



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 2월
석사학위 논문

인장속도에 따른
마찰교반용접된 Al6061 합금의
과단부 상태변화에 대한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

윤 나 연

인장속도에 따른
마찰교반용접된 Al6061 합금의
파단부 상태변화에 대한 연구

A study on status variation of fracture field of
friction stir welded Al6061 alloy
according to tension test speed

2016 년 2 월 25 일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

윤 나 연

인장속도에 따른
마찰교반용접된 Al6061 합금의
과단부 상태변화에 대한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2015년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

윤 나 연

윤나연의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 양 인 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 ㉠

위 원 조선대학교 교수 정 현 철 ㉠

2015년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	IV
LIST OF FIGURES	V
ABSTRACT	VII
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목표 및 내용	3
제 2 장 이 론	4
제 1 절 마찰교반용접(Friction Stir Welding)	4
1.1 마찰교반용접의 기술 개요	4
1.2 마찰교반용접의 진행 순서	5
1.3 마찰교반용접의 특징	6
1.4 알루미늄 합금의 마찰교반용접 적용 현황	8
제 2 절 재료의 기계적 특성	10
제 3 절 포아송 비 (Poisson's ratio)	14
3.1 포아송 비(Poisson's ratio) 이론	15

3.2 체적변화율 (Unit volume change)	15
제 4 절 적외선 열화상(Infrared thermography) 기술	16
4.1 적외선	16
4.2 적외선과 온도	17
4.3 적외선의 특징	18
4.4 적외선 영상 시스템의 원리	19
제 3 장 실험장치 및 실험방법	22
제 1 절 시험편	22
1.1 알루미늄 합금의 특성	22
1.2 마찰교반용접 시험편	23
제 2 절 실험장치	28
2.1 인장시험기(MTS System)	28
2.2 적외선 열화상 카메라(Infrared Thermography)	29
2.3 CCD(Charge coupled device) 카메라	30
제 3 절 실험방법	31
제 4 장 실험결과	32
제 1 절 인장시험을 통한 강도 평가	32
1.1 응력-변형률 선도	32
제 2 절 적외선 열화상을 이용한 파단부 온도변화 측정	34

2.1 인장속도별 파단부 온도변화 측정	34
제 3 절 체적변화 측정	45
3.1 CCD카메라를 이용한 체적변화 측정	45
제 5 장 결 론	54
참 고 문 헌	56

LIST OF TABLES

Table 2-1	Welding processes global market	9
Table 2-2	Normal stress-strain and true stress-strain curve	12
Table 3-1	Effect of the aluminum alloy element	22
Table 3-2	Mechanical composition of Al6061-T6	23
Table 3-3	Mechanical properties of Al6061-T6	23
Table 3-4	Welding bead geometry of FSW welding specimen according to FSW rotation speed	26
Table 3-5	Dimension of tensile test specimen	26
Table 3-6	Specification of MTS System	28
Table 3-7	Specification of infrared thermography system	29
Table 3-8	Specification of CCD Camera	30
Table 4-1	Result of tensile test	32
Table 4-2	Temperature result of FSW rotation speed by tensile load	44
Table 4-3	Data comparison of volume and temperature by 800 rpm FSW speed	47
Table 4-4	Data comparison of volume and temperature by 1200 rpm FSW speed	48
Table 4-5	Data comparison of volume and temperature by 1600 rpm FSW speed	47
Table 4-6	Volume of FSW according to rotation speed and tensile test speed	53

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1	Schematic diagrams showing basic principle of FSW	4
Fig. 2-2	Process procedure of the FSW	5
Fig. 2-3	Features of the FSW	6
Fig. 2-4	MIG welding and FSW welding	7
Fig. 2-5	Compare welding deformation each length 1m (Material : Al6061, Length : 1m, Thickness : 3 mm)	7
Fig. 2-6	Stress-strain curve of the material	10
Fig. 2-7	Comparison with the normal stress-strain curve and true stress-strain curve	12
Fig. 2-8	Principle of poisson's ratio	14
Fig. 2-9	Test of tension members	15
Fig. 2-10	Spectrum of electronic wave	16
Fig. 2-11	Relation between blackbody and temperature	17
Fig. 2-12	Detectino prionciple of IRT	19
Fig. 2-13	Temperature calibration	21
Fig. 3-1	FSW specimen of Al6061-T6	23
Fig. 3-2	Schematic diagram of the tensile specimens	24
Fig. 3-3	Welding specimen of FSW	24
Fig. 3-4	Welding process of FSW	25
Fig. 3-5	Shape and CAD drawing of FSW tool	25
Fig. 3-6	Tensile test specimen of Al6061-T6	26
Fig. 3-7	FSW specimen according to rotation speed of FSW tool	27
Fig. 3-8	Device configuration of MTS System	28
Fig. 3-9	Infrared thermography system	29
Fig. 3-10	Measurement of volume by CCD Camera	30
Fig. 3-11	Experimental setup	31
Fig. 4-1	Result of tensile test	33

Fig. 4-2	FSW specimen according to tensile load test	35
Fig. 4-3	Temperature measurement of rotation speed 800 rpm	36
Fig. 4-4	Fracture field temperature graph of rotation speed 800 rpm	37
Fig. 4-5	Temperature measurement of rotation speed 1200 rpm	38
Fig. 4-6	Fracture field temperature graph of rotation speed 1200 rpm	39
Fig. 4-7	Temperature measurement of rotation speed 1600 rpm	40
Fig. 4-8	Fracture field temperature graph of rotation speed 1600 rpm	41
Fig. 4-9	Temperature graph of FSW specimen according to rotation speed	42
Fig. 4-10	Temperature graph of FSW specimen according to tensile speed	43
Fig. 4-11	Measurement of temperature and volume by CCD Camera and Infrared Thermography	45
Fig. 4-12	CCD Image of specimen of 3 mm/min by 800 rpm of FSW	46
Fig. 4-13	CCD Image of specimen of 5 mm/min by 1200 rpm of FSW	46
Fig. 4-14	Combine with temperature and volume graph of FSW 800 rpm	50
Fig. 4-15	Combine with temperature and volume graph of FSW 1200 rpm	51
Fig. 4-16	Combine with temperature and volume graph of FSW 1600 rpm	52

ABSTRACT

A study on status variation of fracture field of
friction stir welded Al6061 alloy
according to tension test speed

Yun Na Yeon

Advisor : Prof. Kim, Kyeong-Suk, Ph. D.
Dept. Mechanical System Engineering
Graduate School of Chosun University

In general, welding is a technique for bonding for two metallic materials by heating. By various welding methods developed with the development of modern industry it has been recognized as an important technique essential for iron and non-ferrous metal bonding. however, the welding has a significant effect on the destruction of welding structure due to bounding through an heat or external effect in a short time. So, welding make the change of material property, residual stress, deformation of the material or welded defects. Research on fracture prediction of steel material has been reported in many different ways. The fracture portion is deformed due to the heat caused by breaking materials and this heat causes decreasing the strength of materials due to changes the mechanical and fracture properties.

In this paper, aluminum specimen was welded according to welding speed using Friction stir welding process. Aluminum alloys are lightweight, high-performance characteristics in recent years due to energy savings and environmental dimension has widened its application range. In addition, ships, railways, automobiles, aircraft,

etc. is becoming an aluminum alloy used in the manufacture of car body parts and aircraft

equipment are increasingly expanding. Due to this effect, the study of the weld is made of an aluminum alloy continuously. Also useful as a welding method for bonding the aluminum alloy is laser-welded, as well as the conventional arc welding (MIG, TIG), friction stir welding (FSW), the study of the friction stir spot joining (FSSW) are being actively investigated.

In this paper, aluminum specimen was welded according to welding speed using Friction stir welding process. To produce a tensile test, the friction stir welding specimen was added tension according to tension speed rate using MTS tensile test machine. When friction stir welding specimen are tension rate, breaking section shape, yield strength and strength change are shown in the specimen. The hot cracking occurs in the welded part by a reduced cross section of the welded part. In addition this heat frequently make problem such as the discontinuity of the base metal cold cracking, stress corrosion cracking. This problem can be analyzed using a infrared thermography camera. If the load receiving object radiation infrared heat energy by the deformation, the stress can be reduced by using the infrared radiation. Base on this principle, the temperature represents the highest stress value for the part during welding, and movement of temperature that can non-destructively predict the evolution of fatigue cracks.

So, infrared thermography were able to shown about relationship between the heat-affected specimen when the local contraction at fracture part and it showed the relation between the temperature change in the fracture rate and tensile speed of the friction stir welding. In addition, as compared to the temperature change shown in the graph of the volume of the specimen according to the relationship between a tensile rate has been described.

In conclusion, notch, crack, was observed for tensile, infrared thermography camera, the volume change to the welding conditions and this study will be safety, health, promotes a conservative and expected to contribute to basic research.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

1.1 연구 배경

용접은 일반적으로 열을 가하여 2개의 금속재료를 접합하는 기술로써 현대산업의 발전과 함께 다양한 용접법의 발달로 철 및 비철금속의 접합에 없어서는 안 되는 중요한 기술로 인식되고 있다.¹⁾ 하지만 용접은 빠른 시간 내에 높은 열 또는 외부 영향을 통하여 접합하기 때문에 재질의 변화, 잔류응력, 재료의 변형 또는 여러 용접부에서의 결함이 생기기 쉬워 용접구조물의 파괴에 큰 영향을 미칠 수 있다. 파괴는 여러 산업분야에서 광범위하게 발생되고 있으며 용접 및 설비에 관한 산업분야에서도 빼놓을 수 없는 위험요소이기 때문에 이러한 현상에 대하여 원인을 분석하여 사고를 예방하기 위한 안전대책 수립에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.²⁾ 용접부의 변형의 원인으로 모재에 대한 용접현상에 의해 나타난다. 모재의 열팽창 계수가 크고, 열전달이 잘 되는 재료일수록 용접부의 변형이 발생하기 쉬운 경향이 있는데, 이러한 차이는 알루미늄의 용접부에서 쉽게 발견할 수 있으며 국부적으로 급속히 고온으로 가열된 알루미늄 용접부위의 열응력에 의해 용접 시 모재의 외적 구속, 모재 크기, 용접 입열, 판 두께 등의 영향을 받는다. 이러한 알루미늄합금은 경량, 고성능 특성으로 인해 최근 들어 에너지 절약과 환경 보존 차원에서 그 활용범위가 넓어지고 있으며, 선박, 철도, 자동차, 항공기 등 수송기기계의 차체와 부품 제조과정에서 알루미늄합금의 용접공정의 사용은 점점 확대되고 있다. 이러한 영향으로 인해 알루미늄 합금의 용접 접합에 대한 연구가 끊임없이 이루어지고 있다.³⁾

알루미늄합금의 접합에 유용한 용접법으로는 기존의 아크용접(MIG, TIG)을 비롯하여 레이저용접, 마찰교반용접(FSW), 마찰교반 점 접합(FSSW)등이 활발하게 연구가 진행되고 있다. 그 중 알루미늄 TIG용접은 TIG 알루미늄계 피 용접재와 철계 피용접재와의 접합 시 계면에 FeAl₃ 또는 Fe₂Al₅ 등의 취약한 Al-Fe계 금속간 화합물이 매우 두텁게 생성하여 접합강도를 저하시키는 것으로 알려져 있

으며 MIG 용접은 아크가 불안정하고 스퍼터 발생이 쉽고 산화막을 제거하는 클리닝작업이 불충분하다는 문제점을 가지고 있다. 마찰교반용접은 소성유동을 이용한 고상 접합방법으로 기존의 용접법에 비하여 발열이 최소한으로 억제되어 열변형 및 잔류응력을 저감시킬 수 있는 용접법으로 연구·개발이 활발히 진행되고 있으며 그 적용범위 또한 확대되고 있지만, 선박건조와 같은 현장에서의 사용은 제한적이고, 용접부의 단면이 감소하는 문제점이 있다.⁵⁾⁶⁾ 용접부의 단면 감소에 의한 용접 금속부의 고온 균열이 발생하기도 하는데 이는 모재와의 불연속성으로 인하여 저온균열, 응력부식 균열 등의 문제가 자주 발생할 수 있기 때문에 구조물의 안전성을 위해 미리 예측하기 위한 연구가 요구되어지고 있다.

적외선 열화상 카메라(Infrared Thermography)를 이용하여 피로균열측정의 새로운 방법이 될 수 있다. 하중을 받는 물체는 변형과 적외선 열에너지로 방사하면, 방사된 적외선을 이용하여 응력으로 환산이 가능하다. 이를 토대로 용접 시 응력이 가장 높은 부분에 대한 온도값을 나타내고, 온도점의 이동을 확인함으로써 파괴적으로 피로균열의 진전을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 노치, 크랙, 용접조건 등에 대해 인장, 적외선 열화상 카메라, 체적변화를 관찰함으로써 안전성, 건전성, 보수성을 증진시키며 기초 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

1.2 연구목표 및 내용

본 논문에서는 마찰교반용접법을 이용하여 용접 속도별(800, 1200, 1600 rpm)로 알루미늄(Al6061) 시험편을 용접하였으며 인장시험편을 제작하여 MTS 인장시험기를 통해 Al6061 시험편에 속도별(1 mm/min, 3 mm/min, 5 mm/min)로 인장력을 가하였다. 속도별로 마찰교반용접된 시험편을 각기 다른 인장속도로 인장시켰을 경우 시험편에 나타나는 파단부의 형상과 항복강도, 인장강도 등의 변화를 관찰해보고자 한다.

마찰교반용접된 시험편에 인장력을 가하며 동시에 시험편의 파단부 온도변화를 적외선 열화상 카메라를 통해 관찰하였다. 이를 통해 파단부에 국부적인 수축이 일어났을 때 시험편이 받는 열 영향의 관계를 나타낼 수 있었으며, 마찰교반용접 속도와 인장속도에 관한 파단부의 온도변화의 관계를 알 수 있었다. 또한 인장속도에 따른 시험편의 체적의 변화를 그래프로 나타내어 온도변화와 비교하여 관계를 설명하였다.

결론적으로 본 연구에서는 노치, 크랙, 용접조건 등에 대해 인장, 적외선 열화상 카메라, 체적변화를 관찰함으로써 안전성, 건전성, 보수성을 증진시키며 기초 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

제 2 장 이 론

제 1 절 마찰교반용접(Friction Stir Welding)

1.1 마찰교반용접의 기술 개요

마찰교반용접(FSW; Friction Stir Welding)은 1991년에 영국 용접/접합 연구소 (TWI, The Welding Institute)에서 개발된 고상접합 기술로, 두 개의 판을 겹친 후 강력한 힘을 가해 발생하게 되는 마찰열로 두 판을 접합시키는 기술이다.⁷⁾ Fig. 2-1에 나타나듯이 접합 모재보다 경한 재질을 지닌 특수한 형상의 비소모식 tool(또는 stir rod)을 모재에 삽입하여 고속으로 이동하여 회전시킨 후, tool과 모재 사이에 발생하게 되는 마찰열을 이용하여 용융점 이하 온도에서 두 모재의 재 결정화를 통해 접합하는 고상접합 기술로 tool의 교반에 의하여 모재의 소성 유동으로 접합면 양쪽의 모재들이 강제적으로 혼합되는 용접 공정이다.⁸⁾

마찰교반용접 기술은 기존의 용융 용접에 비하여 낮은 입열로 용접이 이루어 지기 때문에 모재의 변형이 적고, 별도의 용접봉, 용가제, 열원 등이 불필요하며 접합되는 과정에서 유해광선이나 유해물질 등이 배출되지 않아 환경친화적인 접합기술이다.

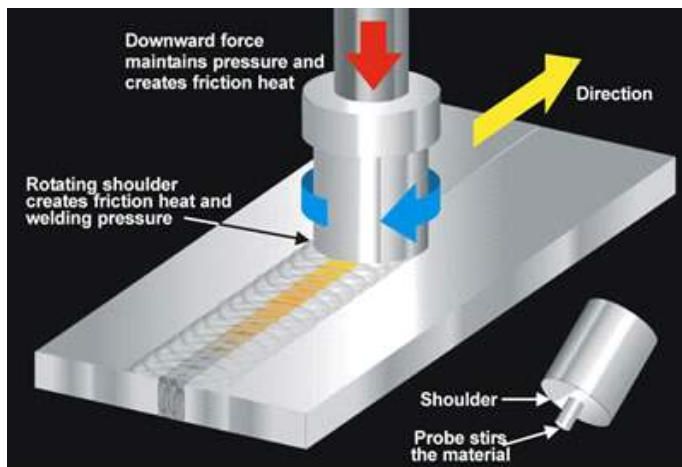


Fig. 2-1 Schematic diagrams showing basic principle of FSW

1.2 마찰교반용접의 진행 순서

마찰교반용접 공정의 진행순서를 Fig. 2-2에 4단계로 모식적으로 구분하여 나타내었다. (a)는 tool이 회전(Rotation)하는 단계로 tool의 회전속도 등 용접조건을 설정한 뒤 tool의 프로브를 미리 회전시키고, (b)단계에서는 모재에 tool을 삽입(Plunging)하여 마찰시켜 열을 발생시킨다. 이어서 마찰열을 충분히 발생시켜 (c) shoulder 부분을 모재와 가깝게 접촉하여 마찰로 인한 영역을 확대시켜 예열(Heating)하는 단계이며, (d)는 tool을 이동시키면서 용접(Welding) 접합이 이루어지는 단계이다. ^{9),10)}

마찰 교반을 일으키는 tool이 삽입된 부분(pin) 주위로 ‘third-body’인 연화된 영역이 생기게 되는데, pin이 모재의 접합선에 따라 이동하며, pin의 앞부분(Advancing side)에서 뒷부분(Retreating side)으로 밀어내어 솔더(Shoulder)에 의하여 단조(Forging)되어 마찰열과 기계적 가공의 조합에 의하여 고상접합부가 만들어진다. 이 때, 회전 tool은 1~5°정도로 기울어 접합 용접을 진행하는 것이 일반적이다.

