creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000241860

2011年 8月

碩士學位論文

Hybrid Welding Process(FSW+TIG)을 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)의 Tool Plunge Point에 따른 용접부의 열적 특성 해석

朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

金 鉦 翰

Hybrid Welding Process(FSW+TIG)을 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)의 Tool Plunge Point에 따른 용접부의 열적 특성 해석

Experimental investigation of temperature with change in tool plunge point in dissimilar butt joint by Hybrid Welding Process(FSW+TIG)

2011年 8月

朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

金 鉦 翰

Hybrid Welding Process(FSW+TIG)을 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)의 Tool Plunge Point에 따른 용접부의 열적 특성 해석

指導敎授 房 漢 瑞

이 論文을 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2011年 8月

朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

金 鉦 翰

金鉦翰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 朝鮮大學校 敎授　權　寧　燮　印

2011年 8月

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Tables ····· Ⅶ
List of Figures ····· Ⅷ
Abstract ····· Ⅸ

제 1 장 서 론

1 . 1 연구배경 및 목적 ····· 1

제 2 장 이론적 배경

2 . 1 FSW의 원리 및 특징 ····· 2
2.1.1 FSW의 원리 ····· 2
2.1.2 FSW의 특징 ····· 4
2 . 2 GTAW의 원리 및 특징 ····· 6
2.2.2 GTAW의 특징 ····· 7
2 . 3 Mg 합금의 종류 및 특성 ····· 8
2.3.1 Mg 합금의 역사 ····· 8
2.3.2 Mg 합금의 특성 ····· 10
2 . 4 연강의 특성 ····· 12

제 3 장 실험 방법

3 . 1 실험장비 및 사용재료 ····· 14
3.1.1 Hybrid Welding Process(TIG+FSW) 실험장비 · 14
3.1.2 사용재료의 특성 및 성질 ····· 16
3 . 2 공구(Tool)의 재질과 형상 ····· 18
3 . 3 마찰교반용접 조건 선정 ····· 20
3 . 4 실험방법 ····· 23
3.4.1 인장시험 ····· 23
3.4.2 경도시험 ····· 24
3.4.3 온도 측정 시험 ····· 25
3.4.4 마이크로조직 분석시험 ····· 26

제 4 장 시험결과 및 고찰

4 . 1 접합조건별 비드의 형상 ····· 30
4.1.1 TIG 용접 실험 ····· 30
4.1.2 Hybrid Welding Process(TIG+FSW) 실험 ····· 31
4 . 2 마찰교반용접부의 인장강도 특성 ····· 33
4.2.1 AZ31B 동종 인장시험 ····· 33
4.2.2 Hybrid Welding Process(TIG+FSW)의
인장시험 ····· 34
4 . 3 마찰교반용접부 횡단면의 경도특성 ····· 37

4 . 4 Hybrid Welding Process(TIG+FSW)의
온도분포 ····· 39
4 . 5 마찰교반용접부의 미세조직 ····· 42

제 5 장 결론 ····· 44

Reference ····· 45

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 ····· 10
Table 2.5 Chemical compositions of SS400 ····· 12
Table 2.6 Mechanical properties of SS400 ····· 12
Table 2.7 The role of contained elements in SS400 ····· 13
Table 3.1 Chemical composition and mechanical property ····· 16
Table 3.2 Tungsten carbide rod specifications and Tool surface coating ····· 18
Table 3.3 TIG-FSW condition ····· 21
Table 4.1 TIG welding parameters and obtained bead shapes ····· 30
Table 4.2 TIG Assisted FSW parameters and obtained bead shapes ····· 31
Table 4.3 Bead appearance of similar joint specimen cinsidered for tensile test ····· 33
Table 4.4 Bead appearance and tensile test result of dissimilar materials Hybrid Welding Process(TIG+FSW) ····· 35
Table 4.5 Tool broken of tool plunge point 7:3 ····· 36
Table 4.6 Tool broken of tool plunge point 5:5 ····· 36

List of Figures

Fig. 2.1 Schematic of friction stir welding ····· 3
Fig. 2.2 Microstructural regions in FSWelded Al alloys ····· 3
Fig. 2.3 Schematic of GTAWelding ····· 6
Fig. 3.1 WINXEN FSW equipment details ····· 15
Fig. 3.2 Setup for TIG-FSW process ····· 15
Fig. 3.3 Configuration of weld specimen ····· 17
Fig. 3.4 Tool dimensions ····· 19
Fig. 3.5 Tool chape ····· 19
Fig. 3.6 Schematic of TIG assisted FSW process ····· 22
Fig. 3.7 Welding configuration for TIG-FSW Tool Plunge Point ···· 22
Fig. 3.8 Tensile test specimen dimensions ····· 23
Fig. 3.9 Vickers hardness test machine and specimen ····· 24
Fig. 3.10 Thermo-Couple 모식도 ····· 26
Fig. 3.11 기기와 Setup ····· 26
Fig. 3.12 열화상 카메라와 스펙 ····· 27
Fig. 3.13 열화상 카메라 Setup ····· 27
Fig. 3.14 열화상 카메라 측정 포인트 ····· 28
Fig. 3.15 Optical microscope ····· 29
Fig. 4.1 Tested specimen and Stress-Strain curve ····· 33
Fig. 4.2 Tensile test graph ····· 35
Fig. 4.3 Hardness distribution of dissimilar
(Hybrid Welding Process) ····· 38
Fig. 4.4 Thermo-Couple setup ····· 39
Fig. 4.5 Thermo-Couple Result ····· 40
Fig. 4.6 Thermo-Cam setup ····· 41
Fig. 4.7 Thermo-cam Result ····· 41
Fig. 4.8 Microstructural(Hybrid welding process(TIG+FSW)) ····· 43

ABSTRACT

Hybrid Welding Process(FSW+TIG)을 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)의 Tool Plunge Point에 따른 용접부의 열적 특성 해석

Kim, Jung-han
Advisor : Prof. Bang, Han-sur, Ph.D.
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering ,
Graduate School of Chosun University

In this study, it is intended to investigate the weldability and mechanical characteristics of hybrid welding process(TIG+FSW) for dissimilar materials Mg alloy(AZ31B) and Mild Steel(SS400). From the results, the tensile strength of FSW dissimilar joint is found to be lower than that of hybrid welding process(TIG+FSW) at optimum welding conditions. Due to increase in plastic flow and formation of finer recrystallized grains at the TMAZ and SZ by TIG preheating in hybrid welding process(TIG+FSW), the hardness values are more in hybrid welding process(TIG+FSW) compared to FSW. From the microstructure analysis, smaller grain size is observed and parent metal elongated grains are deformed in same direction around the nugget zone in TMAZ of AZ31B by hybrid welding process(TIG+FSW) compared to FSW. At nugget zone, coarse grain size is appeared in hybrid welding process(TIG+FSW) when compared to FSW because of more plastic flow due to laser preheating effect. Refined ferrite-bainite microstructure is formed at weld nugget of SS400. But more brittle fracture is found in FSW welded specimens. In hybrid welding process(TIG+FSW) dissimilar joint ductile mode of fracture is found to occur at AZ31B side with fewer brittle particles. Mixed mode of cleavage area and ductile fracture was

observed at SS400 side.

제 1 장 서 론

1 . 1 연구배경 및 목적

최근, 각종 산업분야에 있어서 경량화 구조가 증가하고 있으며 특히 수송기계분야(철도, 자동차, 선박, 항공기 등)에 있어서 연비절감에 의한 경량화 및 환경보호에 대한 요구가 높아짐에 따라 경량 부재의 적용이 빠른 속도로 확대되고 있다.

Friction stir welding(FSW:마찰교반접합) 기술은 마찰교반용접으로 용접에 의한 변형이 적고 용접결함, 흄, 유해광선의 발생 없이 우수한 품질의 접합부를 얻을 수 있으며, 기계적 특성이 우수한 접합 방법이다. 경량금속(Mg, Al, Cu합금 등)은 기존 용융용접에서 문제시 되고 있는 응고균열, 산화, 기공 등의 결함을 최소화 할 수 있는 고상접합공정인 FSW가 다양한 산업분야에서 크게 주목받고 있으며 이미 적용되어지고 있다. 접합대상이 기존의 알루미늄과 알루미늄 동종의 경량합금에서 이종재의 경량합금의 접합 뿐 아니라 경합금과 철강 재료의 접합까지 확대 되고 있다. 모든 구조물을 지지하는 부분의 부재는 강도가 뛰어난 부재를 사용하여야 하므로 경량합금과 철계 합금의 이종접합이 필연 시 되고 있다. FSW를 이용하여 이종재료를 접합할 경우 물리적인 성질이 상이하게 달라 기존 동종재료의 FSW접합 방식으로는 건전한 접합부를 쉽게 얻을 수 없어 두 재료 중 연질의 재료에 마찰교반접합 Tool을 삽입하여 건전한 접합부를 얻은 결과가 보고된바 있으나 연구가 많이 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 용접성이 우수하여 가장 많이 사용되고 있는 Mg-Al-Zn(Mn)계 마그네슘합금(AZ31B)과 탄소함유량이 0.12%-0.3%인 연강(SS400)의 이종재료를 FSW와 TIG welding을 결합한 하이브리드 용접을 실행함으로써 접합부의 미세조직 및 기계적 강도를 측정하고 접합특성과 최적조건에 따른 최적온도를 파악하여 선박, 자동차 및 항공기, 수송기계 부품 제작에 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

2 . 1 FSW의 원리 및 특징

2.1.1 FSW의 원리

FSW(마찰교반용접)은 Fig. 2.1에서 보는바와 같이 비소모성 접합용 Tool을 회전시켜 접합 모재에 삽입하고 이송하게 되면 Tool과 피 접합재 사이에 마찰열이 발생한다. 이 마찰열로 인해 피 접합재는 연화되고 Tool의 상부에서 가하는 하중과 용접방향으로 전진시키는 기계적인 힘에 의해 Tool을 이동시키면서 마찰열에 의해 소성유동이 일어나 연화된 부분을 Advancing side에서 Retreating side로 압출되게 하여 강제적으로 혼합이 되게 함으로서 고상접합부가 만들어지게 하는 접합 방법이다.

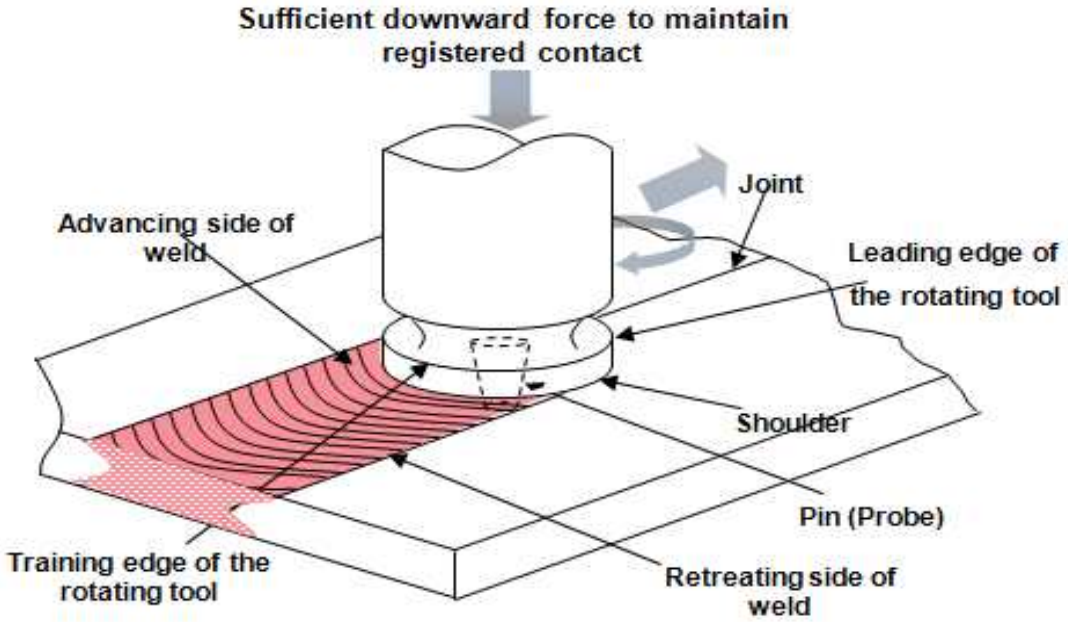
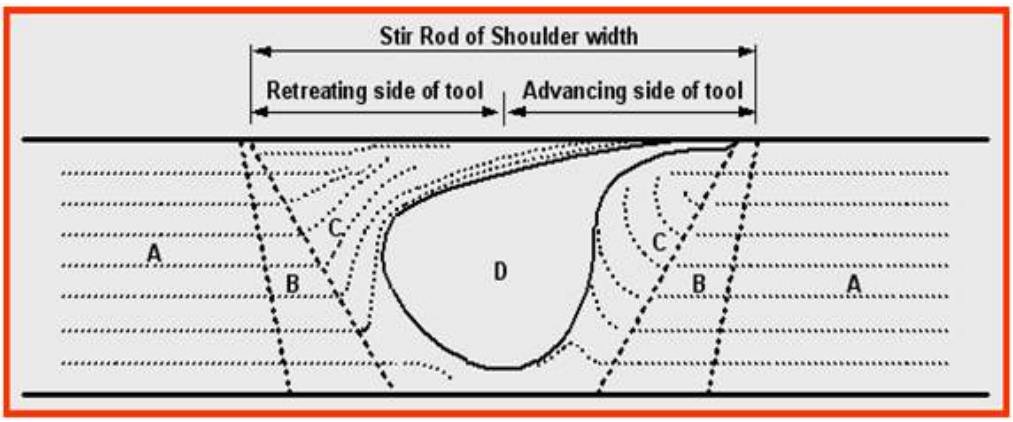


