변형으로 S자 형태의 경화곡선을 보인다

다. 따라서 인장과 압축의 항복점이 다른 비대칭 거동을 보이며, 한번 항복점 이상의 인장 하중을 가한 후 다시 압축 하 중을 가하여 항복점이 떨어지는 바우싱거 효과(bauschinger effect)도 나타난다.

그리고 온간에서는 임계전단응력이 감소하여 상온에서 활성화 되 지 않았던 슬립계가 활성화 되면서 쌍정과 역쌍정 변형에 의한 특이 거동이 사라지게 되고 바우싱거 효과도 상온에 비해 작게 나타나게 된다.²⁹⁾

마그네슘 의 비중은 1.738g/cm^3 이며 알루미늄에 비해 약 2/3배, 티타늄 철에 약 1/4배에 해당하는 비중을 가지고 있으며 가벼우면서도 기계적 특성이 우수하다. 특히 비강도가 매우 우수하다. 현재 사용되고 있는 마그네슘 합금 응용 부품은 굽힘 응력을 대부분 받고 있다.

따라서 굽힘응력에 대한 저항성이 설계에 중요한 요인으로 작용한다. 특히, 굽힘 하중을 받는 패널이나 빔 설계 시에 최소두께 와 하중은 ‘물질 성능 지수’ 의 개념으로 계산 하며, 이를 철강소재와 비교하였을 때의 동등 굽힘 탄성률로 변환하면 $WMg /Ws =(dMg /ds) \times (Es /EMg)^{1/3}$ 이렇게 나타낼 수 있다.³⁰⁾

여기서 굽힘 탄성률이란 철강과 동등한 굽힘 탄성률을 나타낼 수 있는 마그네슘 합금 의 무게를 뜻한다. 마그네슘 합금 AZ91의 경우 값은 0.39로서 철강과 동일한 굽힘 탄성률을 나타내는 조건에서 철강 대비 61%(1-0.39)의 중량감소 효과 가 있음을 표시한다.

플라스틱과 알루미늄의 철강에 대한 굽힘 탄성률을 각각 계산하면 0.65, 0.50가 된다. 따라서 마그네슘 합금의 탄성률/밀도 값은 알루미늄이 나 철강과 유사하지만, 부품 설계 시 사용되는 지수인 굽힘 탄성률을 비교해 보면, 알루미늄 합금이나 또는 플라스틱에 비해 중량 감소 효과가 아주 크다는 것을 알 수 있다.³¹⁾

Mg 합금의 성분비율은 대개 96 Mg, 4 Al이며, 이 계의 합금의 비중은 1.77, 인장강도 27kg/mm^2 , 연신율 16%(단, 주물은 인장강도 17kg/mm^2 , 연신율 9%)이다.

기타 94-6, 92-8, 90-10, 88-12 등 여러 Mg-Al 합금도 있다. Zn은 Al과는 거의 같은 효과가 있다. Cu는 합금을 부드럽게 하며 또 조직을 약하게 한다. 소량 (0.3~0.8)의 Mn은 합금의 내식성을 개선시키는 역할을 한다. Cd는 사형 주물 및 압출합금의 물리적 성질을 좋게 한다. Mg 합금의 주조에서 가장 곤란한 것은 주형에 탕이 들어갈 때 Mg이 주물사와 화학 작용을 하는 것이다.

그러나 이것을 능숙히 이용하여 내식성 피막을 만들어지게 할 수가 있다. 즉 규플르오르화 암모니아 또는 플르오르화 암모니아를 주물사에 가하면 표면에 플르오르화 마그네슘의 내식 피막이 되기 때문이다. 안정 합금(스타비라이저 합금)은 Mg에 Ni, 모넬메탈, Zn, Cu, Al 등을 첨가한 합금을 말하며, 이것은 비철합금의 탈산제로서 사용된다. Mg을 절삭할 때, 나오는 미세 분말에는 착화될 위험이 있어 주의하여야 한다.³²⁾

마그네슘을 용해할 때의 유의해야 할 사항으로 본다면 첫 번째 산화방지로 마그네슘합금은 용융상태에서 산소와 활발히 반응하여 공기중에서 연소하기 때문에 공기와 접촉을 방지하기 위하여 용제(flux)를 사용한다. 용제는 마그네슘보다 용점이 훨씬 낮고 표면장력이 크기 때문에 용탕표면에 막을 형성하여 연소를 방지한다. 최근에는 SF₆ 가스를 사용하여 종래의 염화물계 용제 사용으로 인한 도가니와 노의 침식 및 부식문제를 해결하여 품질을 향상시킬 수 있게 되었다. 두 번째는 온도조절 및 측정인데 마그네슘합금의 용해, 주조시 온도조절은 주조품의 품질에 큰 영향을 미친다. 마그네슘합금은 고온에서는 수소와 강한 반응 때문에 수소가스가 용탕중에 많이 존재하게 되며, SO₂와 같은 플락스는 온도가 700℃를 초과하게 되면 보호막효과가 저하되어 연소될 수 있다. 마그네슘합금의 온도측정은 강관으로 보호관을 씌운 열전대를 용탕중에 장입하여 측정한다.

그리고 세 번째에는 탈가스로 마그네슘합금의 용해와 주조과정에서 많은 양이 수소가스가 함유된다. 이들 수소가스는 주조시 혼입되면 마그네슘합금의 내식성과 기계적 성질을 저하시키는 원인으로 작용하기 때문에 탈가스 처리하

여 최소화하여야 한다. 탈가스방법으로 Ca와 헥사클로로에탄을 포스포라이저를 이용하여 용탕중에 장입한 후 교반하여 탈가스하는 방법이 있으나, 최근에는 흑연탈기기를 이용하여 불활성가스(He, Ar) 또는 활성가스(N)를 이용하는 방법이 있다. 네 번째로 정련이다. 용해, 주조 중 발생한 스크랩과 기공 및 절삭에서 나오는 스크랩 표면의 산화물과 다이 윤활유, 모래 등 불순물을 제거하여 재활용하기 위하여 정련한다. 이러한 불순물이 용탕내에 혼입되면 용탕의 점도를 증가시켜 주조시 용탕의 유동도를 감소시켜 주조특성을 저하시키며 용탕표면 산화를 더욱 빠르게 하여 찌꺼기와 같은 형태로 도가니 바닥에 고이게 한다.

그러므로 이와 같은 불순물은 용제를 이용하여 완전히 제거하여 정련한다. 스크랩의 정련은 한쪽 용해로에서 용해하여 저급 용제로 1차 정련한 뒤 다른 용기에 옮겨 깨끗한 용제로 다시 정련하는 연속처리방식을 많이 사용한다.

마지막으로 다섯째 결정립 미세화인데 그 내용으로는 주조조직의 미세화와 기계적 성질의 향상을 위하여 제3원소 첨가, 과열, 교반, 염소철 처리, 탄산칼슘에 의한 방법 등을 사용하여 결정립 미세화 처리를 한다. 제3원소는 Al, Ar, Zn, Cs, Ca등이 있으나 이중 Zr이 가장 효과적이고 접종제에 의한 미세화는 카바이드가 함유된 가스나 고체를 730~840℃ 사이에서 용탕속에 첨가하여 5~8분간 유지하면서 기포를 발생시킨다. 기계식 교반기를 사용하는 방법은 730~840℃에서 교반기를 용탕 깊숙이 장입하여 미세화 시키는 방법이다. 또한 과열에 의한 미세화는 용탕을 용점보다 150~200℃ 정도 높게 하여 15분간 유지한 후 주입온도까지 낮춘다. 그러나 이 방법은 과열로 인한 연료소비량의 증가, 도가니의 마모와 합금산화도의 증대 등의 단점이 있다.

최근에는 전자장을 이용하여 용탕을 교반시켜 결정화하는 방법으로 결정립의 크기를 미세화하기도 하지만 장치설계 및 제작시의 비용과 많은 전력이 소모되므로 많이 활용되지는 못하는 실정이다.

마그네슘합금은 종류에 따라서 다소 차이가 있으나, 650~680℃의 저온에서 용해가 가능하기 때문에 재생에 필요한 에너지 소모가 적다. 특히, 최초의 마그네슘 잉곳 제조 시 필요한 에너지의 1/4정도만으로도 재생이 가능하므로 에너지 절약효과가 매우 높다. 현장의 생산 공장에서 회수된 마그네슘은 재생 용해해서 불순물을 제거하고, 성분을 환원 가감하여 새로운 합금과 거의 동등한 상태에서 재사용이 가능하다.

또한 마그네슘합금의 치수안정성은 아주 우수하며, 수축률이 일정하고 그 정도도 예측이 쉽다. 주조된 마그네슘합금 부품은 금형에서 제거할 때에 뒤틀림이 적고 잔류응력도 최소 수준이므로 풀림처리 등이 불필요하다.

마그네슘합금은 150℃에서 100시간을 가열해도 변형량이 6X10정도이고 100℃에서는 무시해도 되는 치수안정성을 가지고 있다. 마그네슘합금은 진동 감쇠능이 우수하여 에너지의 흡수율이 높고, 소음 및 진동을 쉽게 감소시키는 재료이므로 전자부품이나 최근 자동차 소음감쇄를 위해 클러치 하우징이나 트랜스미션 케이스 등으로 사용되고 있다. 금속 중 진동감쇠능이 우수한 대표적인 재료로서는 주철, Mn-Cu합금이 있다.

그리고 마그네슘합금은 구조재로서 많은 장점을 가지고 있는 반면 다른 금속에 비해 활성도가 높아 용해 시 산소와 접촉할 경우 발화되거나 쉽게 산화되는 단점이 있다. 따라서 마그네슘합금의 용해 시에는 용제를 사용하거나 용탕표면에 CO₂ 및 SF₆ 혼합가스를 사용하여 공기와 차단시킴으로써 용탕의 산화를 방지한다.³³⁾

2.2 마찰교반용접의 원리

마찰교반용접의 원리는 두 개의 소재와 소재를 접촉시켜 고정을 시키고 이 접촉부 직각방향 면에서의 이음이 있는 부분에 소재보다 강한 재질을 갖는 비소모공구의 마찰을 일정압력으로 회전운동과 이송운동주어 이에 마찰열을 동반한 마찰이 존재하게 되며 이는 공구의 부위 중 핀과 솔더 부분이 해당 소재의 상대적인 운동으로 인해 마찰열에 의한 고상 용접부분이 생성하게 된다.

