[UCI]I804:24011-200000241037

2011年 2月
碩士學位論文

TIG Assisted FSW를 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)용접부의 용접성 평가

朝鮮大學敎 大學院

船舶海洋工學科

全 洲 衍

TIG Assisted FSW를 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)용접부의 용접성 평가

Evaluation of the Weldability of Dissimilar Materials (AZ31B/SS400) Butt Joints by TIG Assisted Friction Stir Welding

2011年 2月 25日

朝鮮大學敎 大學院

船舶海洋工學科

全 洲 衍

TIG Assisted FSW를 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)용접부의 용접성 평가

指導敎授 房 熙 善

이 論文을 工學碩士學位申淸 論文로 提出함.

2010年 10月

朝鮮大學敎 大學院

船舶海洋工學科

全 洲 衍

全洲衍의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授　房　漢　瑞　（印）

委　員 朝鮮大學校 敎授　房　熙　善　（印）

委　員 韓國生産技術硏究院 首席硏究院

吳　益　賢　（印）

2010年 11月

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Table ····· Ⅳ

List of Figures ····· Ⅴ

Abstract ····· Ⅵ

제 1 장 서 론

1 . 1 연구배경 및 목적 ····· 1

1 . 2 연구방법 ····· 2

제 2 장 TIG assisted FSW 하이브리드 용접특성

2 . 1 FSW의 기초 ····· 3

2.1.1 FSW의 원리 ····· 3

2.1.2 FSW의 특징 ····· 4

2 . 2 GTAW(TIG)의 기초 ····· 5

2.2.1 GTAW의 원리 ····· 5

2.2.2 GTAW의 특징 ····· 7

2 . 3 사용재료의 특성 ····· 8

2.3.1 마그네슘의 종류 및 기본성질 ····· 8

2.3.2 연강의 종류 및 기본성질 ····· 12

제 3 장 실험방법

3 . 1 실험장치 및 사용재료 ····· 13
3 . 2 공구(Tool)의 재질과 형상 ····· 15
3 . 3 용접공정별 용접조건 ····· 17
3 . 4 기계적성 및 금속학적 특성 실험 ····· 20
3.4.1 인장실험 ····· 20
3.4.2 경도실험 ····· 21
3.4.3 마크로 및 마이크로조직 분석실험 ····· 22

제 4 장 결과 및 고찰

4 . 1 용접공정에 따른 비드특성 ····· 23
4.1.1 단독 TIG welding ····· 23
4.1.2 단독 Friction stir welding ····· 24
4.1.3 TIG assisted FSW Hybrid welding ····· 27
4 . 2 용접공정에 따른 인장강도 특성 ····· 29
4.2.1 동종재(AZ31B) FSW 용접부의 인장강도 ····· 29
4.2.2 이종재(AZ31B-SS400) FSW 용접부의 인장강도 ····· 30
4.2.3 이종재(AZ31B-SS400) TIG assisted FSW 하이브리드 용접부의 인장강도 ····· 34
4 . 3 용접공정(FSW, TIG assisted FSW 하이브리드 용접)에 따른 경도특성 ····· 39

4 . 4 용접공정(FSW, TIG assisted FSW 하이브리드 용접)에 따른 미세조직 특성 ····· 41
4.4.1 Microstructure of FSW dissimilar joint ····· 41
4.4.2 Microstructure of TIG assisted FSW ····· 42

제 5 장 결 론 ····· 43
참고문헌 ····· 44

List of Tables

Table 2.1 Basic properties of Magnesium Alloys ····· 9
Table 2.2 Physical properties of magnesium alloys ····· 9
Table 2.3 Mechanical properties of magnesium alloys ····· 9
Table 2.4 Characteristic of magnesium alloys ····· 11
Table 2.5 Chemical compositions of SS400 ····· 12
Table 2.6 Mechanical properties of SS400 ····· 12
Table 3.1 Tungsten carbide rod specifications and tool surface coating ····· 15
Table 3.2 TIG Welding condition ····· 18
Table 3.3 Welding condition for TIG assisted FSW hybrid welding····· 19
Table 4.1 Only TIG welding condition and bead profiles ····· 23
Table 4.2 Only FSW condition ····· 25
Table 4.3 Bead profiles of FSW weldments····· 26
Table 4.4 TIG Assisted FSW Condition····· 27
Table 4.5 Bead profiles of TIG assisted FSW hybrid weldments····· 28
Table 4.6 Tensile strength of similar material FSW weldments····· 29
Table 4.7 Tensile strength of dissimilar materials FSW hybrid weldments····· 31
Table 4.8 Stress-strain curve of dissimilar materials FSW hybrid weldments····· 32
Table 4.9 Tensile strength of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments····· 35
Table 4.10 Stress-strain curve of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments ····· 36

List of Figures

Fig. 2.1 Schematic of Friction Stir Welding ····· 3
Fig. 2.2 Schematic of GTAWelding ····· 5
Fig. 2.3 Configuration of GTAWelding ····· 6
Fig. 2.4 Trend of Magnesium ····· 10
Fig. 3.1 FSW equipment and capacity ····· 13
Fig. 3.2 Set-up for TIG assisted FSW hybrid welding ····· 14
Fig. 3.3 Configuration of specimen and tool position····· 14
Fig. 3.4 Detail of tool shape ····· 16
Fig. 3.5 Experiments of TIG Assisted FSW hybrid welding ····· 18
Fig. 3.6 Tensile test machine and specimen dimensions for tensile test ····· 20
Fig. 3.7 Vickers hardness test machine and measurement points ·· 21
Fig. 3.8 Optical Microscope ····· 22
Fig. 4.1 Stress-strain curve for similar material FSW weldments · 29
Fig. 4.2 Comparison of tensile strength for dissimilar materials FSW weldments with process parameters ····· 33
Fig. 4.3 Comparison of tensile strength for dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments with process parameters ····· 38
Fig. 4.4 Hardness distribution of dissimilar materials FSW weldments ····· 40
Fig. 4.5 Hardness distribution of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments ····· 40
Fig. 4.6 Microstructure of dissimilar materials FSW weldments ····· 41
Fig. 4.7 Microstructure of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments ····· 42

ABSTRACT

Evaluation of the Weldability of Dissimilar Materials (AZ31B/SS400) Butt Joints by TIG Assisted Friction Stir Welding

Ju Yeon, Jeon
Advisor : Prof. Hee-Seon Bang Ph.D.
Department of Naval Architecture &
Ocean Engineering
Graduate School of Chosun University

Recently, regulations for the energy exhibition are globally reinforced and industrial trends toward green growth are turned, so that lightweight in materials for transportation such as vehicle and aircraft is the challenge faced by everyone. In these circumstances, use of light weight alloys has rapidly increased. In case of using structural materials in an actual product, two kinds of material is required expecially weld joints. However, joining dissimilar materials is extremely difficult or impossible with conventional Fusion Welding processes.

This thesis presents the development of TIG assisted FSW by applying TIG Preheating to harder material during FSW process. In order to develop Welding techniques for Joining Dissimilar Materials - Magnesium Alloys, Mg-Al-Zn(Mn), which are widely used because of its superior Weldability and Mild steel(C:0.12～0.3%). Also, optimization of process variable of butt-welded joints is described in this paper. In doing so, advantage of TIG assisted FSW is proved by optimizing process variable like rotation speed and welding speed through mechanical experiments

Hence, transportation industries which use Magnesium Alloys to reduce weight of materials will obtain quality improvement of products and productivity growth by applying the welding technique.

제 1 장 서 론

1 . 1 연구배경 및 목적

최근 세계적으로 에너지 절약 및 환경 공해 규제가 대폭 강화되면서 자동차, 항공기 등의 수송 수단의 소재 경량화는 매우 긴박한 과제이며 이러한 목적으로 경량합금의 사용이 증가하고 있다. 또한, 대부분 구조재료를 실 제품에 적용할 경우, 두 가지 이상의 재료가 사용되기 때문에 이 재료들 간의 접합이 필수적이라 할 수 있으며 물리적 특성 차이가 상이한 재료의 접합일 경우 기존의 용융 용접법으로는 접합이 매우 어렵거나 불가능한 실정이므로 이에 대한 대책이 요구되어 지고 있다.

본 논문에서는 용접성이 우수하여 가장 널리 사용되고 있는 Mg-Al-Zn(Mn)계 마그네슘합금과 탄소함유량이 0.12%-0.3%인 연강에 대한 이종재 접합을 위해 TIG와 FSW 용접기법을 복합한 TIG assisted FSW 용접을 개발하였다. 더불어 맞대기 용접 이음부의 공정변수 최적화에 관해 기술하고 있다. TIG assisted FSW시 용접 공정변수(용접속도, 회전속도)별 최적화하였고, 용접부에 대한 기계적 실험을 통하여 강도 측면에서도 단독 FSW에 비해 TIG assisted FSW 용접법이 장점을 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 앞으로 구조 경량화 등을 목적으로 마그네슘합금이 사용되는 수송기기 분야(자동차 및 항공) 등에 본 용접기술을 적용함으로써 제품의 품질향상은 물론 생산성 측면에서도 이바지할 수 있을 것으로 사료된다.

1 . 2 연구방법

이종재(마그네슘 합금-일반구조용강)의 용접을 위하여 단독 마찰교반용접과 마찰교반 하이브리드용접을 실시하였다. 이종재 마찰교반접합시 접합부에 영향을 미치는 주요공정 인자로는 접합 툴의 회전속도, 이송속도, 핀의 삽입깊이 및 위치를 고려하였으며, 마찰교반 하이브리드 용접시 TIG를 보조열원으로 하여 연강(SS400) 판재에 예열함으로써 물리적 특성이 상이한 접합부의 소성유동을 증가시켜 접합성을 높이기 위하여 TIG의 전류, 보호가스, 토치앵글, 펄스전류 등을 주요 공정인자로 고려하여 접합특성을 고찰하였다.

툴의 핀 위치 및 회전방향은 Fig. 3.3와 같이 핀을 주로 마그네슘 합금측에 삽입되도록 하였으며, 연강이 전진측(Advancing side), 마그네슘합금이 후진측(Retreating side)으로 하여 접합을 수행하였다.

제 2 장 TIG assisted FSW 하이브리드 용접특성

2 . 1 FSW의 기초

2.1.1 FSW의 원리

“마찰 용접”은 1954년 구소련의 A.I.Chudikov 가 선반을 개조하여 금속 환봉을 마찰 용접하는데 성공하였고, 1958년 소련 연방전기 용접연구소(VNIESO)에서 1958년 최초로 마찰 용접기를 개발하였다. 이때 소련과 체코등지에서 실용화하는 연구가 수행되어 생산 공정에 도입 되었으며 1960년대부터 유럽, 일본 및 미국에서도 시작품 제작이 시작되었다. 그리고 1991년 영국의 The Welding Institute(TWI)가 본격적으로 개발하게 되었다.

