creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000276190

August 2014

Master's Thesis

Mechanical characteristics in Laser-Arc hybrid welded joints for the application of automotive cowl parts(SGACC60/60)

Graduate School of Chosun University

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering

Jun-Ui Han

Mechanical characteristics in Laser-Arc hybrid welded joints for the application of automotive cowl parts(SGACC60/60)

자동차 카울 부품(SGACC60/60) 적용을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접부 기계적 특성

August 25, 2014

Graduate School of Chosun University

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering

Jun-Ui Han

dCollection @ chosun

Mechanical characteristics in Laser-Arc hybrid welded joints for the application of automotive cowl parts(SGACC60/60)

Advisor : Professor Han-Sur Bang

A Thesis submitted for the degree of

Master of Engineering

April 2014

Graduate School of Chosun University

Department of Naval Architecture and

Ocean Engineering

Jun-Ui Han

dCollection @ chosun

Jun-Ui Han's master thesis is certified.

Commitee Chair Chosun Univ. Prof. Hee-Seon Bang

Member Chosun Univ. Prof. Han-Sur Bang

Member Chosun Univ. Prof. Young-Seob Kwon

May 2014

Graduate School of Chosun University

dCollection @ chosun

CONTENTS

List of Tables V

List of Figures VII

Abstract IX

Chapter 1. Introduction

1 . 1 Research background and purpose 1

1 . 2 Recent technology for automotive lightweight 2

1.2.1 Material sort of body for lightweight technology 2

1.2.2 Application of Laser-Arc hybrid welding for body lightweight 4

1 . 3 Application of Laser-Arc hybrid welding to automotive cowl 6

Chapter 2. Theoretical Background

2 . 1 Respective welding method 8

2.1.1 Principles of Nd:YAG Laser welding 8

2.1.1 Principles of MIG Welding 10

2 . 2 Laser-Arc hybrid welding technology 11

dCollection @ chosun

2.2.1 Principles of Laser-Arc hybrid welding ····· 11
2.2.1 Advantage of Laser-Arc hybrid welding technology ····· 12
2.2.3 Development of hybrid welding technology ····· 14
2.2.4 Welding parameters of Laser-Arc hybrid welding ····· 16
2 . 3 Characteristics of galvanized steel ····· 17
2.3.1 Galvanized steel ····· 17
2.3.2 Type of galvanized steel ····· 17

Chapter 3. Experiment method of MIG, Nd:YAG Laser and Nd:YAG Laser-MIG hybrid welding process
3 . 1 Respective welding system ····· 20
3.1.1 MIG welding equipment ····· 20
3.1.2 Nd:YAG Laser welding equipment ····· 21
3.1.3 Nd:YAG Laser-MIG hybrid welding equipment ·· 23
3 . 2 Objective material ····· 24
3 . 3 Experimental procedure ····· 25
3.3.1 Respective B.O.P test ····· 25
3.3.2 Respective butt welding ····· 26
3.3.3 Effect of welding parameters on weldability ···· 28

dCollection @ chosun

3 . 4 Evaluation of mechanical and metallurgical characteristics ····· 29
3.4.1 Tensile test ····· 29
3.4.2 Hardness test ····· 31
3.4.3 Microstructure analysis ····· 33

Chapter 4. Experimental result & Discussion
4 . 1 Respective B.O.P result ····· 34
4.1.1 Experiment by MIG welding ····· 34
4.1.2 Experiment by Laser welding ····· 35
4.1.3 Experiment by Laser-Arc hybrid welding ····· 36
4 . 2 Respective butt welding result ····· 37
4.2.1 Experiment by MIG welding ····· 37
4.2.2 Experiment by Laser welding ····· 38
4.2.3 Experiment by Laser-Arc hybrid welding ····· 40
4.2.4 Comparison result of respective welding ····· 42
4 . 3 Effect of hybrid welding parameters on weldability ····· 43
4.3.1 Effect of Laser-Arc distance parameters ····· 43
4.3.2 Effect of shielding gas parameters ····· 44
4.3.3 Effect of Various currents & various speeds ····· 45
4 . 4 Tensile test result ····· 48

dCollection @ chosun

4.4.1 Comparison of tensile test of MIG & Laser Laser-Arc hybrid welded joints ····· 48
4.4.2 Tensile test of hybrid welded joints for various currents & welding speeds ····· 49
4 . 5 Hardness test result ····· 50
4.5.1 Comparison of hardness test of MIG & Laser Laser-Arc hybrid welded joints ····· 50
4.5.2 Tensile test of hybrid welded joints for current & welding speed ····· 53
4 . 6 Microstructure analysis ····· 54
4.6.1 Microstructure of respective welded joints ····· 54
4.6.2 Microstructure of hybrid welded joints for current & welding speed ····· 56

