



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](#)

2017년 2월

석사학위 논문

마찰교반점용접과 셀프-피어싱
리벳에 의한 A356/SAPH440
이종재 접합부의 기계적 특성에
관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

이 우 람

마찰교반점용접과 셀프-피어싱
리벳에 의한 A356/SAPH440 이종재
접합부의 기계적 특성에 관한 연구

Study on Mechanical Properties of A356/SAPH440
Dissimilar Material Joints by the Friction Stir Spot
Welding and Self-Piercing Rivet

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

이 우 람

마찰교반점용접과 셀프-피어싱
리벳에 의한 A356/SAPH440 이종재
접합부의 기계적 특성에 관한 연구

지도교수 방 희 선

논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

이 우 람

이우람의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방한서 (인)

위원 조선대학교 교수 방희선 (인)

위원 조선대학교 교수 주성민 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	III
Abstract	V

제1장 서론	1
제1절 연구배경 및 목적	1
제2절 연구방법	3

제2장 이론적 배경	4
제1절 FSSW와 SPR의 원리와 특성	4
1. FSSW의 원리와 특성	4
2. SPR의 원리와 특성	6
제2절 알루미늄 합금의 특성	7
1. 알루미늄 합금의 분류	7
2. A356-T6의 특성	8
제3절 아연도금강판의 분류 및 특성	10

제3장 FSSW 및 SPR 실험 방법	12
제1절 실험의 세부사항	12
1. 실험장비	12
2. 사용재료	14

3. FSSW 톨 및 리벳의 재질과 형상	15
4. 실험 조건	17
5. SPR 공정 해석	19
제2절 소재 물성 평가	20
1. A356 압축시험 및 SAPH440 인장시험	20
2. SPR 리벳 압축시험	21
제3절 접합부 기계적 특성 평가	22
제4절 접합부 미세조직 관찰	24
제4장 실험결과 및 고찰	26
제1절 소재 물성 평가	26
1. A356 압축시험 및 SAPH440 인장시험 결과	26
2. SPR 리벳 압축시험 결과	30
제2절 FSSW 접합부 특성	31
제3절 SPR 공정 해석 및 접합부 특성	34
제4절 전단인장 및 경도 특성	38
1. 전단인장강도	38
2. 경도분포	41
제5절 미세조직 특성	43
제5장 결론	46
참고문헌	48

List of Tables

Table 3.1	Chemical composition and mechanical properties of A356-T6 and SAPH440	14
Table 3.2	Welding conditions for FSSW	17
Table 3.3	Joining conditions for SPR	18
Table 3.4	Specimen dimensions – KS B 0801	21
Table 4.1	Comparison before and after compression test	27
Table 4.2	Top bead profiles of FSSW welded joints with rotation speed and plunge depth	31
Table 4.3	Bottom bead profiles of FSSW welded joints with rotation speed and plunge depth	32
Table 4.4	Cross section of FSSW welded joints with rotation speed and plunge depth	33
Table 4.5	Case study of joining analysis by SPR	34
Table 4.6	Bead profiles of SPR by case 1 and case 3	36
Table 4.7	Thickness of IMC in FSSW welded joints with plunge depth	45

List of Figures

Fig. 1.1	Relation of fuel efficiency for lightweight	1
Fig. 1.2	Development of multi-material concept for automobile	2
Fig. 2.1	Schematic illustration of FSSW	4
Fig. 2.2	Process of FSSW	5
Fig. 2.3	Process of SPR	6

Fig 2.4	Classification of Aluminium alloy	7
Fig 2.5	Diagram with T6 heat treatment	9
Fig 2.6	Activity series of metals in aqueous solution	11
Fig. 3.1	Equipment and specifications of FSSW system	12
Fig. 3.2	Equipment of SPR system	13
Fig. 3.3	Configuration of specimen	14
Fig. 3.4	Tool shape and details	15
Fig. 3.5	Rivet shape and details	16
Fig. 3.6	Strain distance ration of rivet	18
Fig. 3.7	Analysis condition of SPR	19
Fig 3.8	Universal testing machine with compression zig	20
Fig 3.9	KS B 0801 13B specimen dimension and tensile test	21
Fig. 3.10	Universal testing machine	22
Fig. 3.11	Vickers hardness test scheme and equipment	23
Fig. 3.12	Optical microscope	25
Fig 4.1	Load - Stroke curve (A356)	26
Fig 4.2	True stress - True strain curve (A356)	27
Fig 4.3	Engineering stress - Engineering strain curve (SAPH440)	28
Fig 4.4	True stress - True strain curve (SAPH440)	29
Fig 4.5	Load - Stroke curve (Rivet)	30
Fig 4.6	Comparison of analysis results and experiment shapes	30
Fig. 4.7	Cross section of SPR	37
Fig. 4.8	Tensile shear strength of FSSW welded joints with rotation speed	38
Fig. 4.9	Tensile shear strength of FSSW welded joints with plunge depth	39
Fig. 4.10	Tensile shear strength of SPR	40
Fig. 4.11	Hardness distributions of FSSW welded joints	41
Fig. 4.12	Micro structure of FSSW welded joints	43

ABSTRACT

Study on Mechanical Properties of A356/SAPH440 Dissimilar Material Joints by the Friction Stir Spot Welding and Self-Piercing Rivet

Wu-Ram Lee

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining

Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

As fuel-related regulations are being strengthened, the government is working to improve fuel efficiency and reduce exhaust emissions. Efforts are being made to solve the problem by increasing the engine efficiency or reducing the weight of the vehicle. However, improvement of powertrain such as engine is difficult to achieve fuel efficiency and exhaust gas regulation, and weight of vehicle has been greatly increased due to convenience of users and safety devices. However, upgrading function of powertrain such as engine is difficult to achieve fuel efficiency and exhaust gas regulation. Consequently, weight of vehicle has been greatly increased due to convenience of users and safety devices. In order to solve the problem, the method reducing the weight of the vehicle has been changed from a conventional steel to a lightweight material or non-ferrous metal welding method. Therefore, It is required for new potential welding and mechanical bonding methods. Friction Stir Spot Welding is one of Friction Stir Welding. It is similar to resistance spot welding and does not involve melting due to the solid-state welding method using the rotational force and pressure

of the tool. Self-Piercing Riveting (SPR) is a mechanical bonding method using rivets. Unlike conventional rivets, drilling or alignment process between the material and the rivet machine are not required. Therefore, this study intended to perform lap welding of 3mm thick aluminum alloy (A356) and 2mm thick automotive steel sheet (SAPH440) in terms of FSSW and SPR methods. Bonding characteristics were investigated according to the variation of plunge depth and rotational speed (RPM) of friction stir welding, and the bonding characteristics according to the depth and diameter of the SPR lower mold die were observed. Through this study, the highest shear - tensile strength of friction stir welding spot was obtained at the depth of 1.0mm, depth of rotation of 500RPM, SPR of rivet length of 7mm, die depth of 1.2mm and die diameter of 10mm.

제1장 서론

제1절 연구배경 및 목적

전 세계적인 추세로 자동차 연비규제가 강화되면서 친환경, 고연비 자동차 개발이 중요한 이슈로 떠오르고 있으며, 자동차의 중량 감소, 엔진 효율 증대 등 여러 방법이 시도되고 있다. Fig 1.1에서와 같이 자동차의 중량 감소는 차량의 연비향상과 배기가스 배출량과 직결되는 동시에 엔진 효율 증대보다 더 적은 비용으로 더 높은 효율을 나타낼 수 있어 더 가벼운 자동차 부품의 연구가 활발히 진행되고 있다.

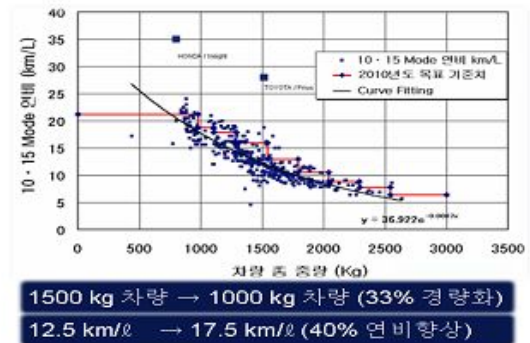


Fig 1.1 Relation of fuel efficiency for lightweight

자동차 경량화 기술은 기존 소재보다 가벼운 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 등의 소재로 교체하거나 비철금속의 이종소재들을 혼용, 초고장력강을 사용하여 부품의 중량감소, 최적화 부품 설계 등으로 구성되는데 이종 이종소재를 혼용하여 효율적인 경량화 및 성능 최적화를 구현하는 Multi-Material의 경우 기존의 용접접합으로는 한계가 있어 신 용접접합기술을 필요로 하고 있다.[1~4]

이러한 문제를 개선한 접합방법으로 1991년 영국 용접연구소(The Welding Institute of the United Kingdom)에서 개발한 마찰교반용접(Friction Stir Welding)

의 응용기술인 마찰교반 점용접(Friction Stir Spot Welding/이하 FSSW)은 용융점 이하의 고상상태에서 접합이 이루어지는데, Tool을 회전시킨 후 피접합체에 삽입하여 마찰열과 강한 소성변형으로 조직의 미세한 재결정과 향상된 기계적 특성을 얻을 수 있다. FSSW 공정은 일반적인 용접에 필요한 차폐가스와 용가재가 필요하지 않아 원가 절감에 탁월할 뿐 아니라, 기존의 용융 용접에 필연적인 열변형이 거의 없고, 흠, 자외선, 적외선 등 유해광선도 발생하지 않아 친환경 공법으로 각광받고 있다.[5~7]

또 다른 접합방법으로 셀프-피어싱 리벳(Self-Piercing Riveting/이하 SPR)이 있는데, 기존의 리벳기술들은 미리 흠을 내 놓은 상태에서 리벳을 체결하는 방법이지만, SPR은 리벳 자체가 구멍을 뚫는 천공(穿孔) 공정과 동시에 체결이 이루어지는 공법으로 소재와 리벳 머신간의 정렬이 불필요하며 자동화에 매우 강점이 있는 공정이다.[8]

이에 본 연구에는 자동차 부품에 적용되는 두께 3mm의 알루미늄 합금(A356)과 두께 2mm의 자동차용강판(SAPH440)에 FSSW와 SPR 접합을 실시하여 접합부의 접합성을 평가하고자 한다. 또한 접합성을 평가하기 위해서 접합부의 기계적 특성 및 금속학적 특성을 고찰하고, SPR의 경우 해석프로그램을 이용하여 공정모사를 통해 최적의 조건을 선정 후 두 접합법을 비교 분석하였다.

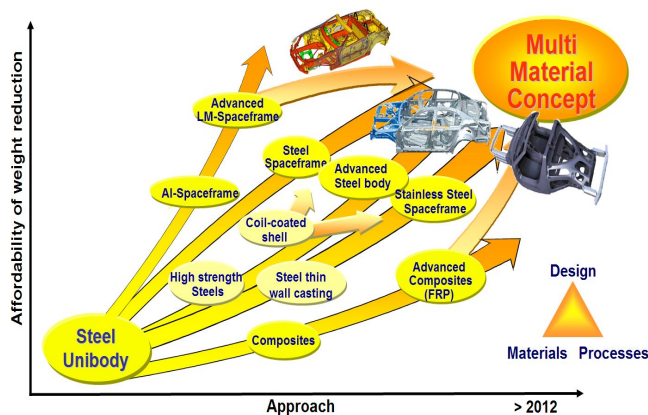


Fig 1.2 Development of multi-material concept for automobile

제2절 연구방법

1장에서는 연구 배경 및 목적 그리고 본 논문의 구성 대해서 나타내었다.

2장에서는 FSSW와 SPR 접합의 원리와 특성에 대한 이론적 배경과 알루미늄 합금, 자동차용 강판의 특성에 대하여 연구하였다.