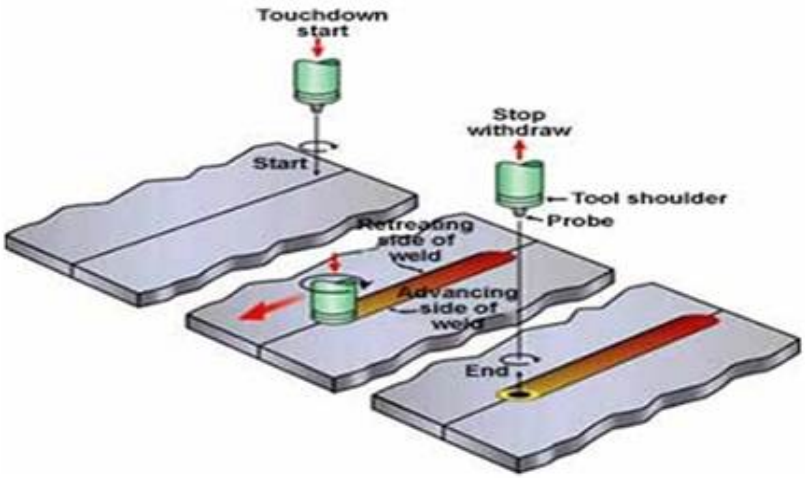


Fig. 2.1 Schematic of Friction Stir Welding

마찰교반접합은 회전하는 공구인 Tool이 접합하고자 하는 피접합체에 닿게 되면 회전체인 Tool과 피접합체간의 마찰력에 의한 마찰열이 발생하게 된다. Tool의 Probe는 피접합체 간의 마찰력에 의한 마찰열이 발생하게 된다. Tool의 Probe는 반 용융상태에서의 피접합체 내부에 교반을 일으켜 접합이 원활하게 도움을 준다. 이때의 피로 접합체는 반 용융상태가 유지되는데 Tool shoulder가 닿은 상태로 진행하게 되면 접합이 이루어진다.

2.1.2 FSW의 특징

FSW는 기존의 용융용접법과는 달리 추가 소모품이 불필요하며, 용접 중 자연친화적인 접합을 수행할 수 있다. FSW의 장점은 다음과 같다.

1) 모재가 녹지 않는 고상용접방식
2) 일반 아크용접에 비해 변형(distortion, shrinkage)이 적음
3) Fumer과 spatter가 발생하지 않음
4) 용접부에 기공이 발생하지 않아 용접 이음부의 기계적 성질이 우수
5) 에너지 효율이 높음 (다른 용접법과 비교해 소비전력이 1/5~1/20)
6) 비소모성 Tool을 사용, Filler wire와 gas의 공급이 불필요하여 경제적임
7) 기계 조작이 간단, 숙련자가 필요 없고 자동화가 용이, 무인화가능

하지만, 여전히 해결되어야 할 문제점을 가지고 있으며, 다음과 같다.

1) 접합부 종단에 Tool의 돌기부의 구멍이 남는다는 점
   (제품의 보수 혹은 end-tad을 부착하여 종단부를 제품의 바깥쪽에 위치하도록 할 필요가 있음)
2) 비소모식 환봉인 Tool을 이용하므로 여성을 형성할 수 없음
3) 강성이 있는 Zig가 필요하고 허용가능 Gap이 협소하여 공정조건 어려움
4) 배면에 Kissing Bend 현상이 나타날 수 있고, 저 융점 금속에 편중 될 수 있으나 여러 종류의 형상이 제안되어 맞대기 용접은 물론 필릿이음부, lap이음부 등도 가능하여 특히 열용량 차이가 큰 대단면 부재의 접합이 가능

2 . 2 GTAW(TIG)의 기초

2.2.1 GTAW의 원리

TIG 용접은 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재간의 아크열에 의해 모재를 용접하는 방법으로서 Fig. 2.2의 원리도와 같이 용접부 주위에 불활성가스를 공급하면서 텅스텐전극봉과 모재와의 사이에 아크를 발생시켜 용접하는 원리이다. Fig. 2.3은 TIG용접의 구성도이다. Fig. 2.3은 TIG용접의 사진이미지이며 텅스텐 전극봉에서 발생된 아크와 모재, 용가재의 이행장면이다.

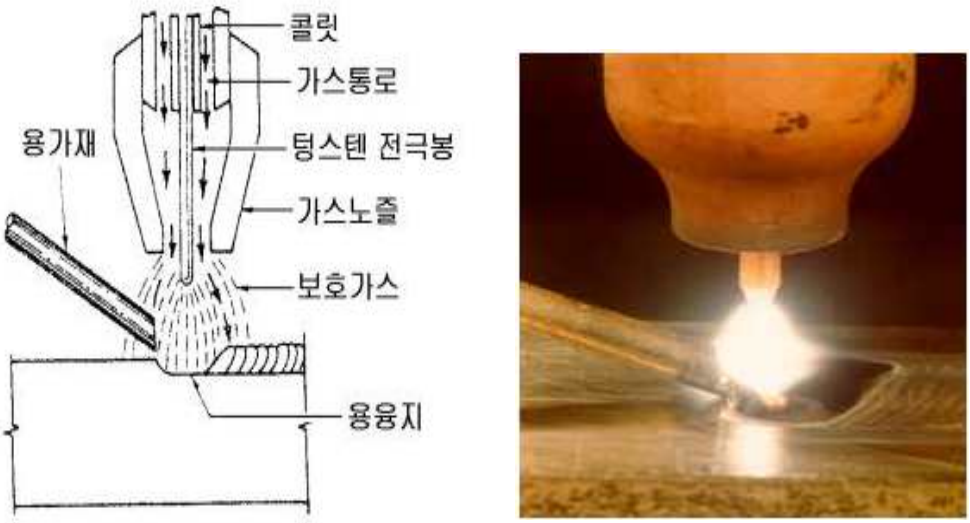


Fig. 2.2 Schematic of GTAWelding

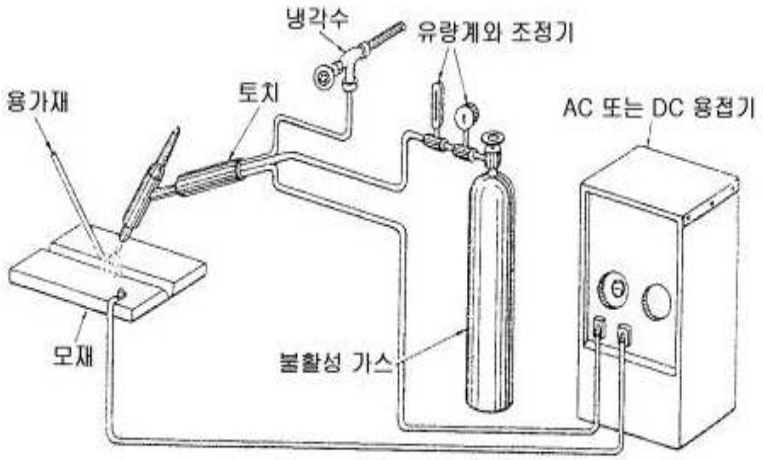


Fig. 2.3 Configuration of GTAWelding

2.2.2 GTAW의 특징

GTAW는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

1) TIG 용접은 용접 입열의 조정이 용이하기 때문에 박판 용접에 매우 좋음
2) 텅스텐 전극봉이 비소모성이므로 용가재의 첨가 없이도 아크열에 의해 모재를 녹여 용접
3) 거의 모든 금속의 용접에 이용할 수 있다. 그러나 용융점이 낮은 금속 즉 납, 또는 주석의 합금 등의 용접에는 이용하지 않음
4) 용접부의 기계적 성질이 우수
5) 내 부식성이 우수
6) 플럭스가 불필요하여 비철금속 용접이 용이
7) 보호 가스가 투명하여 용접작업자가 용접 상황을 잘 파악할 수 있음
8) 용접 스팩터를 최소한으로 하여 전 자세 용접이 가능
9) 용접부 변형이 적음

하지만, 여전히 해결되어야 할 문제점을 가지고 있으며, 다음과 같다.

1) 소모성 용접봉을 쓰는 용접 방법보다 용접 속도가 느림
2) 용접 잘못으로 텅스텐 전극봉이 용접부에 녹아 들어가거나 오염될 경우 용접부가 취화되기 쉬움
3) 부적당한 용접기술로 용가재의 끝부분이 공기에 노출되면 용접금속이 오염
4) 불활성 가스와 텅스텐 전극봉은 다른 용접 방법과 비교해 볼 때 고가
5) SMAW와 같은 다른 용접 방법에 비해 용접기의 가격이 고가

2 . 3 사용재료의 특성

2.3.1 마그네슘의 종류 및 기본성질

마그네슘[5)]은 주기율표 제2족에 속하는 알칼리 토금속이며 탄산염, 황산염, 규산염 등으로 지구상에 널리 다량으로 존대한다. 지각내의 존재량은 나트륨, 칼륨에 이어 제 8위이다. 주요 광석은 마그네사이트, 카널라이트, 돌로마이트, 활석, 사문석, 석면 등이 있으며 가용성 염류로서 바닷물·광천등에도 함유되어 있다. 또한 식물의 엽록소 속에도 클로로필(마그네슘의 킬레이트 화합물)로서 함유되어 있다.

1828년 프랑스 과학자 Antoine Alexander Bussy가 금속칼륨과 용융된 Mg염화물 반응을 1833년 영국 과학자 Michael Faraday는 Mg 산화물에서 전해 환원법을 1866년 독일의 I.G.Farbenindustrie는 Faraday의 전해 환원법을 사용하여 Mg을 생산하였다. 마침내 1921년 Mg 금속이 다양한 분야에 사용될 수 있다는 점을 인식하였고 OXY-fuel welding을 사용하여 마그네슘 용접을 실시하였다.

2차 세계대전 후 생산량이 급증(세계생산량 243,000ton, 세계소비량30,000)하였으며 이때 Mg금속이 고성능 경주용 차와 항공기에 최초로 적용되었으며 Mg의 사용은 1970년 초까지 꾸준히 증가 후 1990년 중반까지 그 관심이 하락하였으나 현재, 재품의 경량화, 더 좋은 연료 효율 등의 이유로 새로운 대체 금속으로 다시 성장하고 있다.

◎ 마그네슘의 기본성질

1) 은백색의 가벼운 금속
2) 대기중에서 급속도로 산화반응
3) 습한 공기 중에서는 광택이 서서히 흐려짐
4) 가열하면 빛을 내면서 연소하여 산화물을 형성 [불꽃반응]
5) 산에는 쉽게 녹으며, 알칼리에는 녹지 않음

Table 2.1 Basic properties of Magnesium Alloys

마그네슘	값[value]	마그네슘	값[value]
원소기호	Mg	융점[°C]	659
원자번호	12	비점[°C]	1103
원자량	24.32	인장강도[Mpa]	270
결정구조	조밀육방정형 [HCP]	용융 잠열[cal/g]	89
밀도[g/cm^3][25°C]	1.738	열전도도(cgs)[0~100°C]	0.40

Table 2.2 Physical properties of magnesium alloys

	Mg[AZ31B]	Mg[AZ91D]	Al[5454계]	Fe[저탄소강]
밀도[g/cm^3][25°C]	1.77	1.81	2.68	7.8
용융점[°C]	630	595	646	1530
융해점[°C]	1090	1055	2467	2750
열전도도[W/mk] [100~300°C]	96	72	134	51
전기전도도[IACS]	18.5%	10.5%	34%	4%

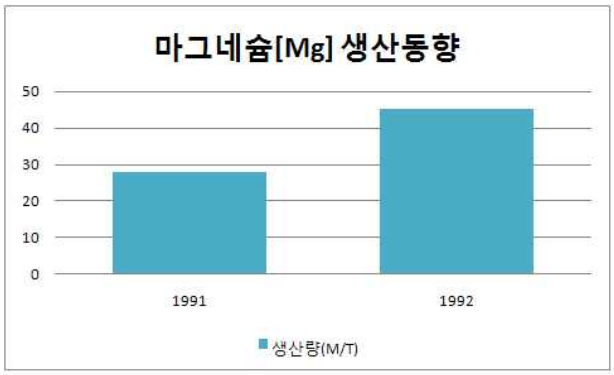
Table 2.3 Mechanical properties of magnesium alloys

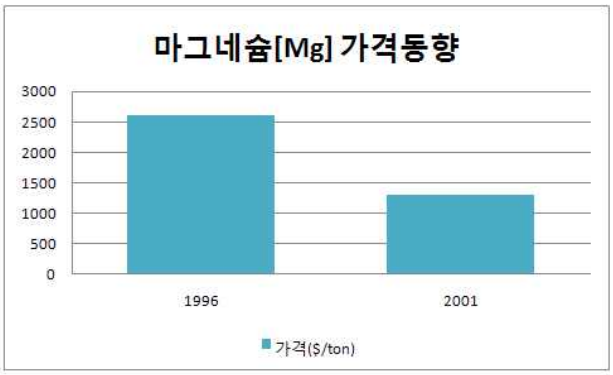
	Mg[AZ31B]	Mg[AZ91D]	Al[5454계]	Fe[저탄소강]
항복강도 ksi [Mpa]	32[220]	33[230]	28[190]	25[170]
인장강도 ksi [Mpa]	42[290]	45[310]	33[230]	40[270]
연신율[%]	15	16	12	40

◎ 마그네슘 합금의 개발 동향

두 차례의 세계 대전을 치르면서 마그네슘 합금의 사용량은 급증하였으나 최근 수 년 전까지도 고강도 알루미늄 합금 개발 등 여타 경량재료에 밀려 사용량이 감소하였다. 그 이유는 마그네슘 합금의 인장강도가 알루미늄 합금과 비슷하나 연성이 좀 낮고 알루미늄 합금이 마그네슘보다 더 높은 비강도를 나타냈으며 가격 또한 알루미늄 가격이 더 싸다.