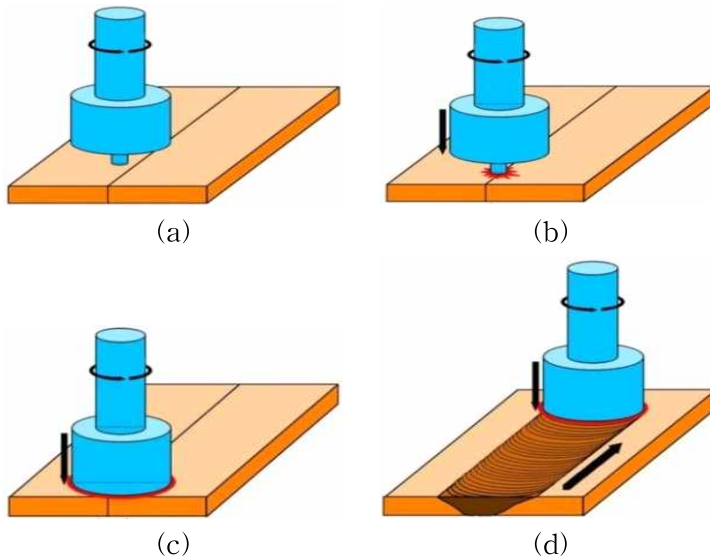


Fig. 2-2 Process procedure of the FSW

1.3 마찰교반용접의 특징

마찰교반용접은 타 용접과는 달리 다양한 특징을 나타내는데 이를 Fig. 2-3에 나타내었다. 마찰교반용접법을 통해 알루미늄 용접 시 차폐 가스를 필요로 하지 않으며 고상용접이므로 용접에 따른 변형이 매우 작다.¹¹⁾ 또한, 별도의 용접봉, 용가제, 열원, 분위기 가스 등이 불필요하며 용접 중 흠이 발생하거나 기공, 균열 등의 결함의 발생이 거의 없으며 적외선 또는 자외선 등의 유해 광선이 발생하지 않기 때문에 환경 친화적인 용접방법이라고 할 수 있다.

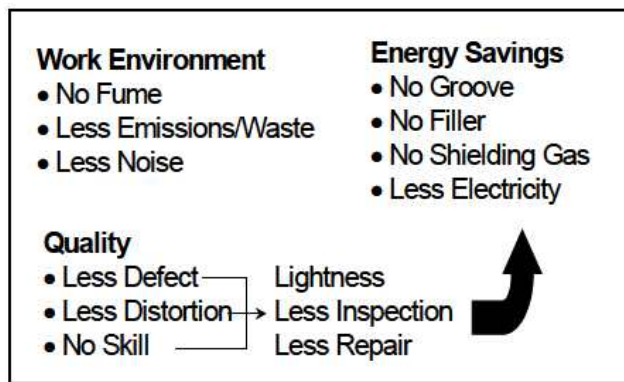


Fig. 2-3 Features of the FSW

Fig. 2-4에서는 충전재료(Filler material)가 필요 없어, 충전재료가 필요한 미그 용접(Metal electrode Inert Gas Welding, MIG)과의 비교를 통해 마찰교반용접의 우수하고 양호한 용접현상을 보여주고 있다. 또한 마찰교반용접은 기계적 에너지 효율이 높아서 판두께 12.5mm의 6000계 알루미늄에 대해 3kW의 에너지면 충분하다고 한다.¹²⁾ 용접/접합 연구소(TWI, The Welding Institute)에 의하면 비소모성 tool을 이용하여 알루미늄 6000계열의 경우 하나의 tool을 이용하여 1000m를 수행할 수 있으며, 75mm 두께에서는 한번에 용접에 가능하며 그 이상도 가능한 기술이라고 서술하고 있다.¹³⁾

이러한 장점으로 마찰교반용접은 경량합금(Al, Mg, Ti 합금)등으로 제조된 구조 제품, 금속기지 복합재료 등 기존 용접 기술의 적용이 거의 불가능했던 재료의 접합이 가능하여 이종재료의 용접에도 적합하다. 이는 마찰교반용접 용접부

에서 용융이 일어나지 않기 때문에 미세한 결정립의 압출조직이 남아있으며 액상에서 고상으로의 변태에 따른 기공, 응고균열, 잔류응력 등과 같은 문제가 해결된다.¹⁴⁾ 또한 마찰교반용접의 이음부 형성에 대하여 맞대기용접, 필릿, lap 이음부 등 여러 종류의 형상의 용접이 가능하며 각기 다른 재질의 접합에 용이하다는 장점이 있어 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다.

마찰교반용접 기술의 단점은 용접 끝 부분에 공구 프로브의 구멍이 남아 용접부 마무리를 위해 보수 및 End-tab을 부착하여 제품의 바깥쪽으로 위치하도록 할 필요가 있다.^{15),16)}

Fig. 2-5는 마찰교반용접 특징과 관련하여 동일한 구속조건으로 용접한 경우 마찰교반용접, 가스 금속 아크용접 및 YAG laser 용접의 각변형량을 비교한 것으로 재질, 두께 및 접합재료에 따라 달라지지만 마찰교반용접의 각변형량은 가스 금속 아크용접의 1/20~1/30 수준으로 적다.¹⁷⁾

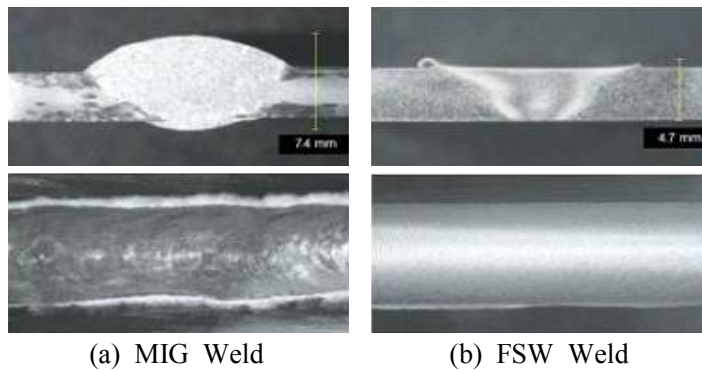


Fig. 2-4 MIG welding and FSW welding

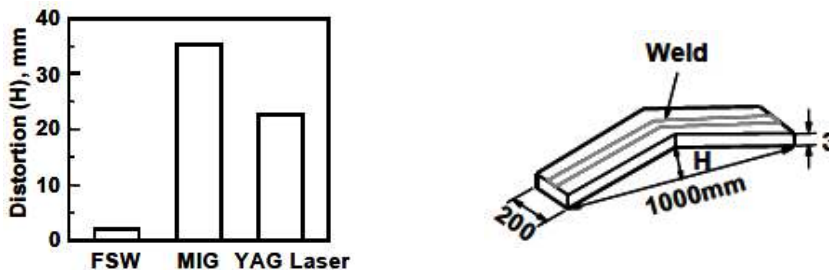


Fig. 2-5 Compare welding deformation each length 1m
(Material : Al6061, Length : 1m, Thickness : 3 mm)

1.4 알루미늄 합금의 마찰교반용접 적용 현황

최근 마찰교반용접 기술과 알루미늄 합금 소재를 접목하여 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 알루미늄 합금은 대부분의 자동차 차체 및 여러 구조부재 등의 소재들 중 경량화 추세에 따라서 가장 높은 비중을 차지하는 금속재료로 지금까지 MIG 용접과 TIG 용접이 사용되어 왔지만 이를 대신하여 마찰교반용접이 본격적으로 사용되어지고 있다.

알루미늄 합금에 마찰교반용접이 처음으로 적용된 사례는 1966년 SAPA(덴마크)에서 어선에 수확된 고기의 냉동보관을 위하여 속이 빈 알루미늄 패널 제조에 적용되었다. 이 때 패널은 알루미늄 압출재가 이용되었으며, 최소한의 변형과 높은 재현성을 구현하기 위해 적용되었다. 더불어 스웨덴 Esab사에서는 선박의 16m 알루미늄 구조부재를 접합할 수 있는 마찰교반 장비를 개발하여 DNV(노르웨이선급), Lloyd(영국선급), RINA(이탈리아선급)등 선급 승인을 획득하여 선박의 구조부재 제작에 활용하였다.¹⁸⁾

일본에서는 철도수송기기와 선박분야를 중심으로 알루미늄 강판에 마찰교반용접 기술이 적용되고 있는데, 1997년 가을부터 700계 신칸센의 floor 판넬의 접합에 적용되었으며, 지하철 신차량의 측면부재의 접합 및 선박용 부재의 접합 등에 적용시키고 있다. 대표적 용접구조용 Al재료인 6N01 및 5083합금을 마찰교반용접에 의해 접합하여 철도차량 및 선박용 광폭 형재를 제작하였고 700계 신칸센(1300mm W, 5000mm L)의 floor 판넬(6N01-T5, 4t) 및 선박판넬(5083-H112, 4t)로 공급하고 있다.¹⁹⁾ 또한 일본 스미토모에서는 경금속 허니컴 패널과 A5083-H112 선체 패널에 마찰교반접합을 적용하여 너비 250mm의 알루미늄 5000계 압출재에 마찰교반용접을 적용하여 폭 1,250mm, 길이 5,000 mm의 선체 외관 부재를 제작하여 선박에 적용하였다. 여기에서 마찰교반용접 접합부가 상,하부 평탄도가 좋은 장점을 가지고 있으므로 선박용 외관에 마찰교반용접이 적용되어 개발되었다.

우리나라의 경우 어업지도선 및 해양 경찰선과 같은 관공선을 중심으로 알루미늄선박이 증가하고 있다. Al-Mg계 합금인 5000계열은 선체의 외관으로 사용되고 있으며, Al-Mg-Si계 합금인 6000계열은 선체상부의 구조재로 사용된다. 해수와 직접 접하는 특성상 용접함에 있어 고온균열 등의 까다로운 공정이 요구되고

있다. 일반적으로 MIG나 TIG 용접법을 이용하여 용접을 시행했을 경우 고온균열 및 변형 등의 문제점이 발생한다. 이러한 문제들로 인해 이를 보완하고 개선이 가능한 알루미늄 합금에 마찰교반용접을 적용하였다.

그 동안 알루미늄은 자동차산업에서 또한 차량 경량화 소재로서 각광을 받아왔지만 철강재료에 비하여 가격이 비싸고 접촉부분의 전해 부식(Electrolytic etching 이하 전식) 등의 문제가 많이 발생하였기 때문에 용접이 불필요한 부분에 제한적으로만 사용되어져 왔다. 하지만 새로운 접합방식인 마찰교반용접을 통해 전해부식이 일어나는 문제점을 줄일 수 있었고 가공속도 또한 기존의 아크용접과 비슷한 속도로 용접할 수 있었다.

마찰교반용접 기술은 60년 가까이 된 오래된 기술임에도 불구하고, 아직 국내에서는 마찰용접기술이 신공업으로 인식되고 있을 만큼 국내 마찰용접산업은 열악한 상태이다. 향후 마찰교반용접이 국내에서도 산업적용이 늘어날 것으로 전망된다. Table 2-1는 마찰교반용접이 주로 적용되고 있는 산업분야를 표시하였다.^{20),21)}

Table 2-1 Welding processes global market

(단위: \$ Million, %)

개요 \ 년도	시장 규모					연평균 성장률(%)
	2010	2011	2012	2013	2014	
아크용접공정	7,004	7,410	7,840	8,285	8,766	5.8
용융용접공정	3,155	3,293	3,138	3,586	3,744	4.4
저항용접공정	494	503	511	519	528	1.7
마찰용접공정	562	582	603	624	646	3.6
고상용접	307	313	319	326	333	2.0
기타용접공정	244	254	264	275	286	4.0
전체(Total)	11,769	12,358	12,976	13,615	14,296	5.0%

*자료출처: BCC Research, 2010, Welding Equipment And Supplies “The Global Market” KISTI(2013) 재구성

제 2 절 재료의 기계적 특성

비행기의 동체에 쓰이는 알루미늄 합금이나 자동차의 차축으로 사용되는 강철과 같은 재료들은 사용될 때에 힘 또는 하중을 받게 된다. 이런 각 상황에서 재료들의 특성을 알고 과도한 변형이 일어나 파괴되지 않도록 각 부분을 설계하는 것이 필요하다. 재료의 기계적 거동은 부과된 하중 또는 힘과 이에 대한 응답, 즉 변형률 사이의 관계를 반영한다.

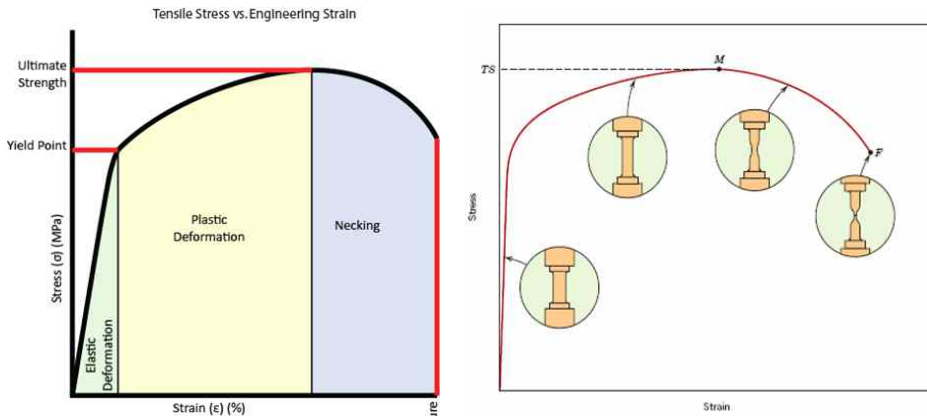


Fig. 2-6 Stress-strain curve of the material

1) 영률 (Young's modulus)

영률은 고체 역학에서 재료의 강성도(stiffness)를 나타내는 값이다. 탄성 계수는 응력과 변형도의 비율로 정의된다. 재료의 시험편에 대한 인장 또는 전단 시험으로 얻은 응력-변형도 선도의 탄성 구간 기울기로부터 탄성 계수를 결정할 수 있다. 이러한 응력과 변형률의 직선적인 관계를 나타낸 것이 훅의 법칙(Hook's Law)이다. 이러한 훅의 법칙은 응력과 변형률에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = E \epsilon \quad E : \text{elastic modulus}$$

이 때 전단 응력과 전단 변형률이 존재한다면, 후의 법칙은 다음과 같이 표현 된다.

$$\tau = G\gamma \quad G : \text{shear modulus}$$

이러한 영률은 원자 결합에 기인하는 물리적 특성이기 때문에, 물질의 원자간 결합에너지가 클수록 더 큰 값을 나타내게 된다. 예를 들어 세라믹의 영률이 금속의 영률보다 높게 측정된다.

2) 항복 강도 (Yield Strength)

항복강도는 탄성변형이 일어나는 한계응력을 말한다. 그러나 재료가 나타내는 탄성한계 또는 이 후에 일어나는 소성변형의 시작점이 어디인지를 정확히 결정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 대부분의 산업현장에서는 0.2% 소성변형까지는 과도한 영구변형이 아니라고 간주하기 때문에 이 정도의 변형을 발생시킬 수 있는 응력을 ‘항복응력’ 또는 '0.2% 오프셋(off-set)' 항복응력이라고 부른다.

3) 최대 인장강도 (Ultimate tensile strength)

인장강도(또는 최대 인장강도)는 응력-변형률 선도에서 최대응력을 최대 인장강도라고 한다. 즉, 재료가 견딜 수 있는 최대 응력을 표현하는 것이고, 그래프에서 최고점을 의미한다.

추가로 파단이 일어나는 점에서 응력을 파단강도 또는 파괴강도라 부른다.

4) 네킹 (Necking)

시편의 국부적인 부분에서 단면적이 감소하는 현상을 의미한다. 이는 연성 재료에서 흔히 발생하며, 취성 재료에서는 나타나지 않는다.

5) 공칭응력-공칭변형률과 진응력-진변형률 (Engineering stress-strain & True stress-strain)

시편의 국부적인 부분에서 단면적이 감소하는 현상을 네킹 현상이라고 하는데, 이러한 단면적 감소는 응력과 변형률을 계산할 때 고려해야 한다.²²⁾

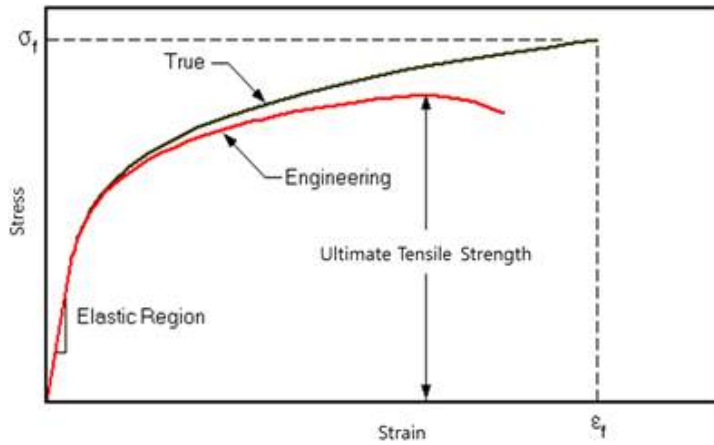


Fig. 2-7. Comparison with the normal stress-strain curve and true stress-strain curve

Table 2-2 Normal stress-strain and true stress-strain curve

	Stress	Strain
Engineering	$\sigma_e \equiv \frac{P}{A_0}$	$\epsilon_e \equiv \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$
True	$\sigma_t \equiv \frac{P}{A_i} = \sigma(1 + \epsilon_e)$	$\epsilon_t \equiv \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) = \ln(1 + \epsilon_e)$

➤ 공칭응력과 진응력 사이의 관계

시편의 변형이 발생할 때 부피의 변화가 없다고 가정하면, 다음과 같은 식을 만족한다.

$$A_0 \cdot l_0 = A_i \cdot l_i \rightarrow A_i = \frac{A_0 \cdot l_0}{l_i}$$

이를 응력에 대입하면,

$$\sigma_t \equiv \frac{P}{A_i} = \frac{P}{A_0} \left(\frac{l_i}{l_0} \right) = \frac{P}{A_0} \left(\frac{l_0}{l_0} - \frac{l_i - l_0}{l_0} \right) = \sigma_e (1 - \epsilon_e)$$

➤ 공칭변형률과 진변형률 사이의 관계

진변형률은 순간적으로 발생하는 공칭변형률의 총합과 같다.

$$\epsilon_t = \int d\epsilon$$

$d\epsilon = \frac{dl}{l}$ 를 고려하면 진변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_t = \int d\epsilon = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \epsilon_e)$$

제 3 절 포아송 비 (Poisson's ratio)