3장에서는 FSSW와 SPR 접합공정 해석에 대해 연구하였다. 접합변수가 접합부의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 FSSW의 경우 상부 3t A356와 하부 2t SAPH440의 겹치기 접합을 수행하였다. 변수로는 회전속도(RPM)와 핀의 삽입깊이(Plunge depth)에 변화를 주었다. SPR은 해석으로 접근하여 우선 소재의 물성을 파악하기 위해 A356 알루미늄 합금과 SPR 리벳은 압축시험을 진행하였고, SAPH440 자동차용 강판의 경우 2t의 판재여서 압축시험이 불가능하여 인장시험의 데이터를 이용하여 물성을 확인하였다. 이렇게 파악한 물성을 기반으로 공정해석에 진행하여 기하학적 구속이 가장 크게 나타난 조건을 기준으로 하부금형의 직경(D)과 높이(h)에 변화를 주어 겹치기 접합을 수행하였다.

4장에서는 FSSW의 접합부 특성과 SPR 공정 해석 및 접합부 특성의 실험결과에 대하여 기계적, 금속학적 특성을 고찰하여 요약 및 결론을 도출하였다.

5장에서는 실험에 대한 결론을 서술하였다.

제 2 장 이론적 배경

제1절 FSSW와 SPR의 원리와 특성

1. FSSW의 원리와 특성

마찰교반 점용접 기술은 TWI에서 개발한 마찰교반용접의 응용기술로 이중소재 용접 기술이 각광받으면서 기존 용융용접이 가지던 문제점들을 보완하는 동시에 충분한 강도를 확보할 수 있는 대체기술로 비철소재의 접합에 주목받고 있다.

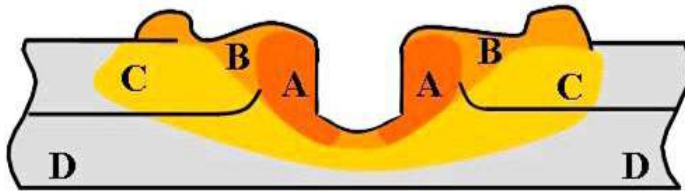


Fig 2.1 Schematic illustration of FSSW

모재보다 강도 및 경도가 높은 tool을 고속으로 회전시켜 상하로 겹친 모재에 Pin을 삽입시키면 Tool과 모재 사이에서 마찰열을 발생시킨다. 이러한 마찰열로 Tool 주변 상하 모재는 연화된 후 교반작용에 의한 상부소재와 하부소재간의 소성 유동을 일으켜 교반과 혼합작용으로 고상상태에서 두 부재가 접합하게 된다. 마지막으로 Tool을 후퇴시켜 핀을 제거하면 겹치기 접합이 완료된다. 마찰교반 점용접 중에 일어나는 모재의 유동은 복잡한데 Pin의 회전으로 인한 판재 표면과 평행한 회전 상으로 발생하는 것과 Pin 측면의 작용으로 인한 모재와 직교하는 면에서 Pin의 축 방향으로 복합적인 소성유동이 발생한다.[9] Fig 2.1에서와 같이 Pin이 삽입된 부위는 소성유동의 영향으로 열과 소성변형의 영향을 받은 SZ(Stir Zone/A.)과 열영향을 받은 HAZ(Heat Affected Zone/C.)이 존재하고, 이 두 영역의

사이에는 압력과 마찰열로 인하여 기계적 열영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone/B.)가 생기게 된다. Fig 2.2는 마찰교반 점용접의 공정을 나타낸 것이다. [1, 10]

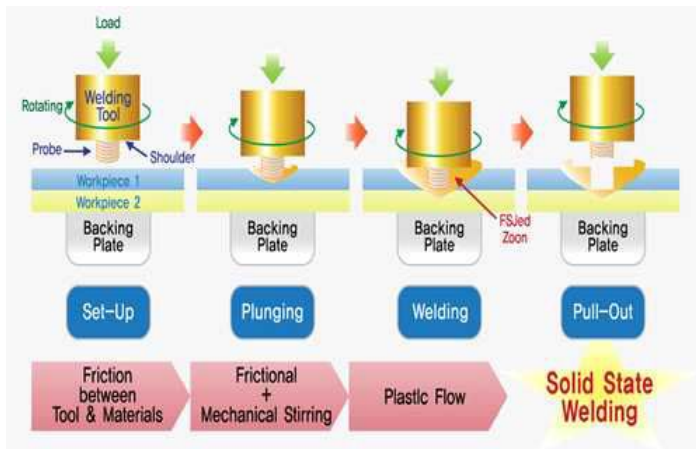


Fig 2.2 Process of FSSW

2. SPR의 원리와 특성

셀프-피어스 리벳(Self-piercing riveting, SPR)은 저항 점용접과 비슷하게 소재의 양쪽에서 리벳과 하부금형을 압착하여 기계적으로 체결하는 공정으로 천공(穿孔)공정이 필요 없어 자동화에 매우 효과적인 접합법이다. Fig 2.3 과 같이 두 판재를 겹쳐 리벳이 상판을 통과하고 리벳의 끝단이 하부금형인 다이의 형상에 따라 벌어져 하판에 기하학적으로 구속되는 과정을 거쳐 접합하게 된다.

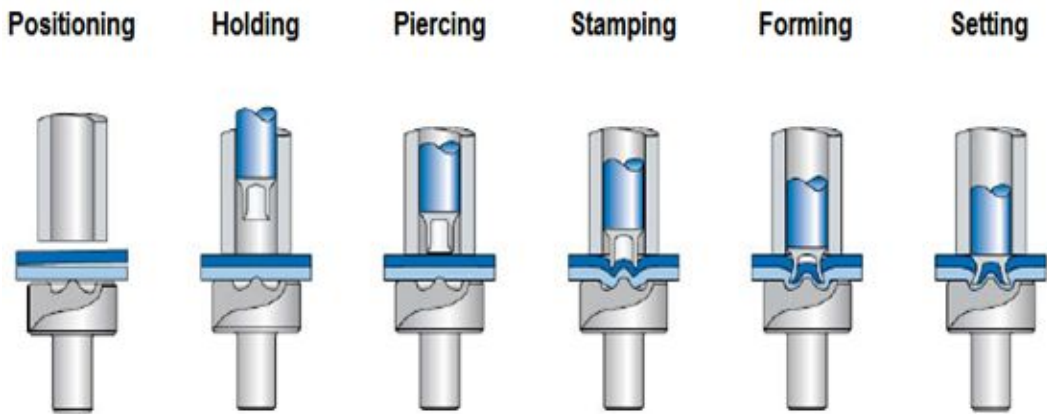


Fig 2.3 Process of SPR

자동차용 강판, 고장력 강판, 마그네슘, 알루미늄, CFRP 등의 다양한 소재의 이종접합이 가능하며 SPR 단독만이 아니라 접착제를 혼용하여 자동차산업에서 사용되고 있으며, 기존에 사용되는 접합법에 비해 활용범위가 매우 크다.

제2절 알루미늄 합금의 특성

1. 알루미늄 합금의 분류

알루미늄은 지구에서 가장 많이 존재하는 금속이다. 산화물 형태로 존재하는 게 대부분이었지만 전기 분해로 인한 정제 기술이 발달하면서 18세기 때 처음으로 순수한 알루미늄을 정제할 수 있었다. 알루미늄의 비중은 철과 비교하면 1/3수준으로 경량화가 중요해지는 자동차 산업에서 꾸준히 사용량이 증가하고 있는 추세이다.[11] 전성(가단성)과 연성이 뛰어나고 동시에 산화피막으로 인한 내식성 등이 우수하여 경량소재로 주목받고 있다. 산업에서 사용되는 알루미늄 합금은 알루미늄에 마그네슘, 망간, 규소 등을 첨가한 것으로 크게 전신용 합금과 주물용 합금으로 나뉘며, 열처리, 시효 등으로 성질을 바꾸어 사용하기도 한다.

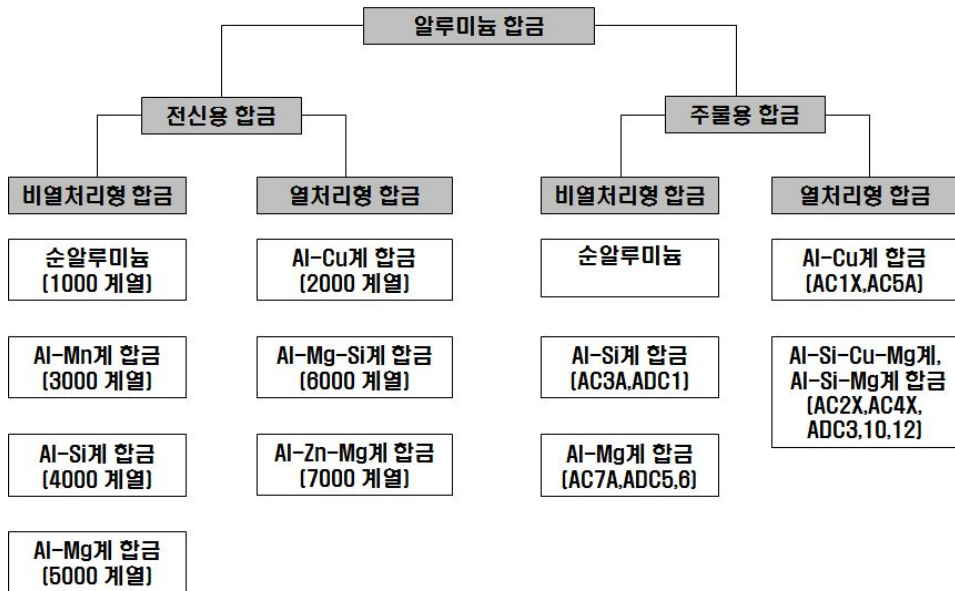


Fig 2.4 Classification of Aluminium alloy

2. A356-T6의 특성

A356-T6(이하 A356) 합금은 Al+Si 외 Cu, Mg 등이 소량 첨가되어 있으며, 유동성과 용접성이 뛰어나고, 주조성이 우수하여 형상이 복잡한 주물에 주로 사용된다. 하지만 알루미늄 합금화에 가장 뛰어나다고 알려진 원소인 Si는 금형, 사형 주조와 같이 응고속도가 낮은 공정에선 주조 시 조대한 침상의 Si 상을 형성하여 강도, 인성 및 기계적 특성을 저해하는 요인으로 작용된다.[12] 이런 단점을 보완하기 위하여 열처리 공정으로 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 크게 두 단계를 거쳐 진행되는데 첫 번째로 용체화 처리이다.

