



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](#)

2016년 8월

석사학위논문

마찰교반점용접을 이용한 알루미늄
합금과 초고강도강(AI5083-O/DP590)의
이종접합 특성 연구

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

정 수 옥

마찰교반점용접을 이용한 알루미늄
합금과 초고강도강(AI5083-O/DP590)의
이종접합 특성 연구

Characteristics of Dissimilar Friction Spot Joining of
AI5083-O/DP590

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

정 수 옥

마찰교반점용접을 이용한 알루미늄
합금과 초고강도강(AI5083-O/DP590)의
이종접합 특성 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

정 수 옥

정수옥의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방한서 (인)

위원 조선대학교 교수 주성민 (인)

위원 조선대학교 교수 방희선 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	IV
List of Tables	V
Abstract	VI
1장. 서론	1
1 . 1 연구 배경 및 목적	1
1.1.1 연구 배경	1
1.1.2 연구 목적	4
1 . 2 국내외 기술 동향	6
1 . 3 마찰교반점용접	7
1.3.1 마찰교반점용접의 원리	7
1.3.2 마찰교반점용접의 특징	10
1 . 4 자동차부품 소재의 특징	12
1.4.1 알루미늄 합금	12
1.4.2 DP(Dual Phase)강	14

2장. 실험방법	16
2 . 1 사용재료	16
2 . 2 실험장비 및 조건	17
2.2.1 실험장비	17
2.2.2 툴(Tool)	18
2.2.3 실험조건	19
2 . 3 접합부 특성 평가	20
2.3.1 접합부 외관 및 단면 특성	20
2.3.2 전단인장시험	20
2.3.3 경도시험	21
2.3.4 미세조직 관찰	22
3장. 결과 및 고찰	23
3 . 1 회전속도에 따른 용접 특성	23
3.1.1 접합부 외관 및 단면 특성	23
3.1.2 전단인장시험 특성	25
3.1.3 경도 분포	28
3.1.4 미세조직 특성	30
3 . 2 삽입속도에 따른 용접 특성	32

3.2.1 접합부 외관 및 단면 특성	32
3.2.2 전단인장시험 특성	34
3.2.3 경도 분포	37
3.2.4 미세조직 특성	39
3 . 3 삼입깊이에 따른 용접 특성	41
3.3.1 접합부 외관 및 단면 특성	41
3.3.2 전단인장시험 특성	45
3.3.3 경도 분포	48
3.3.4 미세조직 특성	50
4장. 결 론	53
참고문헌	55

List of Figures

Fig 1.1	Evolution of CO ₂ emissions from new passenger cars by fuel	3
Fig 1.2	CO ₂ emission regulation	3
Fig 1.3	Application of FSJ in automotive parts	4
Fig 1.4	Application of automotive part details	5
Fig 1.5	Process of friction spot joining	8
Fig 1.6	Principle of friction spot joining	8
Fig 1.7	Schematic illustration of friction spot joining welds	9
Fig 1.8	Classification of steel	15
Fig 2.1	Equipment and specifications of FSJ system	17
Fig 2.2	Tool details used for FSJ	18
Fig 2.3	Configuration of specimen and tensile shear test machine ..	20
Fig 2.4	Vickers hardness tester and test position	21
Fig 2.5	Optical microscope and scanning electron microscope	22
Fig 3.1	Tensile shear strength with rotation speed	26
Fig 3.2	Hardness distributions with rotation speed	29
Fig 3.3	Micro structure with rotation speed	31
Fig 3.4	Tensile shear strength with plunge speed	35
Fig 3.5	Hardness distributions with plunge speed	38
Fig 3.6	Micro structure with plunge speed	40
Fig 3.7	Hook size with plunge depth	43
Fig 3.8	The thickness of Al5083-O(3t) after welding	44
Fig 3.9	Tensile shear strength with plunge depth	46
Fig 3.10	Hardness distributions with plunge depth	49
Fig 3.11	Micro structure with plunge depth	51
Fig 3.12	SEM images with plunge depth	52

List of Tables

Table 1.1	Comparing FSJ and other welding methods	11
Table 1.2	Characteristics of Aluminium	13
Table 1.3	Classification of Aluminium	13
Table 2.1	Chemical composition and mechanical properties of basic materials	16
Table 2.2	Welding conditions for FSJ	19
Table 3.1	Appearance and cross section with rotation speed	24
Table 3.2	Fractured specimen after tensile shear test with rotation speed	27
Table 3.3	Appearance and cross section with plunge speed	33
Table 3.4	Fractured specimen after tensile shear test with plunge speed	36
Table 3.5	Appearance and cross section with plunge depth	42
Table 3.6	Fractured specimen after tensile shear test with plunge depth	47

ABSTRACT

Characteristics of Dissimilar Friction Spot Joining of Al5083-O/DP590

Su-Ok Jeong

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

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

The restrictions of energy efficiency, hazardous substances and greenhouse gas exhaustion are getting stricter globally. This rules effects directly and indirectly to international economy. Especially, studies about improvement of body in automobiles and weight lightening are in progress to follow the environmental regulation, the goals of this study are eco-friendly and for the improvement of fuel efficiency. High strength steel and hot stamping are using as weight lightening process but it effects are not significant. High strength steel is replaced by aluminum and magnesium for lighter and harder. Welding these materials with steel by dissimilar materials welding technique is considered as realistic alternative.

It is hard to make good properties in welding zone during dissimilar welding between steel and aluminum due to formation of intermetallic compound(IMC). The reason of IMC created is due to difference in melting point between steel and aluminum. Also conventional fusion welding has some defects such as thermal deformation, residual stress, crack are representative defects. For this reason, a new welding method

is needed to weld aluminum alloys in automobile industry. This limitation of fusion welding overcame by using of Friction stir joining(FSJ). It is welded by frictional heat, force, plastic flow which appears below melting temperature. This compensate the defects of fusion welding, used similar and dissimilar material welding.

In this study, the effect of various conditions (plunge depths, plunge speeds, rotation speeds) on weldability (mechanical and metallurgical characteristics) in dissimilar materials (Al5083-O/DP590) by FSJ has been clarified. Frist, the result did not show a specific trend in the tensile shear strength in accordance with the rotation speed (300~500rpm). When the rotation speed of 300rpm, a maximum tensile shear strength of 3.0kN and gained strength at the lowest rotation speed 400rpm to 2.6kN. When welding in accordance with the plunge speed (0.3~1.0mm/s), 0.3mm/s gained the maximum tensile shear strength of 6.7kN. The faster plunge speed decreased the tensile shear strength, in particular, the plunge speed 1.0mm/s has been reduced more than 30% tensile shear strength of 0.5mm/s. It is expected that the influence on the tensile shear strength affect the softening and bonding properties of the bonding material to avoid friction and lack of stir by rotation of the tool. The results of plunge depth conditions shown that when plunge depth was 0.7mm, the tensile shear strength reached to the maximum failure load of 6.5kN due to the slightly decreased thickness of aluminium and the improved plastic flow, the maximum tensile shear strength could be acquired. At 0.7mm of plunge depth, the intermetallic(IM) layer was around 5~6 μ m that was the thinnest. At 1.5mm of plunge depth, IM layer increased to 9~30 μ m. In this case, IM layer largely observed and the thickness of aluminum was decreased by force that made the tensile shear strength to be the lowest.

1장. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

1.1.1 연구 배경

최근 범세계적으로 온실가스배출, 에너지효율, 유해물질 규제가 강화되고 있는 추세이다. 이러한 규제환경이 여러 산업분야와 국가 경제에 직·간접적인 영향을 미치고 있다. 특히 자동차 산업에서는 이러한 환경규제를 만족시키기 위해 차체 개선 및 경량화에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이를 통해 차체 경량화, 고연비화 달성을 목표로 하고 있다. 차체 경량화를 위해 고강도강 사용과 핫 스탬핑 등의 가공법이 적용되고 있지만 연비규제에 대한 효과가 미비한 상태이다. 현재, 구조재를 알루미늄이나 마그네슘, 복합재료와 같은 우수한 물성을 갖는 경량소재로 대체하여 강도를 강화하고 중량을 줄이는데 주목하고 있으며, 이것들을 철강재와 접합시키는 이종접합기술을 통한 경량화가 현실적인 대안으로 자리 잡고 있다. 경량소재 중 알루미늄 합금의 사용이 가장 두드러지는데 이는 알루미늄 합금의 비강성(E/ρ)은 철강재와 거의 비슷하지만 비강도(specific strength)가 철강재보다 뛰어나므로 차체 구조재로 사용할 경우 경량화 효과가 크며 내식성, 열·전기전도성, 주조성, 가공성 및 재활용성이 우수하다.[1-4]

알루미늄 합금을 차체에 적용하기 위해선 철강재와의 접합기술이 필요한데 기존 용융용접의 경우, 물성이 서로 다른 재료를 사용하기 때문에 서로 다른 용융점을 가지고 있어 용융용접 시 접합부의 강도를 저하시키는 금속간화합물(intermetallic compound, IMC)이 형성되어 건전한 접합부를 갖기 힘들다. 이에 용융용접의 한계를 발견하고 이를 대체할만한 용접기술인 마찰교반점용접(Friction Spot Joining, FSJ)을 적용하기 시작하였다.[5-10] 마찰교반점용접은 TWI(The welding institute)에서 개발한 것으로 마찰열과 가압력, 소성유동을 이용해 용융온도보다 낮은 온도

에서 접합이 이루어지는 고상접합용접으로 용융용접의 문제점을 보완하며, 동종 소재의 접합뿐만 아니라 이종소재의 용접을 가능케 한다.[11-17]

따라서 본 연구에서는 자동차 경량화 소재로 많이 쓰이는 알루미늄 합금과 물성이 서로 다른 이종재인 고강도강을 사용한 이종재(AI5083-O/DP590) 마찰교반점용접을 실시한 후 접합부의 강도 및 특성을 고찰하고자 하였다.

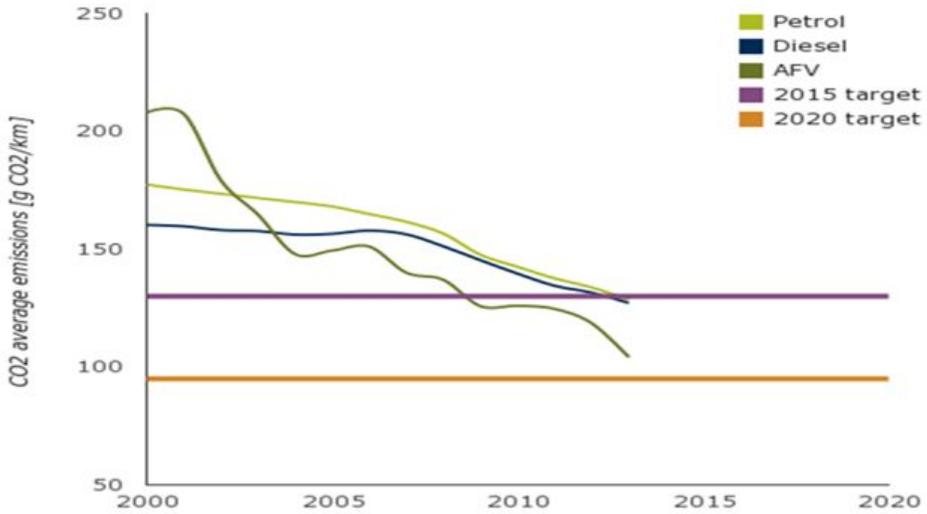


Fig. 1.1 Evolution of CO₂ emissions from new passenger cars by fuel

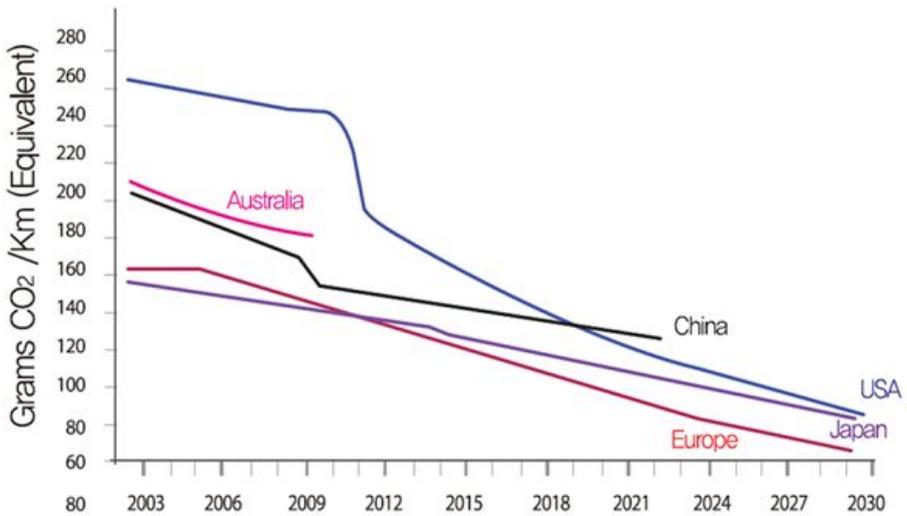


Fig. 1.2 CO₂ emission regulation

1.1.2 연구 목적

자동차관련 규제 강화로 인해 자동차 엔진효율 향상과 주행저항 감소가 기술적인 한계에 도달하였다. 또한 연구개발에 긴 시간이 소요됨에 따라 단기간 효율적 부품개발을 위한 신소재의 적용이 필요하다. 이런 상황에서 경량화와 고강도를 갖춘 자동차 차체부품의 요구가 증가됨에 따라 초고강도강과 알루미늄 부품의 적용이 확대 중이다. 적용 부품은 Center Floor Module 부품으로 Suspension 및 구동계 부품에 의해 지지되어 내장부품 및 승객이 탑승할 수 있는 실내공간을 확보하는 부품으로 실내의 중량을 견딜 수 있는 정강성과 구동 중에 발생하는 진동을 견딜 수 있는 내구성능 요구된다. Reinf Center Floor UPR 부품은 1.5GPa급 초고강도강이 적용되고 있으며, Member Seat Cross Front 부품은 1GPa급 초고강도강, Center Floor Panel은 아연도금강판이 적용되고 있다. Center Floor Module 중 정면충돌 시 충격이 승객에게 전달되지 않도록 충격을 분산하기 위해 강성이 요구하는 Side Upper Member를 고강성 알루미늄으로 대체하여 충분한 강성 및 경량화를 확보하기 위해 현재 1GPa급 소재가 적용되는 Member Seat Cross Front 부품과 알루미늄 Side Upper Member와의 이종재 마찰교반점용접을 적용하고자 한다.

본 연구에서는 마찰교반점용접 기술을 적용하여 이종재료의 접합성을 평가하고 수송기계관련 산업분야에서의 기술적용 가능성을 고찰하고자 하였다.