3.1 포아송 비(poisson's ratio) 이론

지구상의 대부분의 물체는 한 방향으로 힘을 가하여 압축시키거나 혹은 팽창시키면 이 방향과 수직인 나머지 두 방향으로는 물체가 반대로 늘어나거나 혹은 압축된다. 이러한 거동을 포아송 효과(Poisson's effect)라고 부르는데, 이 현상을 최초로 연구한 프랑스의 수학자 포아송(Poisson, 1781~1840)의 이름을 따서 불리게 된 것이다. 또한 힘을 가하는 방향으로의 물체의 길이 변화량에 대한 다른 두 방향으로의 포아송 효과에 의한 길이 변화량의 상대적인 비율을 포아송 비(Poisson's ratio)로 정의하고 있다. 대부분의 금속은 보통 0.3 근처의 값을 가지며 암석이나 콘크리트는 0.15~0.25 범위의 값을 가진다. 대표적인 비압축성 재료인 고무는 0.5의 값을 가진다. 포아송 비가 높다는 것은 물체가 압축이나 인장에 대한 저항력이 낮음을 의미한다. 포아송 비는 탄성계수(elastic modulus) 및 전단 탄성계수(shear elastic modulus)와 더불어 물체의 변형률(strain)과 응력(stress)사이의 상관관계를 표현하는데 사용되는 물체의 고유한 재료 물성치(material properties)이다.²³⁾

$$elong = \frac{\delta}{L} \text{ 이고 } \varepsilon_{lat} = \frac{\delta'}{r} \text{ 이면,}$$

$$\mu = - \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}}$$

μ : poisson's ratio

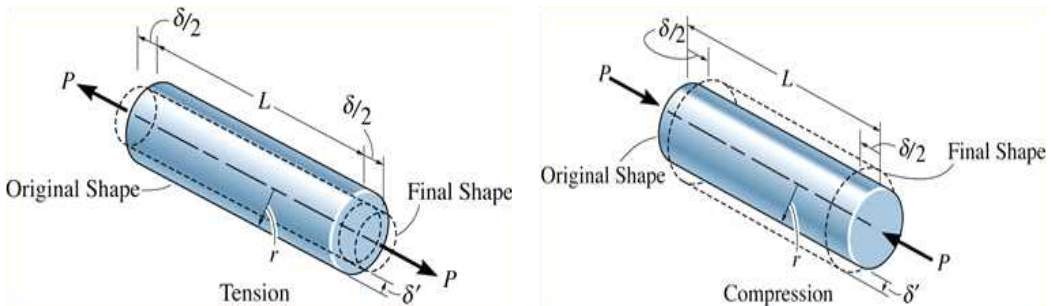


Fig. 2-8 Principle of poisson's ratio

3.2 체적변화율 (Unit volume change)

구조용 강철에 대한 탄성계수 E와 포아송 비 μ 를 알고 있으면 그 재료로 만들어진 균일단면봉의 인장 하에서의 치수와 체적의 변화를 계산할 수 있다. 즉, 변형 전에 그 봉의 길이가 L, 단면적이 A 였다면, 그 체적은 $V=AL$ 이었을 것이며, 체적변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{Al\epsilon(1-2\mu)}{Al} = \epsilon(1-2\mu) \quad (1)$$

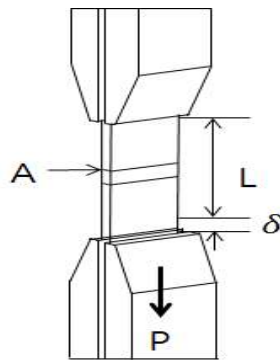


Fig. 2-9 Test of tension members

단위 길이 L에 대한 변형률은 변형률 T(두께)에 대하여 포아송의 비를 나타낼 수 있으며 변형률은 전체 길이에 대하여 길이의 변형값 으로 폭에 대한 두께의 변형값을 나눴을 때 체적변화율은 다음 식(2),(3) 같이 주어진다.

$$\nu = -\frac{\epsilon_T}{\epsilon_t} = -\frac{\delta_t/b}{\delta_l/l} = \frac{\delta_t/b}{L+\delta} \quad (2)$$

$$\nu = L \cdot b \cdot t \quad \nu = L \cdot b' \cdot t' \quad (3)$$

$\frac{\nu'}{\nu}$ = 체적 변화율 $\nu - \nu' = \Delta\nu$

제 4 절 적외선 열화상(Infrared thermography) 기술

4.1 적외선

적외선의 파장은 0.74~1000 μm 정도로 우리 눈에 보이는 가시광선 파장보다 조금 길고 더 낮은 에너지를 갖는다. 하지만 이 주파수가 물질들의 고유 진동수와 거의 비슷하기 때문에 적외선을 받으면 표면의 분자들을 운동시켜 열을 가지게 되며, 반대로 분자의 움직임에 의해 외부로 적외선이 방출되기도 한다.

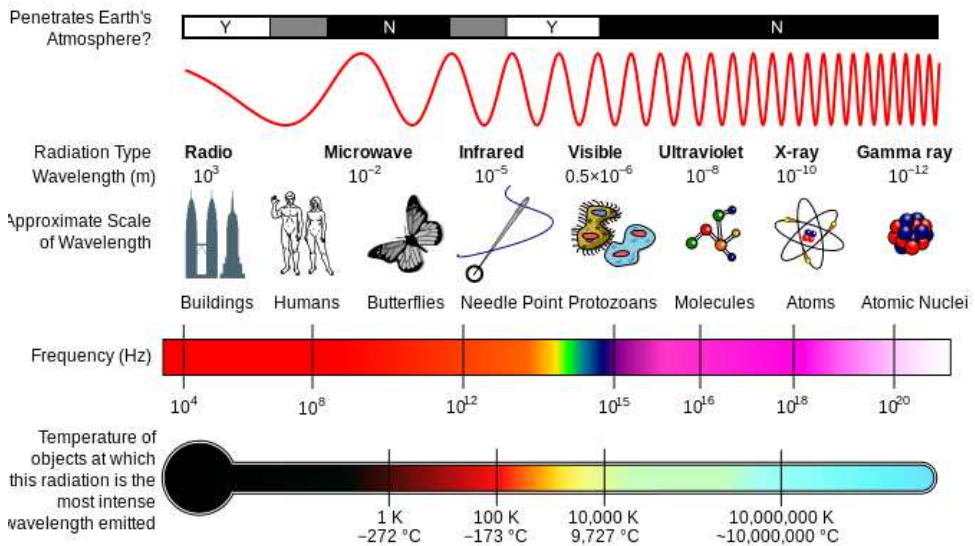


Fig. 2-10 Spectrum of electronic wave

전자기파란 Fig. 2-10에 보여주는 바와 같이 사람이 들을 수 있는 매우 낮은 주파수의 음파에서부터 시작하여 초음파 영역, 라디오, 텔레비전, 휴대폰, 레이더에서 사용하는 라디오파 영역, 적외선 영역, 가시광선 영역, 자외선 영역, X-선 영역, 그리고 우주선 영역 등의 매우 광범위한 영역을 지칭한다. 사람이 볼 수 있는 전자기파의 영역은 가시광선 영역인데, 이는 전자기파의 영역에서 볼 때 매우 좁은 영역에 불과하다.²⁴⁾

4.2 적외선과 온도

적외선과 온도와와의 관계를 알기 위해서는 흑체의 적외선 방사현상을 이야기할 수 있다. 적외선 방사는 1800년대 초 영국의 윌리엄 허셸(Wililam Herschel)에 의해 태양광의 분광 시험 중 적색 부분보다 파장이 긴 부분이 있으며, 인체에 온열효과를 가져오는 파장을 발견하였다. 이 물리 현상은 1890~1900년대 초 플랑크(N.Plank)에 의해 적외선과 파장에 온도를 이용한다는 ‘흑체이론’이라는 이론이 완성되어 적외선을 이용한 온도 측정이 가능하게 되어 체계적으로 이론이 정립되었다. 흑체란, 빛이 흑체 내부로 유입되면 다시는 밖으로 나오지 않아 결국 흑체 내부에서 완전히 흡수됨을 뜻하는 것으로 다른 말로 풀이하면 ‘흑체에 열을 가하면 이 열은 모두 흑체에 흡수되어 흡수된 열은 적외선이라는 형태로 손실 없이 나온다는 것’을 뜻한다.

흑체와 온도의 관계는 Fig. 2-11와 같다. 가로축은 파장(Wavelength)을 나타내며, 세로축은 적외선 복사량을 나타낸다. 즉, 온도가 올라가면 적외선이 나오는 파장의 최대값은 가시광 쪽으로 이동하고 보다 많은 양의 적외선이 나오며, 온도가 낮을수록 파장의 최대값은 긴 파장 쪽으로 이동하며 나오는 적외선의 양도 작아지는 것을 의미한다. 300K(27℃)인 상온에서는 파장의 최대값이 10 μm 근처이며, 500K(223℃)의 온도에서는 5 μm 근처에서 최대값을 가진다.²⁵⁾

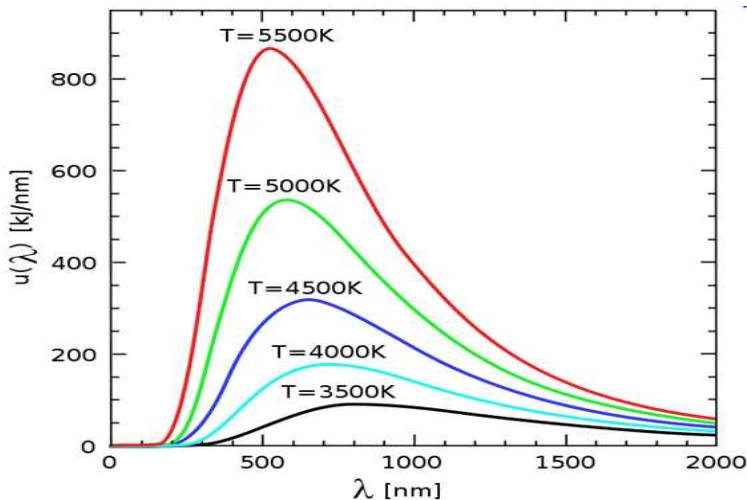


Fig. 2-11 Relation between blackbody and temperature

4.3 적외선의 특징

2.3.1 적외선 가열 (Infrared Heating)

적외선은 전자파의 형태로 에너지를 전달시킬 때 중간에 전달을 위한 물체를 필요로 하지 않기 때문에 에너지를 전달하는 과정에서는 열 손실이 없다. 이와 같이 열의 이동이 직접적이고 손실이 없기 때문에 피사체를 가열시키는데 여러 가지 이점이 있으며 적외선으로 통상 물체의 가열은 그 물체의 표면에만 적용하는 단점이 있다. 즉 적외선 가열은 넓은 표면적의 얇은 물체를 가열하는 것이 적당하다.

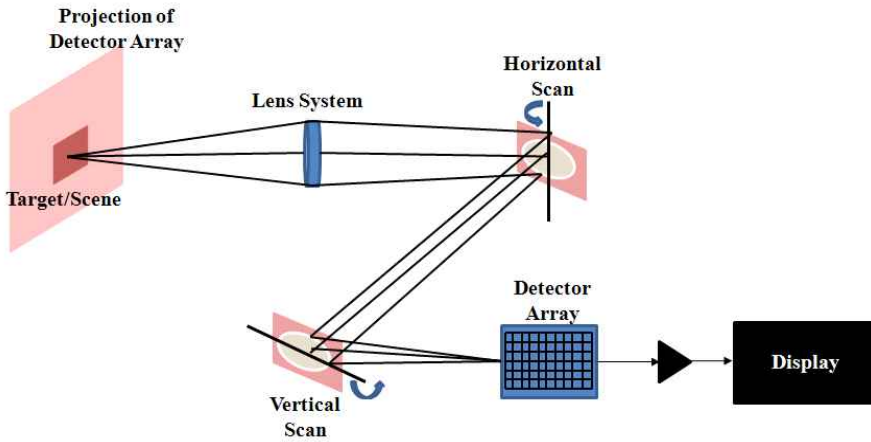
2.3.2 열 방사 (Thermal radiation)

물질을 구성하는 입자(원자, 분자, 이온)의 집단이 열에 의해 가열할 때 그 결과 전파를 방출하는 현상이다. 이 현상은 고온일수록 현저하며 상온 및 저온에서도 물체가 절대온도($^{\circ}\text{K}$)이상의 온도에서는 반드시 일어나며, 또한 태양 등 천체로부터 방사는 대부분이 열방사이다.

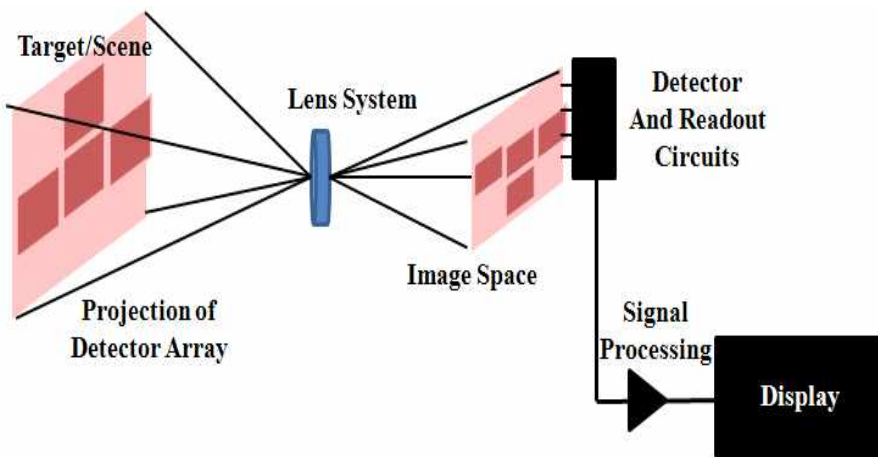
2.3.3 완전 방사체 (Full radiator)

물체에 입사하는 방사의 파장, 입사하는 방향, 편광 등에 관계없이 입사된 방사를 전부 흡수하는 물체를 말한다. 또한 어떤 온도의 전파장 영역에 있어서 최대 열 방사를 하는 방사체를 흑체(Blackbody) 및 플랑크(Plank)방사체라고 한다. 하지만 현실적으로 완전흑체는 존재하지 않으며 다만 이 상태에 근접하는 방사체를 보통 흑체라 하여 완전 방사체로 규정하고 있다.

2.4 적외선 영상 시스템의 원리



(a) scanning type-Serial scanning



(b) Staring type

Fig. 2-12 Detection principle of IRT

어떤 물체의 형태를 인식하고자 하려면 사람의 눈을 생각하면 쉽게 이해가 된다. 눈으로 넓은 영역을 보려면 얼굴을 돌리거나 눈알을 굴리면서 전체를 인식한다. 여기에서 눈은 적외선 센서에 해당하며, 눈알을 굴리는 것은 적외선 광학계에 해당한다. 그리고 얼굴은 적외선 영상 시스템 전체를 의미한다. 이와 같은

원리를 응용하여 두 가지 방법의 광학계를 이용하여 영상을 획득한다. 먼저 Fig. 2-12 (a)과 같은 수평, 수직 거울을 돌리면서 전체를 인식하는 주사 방법(scanning type-Serial scanning)과 (b)과 같이 수평, 수직 거울 없이 인식하는 주시 방법(staring type)이 있다. 주사 방법(scanning type-Serial scanning)은 모니터에 나오는 물체를 실시간으로 보고자 하면 수평, 수직 거울을 고속으로 움직이도록 해야 한다. 왜냐하면 모니터의 주사선을 250선으로 보고, 영상을 무리 없이 보고자 하면 초당 24 frame은 되어야 하므로, 기본적으로 세로축으로는 24×250 에 의해 초당 6000번을 움직여야 한다. 그리고 가로축도 같은 비율로 움직여야 하므로 세로축은 6000×250 에 의해 약 1 MHz 이상의 주기로 움직여야 한다는 결론에 도달한다. 거울이 이렇게 빨리 움직이려면 구동 부분이 특수 설계로 이루어져야 한다. 보통의 평면거울로는 이 속도를 도저히 낼 수 없기 때문에 8각형 또는 그 이상의 각을 이룬 거울을 사용한다. 이 방법의 장점은 주사하면서 신호를 증폭하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있는 것과 센서의 소자 개수가 작아도 된다는 것이다. 그러나 광학계의 복잡성 때문에 시스템 자체의 크기와 무게 때문에 이 방법보다는 주시 방법으로 기술이 옮겨가고 있다.

주시(staring)방법은 주사 방법과는 달리 거울이 없는 대신에 센서의 소자 하나 하나가 모니터의 한 Pixel에 해당하도록 설계되어 있다. 그러므로 센서의 소자 개수가 많으면 많을수록 화면에 나타나는 화질은 그만큼 향상되며, 복잡한 광학계가 없기 때문에 크기 및 무게에서 많은 이점을 갖고 있다. 주시 방법에 사용되는 적외선 센서는 256×256 이상의 이차원 배열을 갖는 소자가 필요하며, 현재 센서의 재료에 따라 다르지만, PtSi를 사용한 경우 1024×1024 배열을 갖는 센서가 개발되어 실용화되었으며, 가장 성능이 우수한 HgCdTe 반도체형 센서인 경우 512×512 배열까지 개발되어 있다. 주사 및 주시 방법으로 광학계에서 센서에 적외선을 집속시켜 주면 센서는 적외선과 반응하여 전압 또는 전류를 발생시킨다. 그런데 센서의 소자 개수가 많아지게 되면 소자 각각의 특성들이 일정하지 않기 때문에 신호처리기에서는 각 소자의 신호 크기를 보상해 주거나 반응을 하지 않는 소자의 신호도 보상해 주어 모니터에 깨끗한 영상이 구현되도록 해야 한다. 이러한 역할의 내용을 Fig. 2-12에 나타내었다. 첫 번째 그림은 각 소자의 특성들이 서로 다른 특성을 갖고 있음을 나타내고 있다, 주위 온도에 변화에 대해 반응하는 정도와 기준점인 offset이 모두 다르다.