하지만 마그네슘 합금의 단점 보완으로 최근 수년간 마그네슘 합금의 사용량이 급증하고 있는 추세이다.





중국 : 마그네사이트 매장량 전세계 22.5%, 27억톤 보유

Fig. 2.4 Trend of Magnesium Alloys

◎ 마그네슘 합금의 종류 및 요소

Table 2.4 Characteristic of magnesium alloys

Mg-Al-Zn-(Mn)계 AZ	용접성과 주조성이 우수하여 가장 널리 사용 Zn: 강도를 상승시키기 위해서 적정량 첨가, 응고시 고온 균열 감수성이 증가하기 때문에 첨가량은 제한됨(1%)
Mg-Zn-(Zr)계	Mg-Zn합금은 시효경화 된 합금 Zr을 첨가함으로써 결정립 미세화 촉진
Mg-Th계	Th이 함유된 합금은 환경적인 문제로 사용에 제한, 가격이 고가, 용접성이 좋아짐으로 소량첨가

또한 합금요소로는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

1) Al

- Al 첨가시 상온강도와 용탕 유동성은 증가하지만 고온강도 및 연성감소
- 취약한 금속간 화합물 형성($Mg_{17}Al_{12}$)→연성감소
- 1.5% Al 이상 첨가된 Mg합금→응력 부식균열의 가능성 증가

2) Zn

- 고용강화를 통하여 고온 강도를 향상, 유동성증가, 강도증가, 결정립 미세화
- Al이 7~10% 첨가된 Mg합금에 1%Zn 첨가→고온에서 취성
- 2%Zn이상 첨가→고온 균열이 발생

3) Zr

- 결정립 미세화에 영향을 미침-응고 과정에서 다량의 Zr 고상 입자들이 생성되어 마그네슘 입계에서 균질한 핵생성을 함

4) Mn

- 내 부식성을 증가시키기 위해 첨가

5) Mg_2Si를 형성함으로써 고온 과정에서 크리프 강도를 향상시킴

2.4.2 연강의 종류 및 기본성질

경강(硬鋼)에 대응하는 말이다. 보통 탄소강은 함유된 탄소의 양에 따라 극연강(極軟鋼)에서 최경강(最硬鋼)까지 여러 종류가 있다. 이것은 탄소의 양이 많아질수록 철과 탄소의 화합물인 단단한 시멘타이트가 강철의 지질(地質) 속에 많아지기 때문인데, 탄소강의 경도는 탄소의 양에 따라 변한다. 연강은 탄소가 0.2 % 전후의 것이다.

Table 2.5 Chemical compositions of SS400

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Other elements		Aluminium
							Each	Total	
0.128	0.263	0.015	0.037	2.554	0.18	0.009	0.05	0.15	Rem.

Table 2.6 Mechanical properties of SS400

Yield Strength (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
312	450	37%

제 3 장 실험 방법

3 . 1 실험장치 및 사용재료

본 연구서는 WINXEN사 마찰교반 전용용접기와, 보조열원으로는 DAIHEN 사의 Inverter ELECON 500P TIG 용접기를 사용하였다. FSW Tool 시스템과 TIG Torch와의 결합은 별도의 지그를 제작하여 장착하였다. Fig. 3.1은 FSW 장비와 제원을 나타낸 것이며, Fig. 3.2는 TIG assisted FSW Hybrid process를 나타내었다.

또한, 용접성과 주조성이 우수하여 가장 널리 사용되고 있는 Mg-Al-Zn (Mn)계 마그네슘합금과 탄소함유량이 0.12%-0.3%인 연강에 대한 이종재 접합을 위한 용접기법을 개발하기 위해 TIG 와 FSW 용접기법을 복합한 하이브리드 용접의 개발과 더불어 맞대기 용접이음부의 공정변수 최적화에 관해 기술하고 있다.

ITEMS		RANGE
TYPE		GENTRY TYPE
Welding Speed	X-axis	0.5~10 mm/sec
	Y-axis	0.5~10 mm/sec
	Z-axis	0.5~10 mm/sec
	R-axis	1~20 RPM
Rotation		300~3000 RPM
LOAD Capacity		Max. 3000Kgf

Fig. 3.1 FSW equipment and capacity

Fig. 3.2 Set-up for TIG assisted FSW hybrid welding

본 실험에서 사용 된 이종재 각 시편의 제원은 200mm(L) × 100mm(W) × 3mm(T)이며, 두시편이 맞닿는 부분은 밀링가공 처리하였다. 실험에 앞서 표면은 알코올로 깨끗하게 세척한 후 Butt type으로 접합하였다.

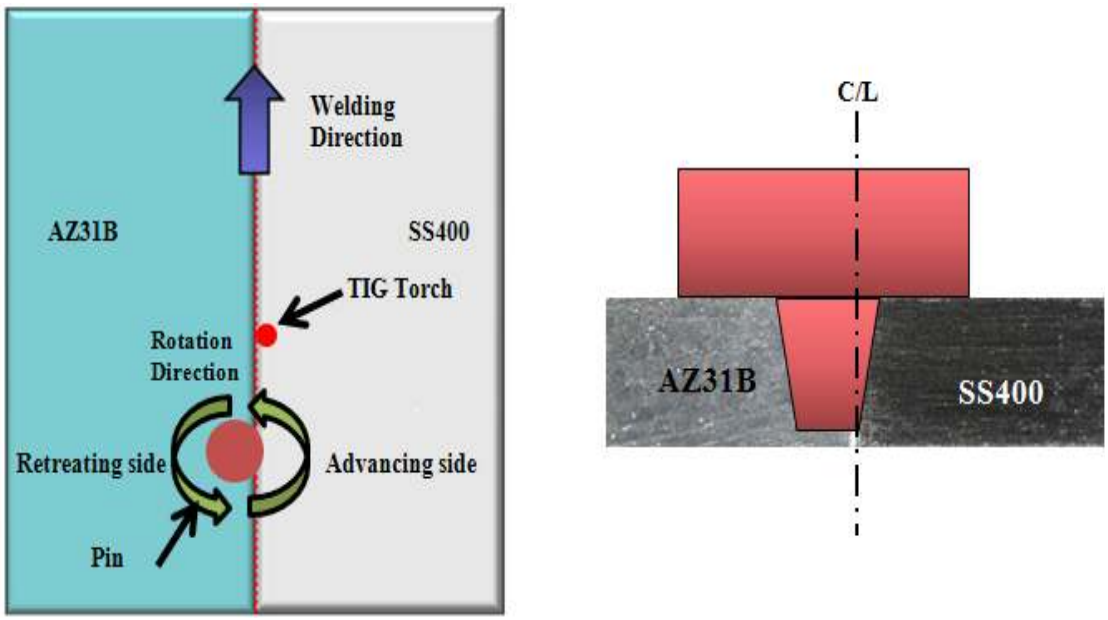


Fig. 3.3 Configuration of specimen and tool position·

3 . 2 공구(Tool)의 재질과 형상

본 실험에 사용된 접합용 툴의 재질은 철계 합금을 접합하기위해 12%Co가 함유된 텅스텐 카바이드(WF20)이며, 긁히거나 재료가 달라붙는 것을 방지하고 우수한 표면을 만들기 위해 Aluminum Titanium Nitride(AlTiN) 코팅을 실시하였다.

Fig. 3.4 접합용 툴의 제원과 제작된 툴의 형상을 나타내었다. Tool probe의 형상은 Smooth frustum type으로 가공하였으며 접합시 모재의 배출을 막고 모재 소성유동과 혼합교반을 촉진시켜주는 Shoulder의 직경은 열이 받는 영향을 줄이기 위해서 15mm로 재조정 하였으며, 오목각(concave)은 3°, Pin 직경은 상부 5mm, 하부 3.5mm이다. Probe길이는 모재보다 0.4mm 작은 2.6mm로 가공하였다.

Table 3.1 Tungsten carbide rod specifications and tool surface coating

Co(±0.5%)	Grade	WC(±0.5%)	Grain Size(μm)	Density (g/㎤)	Hardness (HV30)
12%	WF20	88.0	0.6	14.15	1670

(a) Tungsten carbide rod specifications

Grade	색상	경도 (Hv)	마찰 계수	내식 성	내산 화성	내마 모성	용도
TiN	금색	2000~2400	0.45	○	○	○	절삭공구, 금형, 장식품
ZrN	밝은 금색	2000~2200	0.45	○	△	△	장식품
CrN	은백색	2000~2200	0.25	◎	○	○	기계부품, 금형
AlTiN	**보라 회색**	**2500~2900**	**0.45**	**○**	**◎**	**○**	**절삭공구, 금형, 장식품**
TiC	은백색	3000~3500	0.01	△	△	◎	절삭공구
Al_2O_3	투명~ 회색	2200~4000	0.15	○	◎	○	절연막, 기능막
DLC	회색~ 흑색	1800~8000	0.10	○	○	○	절삭공구, 기능막, 금형

(b) Tool surface coating

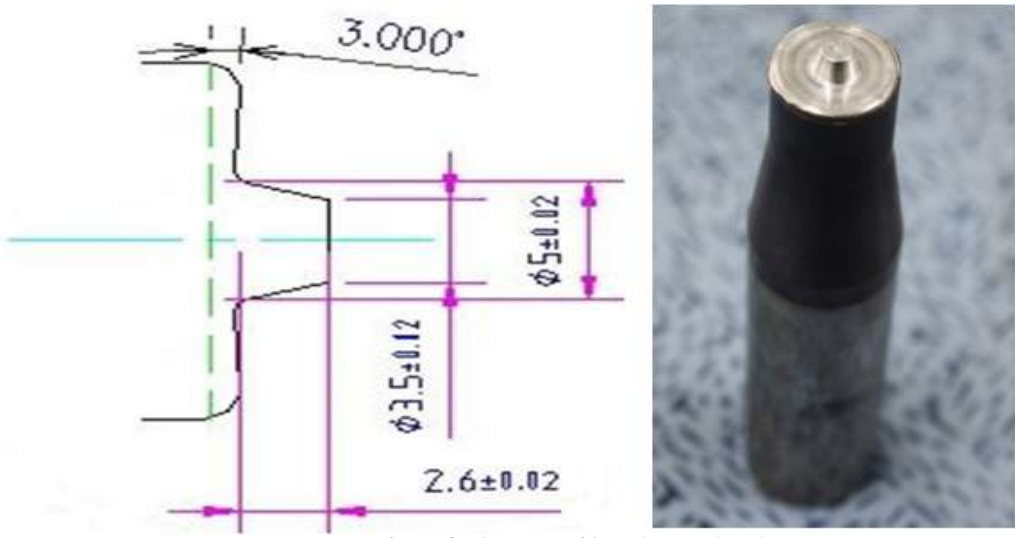


Fig. 3.4 Detail of tool shape

3 . 3 용접공정별 용접조건

이종접합 FSW에서 주요 접합변수는 Tool의 회전속도(Rotating speed), Tool의 이송속도(Travel speed), Tool의 삽입위치(Offset from weld line), Tool의 회전방향(Rotation direction) 등이 있으며, 본 연구에서는 TIG 보조열원을 사용하였으므로 TIG 전류(Current(A)), 보호가스(Shield gas), Torch angle, FSW Tool과 TIG torch 거리 등을 추가로 고려하였다.