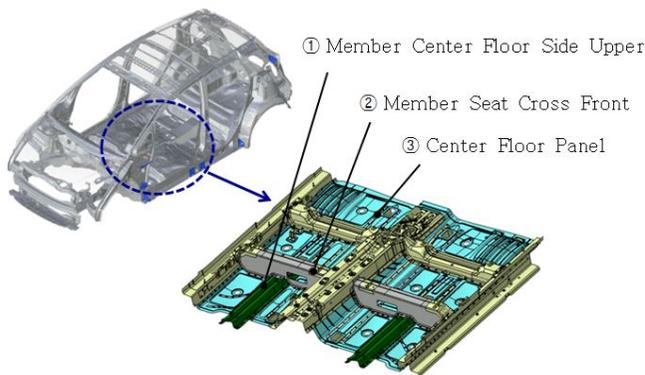


Fig. 1.3 Application of FSJ in automotive parts

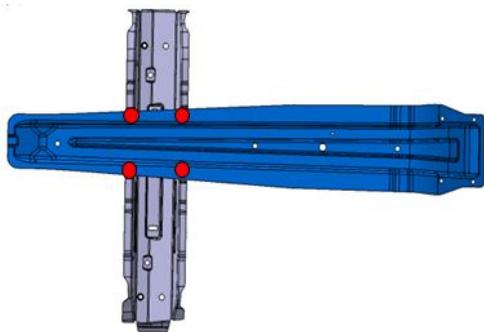
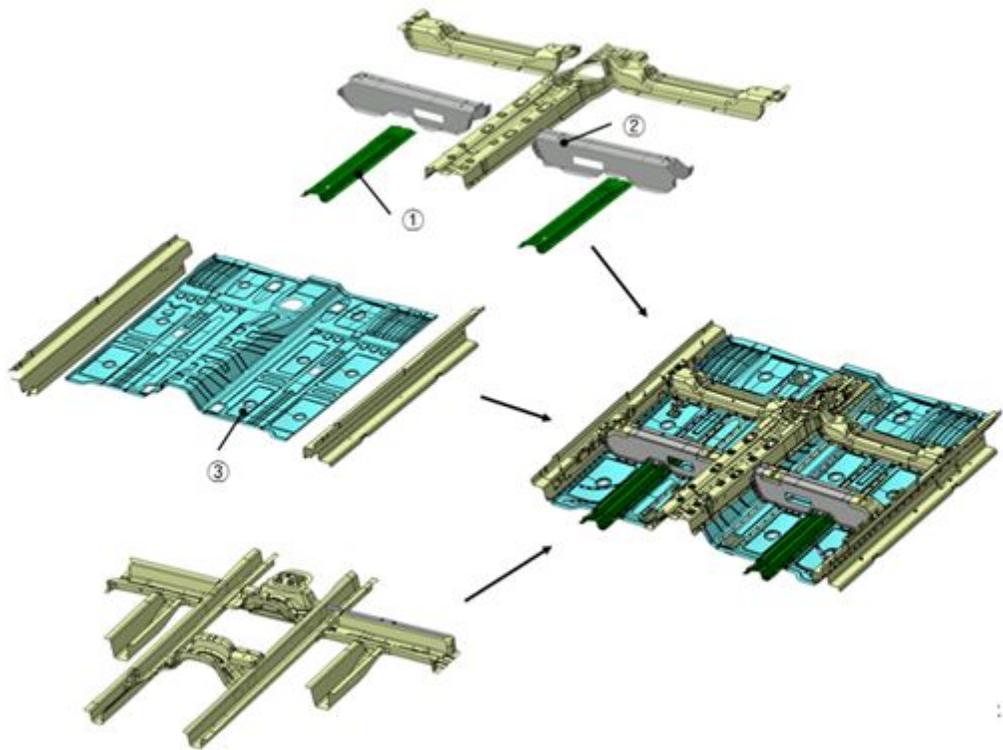


Fig. 1.4 Application of automotive part details

1.2 국내외 기술 동향

최근 들어 국내·외 자동차, 철도차량, 선박, 우주항공 산업계에서 마찰교반용접을 적용하고 있다. 마찰교반용접은 환경규제 만족에 대한 현실적인 경량화 기술로 알려져 있다. 특히, 국외 산업에서는 마찰교반용접의 연구개발 활동이 활발히 진행 중이며, 연구를 넘어 상업화 단계로 진입하고 있는 상황이다. 자동차산업에서 마쯔다, 혼다, 비엠더블유(BMW)에서 마찰교반용접 및 마찰교반점용접이 적용된 차량을 생산해 이미 상용화 되고 있으며, 자동차산업을 선두로 다른 수송기계분야에서도 적용이 확대되고 있다.

항공우주분야에서는 TWI를 중심으로 유럽의 연구기관들이 마찰교반용접 개발 프로젝트를 통한 항공기 적용에 관한 연구가 진행되고 있으며, 항공 산업에서 자동화가 쉽지 않은 리벳접합을 대체할만한 수단으로 제안되고 있다. 철도차량은 알루미늄 구조 동체 용접 2중 skin 구조에 마찰교반용접을 적용하는 추세이며, 선박은 알루미늄 선박제조에 이를 적용함으로써 높은 완성도와 안정적 보장이 가능한 친환경적인 선박을 건조하고 있으며, 각국 선급협회로부터 인증을 받은 상태이다. 현재 국내에서도 마찰교반용접에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 새로운 용접기술을 적용, 활용하기 위해서는 상당한 연구가 요구되며, 접합속도 향상을 통한 생산성 확보와 접합공구인 톨의 수명과 설계에 대한 고민이 필요하다.[18,19]

1.3 마찰교반점용접

1.3.1 마찰교반점용접의 원리

마찰교반용접은 TWI에서 개발한 것으로 초기에는 동종 알루미늄 접합으로 시작하여 최근 이종재의 용접이 주목 받으면서 철강재와 알루미늄, 마그네슘 등과의 접합이 연구되고 있다. 마찰교반용접은 이종접합 시 용융용접이 가지고 있던 문제점들 보완할 수 있는 고상접합방식이며, 이를 응용한 마찰교반점용접은 저항점용접을 대체할 만한 접합기술로 주목을 받고 있다.

Fig. 1.5와 같이 마찰교반점용접에서는 접합공구인 툴(tool)을 회전시키면서 겹쳐진 상판과 하판의 접합부에 삽입시키는데, 겹쳐진 피접합재에 회전하는 공구가 삽입되면서 마찰열과 가압력이 발생하게 된다. 이 마찰열과 가압력으로 인해 피접합재의 온도가 상승, 연화되어 접합계면에서 소성유동이 발생해 상·하판이 점접합된다. 이때, 용융용접과 달리 피접합재는 고상상태이며 기계적으로 교반 접합된 상태이다. 마찰열과 가압력으로 툴을 삽입시키고 일정 유지시간을 가진 후 툴을 후퇴시키면 마찰교반점용접이 된다. 마찰교반점용접 시 접합인자로는 툴의 형상, 회전속도, 가압력, 유지시간, 삽입깊이, 삽입속도 등이 있으며, 이런 접합인자들은 피접합재의 재질이나 두께 등에 의해 영향을 받는다. 마찰교반점용접 시 툴의 솔더(shoulder) 아래쪽에 있는 재료들이 마찰열에 의해 연화되어 핀(pin)쪽으로 유동한다. 핀 근처로 유동된 재료는 툴 회전의 힘으로 핀 표면을 따라 핀의 끝부분에 도달한다. 재료가 핀 끝에 도착하면 위쪽과 바깥쪽으로 강제 회전을 한 다음 다시 핀의 윗부분으로 돌아가면서 소성유동이 발생된다. Fig. 1.6의 1, 2, 3이 반복되면서 그 영역이 확장되면서 교반부가 형성된다.[1,13,20-22]

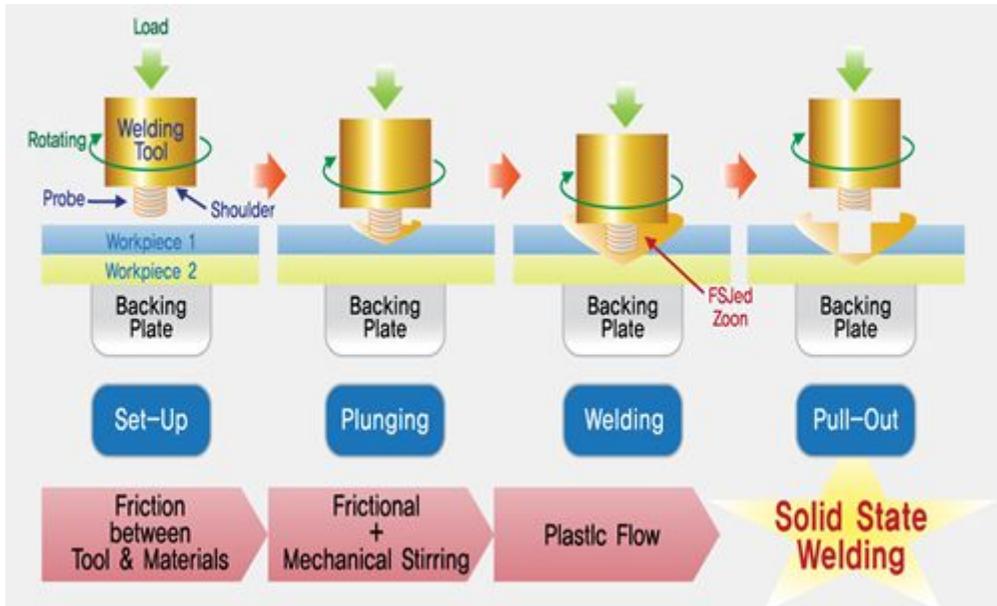


Fig. 1.5 Process of friction spot joining

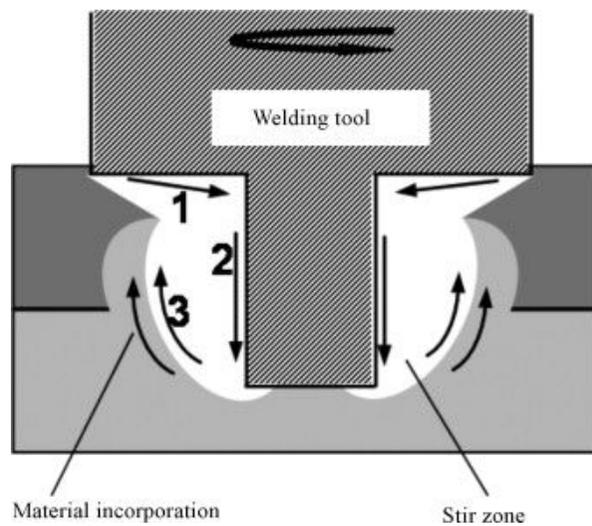
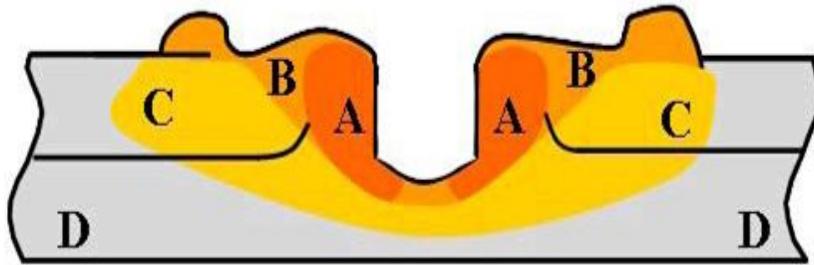


Fig. 1.6 Principle of friction spot joining[22]



A. SZ (Stir Zone)

: contains material that interacts directly with the tool, dynamically recrystallized

B. TMAZ (Thermo mechanically Affected Zone)

: contains material that interacts indirectly with the tool, plastically deformed with partial recrystallization[23]

C. HAZ (Heat Affected Zone) : affected by heat generated during FSJ

D. BM (Base Metal)

Fig. 1.7 Schematic illustration of friction spot joining welds

1.3.2 마찰교반점용접의 특징 [13]

마찰교반점용접은 마찰교반용접과 마찬가지로 다음과 같은 장점이 있다.

- 용융용접에 비해 입열량이 적은 고상용접법이다.
- 고상접합방법이므로 입열량이 작아 저항용접의 경우에 비해 변형이 적다.
- 용가재 및 보호가스가 필요하지 않다.
- 환경 친화적이다. (흄, 소음, 전자기 노이즈 등이 발생하지 않음)
- 접합공정이 완전자동이므로 작업자의 숙련과 경험이 요구되지 않는다.
- 장비 시스템이 매우 간단하여 설비비용이 적게 든다.
- 튜브의 수명이 매우 길어 접합부의 품질저하가 없다.
- 저항용접의 경우에 비해 유지보수에 시간이 걸리지 않는다.
- 자동화가 용이하다.
- 소비전력이 매우 적다. (저항용접의 약 1/20)

Table. 1.1 Comparing FSJ and other welding methods[24]

	Riveting	SPR	RSW	Clinching	Friction spot joining	
Strength	◎	◎	○	×	○	Adequate strength can be achieved
Quality disparities	◎	◎	△	△	◎	Consistent qualities
Deformation (heat warping)	◎	◎	×	◎	○	Very little heat warping
Looseness/ Separation	○	○	○	×	○	No looseness or separation
Facility costs	×	×	×	○	○	No need for primary power source, cooling water or air supply
Cost of electrical power	◎	◎	×	○	◎	Less than 1/20th of that required for resistance spot welding
Cost of supplementary materials	×	×	○	○	○	Not required
Maintenance	△	△	×	◎	◎	Maintenance free for several thousand cycles
Pre-treatment	×	○	○	○	○	Only requires alignment of upper and lower plate
Operational efficiency	×	○	○	○	○	Within a few seconds
Multi-spot operation	○	○	×	○	○	Multiple (clustered) joins possible
Workplace environment	○	○	×	○	○	Quiet with no dust or fumes