500~525℃로 알루미늄 합금에 가열을 한 후 수냉처리를 진행하여 상온에 경화요소가 고용된 상태로 변화시키는 과정을 용체화 처리라고 한다. 용체화 처리 시 온도가 균일하지 않을 경우에 많은 문제점이 발생하게 되는데, 온도가 높을 경우 결정이 조대화(Coarsening)되며 입계 공정 연소(Bruning)현상 등이 발생하게 된다. 온도가 낮으면 확산속도가 느려져 공정 석출물이 미고용 되는 현상과 소재의 조직 등이 균일하지 않게 되어 경도, 인장 등 모든 기계적 특성이 감소하는 문제가 발생하고 또한, 소재의 위치별로 기계적 성질이 차이가 많이 나게 된다. 인공시효 처리는 용체화 과정에서 형성된 과포화 고용체의 제 2상을 안정상태로 만드는 과정으로, 조대한 침상 조직을 미세화 하게 되는데 이를 T6 열처리라 한다.[13]

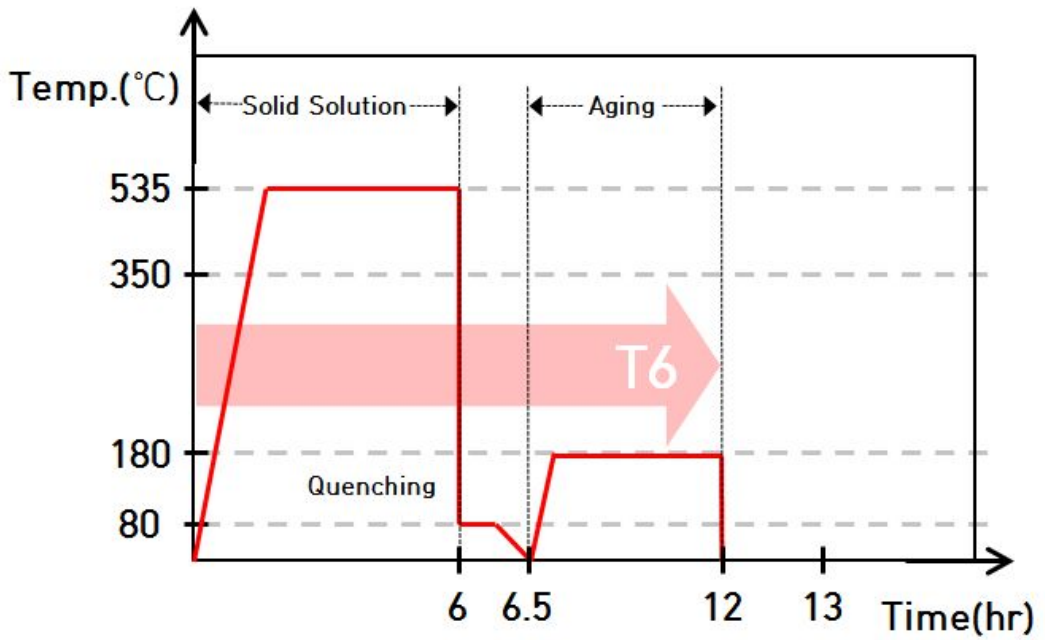


Fig 2.5 Diagram with T6 heat treatment

제3절 아연도금강판의 분류 및 특성

아연도금강판은 1741년 프랑스 화학자 Pall Jacqnes Melouin가 아연을 녹여 철에 도금한 것을 시작으로, 1863년 프랑스 Sorel과 영국의 Crowford가 Flux 발명특허를 취득하면서 산업에 본격적으로 사용되었다. 제조방법에 따라 일반적으로 용융 아연도금강판(Hot Dipped Galvanized Iron, HDGI, CGI, GI)과 전기도금아연강판(Electrolytic Galvanized Iron, EGI)으로 나뉘게 된다. [14]

용융아연도금강판은 순아연 도금과 합금화아연도금(Galvannealed steel sheets, GA), 갈바늄 강판 등의 아연 알루미늄 합금 강판이 있으며, 전기아연도금강판은 순아연 도금 및 아연철도금, 아연니켈도금 등 전기아연합금도금강판이 있다. 아연도금강판의 최대 장점은 스틸의 단점인 부식을 방지하는데 탁월한 역할을 하게 된다. 아연도금강판의 부식 방지 메커니즘은 아연(Zn)과 철(Fe)이 조합하여 금속의 이온화 서열에 따라 반응성이 상대적으로 큰 아연(Zn)이 부식되고, 철(Fe)은 방식 되는 원리이다. 또한, 아연도금은 도금면이 벗겨져도 주변에 위치한 아연(Zn)이 먼저 부식하는 희생방식으로 주석 등 타 도금에 비해 방식에 효과적이다.[15, 16] SAPH440은 차량 스틸계 샤시용으로 310~440MPa 급이 주로 양산되고 있다.

Metal	Oxidation Reaction
Lithium	$\text{Li}(s) \longrightarrow \text{Li}^+(aq) + e^-$
Potassium	$\text{K}(s) \longrightarrow \text{K}^+(aq) + e^-$
Barium	$\text{Ba}(s) \longrightarrow \text{Ba}^{2+}(aq) + 2e^-$
Calcium	$\text{Ca}(s) \longrightarrow \text{Ca}^{2+}(aq) + 2e^-$
Sodium	$\text{Na}(s) \longrightarrow \text{Na}^+(aq) + e^-$
Magnesium	$\text{Mg}(s) \longrightarrow \text{Mg}^{2+}(aq) + 2e^-$
Aluminum	$\text{Al}(s) \longrightarrow \text{Al}^{3+}(aq) + 3e^-$
Manganese	$\text{Mn}(s) \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(aq) + 2e^-$
Zinc	$\text{Zn}(s) \longrightarrow \text{Zn}^{2+}(aq) + 2e^-$
Chromium	$\text{Cr}(s) \longrightarrow \text{Cr}^{3+}(aq) + 3e^-$
Iron	$\text{Fe}(s) \longrightarrow \text{Fe}^{2+}(aq) + 2e^-$
Cobalt	$\text{Co}(s) \longrightarrow \text{Co}^{2+}(aq) + 2e^-$
Nickel	$\text{Ni}(s) \longrightarrow \text{Ni}^{2+}(aq) + 2e^-$
Tin	$\text{Sn}(s) \longrightarrow \text{Sn}^{2+}(aq) + 2e^-$
Lead	$\text{Pb}(s) \longrightarrow \text{Pb}^{2+}(aq) + 2e^-$
Hydrogen	$\text{H}_2(g) \longrightarrow 2\text{H}^+(aq) + 2e^-$
Copper	$\text{Cu}(s) \longrightarrow \text{Cu}^{2+}(aq) + 2e^-$
Silver	$\text{Ag}(s) \longrightarrow \text{Ag}^+(aq) + e^-$
Mercury	$\text{Hg}(l) \longrightarrow \text{Hg}^{2+}(aq) + 2e^-$
Platinum	$\text{Pt}(s) \longrightarrow \text{Pt}^{2+}(aq) + 2e^-$
Gold	$\text{Au}(s) \longrightarrow \text{Au}^{3+}(aq) + 3e^-$




Fig 2.6 Activity series of metals in aqueous solution

제 3 장 FSSW 및 SPR 실험 방법

제1절 실험의 세부사항

1. 실험장비

본 연구에서 사용되어진 FSSW 장비는 WINXEN사의 FSW 장비로 GANTRY TYPE을 사용하여 X, Y축은 테이블이 이동하고, Z축은 상부 헤드가 움직이게 된다. Z축의 회전은 300~3000RPM까지 가능하며 최대하중은 3000kgf이다. Fig 3.1 은 실험장비의 세부사양이다.

Items		Range
Type		Gantry
Welding Speed	X-axis	0.5~10mm/sec
	Y-axis	0.5~10mm/sec
	Z-axis	0.5~10mm/sec
	R-axis	1~20 RPM
Rotation		300~3000 RPM
Load Capacity		Max. 3000kgf



Fig 3.1 Equipment and specifications of FSSW system

SPR 장비의 경우 10Ton 만능재료시험기(Universal Testing Machine)에 적용 가능한 간이 SPR 접합 시험환경을 구축하였다. 상부 지그에는 펀치를 교체할 수 있도록 제작하였고, 하부금형의 경우 접합시편을 고정해주는 블랭크 홀더(Blank

Holder)와 다이(Die)를 교체할 수 있도록 하여 하부금형의 형상에 따라 실험이 가능하도록 제작하였다.

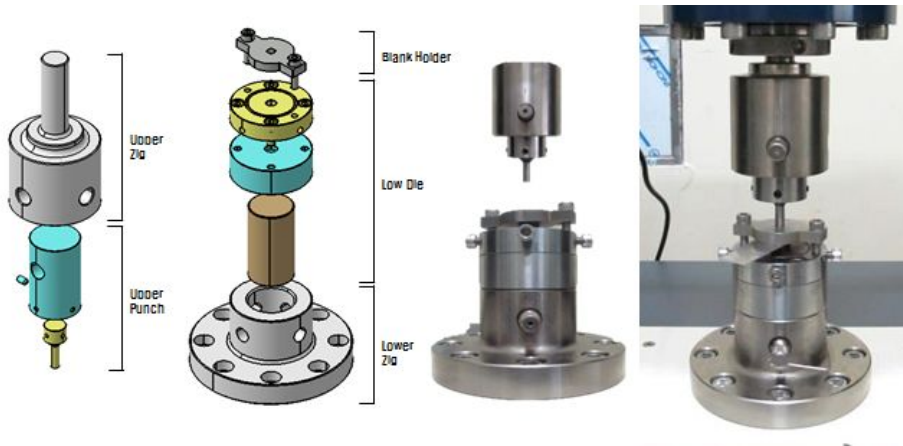


Fig 3.2 Equipment of SPR system

2. 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 알루미늄 주조제 A356-T6 3.0t 와 자동차용 강판 SAPH440 2.0t이다. Fig 3.3에 나타낸바와 같이 시편의 사이즈는 동일하게 150mm(L) X 50mm(B)로 제작 후 상판 알루미늄, 하판 강재를 50mm 겹쳐 마찰교반 점용접과 SPR을 실시했다. 알루미늄 합금 및 강재의 화학적 조성과 기계적 물성은 Table 3.1 과 같다

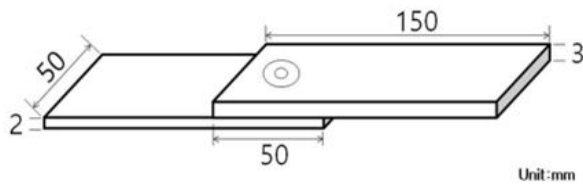


Fig 3.3 Configuration of specimen

Table 3.1 Chemical composition and mechanical properties of A356-T6 and SAPH440

Chemical composition (wt.%)								
A356-T6	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Cu	Ti	Al
	0.45	0.10	0.20	0.10	7.5	0.20	0.20	Bal.
SAPH440	C		Si	Mn	P	S	Al	
	0.074		0.014	1.254	0.012	0.004	0.028	

Mechanical properties			
Materials	T. S (MPa)	Y. S (MPa)	EL.(%)
A356-T6	230	185	2
SAPH440	447.2	332.5	37

3. FSSW 툴 및 리벳의 재질과 형상

마찰교반 정용접에 있어서 툴은 매우 중요한 변수 중 하나이다. Fig 3.4는 본 연구에서 사용된 툴을 나타낸 것이다. 툴의 재질은 WC(Tungsten carbide)-Co12%로 다이아몬드 연삭을 통하여 제작되었으며, 헤드 형상은 절두체(Frustum)로 선정하였다. 핀의 길이는 알루미늄 소재 두께와 동일한 3.0mm, 직경은 상부 6.0mm, 하부 4.0mm 오목각 3° , 솔더 직경은 14mm이다.

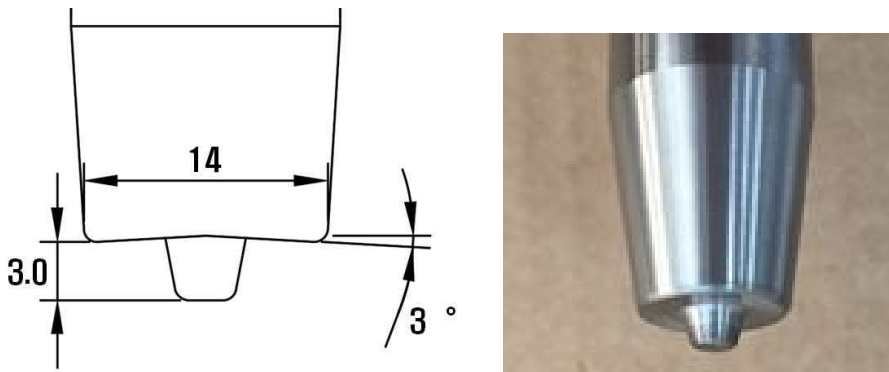


Fig 3.4 Tool shape and details

셀프-피어싱 리벳에 사용된 리벳은 Stanley 社의 상용품을 사용하였다. 헤드의 직경은 8.5mm 리벳 길이 7.0mm 하부 외경의 직경은 4.8mm이다. 형상과 치수는 Fig 3.5 에 나타냈다.