보조열원으로 사용할 TIG의 입열 조건을 도출하기위해 연강에 TIG BOP(Bead on plate)를 실시하였고, 이를 통해 전류가 높을수록 용융되어지는 면적이 커짐을 알 수 있었다. Table 3.3은 예비실험을 통해 TIG 적용 조건을 도출하였다.

이종재료의 접합은 기존의 동종재료와 같이 Tool의 삽입위치를 두 재료의 중앙에 삽입하게 되면 재료의 상이한 물성치로 인해 용접이 거의 이루어지지 않는 현상이 보고된바 있다. 또한 이종재료 중 강한 재료에 Tool을 삽입할 경우 Tool의 과열과 마찰로 인해 파손 및 마모현상을 보이므로 두 재료를 맞댄 면에서 Probe를 연질인 마그네슘 합금 쪽으로 삽입하고, Tool의 회전방향이 접합진행방향과 같은 재료에 연강(Advancing side)을 위치하고 그 반대쪽에 마그네슘 합금(Retreating side)을 위치시켰다. 그리고 툴의 회전 방향은 반시계방향(CCW)으로 하여 접합하였으며 보조열원 TIG electrode의 위치는 시편의 맞댄 중앙에서 연강 쪽으로 약 2mm 이동한 위치에 열원을 조사하였다. Fig. 3.5는 TIG Assisted FSW Hybrid welding의 모식도이며, Table 3.4는 TIG Assisted FSW Hybrid의 접합조건을 나타내었다.

Table 3.2 TIG welding condition

No.	Welding Speed (mm/sec)	TIG Current (A)	TIG Pulsed Current (A)	Shield Gas-Ar (ℓ/min)	Torch Angle(°)	Bead Appearance	Cross Section
1	1.2	50	50	13	60		
2	1.2	80	60	13	60		

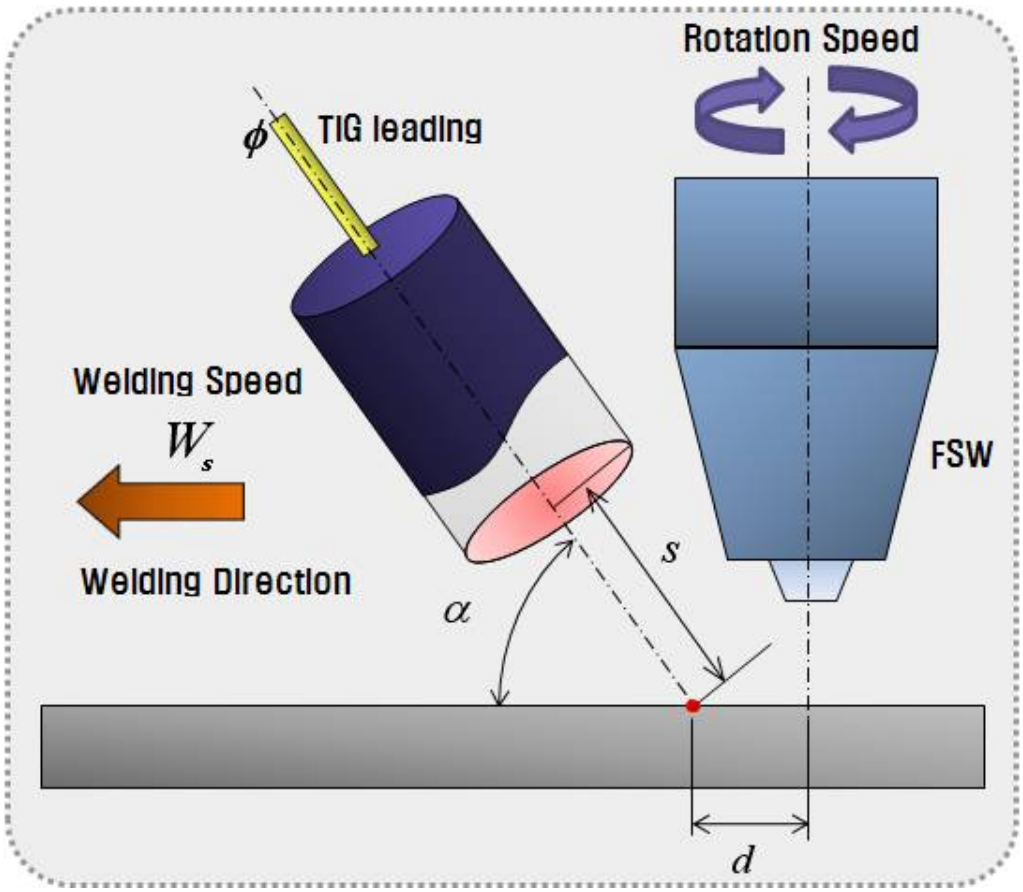


Fig. 3.5 Schematic of TIG assisted FSW hybrid welding

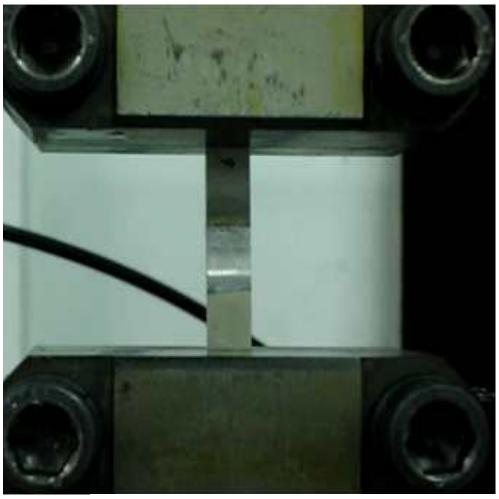
Table 3.3 Welding condition for TIG assisted FSW hybrid welding

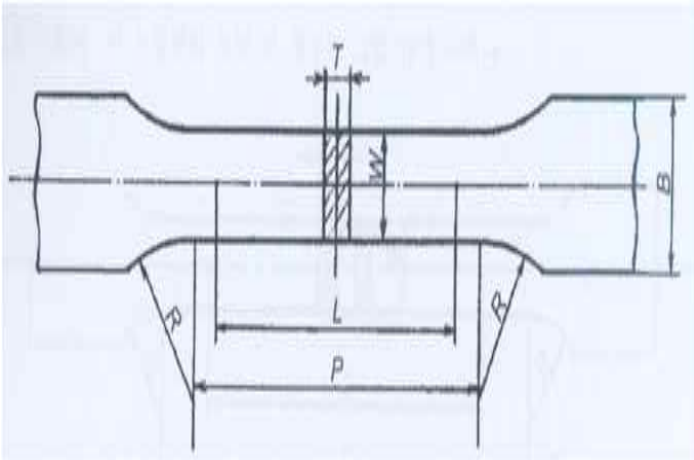
Welding condition		Values
TIG	Current(A)	50 ~ 80
	Shielding gas(ℓ/min)	Ar 13
	Torch angle	60°
FSW	Rotation speed(rpm)	300 ~ 500
	Welding speed(mm/s)	0.8 ~ 2.0
	Shoulder size(mm)	Ø15
	Pin size(mm)	Ø5
	Room temperature	20°
	Tilt angle	3°
FSW-TIG Distance = 25mm		
Leading condition = TIG leading		
Dia. of electrode = 2.4mm		

3 . 4 기계적성능 및 금속학적 특성 실험

3.4.1 인장실험

이종접합부의 인장강도 측정은 SHIMADZU사 EHF-EG200JN-40L 유압식을 사용하였으며, WIN SERVO 프로그램을 사용하였다. 인장시험편은 KS B 0901 13B 호 규격을 사용하여 Load Speed 0.033333mm/sec로 시험하였다. Fig. 3.7은 실험에 사용된 장비와 시편의 규격[1)]을 나타내었다.





	Values					
규격 [KS B 0801 13B]	나비 [W]	표점 거리 [L]	평행부길이 [P]	어깨부 반지름 [R]	두께 [T]	물림부 나비 [B]
	12.5	50	60	20	3	20
Load Speed	0.033333					

Fig. 3.6 Tensile test machine and specimen dimensions for tensile test

3.4.2 경도실험

이종접합부의 경도 측정은 Akashi사의 모델 HM-112의 비커스 경도 시험기로 현미경 배율은 X50이며, 135° 다이아몬드 피라미드 압자를 사용하여 접합방향에 수직인 단면을 절단하여 미세연마 후 에칭을 실시한 후 하중 500gf, 하중시간 10sec 조건으로 상부표면으로 부터 0.5mm, 1.5mm, 2.5mm 지점에서 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였다. Fig. 3.7은 시험에 사용된 장비와 경도 측정 시편을 나타낸 것이다.

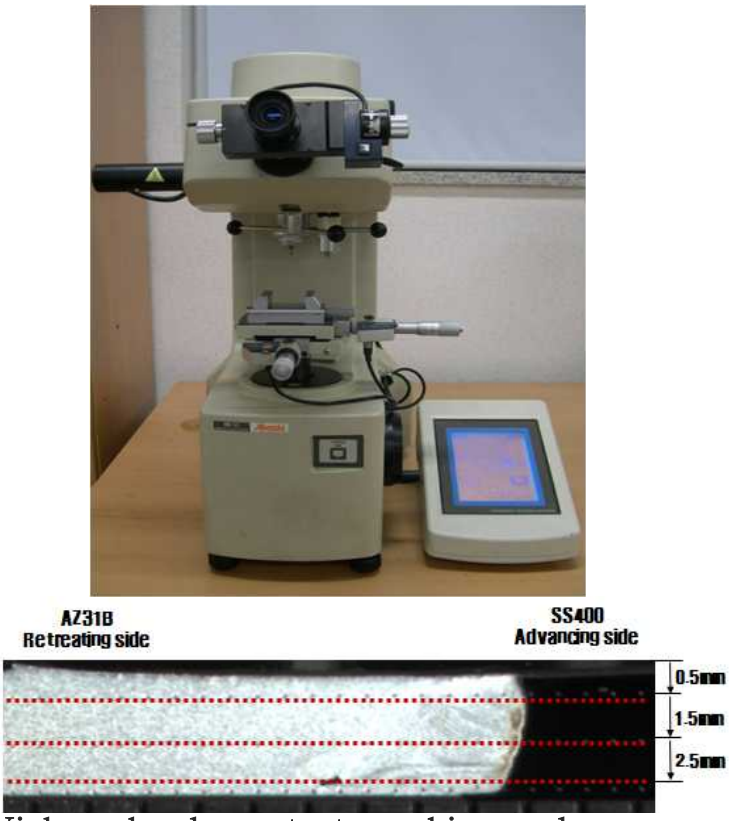


Fig. 3.7 Vickers hardness test machine and measurement points

3.4.3 마크로 및 마이크로조직 분석실험

TIG Assisted FSW hybrid 이종접합부의 결함과 미세조직 관찰을 하기위하여 접합한 소재의 접합부를 절단한 후 마운팅 하여 미세연마 후 접합시험편의 미세조직을 파악하기 위해 접합부의 횡단면(Cross section)을 광학현미경(Optical microscope)이용해 관찰하였다. 광학현미경을 통한 접합부의 조직을 관찰하기위해 시편을 미세 연마 후 마그네슘합금은 피크린산(picric acid) 4.2g, 초산(acetic acid) 10ml, 알코올(methanal) 70ml, 증류수 10ml의 혼합용액을 이용하여 20sec 동안 에칭을 하였으며, 연강은 질산(Nitric acid) 5ml, 에탄올 100ml를 혼합시킨 나이탈 용액을 이용하여 45sec 동안 에칭 후 증류수 세척하여 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 3.8 Optical Microscope

제 4 장 결과 및 고찰

4 . 1 용접공정에 따른 비드별 특성

4.1.1 단독 TIG welding

Table 4.1은 TIG 단독 이종재 용접조건과 비드 형상을 나타낸 것으로서 TIG용접 단독일 경우에는 재료의 상이한 물성 차이로 인해 접합이 불가한 것으로 사료된다.