용융용접으로 인한 일반적인 문제 사항으로 용접 후 일어나는 크랙 및 기공의 생성과 용융상태에서 응고상태로 변화하면서 생성되는 재료내부의 열 균형과 외부표면에 발생되어지는 열 변형으로 잔류응력 등의 용접변형이 일어나는 문제점을 해소 할 수 있다. Fig. 2.2.1 마찰교반용접시 보이는 각부분에 대한 내용을 보이고 있다.

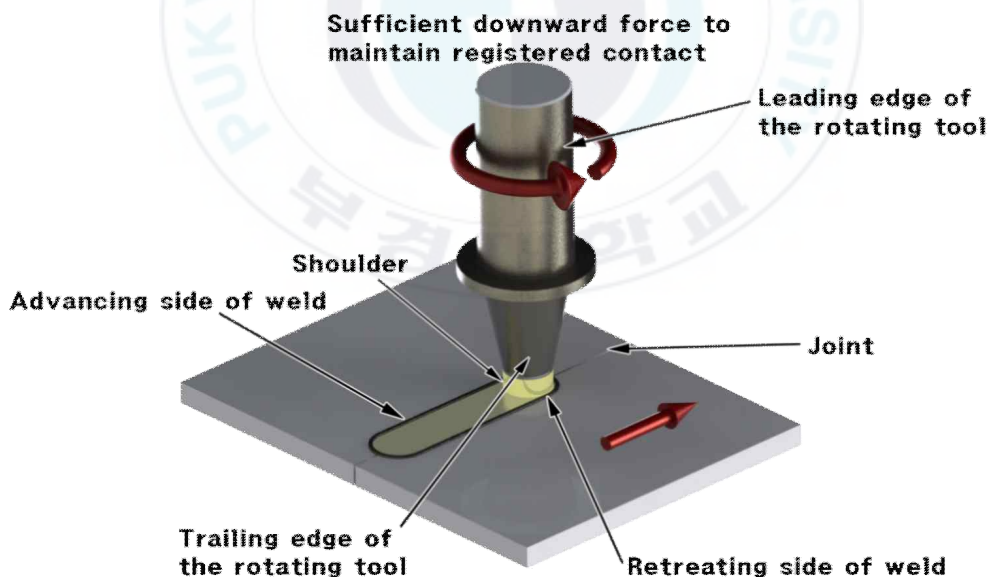


Fig. 2.2.1 Conceptual diagram of FSW

Fig. 2.2.2 마찰교반용접시 보이는 공정을 나열하여 보이고 있다.

공정상 마찰교반용접시 순서를 나누어 본다면 첫째, 마찰교반용접을 하기위해 두 모재의 고정 및 공구의 회전속도를 어떻게 할지 몇가지를 두고 결정 후 회전을 시킨다. 둘째, 회전되고 있는 공구의 핀부를 마찰교반용접 되어질 용접부에 일정압력으로 가하여 마찰열을 생성시킨다. 셋째, 모재의 연화를 위한 공구의 솔더를 모재에 접촉가열부의 영역을 넓게 가져간다. 넷째, 용접이되어질 부분에 따라 모재를 이송을 하던지 공구의 이송을 통하여 가열된 모재의 너깃부(Nugget zone)를 생성됨으로 용접이 이루어진다.^{37-40,41)}



Fig. 2.2.2 System process of FSW

Fig. 2.2.3는 마찰교반용접 공정의 용접 변수를 보여주는데, 마찰교반용접시 용접부분의 질적인 영향은 용접변수에서 크게 좌우된다. 이러한 부분에 있어 공구의 형상적인 부분과 용접의 조건으로 나누어 진다. 형상에 따른 공구의 부위를 본다면 핀의 지름과 기울기 그리고 깊이 솔더의 지름 등으로 있으며 용접조건에 있어 공구의 회전속도와 이송속도 그리고 공구의 기울기와 모재로 가해질 압력과 동반되어질 마찰시 삽입되는 깊이 등이 있다.

이러한 부분에 있어 품질에 가장 크게 영향력을 주는 것은 공구의 이송속도와 회전속도이다. ⁴²⁻⁴³⁾ 산업현장에서 생산조건으로 공구의 회전속도 및 이송속도를 생산량을 고려하여 최적의 상태를 가져가려 하는데 이때 공구의 회전으로 핀 주변에 연하시킨 재질이 혼합됨과 공구의 이송으로 혼합되어진 재질을 핀의 진행방향의 시작에서 뒤쪽으로 이송하는 부분이 된다. 공구의 회전속도가 높을수록 마찰열은 상승하게 되며 이때 생성되는 재질의 연화가 빠르게 되면서 조직의 치밀성이 생성되는 접합부가 생성된다. 생산적인 측면을 고려하여 본다면 보다 많은 생산성을 향상을 위해 공구의 이송속도를 적용하여야 한다. 하지만 이러한 부분은 너무빠른 공구의 이송에 따라 혼합되어질 재질이 공구의 진행방향 시작에서 뒤로 연속적으로 이송이 안되며 이로 인해 용접성이 현저히 좋지 못할 것이다.

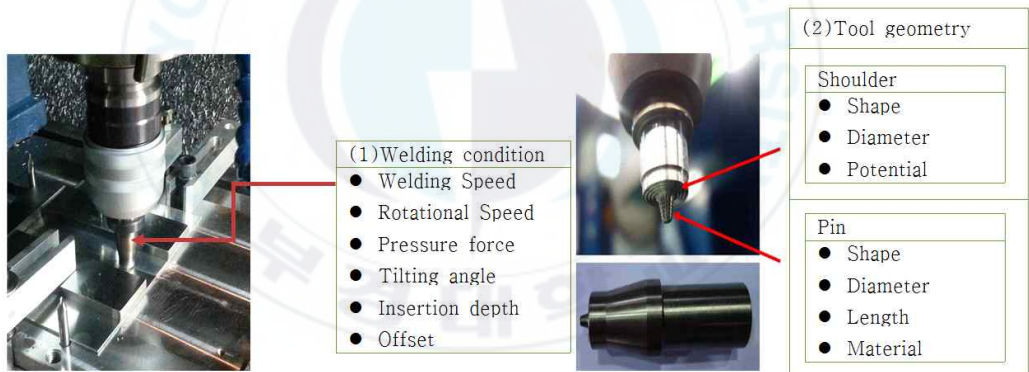


Fig. 2.2.3 Manufacturing parameters of FSW process

마찰교반용접에 사용되어지는 일반적인 공구를 살펴본다면 솔더부와 핀부로 구성되며 대체적으로 핀은 솔더보다 작은 지름의 크기형태로 나타나며 특수형태의 가공되어진 핀 또는 프로브 부로 되어 있다.

Fig. 2.2.4와 같은 핀과 프로브 솔더 종류가 있다. 핀 부분에서 우선 일정압력으로 모재와의 마찰하게 되며 또한 공구의 솔더부와 모재간의 마찰로 인

해 많은 양의 마찰열의 발생되며 연화된 재료방출을 방지 해준다. 마찰교반용 접 공구의 이송경로를 따라 고체 상태 용접부 형성은 재료연화와 공구의 진행 방향 뒤에서 관계형성적인 이동으로 인해 발생하는 것이다. 하지만 이러한 형성이 되기 위해서는 모재의 접촉부 사이의 간격이 밀접하게 맞아야 있어야 한다. 특히 핀이 모재와 마찰을 발생하여 공구의 진행방향으로 이동할 때 더욱이 고정이 잘 되도록 한다.

마찰교반용접에 사용되는 공구의 핀부는 공구의 솔더 하부에 위치하여 길이 변형을 줄 수 있으며 맞대기 용접시 모재 두께의 비율의 80~100%의 값을 갖는다. 마찰교반용접시 핀부의 마찰압력으로 인한 열발생이 핀부위 영역에 재료에만 나타나지만 솔더부위가 모재표면에 마찰되기 시작하면서 높은 추가적인 마찰열이 용접부 경로를 따라 더 하여진다. 적절치 못한 형상으로 쇼울더 형상이 된다면 연화된 재료가 제대로 이송되지 못하여 된다. 그러므로 적절한 형상의 솔더로 연화된 재료의 요구된 위치에서 빠져나가는 것을 막는다.

이와 같은 내용으로 인하여 마찰교반용접에 사용되는 공구는 고온에서의 내마멸성이 우수하여야 하며 또한 고온상태에서 정적 , 동적인 성질이 우수한 재료를 적용하여 제작된다. 더욱이 중요하게 관리 되는 부분은 핀 부 주위의 고온전단강도가 아주 중요한 인자이다.⁴⁴⁾

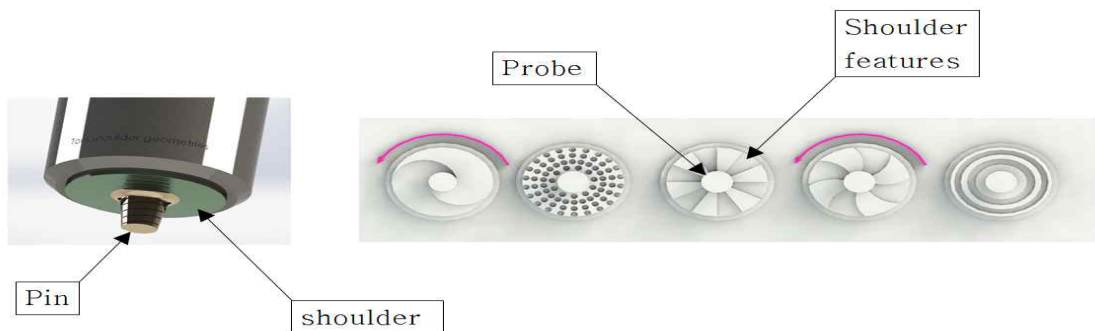


Fig. 2.2.4 Tool shoulder geometries (viewed from underneath the shoulder)

용접의 접합부에 단면의 매크로조직을 4가지 부분으로 TWI(The Welding Institute)용접연구소에서는 분류하여 정의 하였다.^{1,3,45)} AL 합금에서 용접부는 명확한 정 원형의 내부 형상을 지니는 게 특징이고 동적 부분에서는 재결정의 형태이며 이영역이 용접영역의 중심에 발달된 교반부(SZ, Stir Zone)가 존재하는 부분이다.

마찰교반용접시 교반영역의 형상은 작업되어지는 재료 및 공구의 공정조건에 따라 많은 변화가 많으며, 일반적인 형상이 아닌 다양한 형태를 갖는 교반부의 생성물들이 용접시 진행경로 표면에 자주 나타나며 이는 공구의 솔더의 끝부 까지 갈 수 있다. 교반부의 영역은 공구의 핀의 지름보다도 조금 크며 솔더의 지름보다는 작은 것이 일반적이다.