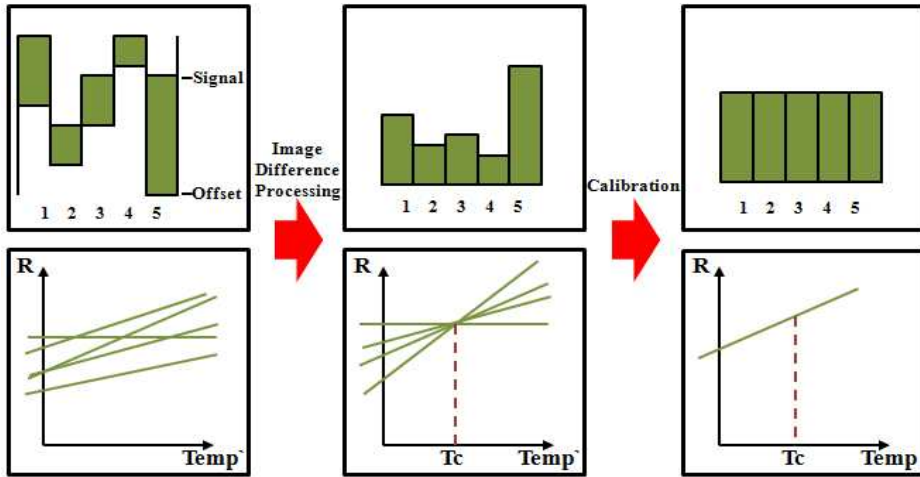


Fig. 2-13 Temperature calibration

이것을 두 번째 그림에서 기준점인 offset을 모두 맞추고, 세 번째 그림에서처럼 소자의 특성을 모두 균일하게 맞추어 주면, 온도변화에 대한 반응 정도가 모두 동일하게 나타나게 되어 깨끗한 상을 얻을 수 있는 것이다. 적외선 열화상 기법에서의 결함은 적외선 이미지에서 결함이 차지하고 있는 화소수(Pixel)로 크기를 대략적으로 추정할 수 있다. 일반적으로 결함의 크기측정을 위해서는 먼저 지시자를 이용하여 적외선 열화상 카메라의 화각에 따라 단위 화소에 대응하는 실제 길이를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기(mm) D 는 식 (2.5)과 같이 표현된다.

$$D = M \times \left(\frac{L}{P}\right) \quad (2.5)$$

여기에서, L 은 지시자(Calibrator)의 길이(mm), P 는 지시자의 길이에 대응하는 화소수(Pixel), M 은 결함이 차지하는 화소수(Pixel)이다.²⁶⁾

제 3 장 실험장치 및 실험방법

제 1 절 시험편

3.1 알루미늄 합금의 특성

알루미늄 합금은 강재에 비해 1/3의 밀도를 가지고 있다. 때문에 항공우주산업 외에 일반 공업용 차량, 토목, 건축, 조선, 화학 및 식품 등 많은 공업 분야에 널리 사용된다. 알루미늄은 pH 4.5 ~ 8.5 의 환경에서 산화 피막이 모재를 보호하기 때문에 내식성은 우수하지만 이온화 경향이 크기 때문에 대기중의 산소와 반응하여 쉽게 부식되며, 녹는점이 강재에 비해 낮으므로 열에 민감하다는 특성을 가지고 있다. 또한 순수 알루미늄은 강도가 낮기 때문에 각종 원소 (Mn, Si, Mg, Cu, Zn, Cr 등)를 첨가하여 강도를 향상하여 사용된다. Table 2-3은 합금원소별 알루미늄에 미치는 영향에 관련하여 나타내었다.

Table 2-3 Effect of the aluminum alloy element

원소	원소의 영향
Si	<ul style="list-style-type: none"> - 유동성을 좋게 하고 얇은 주물의 생산에 적합한 원소 - 외부수축 및 열간 취성을 감소시키며 열팽창계수를 적게함 - 용접성은 개선되지만 절삭성은 나빠지며 강도를 증가
Cu	<ul style="list-style-type: none"> - 열처리 유, 무에 관계없이 강도, 경도를 증가 - 내부수축을 감소시키며 절삭성을 개선함 - 유동성을 나쁘게 하고 열간 취성을 일으키기 쉬움 - 0.3~1.0% 함유 시 내식성이 나빠지며 1.1% 이상 시 경도향상이 현저함
Mg	<ul style="list-style-type: none"> - Si와 공존하면 열처리에 의해 Mg₂Si가 석출되어 강도 향상이 현저하다 - Mg단독으로도 강도와 신율이 증가함 - 내식성, 절삭성은 향상되지만 드로스가 생기기 쉬워 유동성이 나빠짐
Ti	<ul style="list-style-type: none"> - 결정립 미세화를 위해 0.05~0.2% 첨가하며 보론이 공존하면 미세화효과가 큼 - 기계적 성질, 특히 신율을 개선하며 열전도성이 나빠짐
Fe	<ul style="list-style-type: none"> - 금형 소착 및 제품 굽힘 개선원소로 유효 - 미세한 침상정의 Al₃Fe로써 정출 - Al-Fe-Si로써 정출하므로 과잉의 Fe는 강도저하의 원인
Mn	<ul style="list-style-type: none"> - 소량이면 고용되어 강도를 향상시킴 - Fe의 출입에 의한 악영향을 개선하고 소착을 감소시킴 - Al-Mg계에서는 내식성 향상 원소로 사용됨 - ALDC 6종에서는 Fe에 의한 내식성 저하 억제원소로 첨가

*자료출처: 자동차부품산업진흥재단

3.2 마찰교반용접 시험편

3.2.1 재료 및 시험편

본 실험에서 사용된 알루미늄 재료는 길이 150 mm, 두께 6 mm의 Al6061 판재이다. 화학적 조성은 Table 3-2와 같으며 항복점(yielding point)과 인장응력(tensile stress)의 값은 각각 $\sigma_y = 274$ MPa와 $\sigma_r = 322$ MPa 이며, 연신율(elongation)은 16.63 % 이고 비커스경도는 112 Hv이다. 이를 Table 3-3에 나타내었다.

Table 3-2 Mechanical composition of Al6061-T6

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.65	0.4	0.23	0.07	1.0	0.16	0.03	0.02

Table 3-3 Mechanical properties of Al6061-T6

Tensile Strength [Mpa]	Yield Strength [Mpa]	Elongation [%]	Hardness [Hv]
340	295	13.5	112

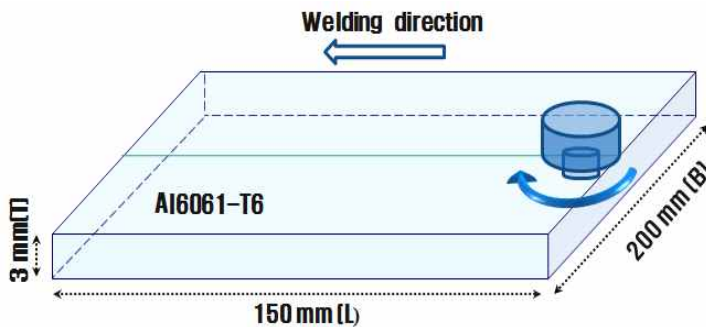


Fig. 3-1 FSW specimen of Al6061-T6

압연방향을 용접 진행 방향으로 하여 마찰교반용접을 수행하였으며 공구의 회전방향은 시계방향(CW)이며, tool의 회전수는 각각 800, 1200, 1600 rpm을 사용하였다. 이송 속도는 3 mm/s로 각각 동일하게 주었으며 Z축 깊이는 3.15 mm이다. Fig. 3-2와 Fig. 3-3은 용접된 부재로부터 인장시험편을 채취한 모식도와 실제 실험을 위해 제작된 인장시험편 모습이다.

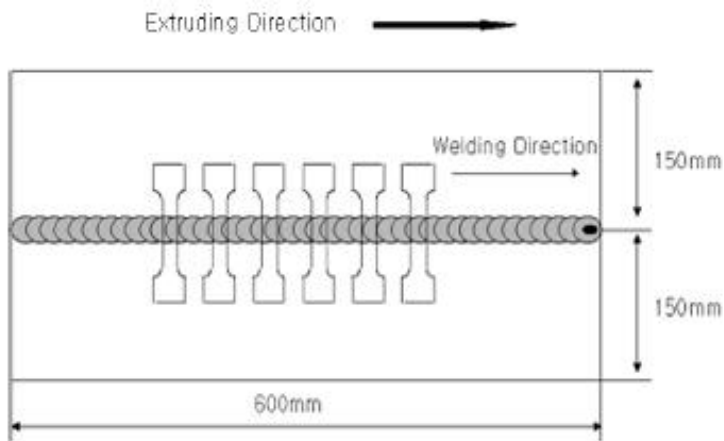


Fig. 3-2 Schematic diagram of the tensile specimens

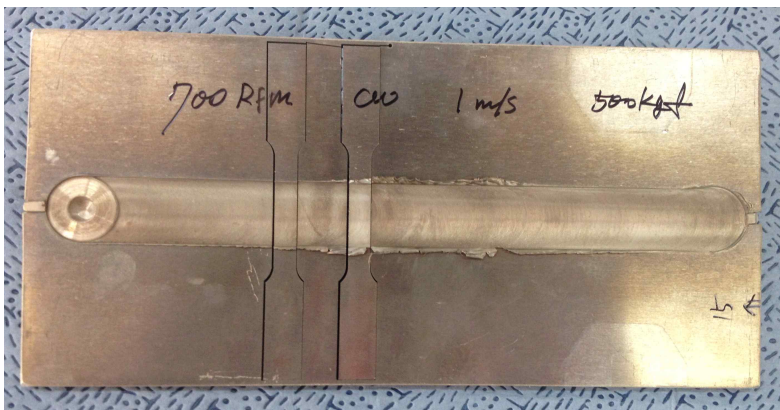


Fig. 3-3 Welding specimen of FSW

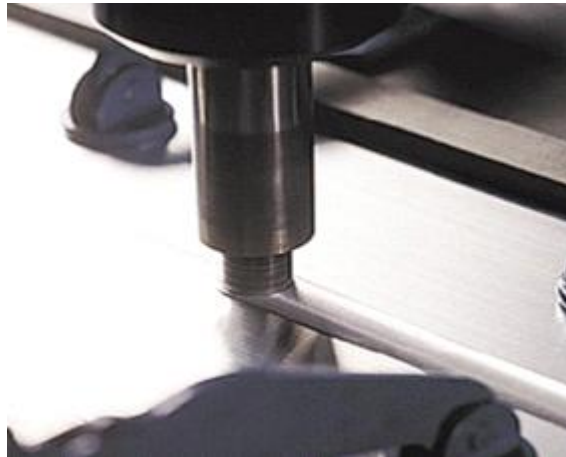


Fig. 3-4 Welding process of FSW

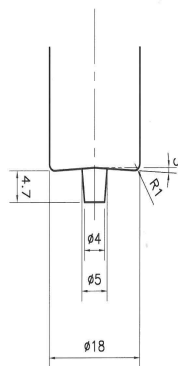





Fig. 3-5 Shape and CAD drawing of FSW tool

Fig 3-4는 알루미늄 판재에 tool의 회전속도별로 마찰용접을 진행한 후 나타난 비드의 형상이다.

Table 3-4 Welding bead geometry of FSW welding specimen according to FSW rotation speed

Rotation speed [RPM]	Welding bead geometry
800	
1200	
1600	

알루미늄 판재를 맞대기 마찰교반용접을 시행 후 ASTM E8M-04 규격의 인장 시험편으로 Fig. 3-6과 같이 제작하였다. Fig. 3-7은 회전속도별로 마찰교반용접을 진행한 알루미늄 판재의 모습을 나타내고 있다.

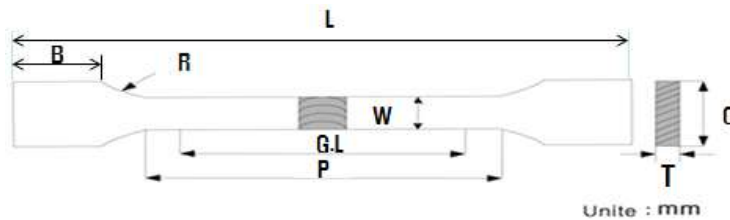
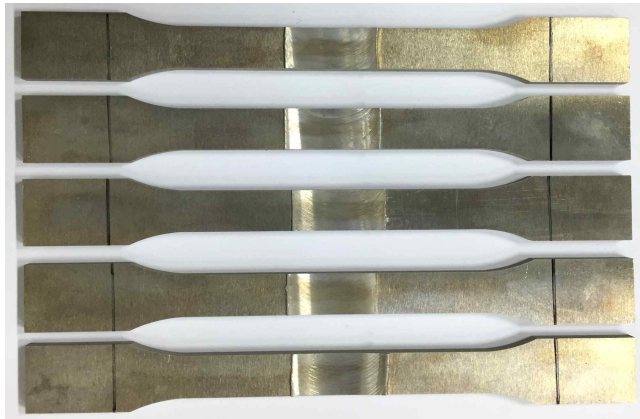


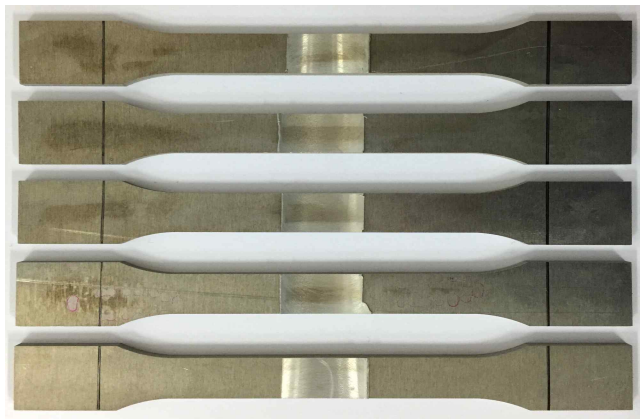
Fig. 3-6 Tensile test specimen of Al6061-T6

Table 3-5 Dimension of tensile test specimen

Standard	L	W	G.L	P	R	T	B	C
ASTM E8M-04	120 mm	12.5 mm	50 mm	60 mm	20 mm	3 mm	20 mm	20 mm



(a) 800 rpm



(b) 1200 rpm



(c) 1600 rpm

Fig. 3-7 FSW specimen according to rotation speed of FSW tool

제 2 절 실험장치

2.1 인장시험기 (MTS System)

본 연구에서 파단부의 온도 및 상태 거동을 확인하기 위해 알루미늄(A16061) 시험편에 인장력을 가하기 위한 인장시험기(MTS Co.)를 Fig. 3-8과 같이 사용하였다. 인장시험기는 미국 MTS 사의 MTS Landmark Servohydraulic Test Systems 을 사용하였으며, H/W controller, S/W controller, PC, servo-valve controller, MTS Cooling System으로 이루어져 있다. Table. 3-6은 인장시험기의 제원이다.



Fig. 3-8 Device configuration of MTS System

Table 3-6 Specification of MTS System

Description	Technical data
Force capacity	100 kN (Monotonic: 120 kN)
Available actuator ratings	25 kN
Dynamic stroke	100 mm
Output voltage	±10 V (full scale)
Excitation frequency	10 kHz (±100 mm)
Data sampling rate	122.88 kHz

2.2 적외선 열화상 카메라 (Infrared Thermography)

인장 시험기를 이용하여 시험편에 인장하중을 인가하는 동시에 적외선 열화상 카메라를 이용하여 인장 하중을 받아 파단이 되기까지의 시험편의 표면온도 변화를 측정하였다. 본 실험에 사용된 적외선 열화상 카메라는 프랑스 FLIR systems사의 silver480 모델을 사용하였고, 세부사양은 Table 3-7에 나타내었다.



Fig. 3-9 Infrared thermography system

Table 3-7 Specification of infrared thermography system

Description	Technical data
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	내장 스텐링 쿨러(Stirling)
Spectral Response	3.7~5.0 um
Number of Pixels	320 * 256
Pitch	30 um*30 um
NETD	25mK@25°C (20 mK typical)
Temperature measure range	-15~2000°C
Frame rate	5 Hz~380(400) Hz
Frame rate resolution	1 Hz Step

2.3 CCD(Charge coupled device) 카메라

인장시험기(MTS Co.)를 이용하여 마찰교반용접 시험편에 인장을 가할 때 체적변화를 관찰하기 위하여 근거리를 측정하기 위해 CCD 카메라를 이용하였다.

CCD 카메라를 통해 시험편의 이미지를 받아드리면 이때는 픽셀 값으로 나타낼 수 있는데 이를 실제 길이로 환산하여 인장시험을 통한 체적변화를 관찰할 수 있다. 본 실험에서는 각 회전속도별로 마찰교반용접된 시험편을 이용하여 인장시험을 진행하였을 때 인장속도별 체적변화의 관계를 관찰해보고자 하였다. Table 3-8은 CCD 카메라의 세부 사항을 보여주고 있다.

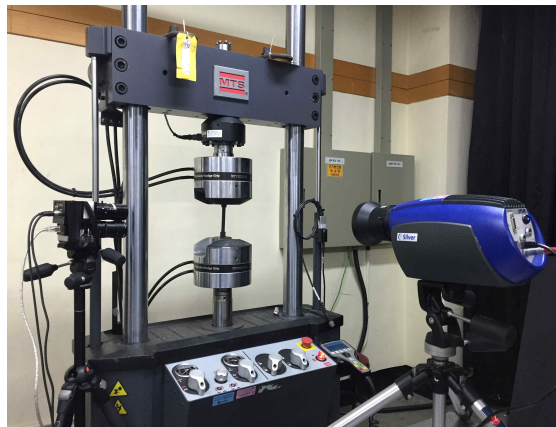


Fig. 3-10 Measurement of volume by CCD Camera

Table 3-8 Specification of CCD Camera

Description	Technical data
Resolution	1392 × 1040
Sensor Type	Sony ICX267AL/AK, progressive scan CCD
Sensor Optical Size	1/2 "
pixel size (μm)	4.65 × 4.65
Frame Rate at Full Resolution	18.7 fps
Video Output Type	IEEE 1394a

제 3 절 실험방법

각 800, 1200, 1600 rpm의 속도로 마찰교반용접된 Al6061 인장시험편을 파단에 이르도록 인장 속도별로 인장실험을 진행 할 경우, 용접조건별 시험편에 따라 파단부에서 발생하는 온도 변화를 측정하여 비교하였다.

마찰교반용접된 시험편이 파단에 이르기까지 조건별로 동일한 1, 3, 5 mm/min의 인장속도로 시험편에 인장하중을 인가하기 위해 MTS 사의 인장시험기 MTS793을 이용하였다. 또한 시험편의 파단부 온도를 측정하기 위한 적외선 열화상 검출기로 FLIR사의 상용 제품인 SC5500 모델을 사용하였다.

적외선 열화상 검출 온도 실험 시 인장시험편의 빛의 반사를 방지하기 위해 방사페인트(KRYLON 4290 Ultra Flat Black)를 도포하여 시험편의 방사율을 임의로 최대 0.97을 유지시켰다. 시스템의 주변 온도는 15°C로 일정하게 유지하여 실험을 수행하였다.