Fig. 2.1 Schematic of Friction Stir Welding



A: BM (Base Metal)

B: HAZ (Heat Affected Zone; affected by heat generated during FSW)

C: TMAZ (Thermomechanically Affected Zone; contains material that interacts indirectly with the tool , plastically deformed with partial recrystallization)

D: SZ (Stir Zone; contains material that interacts directly with the tool, dynamically recrystallized)

Fig. 2.2 Microstructural regions in FSWelded Al alloys

2.1.2 FSW의 특징

FSW는 기존의 용융용접법과는 달리 별도의 열원, 용접봉, 용가재, 보호가스 등이 불필요하며 용접 중 유해광선(적외선, 자외선 등)이나 유해가스, 유해물질이 배출되지 않기 때문에 경제적이면서도 환경 친화적인 접합기술로 평가받고 있다. FSW의 장점을 정리해보면 다음과 같다.

1) 용융용접이 아닌 고상용접으로 용접에 따른 변형이 적다.

2) 기존 용융용접과 달리 별도의 열원 발생장치, 용접봉, 용가재, 분위기 가스 등을 사용할 필요가 없으며 접합 후 후가공이 필요치 않고 접합 시 소비전력이 매우적다.

3) 용융 용접에 비해 변형이 적기 때문에 용접부의 조직적, 기계적 특성이 매우 우수하고 잔류응력이 거의 발생하지 않는다.

4) 용융 용접에서 발생하기 쉬운 기공, 균열 등의 결함이 거의 발생하지 않는다.

5) 경량합금(Mg, Al, Ti, Cu 합금)등으로 제조된 주조 제품, 금속기지 복합재료 등 기존 용접 기술의 적용이 거의 불가능했던 재료의 접합이 가능하여 이종재료의 용접에도 적합하다.

6) 접합 중 유해가스나 유해 광선이 발생하지 않아 작업환경이 친환경적이다.

7) 작업자의 숙련도나 기량에 크게 의존하지 않고, 자동화와 표준화가 가능하다.

한편, FSW가 단점은 다음과 같다.

1) 접합부 뒷면에 Tool의 압력과 마찰압력을 견딜 수 있는 back-up 재료가

필요하다.

2) 마찰교반접합부 종단에 Tool 핀부분의 구멍이 남는다.
하지만 이와 같은 단점을 근본적으로 해결하거나 후처리 공정으로써 해결할 수 있는 방법이 개발되어지고 있다. 마찰교반용접부 종단의 돌기부 구멍은 종단부에 end-tab을 부착하여 종단부를 바깥쪽으로 이동시켜 제거하는 방법과 공구의 핀이 종단부에 다다를 즈음 핀 부분만 상승하여 돌기부가 생기지 않도록 하는 방식이 사용되고 있다. 또한 FSW 용접 후 핀이 없는 평평한 공구를 회전시켜 용접부의 표면을 2차 소성변형을 시켜 연화된 금속이 종단부의 구멍을 없애주는 방법이 적용될 수 있을 것이다.

2 . 2 GTAW의 원리 및 특징

2.2.1 GTAW의 원리

Fig. 2.2와 같이 GTAW는 TIG 용접이라고도 불리우며 비소모성 텅스텐 용접봉과 모재간의 아크열에 의해 모재를 용접하는 방법으로서 용접 부 주위에 불활성 가스를 공급하면서 용접하는 것이다.

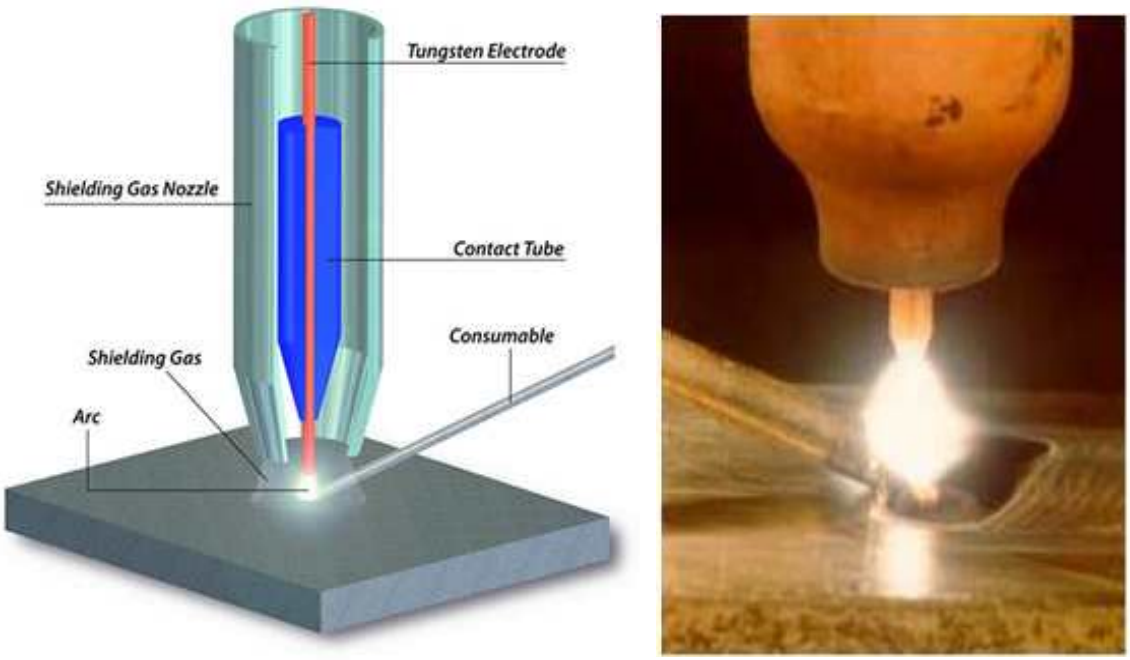


Fig. 2.3 Schematic of GTAWelding

2.2.2 GTAW의 특징

TIG 용접의 장점과 단점은 다음과 같다.

1) 장점

- 용접부의 기계적 성질이 우수하다.
- 용접 부 변형이 적다.
- 보호가스가 투명하여 용접 작업자가 용접 상황을 잘 파악할 수 있다.
- 플럭스가 불필요하여 비철금속 용접이 용이하다.
- 용접 스패터를 최소한으로 하여 전 자세 용접이 가능하다.
- 내 부식성이 우수하다.

2) 단점

- 소모성 용접봉을 쓰는 용접보다 용접속도가 느리다.
- 부적당한 용접 기술로 용가재의 끝부분이 공기에 노출되면 용접금속이 오염된다.
- 용접 잘못으로 텅스텐 적극 봉이 용접부에 녹아 들어가거나 오염될 경우 용접부가 취화되기 쉽다.
- SMAW와 같은 다른 용접 방법에 비해 용접기의 가격이 비싸다.
- 불활성 가스와 텅스텐 전극봉은 다른 용접방법에 비교해 볼 때 고가 이다.

2 . 3 Mg 합금의 종류 및 특성

2.3.1 Mg 합금의 역사

마그네슘은 알칼리 토금속으로서 탄산염, 황산염, 규산염 등 지구상에 가장 널리 다량으로 존재하는 것 중 하나이다. 지각 내 존재량은 나트륨, 칼륨에 이어 여덟 번째 이다. 가용성 염류로서 바닷물, 광천 등에도 함유되어 있다. 식물의 엽록소 속에도 마그네슘의 킬레이트 화합물인 클로로필로 함유되어 있다.

1828년 프랑스의 과학자 Antoine Alexander Bussy가 금속칼륨과 용융된 Mg 염화물 반응을 사용하고 1833년 영국의 과학자 Michael Faraday는 Mg 산화물에서 전해 환원법을 사용, 1866년 독일의 I.G.Farbenindustrie의 전해 환원법을 사용하여 Mg을 생산하였다. 1921년부터 Mg금속이 다양한 분야에서 사용될 수 있다는 점을 인식하였고 OXY-fuel welding을 사용하여 마그네슘 용접을 실시하였다.

2차 세계대전 이후 생산량이 급증(세계소비량 30,000ton, 세계생산량 243,000ton)하였스며 이때 Mg금속이 최초로 항공기와 고성능 경주용 차에 적용이 되었으며, Mg의 사용은 1970년대 초까지 꾸준히 증가한 후 1990년 중반까지 그 관심이 하락하였으나 현재, 좋은 연료 효율에 대한 제품의 경량화 등을 이유로 새로운 대체 금속으로 다시 성장하고 있다.

2.3.2 Mg 합금의 특성

1) 은백색의 매우 가벼운 금속
2) 대기 중에서는 급속도로 산화반응
3) 습한 공기 중에서 광택이 서서히 흐려짐
4) 가열을 하면 빛을 내면서 연소하여 산화물을 형성(불꽃반응)
5) 알칼리에는 녹지 않으나, 산에는 쉽게 녹음

Table 2.1 Basic properties of Magnesium Alloys

마그네슘	값(value)	마그네슘	값(value)
원소기호	Mg	용융점(℃)	650
원자번호	12	비점(℃)	1100
원자량	24.31	인장강도(MPa)	260
결정구조	조밀 육방정형 (HCP)	용융잠열(cal/g)	90
밀도(g/cm^3)(25℃)	1.738	열전도도(cgs)(0~100℃)	0.40

Table 2.2 Physical properties of magnesium alloys

	Mg(AZ31B)	Mg(AZ91D)
밀도(g/cm^3)(25℃)	1.77	1.81
용융점(℃)	650	595
융해점(℃)	1090	1055
열전도도(W/mk)(100~300℃)	96	72
전기전도도(IACS)	18.5%	10.5%

Table 2.3 Mechanical properties of magnesium alloys

	Mg(AZ31B)	MG(AZ91D)
항복강도 ksi(MPa)	32(220)	33(230)
인장강도ksi(MPa)	42(290)	45(310)
연신율(%)	15	16

2.3.2 Mg 합금의 종류

마그네슘은 다음과 같은 합금으로 나누어 진다.