마찰교반용접시 사용되어지는 핀의 형태는 아직까지는 최적에 상태의 형상에 대하여 나타난 바는 없지만 다양한 시도를 통해 변화를 해가는 과정에서 공구의 정형화에 대한 연구는 진행되어가고 있으며 특히 고온에서 재료의 조건 중 정적인 부분과 동적인 부분 그리고 내마모성에 대한 성질이 우수하게 적용되어 제조되어야 한다. 그리고 핀 부분 영역의 고온전단강도가 특히 중요하게 가미가 되어 작업조건에 맞춘 설계가 진행되고 있다.^{10,46,47)}

지금으로써는 마찰교반용접시 일어나는 교반접합부에 대한 형상에 명확한 정의가 없으며 이러한 부분은 모재의 고온에서 강도 및 공구의 형상에 따른 설계 및 용접의 조건등과 경우의 수에 작용되는 여러 인자들에 의해 나타난다.

교반부 외적인 부분에서의 매크로조직은 아주 특이한 형상으로 표현되며 교반부 주변에 접한 소재는 소성변형율이 아주 높으며 변화되는 결정의 조직의 90°를 넘어설 정도까지 회전할 수 있는 부분이 발생한다.

이러한 부분은 마찰교반용접 고유의 기계적인 열영향부(TMAZ, Thermo Mechanical Affect Zone) 라 칭하며 소성변형에 의한 재결정이 발생하는 부분이다.

그 외 마찰로 인한 용접부의 변형의 영향은 주지 않지만 접합부에 열적인 부분이 성질을 미치는 열영향부(HAZ, Heat affect zone)도 있다.

재료의 연화되는 것은 공구의 회전속도에 달려 있으며 이는 마찰열에 의해 나타난다. 이것이 재질을 혼합시키는데 재질의 연화가 빠르게 진해됨에 용접부의 변형이 커지며 이러한 연유로 용접되는 주변에 영향을 미치게 된다.

용접의 조건이 맞지 아니하면 기공의 발생 및 용접결함 등이 나타날 가능성이 높으므로 용접에 속도에 따른 공구의 너무 빠르지 않게 진행을 시켜야만 한다. 그렇지 못할 경우에는 재질의 연화에서 혼합이 된 재질이 공구의 진행 방향 앞에서 뒤쪽으로 연결되지 못하고 남게 되어버린다.⁴⁸⁾

기계적 열적 변형이 많은 영향을 받지 않는 부분은 가장 외각의 모재부(PM, Parent Metal) 부분으로 나타난다. 이러한 부분을 4가지로 표현하였고 용접시 사용되는 재료에 따라 다소 차이가 난다.

3. 실험

3.1 실험재료 및 실험장치

본 논문에 사용되는 실험재료는 경량 합금 중 마그네슘 합금 AZ31와 AZ61를 사용하였으며 두께는 2 mm의 판재를 Fig. 3.1.1 과 같이 150mm × 100mm로 절단 후 맞대기 용접을 수행하였다. 마그네슘 합금은 Mg-Al-Zn 계와 Mg-Zn-Zr 계의 두 종류로 나눌 수 있다. 본 실험에서 사용된 재료는 마그네슘 합금 Mg-Al-Zn 계인 AZ31 AZ61 압출재로 Al을 3%~6%, Zn을 1% 함유한다. Al 은 기계적 성질을 개선하는 효과가 있으며 Zn 은 내식성 및 강도를 개선하는 효과가 있다. 실험에 사용된 AZ31와 AZ61 압출재는 150mm × 100mm × 2mm 로 가공되어 맞대기 방식으로 접합되었으며 화학조성 및 기계적 특성을 Table 3.1.1과 3.1.2에 나타내었다.

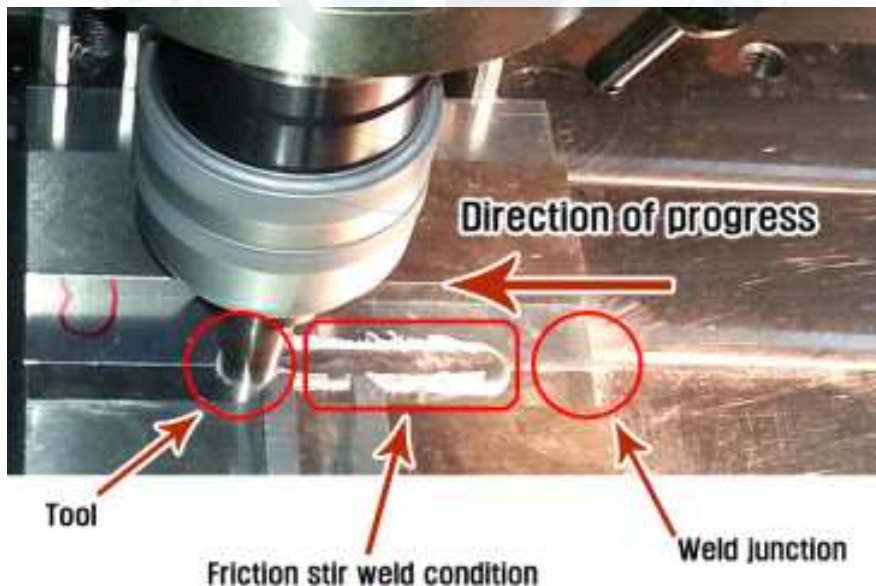


Fig. 3.1.1 Welding process state of affairs

Table 3.1.1 Chemical composition of AZ31 AZ61 alloy (Wt.%)

Alloys	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Si	Cu	Mg
AZ31	3.10	1.07	0.30	0.005	<0.001	<0.005	<0.005	bal.
AZ61	5.8~7.2	0.4~1.5	0.15~0.5	<0.005	<0.005	<0.1	<0.05	bal.

Table 3.1.2 Mechanical properties of AZ31 alloy

Material	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Reduction of area ψ (%)	Elongation ϵ (%)	Hardness HV
AZ31	274	182	29.4	16.2	55
AZ61	314	210	25	13	60

실험에서는 Fig 3.1.2 는 MCT(Machining Center Tooling System)TNV400의 전체 장비의 모습이며 이를 이용하여 마찰교반용접을 시행하며, Fig 3.1.3 은 장비의 구동시 작업이 이루어질 방향 및 각부에 대한 명칭을 설명한 것이 보여지고 있다.



Fig. 3.1.2 Machining Center Tooling System TNV400

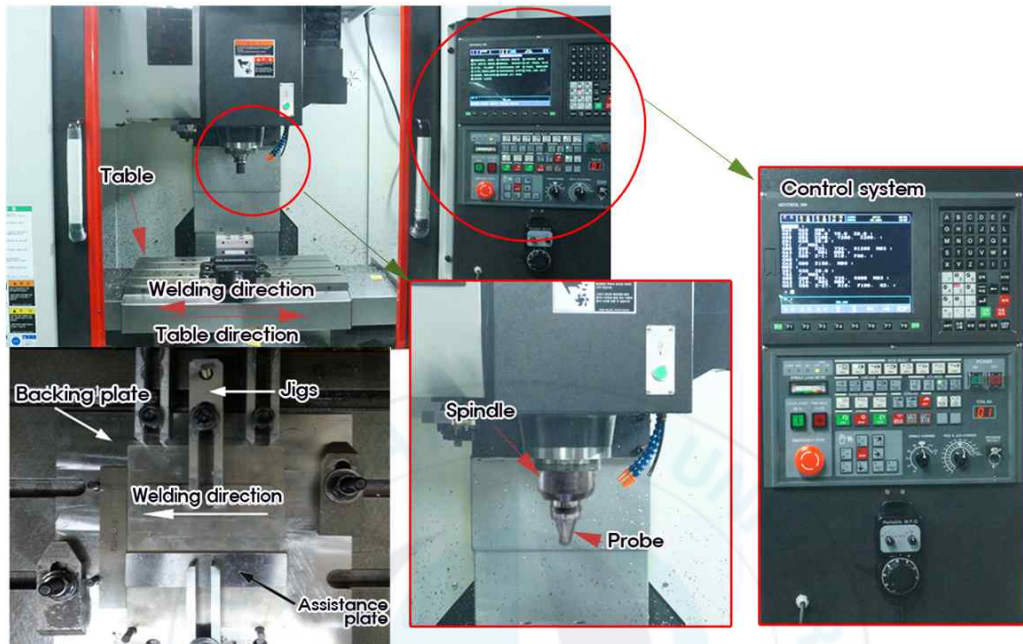


Fig. 3.1.3 Equipment of FSW

Fig 3.1.4 과 같이 MCT에서 마찰교반용접을 적용하기 위해 새로운 지그를 적용하여 두께 2mm 판재를 고정하였다.

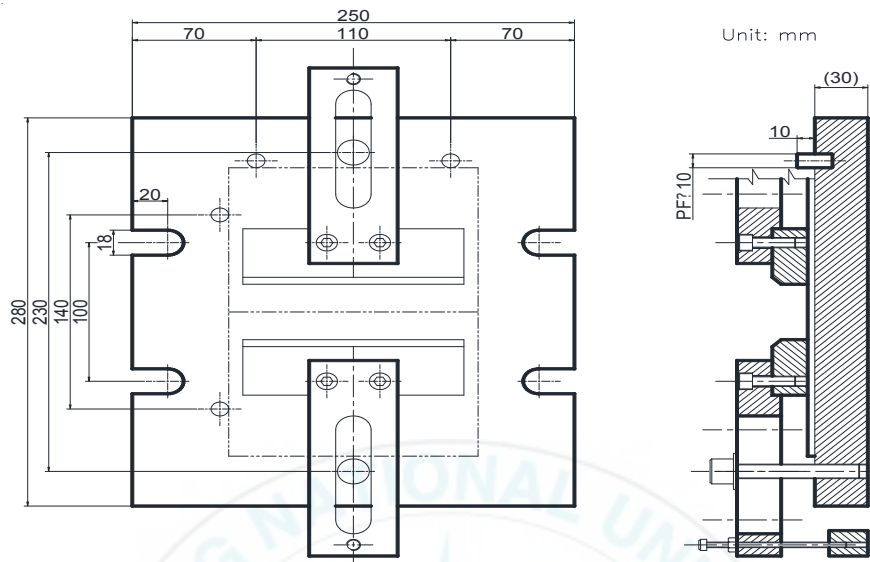


Fig. 3.1.4 Dimension of the jig & fixture

얇은 판재를 고정하기 위하여 클램핑시 사용된 새로 제작된 지그에 고정 접촉부에 필요한 플레이트가 필요하였으며 이곳에 사용된 판재는 SKD61 소재를 사용하여 고정을 하였다.