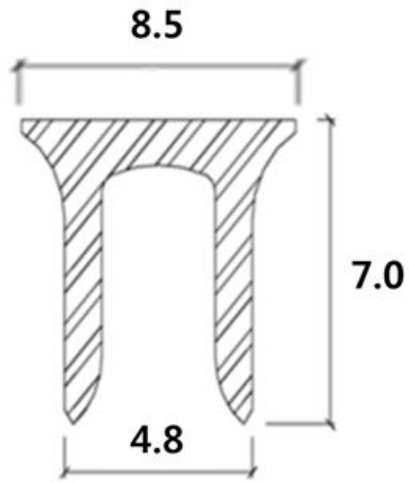


Fig 3.5 Rivet shape and details

4. 실험 조건

FSSW의 주요 공정변수는 틀의 형상, 회전속도(RPM), 삽입속도(Plunge speed), 삽입깊이(Plunge depth), 가압력, 유지시간(Dwell time) 등이 있다. 본 연구에서는 틀 형상, 유지시간, 삽입속도를 고정하고 주안점으로 회전속도(RPM), 삽입깊이(Plunge depth) 변화에 따른 용접특성을 15 케이스에 대해 실시하였다. Table 3.2는 15 케이스의 FSSW 용접조건으로 회전속도 300 ~ 500 RPM 조건에서 삽입깊이 0.2 ~ 1.2mm 에 대한 용접조건을 나타낸 것이다.

Table 3.2 Welding conditions for FSSW

Case	회전속도(RPM)	삽입깊이(mm)
1	300	0.2
2		0.5
3		0.7
4		1.0
5		1.2
6	400	0.2
7		0.5
8		0.7
9		1.0
10		1.2
11	500	0.2
12		0.5
13		0.7
14		1.0
15		1.2

SPR의 주요 공정변수는 리벳의 형상, 하부금형의 형상, 체적, 접합속도(Punch speed) 등이 있지만, 상용 리벳을 사용하는 관계로 리벳의 형상은 고정된 채로 접합의 해석을 통하여 Table 3.3에서와 같이 하부금형의 깊이와 반지름에 따른 케이스를 선정하여 리벳의 변형거리 비율($\Delta x/r$)을 확인하였다. 해석 결과를 토대로 기하학적 구속이 크게 나타난 조건의 하부금형을 제작하여 실험을 진행하였다.

Table 3.3 Joining conditions for SPR

Case	하부금형 깊이 (Die depth, H)	하부금형 반지름 (Die radius, R)
1	1.2mm	5.0mm
2	1.1mm	6.0mm
3	1.2mm	7.0mm
4	1.4mm	7.0mm

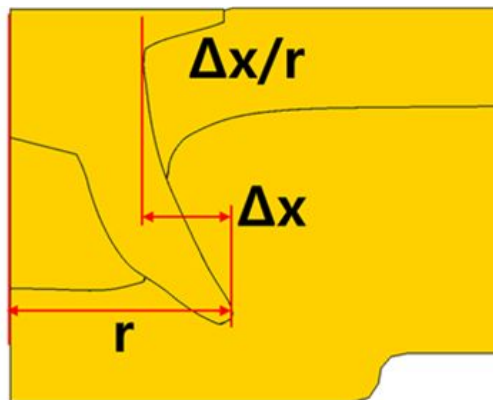


Fig 3.6 Strain distance ration of rivet

5. SPR 공정 해석

SPR 공정 해석 모사에 필요한 물성 데이터를 얻기 위해 A356, SPR 리벳의 경우 압축시험을 실시하여 데이터를 추출하였다. SPR 리벳은 형상과 크기 때문에 부품 자체에 압축시험을 진행하였으며, SAPH440은 판재로 압축시험이 불가해 인장시험으로 대체하여 물성 데이터를 확보하였다.

확보된 물성 데이터를 활용하여 SPR 공정을 Deform 2D 해석 프로그램을 사용하여 Fig 3.6과 같이 해석조건을 선정하였다.

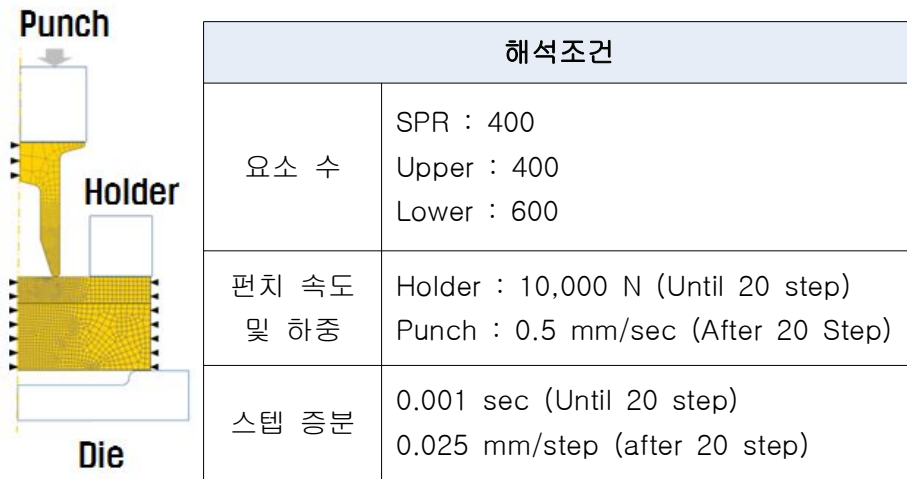


Fig 3.7 Analysis condition of SPR

제2절 소재 물성 평가

1. A356 압축시험 및 SAPH440 인장시험

A356 소재의 물성 데이터를 얻기 위해 직경 7mm, 두께 5mm의 압축시험 시편을 제작하여 10Ton 용량의 만능재료시험기(Universal Testing Machine)에 압축시험용 지그를 사용하여 실험하였다. 시험 속도는 1mm/min, 변위제어로 3.5mm 압축하였다.

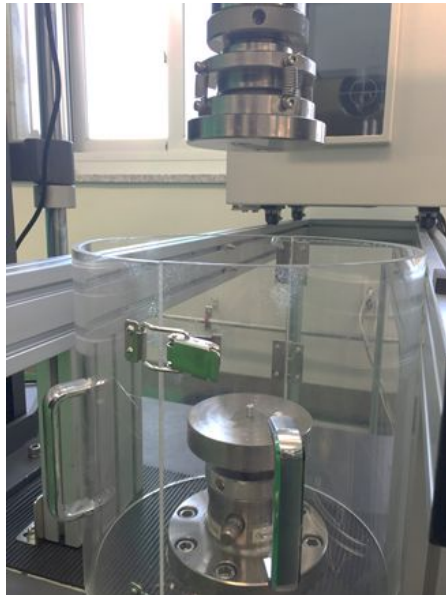


Fig 3.8 Universal testing machine with compression jig

SAPH440은 소재의 두께가 2t의 판재로 압축시험이 불가하여 Table 3.4에 표시된 KS B 0801 시험편 치수와 형상에 맞게 가공하고 Fig 3.9에서와 같이 익스텐서미터(Extensometer)를 장착하여 인장시험을 수행한 후 극한 인장강도까지 응력선도를 외삽 하여 물성 데이터를 확보하였다.

Table 3.4 Specimen dimensions – KS B 0801

제품단면 모양	구분	나비 W	표점 거리 L	평행부 길이	평행부 끝에서 물림장치까지의 거리
판	13호	12.5	50	75	87.5

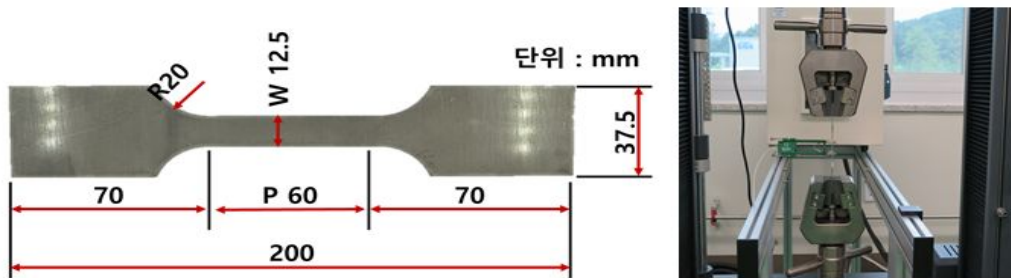


Fig 3.9 KS B 0801 13B tensile specimen dimension and tensile test

2. SPR 리벳 압축시험

SPR의 리벳은 형상이 작아 시편 추출이 어려워 부품 자체에 10Ton 용량의 만능 재료시험기(Universal Testing Machine)에 압축시험용 지그를 사용하여 실험하였다. 시험 속도는 1mm/min, 변위제어로 3.0mm로 압축실험을 진행하였고, 해석과 하중선도 비교를 통해 물성치를 역추산하였다.

제3절 접합부 기계적 특성 평가

FSSW와 SPR의 접합 후, 각 조건별 시편의 접합여부, 형태, 결함 등을 1차적으로 육안검사하였다. 또한 단면 관찰을 통해 FSSW의 접합예측과 흑 형성, SPR의 리벳 끝단에 의한 기하학적 구속을 확인하여 특성을 고찰하고자 하였다.

FSSW와 SPR의 조건별로 접합부의 전단인장강도 평가를 위해 KS B 0851 규격에 의거하여 시편을 150mm(L) X 50mm(W)로 제작하여 50mm 겹친 후 접합을 실시하였다. 접합 시편을 10Ton 만능재료시험기(Universal Testing Machine)로 전단인장강도 시험을 실시하였고, 시험 속도는 2mm/min으로 설정하였다.



Fig 3.10 Universal testing machine

Akashi 社 HM-112 micro vickers 경도기를 사용하여 시편의 경도 분포를 관찰하였다. 압자는 136° 다이아몬드 피라미드로 하중 0.5kgf, 하중시간 10초의 조건을 사용하였으며, 측정위치는 상부 알루미늄과 하부 스틸의 접합부 중심에서 좌우 8mm, 0.5mm 간격으로 측정하였다.

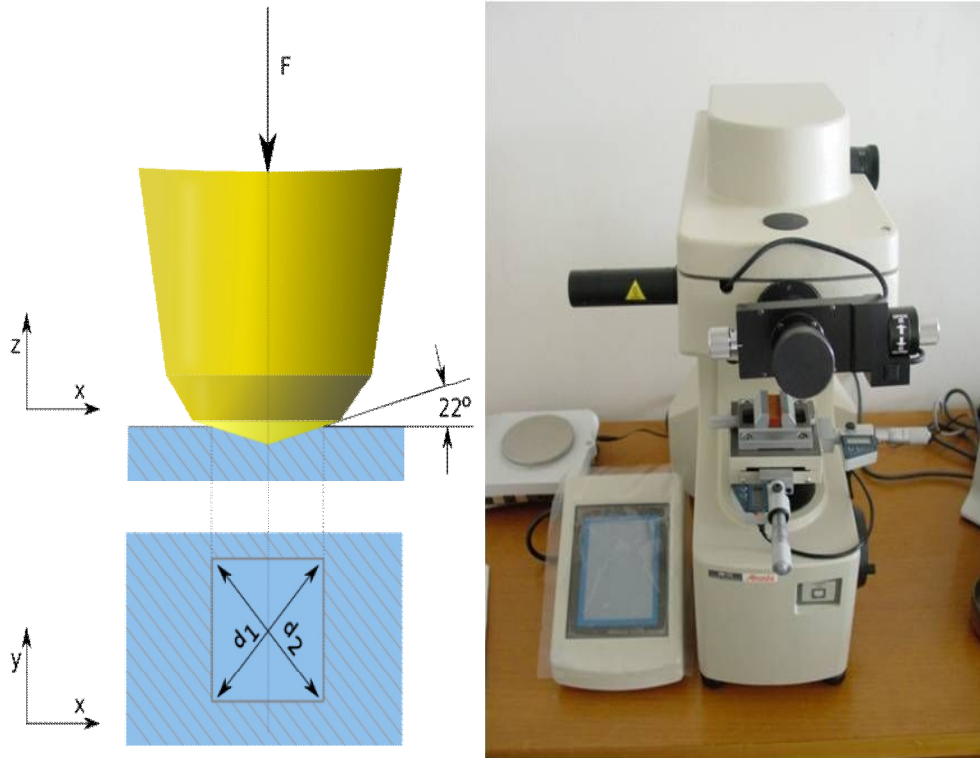


Fig 3.11 Vickers hardness test scheme and equipment

제4절 접합부 미세조직 관찰

미세조직 관찰을 위해 접합시편의 절단과 마운팅, 연마 후 부식(에칭)을 실시하였다. 마운팅 후 시편의 연마를 위하여 자동연마기계를 사용하여 사포 #200부터 시작하여 #500, #800, #1000, #1200 으로 연마 후 다이아몬드 입자와 윤활제를 사용하여 미세연마까지 진행 후, 부식을 하였다.