Table 2.4 Characteristic of magnesium alloys

Mg-Al-Zn AZ합금	주조성과 용접성이 좋아 가장 널리 사용됨 Zn: 강도를 상승시키기 위해서 적정량을 첨가, 응고시 고온 균열 감수성이 증가하기 때문에 첨가량 제한(1%)
Mg-Zn-(Zr)	Mg-Zn 합금은 시효경화 합금 Zr을 첨가하여 결정립 미세화 촉진 효과
Mg-Th	Th(Thorium)은 환경문제로 인해 사용이 제한되어 있어 합금에 아주 소량만 첨가, 가격 또한 고가, 용접성이 좋아짐

마그네슘 합금의 요소는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

1) Al(Aluminium)
- 용탕 유동성과 상온강도가 증가하지만 고온강도 및 연성이 감소함
- 1.5%이상 Al 첨가 시 응력 부식균열의 가능성이 증가됨
- 금속 간 화합물 생성($Mg_{17}Al_{12}$)으로 연성이 감소됨

2) Zn(Zinc)
- 고용강화를 하여 고온강도를 향상시키고, 결정립 미세화와 유동성과 강도 증가함
- 2%이상 Zn 첨가 시 고온 균열이 발생함
- Al이 7~10% 첨가된 합금에 Zn을 1% 첨가를 하게 되면 고온에서 취성이 생김

3) Zr(Zirconium)

- 첨가 시 응고 과정에서 다량의 Zr 고상 입자들이 생성되어 마그네슘 합금 입계에서 균일한 핵생성을 하여 결정립 미세화에 영향을 미침

4) Mn(Manganese)

- 첨가 시 내 부식성 증가

2 . 4 연강의 특성

탄소강은 함유된 탄소의 양에 따라 극연강(0.12%이하), 연강(0.12%~0.30%), 경강(0.30%~0.50%), 최경강(0.50~0.90)으로 나누어진다. 본 논문에 쓰인 SS400은 연강(0.12%~0.30%)으로서 가장 많이 사용되는 강종으로 주요 강도 부를 제외하고 배부분의 기계 및 구조물의 보조 부재로 사용되고 용접성과 가공성 경제경이 좋다는 장점이있다. 현재 건축용 자재, 자동차용, 선박용, 해양구조물 건축 교량용으로 널리 사용 되고 있다.

Table 2.5 은 본 논문에 사용된 SS400의 화학적 성분을 나타낸 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 Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Melting Point (℃)
312	450	37	1,473

Table 2.7은 탄소강의 함유원소의 역할을 나타낸 것이다.

Table 2.7 The role of contained elements in SS400

Mn	선철 중에 존재하거나 탈산제의 일부로 잔존한 것이 강에 잔류하여 Ferrite에 고용되거나 MnS의 형태로 존재함 연신율은 변하지 않고 인장강도가 높아지고 고온 소성 및 주조성이 좋아짐
Si	선철 중에 존재하거나 탈산제의 일부로 잔존한 것이 강에 잔류하여 Ferrite에 고용됨(0.3~0.5%) 결정 크기가 커지고 인장강도, 탄성한계, 경도는 높아지나 연신율, 충격강도 접합성이 떨어짐
P	Fe와 결합하여 Fe3P 화합물을 생성, 결정이 크로 거칠어짐 Fe3P의 형태로 입계에 편석(Segregation)하여 충격내성을 감소시킴 경도 및 인장강도는 높아지나 연신율은 떨어지고 상온취성의 원인이 되므로 공구강에서는 0.025%이하로 유지
S	Mn가 결합하여 MnS을 생성, 잔류량은 Fe와 결합하여 FeS 생성 FeS는 공정(Eutectic)을 만들어 입계에 망상으로 분포하여 인장강도, 연신율, 충격내성을 저하시킴 FeS는 용융점(1193℃)이 낮아 고온취성의 원인이 되므로 보통 0.03%이하 유지
Cu	극소량이 Fe에 고용되어 인장강도, 탄성한계, 내부식성 향상 고탄소강에서는 0.25% 정도면 양호

제 3 장 실험 방법

3 . 1 실험장비 및 사용재료

3.1.1 Hybrid Welding Process(TIG+FSW) 실험장비

본 논문에 사용된 FSW(Friction Stir Welding)장비는 WINXEN사에서 제작한 용접기를 사용하였으며, 보조열원으로 사용한 TIG 용접기는 일본의 DAIHEN 사의 Inverter ELECON 500P TIG 용접기를 사용하였다. FSW Tool 시스템과 TIG Torch와의 결합은 별도의 지그를 제작하여 장착하였다. 또한 시편을 지지할 수 있는 Backing Plate는 STD 11 Plate를 열처리 가공하여 제작하였다.

Fig. 3.1은 FSW 장비와 제원을 나타낸 것이며, Fig. 3.2는 Hybrid Weldig Process(TIG+FSW)를 나타낸 것이다.

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 WINXEN FSW equipment details

Fig. 3.2 Setup for TIG-FSW process

3.1.2 사용재료의 특성 및

본 실험에 사용된 Mg-Al-Zn(Mn)계 마그네슘 합금인 AZ31B는 가공용으로 가장 많이 사용되는 합금이고 실용금속 중 가장 경량한 금속이고 비강도와 내력, 찍힘성, 주조성이 우수하다는 장점이 있다. 탄소함유량 이 0.12%~0.30%인 연강 SS400은 가장 많이 사용되는 강종으로서 주요 강도 부를 제외하고 대부분의 기계 및 구조물의 보조부재로 사용되고 용접성과 가공성 경제성이 좋으며 현재 건축용 자재와 자동차, 선박, 해양구조물 건축 교량용으로 널리 사용 되고 있다. 각 시편의 크기는 200mm(L) × 100mm(W) × 3mm(T)이며 두 시편이 맞닿는 부분은 밀링가공을 하였으며, 시편표면은 알코올로 깨끗하게 세척한 후 Butt type으로 접합하였다.

Table 3.1에는 실험에 사용된 재료의 화학적 성분 조성과 기계적 성질을 나타냈다. Fig 3.3은 접합시편의 배치를 나타내었다.

Table 3.1 Chemical composition and mechanical property

Material	Chemical composition (wt%)								
AZ31B	Al	Fe	Si	Cr	Mg	Ti	Cu	Mn	Zn
	3.0	-	0.05	-	bal		0.05	0.2	1.0
	Mechanical properties								
	Yield Stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile Stress (MPa)	Heat conduction coff. (mm/m ℃)	Density (g/cc)	Melting Point			
	220	15	260		1.74	650			

Material	Chemical composition (wt%)								
SS400	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	기타
	0.16	0.32	1.63	0.008	0.013	0.03	0.04	-	-
	Mechanical properties								
	Yield Stress (MPa)	Elongation (%)	Tensile Stress (MPa)	Heat conduction coff. (mm/m ℃)	Density (g/cc)	Melting Point			
	312	37	450	0.012	7.85	1,473			

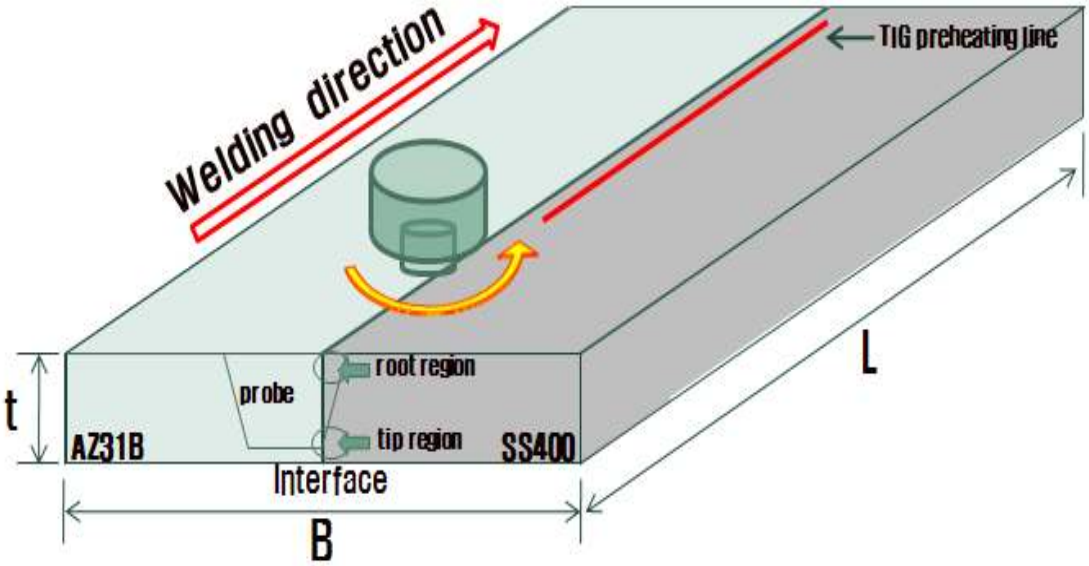


Fig. 3.3 Configuration of weld specimen

3 . 2 공구(Tool)의 재질과 형상

본 실험에 사용된 접합용 툴의 재질은 철계 합금을 접합하기위해 12%Co가 함유된 텅스텐 카바이드(WF20) 재질을 다이아몬드 연삭기를 이용하여 연삭하였으며 내마모성과 내열성, 경도를 향상시키기 위하여 나노코팅 (AlTiM/Si3N4)을 실시하였다. 툴의 특성과 표면코팅특성은 Table 3.2에 나타내었다.

Fig. 3.4 접합용 툴의 제원과 제작된 툴의 형상을 나타낸 것이다. Tool probe의 형상은 Smooth frustum type으로 가공하였으며 접합 시 모재의 배출을 막고 모재 소성유동과 혼합교반을 촉진시켜주는 Shoulder의 직경은 AZ31B의 열을 줄이기 위해 15mm이며, Concave(오목각)은 3°, Probe 직경은 상부 5mm, 하부 3.5mm이다. Probe 길이는 모재보다 0.4mm 작은 2.6mm로 가공하였다.

Table 3.2 Tungsten carbide rod specifications and Tool surface coating

(a) Tungsten carbide rod specifications

Co(±0.5%)	Grade	WC(±0.5%)	Grain Size(μm)	Density (g/cc)	Hardness (HV30)
12%	WF20	88	0.6	14.15	1670

(b) Tool surface coating

Grade	마찰계수	미세경도 (Gpa)	최대사용 온도(℃)	특징 및 적용분야
AlTiN / Si_3N_4	0.45	45	1200	◆ 차세대 고성능 나노구조 및 나노경도 ◆ 뛰어난 초내열성 ◆ 건식 고속가공조건에서 뛰어난 성능