그리고 Fig. 3.1.5와 같이 적용이 되어질 공구를 준비하였다. Table 3.1.3은 공구의 제원을 나타내었다.

Table 3.1.3 Tool measurement used in experiment

Item	Dimension
Shoulder diameter (mm)	15
Pin root diameter (mm)	3
Pin length (mm)	1.5
Shoulder angle (°)	3
Shoulder corner radius (mm)	0.5
Pin taper angle (°)	10
Material	SKD61 (tool steel)

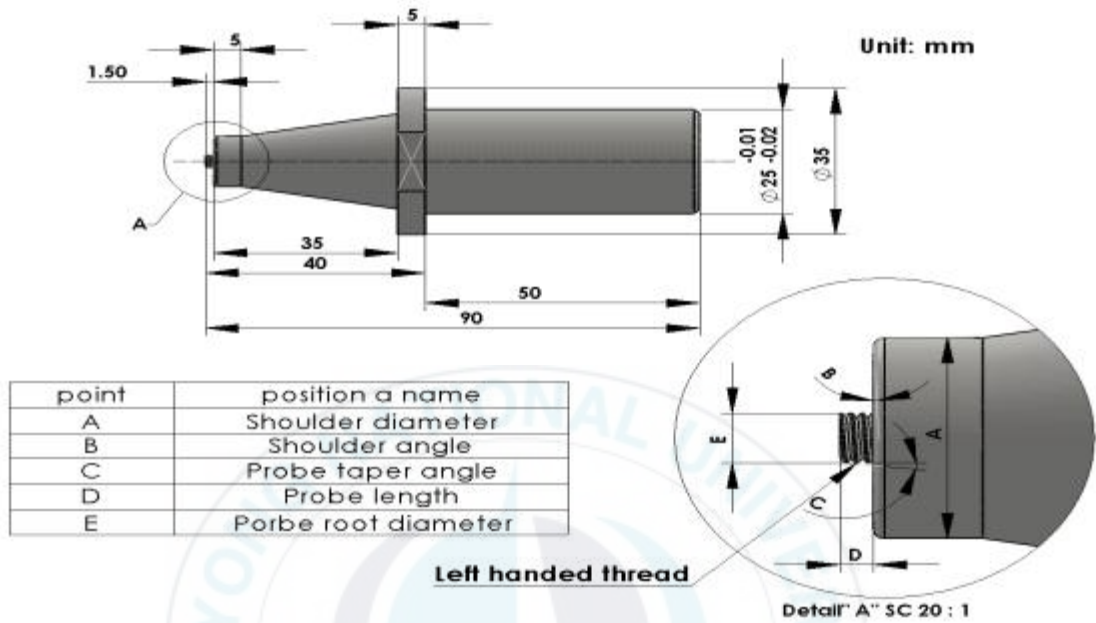


Fig. 3.1.5 Geometry of the tool

Fig. 3.1.6 와 같이 인장시험편은 ASTM E8 standard 규격을 적용하였으며 사용되는 장비의 그림을 보여지고 있다.

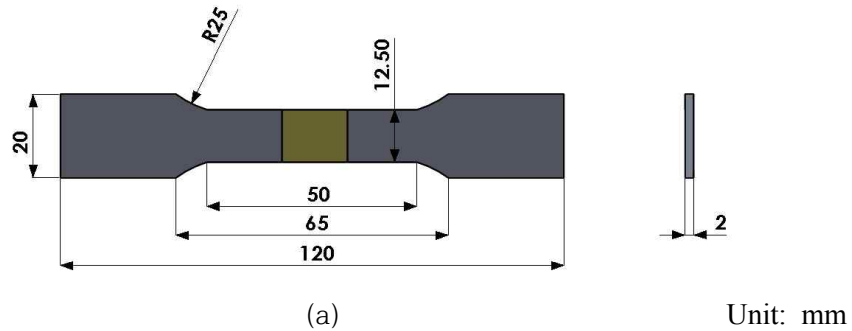


Fig. 3.1.6 Tensile specimen (a) and waterjet T300-3015 model (b)

인장시험편 가공에 사용되는 장비로 디에스워터젯 T300-3015로 사용되며 장비 내역을 보면 작업범위는 X축 3,050이며 Y축 1,550 Z축 200이다. 직선위치의 정밀도는 ± 0.05 이며 반복위치 정밀도 $\pm 0.03(\text{mm})$ 로 최대급속 이송속도를 보면 XY축은 1,500 최대급속 이송속도Z 4,000(mm/min) 최대가공속도 6,000(mm/min)으로 되어 있다.

Fig. 3.1.6 은 인장시험편과 워터젯 장비를 보이고 있다.

3.2 실험방법 및 조건

실험계획법 중 하나인 이원배치법을 이용하여 AZ31과 AZ61 박판에 대한 이종 마찰교반접합을 실시하여 공구의 회전속도, 이송 속도가 인장강도(항복강도) 특성치에 미치는 영향에 대해 정량적인 분석을 실시하고, 각 특성치를 최대로 갖는 최적의 공정 조건을 도출하고자 한다.

Table 3.2.1 Design of experiment

Design of experiment	Join variable	Experiment size(number)	Properties
Two-way factorial design	Rotation speed	$9(3^2) \times 2 = 18$	Tensile strength
	Welding speed		

Table 3.2.2에서 보는 것과 같이 각 수준의 정의를 회전속도와 이송속도에 변화를 주려고 한다.

Table 3.2.2 Factors and each levels for experiment

Level	Rotation speed(rpm)	Welding speed(mm/mim)
1	1000	100
2	2000	200
3	3000	300

준비사항의 이종간의 각 재료의 내용과 공구의 해당되어지는 사양을 다음과 같이 Table 3.2.3과 Table 3.2.4에서 나타내었다.

Table 3.2.3 Plate material

Plate material	Size(mm)	Quantity(EA)
AZ31	2×100×150	18
AZ61	2×100×150	18

Table 3.2.4 Tooling system

Tool material	Shoulder diameter(mm)	Pin diameter(mm)	Quantity(EA)
SKD61	15	3	1

모든 조건에 대해 SEM 촬영을 실시하고 접합조건에 따른 접합부 결정조직 변화와 강도 변화를 확인하고 각 특성치들 간의 상관관계를 규명하고자 한다. 우선 접합 변수들의 변화에 따른 인장강도(항복강도)변화 그리고 접합 변수들이 인장강도에 미치는 영향에 대해 정량적인 분석 다음으로 최적의 인장강도(항복강도)를 갖는 접합 조건 도출, 검증실험을 통한 실험계획법 적용하려고 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 접합부 표면 및 인장강도 결과

본 논문에서는 마찰교반접합을 이용하여 이종 마그네슘 합금의 접합을 실시하였으며 대표적인 접합 공정 변수인 공구의 회전속도와 이송속도가 접합부 인장강도 특성치에 미치는 영향에 대해 정량적인 결과를 도출하고자 실험계획법 중 이원배치법의 원리를 이용하여 실험을 배치하고 통계적 분석방법인 분산분석을 통해 접합 공정 변수들간의 상관관계에 대해 파악하고자 하였다. 또한 실험의 신뢰성을 향상시키고 접합 공정 변수들간의 교호작용을 파악하기 위해 조건당 2회의 case A와 case B로 반복 실시하여 총 18회의 실험을 실시하였다.

Table 4.1.1에서 Table 4.1.6까지 이종 마그네슘합금의 마찰교반접합 실험 결과를 나타내었다. 본 논문에서는 이종 마그네슘합금의 접합을 위하여 다음 사항을 고려하여 실험을 실시하였다. 접합 공구는 시계방향으로 회전을 하였으며 접합 판재는 오른쪽에서 왼쪽 방향으로 진행 시켰다. 마찰교반접합은 공구 핀부의 회전방향과 판재의 진행방향이 반대인 AS(Advancing Side)와 공구 핀부의 회전방향과 판재의 진행방향이 같은 RS(Retreating Side)로 구분을 하고 있으며 본 논문에서는 AS부에 모재의 인장강도와 경도 값이 다소 낮은 AZ31 마그네슘합금을 배치하였으며 RS부에 AZ61 마그네슘합금을 배치를 하였다.

기본적으로 마찰교반접합 공정에서 재료에 삽입되어 실질적인 교반을 통한 소성유동을 일으키는 것은 공구의 핀부이며 공구의 솔더부는 재료가 외부로 배출되지 못하게 하는 역할과 공구와 재료의 마찰을 통해 발생된 마찰열로 접합부의 온도를 적정 수준까지 올리는 역할을 수행한다. 따라서 마찰교반접합 공정은 접합부 표면 형상만으로는 접합 조건의 안정성과 신뢰성을 확신하기는 힘들다. 또한 예비실험을 통해 핀부와 솔더부의 삽입 깊이에 따라 접합 자체가 완벽하게

이뤄지지 않는 것을 확인하여 본 논문에서는 1.5mm 의 핀부를 완벽하게 접합 판재에 삽입하기 위하여 1.7mm의 삽입깊이를 설정하여 솔더부가 2mm이상 삽입 되도록 접합 실험을 진행하였으며 육안으로 확인 결과 전반적으로 모든 조건에서 접합은 안정적으로 이뤄졌으며 접합부 표면에 대한 형상도 양호하게 나타났다. 또한 솔더부의 2mm 이상 삽입으로 인하여 솔더부 진행방향인 접합부 길이 방향으로 발생한 버는 접합후 절단하였다.

Table 4.1.1 Factors with regard to quality view of FSW(1000:100,200,300)

No.	Factors		Quality view of FSW	
	(A)	(B)	case A	case B
1	1000	100		
2	1000	200		
3	1000	300		

Table 4.1.1은 공구의 회전속도가 1000(rpm)인 조건에서 공구의 이송속도를 100, 200, 300(mm/min) 변화시켜 접합한 접합부 표면을 나타낸다. 접합부 표면에 대해 육안으로 확인결과 이송속도가 증가할수록 솔더부가 다소 거칠게 나타났다으나 크게 차이를 보이진 않았다.