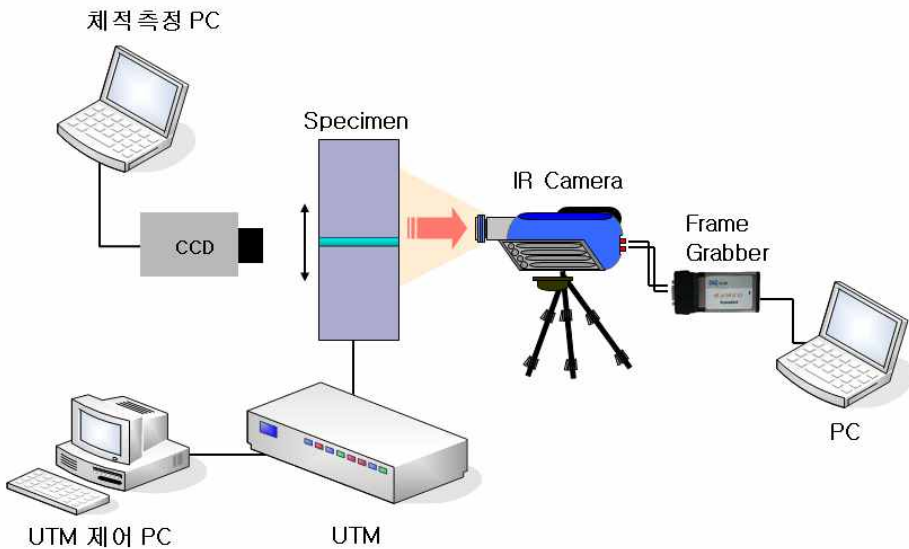


Fig. 3-11 Experimental setup

제 4 장 실험결과

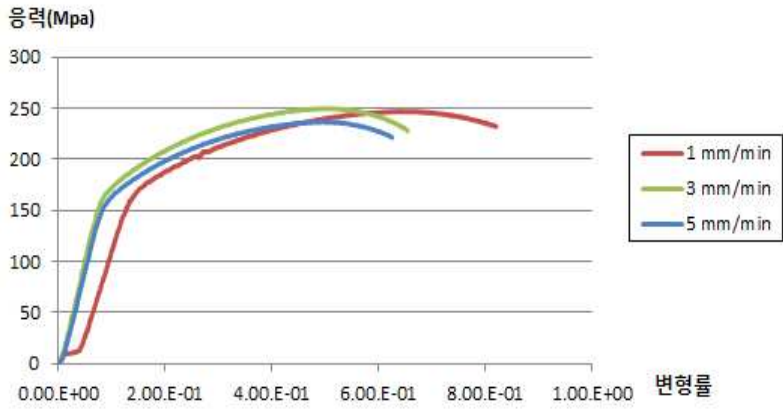
제 1 절 인장시험을 통한 강도 평가

4.1 응력-변형률 선도

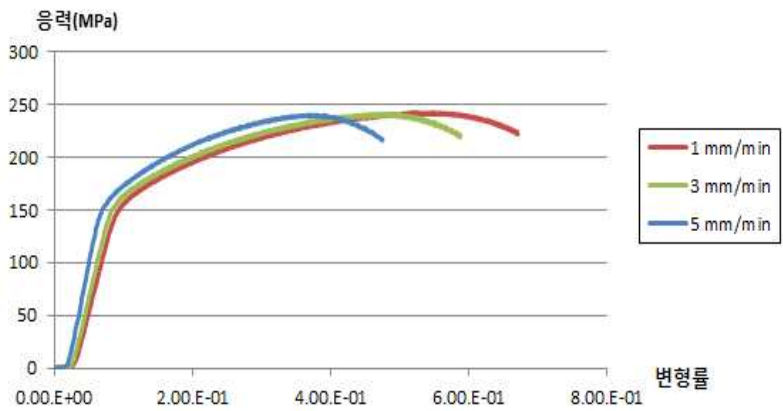
인장시험기(MTS Co.)에 의해 조건별로 마찰교반용접된 시험편에 서서히 인장력을 가하여 파단이 될 때 까지 응력-변형률 선도에 대하여 나타내었다. Al6061 재료에서 항복 강도는 앞서 말한 이론에서 ‘오프셋 방법’을 통해 정할 수 있는데, 이는 선형 구간과 같은 기울기를 갖는 직선을 가로좌표의 어느 특정한 점 (0.2 %)을 지나게 할 때 생기는 응력-변형도 선도와의 교점으로 항복 강도를 정하는 방법이다. 이를 통하여 마찰교반용접 Al6061 시험편에 대한 재료의 특성을 나타내었다. Fig. 4-1은 용접 속도별로 비교한 응력-변형도 그래프이며 Table 4-1은 실험을 통해 얻은 항복강도와 인장강도 및 파단강도 결과값을 나타내었다.

Table 4-1 Result of tensile test

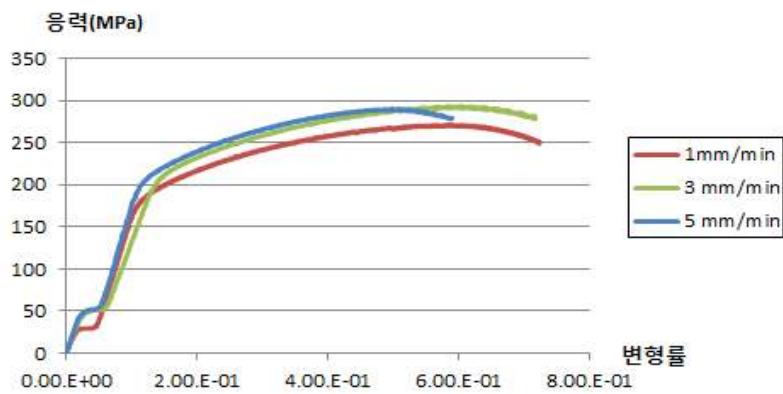
마찰교반용접 속도 (rpm)	인장속도 (mm/min)	항복강도 (MPa)	인장강도 (kgf/mm ²)	파단강도 (kgf/mm ²)
800	1	184.2649	236.0627	217.4668
	3	182.7409	237.0199	221.5601
	5	176.1491	238.4855	232.2955
1200	1	174.5733	240.4071	218.7982
	3	172.4988	241.5225	221.2681
	5	169.7971	242.7131	222.4887
1600	1	189.3134	271.1928	248.9735
	3	188.4268	293.3802	277.8345
	5	183.4890	290.3581	280.317



(a) 800



(b) 1200



(c) 1600

Fig. 4-1 Result of tensile test

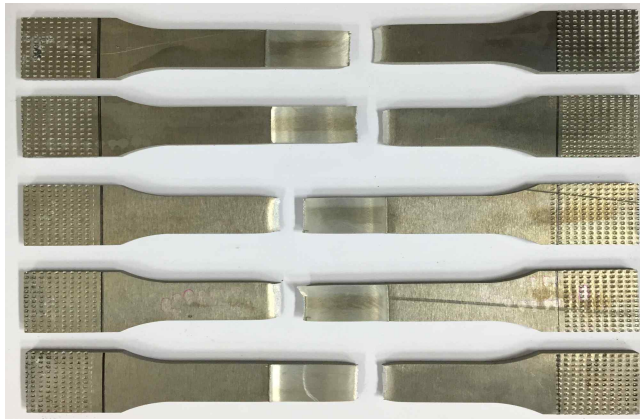
제 2 절 적외선 열화상을 이용한 파단부 온도변화 측정

2.1 인장속도별 파단부 온도변화 측정

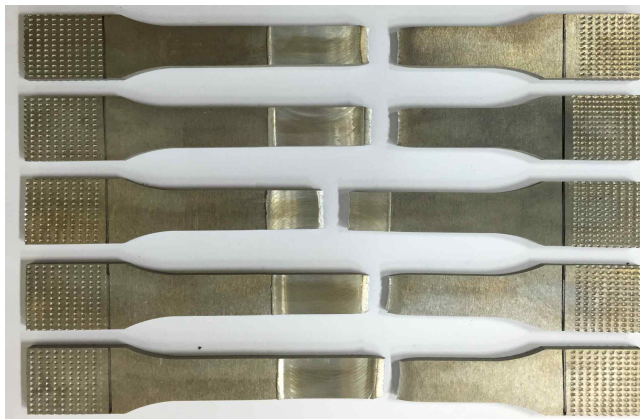
파단실험을 위해 인장시험기(MTS)를 통해 마찰교반용접 시험편의 상단부와 하단부를 지그로 고정시킨 뒤 y축 방향인 아래 방향으로 인장조건별로 마찰교반용접 시험편에 인장력을 가하였다. 하중을 받는 물체는 변형이 됨과 동시에 일부 에너지를 적외선 에너지로 방사하고, 이 방사된 적외선은 이에 상응하는 응력으로 환산 가능하다는 이론을 토대로, 인장시험을 진행하였을 때 응력이 가장 높은 부분(노치, 크랙) 즉, 용접시험편이 파단된 부분의 온도 값을 적외선 열화상 검출기를 이용하여 실시간으로 관찰하였다.

이를 통해 마찰교반용접 시험편이 파단에 이르기까지의 파단부 및 파단부 주변에서 발생하는 표면 온도 영상을 Fig. 4-3을 통해 마찰교반용접된 Al6061 용접 시험편에 1 mm/min, 3 mm/min, 5 mm/min 속도로 인장시켜 시험편의 파단부 온도 결과를 확인하였다.

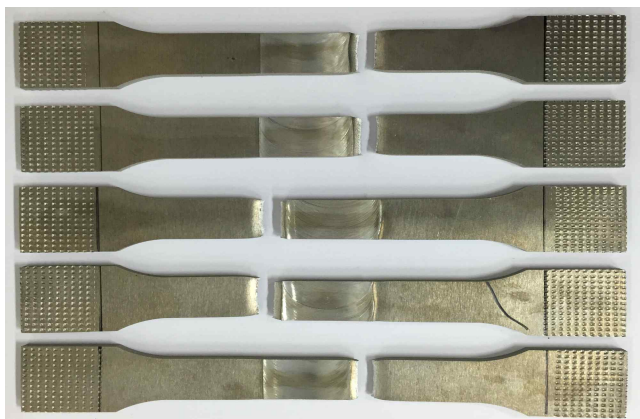
시험편에 인가된 인장 속도가 빠를수록 적외선 열화상 이미지를 통한 시험편의 파단부의 온도가 증가함을 확인할 수 있었으며, 파단부 뿐만 아니라 파단부 주변 온도 또한 변화가 있음을 확인할 수 있었다. 마찰교반용접 조건으로 인한 단면적의 감소의 차이로 인해 용접부와 모재부에 응력이 집중되는 현상의 차이가 발생하고, 그에 따라 용접부 보다 모재부 영역에서 온도가 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 800 rpm

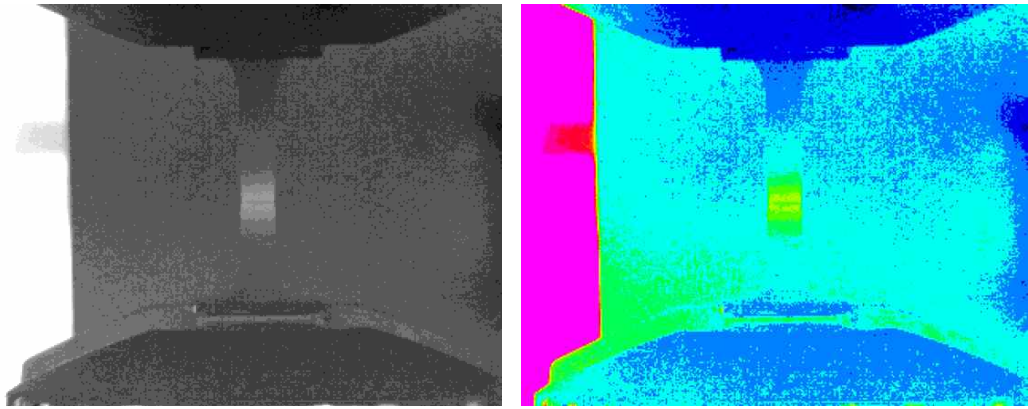


(b) 1200 rpm

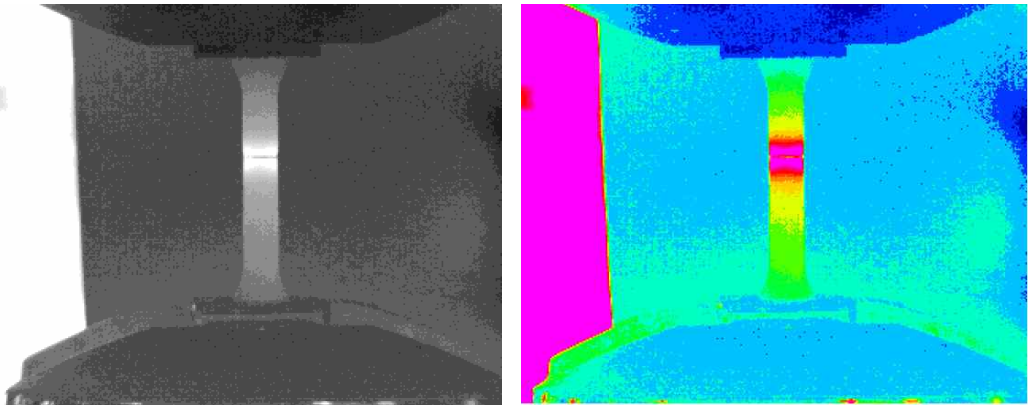


(c) 1600 rpm

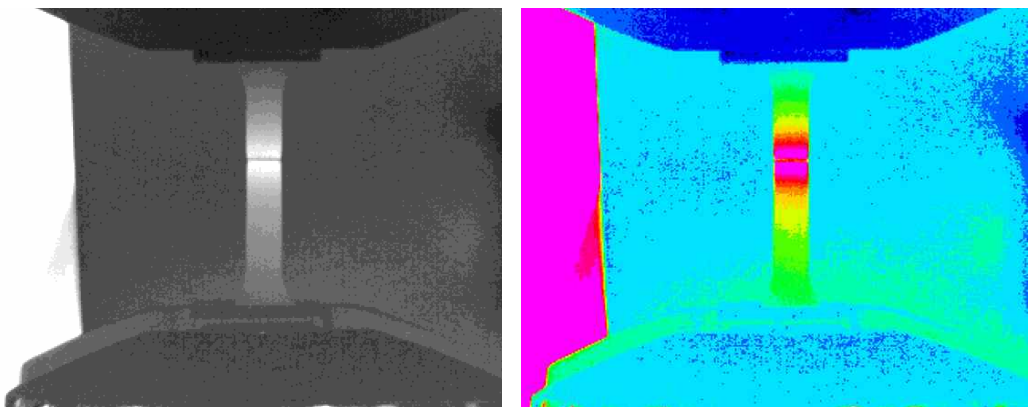
Fig. 4-2 FSW specimen according to tensile load test



(a) 1 mm/min

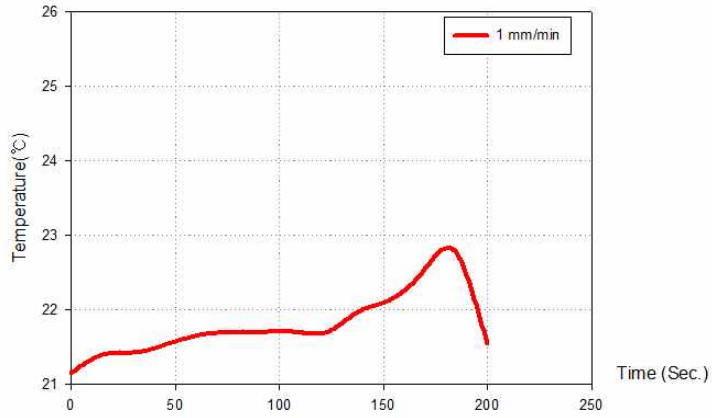


(b) 3 mm/min

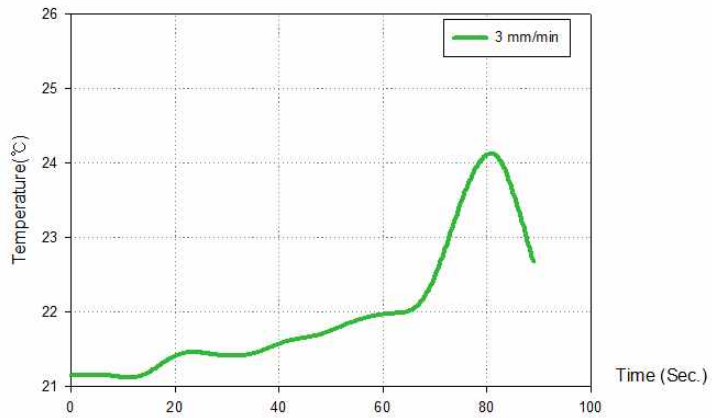


(c) 5 mm/min

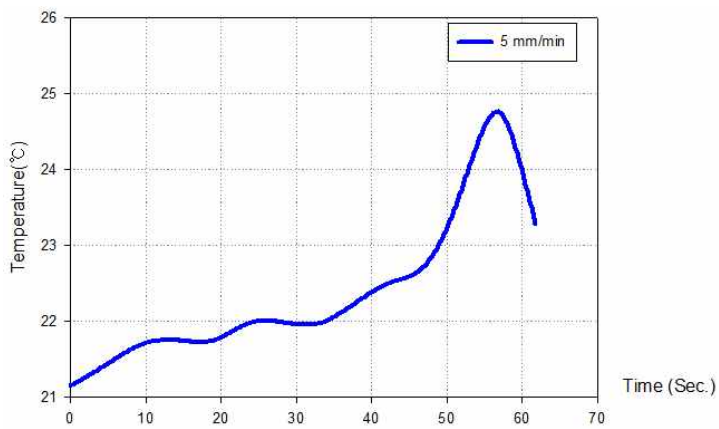
Fig. 4-3 Temperature measurement of rotation speed 800 rpm