Chapter 5. Conclusion ····· 57
Reference ····· 59

dCollection @ chosun

List of Tables

Table 2.1 Relative comparison of Laser-Arc hybrid welding ····· 13
Table 2.2 Cost estimation between Laser and Hybrid welding ····· 15
Table 3.1 Specifications of MIG welding equipment ····· 21
Table 3.2 Specifications of Nd:YAG Laser welding equipment ····· 22
Table 3.3 Chemical compositions in SGACC60/60 and KC-28 solid wire ····· 24
Table 3.4 Mechanical properties of SGACC60/60 ····· 24
Table 3.5 B.O.P conditions of MIG welding ····· 25
Table 3.6 B.O.P conditions of Laser welding ····· 25
Table 3.7 B.O.P conditions of Laser-Arc hybrid welding ····· 26
Table 3.8 Conditions of MIG welding ····· 26
Table 3.9 Conditions of Laser welding ····· 27
Table 3.10 Conditions of Laser-Arc hybrid welding ····· 27
Table 3.11 Conditions of Laser-Arc hybrid welding parameters ····· 28
Table 3.12 Dimension of tensile test specimen ····· 30
Table 3.13 Hardness testing conditions ····· 32
Table 3.14 Schematics on the hardness testing positions ····· 32
Table 4.1 Bead profiles of MIG welding for various voltages & currents ····· 34
Table 4.2 Bead profiles of Laser welding for peak power ····· 35
Table 4.3 Bead profiles of Laser-Arc hybrid welding for various currents ····· 36
Table 4.4 Bead & Cross section profiles of MIG welding ····· 37
Table 4.5 Bead & Cross section profiles of Laser welding ····· 39

dCollection @ chosun

Table 4.6 Bead & Cross section profiles of Laser-Arc hybrid welding ····· 40
Table 4.7 Bead surface appearance & Cross section of Laser-Arc hybrid welding for various Laser-Arc distance ····· 43
Table 4.8 Bead surface appearance & Cross section of Laser-Arc hybrid welding for various Ar-CO_2 gas compositions ····· 45
Table 4.9 Bead appearance Laser-Arc hybrid welding for various currents & welding speeds ····· 46
Table 4.10 Quality levels in Laser-Arc hybrid welding for various currents & welding speeds ····· 47
Table 4.11 Optical microstructure of respective welded joints ····· 55

dCollection @ chosun

List of Figures

Fig. 1.1 Relation of fuel efficiency for lightweight ····· 2
Fig. 1.2 Audi A8 aluminum body ····· 3
Fig. 1.3 Application of high strength steel to Volvo XC90 ····· 3
Fig. 1.4 Lightweight using magnesium alloy of America ····· 4
Fig. 1.5 Application of Laser-Arc hybrid welding of New Audi TT ····· 5
Fig. 1.6 Position of cowl ····· 7
Fig. 1.7 Effect of Laser-Arc hybrid welding to automotive cowl ····· 7
Fig. 2.1 Structure of Nd:YAG Laser ····· 8
Fig. 2.2 Schematic of Nd:YAG Laser ····· 9
Fig. 2.3 Schematic & Structure of MIG ····· 11
Fig. 2.4 Laser-Arc hybrid welding & system ····· 12
Fig. 2.5 Relative comparison of weld processes ····· 13
Fig. 2.6 Welding parameters of Nd:YAG Laser-MIG welding ····· 16
Fig. 2.7 Application of galvanized steel ····· 19
Fig. 3.1 MIG welding equipment ····· 20
Fig. 3.2 Nd:YAG Laser welding equipment ····· 21
Fig. 3.3 Nd:YAG Laser-MIG hybrid welding equipment ····· 23
Fig. 3.4 Dimension of specimen for main experiment ····· 24
Fig. 3.5 High speed camera equipment ····· 29
Fig. 3.6 Process of tensile test ····· 30
Fig. 3.7 Micro vickers hardness test ····· 31

dCollection @ chosun

Fig. 3.8 Optical microscope ····· 33
Fig. 4.1 Comparison of penetration depth & width ····· 42
Fig. 4.2 High speed phothgraphy of Laser-Arc hybrid welding for various LAD ····· 43
Fig. 4.3 High speed photography of Laser-Arc hybrid welding for various Ar-CO_2 shielding gas compositions ····· 44
Fig. 4.4 Comparison of tensile strength of respective welded joints ····· 48
Fig. 4.5 Tensile strength of Laser-Arc hybrid welded joints for various currents & welding speeds ····· 49
Fig. 4.6 Hardness distribution of MIG welded joints ····· 51
Fig. 4.7 Hardness distribution of Laser welded joints ····· 51
Fig. 4.8 Hardness distribution of Laser-Arc hybrid welded joints ··· 52
Fig. 4.9 Comparison of hardness distribution of MIG & Laser and Laser-Arc hybrid welded joints ····· 52
Fig. 4.10 Hardness distribution of Laser-Arc hybrid welded joints for current & welding speed ····· 53
Fig. 4.11 Optical microstructure of Laser-Arc hybrid welded joints for current & welding speed ····· 56

dCollection @ chosun

ABSTRACT

자동차 카울 부품(SGACC60/60) 적용을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접부 기계적 특성

Jun-Ui Han

Advisor : Prof. Bang, Han-sur, Ph.D.