부식에 사용된 용액은 SAPH440의 경우 나이탈(Nital) 4% 용액으로 질산(Nitric acid) 4ml와 에탄올(Ethanol) 100ml를 혼합하여 10초 동안 에칭하였으며, A356은 불산(Hydrofluoric acid) 0.5ml와 증류수 100ml의 혼합용액으로 15초 동안 에칭하였다. 각 과정이 끝난 시편은 증류수로 1차 세척 후 알코올로 2차 세척한 뒤 미세조직을 관찰하였다.

연마 및 부식이 완료된 시편 접합부(Cross section)의 미세조직 관찰을 위해 OLYMPUS社 BX51M 광학현미경(Optical microscope)을 사용하였다. 특히 알루미늄-철계 용접부의 경우 취성의 성질을 가지는 금속간화합물 Al_xFe_x 가 발생하므로, 금속간화합물 층의 두께를 측정하였다.

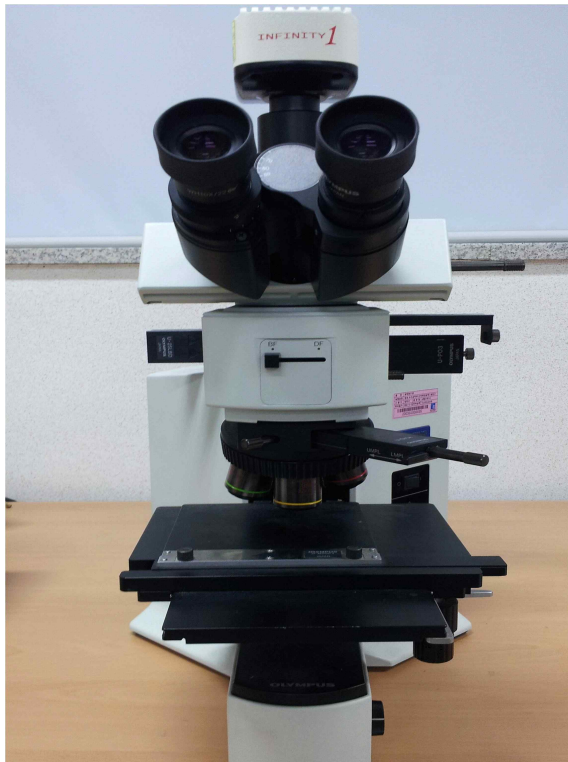


Fig 3.12 Optical microscope

제 4 장 실험결과 및 고찰

제1절 소재 물성 평가

1. A356 압축시험 및 SAPH440 인장시험 결과

A356 소재의 압축시험 결과, 모든 실험에서 크랙이 발생하였다. 이는 연신율이 2~3% 로 주조용 알루미늄 합금의 특성상 필연적으로 발생할 수밖에 없는 것으로 판단되며 Fig 4.1에서와 같이 변위제어로 3.5mm까지의 압축시험 결과를 통해 Fig 4.2의 진 응력-진 변형을 곡선 데이터를 확보하였다. Table 4.1은 압축시험 시편의 전, 후 형상변화를 측정 한 것이다.

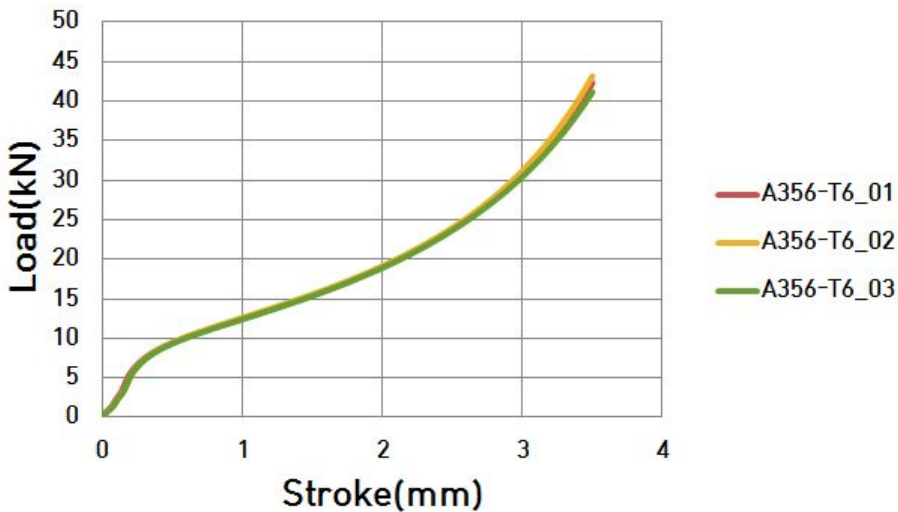


Fig 4.1 Load - Stroke curve (A356)

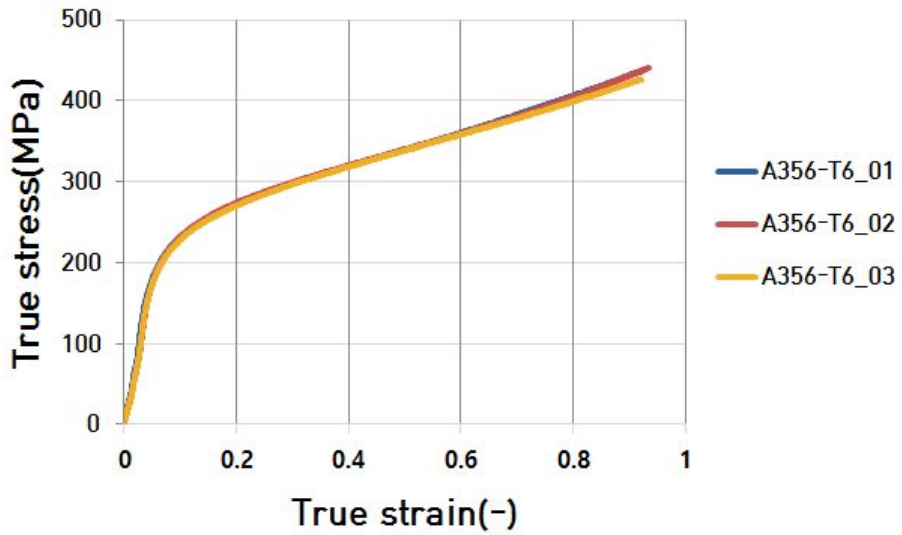


Fig 4.2 True stress - True strain curve (A356)

Table 4.1 Comparison before and after compression test


구분	압축시험 전		압축시험 후	
	높이(mm)	직경(mm)	높이(mm)	직경(mm)
A356	4.98	7.0	1.48	11.55
	4.99	7.0	1.46	11.57
	5.02	7.0	1.5	11.45
시편 형상				

Fig 4.3은 SAPH440 소재의 인장시험 그래프로 탄성계수는 207,000MPa, 항복강도는 326MPa, 최대인장강도는 440MPa, 파단 변형률은 0.353으로 측정되었다. Fig 4.4는 SAPH440 2t 판재의 두께로는 압축시험이 불가능하기 때문에 인장시험 결과를 토대로 극한인장강도까지 응력선도를 외삽하여 진응력-진변형을 곡선을 확보하였다.

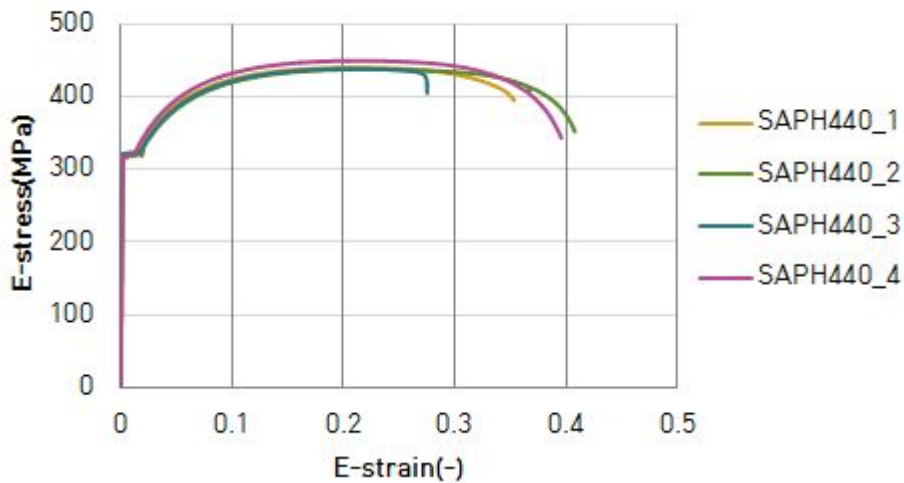


Fig 4.3 Engineering stress - Engineering strain curve (SAPH440)

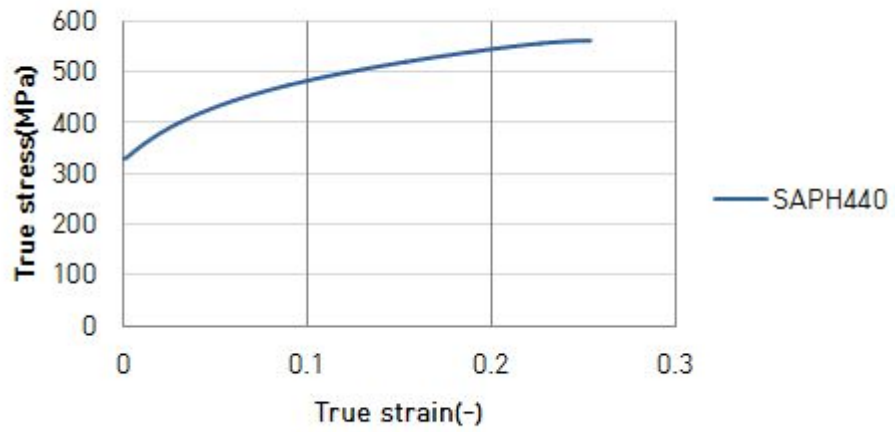


Fig 4.4 True stress - True strain curve (SAPH440)

2. SPR 리벳 압축시험 결과

Fig 4.5는 리벳의 압축시험 결과와 해석을 통해 하중선도를 비교하여 물성치를 역추산하여 그래프로 나타낸 것이다. 추정된 강도는 1500MPa, 변형경화 지수 0.01이다. Fig 4.6은 실제 리벳의 변형과 해석상에서의 변형을 비교한 것이다.