(a) 1 mm/min

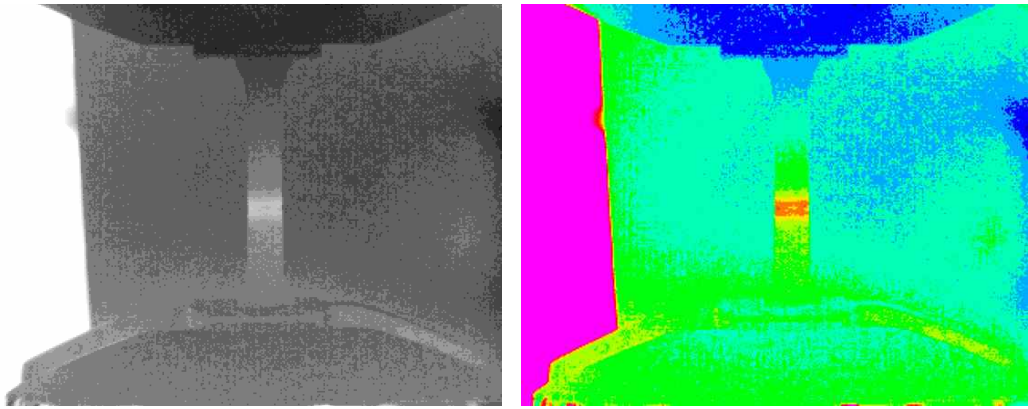


(b) 3 mm/min

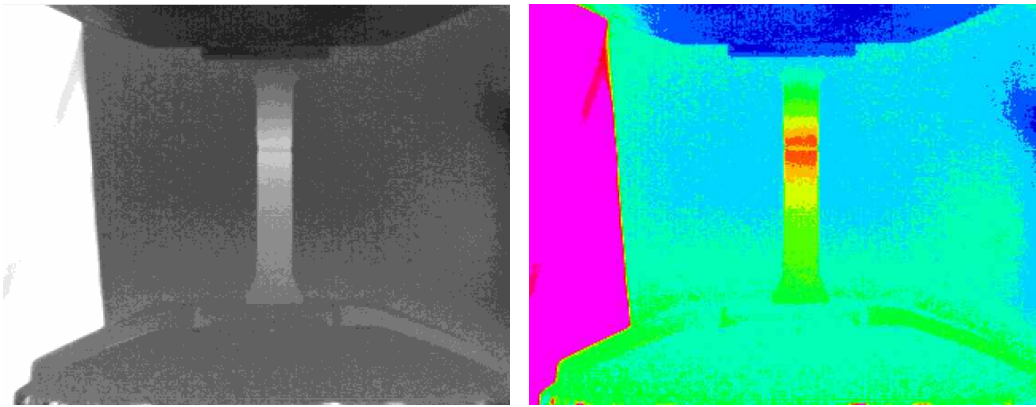


(c) 5 mm/min

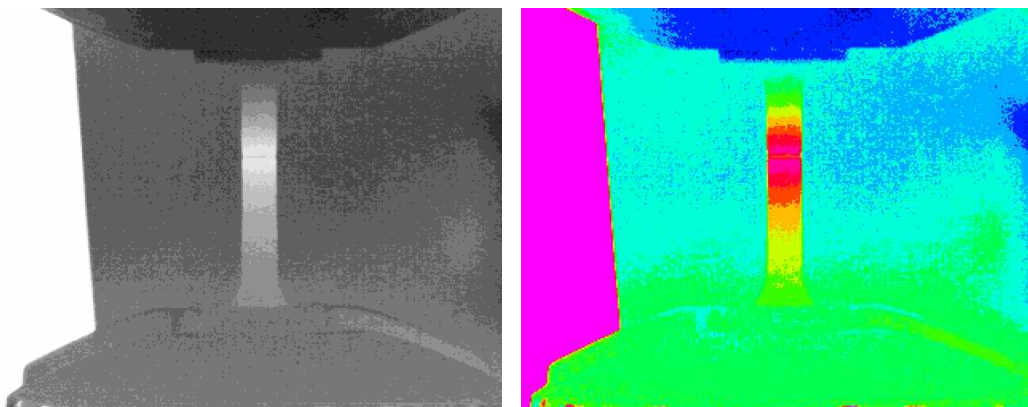
Fig. 4-4 Fracture field temperature graph of rotation speed 800 rpm



(a) 1 mm/min

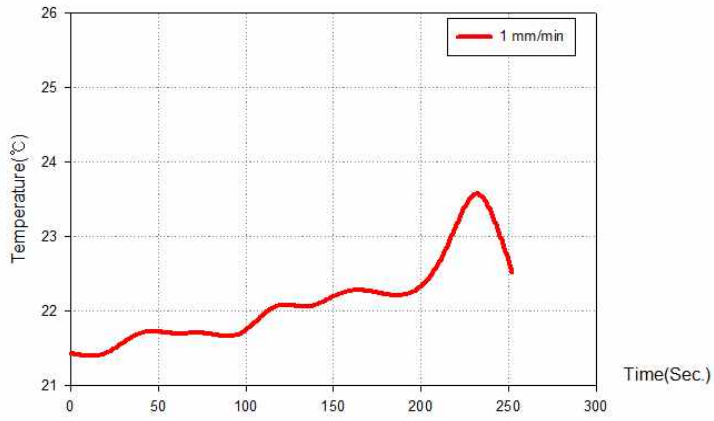


(b) 3 mm/min

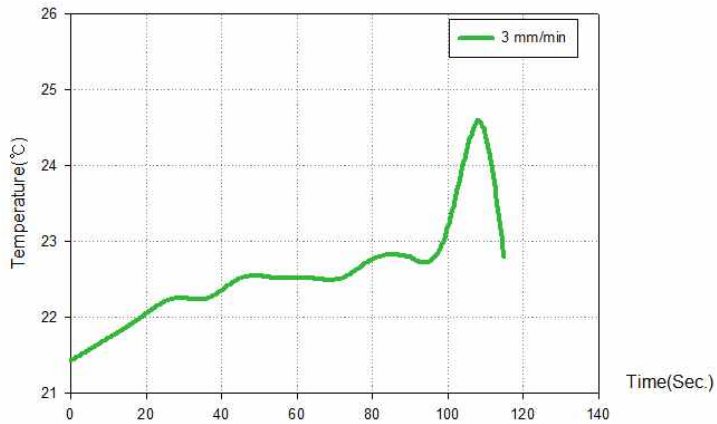


(c) 5 mm/min

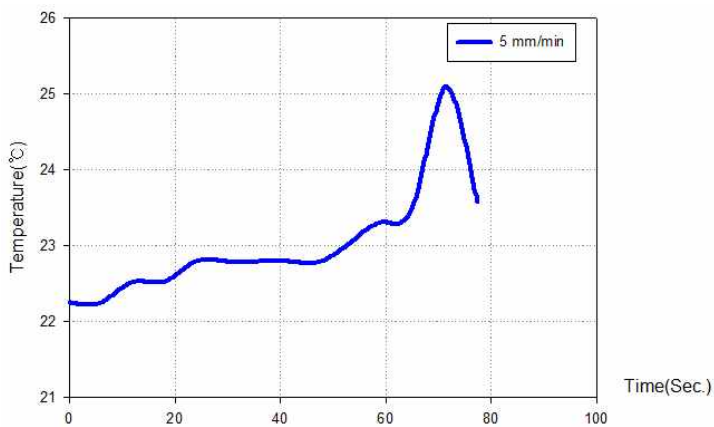
Fig. 4-5 Temperature measurement of rotation speed 1200 rpm



(a) 1 mm/min

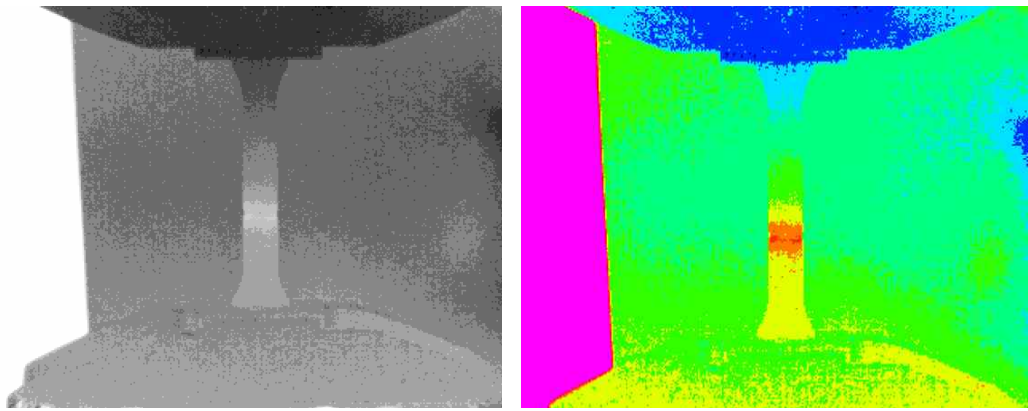


(b) 3 mm/min

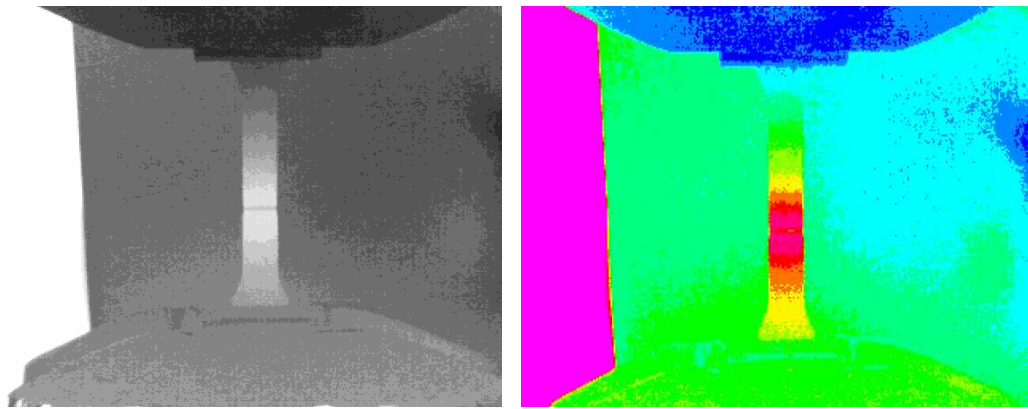


(c) 5 mm/min

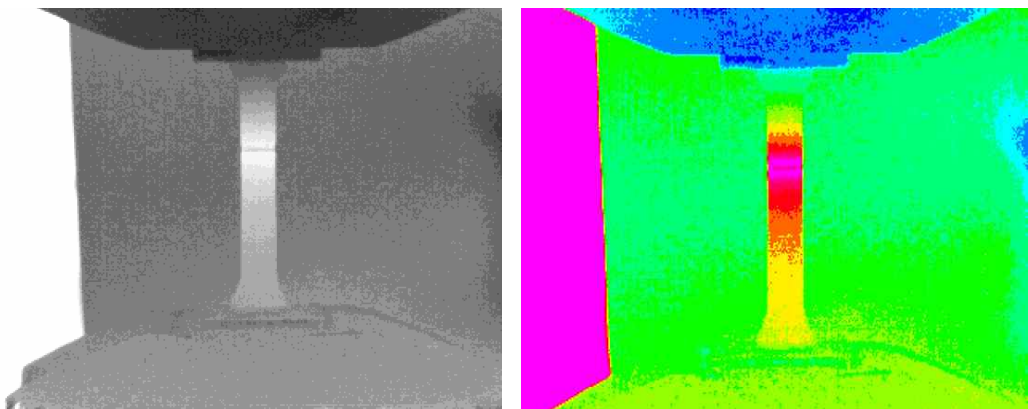
Fig. 4-6 Fracture field temperature graph of rotation speed 1200 rpm



(a) 1 mm/min

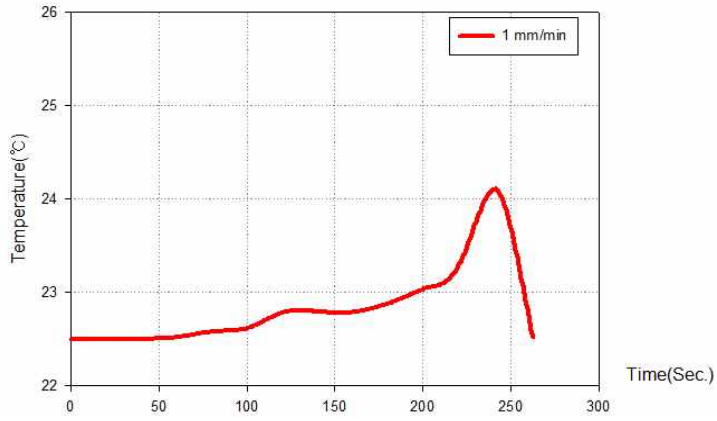


(b) 3 mm/min

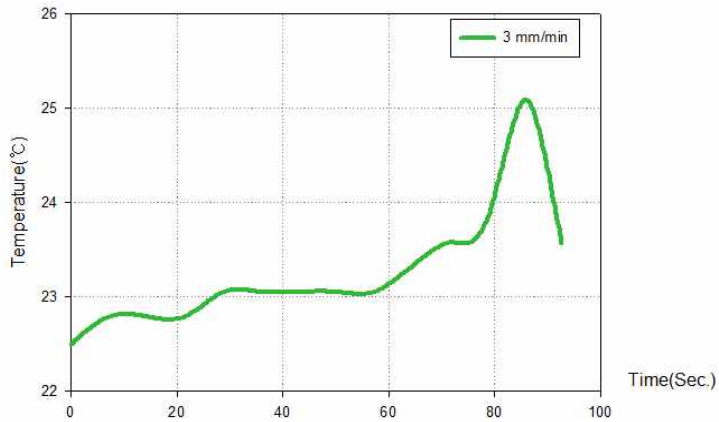


(c) 5 mm/min

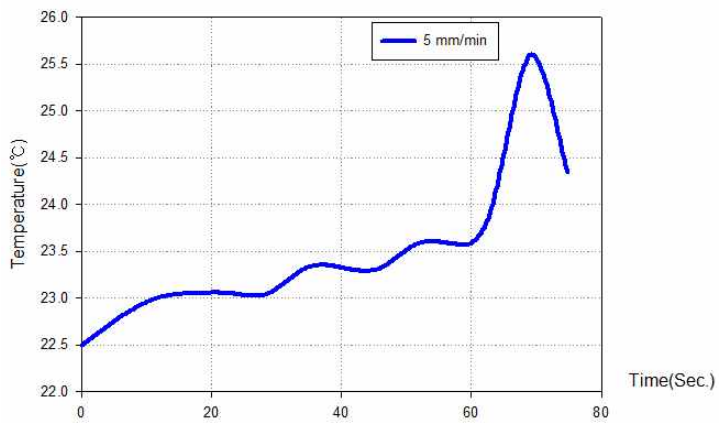
Fig. 4-7 Temperature measurement of rotation speed 1600 rpm



(a) 1 mm/min

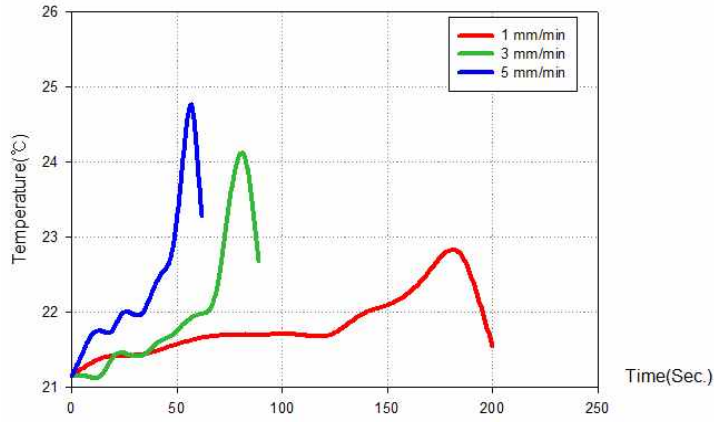


(b) 3 mm/min

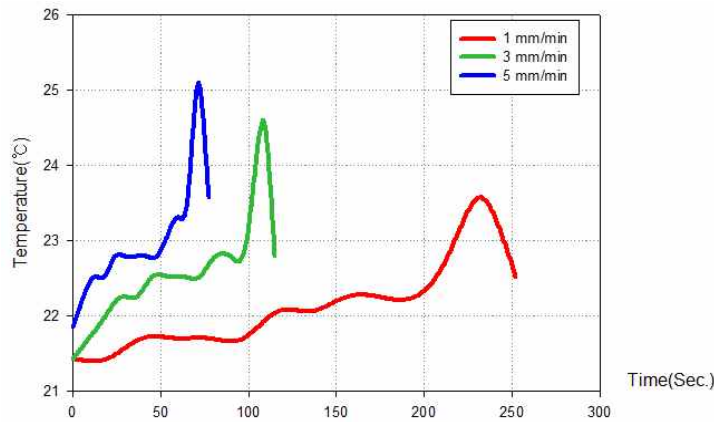


(c) 5 mm/min

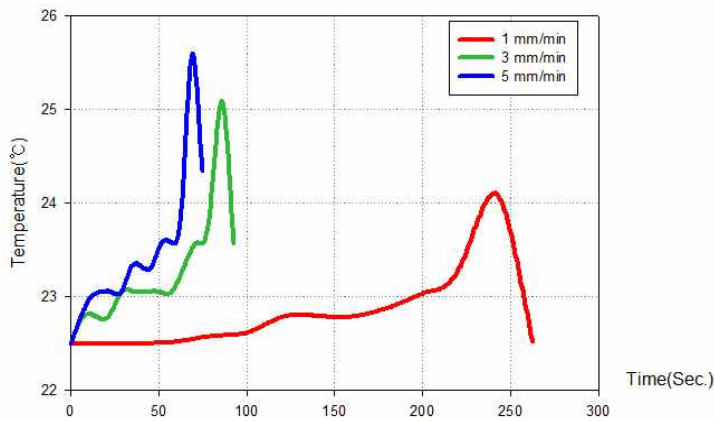
Fig. 4-8 Fracture field temperature graph of rotation speed 1600 rpm



(a) 800 rpm

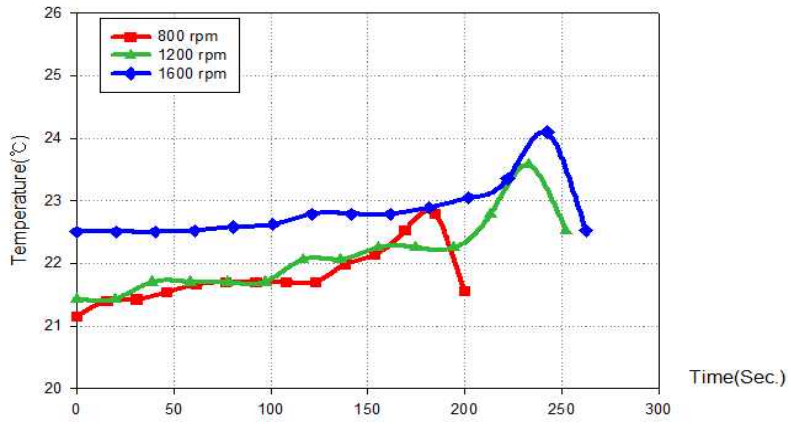


(b) 1200 rpm

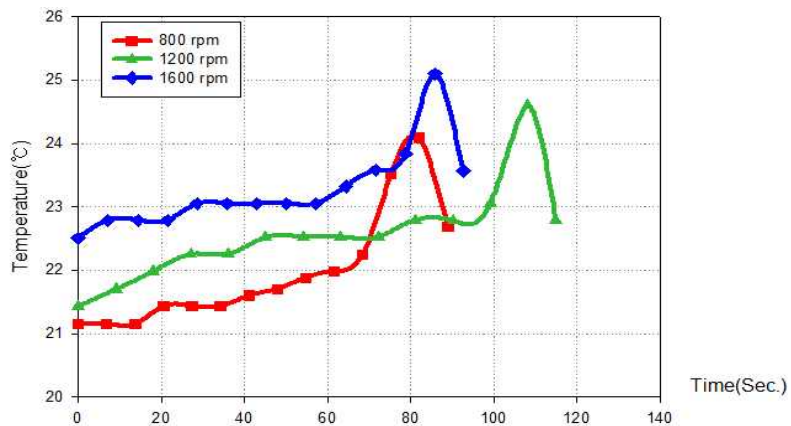


(c) 1600 rpm

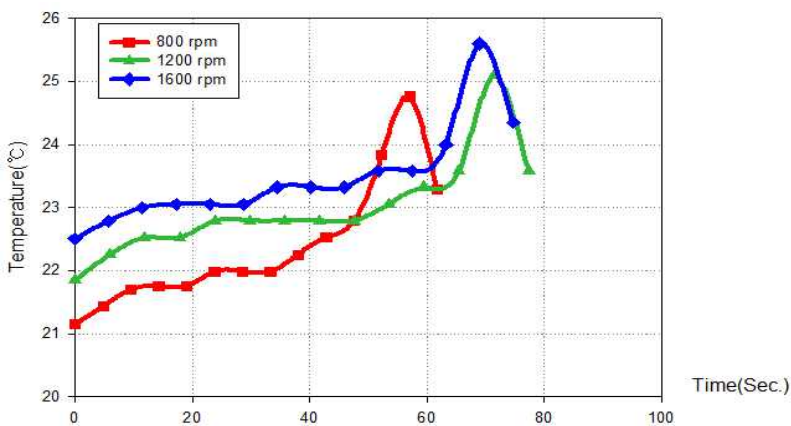
Fig. 4-9 Temperature graph of FSW specimen according to rotation speed



(a) 1 mm/min



(b) 3 mm/min



(c) 5 mm/min

Fig. 4-10 Temperature graph of FSW specimen according to tensile speed

Fig. 4-9 은 영상을 통해 획득한 파단부의 온도변화 결과 그래프로 (a)는 마찰교반용접 속도 800 rpm, (b)는 1200 rpm, (c)는 1600 rpm 이다. 이는 파단실험이 완료된 후 적외선열화상 실시간 온도영상을 통해 마찰교반용접 시험편이 인장 속도에 따라 일정하게 늘어난 길이에 따른 파단 위치를 파악하고, 인장 시작부 터 파단에 이르기까지 일정시간 간격으로 시험편 길이에 대한 파단의 위치를 파악하여 파단부의 온도변화 결과를 도출해내었다.