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, safety, lightness and environmental protection have become more and more important in automotive industry. New material and new forming methods have been adopted to reduce the weight on condition of no increasing cost. However, infrastructure construction problem, performance contrast high price is still limited. Accordingly, improving durability and lightness in automotive structure have led to the wide use of galvanized steel sheets as a corrosion resistant material. Because of high strength and toughness, better performance both in high and low temperature, high resistance to abrasion and corrosion, galvanized steel sheets have attracted great attention in many academic research and industry applications. Especially, galvanized steel sheets can replace existing steel to reduce the body weight and to improve safety in automotive industry.

Although welding methods(Spot welding, MIG, TIG) that are applied to body parts of galvanized steel have been used for a long time, disadvantage such as high electricity consumption, electrode replacement and technical limitation give rise to interest in Laser-Arc hybrid welding. The hybrid welding technology that combines the

dCollection @ chosun

advantage of laser welding(deep penetration, high speed, small heat-affected zone) and arc welding(low cost , fit-up mitigation, high-power) can improve quality of welding and productivity. Because of many process parameters of laser, arc and hybrid is not easy to optimize process. To solve this issue, various researches that affect weldability of many process parameters have been carried out.

In this paper, high-strength galvanized steel for application of the automotive cowl parts carry out respective processes MIG, Laser, Nd:Yag Laser-Mig hybrid welding. Several process parameters such as Laser-Arc distance, shieldingas and welding currents & welding speeds were investigated. Weld quality was evaluated by EN ISO13919-1(Reinforcement, Undercut, Excess weld metal Excessive penetration). In oder to evaluate weldability, This paper can carry out mechanical characteristic and metallurgical characteristic.

dCollection @ chosun

Chapter 1

Introduction

1.1 Research background and Purpose

최근, 자동차업계에서는 안전감, 가벼움 그리고 환경보호가 점점 더 중요해 지고 있는 상황이다. 새로운 재료와 가공법은 비용을 줄이고 차체 경량화 시키기 위해 도입되어졌지만, 인프라 구축 문제, 성능대비 높은 가격 등의 문제로 아직까지는 보급에 한계가 있다. 따라서 차체 구조에 내구성과 경량화를 향상시키기 위해 내식성 재료인 아연도금강판이 자동차업계에서 광범위하게 사용되어지고 있다.[1,2] 아연도금 강판은 고강도와 인성, 높고 낮은 온도 모두에서 기존의 재료보다 우수한 성능을 나타내며, 내마모성 및 내 부식성이 뛰어난 특징이 있기 때문에 자동차용 아연도금 강이 많은 학계와 산업에서 큰 관심을 받고 있다.[3] 차체 조립 시 적용되는 용접은 저항 점용접(Spot welding), 가스 메탈 아크 용접(MIG), 가스 텅스텐 아크 용접(TIG) 등이 오랫동안 사용되어져 왔다.[4] 특히, 점용접은 자동차 산업에서 가장 많이 사용되어지고 있는 용접법이지만, 겹치기 용접을 위하여 Flange가 요구되므로 이에 따른 차체 중량 증가 및 자유로운 차체 설계에 한계가 있다. 또한, 타점 진행과 함께 아연 부착량의 증가로 용접강도가 저하되고 스폿간의 Repositioning 시간 및 전극의 교체로 생산성이 떨어지는 문제점이 있다. 특히 아연도금 강을 용접 할 때 아연은 약 420°C에서 녹기 시작하여 906°C에서 증발하기 때문에 아크가 점화 될 때 이미 아연이 증발하여 아연 증기와 산화물이 발생한다. 이는 기공 형성과 용융 불량, 크랙 발생, 불안정한 아크의 원인이 되고 있다.[5] 이에 따라 기존의 용접 품질, 생산성 향상 및 Flange 제거를 통한 차체경량화의 문제점을 극복 할 수 있는 새로운 개념의 용접/접합 기술 개발이 절실히 요구되어지고 있다.

따라서, 고밀도 열원을 갖는 레이저 빔 용접기술과 기존의 아크용접기술을 동시에 사용한 복합 용접 기술인 하이브리드 용접 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 용접은 아크용접의 장점인 값이 싸고 핏-업 완화 및 고출력을 낼 수 있으며, 레이저 용접의 장점인 깊은 용입 특성 및 빠른 용접속도를 가져 두 용접

dCollection @ chosun

의 장점을 최대한 발휘 할 수 있어 용접부의 품질 및 생산성을 향상시킬 수 있다.[6] 하지만, 레이저-아크 하이브리드 공정의 특성상 레이저,아크 및 하이브리드 공정변수가 각각 존재하므로 공정변수가의 수가 많아 공정변수 최적화 쉽지 않다.[7] 특히 아연도금 강판의 Laser-MIG 하이브리드 용접에서 공정변수가 용접성에 미치는 영향에 대한 선행 연구들이 부족한 상황이다.

본 연구에서는 자동차 부품 카울에 적용되는 두께(0.65mm) 아연도금강판(SGACC60/60)에 대하여 각 공정별 MIG, Laser 그리고 Nd:YAG Laser-MIG hybrid 맞대기 용접을 실시하여 용접부의 용접성을 평가하고자 한다. 아울러 용접부의 접합성을 평가하기 위해서, 용접부의 기계적 특성 및 금속학적 특성을 고찰하였다.