1.4 자동차부품 소재의 특징

1.4.1 알루미늄 합금

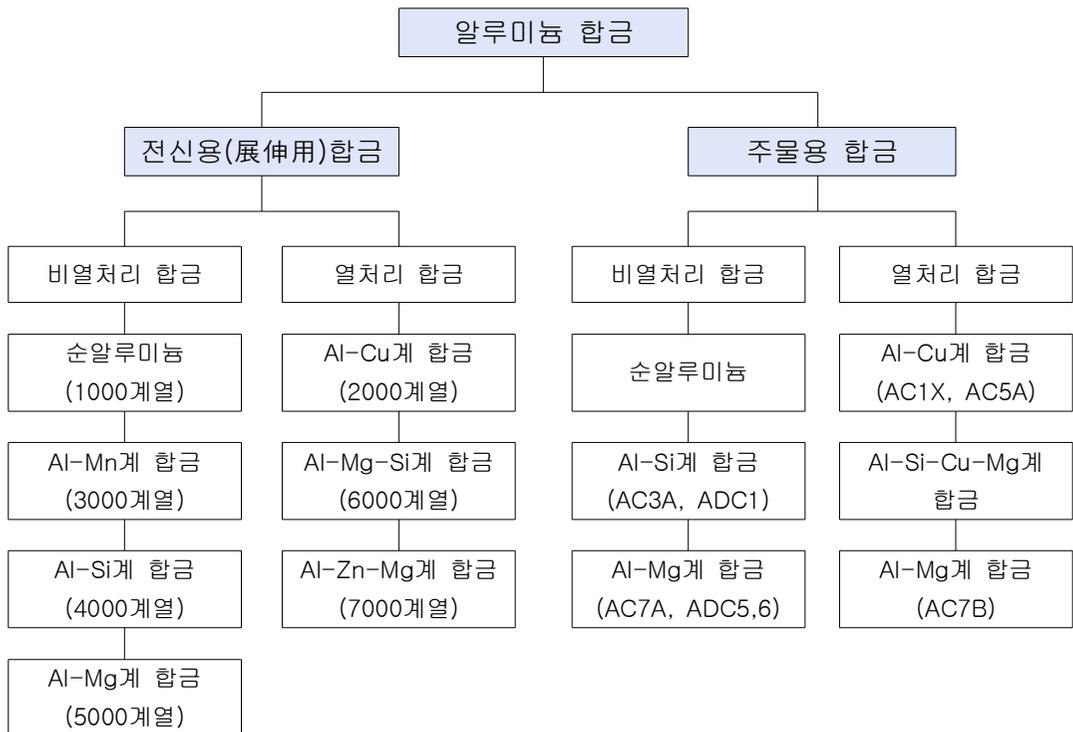
알루미늄은 규소 다음으로 지구에 가장 많이 존재하는 원소이다. 또한 알루미늄은 마그네슘 다음으로 가벼운 금속으로 자동차산업에서 주목하고 있는 경량화에 어울릴 만한 소재이다. 기존의 자동차 부품을 대체하기 위해서 강도, 성형성, 용접성, 내식성 등이 우수해야 하며, 내연강판보다 나은 재료여야 하는데 알루미늄 합금의 경우, 경량성 뿐만 아니라 위의 요건들을 다 만족할 수 있는 우수한 재료로 평가되어 사용비율이 꾸준히 증가되고 있다. 알루미늄은 순도 99.0%이상을 순 알루미늄이라 부르고 있으며, 현재 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금이라는 것은 다른 합금원소를 첨가한 경우를 말한다. 알루미늄 합금은 필요한 성질에 따라 전신용 합금과 주조용 합금으로 나눌 수 있으며, 이것들을 열처리, 시효 등으로 높은 강도를 얻을 수 있는 열처리 합금과 비열처리 합금으로 구분할 수 있다.

특히, 알루미늄 5000계열의 합금 원소는 마그네슘이며 여기에 망간이 첨가되면, 중·고강도 경화 합금이다. 마그네슘은 경화제로서 망간보다 훨씬 더 효과적이며 많은 양을 첨가할 수 있다. 이 계열의 합금으로는 5005, 5052, 5083, 5086 등이 있으며, 좋은 용접 특성과 내부식성을 가지고 있다. 마그네슘 첨가량이 비교적 적은 것은 장식용재나 기물용재에, 많은 것은 구조재로서 사용된다. 중간 정도의 마그네슘을 함유 하는 것은 일반적인 재료로 쓰인다. 특히, 5083은 마그네슘 함유량이 많은 합금으로 비열처리형 합금 중에서는 가장 뛰어난 강도를 나타내며 용접성도 양호하다. 이 때문에 용접 구조재로서 선박, 차량, 화학 플랜트 등에 사용되고 있다.[3]

Table. 1.2 Characteristics of Aluminium

성 질	알루미늄	연강	비고
비중(g/cm ³)	2.70	7.86	경량화 가능
용융점(°C)	660	1500~1527	브레이징/이종용접 어려움
비열(cal/g)	0.22	0.11	높은 전류로 빠르게 용접
선팽창계수(10 ⁻⁶ /°C)	24	12	열변형, 잔류응력, 균열
열전도율(C.G.S 단위)	0.52~0.54	0.12	높은 전류로 빠르게 용접
고유저항(Ω/mm ² /m)	0.028	0.120	저항열 발생이 어려움
산화막의 용융점(°C)	2050(Al ₂ O ₃)	1400 ~1600	용융용접시 산화막 제거 필요

Table. 1.3 Classification of Aluminium



1.4.2 DP(Dual Phase)강

최근 자동차 경량화를 위해 고강도강의 사용이 증가하고 있으며, 자동차용 강판 소재에 대한 관심도 커지고 있다. 경량화로 철강재보다 가벼운 알루미늄이나 마그네슘과 같은 소재의 비율이 증가하고 있는 추세이지만 아직까지는 강도 등이 문제점으로 남아 있다. 그래서 차체 경량화와 동시에 승객의 안전을 우선적으로 해결 방안으로 제시되는 자동차용 강판들이 개발되고 있다. Mild강부터 AHSS까지 다양한 강들이 사용되고 있으며, 차체 제어, 균형 유지, 충격 완화 등 자동차 구동에 필수적인 역할을 위해 내구성, 강도, 성형성 등을 갖춘 AHSS(Advanced High Strength Steel)는 강도를 높이고 두께를 낮춘 강으로 경량화에 적합성 소재이다.

상용화 되고 있는 AHSS에는 DP(Dual Phase)강, TRIP(Transformation Induced Plasticity)강, CP(Complex Phase)강이 있다. 인장강도(Tensile Strength, TS)-연신율(Elongation, El) 관계로 나타내며 이를 Banana-Diagram으로 부른다. TS x El의 값 25,000MPa·%을 기준으로 나누며, 이 값보다 작은 Mild(연질)강, IF(Interstitial Free)강, 고강도 IF강, BH(Bake Hardening)강, HSLA(High Strength Low Alloy)강, 일반 AHSS 등이 있다. AHSS는 HSLA강의 결점을 보완하기 위해 개발되었고 금속 조직을 제어함으로써 강도가 확보되는 강으로 DP, TRIP강 등이 있는데 DP강은 페라이트(Ferrite)와 마르텐사이트(Martensite), 이 두 가지 상(Phase)을 갖는 강으로 페라이트조직사이에 마르텐사이트가 5~15%의 함량으로 분산되어 있으며, 약간의 잔류 오스테나이트의 혼합조직도 볼 수 있다. 페라이트의 연성 기질로 가공성을 향상, 마르텐사이트의 경질로 강도 증가를 확보할 수 있다.[25,26]

DP강은 sill side members, seat rail, 보강재 등 주로 내판 구조부품에 사용되며, 자동차의 좌우 움직임을 억제, 지탱하는 cross member를 만드는데 적격인 소재이며, 최근에는 door outer 등 외판재로도 확대되고 있다.

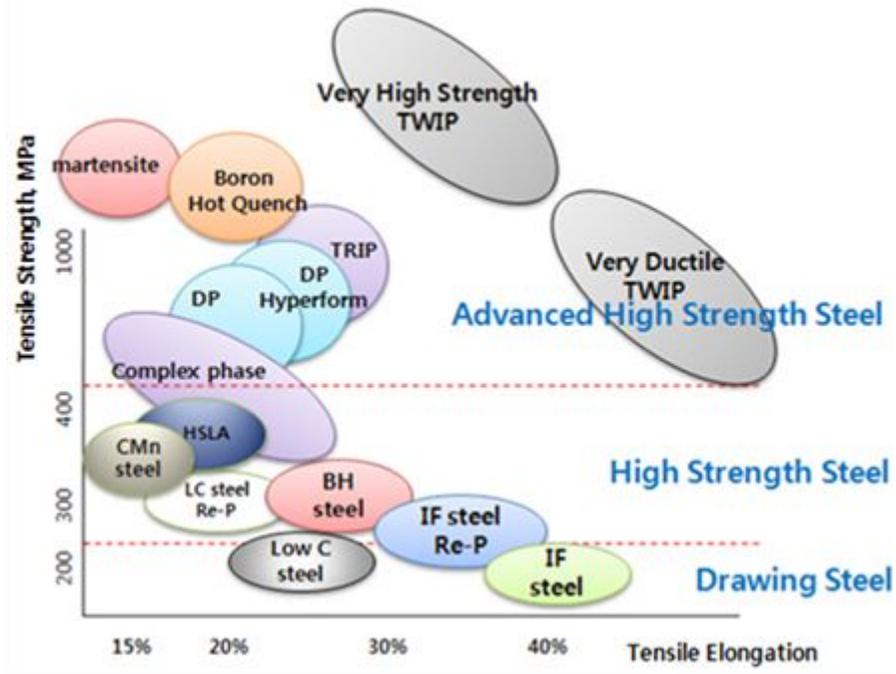


Fig. 1.8 Classification of steel

2장. 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 경량소재인 알루미늄합금인 Al5083-O 3mm(t)와 자동차용 고강도강판인 SGAFC DP590강 2mm(t)를 사용하였으며, 각각 150mm(L) X 50mm(W)로 제작하여 상판은 알루미늄, 하판은 강재를 50mm 겹친 상태로 겹치기 마찰교반점용접을 실시하였다. 사용된 재료의 화학조성과 기계적 물성은 Table. 2.1과 같다.

Table. 2.1 Chemical composition and mechanical properties of basic materials

Chemical composition (wt.%)									
Material	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Cu	Ti	Zn	Al
Al5083-O	4.402	0.655	0.297	0.096	0.083	0.020	0.010	0.002	Bal.
DP590	C		Si		Mn		P		S
	0.063		0.178		1.819		0.012		0.005

Mechanical properties			
Material	T.S (MPa)	Y.S (MPa)	EL.(%)
Al5083-O	316.9	143.13	23.15
DP590	593.0	375.0	29

2.2 실험장비 및 조건

2.2.1 실험장비

본 연구의 마찰교반점용접을 수행하기 위해 WINXEN사의 FSW 실험장비를 사용하였다. FSW 실험장비는 GANTRY TYPE으로 X Y, Z축 이동이 가능하며, X, Y축은 실험장비의 테이블에 의해 이동된다. Z축의 회전은 300~3000rpm까지 가능하며 최대하중은 3000kgf인 장비로 실험을 진행하였다. Fig. 2.1은 사용된 실험장비와 사양을 나타내었다.



ITEMS		RANGE
TYPE		GANTRY TYPE
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. 2.1 Equipment and specifications of FSJ system

2.2.2 툴(Tool)

마찰교반용접에 있어서 툴의 형상과 제원은 매우 중요한 요소 중에 하나이다. 본 실험에 사용된 툴은 WC(tungsten carbide)-Co12%를 다이아몬드 연삭을 통해 제작하였으며, 재료의 원활한 소성유동을 위해 절두체(frustum) 형상으로 하였다. 실제 부품에 적용하고자 자동차부품의 플랜지 길이를 고려하여 솔더의 직경은 14mm로 하였고, 핀의 길이는 알루미늄 두께와 동일한 3.0mm이며, 핀의 직경은 위, 아래 각각 6mm, 4mm이며, 오목각 3°로 제작하였다. 본 연구에 사용된 툴의 형상과 치수를 Fig. 2.2에 나타내었다.

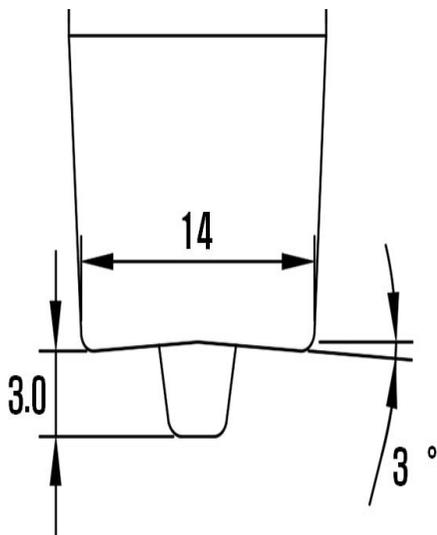


Fig. 2.2 Tool details used for FSJ

2.2.3 실험 조건

마찰교반점용접의 주요 변수는 회전속도(rpm), 삽입속도(Plunge speed), 유지시간(Dwell time), 삽입깊이(Plunge depth), 가압력, 톨의 형상 등이 있다. 본 실험에서는 Table. 2.2와 같이 회전속도, 삽입속도, 삽입깊이에 따른 마찰교반점용접 접합부 특성에 대한 실험을 실시하였다.

먼저, 회전속도(300~500rpm)에 따른 용접조건은 삽입속도는 0.5mm/s, 삽입깊이는 0.2mm, 유지시간은 15초를 적용하여 실험하였다. 삽입속도(0.3~1.0mm/s)에 따른 조건으로는 회전속도는 300rpm, 삽입깊이는 0.7mm, 유지시간은 15초로 적용하여 진행하였다. 마지막으로 삽입깊이(0.2~1.5mm)에 따른 용접에서는 회전속도 300rpm, 삽입속도 0.5mm/s 유지시간은 15초로 겹치기 마찰교반점용접을 실시하였다.

Table. 2.2 Welding conditions for FSJ

조건	회전속도 (rpm)	삽입속도 (mm/s)	삽입깊이 (mm)	유지시간 (sec)
회전속도에 따른 조건	300	0.5	0.2	15
	400			
	500			
삽입속도에 따른 조건	300	0.3	0.7	15
		0.5		
		1.0		
삽입깊이에 따른 조건	300	0.5	0.2	15
			0.5	
			0.7	
			1.0	
			1.5	

2.3 접합부 특성 평가

2.3.1 접합부 외관 및 단면 특성

회전속도(300~500rpm), 삽입속도(0.3~1.0mm/s), 삽입깊이(0.2~1.5mm)에 따른 마찰교반점용접 후, 각 조건별 접합된 시편을 육안으로 접합 여부, 외관의 형태, 생성된 burr의 형상이나 양 등을 1차적으로 관찰하였다. 또한 단면 관찰을 통해 흑의 형성과 크기 등을 측정하여 용접공정변수에 따른 특성을 고찰하고자 하였다.

2.3.2 전단인장시험

각 조건별로 마찰교반점용접 된 접합부의 전단인장강도를 평가하기 위해 전단인장시험편을 KS B 0851 규격에 의거하여 두 재료를 각각 150mm(L) X 50mm(W)로 제작하여 50mm를 겹친 후 마찰교반점용접을 하였다. 접합된 시편을 만능재료시험기(UT100F)를 사용하여 전단인장강도 시험을 실시하였고 cross-head speed는 3mm/min로 설정하였다. Fig. 2.3은 인장시험편 규격과 시험에 사용된 만능재료시험기를 나타낸 것이다.