Table 4.1 Only TIG welding condition and bead profiles

No	Material	Input point	Travel speed (mm/sec)	TIG current(A)	TIG pulsed Current(A)	Shield gas (ℓ/min)	Torch angle (°)
1	AZ31B-SS400	center	1.0	50	50	13	60
2	AZ31B-SS400	center	1.0	70	70	13	60

(a) welding condition

No	TIG Current(A)	Travel speed (mm/sec)	Bead Appearance
1	50	1.0	
2	70	1.0	

(b) bead appearance

4.1.2 단독 Friction stir welding

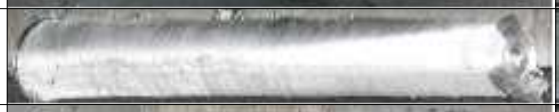
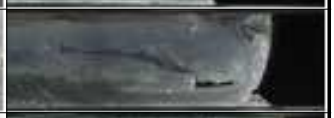
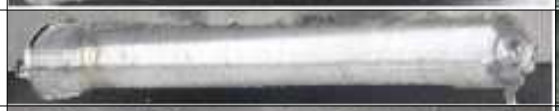
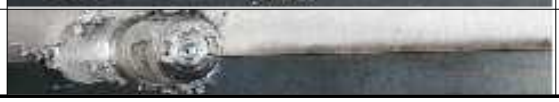
Table 4.2와 4.3은 FSW 단독 이종재 용접 조건과 비드형상을 나타낸 것이다. 용접조건은 예비실험을 통해 비드 표면과 육안검사로 Tool의 회전속도와 이송속도를 제외한 변수들을 고정 시켰다.

본 실험에서는 Tool의 회전 속도와 이송속도를 고려하여 각 조건별 실험을 실시하였다. 접합면의 비드와 접합부 종단의 Probe hole의 형태로 인해 1차적으로 육안검사를 함으로써 접합부 특성을 파악하였다. Table 4.3에 나타낸 바와 같이 Tool의 회전속도가 500rpm 이상 일 때 Material Heating이 발생함으로 용접이 불가 했으며, 양호한 접합 비드 표면과 단면접합특성을 나타낸 접합조건은 Tool의 회전속도 300rpm, 400rpm 그리고 이송속도는 0.8~2.0mm/sec이다. 이 조건을 TIG Assisted FSW hybrid welding의 기본 조건으로 적용하였다.

Table 4.2 Only FSW condition

No.	Material	Adv. side	Tool input point	Rotating Speed (rpm)	Travel Speed (mm/sec)	Rotation Direction
1	AZ31B-SS400	SS400	9:1	300	0.8	ccw
2	AZ31B-SS400	SS400	9:1	300	1.0	ccw
3	AZ31B-SS400	SS400	9:1	300	1.2	ccw
4	AZ31B-SS400	SS400	9:1	300	1.4	ccw
5	AZ31B-SS400	SS400	9:1	300	1.6	ccw
6	AZ31B-SS400	SS400	9:1	300	1.8	ccw
7	AZ31B-SS400	SS400	9:1	300	2.0	ccw
8	AZ31B-SS400	SS400	9:1	400	0.8	ccw
9	AZ31B-SS400	SS400	9:1	400	1.0	ccw
10	AZ31B-SS400	SS400	9:1	400	1.2	ccw
11	AZ31B-SS400	SS400	9:1	400	1.4	ccw
12	AZ31B-SS400	SS400	9:1	400	1.6	ccw
13	AZ31B-SS400	SS400	9:1	400	1.8	ccw
14	AZ31B-SS400	SS400	9:1	400	2.0	ccw
15	AZ31B-SS400	SS400	9:1	500	0.8	ccw
16	AZ31B-SS400	SS400	9:1	500	1.0	ccw

Table 4.3 Bead profiles of FSW weldments

Rotation speed (rpm)	Travel speed (mm/sec)	Bead appearance	Cross section
300	0.8		
	1.0		
	1.2		
	1.4		
	1.6		
	1.8		
	2.0		
400	0.8		
	1.0		
	1.2		
	1.4		
	1.6		
	1.8		
500	0.8		Material Heating
	1.0		Material Heating

4.1.3 TIG assisted FSW hybrid welding

Table 4.4과 4.5는 TIG Assisted FSW hybrid 이종재 용접 조건과 비드 형상을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 기초 실험에서 정한 변수들을 고정으로 툴의 회전속도, 접합 속도, 전류를 변수로 적용하여 각 조건에서의 접합 실험을 실시하였다. 전류는 Tool의 회전속도 300rpm에서 TIG current 80(A), 400rpm에서 TIG current 50(A)을 각각 적용하였다. 그밖에 고정 변수로는 Shield gas 13ℓ/min, Torch angle 60°, 회전방향 CCW, TIG는 접합계면에서 연강쪽으로 2mm 떨어진 지점과 툴에서 25mm 떨어진 지점에 조사 하였다.

Table 4.4 TIG assisted FSW Condition

No	Material	Tool input point	Rotating Speed (rpm)	Travel Speed (mm/sec)	TIG Current(A)	TIG pulsed Current(A)
1	AZ31B-SS400	9:1	300	0.8	80	60
2	AZ31B-SS400	9:1	300	1.0	80	60
3	AZ31B-SS400	9:1	300	1.2	80	60
4	AZ31B-SS400	9:1	300	1.4	80	60
5	AZ31B-SS400	9:1	300	1.6	80	60
6	AZ31B-SS400	9:1	300	1.8	80	60
7	AZ31B-SS400	9:1	300	2.0	80	60
8	AZ31B-SS400	9:1	400	0.8	50	50
9	AZ31B-SS400	9:1	400	1.0	50	50
10	AZ31B-SS400	9:1	400	1.2	50	50
11	AZ31B-SS400	9:1	400	1.4	50	50
12	AZ31B-SS400	9:1	400	1.6	50	50
13	AZ31B-SS400	9:1	400	1.8	50	50
14	AZ31B-SS400	9:1	400	2.0	50	50

Table 4.5 Bead profiles of TIG assisted FSW hybrid weldments

Rotation speed (rpm)	Travel speed (mm/sec)	Bead Appearance	Cross section
300	0.8		
	1.0		
	1.2		
	1.4		
	1.6		
	1.8		
	2.0		
400	0.8		
	1.0		
	1.2		
	1.4		
	1.6		
	1.8		
	2.0		

4 . 2 용접공정에 따른 인장강도 특성

4.2.1 동종재(AZ31B) FSW 용접부의 인장강도

본 실험에 앞서 동종 AZ31B의 마찰교반 접합부의 인장강도 특성을 파악하기 위하여 Table 4.6와 같은 접합조건으로 실험을 실시하였다. Fig. 4.1은 300rpm에 1.2mm/sec의 Stress-Strain Curve 특성을 나타내었다. AZ31B 모재의 인장강도는 약 260Mpa이며, AZ31B의 동종 마찰교반접합부의 최대 인장강도는 Base Metal의 약 85%인 221.9Mpa을 나타냈다.

Table 4.6 Tensile strength of similar material FSW weldments

Rotation speed (rpm)	Travel speed (mm/sec)	Bead appearance	Fractured Specimens	Y.S (Mpa)	T.S (MPa)
300	1.2			212.8	221.9
400	1.2			208.1	231.1

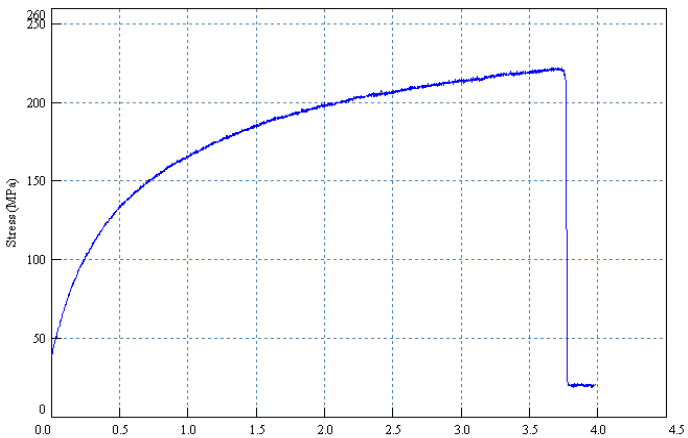


Fig. 4.1 Stress-strain curve for similar material FSW weldments

4.2.2 이종재(AZ31B-SS400) FSW 용접부의 인장강도

이종재의 TIG Assisted Friction stir welding 의 접합특성 및 인장강도를 분석하기 위하여 먼저 FSW 단독으로 접합을 실시하였으며, Table 4.7은 FSW 단독 이종재 접합 조건별 단면, 인장파단면과 인장 강도 값을 나타내었다. 파단은 AZ31B와 SS400의 접합계면에서 나타났으며, Table 4.8의 Stress-Strain Curve를 나타낸 것과 같이 대부분 취성 파단 특성을 보이고 있다. Tool의 회전수 400rpm, 이송속도 1.2mm/sec 조건에서 가장 양호한 접합부와 인장강도를 나타냈다.
Fig. 4.2는 접합 조건별 인장강도를 그래프화 한 것이다.