1.2 Recent technology for automotive lightweight

1.2.1 Material sort of body for lightweight technology

최근 들어 심각한 환경오염과 자동차 수용의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해 이미 선진국에서는 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 심하게 강화하고 있는 실정이며, 자동차 재료의 개발동기도 단순한 연비 향상이라는 수준을 넘어 환경규제에 따른 경쟁력 향상을 위한 새로운 기술개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 분위기 속에서 자동차 연비 향상 및 배기가스 규제 목표를 달성하기 위해 차체 경량화의 이목이 집중 되어 있으며, 그림 1.1과 같이 기존의 소재를 대신할 수 있는 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 연비를 향상 시킬 수 있기 때문에 환경오염방지와 연료절감에 가장 효과적인 방법이다.

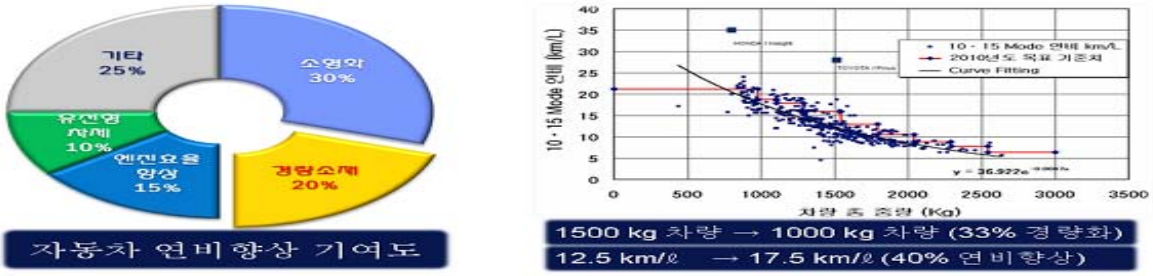


Fig 1.1 Relation of fuel efficiency for lightweight

dCollection @ chosun

차체 경량소재로는 대표적으로 알루미늄 합금, 고장력강, 마그네슘 합금이 사용되고 있으며, 그림 1.2과 같이 AUDI A8은 알루미늄 합금을 차체에 적용하였으며, 무게가 철의 약 1/3으로서 차체 경량성에 우수하며, 우수한 충돌특성 및 외관이 미려한 장점을 가지고 있다. 하지만 스틸 대비 생산가격 및 수리비용이 고가인 점이 자동차 시장 점유에 제약을 받고 있다.

Fig 1.2 Audi A8 aluminum body

따라서 그림 1.3과 같이 Volvo XC90에 고장력강이 차체에 적용되어 있으며, 인장전단강도가 일반강판보다 2배보다 높아 차체의 판 두께를 줄여서 경량화를 달성할 수 있다. 하지만 가공이 어렵고 용접성이 떨어지며 형태의 수명이 저하되는 단점을 가지고 있다.[8]

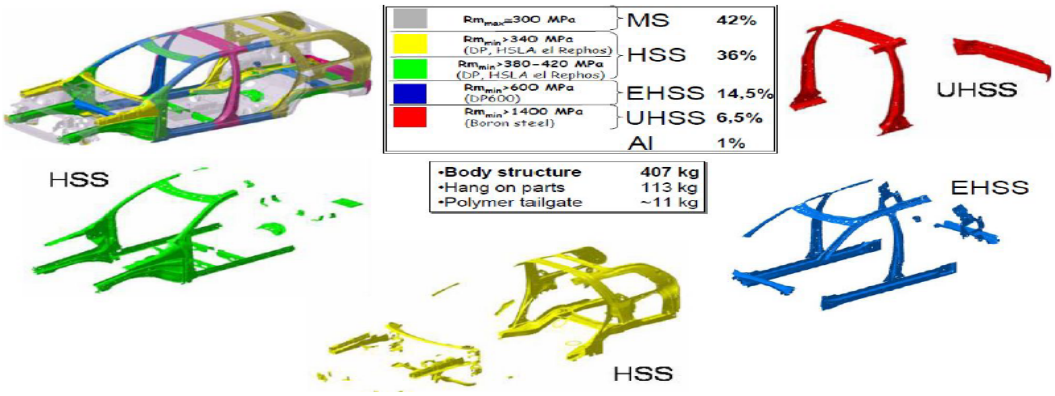


Fig 1.3 Application of high strength steel to Volvo XC90

dCollection @ chosun

마그네슘 합금은 자동차 경량화에 따라 차체 재료로서 차지하는 비중이 점차 늘어나고 있는 추세이며, 그림 1.4와 같이 미국 자동차 산업의 경우 1990년 초에는 차량 한 대당 1.2kg 정도 마그네슘 합금을 적용하였으며, 그 사용량이 매년 15% 이상씩 증가하고 있다. 또한 'Magnesium Vision 2020'을 통해 마그네슘 합금 소재 적용을 2005년 5kg에서 2020년 160kg대로 확대하기 연구개발을 시행하고 있다.