(b) Tool surface coating

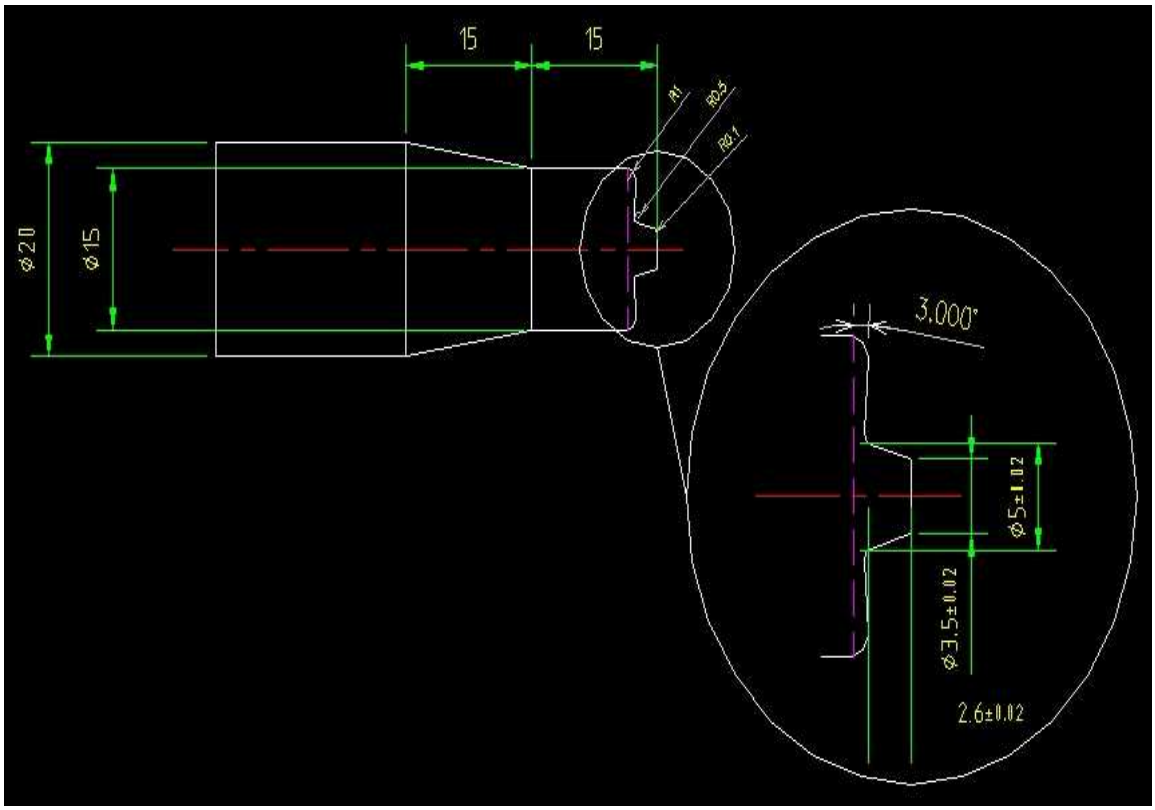


Fig. 3.4 Tool dimensions

Fig. 3.5 Tool shape

3 . 3 마찰교반용접 조건 선정

이종접합 FSW에서 주요 접합변수는 Tool의 회전속도(Rotating speed), Tool의 이송속도(Travel speed), Tool의 삽입위치(Offset from weld line), Tool의 회전방향(Rotation direction), Backing plate등이 있으며, 본 실험에서는 TIG 보조열원을 사용하였으므로 TIG 전류(Current(A)), 보호가스(Shield gas), Torch angle, FSW Tool과 TIG torch 거리 등을 추가로 고려하였다.
우선 구조. 용접 실험실에서 선행 연구되어진 AZ31B와 SS400의 용접 최적조건인 Tool 회전속도(Rotating speed) 400RPM, Tool 이송속도(Travel speed) 1.2mm/sec, Tool의 회전방향(Rotation direction)은 AZ31B를 Retreating side, SS400은 Advancing side인 CCW(반 시계방향), TIG 전류(Current(A)) 50A, 보호가스(Shield gas)13ℓ/min, Torch angle 60°, FSW Tool과 TIG torch와의 거리는 2.5mm를 고정으로 하고, Tool Plunge Point를 변수로 하여 실험을 진행하였다. Tool Plunge Point의 조건으로는 선행연구 되어진 9:1(AZ31B_9/ SS400_1)을 포함하여 7:3(AZ31B_7/ SS400_3), 5:5(AZ31B_5/ SS400_5)로 선정하여 실험을 실행하게 되었다.
본 실험의 TIG Assisted FSW 접합조건으로는 Table 3.4과 같다.
Fig. 3.6는 TIG Assisted FSW Hybrid welding의 모식도를 나타낸 것이다.
Fig. 3.7은 Tool Plunge Point의 모식도를 나타낸 것이다.

Table 3.3 TIG-FSWelding condition

Welding condition		Values
TIG	Current(A)	50
	Shielding gas(L/min)	Ar 13
	CTWD(mm)	s = 5
	Torch angle	60°
FSW	Rotation speed(RPM)	400
	Welding speed(mm/s)	1.2
	Shoulder dia.(mm)	Ø15
	Pin dia.(mm)	Ø5
	Room temperature	23°
	Tilt angle	3°
FSW Tool Plunge Point		9:1(AZ31B_9/ SS400_1)
		7:3(AZ31B_7/ SS400_3)
		5:5(AZ31B_5/ SS400_5)
TIG-FSW Distance = 25mm		
Leading condition = TIG leading		
Dia. of electrode = 2.4mm		

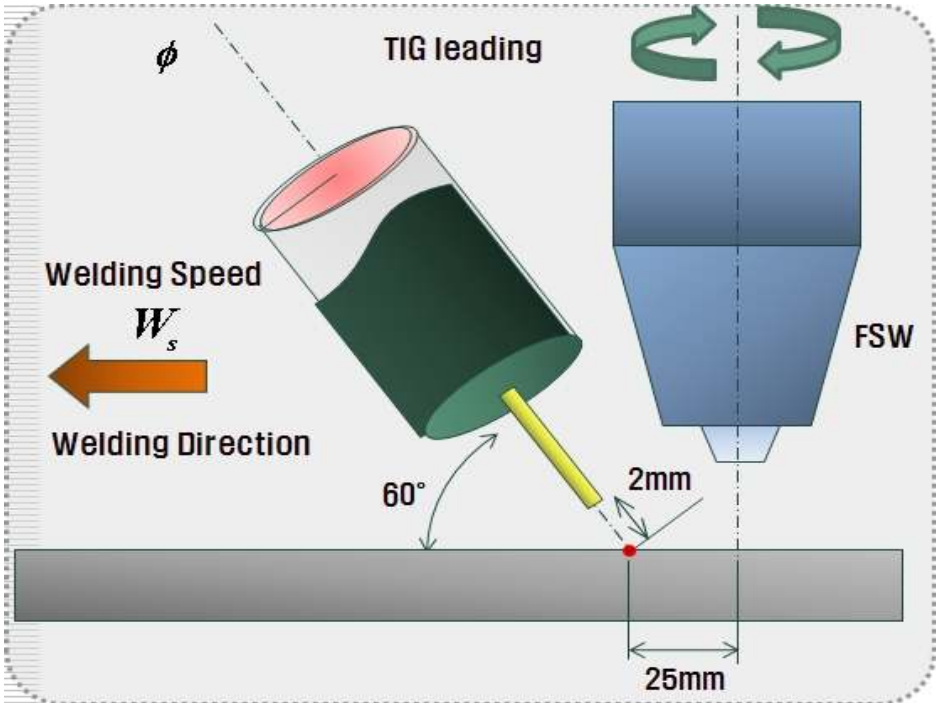


Fig. 3.6 Schematic of TIG assisted FSWelding process

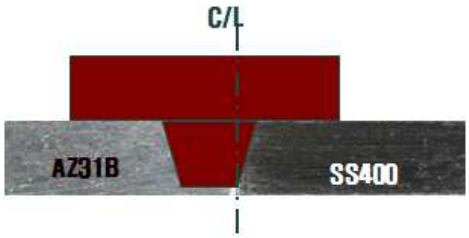
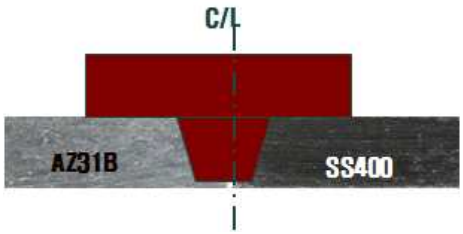
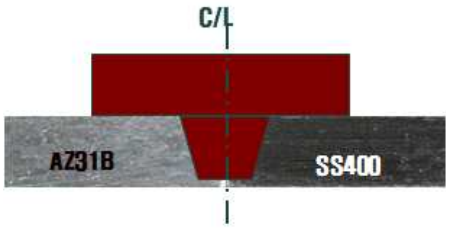
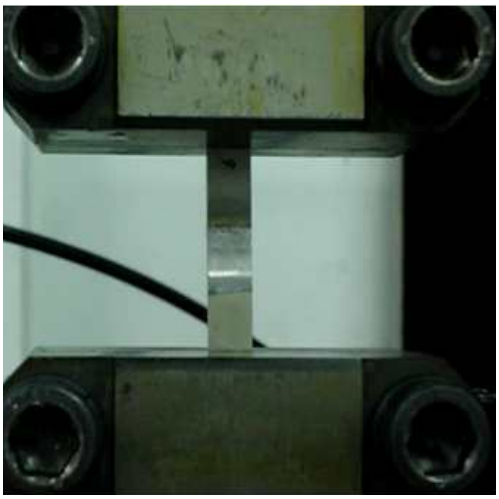
Hybrid Welding Process(TIG+FSW) Tool Plunge Point	
9 : 1	
7 : 3	
5: 5	

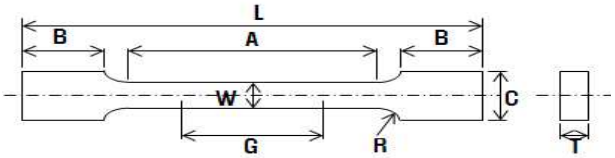
Fig. 3.7 Welding configuration for TIG-FSW Tool Plunge Point

3 . 4 실험방법

3.4.1 인장시험

이종접합부의 인장강도 측정은 SHIMADZU사 EHF-EG200KN-40L 유압식을 사용하였며, WIN SERVO 프로그램을 이용하였다.
인장시험편은 와이어 컷팅 방식으로 채취하였으며 KS B 0801 5호 규격을 사용하였다. 인장 Load speed 는 0.0333mm/sec로 시험하여 Stress-Strain 선도를 구하였다. Fig. 3.7은 실험에 사용된 장비와 시편의 규격을 나타낸 것이다.





G-Gage length : 60mm
W-Width : 12.5mm
T-Thickness : 3mm
R-Radius of fillet : 20mm
L-Over-all length : 170mm
B-Length og grip section : 40mm
C-Width of grip section : 25mm

Fig. 3.8 Tensile test specimen dimensions

3.4.2 경도시험

이종접합부의 미소경도 측정은 일본 Akashi사의 모델 HM-112의 비커스 경도 시험기로 현미경 배율은 X50이며, 135° 다이아몬드 피라미드 압자를 사용하여 접합방향에 수직인 단면을 절단하여 미세연마 후 에칭을 실시한 후 접합부 중심에서 500g 하중으로 10초 동안 실시하였다. Fig. 3.8은 시험에 사용된 장비와 경도 측정 시편을 나타낸 것이다.

	Values
Type	Micro vickers hardness
Load	0.5 Kgf
Loading	10 sec
Test Position	Bellow 0.5, 1.5, 2.5 on surface

Fig. 3.9 Vickers hardness test machine and specimen

3.4.3 온도 측정 시험

최적 조건의 최적 온도를 파악하기 위해 Thermo-Couple을 이용한 내부 온도 측정시험과 열화상 카메라를 이용한 외부 온도시험을 실시하였다. 내부 온도 측정에 사용된 Thermo-Couple이란, 종류가 다른 2개의 금속의 양 끝단을 접속하여 만든 것으로 양 끝단 접점에 온도차가 발생할 때 금속에서 열기전력이 발생하여 전류가 흐르게 된다. 이 기전력을 측정하여 1V일 때 1도 2V일 때 2도 3V일 때 3도 이런 식으로 온도를 측정하게 되고 그 측정값을 Thermo-Couple이 연결되어 있는 장비에 전송을 하고 그 전송 값을 모니터로 보여주게 된다. Thermo-Couple은 11개(B, G, C, D, E, J, K, N, R, S, T)로 나뉘어져있고, 그중 J, K, R Type을 가장 많이 사용한다. 본 논문에서는 +극이 니켈크롬(NICr), -극이 니켈알루미늄(NIAl)로 구성되어진 K Type을 선정하여 사용하게 되었다. K Type은 1250℃까지 측정이 가능하고 값이 싸다는 장점을 가지고 있다. 측정값을 읽어내는 장비로는 GRAPHTEC사의 midiLOGGER GL220을 사용하여 Tool이 삽입 된 직후부터 접합이 모두 끝난 뒤 상온으로 온도가 떨어질 때 까지 측정을 하였다. 외부 온도 측정에 사용된 열화상 카메라는 FLIR사의 적외선 열 화상 카메라를 사용하였고 -40℃에서 500℃까지 촬영이 가능하며 초당 60Hz, 60장에 가깝게 촬영을 할 수 있다.