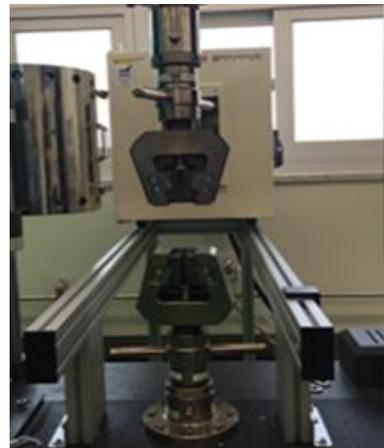
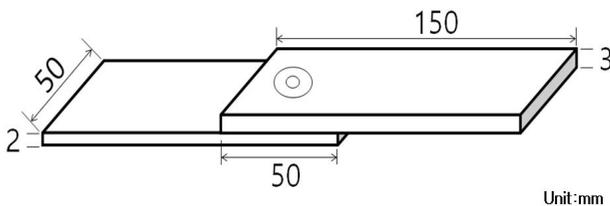
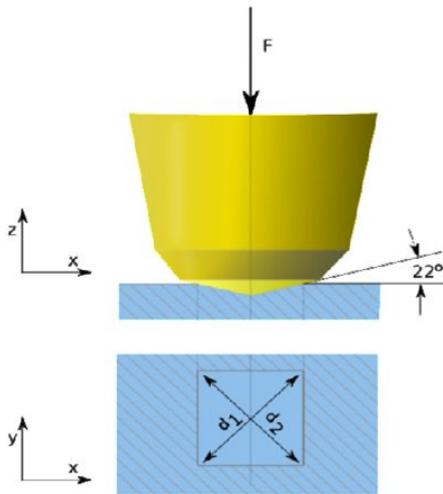


Fig. 2.3 Configuration of specimen and tensile shear test machine

2.3.3 경도시험

Akashi사 HM-112 micro Vickers 경도기를 사용하여 접합된 시편의 경도 분포를 분석하였다. 비커스 경도기는 136° 다이아몬드 피라미드 압자를 이용하는 장비로써, 하중 0.5kgf, 하중시간 10초의 조건으로 접합계면을 기준으로 알루미늄 측으로 0.7mm, 강재 측으로 0.7mm의 위치에서 측정하였다. 접합부의 측정간격은 좌우 각각 10mm씩 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였으며, 점용점 후 생긴 hole에서의 경도 값은 측정이 불가하여, hole 좌우 끝의 접합부 시작점부터 경도를 측정하였다.



(a) vickers hardness tester



(b) test position

Fig. 2.4 Vickers hardness tester and test position

2.3.4 미세조직 관찰

미세조직 관찰을 위해 시편 절단과 마운팅, 미세연마를 먼저 실시하였다. 다이아몬드 연마까지 마친 후, DP590은 나이탈(Nital) 용액(HNO_3 4ml, ethanol 96ml 혼합)을 이용해 3초 동안 에칭 후, 증류수로 세척하였다. 알루미늄의 경우, 켈러(Keller) 용액(증류수 175ml + HNO_3 20ml + HCl 3ml + HF 2ml)을 사용하여 20초 에칭하였다. 접합된 시험편의 단면(cross section)을 관찰하기 위해 OLYMPUS 사 BX51M광학현미경(Optical microscope, OM)과 이종재료의 용접에서 발생하는 금속간화합물(IMC)의 형성과 두께를 분석하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 사용하였다.



Fig. 2.5 Optical microscope and scanning electron microscope

3장. 결과 및 고찰

3.1 회전속도에 따른 용접 특성

3.1.1 접합부 외관 및 단면 특성

회전속도(300~500rpm)에 따른 마찰교반점용접을 실시하였다. 삽입깊이는 0.2mm, 삽입속도는 0.5mm/s, 유지시간은 15초로 고정시켰다. 접합된 시편의 외관을 관찰한 결과를 Table 3.1에 나타내었다. 각 조건별 실험에서 모두 원형의 burr가 형성되었다. 이는 툴의 삽입과 동시에 가압력과 회전에 의해 알루미늄이 밀려나면서 형성된 것으로 판단된다. 각 조건에서 burr의 형성은 비슷하였고 접합된 시편의 뒷면에서 300, 400rpm에서 비슷한 그을린 것을 관찰하였다. 300rpm에서 500rpm으로 회전속도 증가 시, 시편 뒷면에 나타난 핀의 흔적이 상대적으로 뚜렷해짐을 발견하였는데 이는 회전속도 증가에 의해 입열이 높아지기 때문에 나타나는 현상임을 알 수 있었다.

회전속도 300~500rpm의 접합부 단면에서 모두 흑을 관찰할 수 있었고 각 조건별로 단면에서의 큰 차이점을 찾아볼 수 없었다. 그리고 본 실험에서 사용된 마찰교반용접 실험장비의 기울기가 3°로 고정되어 마찰교반점용접된 시편에서 기울기를 확인할 수 있었다.

Table. 3.1 Appearance and cross section with rotation speed
 (pin 3.0mm, plunge depth 0.2mm, plunge speed 0.5mm/s, dwell time 15s)

Rotation speed (rpm)		Appearance		Cross section
300	Top			 Al  Steel
	Bottom			
400	Top			
	Bottom			
500	Top			
	Bottom			

3.1.2 전단인장시험 특성

KS B 0851 인장규격(저항점용접 규격)에 의거하여 제작한 시험편을 사용하여 회전속도(300~500rpm)에 따른 마찰교반점용접을 실시하였다. 각 조건별 3개의 전단인장시험편을 제작하였으며, 전단인장강도시험을 한 결과의 평균값을 Fig. 3.1에 나타내었고 전단인장시험 후 파단된 시편을 Table 3.2에 나타내었다.

회전속도 300rpm에서 3.0kN으로 최대 전단인장강도를 얻었고, 400rpm일 때 가장 낮은 전단인장강도로 2.6kN으로 각 조건별로 큰 차이가 나지 않았다. 하지만, 각 조건별 평균 전단인장강도가 아닌 최고 전단인장강도를 비교하였을 때, 회전속도에 따라 전단인장강도가 증가하는 양상을 보였다. 일반적으로 회전속도의 증가에 따라 접합부 강도가 증가하고, 회전속도가 더 증가할수록 높은 입열로 인해 금속간화합물 발생이 발생하여 전단인장강도가 저하되는 경향이 있다. 하지만, 본 실험에서는 수행한 회전속도 300~500rpm의 조건에서는 금속간화합물의 영향보다는 회전속도의 증가로 인한 원활한 교반이 접합부의 강도를 향상시키는 것으로 판단된다.

전단인장시험 후 파단면을 관찰하였다. 저항점용접의 일반적인 파단면은 계면파단(Shear fracture), 플러그파단(Plug fracture), 테어파단(Tear fracture)의 3가지 양상으로 분류하며, 계면파단에서 테어파단으로 진행될수록 전단인장강도 특성이 증가된다. 본 실험 결과, 모두 계면파단양상을 보였다.

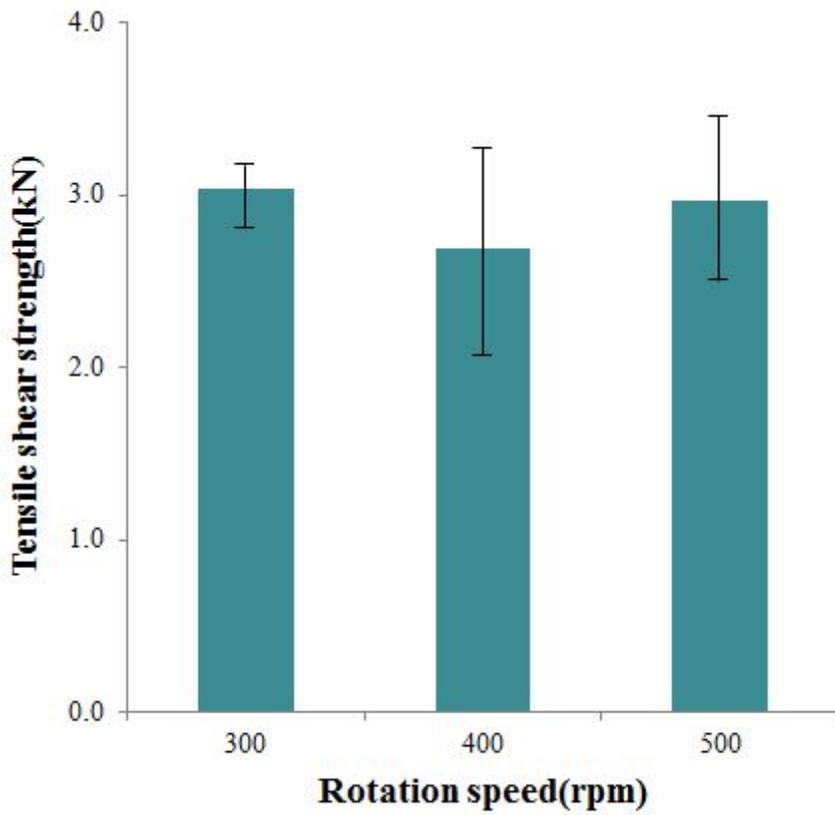
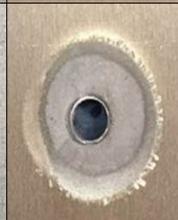


Fig. 3.1 Tensile shear strength with rotation speed

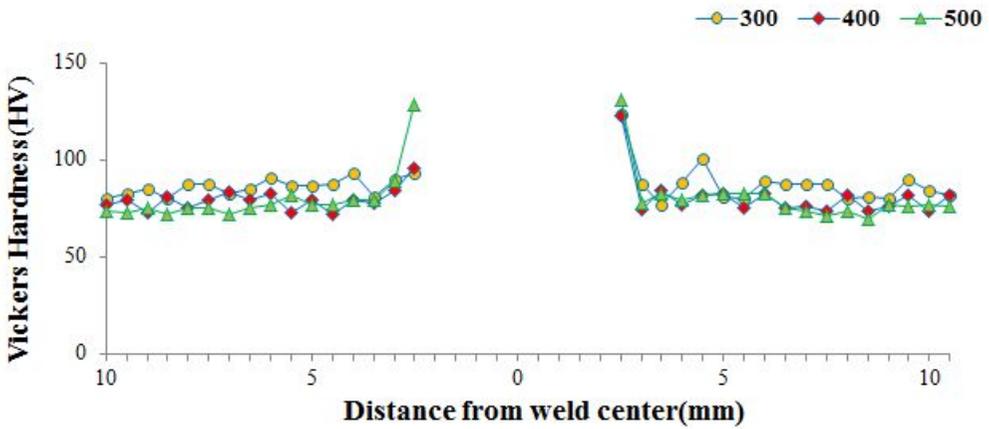
Table. 3.2 Fractured specimen after tensile shear test with rotation speed (pin 3.0mm, plunge depth 0.2mm, plunge speed 0.5mm/s, dwell time 15s)

Rotation speed (rpm)	Fractured specimen				Load(kN)
	Top		Bottom		
300					3.0
400					2.6
500					2.9

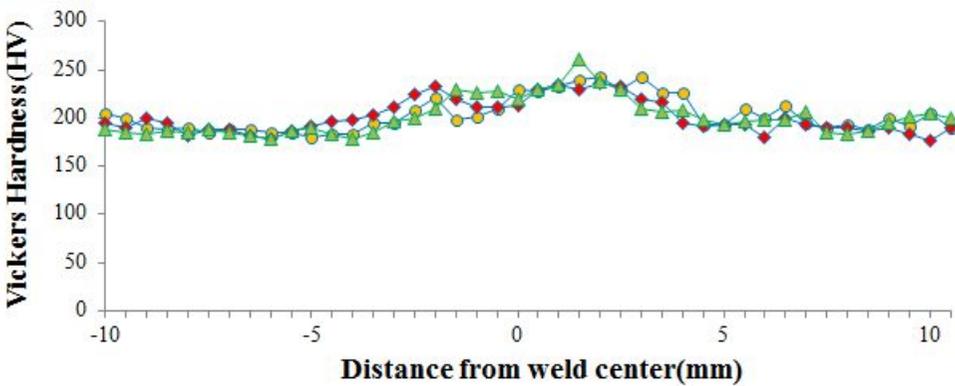
3.1.3 경도 분포

Fig. 3.2는 회전속도(300~500rpm)에 따른 접합부의 경도를 측정한 것으로 (a)는 AI5083-O, (b)는 DP590을 나타내었다. 앞서 언급한 것과 같이 접합계면을 기준으로 알루미늄 측으로 0.7mm, 강재 측으로 0.7mm의 위치에서, 접합부의 중심으로 좌우 각각 10mm씩 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였으며, 점용접 후 생긴 hole에서의 경도는 측정이 불가하여, hole 좌우 끝의 접합부 시작점부터 경도를 측정하였다.

측정된 알루미늄과 강재의 모재 평균 경도는 각각 약 80Hv, 195Hv이다. 알루미늄에서 최고 경도는 약 138Hv이며, 혹은 측정되지 않았다. 강재의 최고 경도는 약 261Hv로 알루미늄과 강재 모두 회전속도 500rpm에서 측정되었다. 평균 전단인장 강도 값이 높은 300rpm의 경우, 알루미늄측 교반부의 경도는 약 124Hv, 마찰열의 영향으로 조직이 조대화 되는 열영향부는 약 77Hv이며, 강재측의 교반부 경도는 약 242Hv, 열영향부는 약 182Hv가 측정되었다. 이는 동적재결정에 의한 결정립 미세화로 교반부에서 가장 높은 경도를 나타내었다. 알루미늄과 강재 모두 열영향부에서는 모재의 경도보다 낮은 경도를 확인할 수 있었는데, 이는 톨의 회전과 마찰에 의한 열의 영향을 받아 조직이 조대화 되면서 경도가 낮아지는 것으로 판단된다. 회전속도에 따른 각 조건에서 모두 교반부, 열기계적 영향부, 열영향부, 모재는 비슷한 양상의 경도 분포를 보였으며, 이러한 접합부의 각 영역별 특성을 고찰할 수 있었다.



(a) Al5083-O



(b) DP590

Fig. 3.2 Hardness distributions with rotation speed

3.1.4 미세조직 특성

회전속도(300~500rpm)에 따른 용접 후, 300rpm에서의 조직을 관찰하였다. Fig. 3.3와 같이 접합부를 관찰한 결과, 마찰열과 소성유동으로 동적재결정이 일어나는 영역인 교반부(stir zone, SZ)과 마찰열과 기계적 변형이 동반되는 열영향부(Thermo-mechanical affected zone, TMAZ), 열의 영향을 받는 열영향부(Heat affected zone, HAZ) 그리고 모재(Base Metal, BM)의 영역이 관찰이 되었다.