그래프로 나타낸 결과 1 mm/min의 인장속도로 파단시켰을 때 마찰교반용접 회전속도별로 비교한 결과 22.79℃, 23.58℃, 24.1℃ 로 온도가 가장 낮게 나타났 으며 세 가지 조건 중 800 rpm 조건일 경우 가장 낮은 파단부의 온도 값을 확 인하였다. 3 mm/min 의 인장조건일 경우 24.09℃, 24.6℃, 25.1℃ 이었으며, 5 mm/min 의 경우에는 24.76℃, 25.1℃, 24.35℃의 온도를 얻었다.

Fig. 4-10 그래프에서는 높은 인장속도일 경우 급격한 경사의 온도를 보였고 낮은 인장속도일 경우 완만한 형태로 나타났다. 이 결과를 통해 같은 조건의 마찰교반용접 시험편에서의 적외선 열화상 결과값은 인장속도가 빠를수록 파단부 의 온도가 높게 나타났다. 또한, 같은 인장속도에서 빠른 회전수의 마찰교반용접 된 시험편일수록 파단부의 온도도 높게 나타남을 확인하였다.

Table 4-2 Temperature result of FSW rotation speed by tensile load

rpm \ °C	800	1200	1600
1 mm/min	22.79	23.58	24.1
3 mm/min	24.09	24.6	25.1
5 mm/min	24.76	25.1	25.6

제 3 절 체적변화 측정

3-1. CCD 카메라를 이용한 체적변화 측정

마찰교반용접된 시험편을 인장시험기(MTS Co.)와 CCD 카메라를 동기화하여 1 mm/min, 3 mm/min, 5 mm/min 로 인장시험을 진행하였다. 변위 제어를 통해 시험편이 파단 되었을 때 시험편의 체적 변화를 측정하였다. Fig. 4-11은 인장 속도에 따른 시험편의 파단 실험에 대한 구성을 보여주고 있다. 주변온도는 18℃로 일정하게 유지한 상태에서 적외선 열화상 카메라를 이용하여 온도를 측정하였다. 각 속도별 시험편의 온도변화에 따른 시험편의 체적변화를 측정 하였고 파단부의 온도변화와 체적변화에 대한 실험결과를 Table 4-3에 나타내었다.

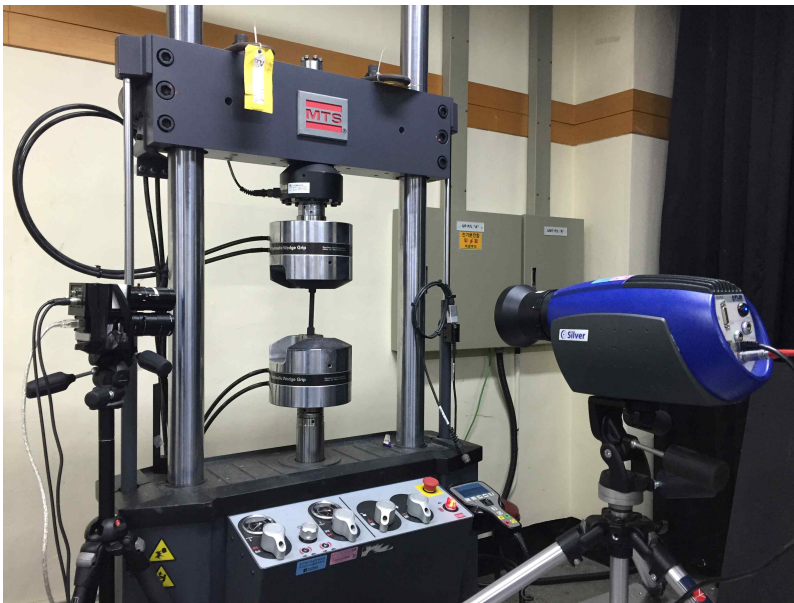


Fig. 4-11 Measurement of temperature and volume by CCD Camera and Infrared Thermography

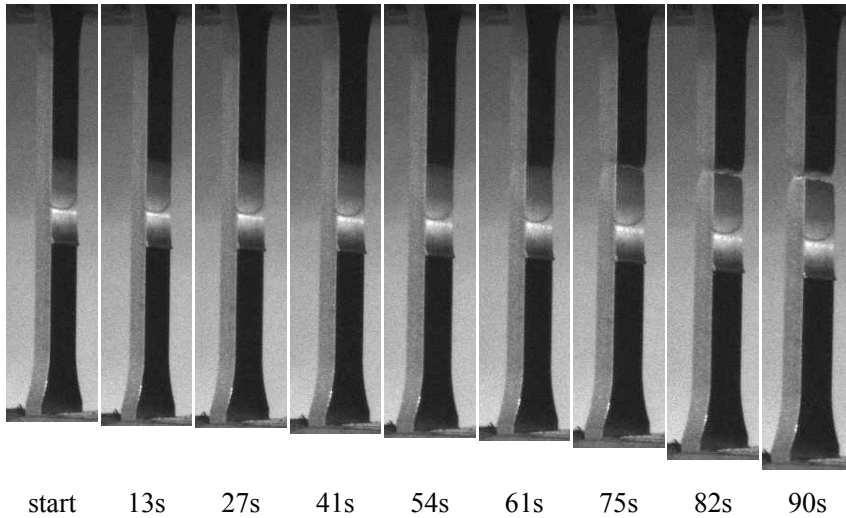


Fig. 4-12 CCD Image of specimen of 3 mm/min by 800 rpm of FSW

Fig. 4-12, 4-13 은 마찰교반 용접속도(800, 1200, 1600 rpm)에 따른 파단부의 온도변화와 체적의 변화에 대한 그래프를 나타내었다. Fig. 4-3, 4-4, 4-5 는 온도 변화와 체적변화에 대한 그래프를 관찰하였을 때 거의 비슷하게 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 파단부의 온도가 급격히 상승하는 구간에 국부적으로 파단부의 수축이 일어나 체적변화가 급격히 나타난다는 것을 확인하였다.

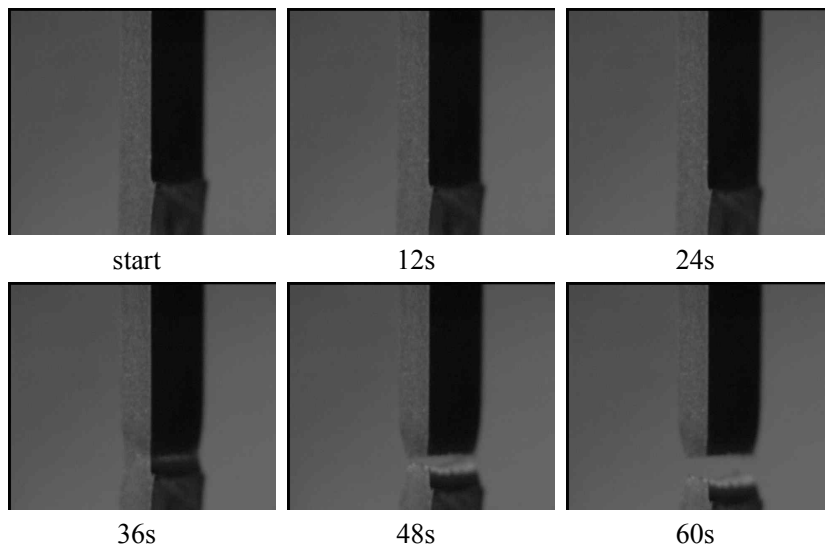


Fig. 4-13 CCD Image of specimen of 5 mm/min by 1200 rpm of FSW

Table 4-3 Data comparison of volume and temperature by 800 rpm FSW speed

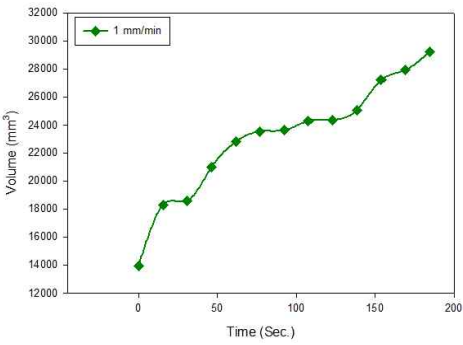
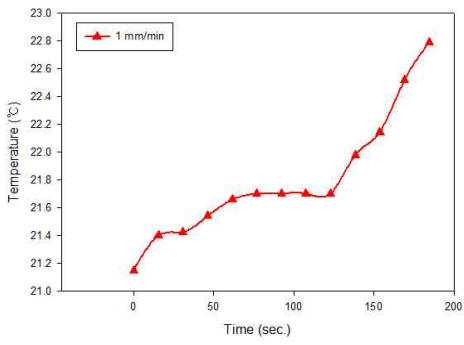
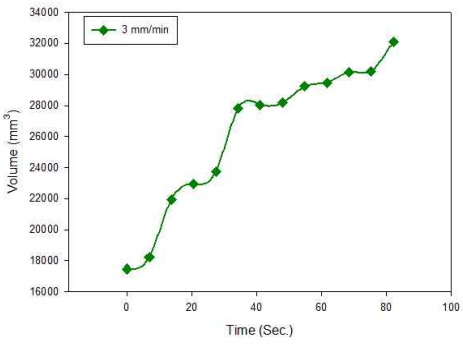
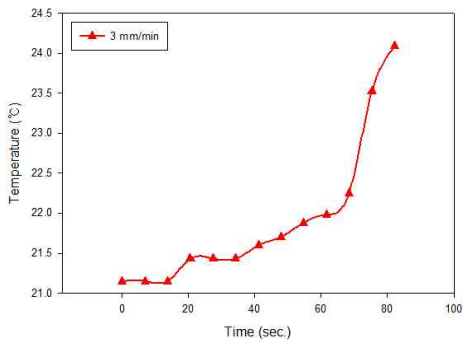
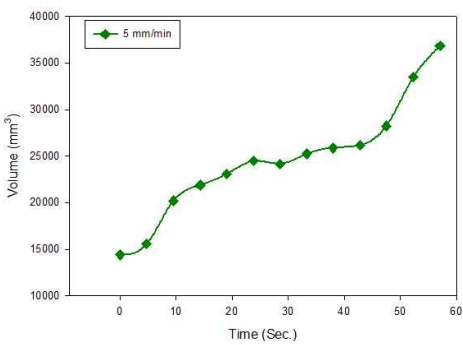
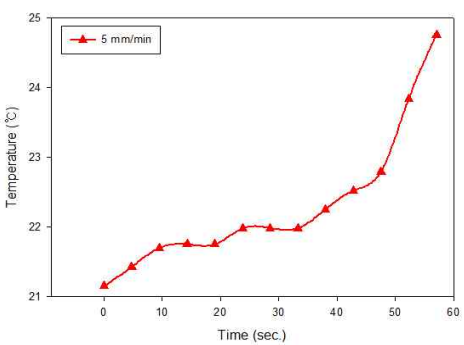
	Volume (mm ³)	Temperature (°C)
1 (mm/min)		
3 (mm/min)		
5 (mm/min)		

Table 4-4 Data comparison of volume and temperature by 1200 rpm FSW speed

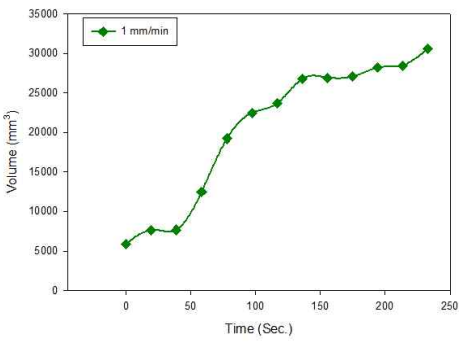
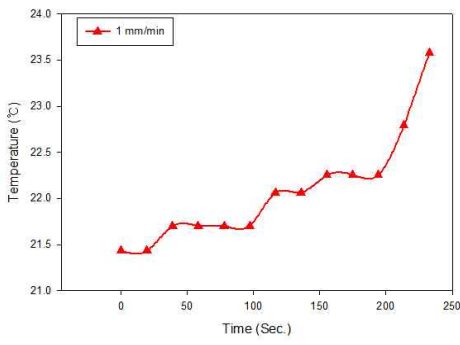
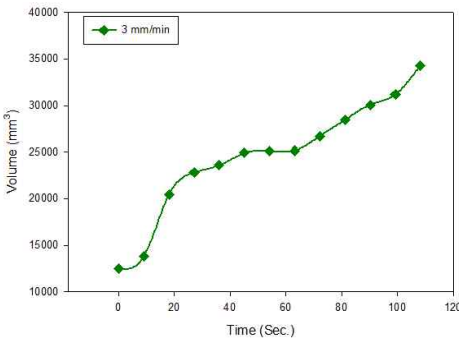
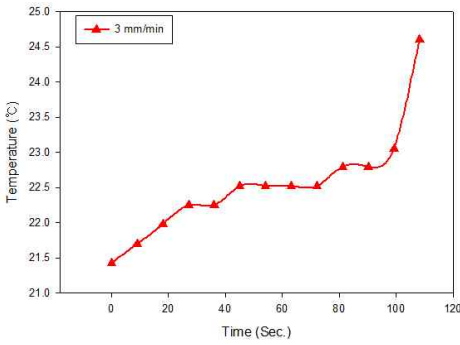
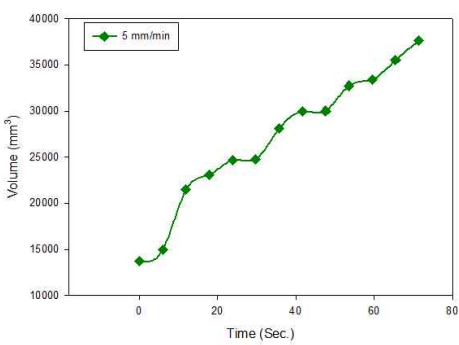
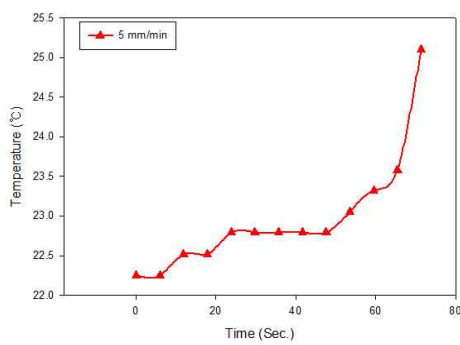
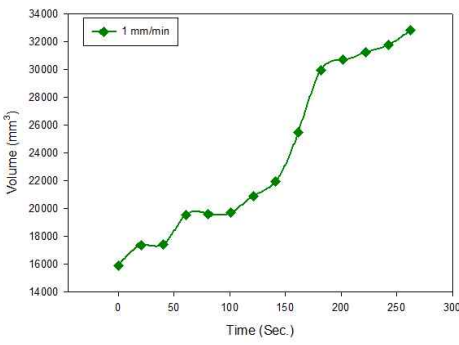
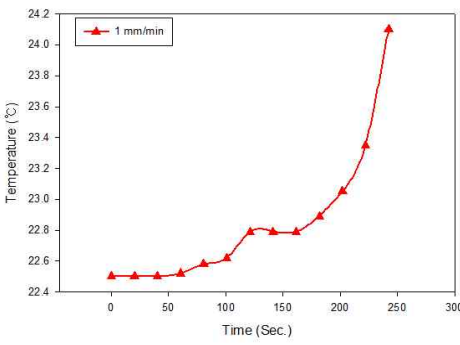
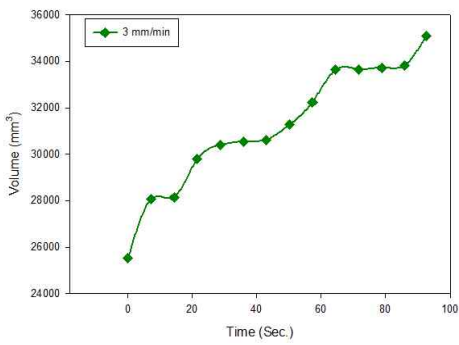
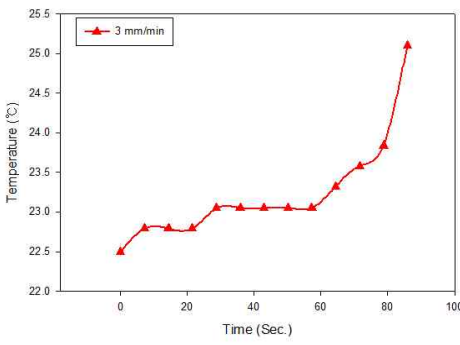
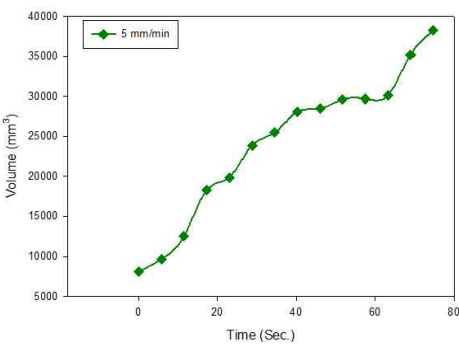
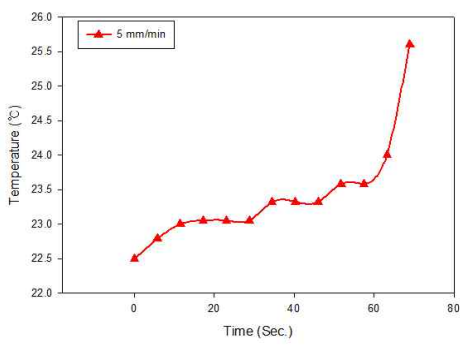
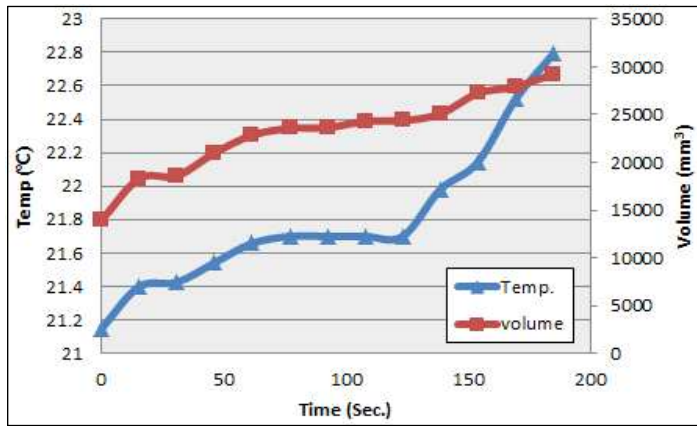
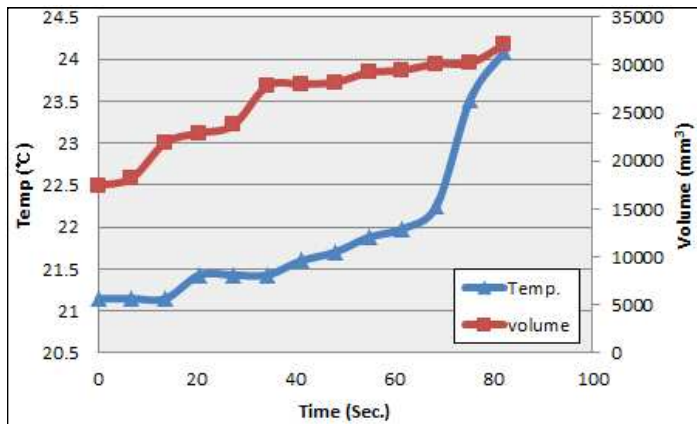
	Volume (mm ³)	Temperature (°C)
1 (mm/min)		
3 (mm/min)		
5 (mm/min)		