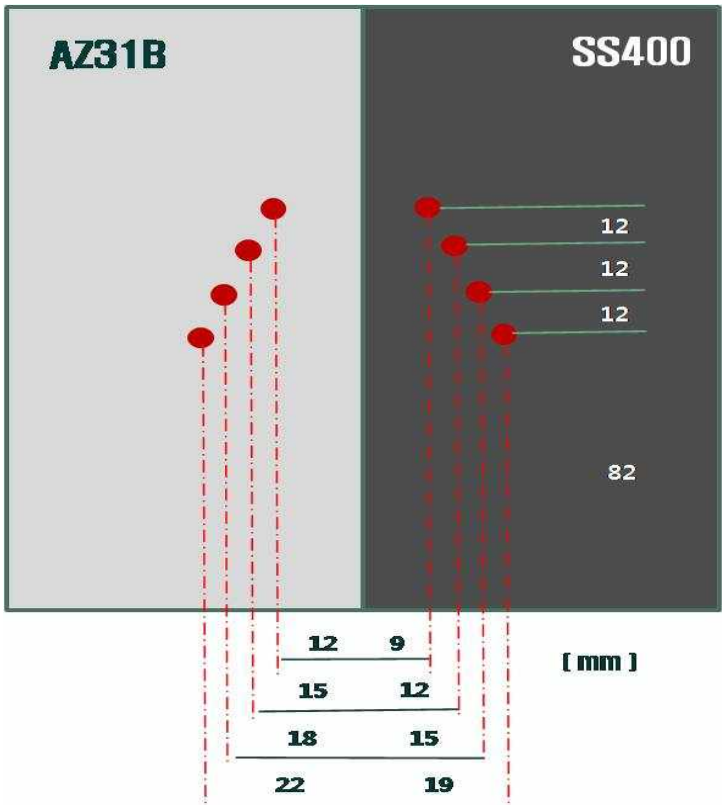


Fig. 3.10 Thermo-Couple 모식도

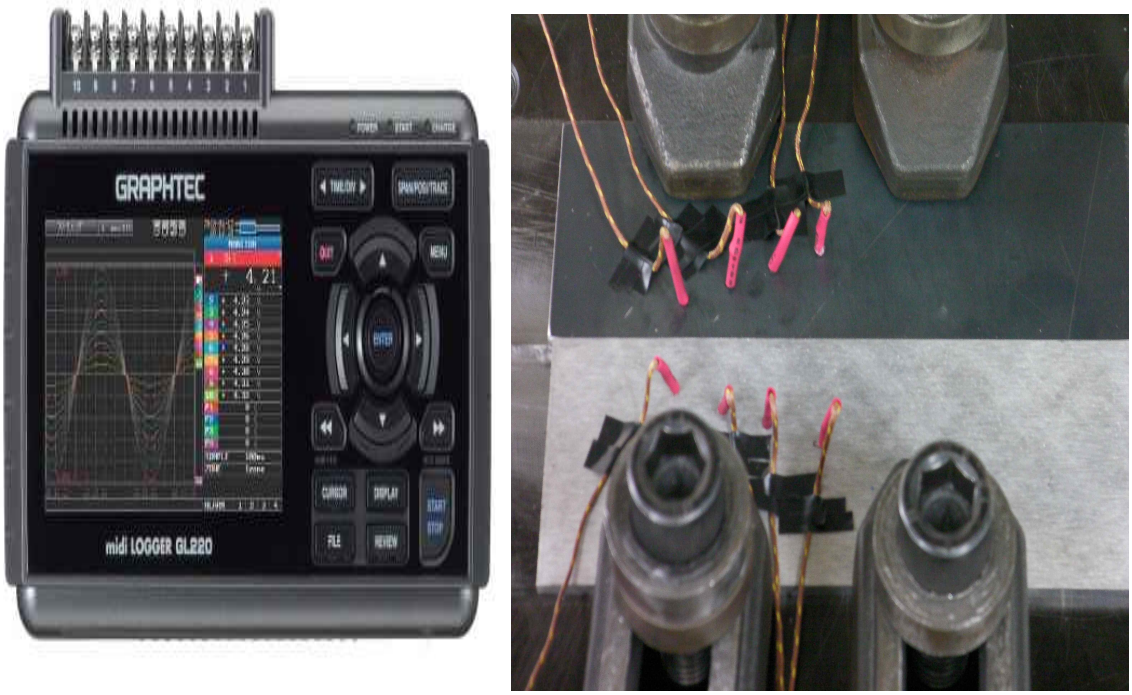


Fig. 3.11 기기와 setup

Product Specifications	
System Type	Focal Plain Array
Spectral Range	Long Wave
Detector	320 X240
Detector Material	Microbolometer
Measurement Accuracy	+/- 2 Degrees C
Measurement Range	-40 to 500 C
With Filter	500 C
Field View	24 X 18 Degrees
Cooling	Uncooled
Spatial Resolution	Lens Dependent
Thermal Sensitivity	<0.10 at 30 Degrees C
Detector Refresh Rate	60 Hz
Dynamic Range	14 Bit
Emmissivity Adjustment	.01-1.00
Palettes	Multiple
Display Type	LCD and Eye Piece
Image Storage Capacity	1000+ Images Per Card
Storage Medium	PCMCIA
Operating Temperature	-20 to 55C
Camera Weight	< 5.0 Lbs
Camera Size	8 X 6 X 4
Focus Distance	12 Inches to Infinity
Video Output	60 Hz NTSC
Power Supply	Battery or AC
Voice Annotation	Yes
Available Accessories	Lenses, PCMCIA Cards, Software, Batteries

Fig. 3.12 열화상 카메라와 스펙

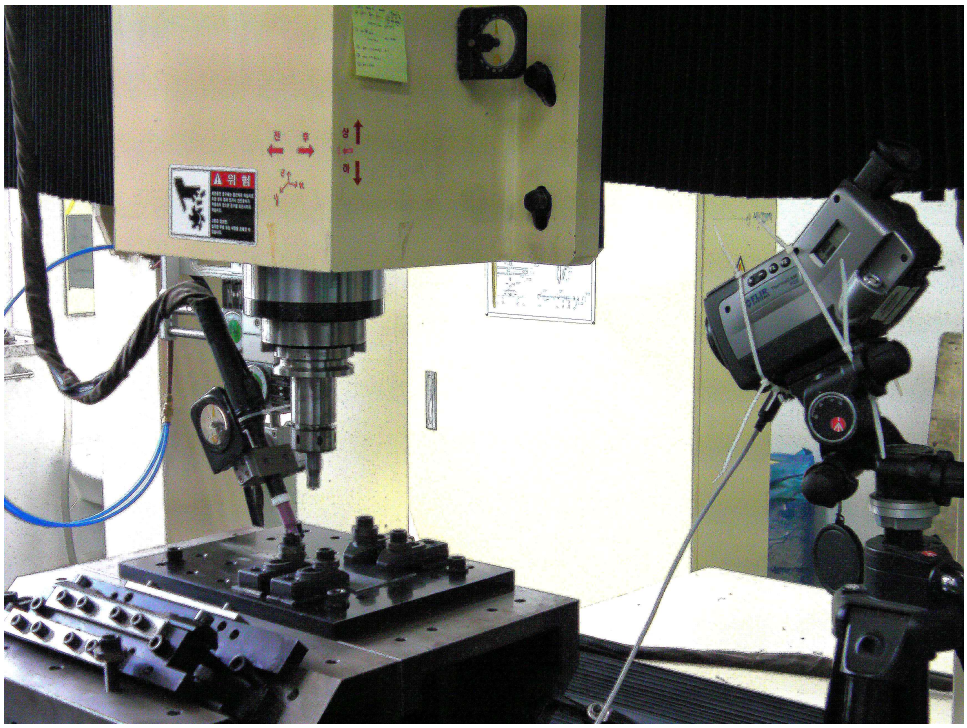


Fig. 3.13 열화상 카메라 setup

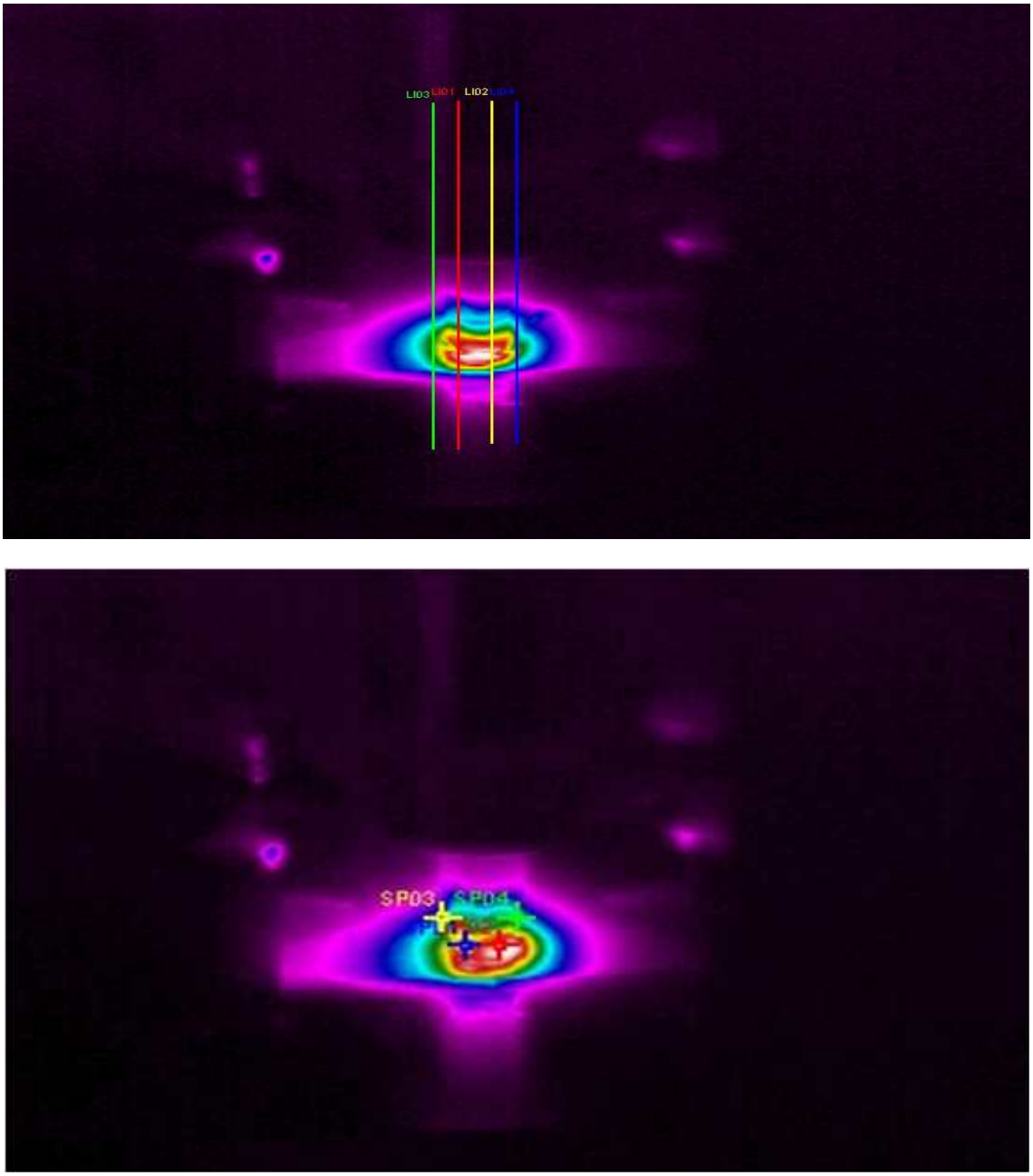


Fig. 3.14 열화상 카메라 측정 포인트

3.4.4 마이크로조직 분석시험

Hybrid Welding Process(TIG+FSW) 이종접합부의 결함과 미세조직 관찰을 하기위하여 접합한 소재의 접합부를 절단한 후 마운팅 하여 미세연마 후 마그네슘(AZ31B)합금은 피크린산(Picric acid) 4.2g, 초산(Acetic acid) 10㎖, 알코올(Methanol) 70㎖, 증류수(water) 10㎖ 혼합용액으로 에칭을 실시하였고 연강(SS400)은 질산(Nitric acid) 5㎖, 에탄올(ethanol) 100㎖ 혼합용액(Nital)으로 에칭한 후 증류수(distilled water) 세척을 한 후 OLYMPUS사의 Bx51m 광학현미경(Optical Microscope)를 이용하여 이종접합부의 조건별 단면 미세조직특성을 분석하였다.