Table 4.1.2 Factors with regard to quality view of FSW(2000:100,200,300)

No.	Factors		Quality view of FSW	
	(A)	(B)	case A	case B
4	2000	100		
5	2000	200		
6	2000	300		

Table 4.1.2는 공구의 회전속도가 2000(rpm)인 조건에서 공구의 이송속도를 100, 200, 300(mm/min) 변화시켜 접합한 접합부 표면을 나타낸다. 접합부 표면에 대해 육안으로 확인결과 이송속도가 증가할수록 솔더부가 다소 거칠게 나타났으나 크게 차이를 보이진 않았다.

Table 4.1.3 Factors with regard to quality view of FSW(3000:100,200,300)

No.	Factors		Quality view of FSW	
	(A)	(B)	case A	case B
7	3000	100		
8	3000	200		
9	3000	300		

Table. 4.1.1 에서부터 Table .4.1.3 각 접합 공정 변수들의 조건별 접합부 형상을 나타내었다. 전반적으로 모든 접합 조건에서 접합부 비드 형상은 육안으로 확인 결과 예상 되었던 연화심화로 인한 비드부의 고열로 인한 형상부 변형등과 같은 큰 문제점을 발견되지 않았다. 본 논문에서는 박판 접합을 위하여 판재를 고정하기 위한 별도의 치구를 만들어 사용하였으며 판재를 고정하는 방법으로 전체 클램핑시 모재와 전체 접촉되는 부분의 판재SKD61 소재의 판의 크기 조절을 하여 실제 힘을 가하여 고정하려고 하는 클램프의 위치와 모재 위치고정을 위한 맞춤 핀 개소를 유동적으로 하여 안정적인 고정을 시도함에 따라 접합부의 상태가 변화하는 것을 확인하였다.

Table 4.1.3는 공구의 회전속도가 3000(rpm)인 조건에서 공구의 이송속도를 100, 200, 300(mm/min) 변화시켜 접합한 접합부 표면을 나타낸다. 접합부 표면에 대해 육안으로 확인결과 이송속도가 증가할수록 솔더부가 다소 거칠게 나타났으나 크게 차이를 보이지 않았다. 전반적으로 9회에 반복2번으로 총 18회 접합한 모든 조건에서 접합부 표면은 육안으로 확인한 결과 입열량 부족이나 교반 부족으로 인한 기공이나 크랙은 발견되지 않았으며 양호한 상태를 나타내었다. 따라서 모든 조건에 대해서 접합부 중앙 위치에서 인장시험편을 가공하여 인장 시험을 실시하였다.

Table 4.1.4 Factors with regard to quality view of test piece after tensile test

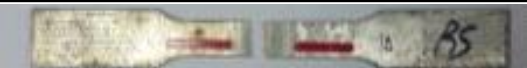
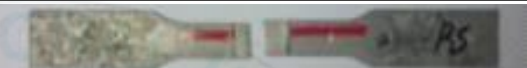
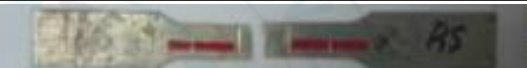
No.	Factors		Quality view of test piece after tensile test	
	(A)	(B)	case A	
1	1000	100	Case A	
			Case B	
2	1000	200	Case A	
			Case B	
3	1000	300	Case A	
			Case B	
4	2000	100	Case A	
			Case B	
5	2000	200	Case A	
			Case B	
6	2000	300	Case A	
			Case B	
7	3000	100	Case A	
			Case B	
8	3000	200	Case A	
			Case B	
9	3000	300	Case A	
			Case B	

Table. 4.1.4는 접합부 중앙 위치에서 인장시험편을 가공하여 인장시험을 실시한 결과를 나타내었다. 본 논문에서 적용한 모든 조건에서 인장시험편의 파단부 형상에 대해 육안으로 확인한 결과 파단의 시작은 AS부인 AZ31 마그네슘 합금 재료에서 시작하여 핀 삽입부인 두 재료의 접합면에 걸쳐서 파단이 이뤄진 것을 알 수 있었다. 이것은 접합을 위한 재료의 교반 과정중에 핀부의 회전방향과 재료의 이송방향이 반대인 AS부에서 핀부의 회전방향과 재료의 이송방향이 같은 RS부에 비해 높은 내부 응력이 발생하여 나타나는 결과로 판단된다.

Table 4.1.5에 공구의 회전속도와 이송속도 변화에 따른 접합부 인장강도 결과 값을 나타내었다.

Table 4.1.5 Tensile strength of FSW conditions

No.	Factors		Tensile strength(MPa)	
	Rotation speed (rpm), (A)	Welding speed (mm/min), (B)	case A	case B
1	1000	100	203.54	200.15
2	1000	200	191.24	185.12
3	1000	300	176.15	180.45
4	2000	100	210.16	203.15
5	2000	200	195.74	198.36
6	2000	300	180.32	182.44
7	3000	100	218.11	215.65
8	3000	200	207.56	193.15
9	3000	300	187.12	190.61

본 실험에서 선정한 접합 공정변수들의 조합에서 접합부 인장강도를 측정한 결과 전반적으로 공구의 이송속도가 증가할수록 접합부 인장강도는 감소하였으며 회전속도가 증가할수록 접합부 인장강도는 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 회전속도의 변화에 따른 접합부 인장강도 결과 값보다 이송속도 변화에 따른 접합부 인장강도 결과 값이 다소 큰 차이를 나타내는 것으로 보아 이송속도가 접

합부 인장강도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Table 4.1.6에 마찰교반접합시 접합 공정 변수들이 접합부 인장강도 특성에 미치는 영향에 대해 정량적인 분석을 실시하기 위하여 통계적 기법인 분산분석을 실시하여 나타내었다.

Table 4.1.6 ANOVA for tensile strength before pooling

	SS	Φ	MS	F_0	$F_{(0.05)}$	$F_{(0.01)}$
A	477.66	2	238.83	12.15	4.26	8.02
B	1968.72	2	984.36	50.08	4.26	8.02
A×B	34.80	4	8.70	0.44	4.26	8.02
E	176.91	9	19.66			
T	2658.09	17				

실험에 사용된 접합 공정 변수는 공구의 회전속도와 이송속도이며 교호작용을 검출하기 위해 2회 반복 실험을 실시하였다. 여기서 S는 변수의 제곱합이며, Φ 는 변수의 자유도, V는 제곱평균, F_0 는 제곱평균비를 나타낸다.

실험 결과를 토대로 분산분석을 실시하여보니 회전속도와 이송속도는 1% 유의수준까지 유의한 것으로 나타났다. 그리고 이송속도가 회전속도보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 회전속도와 이송속도의 교호작용은 검출되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 Table 4.1.7에 회전속도와 이송속도의 교호작용을 오차항에 풀링하여 다시 분산분석을 실시한 결과를 나타내었으며 분산분석 결과 이종 마그네슘합금의 마찰교반접합시 접합부 인장강도 특성에 대하여 공구의 회전속도 및 이송속도의 수준의 변화에 따라서 유의한 차가 있음을 알 수 있다.

Table 4.1.7 ANOVA for tensile strength after pooling

	SS	Φ	MS	F0	F _(0.05)	F _(0.01)
A	477.66	2	238.83	14.67	4.26	8.02
B	19687.72	2	984.36	60.44	4.26	8.02
E	211.71	13	16.29			
T	2658.09	17				

또한 교호작용이 유의하지 않으므로 인자 A, B의 조합에 의한 특별한 효과는 나타나지 않는 것으로 간주하였다. 따라서 A, B 각 인자에 대하여 모평균을 추정하여 Table 4.1.8에 나타내었다. 접합 공정 변수들간의 접합부 인자의 모평균을 추정해본 결과 공구의 회전속도는 3수준에서 가장 높은 값을 나타냈으며 접합부 인장강도와 비례하는 경향을 보였다. 또한 공구의 이송속도는 1수준에서 가장 높은 값을 나타냈으며 인장강도와 반비례하는 경향을 보였다.

Table 4.1.8 Estimate of population for each factors

	Factors	Point estimation	Confidence interval	+	-
1%	A1	189.44	6.57	194.24	184.60
	A2	195.03	6.57	199.86	190.20
	A3	202.03	6.57	206.87	197.20
	B1	208.45	6.57	213.29	203.63
	B2	195.20	6.57	200.03	190.36
	B3	182.85	6.57	187.68	178.12
A3B1	99%	214.99	6.57	221.56	208.42