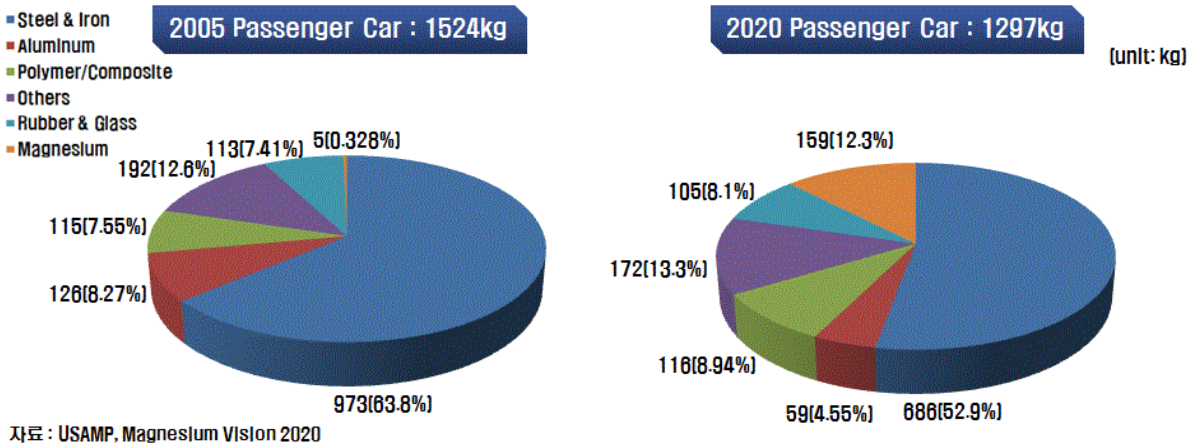


Fig 1.4 Lightweight using magnesium alloy of America

1.2.2 Application of Laser-Arc hybrid welding for body lightweight

레이저-아크 하이브리드 용접 기술은 고밀도 열원을 갖는 레이저 빔 용접기술 기존의 아크 용접 기술을 동시에 사용하여 두 용접법의 장점을 최대로 발휘할 수 있도록 한 복합용접기술로 기존 용접에 비해 용접생산성과 용접품질이 뛰어나서 산업계로부터 많은 주목을 받고 있다. 특히, 유럽에서의 레이저-아크 하이브리드 용접은 자동차의 차체용접에서 상용화되었다. 최근 파이버 레이저의 등장에 의해 보다 레이저의 적용이 쉽게 되어 박판뿐만 아니라 후판용접에서도 적용되기 시작하였다. 2000년 초에는 AUDI사의 A8의 루프 프레임과 그림 1.5와 같이 New AUDI TT 모델에 레이저용접과 MIG용접을 조합한 레이저 하이브리드 용접을 적용 하였으며, 폭스바겐사의 Phaeton의 도어를 용접하는데 레이저 하이브리드 용접(이음부:48곳, 길이 3,570mm)을 적용하였다. 일본 Honda에서는 자동차 차체 전체를 알루미늄(All aluminum body)으로 제작을 목표로 고효율 레이저-미그 하

dCollection @ chosun

이브리드 용접기술을 개발하여 용접공정의 자동화와 고속 용접, 저입열 저변형 용접의 실현을 통해 자동화에 의해 안정된 품질보증, 양산시 정밀도 변화 및 공정수를 삭감 및 용접조립을 위한 사전공작의 공수 삭감 등의 효과를 가져왔다.[9]