Fig. 3.15 Optical microscope

제 4 장 시험결과 및 고찰

4 . 1 접합조건별 비드의 형상

4.1.1 TIG 용접 실험

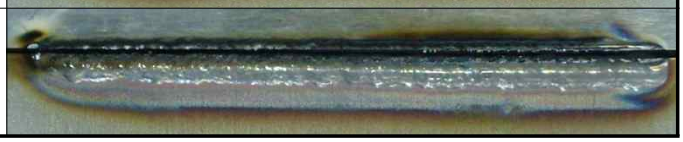
Table 4.1은 TIG 단독 이종재 용접조건과 비드 형상을 나타낸 것으로서 TIG용접 단독일 경우에는 재료의 상이한 물성 차이로 인해 접합이 불가한 것으로 사료된다.

Table 4.1 TIG welding parameters and obtained bead shapes

(a) Welding parameters

No.	Material	Plunge point	Travel speed (mm/s)	TIG Current (A)	TIG pulsed Current (A)	Shield Gas (l /min)	Torch Angle (deg)
1	AZ31B-SS400	center	1.0	50	50	13	60
2	AZ31B-SS400	certer	1.0	70	70	13	60

(b) Weld bead of dissimilar joint

No.	TIG Current(A)	Travel speed (mm/s)	Bead appearance
1	50	1.0	
2	70	1.0	

4.1.2 Hybrid Welding Process(TIG+FSW) 실험

Table 4.3은 Hybrid Welding Process(TIG+FSW) 이종재 용접 조건과 비드형상을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 구조. 용접 실험실에서 선행하여 도출한 최적조건을 토대로 Tool Plunge Point를 변수로 적용하여 각 조건별 접합실험을 실시하였다. Table 4.4는 Hybrid Welding Process (TIG+FSW) Shape of bead를 나타낸 것이다. 가장 양호한 비드표면과 접합 단면을 나타낸 조건은 Tool의 회전속도 400rpm, Travel speed 1.2mm/sec Tool Plunge Point 9:1, TIG cerrent 70(A), Shield gas 7ℓ/min 일 때 가장 양호하였다.

Table 4.2 TIG Assisted FSW parameters and obtained bead shapes

(a) Welding parameters

No.	Material	Tool Plunge Point	Rotation Speed	Travel Speed	Rottion Direction	TIG Current(A)	TIG Pulse Current(A)	Shield Gas(L/min)	Torch Angle
1	AZ31B -SS400	9:1	400	1.2	ccw	50	50	13	60
2	AZ31B -SS400	7:3	400	1.2	ccw	50	50	13	60
3	AZ31B -SS400	5:5	400	1.2	ccw	50	50	13	60

(b) Weld beads and cross section of dissimilar joint

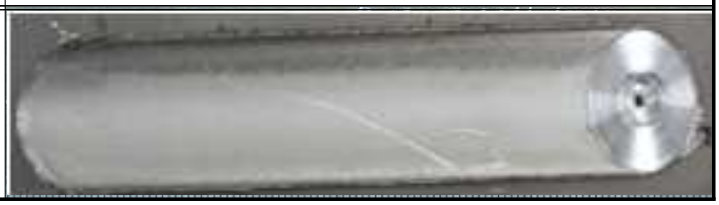
RPM	Travel speed	Tool Plunge Point	Appearance	Cross section
400	1.2	9:1		
		9:1		
		7:3		
		7:3		접합 불량 (파단)
		5:5		
		5:5		

4 . 2 마찰교반용접부의 인장강도 특성

4.2.1 AZ31B 동종 인장시험

본 실험에 앞서 동종 AZ31B의 마찰교반 접합부의 인장강도 특성을 파악하기 위하여 Table 4.5와 같은 접합조건으로 실험을 실시하였다.
Fig. 4.1은 인장파단면과 Stress-Strain curve 특성을 나타낸 것이다.
AZ31B 모재의 인장강도는 약 260MPa이며, AZ31B 동종 마찰교반접합부의 인장강도는 Base Metal의 약 85%인 221.9MPa 정도로 나타났다.

Table 4.3 Bead appearance of similar joint specimen considered for tensile test

RPM	Travel speed(mm/s)	Appearance
400	1.2	

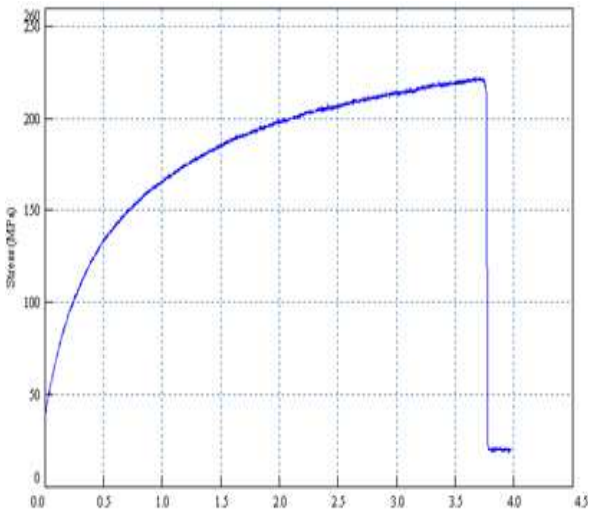


Fig. 4.1 Tested specimen and Stress-Strain curve

4.2.2 Hybrid Welding Process(TIG+FSW) 인장시험

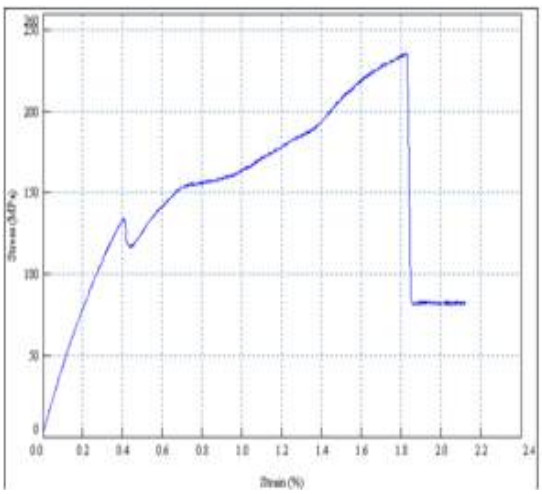
Table 4.7은 이종재의 Hybrid Welding Process(TIG+FSW)의 접합특성 및 인장파단면과 인장 강도 값을 나타낸 것이다.

인장 파단은 구조. 용접 실험실에서 선행연구 한 바와 같이 FSW 단독 접합 특성과 유사하게 대부분 AZ31B과 SS400의 접합계면에서 나타났으며, FSW 단독 접합의 취성 파단 특성과 다르게 접합 특성이 양호하고 인장강도가 높은 조건 400rpm에서 연상파단 형상을 보이고 있다. 이는 AZ31B의 열전도도가 철의 3배인 반면 열전도도가 철의 약 3분의 1인 SS400 접합부분에 TIG 보조열원을 가함으로써 거의 대등한 온도분포 하에서 Tool의 소성교반으로 인해 접합계면의 강도가 상승한 것으로 사료된다. 연신율 또한 FSW 단독 접합에 비해 더욱 늘어난 것으로 판단된다. Stress-Strain curve는 Table 4.8에 나타내었다.

Tool의 Plunge Point가 연강(SS400)으로 많이 삽입 될수록 마그네슘(AZ31B)과 연강(SS400)의 탈락한 입자가 증가하는 것을 파악할 수 있었다. 이로 인해 나머지 실험을 실행 할 수 없을 정도로 접합이 되지 않는 것을 확인할 수 있었다. Tool 또한 연강의 강도를 이기지 못하고 깨지는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과 최대인장강도는 235.3MPa로, 이는 AZ31B 합금의 모재 최대 인장강도(260MPa)의 약 91%에 달하는 우수한 강도값을 나타낸다.

Table 4.4 Bead appearance and tensile test results of dissimilar materials Hybrid Welding Process(TIG+FSW)

Rotation Speed (RPM)	Travel Speed (mm/sec)	Tool Plunge Point	Fractured Specimens	Y.S (MPa)	T.S (MPa)
400	1.2	9 : 1		202.8	235.8
				197.8	227.8



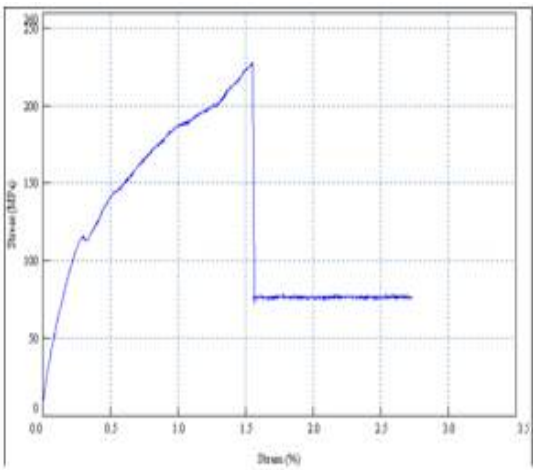


Fig. 4.2 Tensile test graph

Table. 4.5 Tool broken of tool plunge point 7:3

Rotation Speed (RPM)	Travel Speed (mm/sec)	Tool Plunge Point	Bead Appearance	Tool broken
400	1.2	7 : 3		

Table 4.6 Tool broken of tool plunge point 5:5

Rotation Speed (RPM)	Travel Speed (mm/sec)	Tool Plunge Point	Bead Appearance	Tool broken
400	1.2	5 : 5		

4 . 3 마찰교반용접부 횡단면의 경도특성

Fig. 4.3은 Tool의 회전속도가 400rpm, 이송속도 1.2mm/s, TIG current 50A, Shield gas 13mm/min 일 때 가장 양호한 접합특성을 나타낸 시편에 Vickers hardness test machine을 사용하여 하중 500g, 하중시간 10sec의 조건으로 이종접합부 단면을 표면으로부터 0.5mm, 1.5mm, 2.5mm 지점에서 0.5mm 간격으로 측정하여 경도 분포를 나타낸 것이다.

AZ31B 합금 측의 경도분포는 Base metal 영역에 비하여 접합부의 경도값이 크게 달라지지 않았으며 Stir zone 영역에서 경도값이 약간 상승하였다. SS400 영역에서는 AZ31B합금 영역과 달리 Base metal 영역보다 접합부 근방에서 약간 높은 경도분포현상을 나타내었다. Tool에 의한 소성변형과 Shoulder부의 마찰열로 인한 온도상승, TIG의 조사로 결정립 크기와 재결정이 다소 증가했기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 Tool Plunge Point 9:1을 제외한 나머지 영역들에서는 경도를 측정할 수 없을 만큼 접합이 이루어지지 않아 경도 측정이 불가능 하였다.