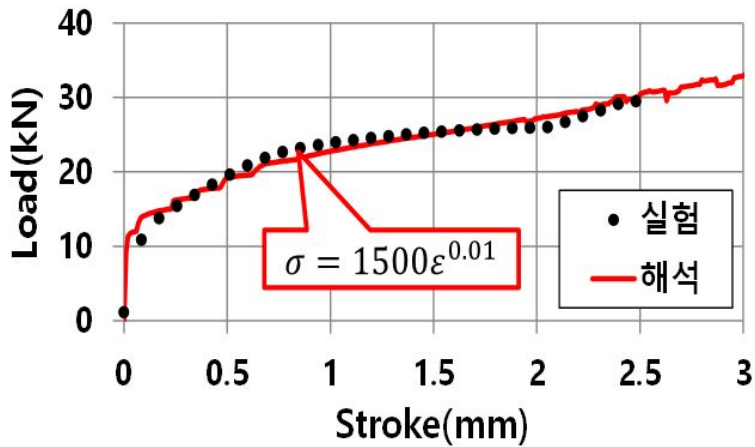


Fig 4.5 Load - Stroke curve (Rivet)

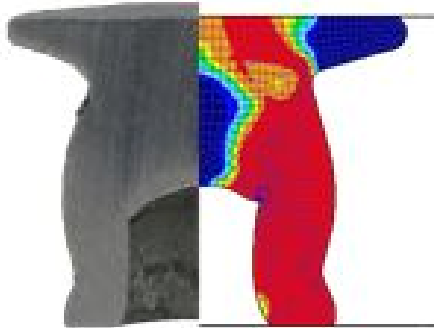


Fig 4.6 Comparison of analysis results and experiment shapes

제2절 FSSW 접합부 특성

FSSW의 최적 조건을 선정하기 위하여 삽입깊이 0.2mm~1.2mm, 회전속도 300RPM~500RPM의 15조건에서 접합을 실시하여 비드형상(Bead surface)을 관찰하였다. Table 4.2는 삽입깊이와 회전속도에 따른 탑 비드형상, Table 4.3은 백 비드형상, Table 4.4는 용접부 단면형상을 나타낸 것이다. Table 4.2에서와 같이 툴의 솔더로 인한 버(Burr)는 0.2mm, 300RPM 조건 외엔 모두 발생하였다. Table 4.3을 보면 삽입깊이가 0.2mm, 0.5mm의 경우 백 비드(Back bead)의 그을림 현상이 적어 적은 교반으로 인한 미접합이 예상되었으며, 삽입깊이가 깊어질수록 마찰열에 의한 그을림이 진해졌다.

Table 4.2 Top bead profiles of FSSW welded joints with rotation speed and plunge depth

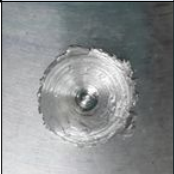




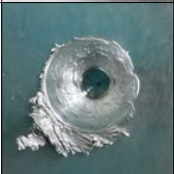
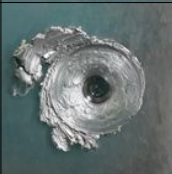








삽입깊이 (mm) 회전속도 (RPM)	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2
300					
400					
500					

Table 4.3 Bottom bead profiles of FSSW welded joints with rotation speed and plunge depth












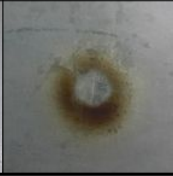

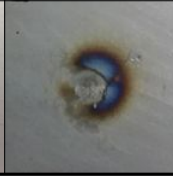
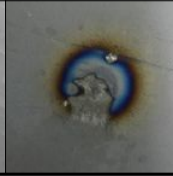
삼입깊이 (mm) 회전속도 (RPM)	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2
300					
400					 (13)
500					

Table 4.4 Cross section of FSSW welded joints with rotation speed and plunge depth

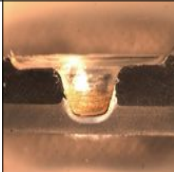
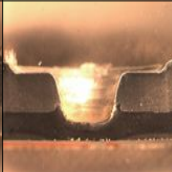
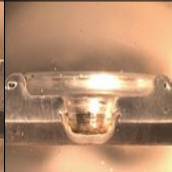
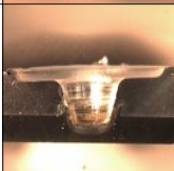
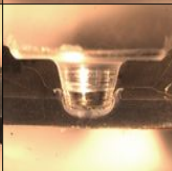

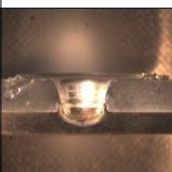
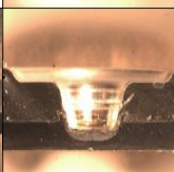
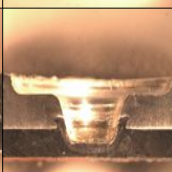
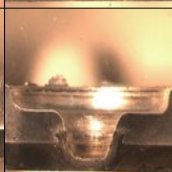
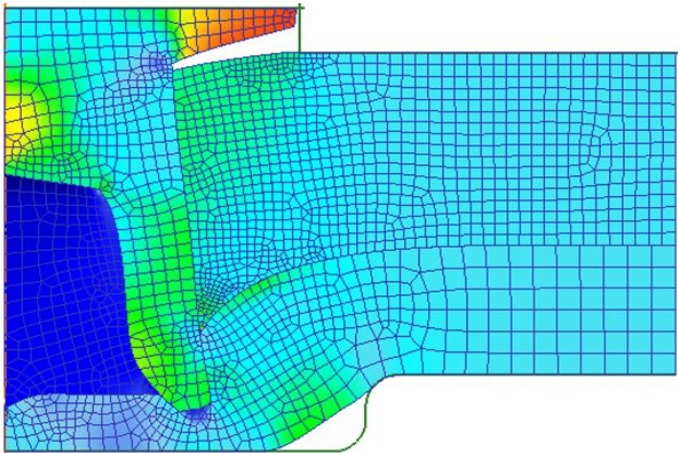
삽입깊이 (mm) 회전속도 (RPM)	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2
300	-	-			
400	-	-			
500	-				

Table 4.4를 살펴보면, 삽입깊이 0.2mm와 0.5mm는 접합이 이루어지지 않았고, 0.7mm ~ 1.2mm는 툴의 핀 끝단에 의한 압력 및 회전속도에 의한 열로 강재의 연화와 소성유동이 발생하여 상부 알루미늄 쪽으로 흑이 생성된 것을 확인할 수 있다. 그러나 1.2mm는 과도한 툴의 삽입으로 상부 알루미늄의 유효두께가 과도하게 줄어들어 전단인장강도의 저하가 예상된다.

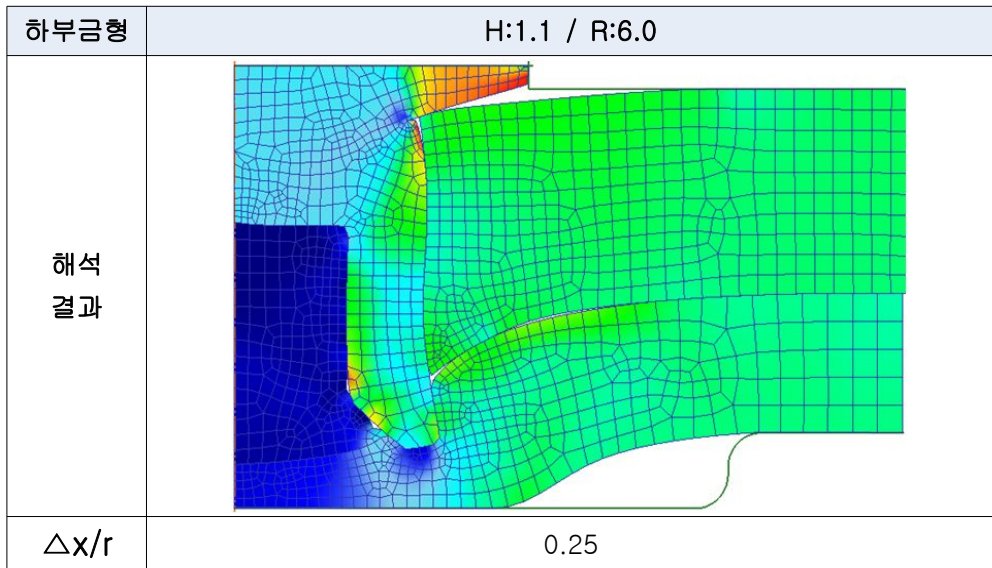
제3절 SPR 공정 해석 및 접합부 특성

Table 4.5는 하부금형의 높이(H)와 하부금형의 반지름(R)의 변화에 따른 결과와 리벳의 변형거리 비율($\Delta x/r$)을 나타낸 것이다. 공정 해석 결과 모든 조건에서 공극의 발생은 나타나지 않았고, 조건 1과 3이 리벳의 변형 거리 비율($\Delta x/r$)이 0.33 이상으로 접합이 양호함을 확인하였다. 그러나 A356 알루미늄 주조재의 연성 부족으로 인한 크랙 발생은 불가피할 것으로 나타났다. Table 4.6은 가장 높은 리벳의 변형 거리 비율을 나타낸 조건 1, 3의 실제 비드를 나타낸 것이다.

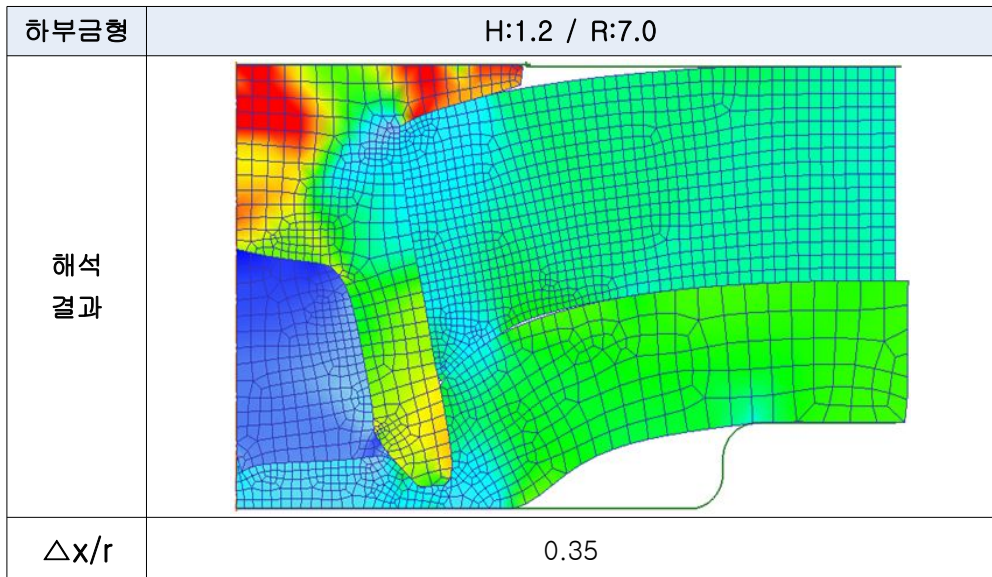
Table 4.5 Case study of joining analysis by SPR

하부금형	H:1.2 / R:5.0
해석 결과	
$\Delta x/r$	0.34

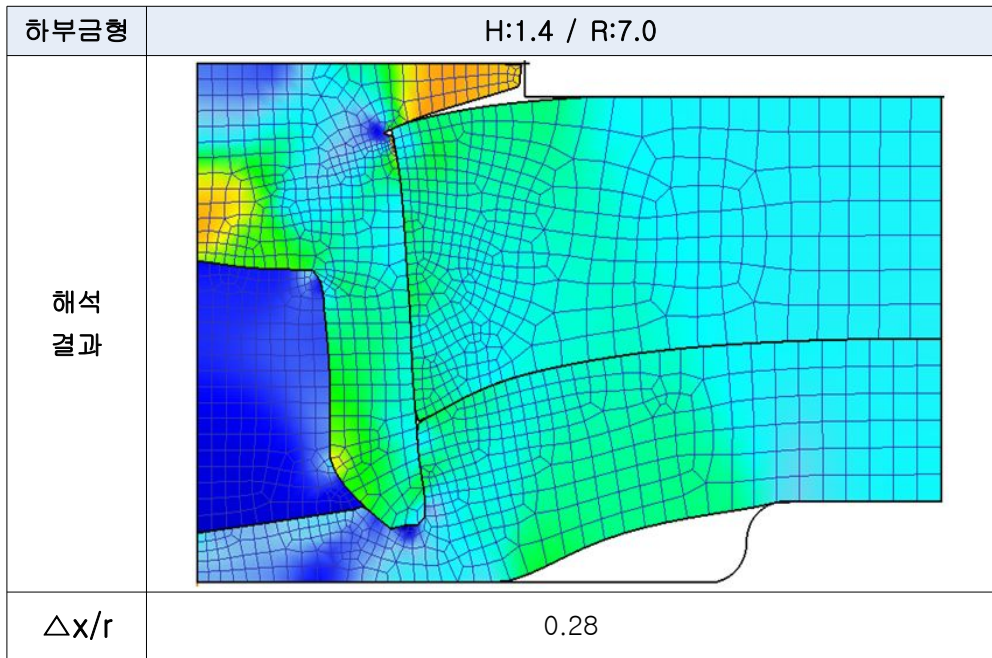
(A) case 1



(B) case 2

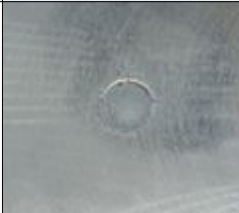

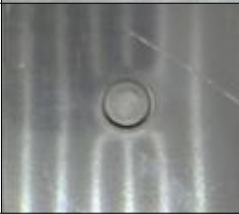



(C) case 3



(D) case 4

Table 4.6 Bead profiles of SPR in case 1 and case 3

조건	1	3
Top		
Bottom		

접합부의 경우 1, 3 조건 모두 알루미늄 소재 연성 부족으로 인한 크랙을 확인하였는데 단면사진 Fig 4.7 에서와 같이 내부의 크랙(붉은 원)을 확인할 수 있었다. 또한, 리벳 끝단에 의한 기하학적 구속(노란 원)이 체결된 것을 확인할 수 있었다