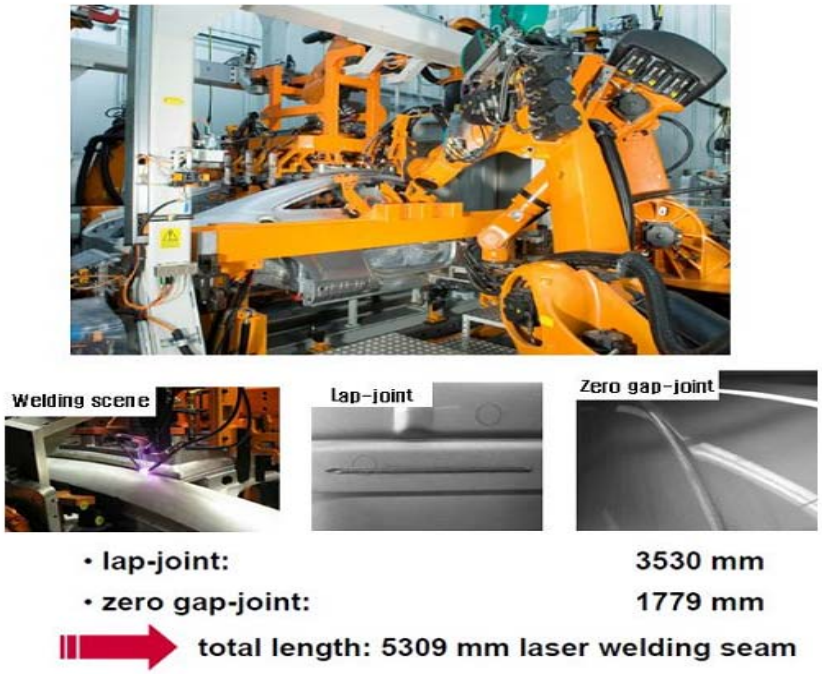


Fig 1.5 Application of Laser-Arc hybrid welding of New Audi TT

dCollection @ chosun

1.3 Application of Laser-Arc hybrid welding to automotive cowl

카울(cowl)은 그림 1.6과 같이 프런트 윈도우와 연결된 앞쪽 패널부분이며, 계기판, 핸들, 엔진룸을 연결해주는 지지대이다. 카울의 역할은 환기 덕트 기능과 물이 엔진룸으로 들어가는 것을 방지한다. 특히 와이퍼의 작동 모터 등의 부품이 들어갈 공간을 확보하여 외부환경으로부터 보호하는 역할을 한다.

차체 부품 카울(cowl) 조립의 경우 그림 1.7과 같이 성형된 각각의 부품을 지그 시스템으로 고정시킨 후 저항 점용접을 실시하는데, 저항 점용접시 겹치기 용접을 위하여 Flange가 요구되며, 이에 따른 차체 중량 증가 및 자유로운 차체 설계에 한계가 있으며, 타점 진행과 함께 아연 부착량의 증가로 용접강도가 저하되고 스폿간의 Repositioning 시간 및 전극의 교체로 생산성이 떨어지는 문제점이 발생한다. 이에 레이저-아크 하이브리드 용접은 빠른 용접속도 및 우수한 용접품질 뿐만 아니라 자동차 부품 카울(cowl) 적용 시 플랜지를 완전히 없애고 맞대기 용접이 가능하여 자동차 차체 경량화에 효과적이라 할 수 있다.