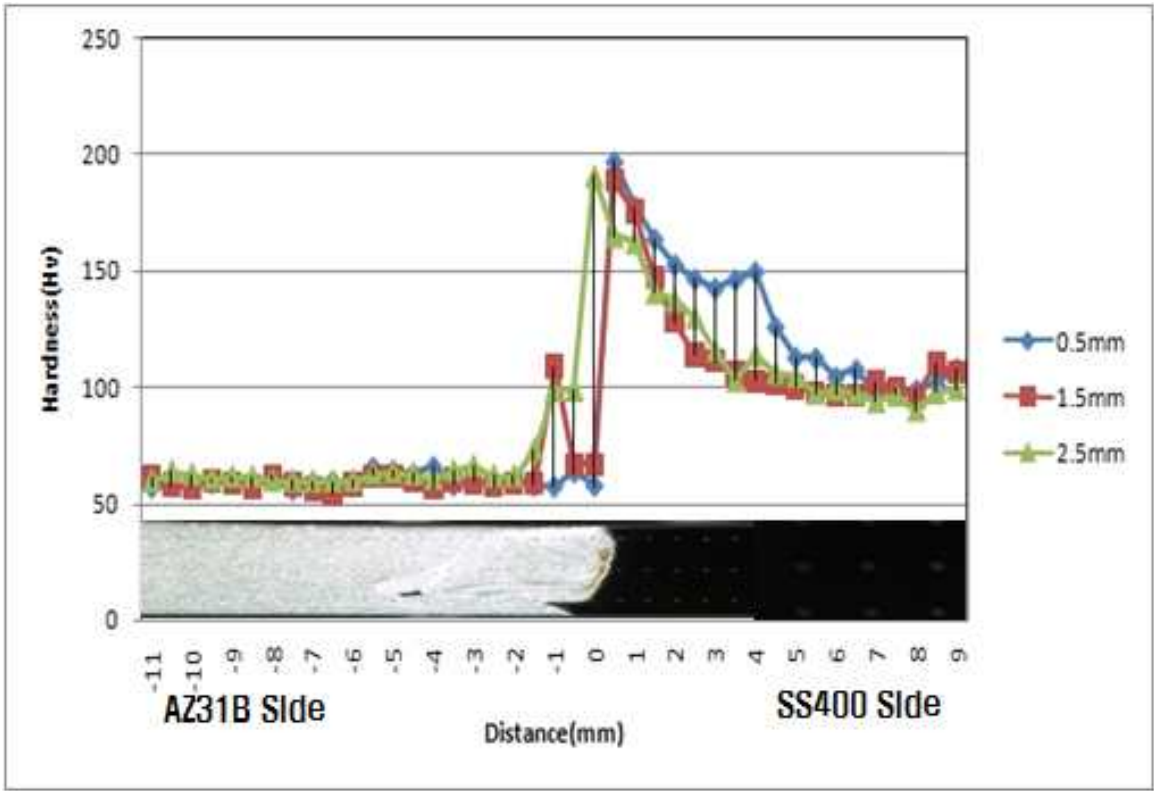


Fig. 4.3 Hardness distribution of dissimilar(Hybrid Welding Process)

4 . 4 Hybrid Welding Process(TIG+FSW)의 온도분포

Thermo-Couple을 이용하여 각 포인트별 내부 온도를 측정하고 전체적인 외부 온도 측정을 위해 적외선 열화상 카메라를 이용하여 Hybrid Welding Process(TIG+FSW)의 온도분포를 측정하였다. 선행연구 되어 진 최적조건 Tool rotation speed 400RPM, Travel speed 1.2mm/sec, TIG current 50A, Tool Plunge Point 9:1일 때의 온도를 측정하였다. 이는 최적공정조건에서의 온도를 파악하고 최적온도를 찾기 위함이며, 그 온도에서의 조직변화를 살펴 접합의 신뢰성을 높이기 위하여 측정하였다. 내부 온도측정에서 AZ31B는 최대온도 264.6℃를 기록하였고 SS400에서는 237.5℃를 기록하였다. 이는 AZ31B가 SS400보다 열전도도가 더 좋기 때문으로 사료된다. 외부온도 측정에서는 AZ31B측에서 163℃, SS400측에서 135℃를 기록하였고, 이 역시 열전도도가 AZ31B가 좋기 때문인 것으로 사료된다.

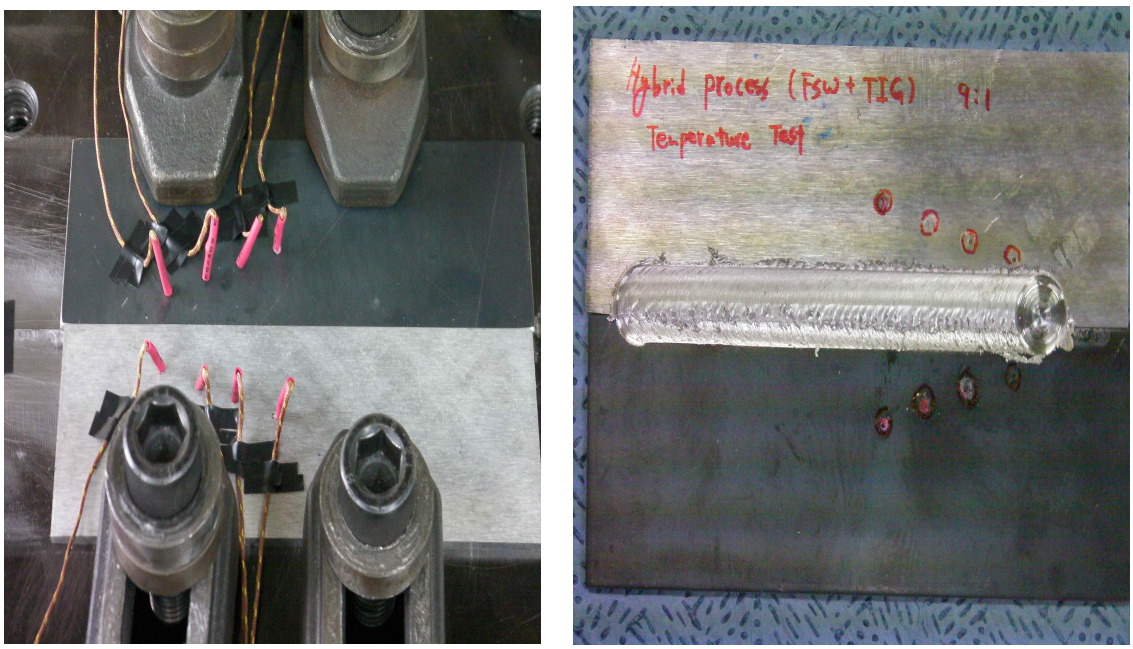
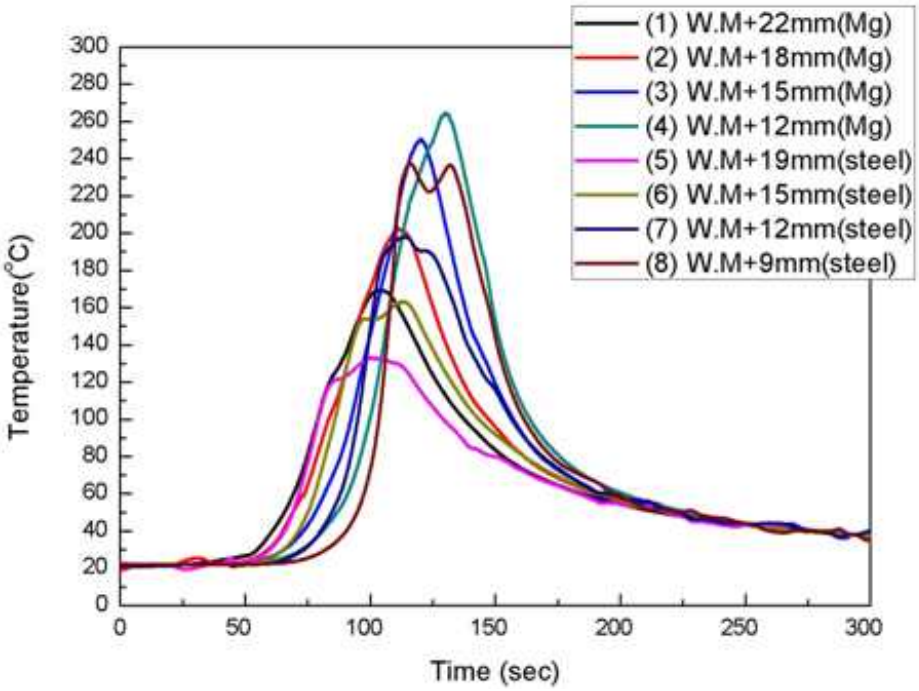


Fig. 4.4 Thermo-Couple setup



Position		Temp (℃)		
		Start	Max.	Finish
Mg	1	21	169.2	37.3
	2	19.1	202.1	38
	3	22	250.3	39.8
	4	22	264.6	37.4
Steel	5	23	133.2	39.5
	6	21.9	163.2	37.1
	7	21.3	198	39.4
	8	21.8	237.5	35.2

Fig. 4.5 Thermo-Couple Result

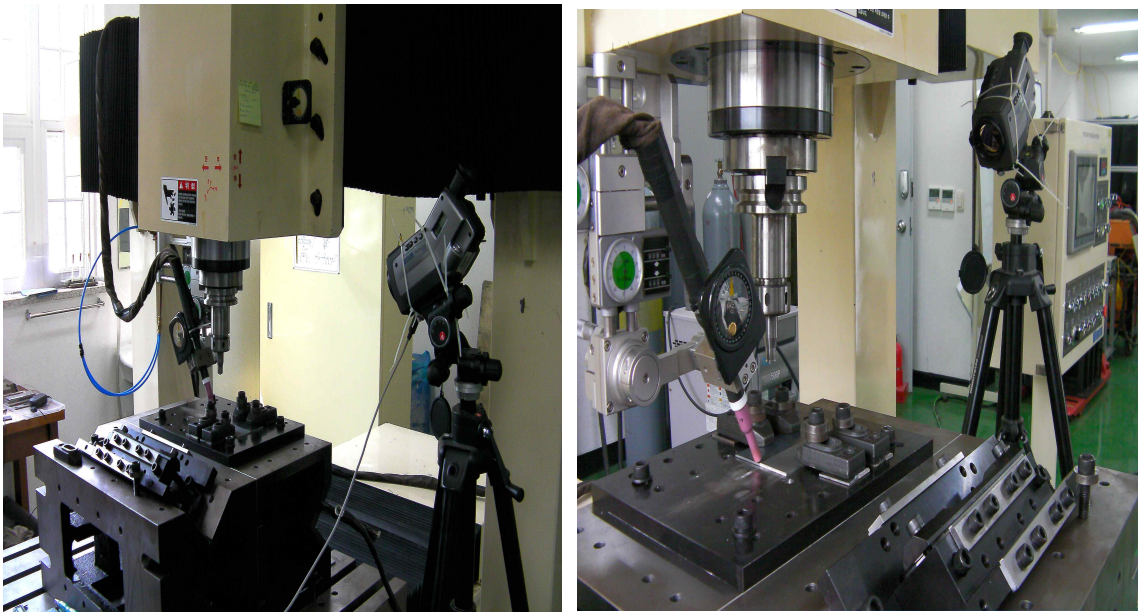
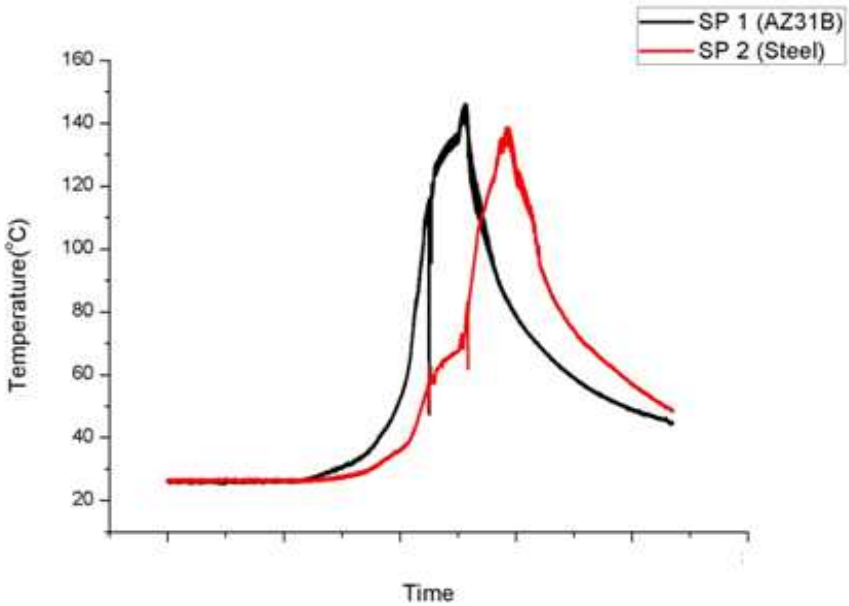


Fig. 4.6 Thermo-Cam setup



Position		Temp (°C)		
		Start	Max.	Finish
Mg	1	30	162	34
	3	29	129	32
Steel	2	30	135	32
	4	29	128	31

Fig. 4.7 Thermo-Cam Result

4 . 5 마찰교반용접부의 미세조직

Fig. 4.5는 이종재료 하이브리드 마찰교반 접합부의 미세조직을 나타낸 것이다. AZ31B 마그네슘 합금 Babe metal(a)에서는 등축적 조직을 나타내고 있으며, HAZ(b)는 모재와 거의 유사하거나 약간 미세해진 조직을 나타내고 TMAZ(b) 역시 툴의 기계적인 힘과 마찰열로 인하여 조직이 미세화 되어 진 현상을 보였다. TMAZ(b)에서는 소성유동 현상으로 인한 일정한 방향성을 가진 연신된 조직이 관찰됨을 알 수 있었다. Stir zone(c)에서는 툴의 회전으로 인하여 동적 재결정이 일어났고, 그로 인하여 미세 재결정 조직이 관찰되었다. 이러한 현상은 SS400측에 조사된 TIG의 영향으로 소성유동이 증가되어 나타나는 것으로 사료된다.