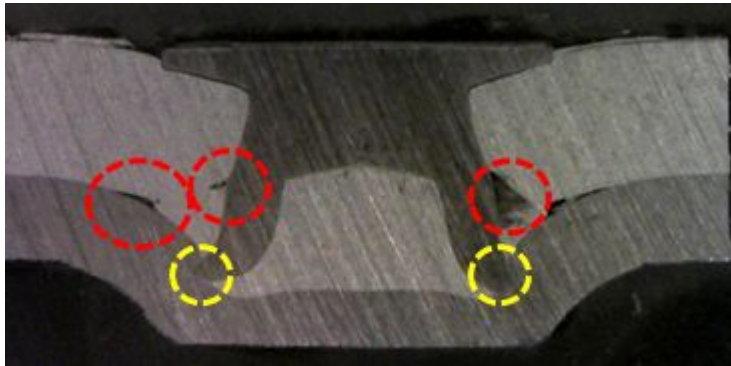


Fig 4.7 Cross section of SPR

제4절 전단인장 및 경도 특성

1. 전단인장강도

FSSW의 전단인장 측정에 필요한 시험편은 정의된 규격이 없는 관계로 저항 점용 접 규격인 KS B 0851 인장규격에 의거하여 회전속도 300~500RPM의 조건별 3개의 시험편을 제작하였다. 회전속도별 전단인장강도 시험 결과의 평균값을 Fig 4.8 에 나타내었다. Table 4.4 톨의 회전속도에 따른 접합부 단면특성에서 알 수 있듯이 회전속도 500RPM 삽입깊이 1.0mm 에서 3.5kN으로 최대 전단인장강도를 확보하였으며 회전속도가 증가함에 따라 전단인장강도 또한 증가하는 양상을 보이는데, 이는 회전속도의 증가로 인해 원활한 교반이 용접부의 강도를 향상시키는 것으로 판단 된다.

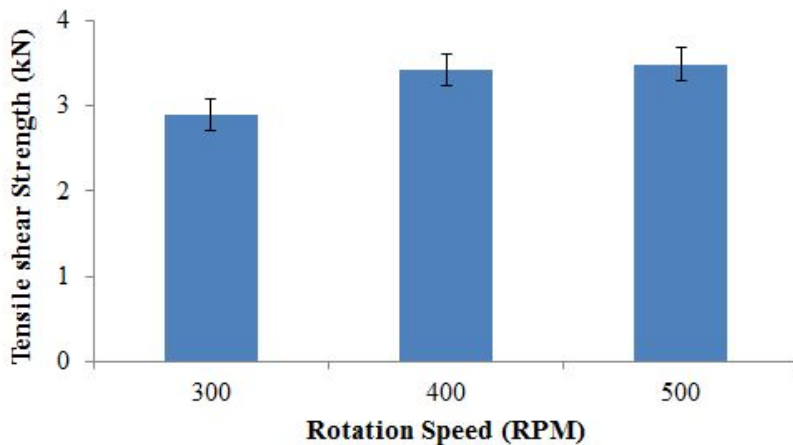


Fig 4.8 Tensile shear strength of FSSW welded joints with rotation speed

Fig 4.9는 톨의 회전속도별 전단인장시험 결과를 토대로 가장 높은 전단인장강도를 얻은 500RPM 조건에서 회전속도를 고정시킨 후 삽입깊이에 따른 전단인장시험결과를 나타낸 것이다. 삽입깊이 0.5mm 조건을 제외한 모든 조건에서 KS B 0850 규격(점 용접부의 검사 방법)의 알루미늄 합금 3t 전단인장하중 기준치인 1.8kN 이상의 강도를 얻을 수 있었다. 삽입깊이 1.0mm일 때 가장 높은 3.5kN의 전단인장강도를 확보할 수 있었다.

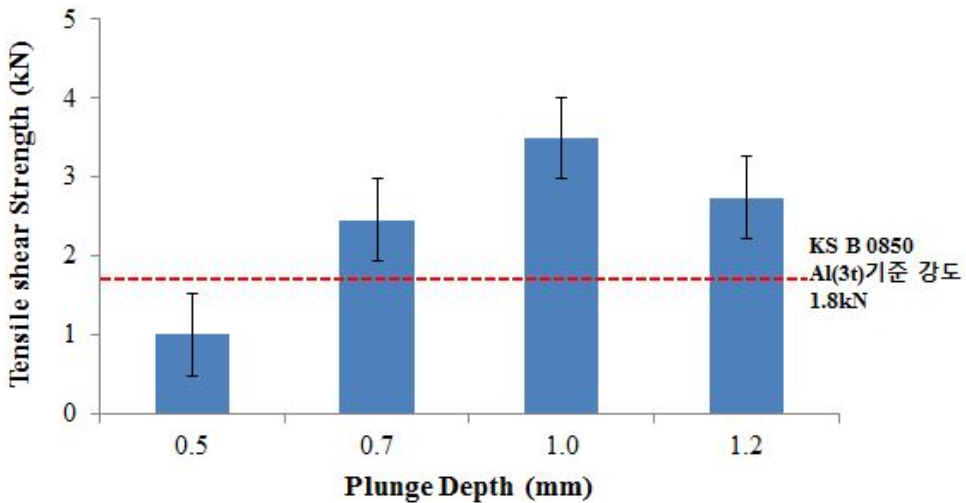


Fig 4.9 Tensile shear strength of FSSW welded joints with plunge depth

SPR의 또한 정의된 규격이 없는 관계로 FSSW와 비교 분석만을 진행하였으며 Fig 4.10과 같이 조건 1은 7.9kN, 조건 3은 6.4kN의 전단인장강도를 나타냈다. 조건 1과 3은 하부금형인 다이 높이는 같지만 반지름은 5mm와 7mm로 차이가 있으며, 해석결과에선 조건 3이 기하학적 구속인 리벳의 변형거리 비율이 더 높게 나타났지만 전단인장시험 결과에서는 반대로 나타났다. 이는 접합부 특성에서 설명한 크랙의 영향으로 사료된다.

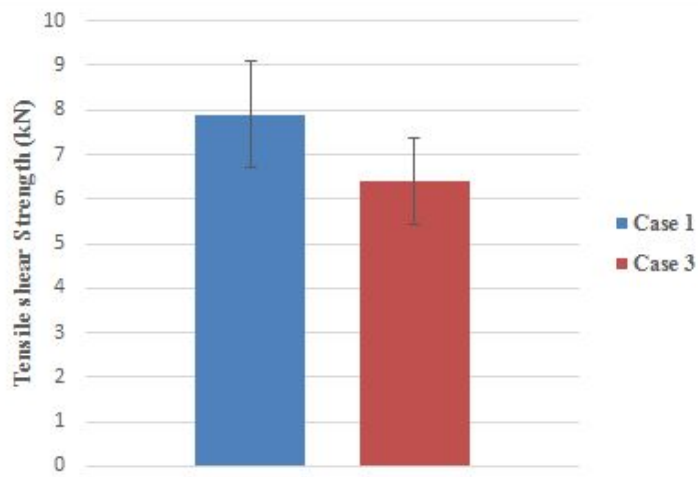
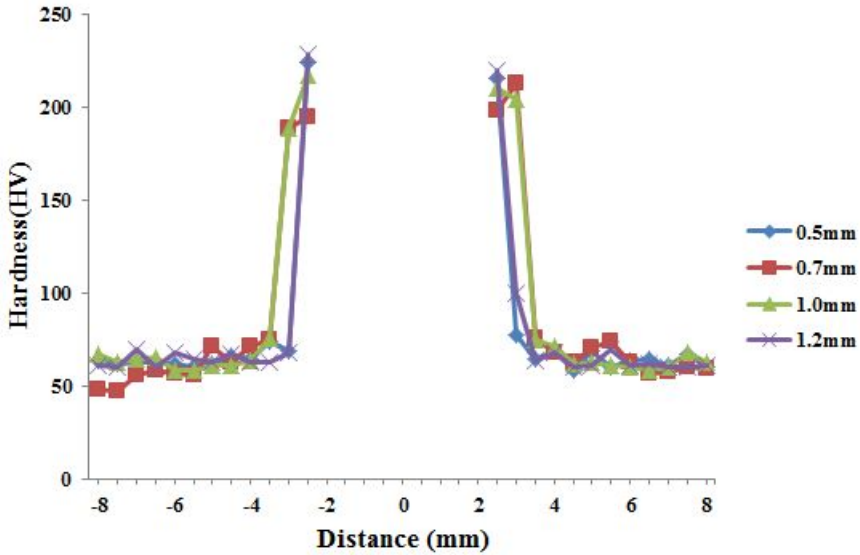


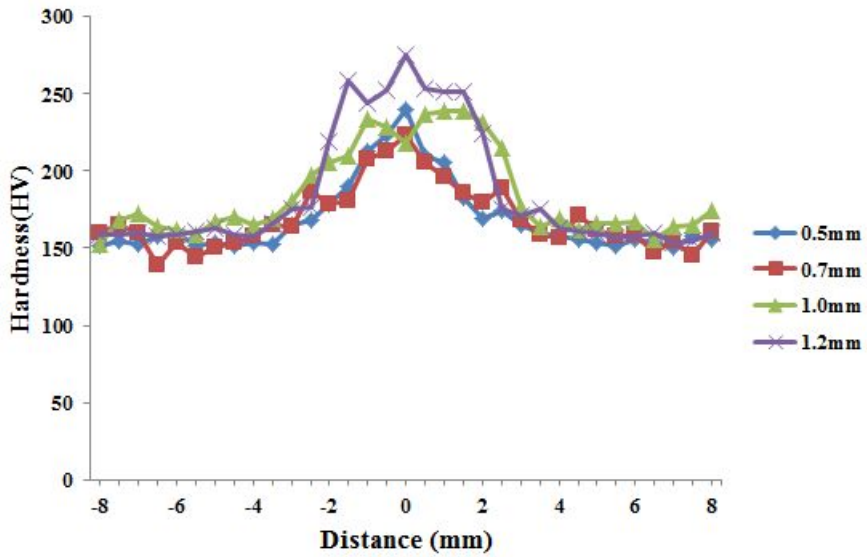
Fig 4.10 Tensile shear strength of SPR

2. 경도분포

Fig 4.11은 FSSW의 용접부의 경도분포로 (A)는 상부 알루미늄 (B)는 하부 스틸을 나타낸 것이다. 전단인장강도가 높게 나온 500RPM의 조건에서 삽입깊이별 경도를 측정하였다. 경도 측정 결과, 삽입깊이 1.2mm일 때 알루미늄 측에서 최대 경도 값이 약 228Hv로 알루미늄 모재가 50Hv 정도인 것에 비해 높게 나타났는데 이는 교반과정에서 상부 알루미늄 쪽으로 하부의 스틸이 유입되어 흑이 생성된 것으로 예상된다. 또한 하부 스틸도 틀의 삽입깊이 1.2mm일 때, 최대 경도가 약 275Hv로 모재 대비 약 115Hv 높아진 것을 확인할 수 있었다. 알루미늄과 스틸 모두 삽입깊이가 증가할수록 틀의 가압력과 회전에 의한 소성변형으로 인해 경도 값이 높아지는 것으로 판단된다.