dCollection @ chosun

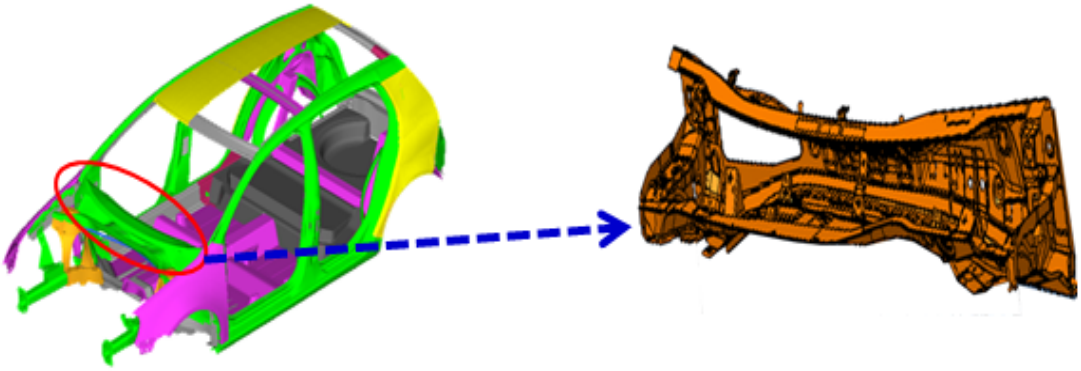


Fig 1.6 Position of Cowl

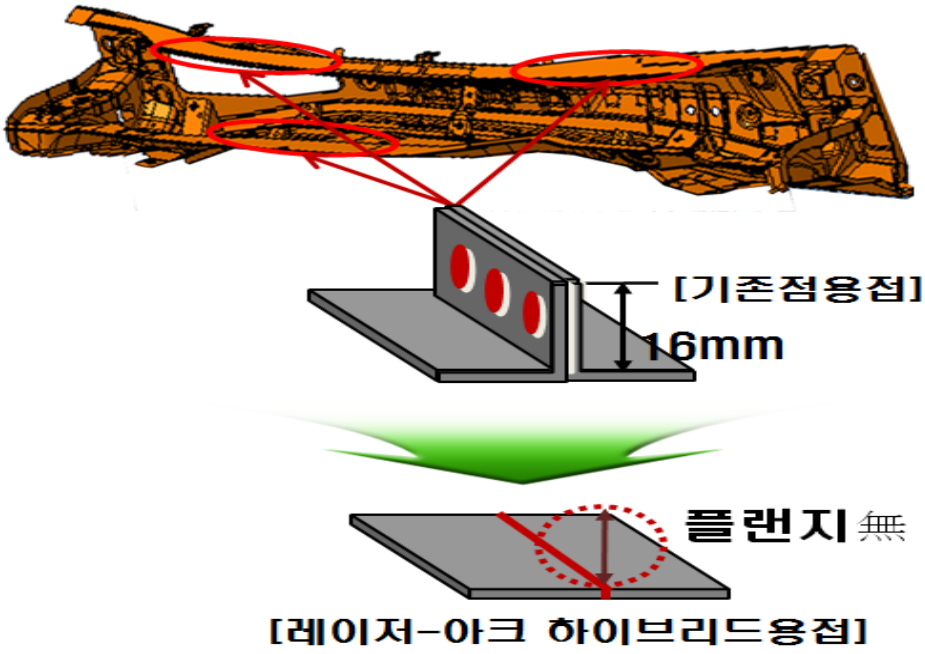


Fig 1.7 Effect of Laser-Arc hybrid welding to automotive cowl

dCollection @ chosun

Chapter 2
Theoretical Background

2.1 Respective welding method

2.1.1 Principles of Nd:YAG Laser welding

Nd:YAG 레이저는 합성 결정으로 활성물질 Nd^{3+}를 레이저 매질로 사용한다.[10] 레이저의 출력파장은 1.06㎛으로 평균 수 W로부터 1kw의 범위에서 펄스 또는 연속출력의 고 반복율로 발진된다. Nd:YAG 막대는 Xe 플래시 램프에 광을 조사하면 0.5~0.9㎛dml 파장영역이 광을 흡수하여 원자가 준안정 상태가 되며, 이상태에서 원자의 수명이 짧기 때문에 곧바로 안정 상태로 준위를 이동한다.[11] 레이저의 구조는 실제로 레이저 빛을 발생시키는데 필요한 핵심적인 부분과 개략도를 그림 2.1과 그림 2.2와 같이 나타낸 것이다. 빛을 발생시키는데 필요한 부분을 제외한 나머지 부분은 빛의 특성, 출력, 시스템 안정성 등을 제어하는데 필요한 것들로써 레이저 빛을 발생시키는 부분만큼이나 중요하며 실제 레이저를 안정적으로 사용할 수 있도록 해준다.

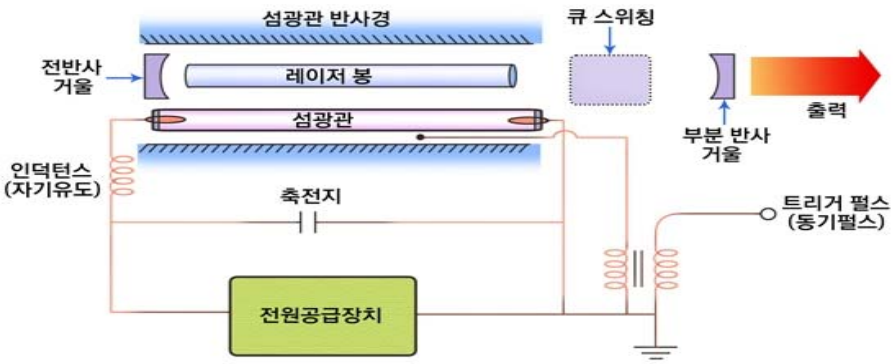


Fig 2.1 Structure of Nd:YAG Laser

dCollection @ chosun

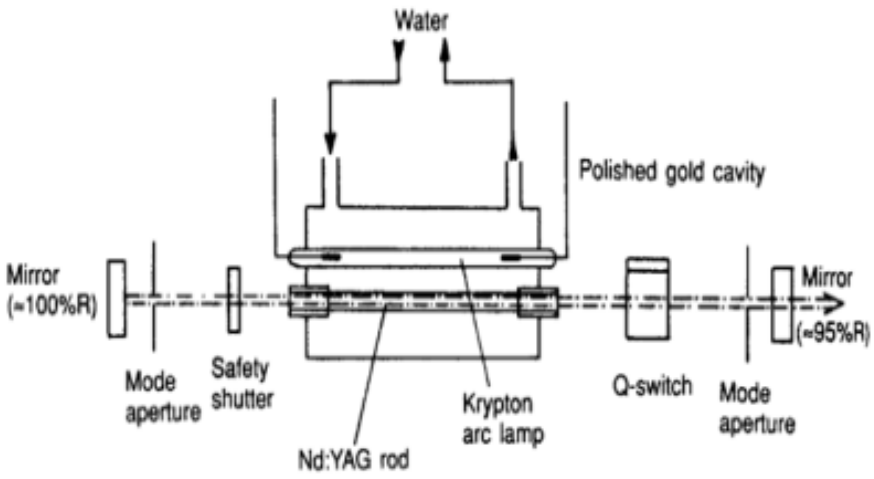


Fig 2.2 Schematic of Nd:YAG Laser

(1) Components' role of Nd:YAG Laser

◎ Nd:YAG rod

레이저 빛을 발생시키는 부분이며, 크립톤램프에서 발생된 빛을 받아 원자들이 고 에너지 상태가 되었다가 원래상태로 돌아오면서 레이저 빛을 발생시킨다.

◎ Krypton arc lamp

Nd:YAG 봉에 빛 에너지를 공급해주는 부분이며 Quartz 유리관 안에 불활성 기체인 크립톤을 주입하고 양쪽 전극에 고전압을 가하여 아크(arc)를 발생시킴

◎ Polished gold cavity

단면이 타원형이며 길이 10~15cm, 폭 6~7cm 정도의 상자로 왼쪽그림에 나타낸 것처럼 안쪽에 크림톤 램프와 YAG 봉이 위치한다. 램프에서 발생된 빛은 cavity 내면에서 반사되어 YAG 봉에 집중되도록 설계되어 있고 반사율을 높이기 위해 내면을 금으로 코팅하여 놓는다.

dCollection @ chosun

◎ Cooling water

온도가 올라가면 YAG봉의 빛 발생효율이 감소하므로 냉각수를 이용해 램프에서 발생된 열을 제거하여 YAG 봉의 온도를 낮춰준다. 냉각수는 전기전도성이 없는 물(deionized water)을 사용한다.