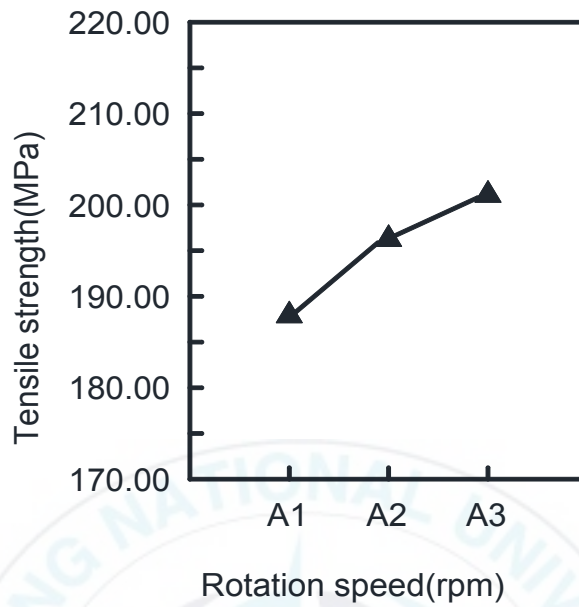


Fig. 4.1.1 Graphical illustration of the effect on rotation speed

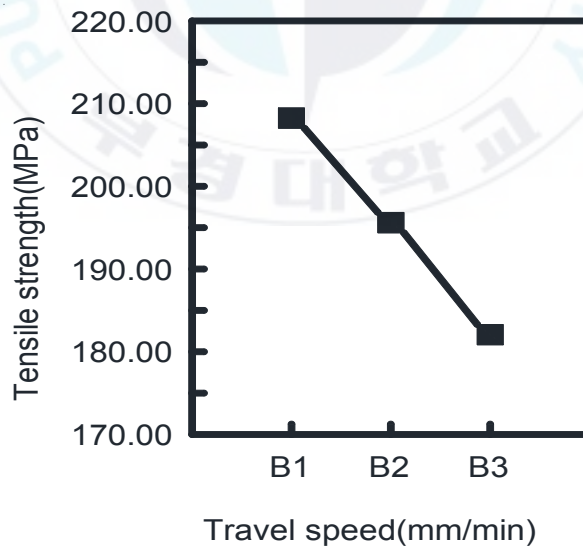


Fig. 4.1.2 Graphical illustration of the effect on welding speed

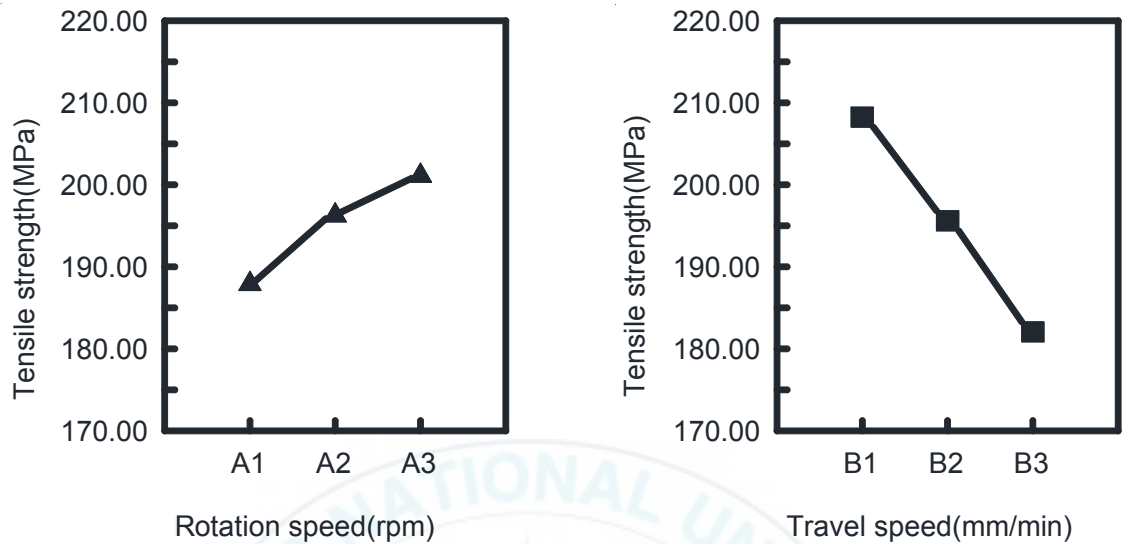


Fig. 4.1.3 Graphical illustration of the effect on all factors

Fig. 4.1.3을 보면 인장 강도를 가장 크게 하는 A, B 접합 공정 변수의 최적 공정 수준은 A3B1 수준으로서 A3B1 수준조건에서의 접합부 인장강도 모평균과 점추정 및 구간추정은 99% 신뢰구간에서 $214.99 \pm 6.57(\text{mm})$ 으로 나타났다.

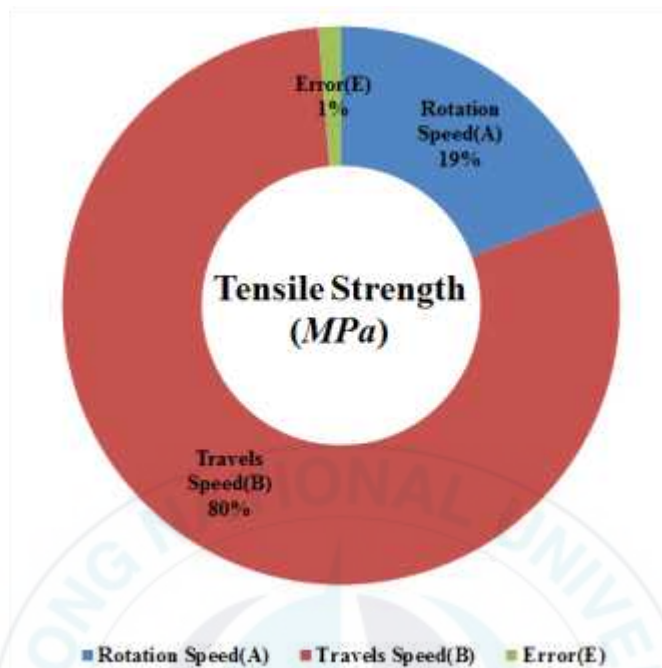


Fig. 4.1.4 Graphical illustration of the contribution on all factors

Fig. 4.1.4에 이종 마그네슘합금의 마찰교반접합시 접합부 인장강도에 영향을 미치는 각 접합 공정 변수들의 기여도를 나타내었다. 공구의 이송속도(80%) 변화가 공구의 회전속도(19) 변화보다 접합부 인장강도 특성에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.2 경도 및 미세조직 결과

미세조직과 시험방법에 있어서 본 논문에서는 AZ31 과 AZ61 이중 마그네슘 합금에 대하여 마찰교반접합을 실시하였으며 인장강도 특성치를 최적으로 갖는 공정조건을 도출하고자 하였다. 인장실험 결과, 공구의 회전속도 1000rpm, 공구의 이송속도 300mm/min 인 3번 조건에서 인장강도가 가장 낮게 나타났으며, 공구의 회전속도 3000rpm, 공구의 이송속도 100mm/min 인 7번 조건에서 인장강도가 비교적 높게 나타났다. 따라서 인장강도를 최고를 갖는 조건과 최저로 갖는 조건에 대해 접합부 단면에 대한 조직 관찰과 경도 측정을 실시하였다.

Fig. 4.2.1 는 본 논문에서 조직관찰을 위해 사용된 금속현미경으로서 50~1000배의 배율까지 가능한 Carl Zeiss AxioObserver Z1m 이다.



Fig. 4.2.1 Metallographic microscope

Fig. 4.2.2는 경도측정에 사용된 마이크로 MITUTOYO 비커스경도시험기이며 단면의 경도 분포, 금속의 단결정이나 특정 조직부분의 경도를 측정하는 용도로 사용된다.



Fig. 4.2.2 Vicker's hardness a tester picture

시험기의 압입강도 시험 하나로 대면각이 136° 인 정사각뿔형태의 다이아몬드 압자에 정하중을 적용하여 경도를 측정하는 시험방법으로 압자를 측정하고자 하는 면에 밀어붙였을 때 자국이 남은 곳의 외각의 겉넓이를 하중의 값으로 나누어 경도의 크기를 결정 짓는다.

미세조직 및 경도시험 결과 내용 중 본 논문에서는 접합부 단면에 대해 현미경 관찰을 실시하여 이종 재료간 접합시 핀 삽입부의 교반이 원활하게 이루어지는지를 파악하고자 하였다. 또한 경도 측정을 통해 접합부 단면의 경도분포 특성에 대해 파악하고자 하였다. 시험편 제작을 위하여 인장시험편 가공 후 남은 판재를 마운팅하기 위한 크기로 절단하였으며 200~2000 종이 사포를 사용하여 표면을 연마하였다. 에칭은 ASTM E407의 NO. 74를 적용하여 증류수와 질산, 불산, 염산 등의 혼합용액에 5분간 에칭하여 관찰하였다. 경도 측정 전에 현미경 관찰을 통해 접합시 재료의 소성유동을 통한 교반이 원활하게 이뤄졌는지를 확인하고자 하였으며 아래 Fig. 4.2.3에 결과를 나타내었다.

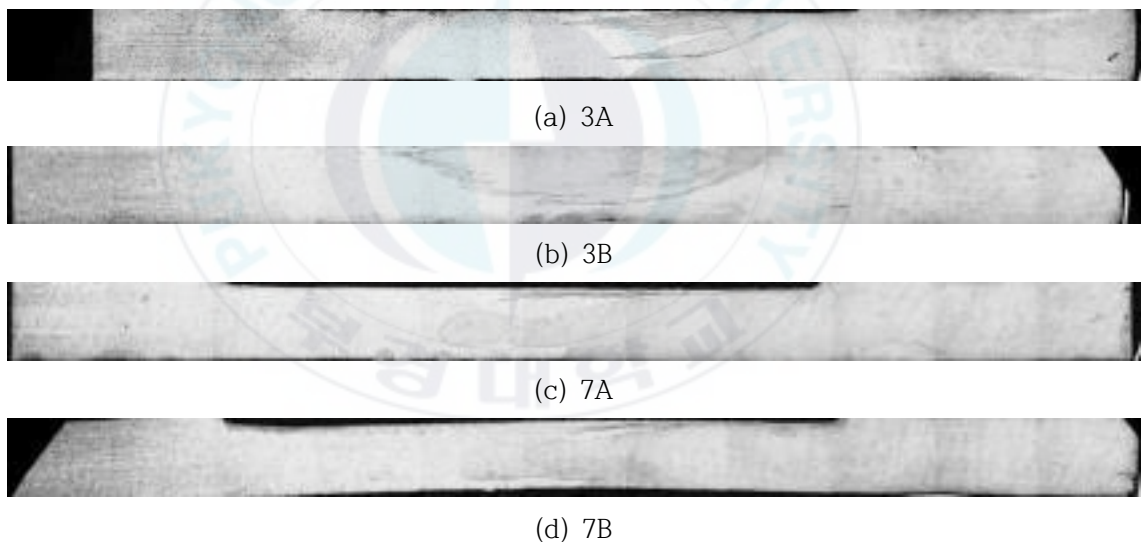


Fig. 4.2.3 Metallographic microscope watch

9개의 접합 조건 중 접합부 인장강도를 기준으로 하여 인장강도가 가장 높은 7번 조건과 인장강도가 가장 낮게 나온 3번 조건에 대해 접합부 단면을 50배 현미경으로 관찰한 결과 2개의 조건 모두 확연하게 접합부가 구분되는 것을 확

인할 수 있었다.

인장강도가 가장 낮게 나온 3A와 3B의 경우 AZ31 마그네슘 합금과 AZ61 마그네슘 합금의 구분이 확연히 가능하며 핀 삽입부인 접합면을 기준으로 원활하게 소성유동이 이뤄지지 않은 것으로 나타나고 핀 삽입부를 기준으로 원활하게 소성유동이 이뤄져 재결정이 된 것으로 보이나 충분한 입열이 이뤄지지 않아 인장강도가 다소 낮게 나온 것으로 판단된다. 반면 7A와 7B의 경우 핀 삽입부인 접합면을 기준으로 AZ31 마그네슘 합금과 AZ61 마그네슘 합금이 원활하게 소성유동이 이뤄진 것으로 보이며 따라서 인장강도 역시 높게 나온 것으로 판단된다.