(A) A356



(B) SAPH440

Fig 4.11 Hardness distributions of FSSW welded joints

제5절 미세조직 특성

FSSW 용접시험편중 가장 높은 전단인장강도를 나타낸 용접조건, 회전속도 500RPM, 삽입깊이 1.0mm 조건 시험편에 대한 위치별 미세조직을 고찰하였다. 알루미늄의 HAZ와 TMAZ 부분인 B, C는 툴의 회전에 생긴 입열로 조직이 미세화 되었으며, 스틸부분의 HAZ와 TMAZ인 E, F는 모재 D와 비교하였을 때 역방향 회전으로 생긴 열영향으로 알루미늄과 동일하게 조직이 미세화 되었다. 특히 TMAZ는 핀 끝단에 의한 압력까지 작용하여 소성변형이 발생하였다. 입열량의 증가로 강재가 연화되고 소성유동에 의해 흑이 생성되는 것으로 판단된다.[17]

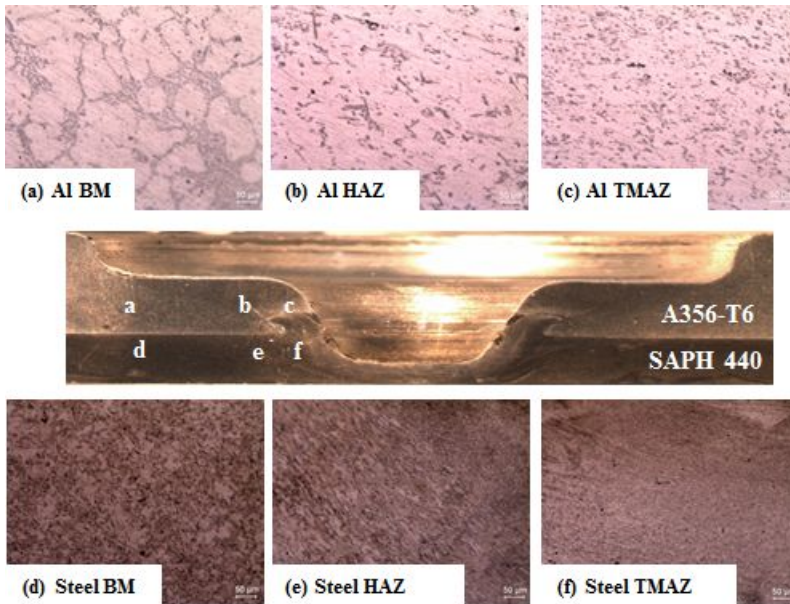
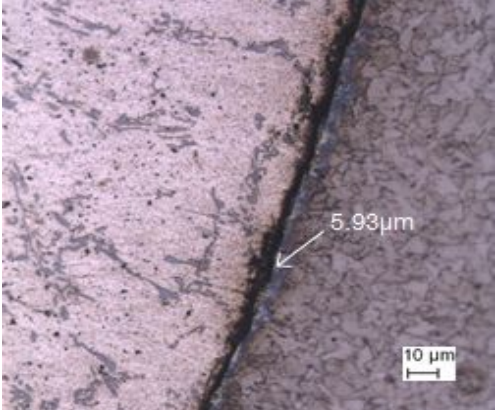
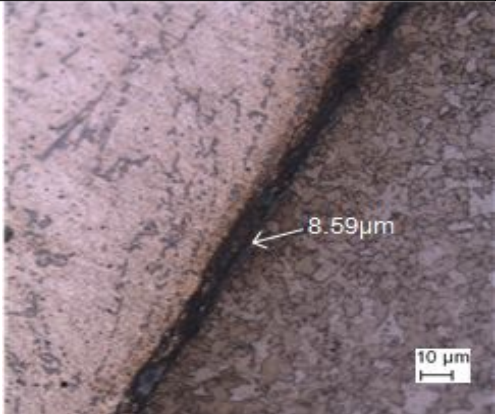
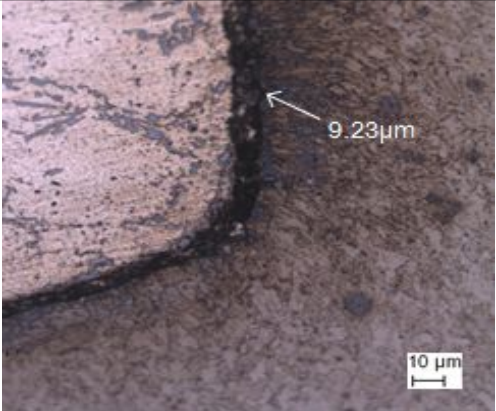


Fig 4.12 Micro structure of FSSW welded joints

또한, 알루미늄-철계 용접시 용접부의 강도를 저하시키는 취성의 금속간화합물 Al_xFe_x 가 발생하므로 FSSW의 삽입깊이 0.7~1.2mm 조건에서 금속간화합물(IMC)층을 관찰하였다. Table 4.7과 같이 삽입깊이 0.7mm일 때 금속간화합물 두께가 최대

5.93 μm , 1.0mm 일 때 최대 8.59 μm , 1.2mm 일 때 최대 9.23 μm 로 삼입깊이가 증가할 수록 금속간화합물 두께가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 삼입깊이의 증가에 비례하여 가압력과 마찰열이 증가해 금속간화합물 층의 형성과 그 두께가 증가하는 것으로 사료된다. 삼입깊이 0.7~1.2mm 조건 모두 이종재료 접합에서 요구되는 10 μm 이내의 금속간화합물 두께를 만족하였다.

Table 4.7 Thickness of IMC in FSSW welded joints with plunge depth

삽입깊이 (mm)	금속간화합물
0.7	
1.0	
1.2	

제 5 장 결 론

본 연구에서는 마찰교반점용접(FSSW)과 셀프-피어싱 리벳팅(SPR)를 이용하여 알루미늄 주조재 A356과 자동차용강판 SAPH440의 이종소재 접합에 대한 접합성을 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) FSSW는 삽입깊이가 0.5mm 이하에서는 회전속도와 무관하게 용접이 이루어지지 않았고, 삽입깊이 1.2mm에서는 상부 알루미늄 소재의 유효두께 감소로 인해 전단인장 값이 감소하였다. 접합부 단면형상의 경우 훅(Hook)과 유효두께 측면에서 살펴보면, 삽입깊이가 깊어질수록 회전속도(RPM)가 빠를수록 가압력 상승 및 마찰열 증가로 훅 크기가 증가하였지만, 툴의 슬더로 인한 알루미늄 상부의 유효두께가 감소하여 강도가 오히려 저하되었다.
- 2) FSSW는 삽입깊이 1.0mm 회전속도 500RPM 조건에서 가장 높은 3.5kN의 전단인장강도를 나타냈고, KS B 0850 점용접부의 검사 규격의 AI 3t의 전단인장하중 기준치인 1.8kN 이상의 강도를 확보하였다.
- 3) FSSW는 삽입깊이가 증가할수록 가압력과 마찰열로 인해 금속간화합물의 두께가 증가하는 것으로 확인되었으며, 삽입깊이 1.0mm 조건에서 8.59 μ m로 이종재료 접합에 요구되는 10 μ m이내의 금속간화합물 두께를 형성하였다.
- 4) SPR 공정해석 결과 모든 조건에서 공극은 발생하지 않았으며, 하부금형의 높이가 1.2mm, 반지름 5.0mm 조건에선 리벳의 변형 거리 비율($\Delta x/r$)이 0.34, 하부금형 높이가 1.2mm, 반지름 7.0mm 조건에선 0.35로 양호한 접합을 확인하였다. 그러나 알루미늄 소재 A356의 연성 부족으로 인한 크랙 발생이 확인되었다.

- 5) SPR은 하부금형의 반지름 5mm와 7mm 조건에서 각각 7.9kN, 6.4kN의 인장강도를 확보하였으며 반지름 7mm의 조건에서 강도가 더 낮은 것은 하부금형의 반지름의 크기가 상대적으로 커 상부 알루미늄 소재의 변형이 커진 만큼 크랙 또한 성장했기 때문이다.
- 6) FSSW는 회전속도 500RPM, 삽입깊이 1.0mm, 유지시간 15sec, 톨 삽입속도 1mm/sec의 조건에서 3.5kN의 최대 전단인장강도를 확보하였다. SPR은 소재의 두께보다 2mm 길게 적용하고, 금형 직경은 리벳의 외경보다 두 배 크게 설계하여 리벳 길이 7mm, 하부금형의 깊이 1.2mm, 직경 10mm에서 가장 높은 7.9kN의 전단인장강도를 확보하였고, 해석상에서도 상기 조건에서 가장 큰 기하학적 구속을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Y. S. Kim : Future of the friction stir spot welding technology for non-ferrous metal, Journal of Welding and Joining, 2012, 30-3, pp4-14
- [2] S. H. Chowdhury, D. L. Chen, S. D. Bhole, X. Cao and P. Wanjara : Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive, Materials Science and Engineering: A, 2013, 562, pp53-60
- [3] 정현상 : 자동차 경량화 용·복합소재 트렌드분석, 한국과학기술정보연구원, 2013
- [4] H. S. Bang, H. S. Bang and G. H. Jeon : Recent Studies on Hybrid Friction Stir Welding. Journal of Welding and Joining, 2010, 28-5, pp35-37
- [6] S. H. Kim, S. W. Kim, S. J. Park and W. S. Chang : Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32 / A6022-T4, RIST journal of R&D, 2007, 21-2, pp153-159
- [7] C. K. Chun, H. J. Kim and W. S. Chang : Friction Stir Spot Joining on Aluminum Alloy for Transportation, Journal of The Korean Welding & Joining Society, 2008, 26-6, pp23-29
- [8] Y. Abe, T. Kato, K. Mori Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets using conventional rivet and die, journal of materials processing technology 209 (2009) pp3914-3922
- [9] Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee, S. B. Jung and W. S. Chang : Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium Alloys, Journal of Welding and Joining, 2005, 23-3, pp16-20

- [10] E. H. Kim, K. J. Lee and K. H. Song : Evaluation of mechanical properties on friction stir lap jointed Al6061/HT590 alloys, Journal of Welding and Joining, 2015, 33-2, pp8-13
- [11] Y. Kim, K. Y. Park and S. B. Kwak : Mechanical fastening and joining technologies to using multi mixed materials of car body, Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.3(2015) pp12-18
- [12] Y. H. Yina, N. Sunb, T. H. Northc and S. S. Hua : Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds, Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210, pp2062-2070
- [13] S. J. Lee, S. K. Lee and N. I. Baik : A Study on the Microstructure and Hardness of Al-Si-Mg Alloys upon Heat Treatments, J of the Korean Society for Heat Treatment, v.13, no.2, 2000 Year, pp.108-114
- [14] D. Horstmann, Proc. Fourteenth Int. of Hot Dip Galvanizing, Munich, ZDA, London, (1985) 6/1
- [15] A. A Hershman, Proc. Eighth Int. Conf. of Hot Dip Galvanizing, London, ZDA, London, (1967) 3
- [16] Metals Hand book, 3rd ed, Japan Institute of Metal, Maruzen, Tokyo, Japan, (1993) 539
- [17] Kim KS, Master Thesis, Gyeongsang National University, "Microstructures and mechanical properties of A356 semisolid metal fabricated by cooling plate" (2000) 1.