Table 4.7 Tensile strength of dissimilar materials FSW hybrid weldments

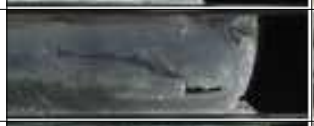
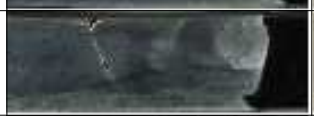
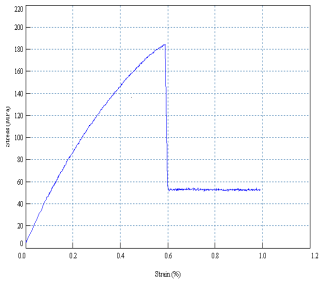
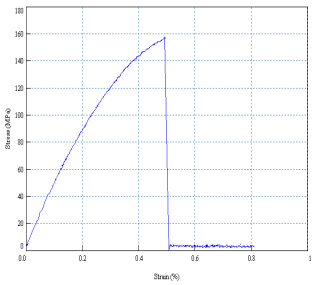
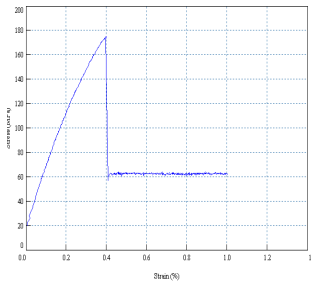
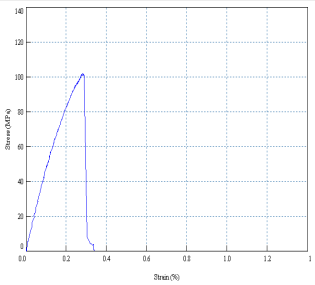
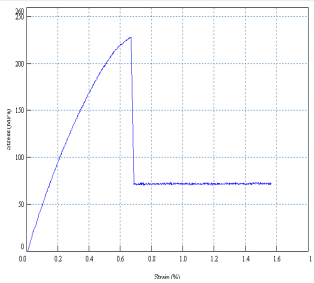
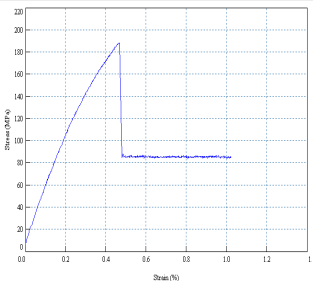
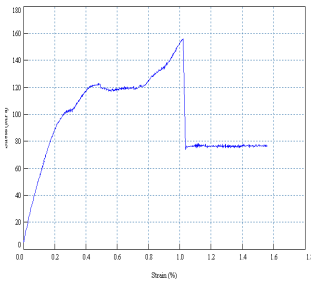
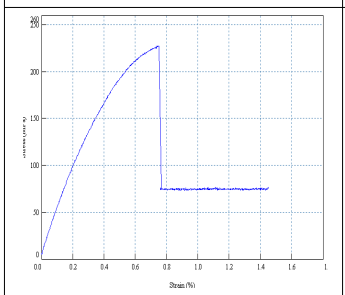
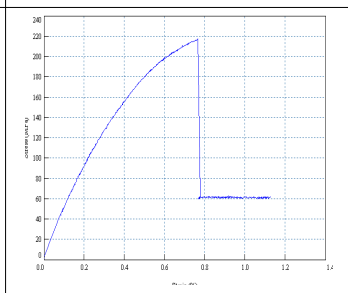
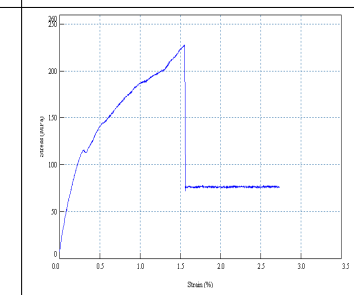
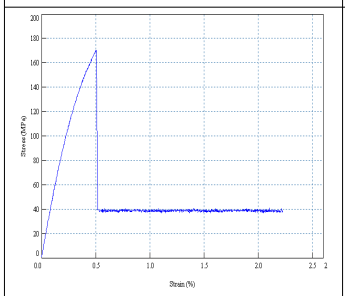
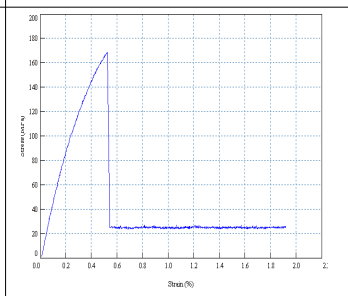
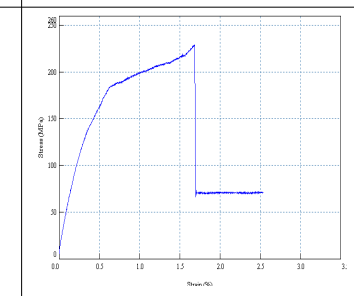
Rotation speed (rpm)	Travel Speed (mm/sec)	Cross section	Fractured specimens	Y.S (Mpa)	T.S (MPa)
300	0.8			160.3	184.2
	1.0			140.6	157.5
	1.2			150.3	175
	1.4			110	122.5
	1.6			20.5	228.1
	1.8			165.3	188.3
	2.0			129.7	155.8
400	0.8			209.4	227.2
	1.0			196.7	217.2
	1.2			197.8	227.8
	1.4			150.8	170
	1.6			150	168.6
	1.8			209.4	228.9

Table 4.8 Stress-strain curve of dissimilar materials FSW hybrid weldments

Rotation speed (rpm)	Travel Speed(mm/sec)		
300	0.8	1.0	1.2
			
	1.4	1.6	1.8
			
	2.0		
			

Rotation speed (rpm)	Travel Speed(mm/sec)		
400	0.8	1.0	1.2
			
	1.4	1.6	1.8
			

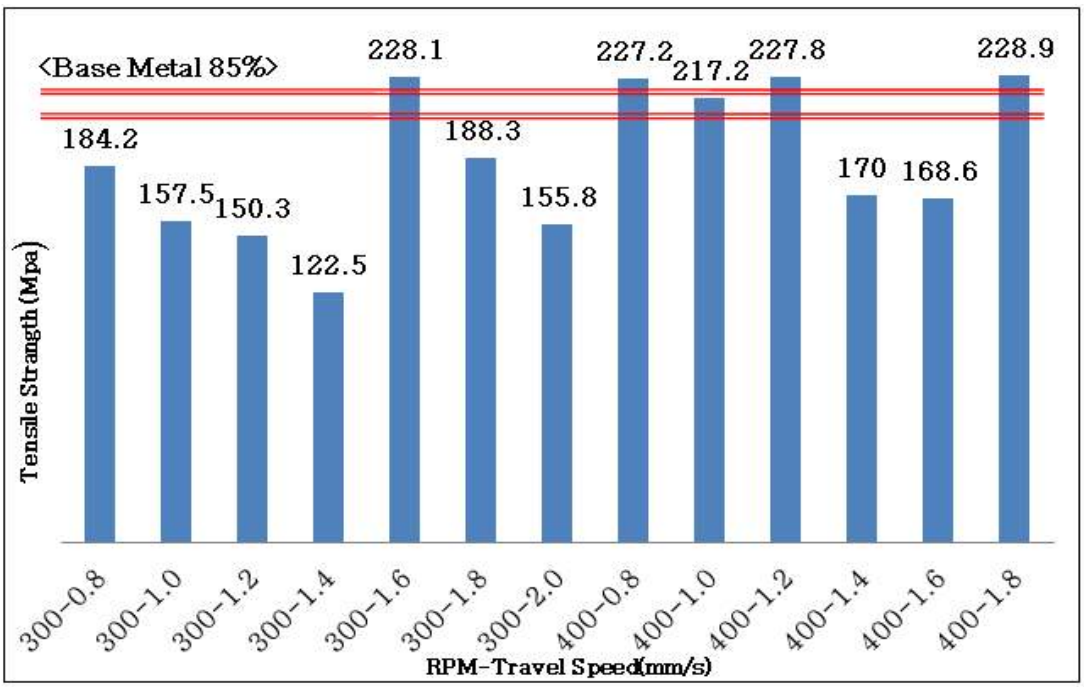


Fig. 4.2 Comparison of tensile strength for dissimilar materials FSW weldments with process parameters

4.2.3 이종재(AZ31B-SS400) TIG assisted FSW 하이브리드 용접부의 인장강도

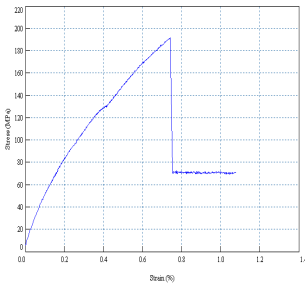
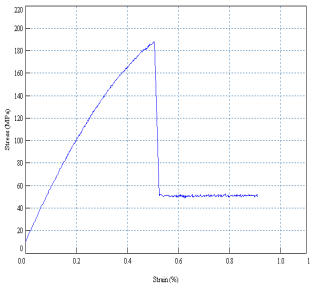
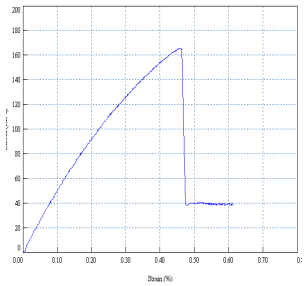
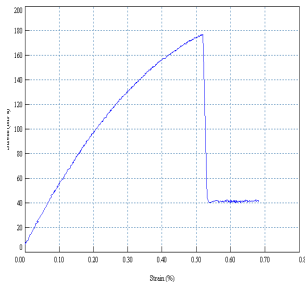
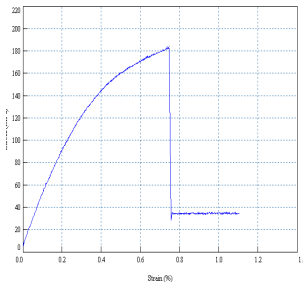
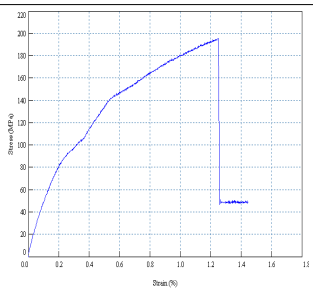
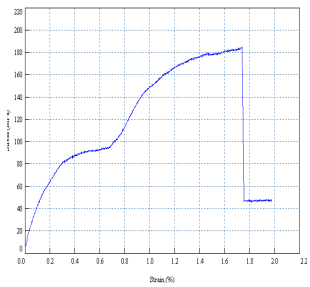
Table 4.8은 이종재의 TIG Assisted FSW hybrid welding 의 접합특성 및 인장 파단면과 인장강도 값을 나타내었다. 인장파단은 FSW단독 접합 특성과 유사하게 대부분 AZ31B와 SS400의 접합계면에서 나타났으며, FSW 단독 접합의 취성 파단 특성과 같으나 연신율면에서 단독에 비하여 높음을 알 수 있었다. 이는 SS400의 접합부분에 TIG를 보조 열원으로 가함으로서 거의 대등 한 온도 분포 하에서 Tool의 소성교반으로 인한 접합계면의 강도가 상승한 것으로 사료 된다. Stress-Strain curve는 Table 4.9에 나타내었다. 접합계면이 아닌 탈락된 연강 입자가 보이긴 하나 접합계면에서 파단이 됨으로써 인장강도에 기인하지 않는 것으로 사료된다. 위의 실험 결과를 통하여 Tool의 회전수와 이송속도가 적정 입열양이 었을 때 접합 특성이 좋아짐을 알 수 있었다.