교반부에서는 소성유동에 의한 동적재결정이 진행되어 모재의 조직보다 매우 미세화된 결정립을 관찰할 수 있었다. 열영향부에서는 열 영향에 의해 조직이 모재보다 다소 조대화 되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 알루미늄의 교반부에서 툴의 회전에 의한 교반 흔적을 뚜렷이 볼 수 있었으며, 알루미늄측에서 흑의 조직도 관찰할 수 있었다. 흑은 강재가 교반에 의해 알루미늄으로 유입되는 현상에 의해 형성된 것으로 툴의 가압력과 교반으로 미세화된 강재의 조직들로 이루어진 영역임을 확인하였다.

회전속도가 증가하면서 입열량의 증가로 강재의 연화와 소성유동에 미치는 영향이 증가하여 흑의 형성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 회전속도 증가 시, 상대적으로 낮은 회전속도 조건과는 다소 다르게 흑의 형상이 알루미늄 모재 쪽으로 말려 들어가는 것을 관찰하였다. 이는 툴의 높은 회전속도에 영향을 받아 나타난 것으로 사료된다.[27] 교반부, 기계적 열영향부, 열영향부 등 각 영역별 미세조직 관찰을 통해 앞에서 언급했던 경도 분포 특성에서 교반부의 경도가 모재보다 높고, 열영향부의 경도가 모재보다 낮은 특성과 관련하여 고찰할 수 있었다.

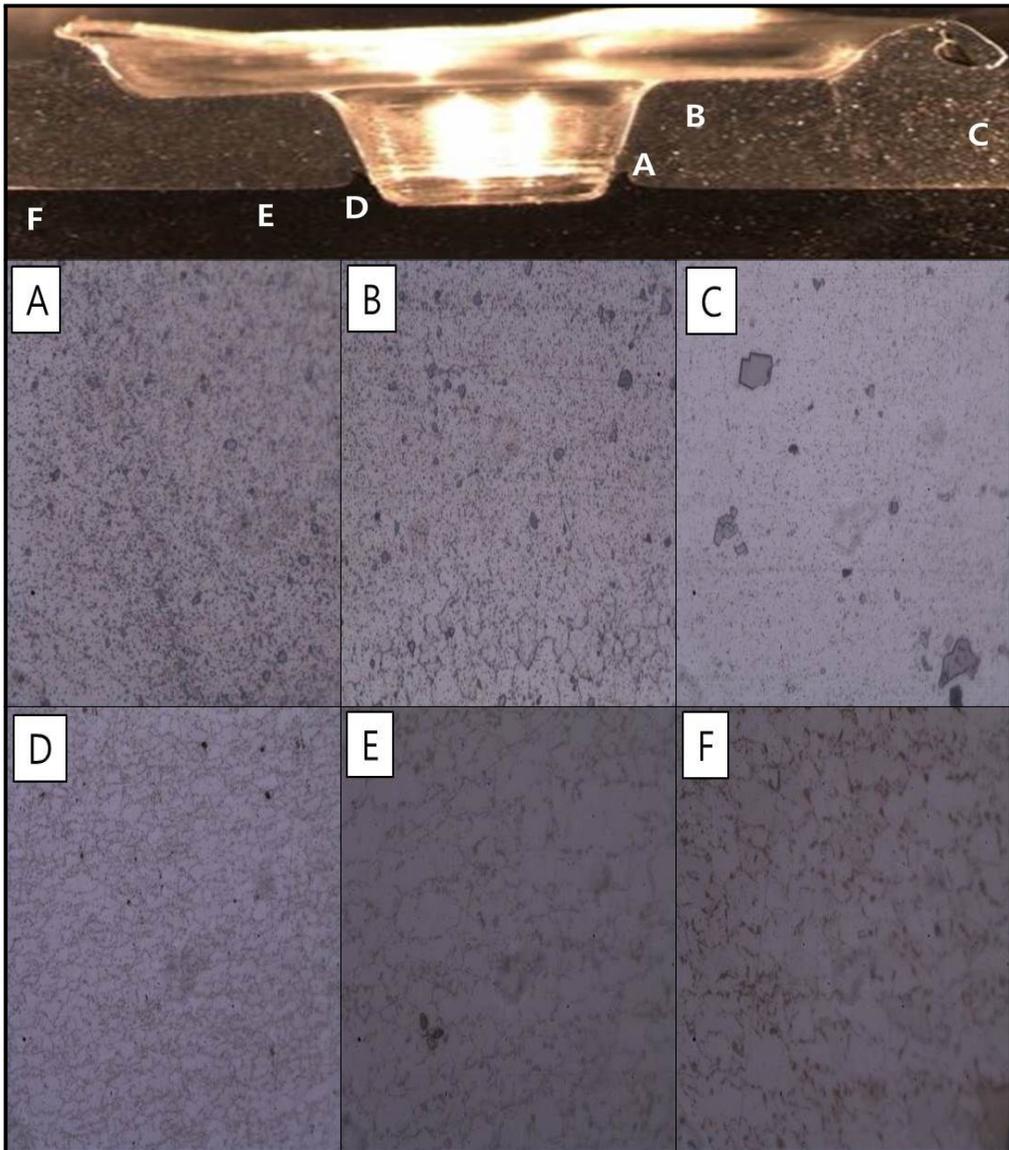


Fig. 3.3 Micro structure with rotation speed, 300rpm(500x)

(A: SZ B: TMAZ+HAZ C: BM D: SZ E: HAZ F: BM)

3.2 삽입속도에 따른 용접 특성

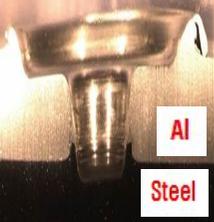
3.2.1 접합부 외관 및 단면 특성

삽입깊이 0.7mm, 회전속도 300rpm, 유지시간 15초에 삽입속도는 0.3, 0.5, 1.0mm/s의 조건으로 변화를 주며 마찰교반점용접을 실시하였고, 접합된 시편을 Table 3.3에 나타내었다.

앞선 실험조건인 회전속도에 따른 용접에서 나타난 것과 같이 툴의 가압력과 회전에 의해 밀려난 알루미늄이 원형의 burr를 형성하였다. 각 조건별로 원형의 burr를 형성시켰지만, 삽입속도가 빠를수록 burr가 넓게 퍼지면서 형성되는 것을 관찰하였다. 이는 삽입속도가 빠를수록 마찰에 의한 마찰열과 연화되는 피접합재의 양이 적어 원형을 형성하는 대신, 제대로 연화되지 못한 상태에서 밀려난 알루미늄이 넓게 퍼지면서 burr를 형성하는 것으로 판단된다. 접합된 시편의 뒷면을 관찰하였을 때, 핀의 흔적과 마찰열에 의해 그을려진 현상을 볼 수 있는데 삽입속도가 1.0mm/s에서 0.3mm/s로 느려질수록 더 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 삽입속도가 느릴수록 툴의 회전에 의한 마찰과 교반하는 시간이 더 증가하기 때문에 열이 더 많이 전달되어 나타는 것이라 사료된다.

각 조건별 단면을 관찰한 결과, 삽입깊이가 0.7mm로 강재의 모재 대비 약 30% 이상 삽입이 된 것을 확인할 수 있었고, 툴의 삽입된 깊이와 비슷한 크기의 흑이 형성되는 것으로 알 수 있었다. 이는 툴이 삽입되면서 밀려난 알루미늄은 burr를 형성하였고, 강재까지 삽입되는 툴에 의해 밀려난 강재가 연화된 알루미늄층으로 유입되어 흑을 형성하는 것으로 판단된다. 삽입깊이가 0.3mm/s의 흑의 형상은 다른 조건과는 달리 폭이 다소 넓은 것을 관찰하였는데 이는 앞서 언급했던 것과 같이 상대적으로 피접합재가 연화되는 양이 증가하면서 강재의 유입이 원활하게 이루어져 발생된 것으로 판단된다.

Table. 3.3 Appearance and cross section with plunge speed
 (pin 3.0mm, rotation speed 300rpm, plunge depth 0.7mm, dwell time 15s)

Plunge speed (mm/s)	Appearance			Cross section
0.3	Top			 Al Steel
	Bottom			
0.5	Top			
	Bottom			
1.0	Top			
	Bottom			

3.2.2 전단인장시험 특성

KS B 0851규격에 따라 제작된 시험편을 사용하여 삼입속도(0.3~1.0mm/s)에 따른 실험을 진행하였다. 조건별로 각각 3개의 시험편으로 마찰교반점용접을 진행하였으며 전단인장시험 결과의 평균값을 Fig. 3.4와 같이 나타내었고, 전단인장시험 후 파단된 시험편을 Table 3.4에 나타냈다.

본 전단인장강도 시험에서 최대 전단인장강도는 삼입속도가 0.3mm/s일 때 6.7kN이었으며, 0.5mm/s는 0.3mm/s와 비슷한 6.5kN을 얻었다. 이는 삼입속도의 변화에 큰 차이가 없었기 때문에 비슷한 결과 값을 얻은 것으로 판단된다. 그러나 삼입속도가 1.0mm/s일 때 4.4kN으로 낮은 전단인장강도를 나타내었다. 이는 높은 전단인장강도를 보인 0.3mm/s의 값보다 약 30%이상 감소한 수치이다. 이런 양상은 평균값이 아닌 최고 전단인장강도에서도 비슷하게 나타났다. 이러한 이유는 앞서 외관 특성에서 언급한 것과 같이 틀이 삼입되면서 회전에 의한 마찰열과 교반이 이루어지는데, 삼입속도가 빠를 때는 마찰열과 교반의 시간이 충분하지 않아 피접합재의 연화와 접합성에 영향을 미쳐 전단인장강도에 영향으로 주는 것으로 판단된다.

전단인장강도 시험 후, 파단면을 관찰하였다. 삼입속도가 0.3, 0.5mm/s에서는 플러그파단이 발생하였고 1.0mm/s에서는 계면파단의 양상이 나타났다. Table 3.4에서 강재의 위쪽 파단면을 관찰했을 때, 삼입속도 0.3, 0.5mm/s에서는 강재의 흑주변에 알루미늄이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 삼입속도 1.0mm/s에서는 알루미늄의 흔적 없이 계면파단이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이는 삼입속도의 증가에 따라 틀과 피접합재간의 마찰과 교반이 진행되는 시간이 상대적으로 감소되어 마찰교반점용접의 접합성에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

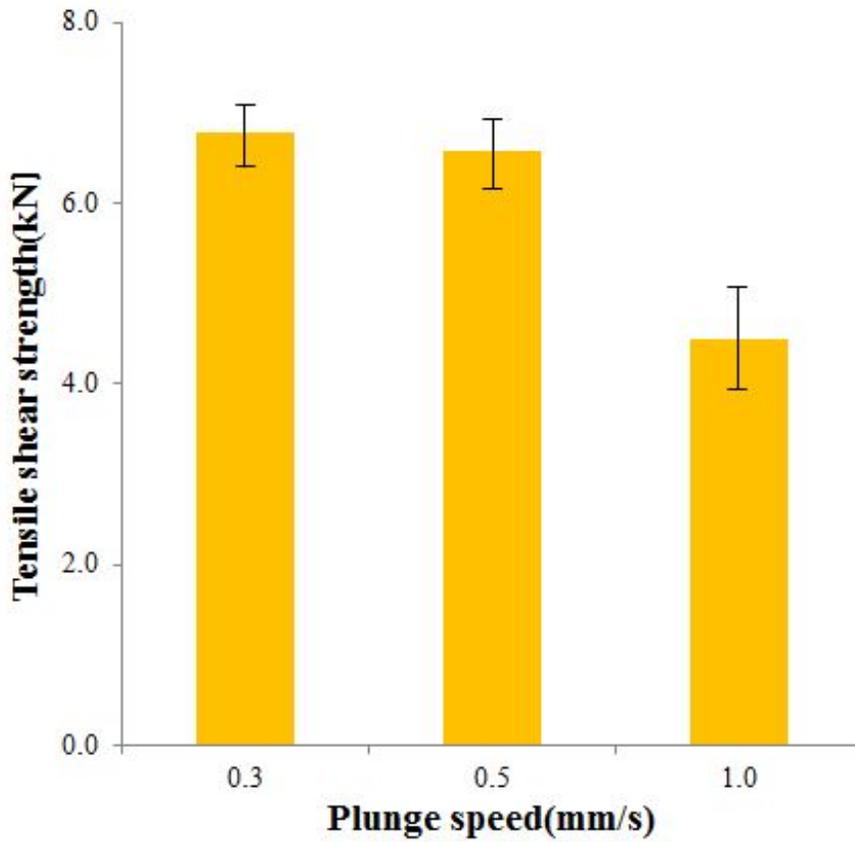
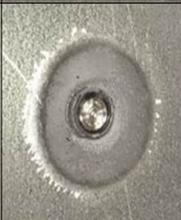
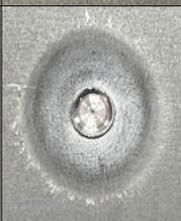


Fig. 3.4 Tensile shear strength with plunge speed

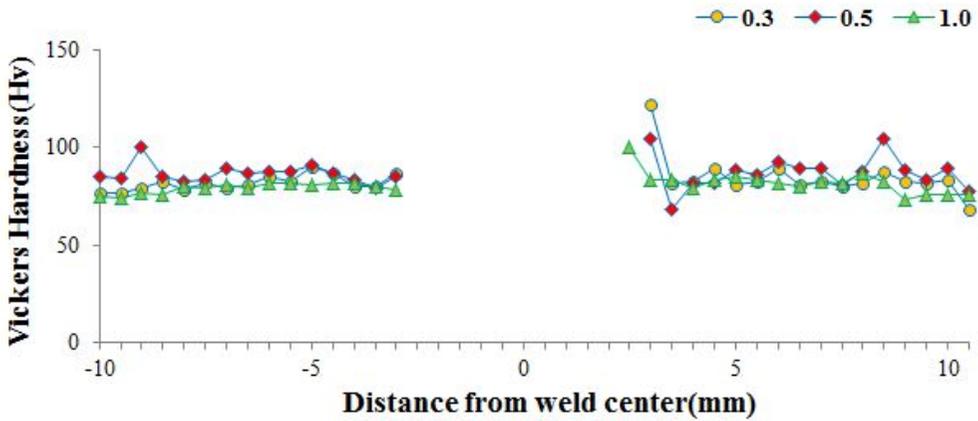
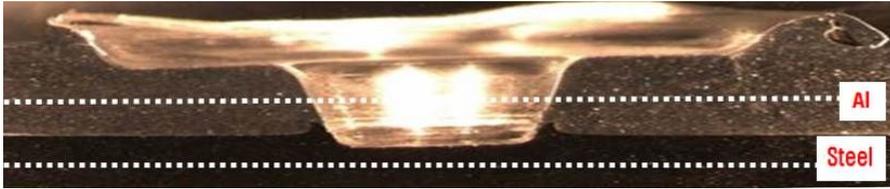
Table. 3.4 Fractured specimen after tensile shear test with plunge speed (pin 3.0mm, rotation speed 300rpm, plunge depth 0.7mm, dwell time 15s)