Table 4-5 Data comparison of volume and temperature by 1600 rpm FSW speed

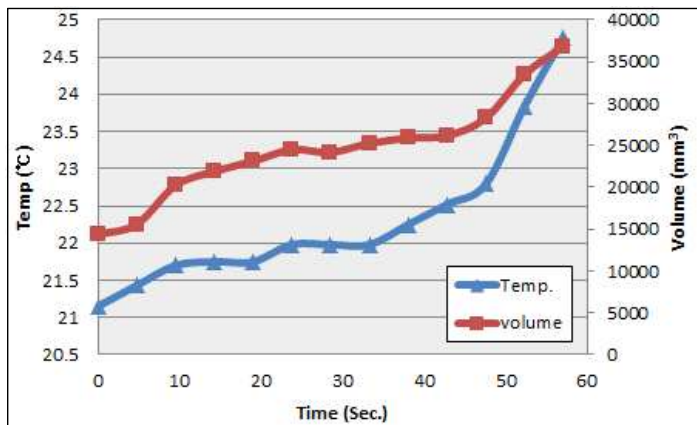
	Volume (mm ³)	Temperature (°C)
1 (mm/min)		
3 (mm/min)		
5 (mm/min)		



(a) 1 mm/min

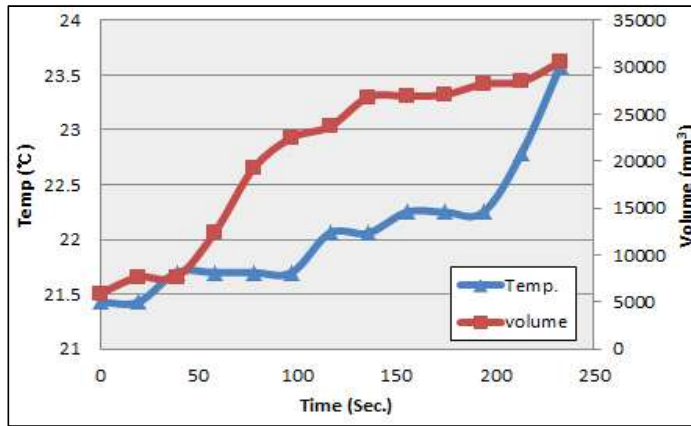


(b) 3 mm/min

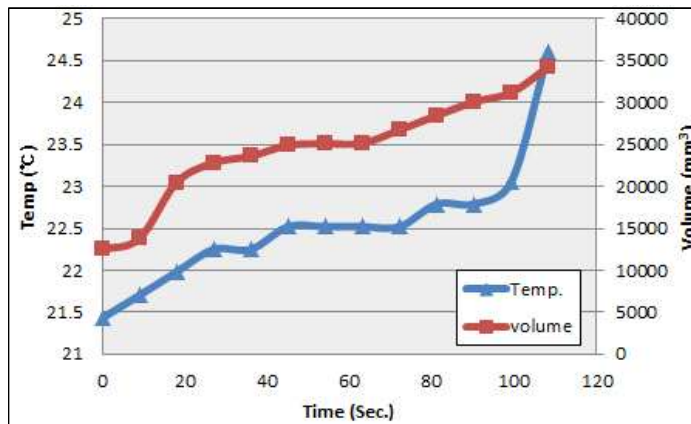


(c) 5 mm/min

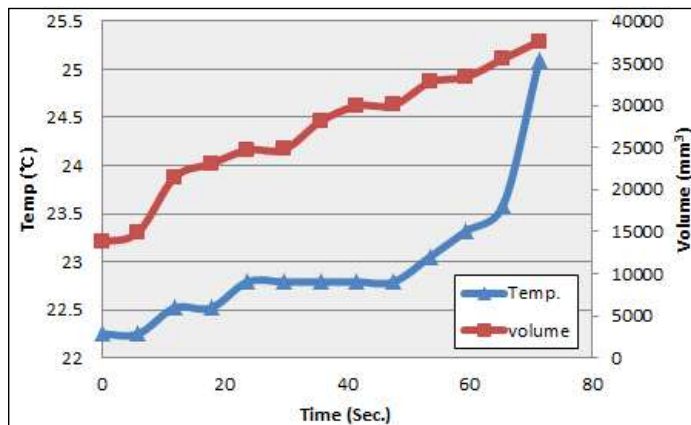
Fig. 4-14 Combine with temperature and volume graph of FSW 800 rpm



(a) 1 mm/min

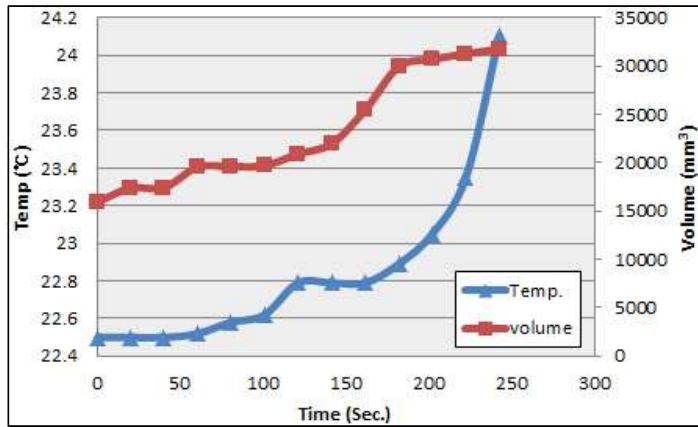


(b) 3 mm/min

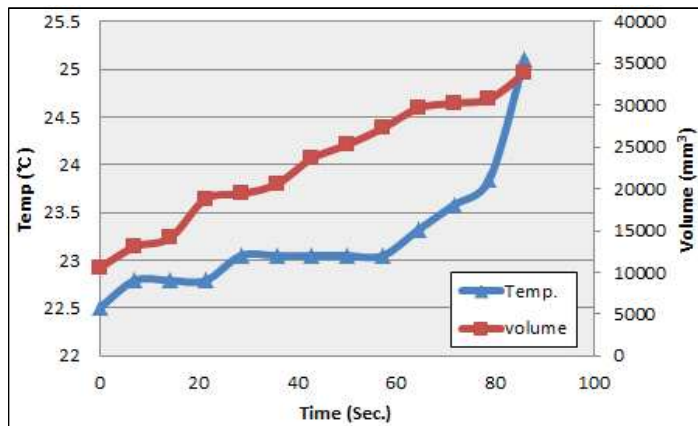


(c) 5 mm/min

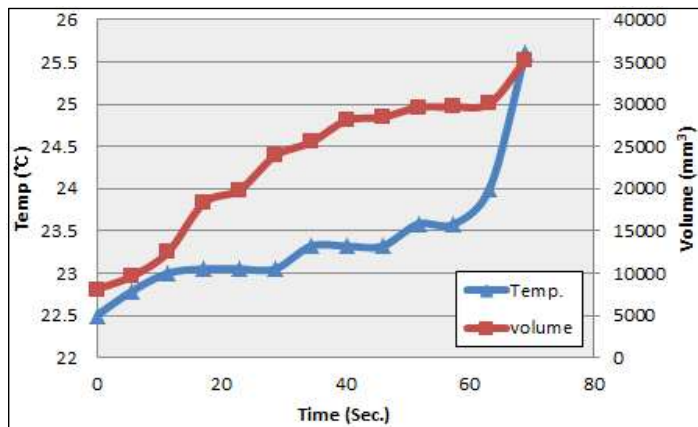
Fig. 4-15 Combine with temperature and volume graph of FSW 1200 rpm



(a) 1 mm/min



(b) 3 mm/min



(c) 5 mm/min

Fig. 4-16 Combine with temperature and volume graph of FSW 1600 rpm

인장속도에 대하여 Fig. 4-14, 4-15, 4-16 그래프를 비교하였을 때, 인장속도가 증가할수록 열에너지의 생성이 증가하여 온도가 빠르게 증가하였고 체적의 변화도 비슷하게 증가함을 관찰할 수 있었다. 마찬가지로 마찰교반용접 속도가 빠를수록 결과 값이 증가함을 Table 4-6을 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과에서 보여 주듯이 각 인장속도별 온도변화는 체적의 변화와 관련이 있다는 것을 보여주고 있다. 반대로 체적변화 데이터를 통하여 온도변화를 예측할 수 있을 것으로 보인다.

Table 4-6 Volume of FSW according to rotation speed and tensile test speed

mm ³ \ rpm	800	1200	1600
1 mm/min	29240	30555	32840
3 mm/min	32130	34256	35079
5 mm/min	36824	27608	38290

제 5 장 결 론

본 논문에서는 마찰교반용접 속도별로 제작된 Al6061 용접 시험편을 인장 시 발생하는 파단부의 온도변화를 알아보기 위해 인장실험과 동시에 적외선 열화상 카메라를 통하여 이들의 파단부의 변화를 관찰하였으며, CCD 카메라를 이용하여 인장실험 시 나타나는 Al6061 시험편의 체적의 변화를 온도변화와 관련하여 시험편 파단 시 발생하는 열영향부, 체적의 변화를 통해 인장속도와 용접 속도에 대한 관계를 설명하였다.

- 1) 본 연구에서는 알루미늄 Al6061 시험편을 재료로 선정하였다. 알루미늄 합금은 많은 공업 분야에서 널리 사용되고 있지만 지금까지 주로 사용되어진 용접법은 접합강도를 저하시키는 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 마찰교반용접법을 적용하여 알루미늄 Al6061을 용접 틀의 회전수에 따라 용접을 진행하였다. 용접을 진행한 후 비드 형상을 관찰한 결과 접합이 잘 이루어진 것을 확인하였다.
- 2) Al6061 판재에 tool의 회전속도별로 마찰교반용접을 진행한 후 인장실험을 진행하였다. 마찰교반용접 회전속도와 인장속도가 클수록 인장강도와 파단강도의 값이 크게 나타났다. Al6061 시험편이 인장하중을 받아 결정구조가 변하게 되어 단면적이 줄어든 후 시험편이 끊어지는 시점에서의 하중을 관찰하였을 때 최고점의 하중보다 적게 나타났다.
- 3) 인장실험 시 파단부의 열 영향부를 관찰하기 위해 적외선 열화상 카메라를 통해 온도분포 영상을 획득하였다. 시험편에 인가된 인장 속도가 빠를수록 적외선 열화상 이미지를 통한 시험편의 파단부의 온도가 증가함을 확인하였고, 파단부 뿐만 아니라 파단부 주변 온도 또한 변화가 있음을 확인할 수 있었다. 마찰교반용접 조건으로 인한 단면적의 감소의 차이로 인해 용접부와 모재부에 응력이 집중되는 현상의 차이가 발생하고, 그에 따라 용접부보다 모재부 영역에서 온도가 급격히 상승하였다.

- 4) CCD 카메라를 이용하여 인장실험과 동시에 체적변화를 관찰하였다. 온도변화와 체적변화에 대한 그래프를 관찰하였을 때 마찰교반용접의 용접속도 및 인장속도와 비례하여 상승하는 것을 관찰할 수 있었다. 파단부의 온도가 급격히 상승하는 구간에 국부적으로 파단부의 수축이 일어나 체적변화가 급격히 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) T. Shinoda: Friction Stir Welding의 皺勢, 輕金屬溶接, 37-9, p.406 (1999)
- 2) TWI, 1st International Symposium on Friction Stir Welding, held at the Rockwell Science Center, Thousand Oaks, California, June, 14-16 (1999)
- 3) KISTI, 기술산업정보분석, “마찰교반용접(Friction Stir Welding)”, 한국과학기술정보연구원
- 4) 윤영진, “알루미늄 4032 합금의 마찰교반접합 시 프로브 및 용접 조건이 용접 특성에 미치는 연구”. 선문대학교, 공학석사 논문 (2011)
- 5) T. Shinoda et al., Recent Trends of Research and Development of FSW Technology in Japan, Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27-28, September (2001)
- 6) 조제형, 김명현, 최준응, “알루미늄 소형선박의 마찰교반접합 적용 연구”, Journal of KWIS vol.30, No.2, p. 135-140 (2012)
- 7) O.T. Midling et al.: Industrialization of the Friction Stir Welding Technology in Panels Production for the Maritime Sector, Friction Stir Welding Symposium, Thousand Oaks, USA, 14-16, June (1999)
- 8) BCC Research, 2010 Welding Equipment And Supplies “The Global Market” KISTI (2013)
- 9) Maldague. X., "Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography", London: Springer-Verlag (1993)
- 10) W. H. Kearns, "Welding handbook", American Welding Society, 7th edition, Vol. 5, pp. 276-311 (1984)
- 11) J. F. Lancaster, "Metallurgy of welding", 3rd edition, pp. 1-5 (1980)
- 12) K. Masubuchi, "Analysis of welded structures-Residual stresses, distortion, and their consequences", Pergamon Press, Oxford (1980)
- 13) P. Michaleris and A. DeBiccari, "Prediction of welding distortion," Welding Journal, Vol. 76, No. 4, pp. 172-179 (1997)

- 14) A. J. A. Parlane, "Residual stresses in thick weldments(A review of contemporary measurement techniques", The welding institute, Abington, Cambridge, England (1977)
- 15) M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer," Sov. Phys. Tech. Phys. 17, 333-334 (1972)
- 16) U. Schnars, and W. Juptner, "Direct recording of hologram by a CCD target and numerical reconstruction," Appl. Opt. 33, 179-181 (1994)
- 17) B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Three-dimensional object recognition by use of digital holography," Opt. Lett. 25, 610-612 (2000)
- 18) S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Pub. Co (1980)
- 19) Arch C.Luther,"Video Camera Technology", Artech House Inc,Section 3.1 (1998)
- 20) Nancy,K.DelGrandeandP.F.Durbin,"Using Emissivity-Corrected Thermal Maps to Locate Deep Structural Defects in Concrete Bridge Decks", SPIE Symposium on Non-Destructive Evaluation of Aging Infrastructure Oakland, CA, June 06-08, (1995)
- 21) G. Gaussorgurs, "Infrared thermography," translated by Chomet, S., Champman & Hall, London (1994)
- 22) 윤경원, "적외선 열화상 기법을 이용한 감육 배관의 결함 검출 최적 계측 조건 평가", 조선대학교, 공학석사 논문, (2013)
- 23) Anderson,T.L,"Fracture Mechanics", CRC press, Boca Raton pp. 52-72 (1995)
- 24) 임상전, 이성범, "재료역학", 문운당 출판사 (2008)
- 25) 오병욱, 고진현, 김덕중, "용접역학", 원창출판사 (2006)
- 26) 권혁준, 임진환, "일반용접공학", 선학출판사 (2006)

저작물 이용 허락서

학 과	기계시스템공학과	학 번	20147104	과 정	석사
성 명	한글: 윤 나 연 한문: 尹 拏 娟 영 문: Na-yeon, Yun				
주 소	광주광역시 북구 일곡로100(현대1차아파트), 103-1003				
연락처	E-mail : yunnayeon@naver.com				
논문제목	한글: 인장속도에 따른 마찰교반용접된 Al6061 합금의 파단부 상태변화에 대한 연구 영문: A study on status variation of fracture field of friction stir welded Al6061 alloy according to tension test speed				

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 의사표시가 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() 반대()

2015 년 12 월 10 일

저작자: 윤 나 연 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하