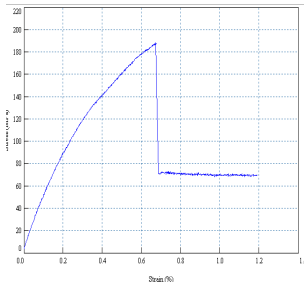
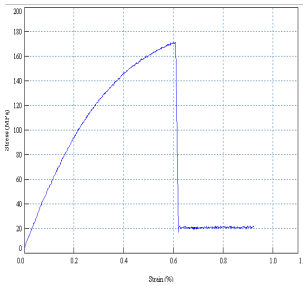
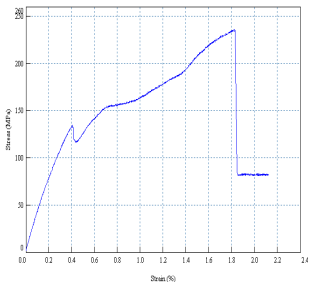
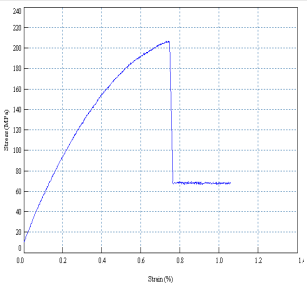
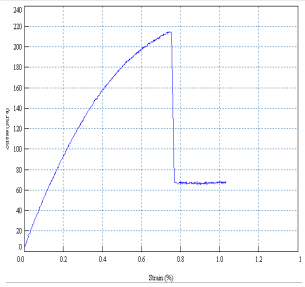
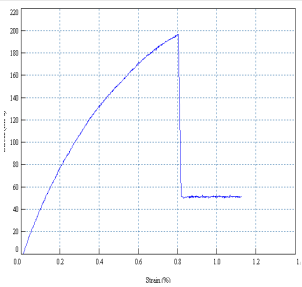
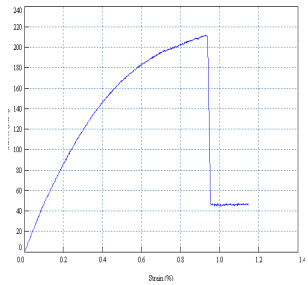
실험결과 최대 인장강도 235.8Mpa로, 이는 AZ31B 합금모재의 최대 인장강도(260Mpa)의 약 91%에 달하는 우수한 인장강도 값을 얻을 수 있었다. Fig. 4.3는 접합 조건별 인장강도를 그래프화 한 것이다.

Table 4.9 Tensile strength of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments

Rotation speed (rpm)	Travel speed (mm/sec)	Bead appearance	Fractured specimens	Y.S (Mpa)	T.S (MPa)
300	0.8			163.1	191.4
	1.0			168.3	188.1
	1.2			143.6	165
	1.4			159.7	177.2
	1.6			170.6	183.9
	1.8			180.6	195.6
	2.0			176.1	184.7
400	0.8			167.2	187.8
	1.0			158.1	171.7
	1.2			202.8	235.8
	1.4			190.8	206.7
	1.6			190.9	214.7
	1.8			176.7	196.7
	2.0			197.5	211.7

Table 4.10 Stress-strain curve of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments

Rotation speed (rpm)	Travel speed(mm/sec)		
300	0.8	1.0	1.2
			
	1.4	1.6	1.8
			
	2.0		
			

Rotation speed (rpm)	Travel speed(mm/sec)		
400	0.8	1.0	1.2
			
	1.4	1.6	1.8
			
	2.0		
			

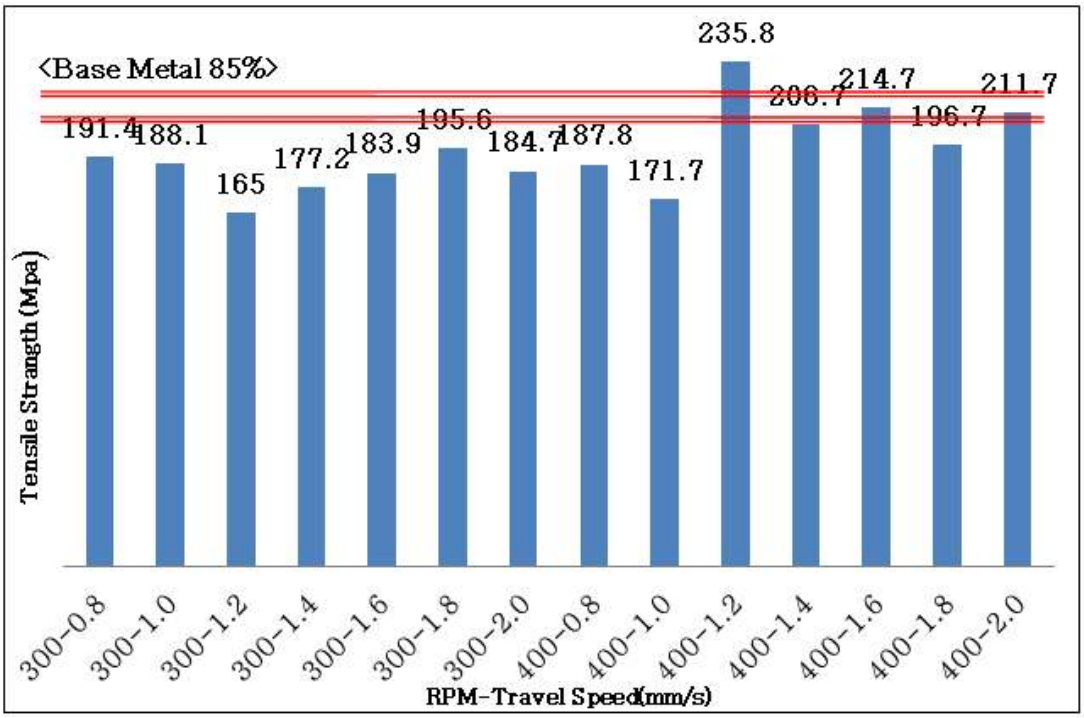


Fig. 4.3 Comparison of tensile strength for dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments with process parameters

4 . 3 용접공정(FSW, TIG assisted FSW 하이브리드 용접)에 따른 경도특성

Fig. 4.4 및 4.5는 단독 마찰교반접합부 및 TIG assisted FSW hybrid 접합부에서 인장강도가 가장 높게 나타난 용접조건(툴의 회전속도가 400rpm, 이송속도 1.2mm/s, TIG current 50A, 보호가스 13ℓ/min)에 대한 경도 분포를 나타낸 것이다. 단독 마찰교반접합부의 경우 마그네슘합금(AZ31B) 측의 경도분포는 모재영역과 교반부를 비교했을 때 경도 값이 거의 비슷했으며, 연강(SS400)측의 접합부의 경도 양상은 접합부 근처에서 AZ31B합금 영역과 달리 모재영역보다 높게 나타났다. 그리고 TIG assisted FSW hybrid 접합부의 경우 마그네슘 합금측은 모재에 대비하여 경도가 그다지 크게 변화하지 않고 연강(SS400)은 접합부 근방에서 모재보다 경도가 상승하는 단독 마찰교반접합부의 경우와 전체적인 양상이 동일하게 나타났다. 그러나 TIG assisted FSW hybrid 용접부의 연강(SS400)측의 경도가 단독의 마찰교반접합부에 비해 소폭으로 감소함을 보였다. 이는 단독의 마찰교반접합부보다 하이브리드 공정시 온도가 더 상승하여 재결정 및 결정립 크기가 다소 증가했기 때문이라고 사료된다.

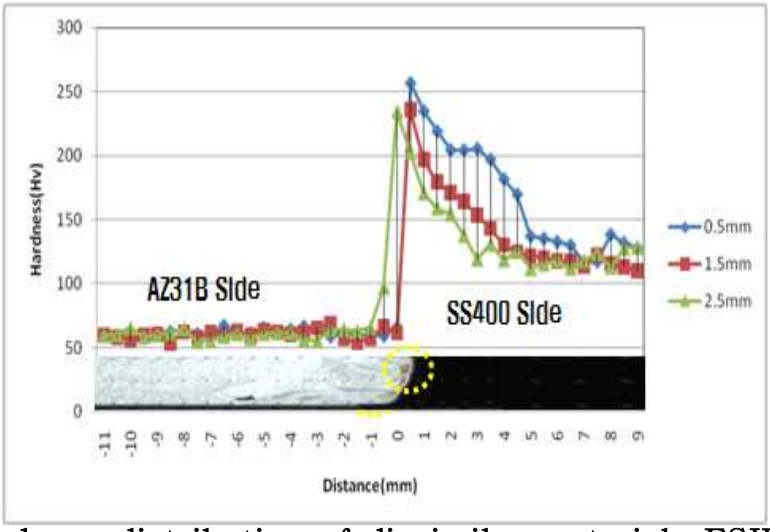


Fig. 4.4 Hardness distribution of dissimilar materials FSW weldments

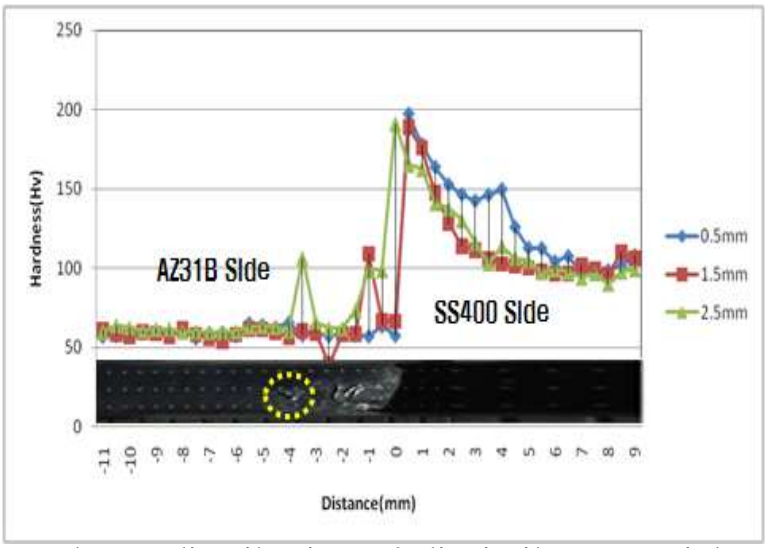


Fig. 4.5 Hardness distribution of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments

4 . 4 용접공정(FSW, TIG assisted FSW 하이브리드 용접)에 따른 미세조직 특성

4.4.1 Microstructure of FSW dissimilar joint

단독 마찰교반 접합부의 매크로 단면사진과 각각의 위치별 마이크로 조직을 나타낸 것이다. 단독 마찰교반 접합부의 마그네슘 합금 측 모재(A)는 미세한 등축정 조직으로 구성되어 있으며 (B)의 HAZ와 TMAZ에서는 미세조직의 큰 차이는 발견되지 않으나 모재(A)보다 공정중 열 이력에 의해 결정립크기가 다소 조대화된 현상을 보이고 있다. 또한 (c)의 Stir zone의 경우 소성유동으로 인한 Mg rich와 steel rich가 반복적으로 겹쳐있는 선명한 어니언링 형상을 나타내었다. 또한 연강의 상부(E)와 하부(F)에서의 결정립형상과 크기의 유의차는 발생하지 않음을 알 수 있다.