Plunge speed (mm/s)	Fractured specimen				Load(kN)
	Top		Bottom		
0.3					6.7
0.5					6.5
1.0					4.4

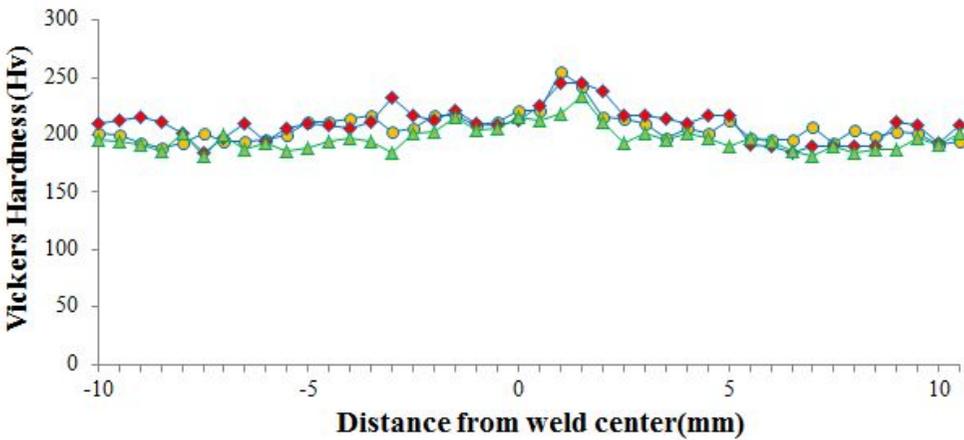
3.2.3 경도 분포

Fig. 3.5는 삽입속도(0.3~1.0mm/s)에 따른 접합부의 경도 분포를 나타내었다. 접합계면을 기준으로 알루미늄 측으로 0.7mm, 강재 측으로 0.7mm의 위치에서, 접합부의 중심으로 좌우 각각 10mm씩 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였으며, 정용접 후 생긴 hole에서의 경도 측정이 불가하여, hole 좌우 끝의 접합부 시작점부터 경도를 측정하였고, Fig. 3.5에서 (a)는 Al5083-O, (b)는 DP590을 나타낸다.

사용된 알루미늄과 강재의 모재 평균 경도는 각각 약 80Hv, 195Hv로 삽입속도 0.3mm/s조건에서 알루미늄 약 122Hv, 강재 약 255Hv으로 알루미늄은 모재 대비 약 50%, 강재는 모재 대비 35%이상으로 높은 경도가 교반부에서 측정되었다. 알루미늄과 강재의 열영향부 경도는 각각 약 73Hv, 193Hv로 모재 보다 다소 낮은 경도였다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 동적재결정으로 인해 결정립 미세화로 기인한 것으로 경도가 높아지며, 열에 의한 영향으로 조대화된 조직에 의해 경도가 낮아지는 것으로 사료된다. 또한, 삽입속도가 느릴수록 교반부에서 경도가 높았는데 삽입속도가 늦어짐에 따라 톨의 회전과 교반에 의해 동적재결정의 시간이 증가되어 상대적으로 결정립 미세화의 진행이 더 이루어진 것으로 판단된다. 삽입속도 0.5mm/s에서도 이와 비슷한 양상을 가졌으며, 삽입속도가 1.0mm/s일 때 교반부에서 알루미늄은 약 100Hv, 강재는 약 234Hv이며, 열영향부에서는 각각 약 79Hv, 184Hv로 경도 분포 양상은 비슷하나 다른 조건에 비해 낮게 측정되었다.



(a) Al5083-O



(b) DP590

Fig. 3.5 Hardness distributions with plunge speed

3.2.4 미세조직 특성

삼입속도(0.3~1.0mm/s)에 따른 실험에서 최대 전단인장강도를 얻었던 삼입속도 0.3mm/s조건인 미세조직을 Fig. 3.6에 나타내었다. 교반부, 기계적 열영향부, 열영향부, 모재의 영역을 알루미늄과 강재에서 모두 관찰할 수 있었다. 특히, 모든 조건에서 교반부와 모재를 비교했을 때, 결정립 크기의 차이를 확인할 수 있었다. 이는 기계적인 영향으로 소성유동된 조직들이 동적재결정으로 결정립이 미세화되었기 때문으로 사료된다. 또한, 핀의 바닥과 강재가 수직으로 맞닿는 교반부에서도 모재의 조직보다 미세화된 조직들을 관찰할 수 있었는데 이는 톨의 회전과 가압력에 의해 결정립의 크기가 연신되거나 미세화된 것으로 판단된다. 다른 실험에서와 마찬가지로 열영향부는 모재에 비해 다소 조대화된 것을 확인할 수 있었다. 교반 중에 강재가 알루미늄으로 유입되어 형성된 흑을 관찰했을 때, 흑의 조직은 강재의 미세화된 조직들로 이루어졌으며, 흑의 끝부분으로 갈수록 조직이 매우 미세화되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 교반부, 열영향부, 흑 등의 각 영역별 조직의 변화가 경도 분포에 영향을 주는 것으로 사료된다.

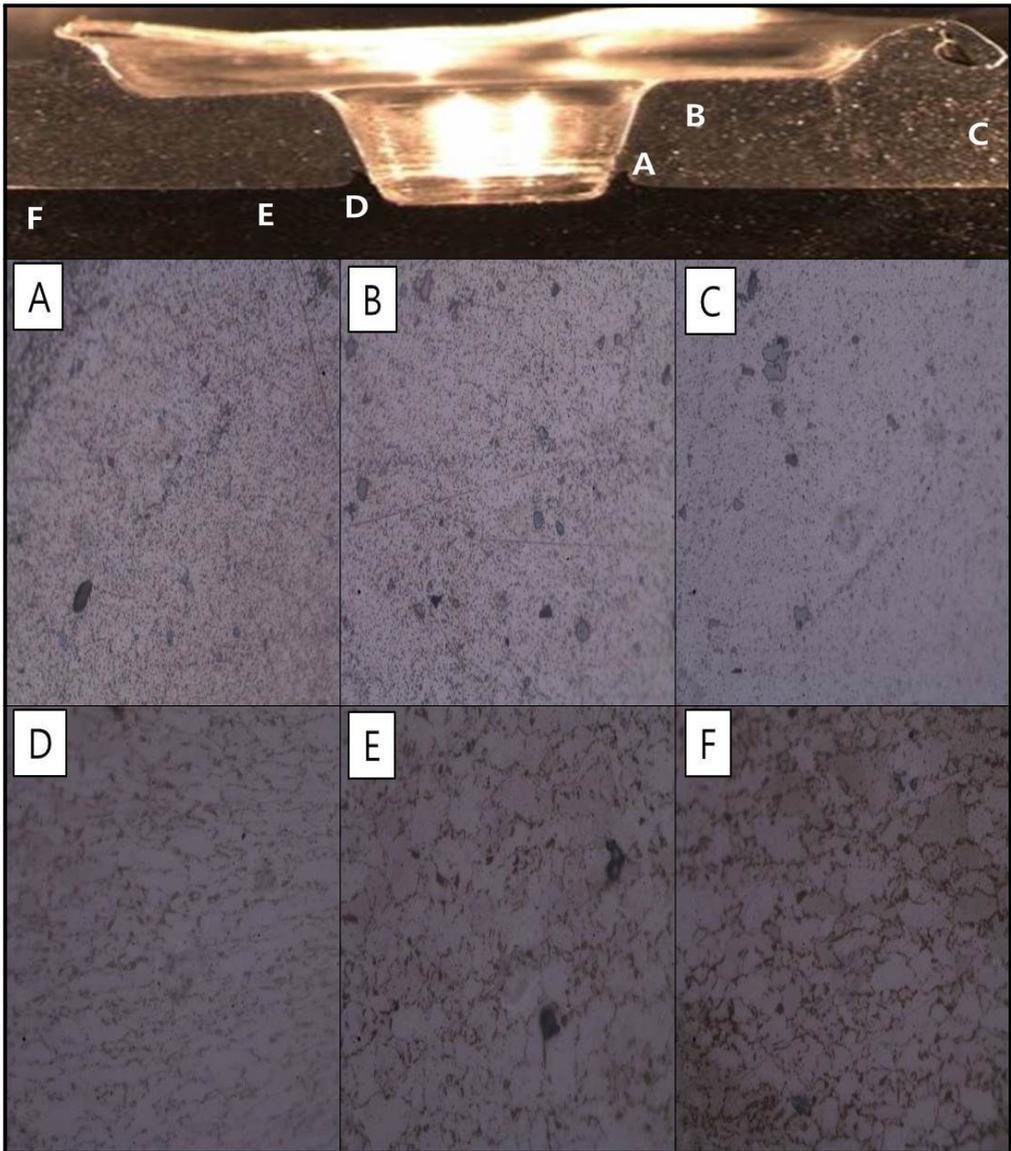


Fig. 3.6 Micro structure with plunge speed, 0.3mm/s(500x)

(A: SZ B: TMAZ+HAZ C: BM D: SZ E: HAZ F: BM)

3.3 삽입깊이에 따른 용접 특성

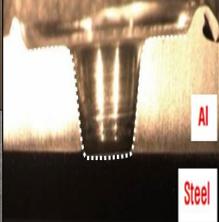
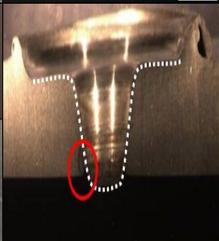
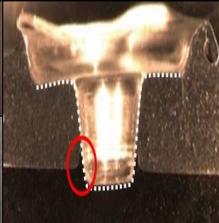
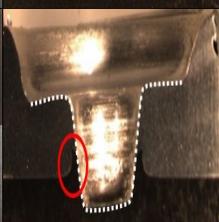
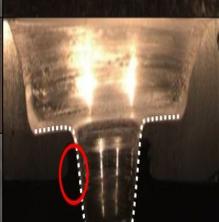
3.3.1 접합부 외관 및 단면 특성

삽입깊이(0.2~1.5mm)에 따라 조건별로 마찰교반점용접을 실시한 후, 용접된 시편의 외관을 관찰한 모습을 Table. 3.5에 나타내었다. 툴의 가압력과 회전에 의해 밀려나온 알루미늄이 원형으로 형성된 burr를 만들어 냈다. 그리고 시편의 뒷면을 보면 삽입깊이가 깊어지면서 핀의 흔적을 뚜렷하게 볼 수 있었다. 이는 삽입깊이가 깊어질수록 강재의 하표면과 가까워지기 때문에 툴의 회전과 가압력에 의해 열이 전달되어 점점 검은색으로 변화되는 것으로 사료된다.

각 시편의 접합부를 잘라 단면을 관찰하였을 때, 툴의 삽입깊이에 따라 솔더를 기준으로 형성된 burr의 양을 관찰할 수 있었고, 삽입깊이가 증가하면서 burr의 양이 증가함을 발견하였다. 또한, 삽입깊이가 증가하면서 흑의 크기와 그 면적도 증가하였으며, 삽입깊이가 1.5mm일 때 현저히 증가하는 것을 Fig. 3.7을 통해 알 수 있었다. 이는 툴의 회전과 마찰열로 인해 연화된 강재가 알루미늄으로 밀려들어가는 것이며, 삽입깊이가 증가할수록 강재가 알루미늄측으로 더 많이 유입되는 것으로 판단된다.[28]

Fig. 3.8과 같이 접합부의 알루미늄 두께를 관찰하였을 때, 삽입깊이가 증가할수록 접합 후의 알루미늄 두께도 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 삽입깊이가 증가하는 만큼 툴의 가압력과 회전에 의해 밀려난 알루미늄이 증가하기 때문에 burr의 양은 증가되고, 알루미늄의 두께는 삽입깊이의 증가에 따라 감소하는 것으로 판단된다. 또한 저항점용접 압흔 허용도에 따라 모재 두께 대비 10% 또는 0.15mm를 초과를 허용하지 않는다. 하지만, 본 실험에서는 압흔 허용도를 만족하는 조건은 삽입깊이 0.2mm의 조건만 만족하였으며, 차후 압흔 허용도를 고려한 최적 용접조건 도출을 위한 연구가 추가적으로 필요하다고 사료된다.

Table. 3.5 Appearance and cross section with plunge depth
 (pin 3.0mm, rotation speed 300rpm, plunge speed 0.5mm/s, dwell time 15s)

Plunge depth (mm)		Appearance		Cross section
0.2	Top			 Al Steel
	Bottom			
0.5	Top			
	Bottom			
0.7	Top			
	Bottom			
1.0	Top			
	Bottom			
1.5	Top			
	Bottom			