Fig. 4.2.4에 현미경 관찰 후 경도 측정부위에 대해 나타내었다. 본 논문에서 적용한 판재는 박판에 속하는 2mm 판재로서 재료의 두께 방향에 대한 열전달은 고려하지 않았다. 따라서 접합부 단면의 중심을 기준으로 횡 방향으로 3mm 간격으로 5포인트, 5mm 간격으로 2포인트, 판재 두께방향에 0.5mm 간격으로 1포인트, 총 8포인트에 대해 순서대로 경도 측정을 실시하였다. 경도시험은 ASTM E384-11 규격에 준하였으며 시험하중의 조건은 300g, 가압시간 10초로 두고 실험을 수행하였다.

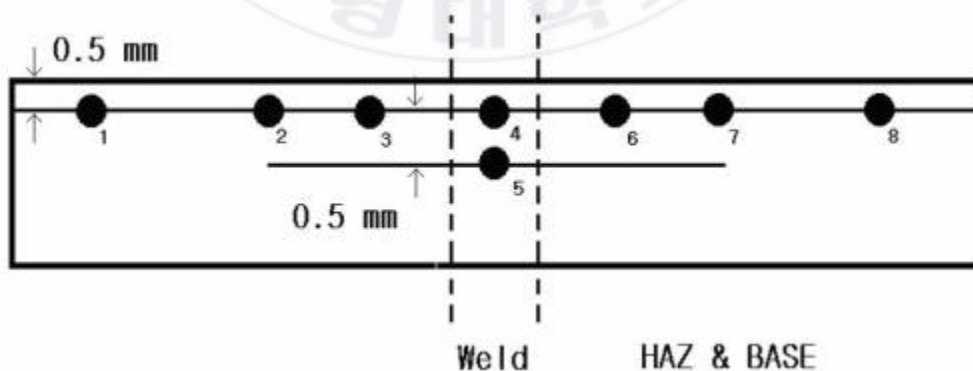


Fig. 4.2.4 Hardness point measurement

Table 4.2.1은 접합부 인장강도를 기준으로 인장강도가 가장 높게 나온 조건과 가장 낮게 나온 조건 대해 접합부 단면에 경도측정을 실시한 결과를 나타내었다.

접합부 단면에 대해 경도 측정은 총 8포인트를 순서대로 측정하였으며 1번과 8번은 접합 판재의 모재부에 해당한다. 2번과 7번은 열영향부에 해당하며 3번과 6번은 열/기계적 영향부에 해당하며 실제 핀부가 삽입되는 것은 4번에 해당한다.

Table 4.2.1 Hardness measurement

No.	Location	Hardness(Hv)			
		3A	3B	7A	7B
1	BM(AZ31)	58	57	61	60
2	HAZ(AZ31)	51	53	59	59
3	TMAZ(AZ31)	49	50	56	57
4	SZ(TOP)	45	43	56	55
5	SZ(BOTTOM)	49	50	58	56
6	TMAZ(AZ61)	59	57	64	62
7	HAZ(AZ61)	58	57	66	65
8	BM(AZ61)	62	67	71	70

Fig. 4.2.5에 접합부 단면 영역에 대한 경도 측정 결과를 나타내었다. 여기서 BM은 Base Metal이며, HAZ는 열영향부 (Heat Affected Zone), TMAZ는 기계적 열영향부 (Thermal Mechanical Affected Zone), SZ는 교반부 (Stir Zone) 의 약자이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 실질적인 접합이 이뤄지며 핀부가 삽입되어 교반을 통한 소성유동을 일으켜 재결정을 이루는 SZ 부에서 모재의 경도 값에 비해 다소 낮은 값을 나타내었으나 AZ61 마그네슘 합금의 경우는 모재의 경도 값 대비 80% 정도의 경도 값을 나타냈으며 AZ31 마그네슘 합금의 경우 모재의 경도 값과 크게 차이가 나진 않는 것으로 나타났다. 이것은 소성유동을 통한 재

결정이 원활하게 이뤄지는 과정 중에 모재의 인장강도와 경도가 다소 낮은 AZ31 마그네슘 합금이 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

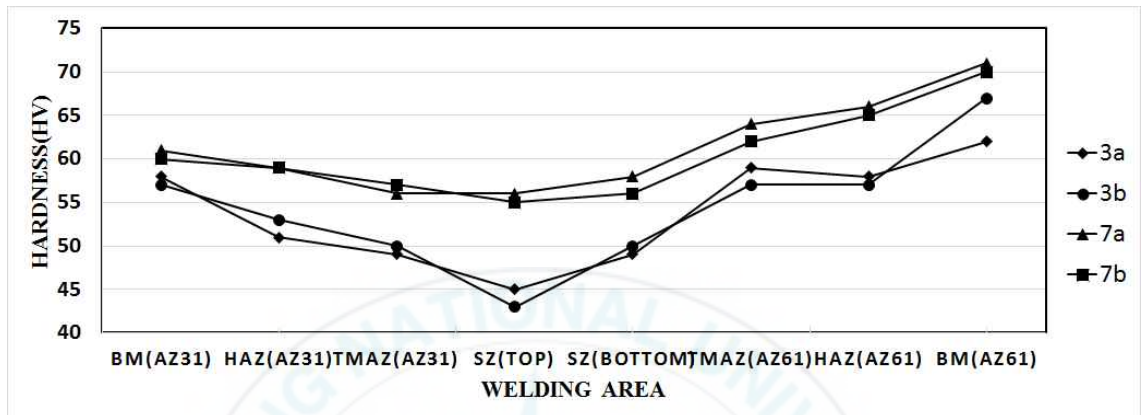


Fig. 4.2.5 Hardness point measurement at welding area

5. 결론

본 연구의 목적은 대표적인 이종 마그네슘 합금(AZ31, AZ61)의 마찰교반접합 특성에 대해서 통계적 기법인 실험계획법 중 이원배치법의 원리를 적용하여 접합 공정 변수들 간의 상관관계에 대해 알아보고 최적의 접합부를 얻는 최적공정 조건에 대해 파악하고자 하였다.

마찰교반접합 공정 변수 중 가장 많이 취급되며 관리되고 있는 접합 공구의 회전속도(A)와 이송속도(B)를 변수로 선정하였으며 각각 3수준으로 변화하여 접합 실험을 진행하였으며 접합부 인장강도를 특성치로 선정하여 통계적 기법인 이원배치법의 원리를 이용하여 실험을 배치하였으며 분산분석을 통해 각각의 공정변수들이 접합부 인장강도 특성치에 미치는 영향에 대해 정량적인 분석을 실시하고자 하였다. 본 논문에서는 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대표적인 경량소재인 AZ31 과 AZ61마그네슘 합금의 마찰교반접합을 통계적 기법인 이원배치법의 원리를 이용하여 9회씩 2회 반복하여 실시하였으며 18 개의 접합 시험편에 대해 접합부 인장강도 특성치를 얻기 위해 인장시험을 실시한 결과 접합 실험에 적용한 접합 공정 변수들의 수준은 적절하다고 판단된다.

2. 통계적 기법인 이원배치법의 원리를 적용하여 접합부 인장강도를 특성치로 선정하여 분산분석을 실시한 결과, 본 논문에서 선정한 접합 공정 변수들의 조합에서는 접합 공구의 회전속도가 증가할수록 접합부 인장강도는 증가하는 경향을 나타냈으며, 접합 공구의 이송속도가 증가할수록 접합부 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 접합 공구의 회전속도가 과도하게 증가할 경우 입열량의 증가로 인한 접합부 조직의 미세화로 인한 결과로 예측되며, 공구의 이송속도가 너무 느릴 경우, 접합부가 안정적으로 교반이 이뤄지지 않아 조직의 균일화 되지 않는 것으로 판단된다.

3. 이종 마그네슘합금(AZ31, AZ61)을 마찰교반접합을 이용하여 이원배치법의 원리로 접합 실험을 실시 한 후 접합부 인장강도를 측정하여 인장강도 결과 값을 특성치로 선정하여 분산분석을 실시한 결과, 본 논문에서 선정한 접합 공정 변수인 공구의 회전속도 2개 공정 변수 변화에 따른 접합부 인장강도 특성이 2개 공정 변수 모두 접합구간 내에서 유의한 결과를 나타냈다.

또한 접합 공정 변수들간의 접합부 인장강도의 모평균을 추정해본 결과, 공구의 회전속도는 3수준에서 가장 높은 값을 나타냈으며 접합부 인장강도와 비례하는 경향을 보였다. 또한 공구의 이송속도는 1수준에서 가장 높은 값을 나타냈으며 인장강도와 반비례하는 경향을 나타내었다. 인장 강도를 가장 크게 하는 A, B 접합 공정 변수의 최적 공정 수준은 A3B1 수준으로서 A3B1 수준조건에서의 접합부 인장강도 모평균과 점추정 및 구간추정은 99% 신뢰구간에서 $214.99 \pm 6.57 \text{mm}$ 으로 나타났다.

4. 접합 공구의 회전속도와 이송속도의 변화에 따라 접합부 인장강도에 미치는 기여도를 확인한 결과. 공구의 이송속도(80%) 변화가 공구의 회전속도(19%) 변화보다 접합부 인장강도 특성에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다

5. 접합부 단면에 대한 50배 현미경 관찰 결과 인장강도가 낮은 조건에서는 재료의 소성유동을 통한 교반이 원활하게 이뤄지지 않은 것으로 나타났으며 인장강도가 높은 조건에서는 재료의 소성유동을 통한 교반이 전반적으로 원활하게 이뤄진 것으로 나타났다. 또한 접합부 단면에 대한 비커스경도 측정결과 실제 접합을 이루는 핀 삽입부와 열영향부에서 모재부에 비해 다소 낮은 경도값(52~60)을 나타내었지만 전반적으로 모재부의 90%이상의 값을 나타내었다.

이와 같이 대표적인 경량소재인 AZ31 과 AZ61 마그네슘 합금의 마찰교반접

합을 통계적 기법인 이원배치법을 적용하여 실험을 실시한 후 인장강도 특성치를 통해 분산분석을 실시하여 확인한 결과 이종 마그네슘합금의 마찰교반접합 적용에 대해 긍정적인 결과를 얻을 수 있었다.