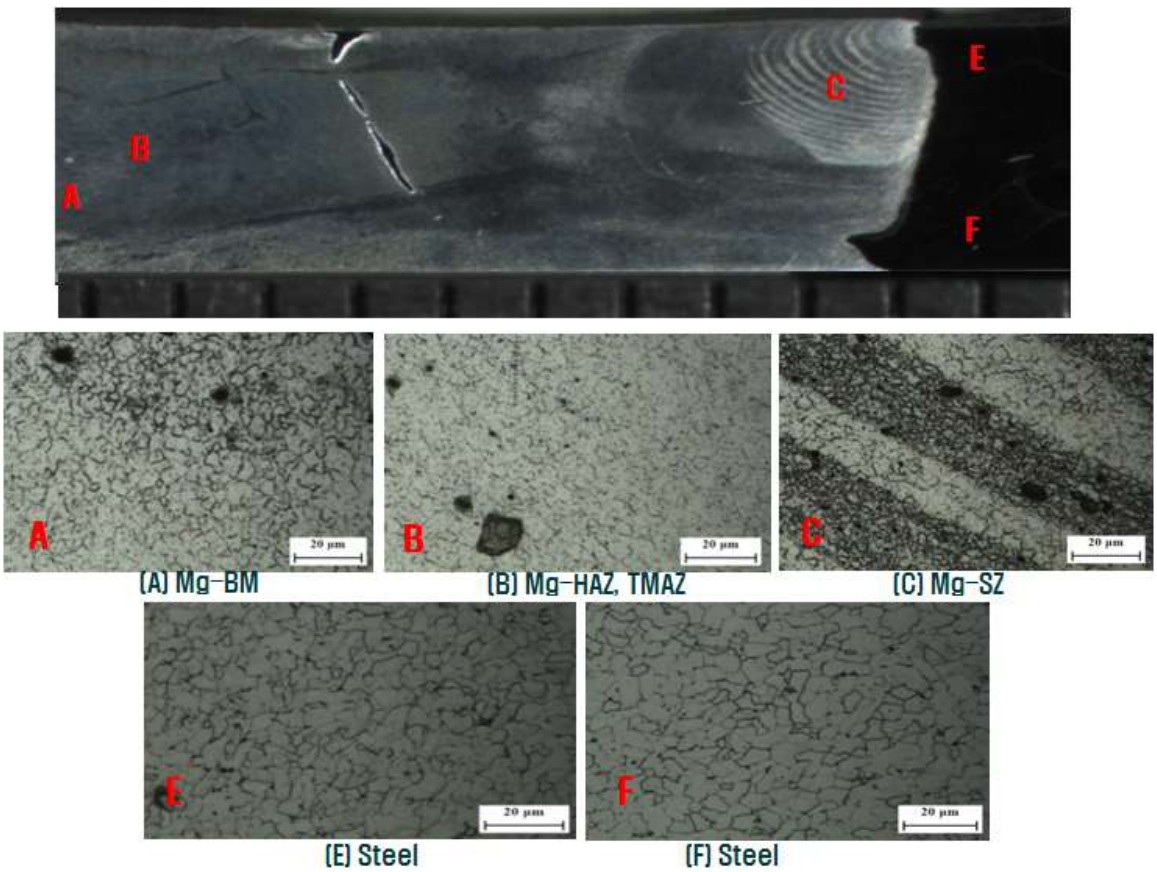


Fig. 4.6 Microstructure of dissimilar materials FSW weldments

4.4.2 Microstructure of TIG assisted FSW dissimilar joint

마찰교반 하이브리드 접합부의 HAZ와 TMAZ (B)의 경우에서는 FSW 접합부보다 작은 크기의 결정립 관찰되었고, 특히 TMAZ는 기계적 영향에 따른 소성변형으로 인해 일정한 방향성을 가진 연신된 조직이 관찰되었다. 동적 재결정 영역인 SZ는 마찰교반 하이브리드 접합부의 경우 FSW 접합부에 비해 극심한 소성변형이 나타난 미세 재결정 조직이 관찰되었다. 이는 연강부에 조사된 TIG 열원의 열영향이 소성유동을 증가시킨 결과로 판단된다. 연강측(SS400)의 상부에서는 단독 마찰교반접합시보다 더욱 조밀한 조직을 나타내는데 이는 TIG 열원 및 마찰열에 의한 가공경화의 영향을 받은 것으로 사료된다.

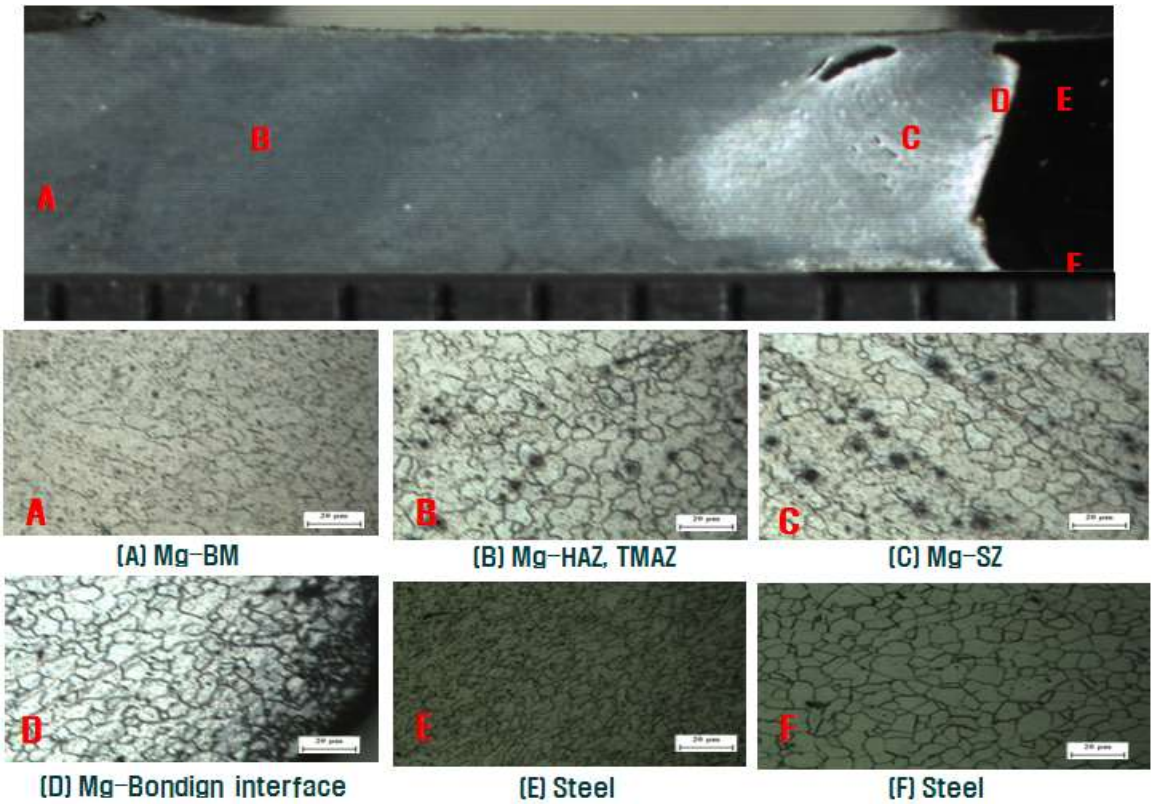


Fig. 4.7 Microstructure of dissimilar materials TIG assisted FSW hybrid weldments

제 5 장 결 론

TIG 용접을 보조열원으로 사용한 마찰교반 접합법을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) TIG assisted FSW hybrid 기술을 적용하여 접합할 경우에서 툴 회전속도 400rpm, 이송속도 1.2mm/sec, 50A일 때 최대인장강도 235.8MPa로 AZ31B 합금 모재(최대 인장강도260Mpa)의 약 90%에 해당하는 강도를 얻었다. 단독 마찰교반용접부에 비해 보다 향상된 강도를 보였고 특히, 연성이 다소 큰폭으로 증가함을 확인할 수 있었다.

2) TIG assisted FSW hybrid 접합부의 경우 마그네슘 합금측은 모재에 대비하여 경도가 그다지 크게 변화하지 않고 연강은 접합부 근방에서 모재보다 경도가 상승하는 단독 마찰교반접합부의 경우와 전체적인 양상이 동일하게 나타났다. 그러나 TIG assisted FSW hybrid 접합부의 연강 측 경도가 단독의 마찰교반접합부에 비해 소폭으로 감소함을 보였다. 이는 단독의 마찰교반접합부보다 하이브리드 공정시 온도가 더 상승하여 재결정 및 결정립 크기가 다소 증가했기 때문이라고 사료된다.

3) 마찰교반 하이브리드 접합부의 HAZ와 TMAZ의 경우에서는 FSW 접합부 보다 작은 크기의 결정립 관찰되었고, 특히 TMAZ는 기계적 영향에 따른 소성변형으로 인해 일정한 방향성을 가진 연신된 조직이 관찰되었다. 동적 재결정 영역인 SZ는 마찰교반 하이브리드 접합부의 경우 FSW 접합부에 비해 극심한 소성변형이 나타난 미세 재결정 조직이 관찰되었다. 이는 연강에 조사된 TIG 열원의 열영향이 소성유동을 증가시킨 결과로 판단된다. 연강의 상부에서는 단독 마찰교반접합시보다 더욱 조밀한 조직을 나타내는데 이는 TIG 열원 및 마찰열에 의한 가공경화의 영향을 받은 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] Korean Industrial Standards : KS B 0801, Test pieces for tensile test for metallic materials, 2007 Ed.

[2] Heung-Ju Kim, et al.: "Microstructures and Mechanical Properties of the Friction Stir Welded Dissimilar Joint of AZ31B/A6061" Journal of KWS, Vol. 24, No. 4, August 2006, pp290-294

[3] Y.C. Chen and K Nakata: "Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel",Materials &Design, Vol. 30, Issue 9, October 2009, pp 3913-3919

[4] Y.C. Chen and K Nakata: "Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel",Materials &Design, Vol. 30, Issue 9, October 2009, pp 3913-3l

[5] KWJS: 용접·접합 편람 Vol.1, 2008

[6] K. Chattopadhyay, et al.: "Microstructural development of dissimilar weldments: case of MIG welding of Cu with Fe filler", Journal of materials science 37 (2002) 2345-2349

[7] C. Maldonado: T. H. North, " Softened zone formation and joint strength properties in dissimilar friction welds", Journal of materials science 37 (2002) 2087-2095

[8] Z. Sun, R. Karppi: "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview", Journal of materials processing technology 59 (1996) 257-267

감사의 글

어느덧 또다시 졸업이라는 것을 하게 되었습니다. 지난 2년이라는 시간을 뒤돌아보면 너무나 짧게 느껴집니다. 끝이 아닌 또 다른 시작이기에 더욱 힘을 내봅니다.

석사과정 동안 끊임없는 가르침과 격려로 저를 일깨워 주신 방한서 교수님과 방희선 교수님께 감사드립니다. 또한, 2년 동안 부족했던 분야의 지식을 열성을 다해 가르치고 조언을 아끼지 않으셨던 이창우 교수님께도 감사드립니다.

2년이 넘는 시간 동안 항상 같이 걸어왔던 구조용접 실험실 식구들과 석사생활 동안 힘낼 수 있게 옆에서 도와준 가영이, 미현이, 혜영이, 은명이, 내화와 바쁜 와중에도 항상 논문을 걱정해주고 배려해준 성휘오빠, 든든한 태훈오빠, 착한 도성이, 절친 명준이, 학부실험실 선배였던 철우오빠에게도 감사의 인사를 올립니다. 그동안 저에게 많은 도움을 주신 모든 분과 이 작은 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

끝으로 전주연이란 사람을 이 세상에서 빛나는 한 사람이 될 수 있도록 사랑으로 보살펴 주신 가족 아빠, 엄마, 상민 오빠에게 고개 숙여 감사를 드립니다.

2010년 12월 6일 늦은 저녁 구조용접실험실에서

전 주 연 올림

저작물 이용 허락서

학 과	선박해양공학과	학 번	20097100	과 정	석 사
성 명	한글 : 전 주 연 한문 : 全 洲 衍 영문 : Jeon Ju Yeon				
주 소	광주광역시 동구 용산동 한국아파트 101동 506호				
연락처	e-mail : wjswndus00@nate.com				
논문제목	한글 : TIG Assisted FSW을 이용한 이종재료(AZ31B/SS400) 용접부의 용접성 평가				
	영문 : Evaluation of the Weldability of Dissimilar Materials (AZ31B/SS400) Butt Joints by TIG Assisted Friction Stir Welding				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함(다만, 저작물의 내용변경은 금지함)
3. 배포・전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송・출력을 허락함

동의여부 : 동의(o) 반대( )

2011 년 2월

저작자 : 전 주 연 (인)

조선대학교 총장 귀하