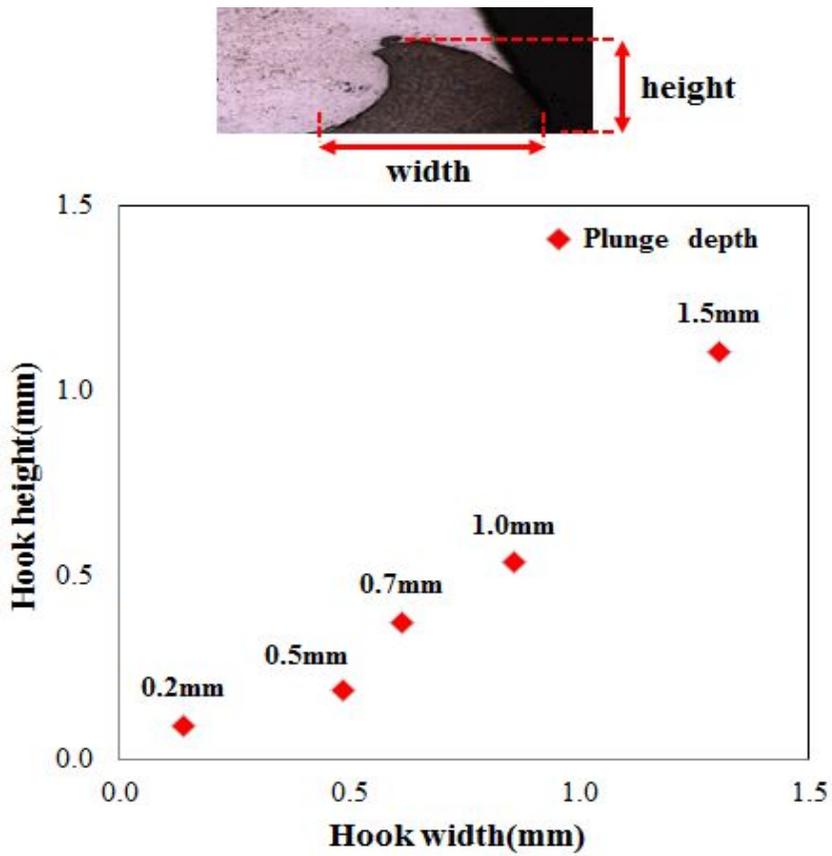


Fig. 3.7 Hook size with plunge depth

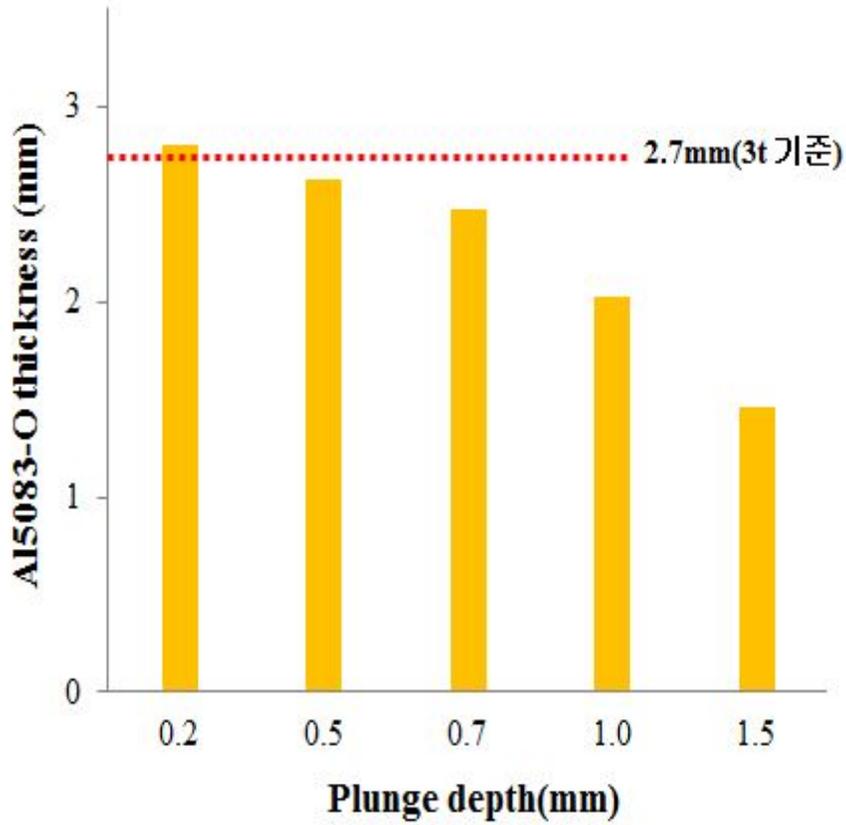


Fig. 3.8 The thickness of Al5083-O(3t) after welding

3.3.2 전단인장시험 특성

KS B 0851 인장규격에 맞춰 시험편으로 제작해 삼입깊이별(0.2~1.5mm)로 마찰교반점용접을 실시한 후에 전단인장시험을 하였다. 조건별로 각각 3개로 시험을 실시한 후, 평균값을 Fig. 3.9의 그래프로, 파단면을 Table 3.6에 나타내었다.

삼입깊이가 0.2mm일 때, 3.0kN으로 가장 낮은 전단인장강도를 얻었으며 0.7mm일 때, 6.5kN으로 가장 높은 강도를 얻었다. 전단인장시험에서 삼입깊이가 0.7mm까지 증가할 때는 전단인장강도가 증가하였고, 삼입깊이 1.0mm이상에서는 전단인장강도가 감소되는 양상을 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 일반적인 저항점용접에서는 계면파단, 플러그파단, 테어파단으로 나눌 수 있는데, 계면파단에서 테어파단의 양상으로 갈수록 전단인장강도 값은 커진다고 보고된다.[29,30]

본 실험에서는 계면파단과 플러그파단의 모습을 볼 수 있었지만, 테어파단의 양상은 볼 수 없었다. 그리고 계면파단에서 플러그파단 양상으로 진행된다면 전단인장강도가 높아져야하는데, 본 실험에서는 감소됨이 관찰되었다. 이러한 이유는 Table. 3.5의 단면(cross section)에 나타난 것과 같이 접합 후 알루미늄의 두께를 그래프로 표현한 Fig. 3.8을 통해 알 수 있었다. 튜의 삼입깊이가 증가하는 만큼 알루미늄의 두께가 얇아지는 것을 확인할 수 있다. 삼입깊이 0.7mm를 기준으로 알루미늄이 점점 얇아지면서 강도 역시 약해지는 것으로 판단된다. 삼입깊이가 0.7mm에서는 알루미늄 모재 대비 약 20%의 두께 감소가 있었지만, 1.5mm에서는 두께의 약 50%로 현저히 감소되었다. 이는 알루미늄 두께의 감소가 알루미늄 자체 인장강도 감소에 영향을 주며, 이러한 현상이 접합부의 전단인장강도에 영향을 준 것으로 사료된다.

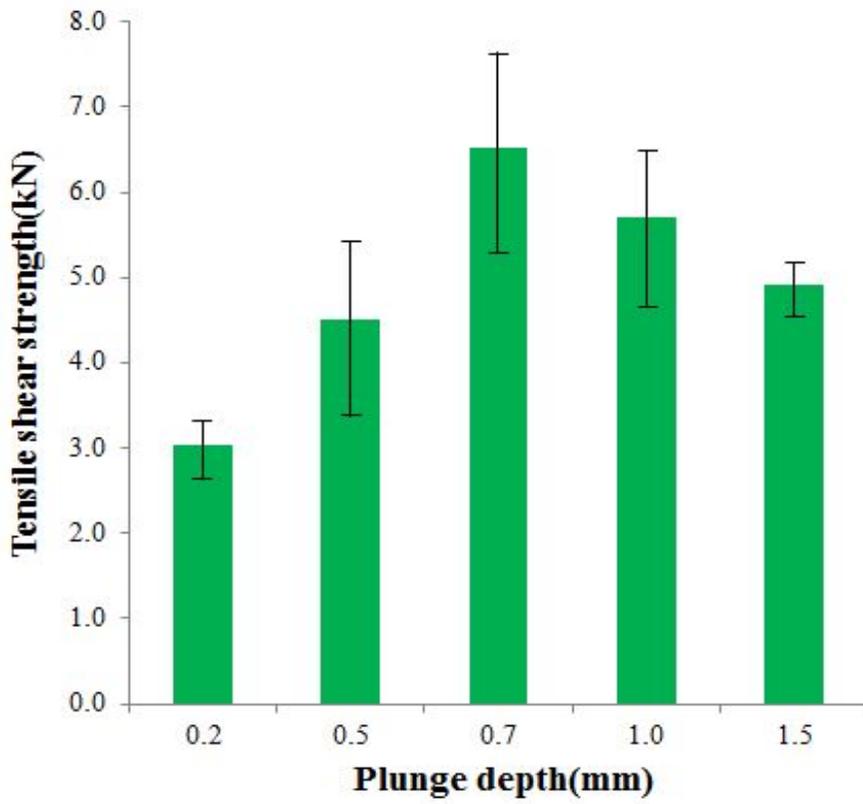
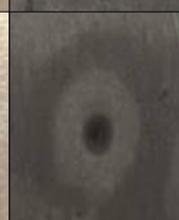


Fig. 3.9 Tensile shear strength with plunge depth

Table. 3.6 Fractured specimen after tensile shear test with plunge depth (pin 3.0mm, rotation speed 300rpm, plunge speed 0.5mm/s, dwell time 15s)

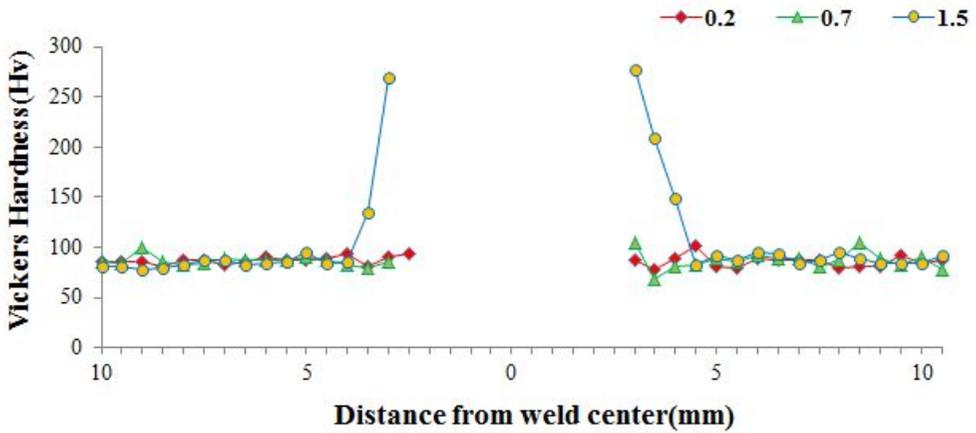
Plunge depth (mm)	Fractured specimen				Load(kN)
	Top		Bottom		
0.2					3.0
0.5					4.4
0.7					6.5
1.0					5.7
1.5					4.9

3.3.3 경도 분포

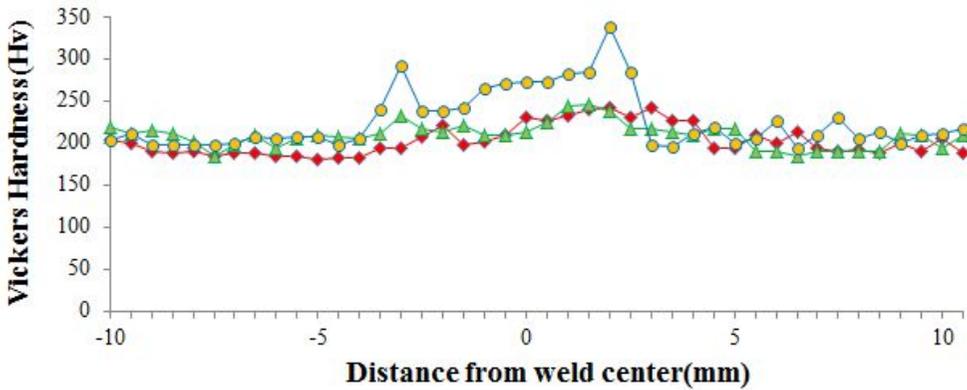
Fig. 3.10은 회전속도(300~500rpm)에 따른 접합부의 경도 분포를 나타내었고, (a)는 AI5083-O, (b)는 DP590이다. 접합계면을 기준으로 알루미늄측으로 0.7mm, 강재 측으로 0.7mm의 위치에서 측정하였다. 접합부의 중심으로 좌우 각각 10mm 씩 0.5mm 간격으로 하였으며, 점용접 후 생긴 hole에서의 경도 측정이 불가하여, hole 좌우 끝의 접합부 시작점부터 경도를 측정하였다.

알루미늄 모재의 평균 경도 값은 약 80Hv, 강재의 모재 경도는 약 195Hv다. 알루미늄측의 경우, 교반부에서 매우 높은 경도 값을 가졌는데, 이는 교반에 의해 강재가 알루미늄으로 유입되어 생성된 흑이 측정된 것으로 약 280Hv이며, 흑을 제외한 알루미늄의 최고 경도는 삽입깊이 1.5mm일 때, 약 149Hv를 얻었고, 강재의 경우도 알루미늄과 마찬가지로 삽입깊이 1.5mm에서 최고 경도인 약 337Hv가 측정되었으며, 툴의 측면이 아닌 툴과 수직으로 맞닿는 강재의 교반부는 약 285Hv로 측정되었다. 삽입깊이 1.5mm에서의 열영향부 경도는 알루미늄, 강재 각각 약 83Hv, 190Hv로 모재보다 다소 낮은 경도가 측정되었다. 모재보다 교반부에서 경도가 높게 측정되는 이유는 툴의 교반으로 인해 동적재결정이 일어나 결정립이 미세화 되면서 경도에 영향을 준 것으로 판단되며, 툴과 수직으로 맞닿는 강재의 부분에서도 툴의 회전과 가압력으로 인해 경도가 모재의 경도보다 높아진 것으로 사료된다. 열영향부는 툴의 회전에 의한 기계적 영향을 받지 않고 열에 의한 영향을 받기 때문에 모재보다 조직이 다소 조대화 되는 것으로 판단된다. 삽입깊이의 증가에 따른 경도를 비교했을 때 0.2mm에서 0.7mm까지는 비슷한 양상의 경도 그래프를 보이지만, 삽입깊이가 1.0mm, 1.5mm일 때는 접합부의 경도가 뚜렷하게 올라가는 것을 볼 수 있다. 이 역시, 툴의 가압력으로 인해 소성변형이 상대적으로 많이 일어났기 때문으로 사료된다.

일반적으로 경도가 높아지는 원인 중에 하나로 매우 높은 경도로서 취성의 성질을 가지는 금속간화합물의 발생을 들 수 있다. 본 실험에서 금속간화합물의 발생으로 접합부에서 경도가 높아지는 것을 배제할 수 없다고 판단된다.