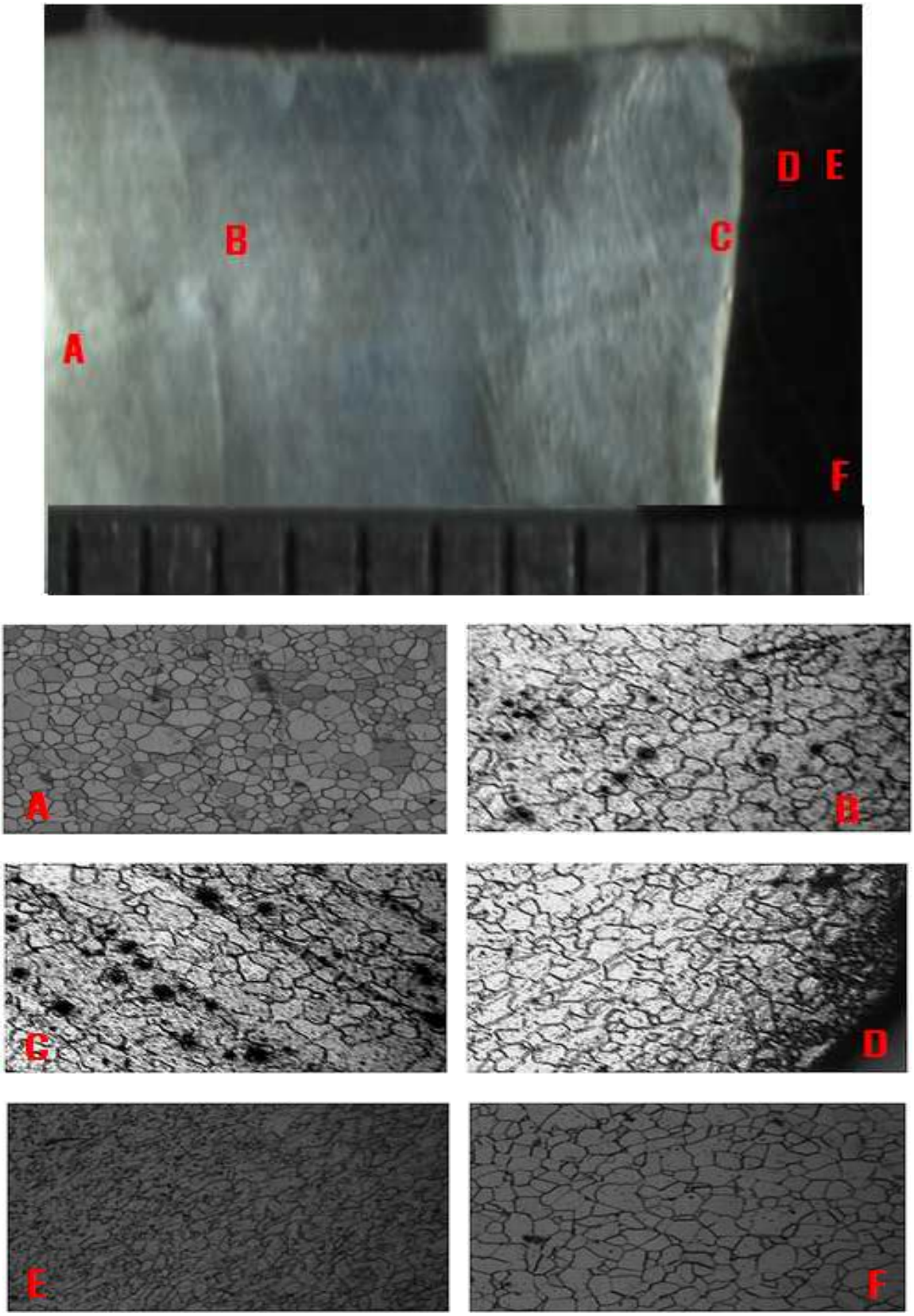


Fig. 4.8 Microstructural(Hybrid welding prcess(TIG+FSW))

제 5 장 결 론

TIG 용접을 보조열원으로 사용한 마찰교반접합법을 이용하여 Tool의 삽입위치를 연질인 마그네슘(AZ31B) 합금에 약 90% 연강(SS400)에 약 10% 비율로 삽입하였으며 Tool의 회전방향은 반시계방향이며 Advancing side에 연강(SS400)을 Retreating side에 마그네슘(AZ31B) 합금을 위치시켜 Plunge Point 9:1, 툴 회전속도 400RPM, 이송속도 1.2mm/sec, TIG Current 50A일 때 마그네슘(AZ31B) 모재(260MPa)대비 91%(235.8MPa)에 상응하는 건전한 접합체를 제작할 수 있었다.

1) Tool의 Plunge Point에 대한 실험결과 용접계면과 조직이 Probe의 삽입위치에 크게 영향을 받는다는 것이 확인 되었다 Probe가 9:1로 삽입이 된 경우는 모재가 교반이 원활히 일어나 접합이 되었지만, 7:3, 5:5에서는 AZ31B와 SS400의 물성치가 상이하게 차이가 나기 때문에 Tool의 교반활동이 원활히 발생되지 않아 접합이 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

2) 온도 구배 실험결과 외부온도는 마그네슘(AZ31B)합금에서 162℃, 연강(SS400)에서는 135℃를 기록하였으며, 내부온도는 마그네슘(AZ31B)합금에서는 264.6℃, 연강(SS400)에서는 237.5℃ 정도에서 원활한 소성교반 활동이 발생하여 접합이 잘 이루어 지는 것으로 판단된다.

3) Hybrid Welding Process(TIG+FSW)의 접합부에서는 HAZ와 TMAZ영역에서 FSW접합부 보다 미세화된 조직들이 관찰되었고, 특히 TMAZ에서 기계적 영향에 따른 소성변형으로 일정한 방향성을 가진 연신된 조직이 관찰됨을 알 수 있었다. SZ에서는 동적재결정으로 인해 극심한 소성변형으로 인한 미세 재결정들이 관찰되었고 이는 연강(SS400)에 조사된 TIG의 열영향으로 소성유동이 증가되어 나타난 결과로 사료된다. 연강(SS400)의 상단에서는 TIG의 열과 마찰열로 인해 가공경화가 일어난 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] H.S. Bang, H.S. Bang, S.M. Joo, “Numerical simulation of Al-SPCC weldment”, Key Engineering Materials, P1738～1744, Oct., 2006

[2] Y.J.Chao, and X.Qi: Heat transfer and thermo-mechanical analysis of Friction Stir joining of Al6061-T6 plates, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, (1999).

[3] A.Askari, S.Silling, B.London, and M.Mahoney: Modelling and Analysis of Friction Stir Welding Processes, Friction stir welding and Processing, TMS publication,(2001) p.43.

[4] H.S. Bang. "Study on The Mechanical Behaviour of Welded part in thick Plate - Three-dimensional Thermal Elasto-Plastic Analysis Baseon Finite Element Method." Journal of the Korean Welding Society, Vol.10, No.4, pp.37~43, December 1992.

[5] G.H. Jeon, A Study on Weldability of TIG Assisted Friction Stir Dissimilar Welding of Al6061 Alloy and STS Sheet, 2010

[6] Ulrike Dressler, Gerhard Biallas, Ulises Alfaro Mercado. "Friction stir welding of titanium alloy Ti6Al4V to aluminium alloy AA2024-T3", 2009

[7] AWS, WELDING HANDBOOK, Vol.1, Eighth Edition, 1987.

[8] AWS, WELDING HANDBOOK, Vol.2, Eighth Edition, 1991.

[9] Bynum, J.E., "Modification to the Hole Drilling Technique of Measuring Residual Stresses for Improved Accuracy and Reproducibility", Journal of Experimental Mechanics, U.S.A., Vol. 21, No. 1, Jan. 1981.

[10] Hidekazu Murakawa, Jianxun Zhang and Hiroyuki Minami, ''FEM Simulation of welding process(ReportⅢ)", Trans. JWRI, Vol. 28, No.1, pp.41～46, 1999.

[11] L.E.Murr, et al.: Solid-state flow association with the friction stir welding of dissmilar metals, Fluid flow phenomena in metals

processing (1999), 31-40

[12] 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

[13] H.S. Bang, G.Y. Han, "The plane-deformation thermal elasto-plastic analysis during welding of plate", The society of naval architects of korea p33~40, Apr.1994

[14] WELDING HANDBOOK, Eighth Edition, Volume 3, MATERIALS AND APPLICATION PART 1, pp.100~110, AMERICAN WELDING SOCIETY.

[15] E. G. WEST, THE WELDING OF NON-FERROUS METALS, CHAPMAN & HALL LTD, 1951, pp.129~254.

Acknowledgement

지난 2년간 많은 배움과 깨달음을 얻었던 정든 연구실을 나서며 평생 잊지 못할 분들께 이 작은 지면을 빌어 감사의 말을 드리고자 합니다.

부족한 저를 2년 동안 성심성의껏 지도편달을 해주신 방한서 지도교수님께 감사하다는 말씀을 드립니다. 또 조언을 아끼지 않으셨던 방희선 교수님께도 감사하다는 말씀을 드립니다. 그리고 먼 길 오셔서 저희의 부족한 공부를 도와주셨던 신찬호, 이창우 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다.

연구실에서 2년 동안 살을 맞대며 좋은 추억들을 나누며 동고동락했던 연구실 식구들.

정말 고마웠습니다.

언젠가 다른 곳에서 만날 날을 기약하며 다들 승승장구하시길 빌겠습니다.

그리고 언제나 제 앞, 뒤 혹은 옆에서 저를 항상 믿어주시고 든든한 버팀목이 되어 주신 아버지, 어머니, 그리고 제 동생 미현이 진심으로 감사드리고 사랑합니다.

앞으로 더욱 믿음직스런 아들이 되어 크신 은혜 보답하도록 하겠습니다.

항상 제가 힘들 때 옆에서 묵묵히 응원해주던 사랑하는 제 여자친구 혜진이에게도 고마움을 표현하고 싶습니다.

또 항상 함께하지는 못하지만 평생 같이 걸어갈 내 친구들 은총, 훈수, 호정, 현섭, 선환이

우리 우정 변치 말고 영원히 잘나가는 6명이 되어보자. 사랑한다.

마지막으로 지금까지 잘 버텨준 제 자신에게 정말 고생했고 앞으로도 잘 부탁한다는 말을 하고 싶습니다.

2011년 6월

내 앞길을 비추는 뜨는 해를 바라보며

김 정 한.

저작물 이용 허락서

학 과	선박해양공학과	학 번	20097619	과 정	석사
성 명	한글: 김정한 한문 : 金鋌翰 영문 : Kim, Jung-Han				
주 소	전라남도 목포시 용해동 금호아파트 1동 1301호				
연락처	E-MAIL : 3207kjh@naver.com				
논문제목	한글 : Hybrid Welding Process(FSW+TIG)을 이용한 이종재료(AZ31B/SS400)의 Tool Plunge Point에 따른 용접부의 열적 특성 해석 영어 : Experimental investigation of temperature with change in tool plunge point in dissimilar butt joint by Hybrid Welding Process(FSW+TIG)				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 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 편집·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 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(O) 반대( )

2011 년 8 월

저작자: 김 정 한 (인)

조선대학교 총장 귀하