참고문헌

1. Welding Techniques of 21st Century, Korea Institute of Science and Technology Information, January 2007
2. M. Stangwood, J. E. Berry, D. P. Cleugh, A. J. Leonard, P. L. Threadgill, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, 1999, Thousan Oak, Calif.
3. C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel : Scripta Materialia 36, 1997, pp. 69-75.
4. BANG Hanseo, KIM Heungju, OH Jeongin, The Korean Welding and Joining Society, Outline Book of Special Lectures and Academy Conference of The Korean Welding Society Vol. 2 2001, 2001. 1, pp.206-208.
5. LEE Wonbae, JANG Hyeongseon, JANG Woongseong, YEON Yunmo, JEONG Seungbu, The Korean Welding and Joining Society, Outline Book of Special Lectures and Academy Conference of The Korean Welding Society Vol. 1 2003. 5, pp. 179-181.
6. SEO Seungil, 2007, "The Current Situation of Friction Stir Welding & Application to Aluminum Railroad Cars", Spring Academic Conference of Korean Society for Railway.
7. Moreira, P. M. G. P. M. A. V. de figueiredo and P. M. S. T de Castro. 2007, "Fatigue behavior of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, No. 48, pp. 169-177.
8. Mahoney, M. W, Rhodes, C. G, Flintoff, J. G, Spurling, R. A. and

- Bingel, W. H. 1998, "Properties of Friction Stir Welded 7075 T651 Aluminum, Metallurgical and Materials", A, No. 29, pp. 1955-1964.
9. Liu, H. J, Fujii, H, Maeda, M. and Nogi, K. 2003, "Tensile Properties and Fracture Locations of Friction Stir Welded Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy", Journal of Materials Processing Technology, No. 142, pp. 692-696.
 10. Lee, W. B, Yeon, Y. M. and Jung, S. B. 2003, "The Improvement of Mechanical Properties of Friction Stir Welded A356 Al Alloy", Materials Science and Engineering, A, No. 355, pp. 154-159.
 11. KIM Miseon(2009), "2009' The Current Situation and Outlook of Friction Stir Welding Techniques", Welding Journal.
 12. LEE Wonbae, YEON Yunmo, SEO Changje, JEONG Seungbu, "Joining Magnesium Alloy by Using Friction Stir Welding", The Korean Welding and Joining Society, The Journal of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 19, No. 6, 2001, pp. 23-28.
 13. LEE Changyong, KIM Seongyu, LEE Wonbae, YEON Yundo, "AZ31-AZ91 Friction Stir Welding of the Dissimilar Magnesium Alloy", Outline Book of Special Lectures and Academy Conference of The Korean Welding Society, Vol.1, 2004, pp. 162-164.
 14. LEE Wonbae, YEON Yunmo, JEONG Seungbu, "Joining Characteristics of AZ31B-H24 Magnesium Alloy with the use of Friction Stir Welding", Outline Book of Special Lectures and Academy Conference of The Korean Welding Society, Vol.1, 2002, pp. 106-108.
 15. LIM Seonggon, KIM Sangsik, LEE Changgil, KIM Seongjun, "Microstructure and Tractive Characteristics of Each Aluminum Alloy

- Friction Stir Welded”, The Korean Institute of Metals and Materials Journal, Vol. 41, No.11, 2003, pp. 743-749.
16. KIM Hongju, CHEON Changgeun, KIM Sukhwan, JANG Woongseong, “The Study on Microstructure and Mechanical Properties of the Friction Stir Welded Dissimilar Joint of AZ31B/A6061”, Journal of The Korean Welding Society, Vol. 24, No. 4, 2006, pp. 6-10.
 17. BANG Hanseo, KIM Hongju, GO Minseong, KIM Gyuhun, “The Study on Thermal Behavior Characteristics of Joint during Friction Stir Welding of Al6061 Alloy”, Journal of The Korean Welding Society, Vol. 20, No. 4, pp. 128-131.
 18. KIM Sangsik, LIM Seonggon, LEE Changgil, KIM Seongjun, “Stress Corrosion Cracking Behavior of Friction Stir Welded Al6061-T651 Alloy”, The Korean Institute of Metals and Materials Journal, Vol. 43, No.3, pp.217-222.
 19. PARK Heesang, LEE Youngho, CHOI Wondu, GO Junbin, “The Study on The Effect of Fin Shapes and the Feed Rate during Al6061-T6 Friction Stir Welding on Mechanical Strength”, Korea Machine Tool Engineers Journal, Vol. 17, No.4, pp. 22-28.
 20. CHANG Seokgi, HAN Minsu, JEON Jeongil, “The Effect of Spinning Speed and Feed Rate on Friction Stir Welding of Al7075-T651”, Papers of the Korean Society of Mechanical Engineers A issues, Vol. 31, No. 4, pp. 532-539.
 21. CHANG Seokgi, SHIN Sanghyeon, “The Study on A Development of Optimizing Tools for Friction Stir Welding with 2 mm Thick Aluminum Alloy using a Milling Machine Friction stir welding”, The Korean Society of Marine Engineering Journal, Vol.25, No.4, pp. 91-96.

22. BAEK Seungyeop, BAE Dongho,, “ The Study on Optimum Parameter for Fatigue Design of Gas Welded Joint in the Rail Road Car Body”, Spring Academic Conference of The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 339-343.
23. WON Sitae, KIM Wongyeong, GU Byeongchun, “The Analysis on Mechanical Properties of Joints according to Welding Methods and Sensitivity Analysis of FSW’s Welding Variables for A6005 Extruded Alloy of Rolling Stock”, Korean Society for Railway, Journal of the Korea Railway Society, Vol.13, No.2, 2010, pp. 131-138.
24. PARK Jaecheol, HAN Minsu, KIM Seongjong, “Comparison of Corrosion Properties for Optimum Friction Stir Welded Aluminum Alloys in Natural Sea Water”, The Korean Society of Marine Engineering, The Korean Society of Marine Engineering, 2010’ Joint Conference Papers, 2010, pp. 459-459.
25. CHOI Wondu, GO Junbin, GU Giyeong, “The Comparative Study on the Fatigue Properties of Friction Stir Welding and MIG Joints of Al6005 Sheets to Design Railway Vehicles”, the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.19, No.5, 2010, pp. 653-659.
26. GU Byeongchun, JEONG Hyeonseung, “Finite Elements Modeling of Friction Stir Welding Heat Source”, The Korean Welding and Joining Society, 2011’ The Korean Welding and Joining Society Spring Academic Conference Excerpt Collection, Vol.55, 2011, pp. 154-154.
27. Thermal and Mechanical Analysis on Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy by the Finite Element Method 2012. Paper Collection.

28. The Study on Grain Refinement and Superplasticity of CA Added AZ31 and AM30 Magnesium Alloy, YOO Youngjae February 2015
29. Evaluation of Tension-Compression Behavior and Non-isothermal Stamping Analysis of AZ31B Mg Alloy Sheet Graduate School of Kangwon National University , August 2015 SEO Oseok
30. Japan welding academic journal Vol.72-5, 2003, pp. 134-142
31. (The Study on High Temperature Deformation, Mechanical Properties and Damping Capacity of Mg Alloy/ LEE Gyuhyeon)-2015.02
32. Metal Terminology, Metal Terminology Compilation Committee, January 1, 1998. Seongandang
33. The Study on Microstructure Evolution due to Heat Treatment Temperature of the Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy, CHOI Younghwan February 2014
34. Michael M.Avendesian, ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloy, pp. 10.
35. Michael M.Avendesian, ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloy, 12-25
36. LEE Yongtae, Korea Institute of Machinery & Materials, Fundamentals and Applications of Magnesium Alloys, Steel & Metal News, 2004, 14-24
37. Mishra, R. S. and Ma, Z. Y. 2005, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering, R, No.50, pp. 1-78.

38. Kallee, S. W, Nicholas E. D. and Thomas, W. M. 2001, "Friction Stir Welding - Invention, Innovations and Applications", INAL CO 2001, 8th International Conference on Joints in Aluminium, pp. 28-31.
39. "Friction Stir Welding - A General Introduction", High Tech Welding Website, <http://www.frictionstirwelding.com>
40. Thomas, W. M. 1998, "Friction Stir Welding and Related Friction Process", Proceedings of INALO98, pp. 157-167.
41. SONG Sangwoo, KIM Namgyu, GANG Jeongyun, "Liquidation Cracking of Mg and Al Alloys during Friction Stir Welding", The Korean Welding and Joining Society, The Korean Welding and Joining Society Journal, Vol.28, No.5, 2010, pp. 28-34
42. Ericsson, M. and Sandstrom, R. 2003, "Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds, and Comparison with MIG and TIG", International Journal of Fatigue, No. 25, pp. 1379-1387.
43. James, M. N, Hattingh, D. G. and Bradley, G. R. 2003, "Weld Tool Travel Speed Effect on Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083 Aluminum", International Journal of Fatigue, No. 25, pp. 1389-1398.
44. Nadan, R, DebRoy, T. and Bhadeshia, H. K. D. H. 2008, "Recent advances in friction stir welding - Process", Weldment structure and properties, Progress in Materials and Science, Vol. 53, pp. 980-1023.
45. P. Threadgill, Friction Stir Welds in Aluminium Alloys, "Preliminary Microstructural Assessment, TWI Bulletin", Mar-April, 1997.
46. Korea Institute of Science and Technology Information, Friction Stir Welding, December 2003

47. The Study on Fracture Properties of Friction Stir Welded Al Alloy according to the Rotation Direction, HWANG Hojun, February 2013
48. The Study on Fracture Properties of Friction Stir Welded Al Alloy according to the Rotation Direction, HWANG Hojun, February 2013



감사의 글

본 논문이 완성되기까지 성원과 가르침을 주신 모든 분들께 진심으로 감사드리고 항상 건강하시고 행복하시길 기원 합니다. 또한 논문을 완성시키기 위한 여러 가지 내용 중에 처음이라는 “경험“ 부분이 마음에 많은 부분 남았습니다. 이러한 가운데 꾸준히 지도와 방향 제시 및 여러 가지 가르침을 주신 강대민 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 각 학기에 걸쳐 가르침과 격려를 해주신 기계공학과 전 교수님께 감사드립니다.

아주 부족한 저의 논문에 깊은 관심과 배려로 심사해주시고 깊은 가르침을 주신 곽재섭, 박영환 교수님께 깊은 감사드립니다.

바쁜 직무에도 본인의 실험처럼 도와주신 박경도, 이대열 선생님께 진심으로 감사드립니다. 또한 석사학위 과정동안 관심과 배려를 아끼지 않으신 대한상공회의소 부산인력개발원 능력개발처 전 교직원께 진심으로 감사드립니다.

항상 옆에서 지켜주고 아껴주신 어머니와 사랑하는 아내 그리고 큰누이에게 고맙고 감사하며 앞으로 살아가면서 이러한 여러 가지 어려움이나 힘든 일이 있을 때 마다 든든한 지원군이 되어주는 가족에게 이러한 영광을 돌립니다.

2016년 7월

이 해 진