(a) Al5083-O



(b) DP590

Fig. 3.10 Hardness distributions with plunge depth

3.3.4 미세조직 특성

Fig. 3.11은 접합부의 미세조직을 나타낸 것이다. 알루미늄과 강재를 관찰한 결과, 소성유동을 통한 동적재결정이 일어나는 교반부와 마찰열과 기계적 변형이 동반되는 기계적 열영향부, 열영향부, 모재를 관찰할 수 있었다. 모재보다 교반부에서 조직이 미세화 된 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 툴의 회전과 마찰에 의해 주변의 조직들이 교반되면서 동적재결정으로 인한 결정립 미세화가 진행된 것으로 판단된다. 알루미늄과 강재에서 모두 결정립 미세화가 나타났으며, 이것이 경도에 영향을 주는 것으로 사료된다. 또한 교반부 주위에서 소성유동의 흔적과 소성유동 중 강재의 일부가 떨어져 나가면서 알루미늄 조직 가운데 자리 잡은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3.12는 삽입깊이(0.7~1.5mm)에 따라 SEM으로 금속간화합물을 관찰한 것이다. 일반적인 이종접합에서는 입열이 클수록 금속간화합물(IMC)이 형성되거나 그 층의 두께가 두꺼워진다. 이런 금속간화합물의 형성과 두께가 접합부의 강도에 영향을 미친다는 연구들이 있다.[7] 본 실험에서는 Fig. 3.12와 같이 삽입깊이의 증가에 따라 금속간화합물층의 두께가 증가하는 것을 관찰하였다. 삽입깊이가 0.5mm이하에서는 금속간화합물이 매우 미소하였고, 삽입깊이 0.7mm에서는 약 5~6 μm , 1.0mm는 약 7~11 μm , 1.5mm는 약 9~30 μm 의 금속간화합물의 두께가 측정되었다. 삽입깊이가 증가할수록 금속간화합물의 두께가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 삽입깊이의 증가에 따라 알루미늄 두께가 감소하면서 입열량이 증가고, 이에 따라 금속간화합물 층의 형성과 그 두께가 증가되는 것으로 판단된다. 특히, 삽입깊이 1.0mm이상일 때, 금속간화합물 층의 두께 증가로 인한 영향으로 Fig. 3.9의 전단인장강도 결과와 같이 전단인장강도가 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

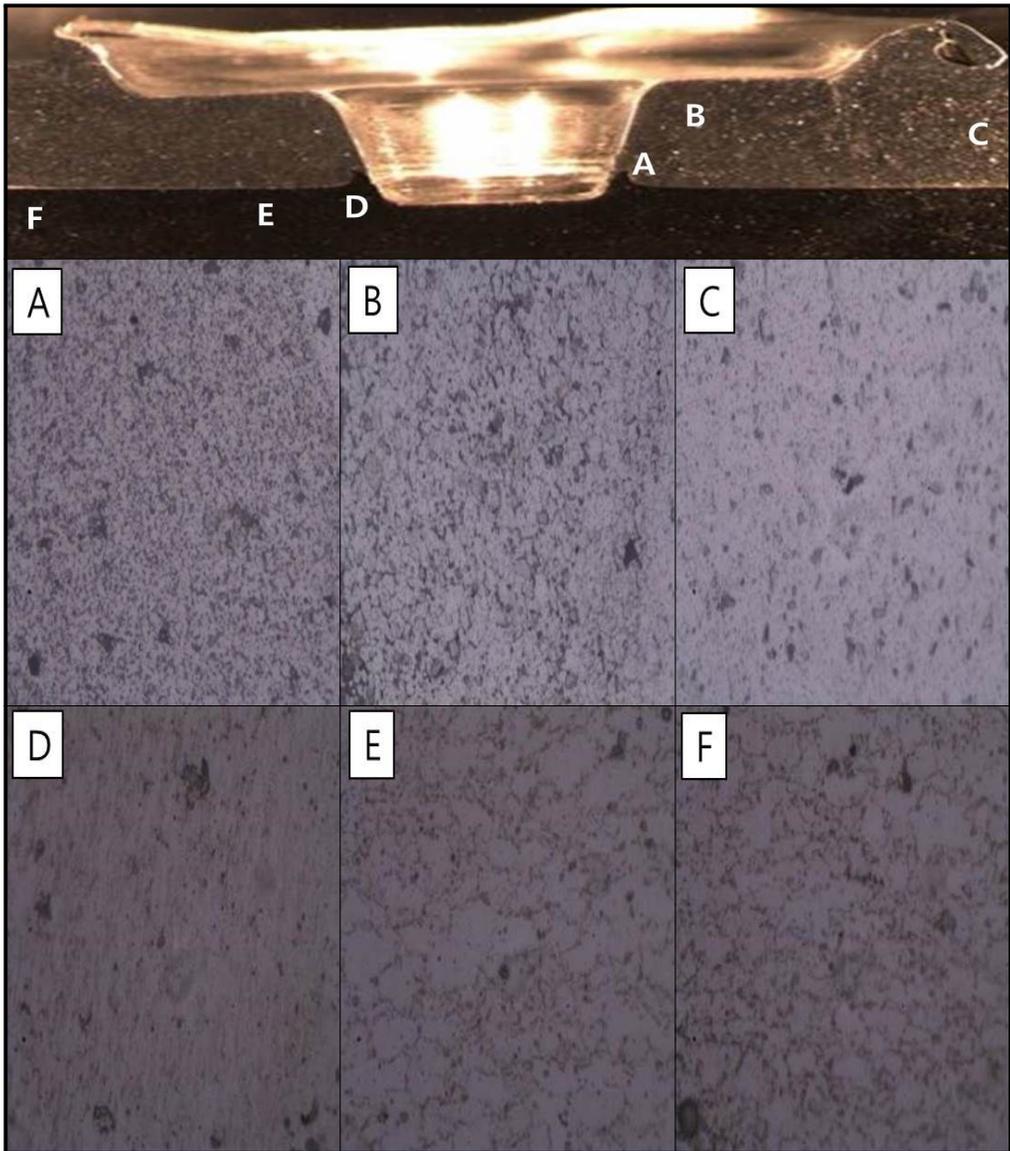
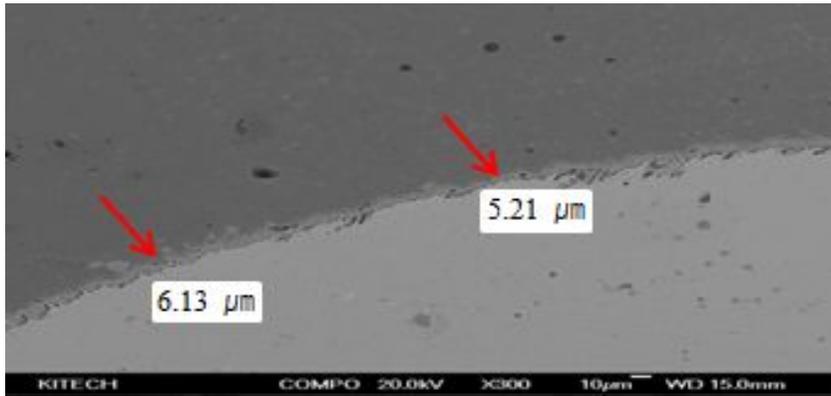
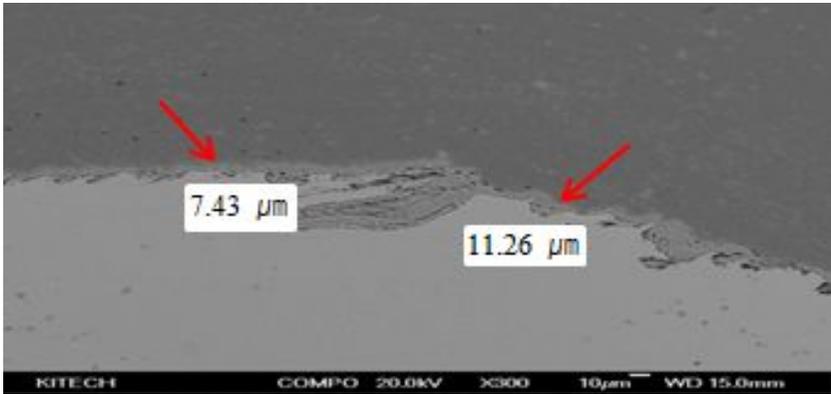


Fig. 3.11 Micro structure with plunge depth, 0.7mm(500x)

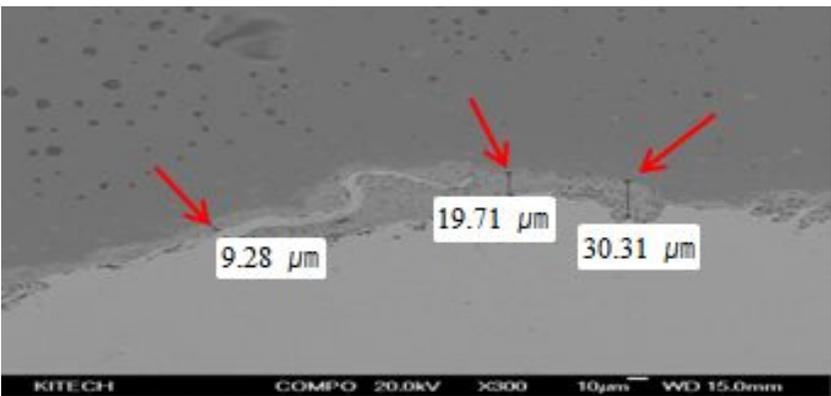
(A: SZ B: TMAZ+HAZ C: BM D: SZ E: HAZ F: BM)



(a) 0.7mm



(b) 1.0mm



(c) 1.5mm

Fig. 3.12 SEM images with plunge depth

4장. 결 론

본 연구에서는 차체 경량화에 적용되는 경량소재인 AI5083-O과 고강도강판인 SGAFc DP590의 겹치기 마찰교반점용접을 실시하여 회전속도, 삽입속도, 삽입깊이에 따른 각 조건별 기계적, 금속학적인 특성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.[31]

- 1) 회전속도(300~500rpm)에 따른 마찰교반점용접에서, 회전속도 300rpm일 때, 최대 전단인장강도인 3.0kN이며 회전속도 400rpm에서 2.6kN으로 가장 낮은 강도를 얻었다. 평균 전단인장강도에서 특정한 경향이 나타나지 않았지만 최고 전단인장강도의 경우, 회전속도가 증가하면서 입열이 증가하기 때문에 전단인장강도가 증가됨을 보였다.
- 2) 삽입속도(0.3~1.0mm/s)에 따른 실험 결과, 0.3mm/s일 때 최대 전단인장강도인 6.7kN을 얻었고, 삽입속도가 빠를수록 전단인장강도가 감소되었다. 특히, 삽입속도가 1.0mm/s일 때는 0.3mm/s의 전단인장강도보다 30%이상 감소되었는데, 이는 톨의 회전에 의한 마찰과 교반 부족이 피접합재의 연화와 접합성에 영향을 미쳐 전단인장강도에 영향으로 주는 것으로 판단된다.
- 3) 삽입깊이(0.2~1.5mm)에 따른 용접에서 삽입깊이 0.5mm이하에서는 계면파단이 발생하였고, 0.7mm이상에서는 교반이 이루어져 접합된 너깃을 형성한 플러그파단이 발생하였다. 알루미늄 두께 감소 측면에서도 감소 폭이 크지 않아 삽입깊이 0.7mm에서 6.5kN의 최대전단인장강도를 나타내었다.
- 4) 삽입깊이가 0.5mm이하에서는 금속간화합물 발생이 매우 미소하였고, 삽입깊이 0.7mm에서는 약 5~6 μ m, 1.0mm는 약 7~11 μ m, 1.5mm는 약 9~30 μ m로 삽입깊이가 증가할수록 금속간화합물의 두께가 증가되었다. 이는 삽입깊이에

따라 감소된 알루미늄에 의해 입열량이 증가되어 금속간화합물 발생이 증가되는 것으로 판단된다.

- 5) 회전속도, 삼입속도, 삼입깊이에 따른 접합부의 경도 분포에서는 동적재결정에 의한 결정립 미세화로 교반부에서 가장 높은 경도가 측정되었고, 열영향부에서는 경도가 감소하는 것을 관찰하였다. 미세조직을 관찰했을 때, 교반부에서는 동적재결정이 발생하며, 기계적 열영향부에서는 마찰열과 소성변형에 의한 결정립 미세화, 열영향부에서는 열 영향에 의해 조직이 다소 조대화 됨을 관찰할 수 있었다. 이런 조직의 변화가 경도에 영향을 주는 것으로 판단된다.

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
- [5] H. S. Shin, Y. C. Jung and K. Choi : Effects of tool speed on joining characteristics during friction stir spot welding of Mg-alloy (AZ31B) sheet, Journal of Welding and Joining, 2011, 29-2, pp80-87
- [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] E. Fereiduni, M. Movahedi and A. H. Kokabi : Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process, Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224, pp1-10
- [9] R. Sakano, K. Murakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, Y. Nagao and H. Kashiki : Development of Spot FSW Robot

- System for Automobile Body Members, 3rd International Friction Stir Welding Symposium, September, 2001, pp27-28
- [10] B. C. Son, et al. : A Study on Resistance Spot Welding of Dissimilar Sheet Metals (Aluminium Alloy-Steel Sheets), Journal of KWS, 1997, 15-4, pp42-62
- [11] W. H. Lee, Y. G. Lim, H. G. Ryu and B. J. Park : Characters of Zinc-coated steel and Al 6061 using FSW, RIST journal of R&D, 2008, 22-4, pp254-258
- [12] R. S. Mishra and Z. Y. Ma : Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering :R :Reports, 2005, 50-1, pp1-78
- [13] 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
- [14] G. Buffa, L. Fratini and MARIO. Piacentini : On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys, Journal of materials processing technology, 2008, 208-1, pp309-317
- [15] K. S. Bang, K. J. Lee, H. S. Bang and H. S. Bang : Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds between 6061-T6 aluminum and Ti-6% Al-4% V alloys, Materials transactions, 2011, 52-5, pp974-978
- [16] H. S. Bang, H. S. Bang, G. H. Jeon, I. H. Oh, and C. S. Ro : Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel, Materials & Design, 2012, 37, pp48-55
- [17] H. S. Bang, H. S. Bang, J. H. Hong, G. H. Jeon, G. S. Kim and A. F. H. Kaplan : Effect of Tungsten-Inert-Gas Preheating on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Al Alloy and Mild Steel, Strength of Materials, 2016, 48-1, pp152-159

- [18] 이창환, 여운동, 장운성, 한국과학기술정보연구원 : 마찰교반용접(기술산업정보분석), 한국과학기술정보연구원, 2003
- [19] ESAB : Friction Stir Welding Technical Handbook, <http://www.esab.com>
- [20] R. Nandan, T. DebRoy, and H. K. D. H. Bhadeshia : Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties, Progress in Materials Science, 2008, 53-6, pp980-1023
- [21] B. T. Gibson, et al. : Friction stir welding: process, automation, and control, Journal of Manufacturing Processes, 2004, 16-1, pp56-73
- [22] Q. Yang, et al. : Material flow during friction stir spot welding, Materials Science and Engineering: A, 2010, 527-16, pp4389-4398
- [23] G. H. Jeon : A Study on Weldability of TIG Assisted Friction Stir Dissimilar Welding of Al6061 Alloy and STS Sheet, Chosun univ, 2010, Master's Thesis
- [24] kawasaki robot, <https://robotics.kawasaki.com>
- [25] T. K. Han, K. Y. Lee and J. S. Kim : Recent developments and weldability of advanced high strength steels for automotive applications, Journal of Welding and Joining, 2009, 27-2, pp13-18
- [26] R. Kuziak, R. Kawalla, and S. Waengler : Advanced high strength steels for automotive industry, Archives of civil and mechanical engineering, 2008, 8-2, pp103-117
- [27] 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
- [28] 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
- [29] C. K. Chun, H. J. Kim, T. K. Kim and W. S. Chang : Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32 / A6022-T4, RIST journal of R&D, 2007,

21-4, pp281-286

- [30] T. Pan, A. Joaquin, D. E. Wilkosz, L. Reatherford, J. M. Nicholson, Z. Feng and M. L. Santella : Spot friction welding for sheet aluminum joining, In Proceedings of the 5th international symposium of friction stir welding, 2004, 1416
- [31] S. O. Jeong, H. S. Bang, and H. S. Bang : Effects of various plunge depths on weldability of dissimilar Al5083-O/DP590 friction spot joint, Journal of Welding and Joining, 2016