◎ Mirrors

YAG봉에서 발생된 빛의 세기는 YAG봉의 길이에 따라 비례하여 증가하므로 길이가 일정한 YAG봉으로 같은 효과를 내기 위해 YAG봉의 양쪽에 거울을 설치하고 방사된 빛이 반복해서 YAG봉을 통과 하도록 한다. 이와 같은 방법으로 수십 혹은 수 백번 YAG봉을 통과한 빛은 세기가 충분히 세지고 어느 한계에 이르면 오른쪽의 95% 반사거울을 통해 5%의 빛을 레이저 출력으로 방출하게 된다. 이 5%의 출력된 빛을 실제 레이저 용접 등에 활용한다.

◎ Others

Mode aperture는 빔의 모양 조정하며, Q-switch는 펄스형태 빔 출력에 사용된다.[12]

2.1.2 Principles of MIG welding method

미그(MIG) 용접은 과심선의 지름 1.0 ~ 2.4mm의 전극 와이어를 일정한 속도로 토오치에 송급하여 와이어와 모재와의 사이에 아크를 발생시켜 용접하는 방법이다. 다음 그림 2.3은 미그(MIG) 용접의 장치 및 모식도를 나타낸 것으로 연속적으로 송급되는 전극 와이어가 아크 높은 열에 의해 용융되어 아크 기둥을 거쳐 용융지로 이행하게 되며, 용융부위는 가스노즐을 통하여 공급되는 보호가스에 의해 주위의 대기로부터 보호 한다. 미그(MIG)용접의 사용되는 보호가스의 종류에 따라 분류되며 순수한 CO_2를 사용하는 것을 (metal active gas : MAG)용접이라 하고, Ar 가스와 같은 물리적, 화학적으로 안정한 불활성 가스를 사용하는 것을 미그(metal inert gas : MIG)용접이라 부른다.[13] 미그(MIG) 용접장치에는 용접건(Welding gun), 케이블, 와이어 공급장치, 용접전원, 보호가스 등으로 나누며, 토치의 냉각에는 공냉식과 수냉식이 있다.

dCollection @ chosun

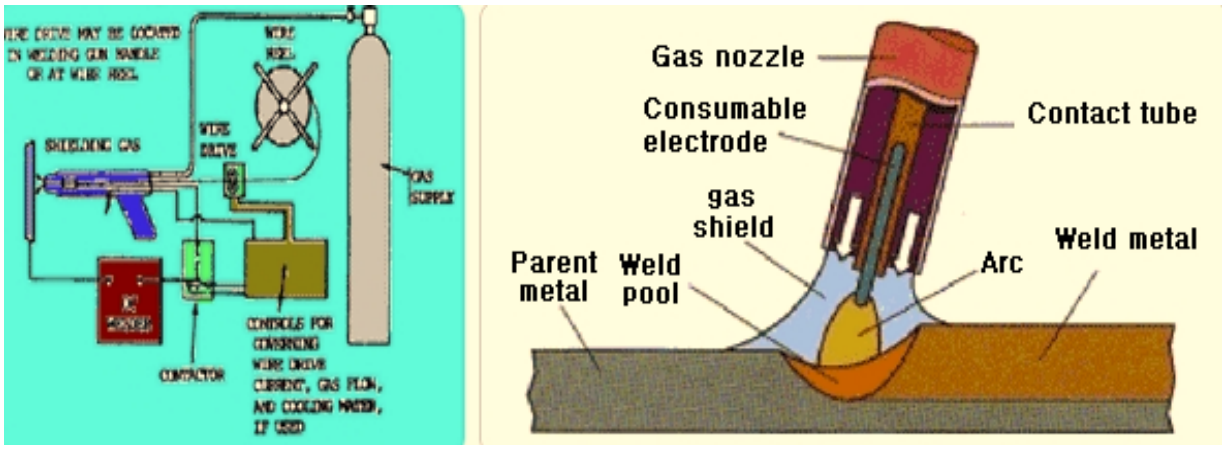


Fig 2.3 Schematic & Structure of MIG

2.2 Laser-Arc hybrid welding technology

2.2.1 Principles of Laser-Arc hybrid Welding

레이저 아크를 결합하여 하나의 프로세스로 이용하기 위한 최초의 시도는 1979년 영국 Imperial College의 W. Steen에 의해 이루어 졌다. 2kw CO_2레이저와 TIG를 이용하여 단독 레이저 용접대비 50%~100%의 용접속도 향상과 약 20%의 용입을 더 확보하면서 하이브리드 용접의 가능성을 보여줬다.[14] 레이저-아크 하이브리드 용접은 CO_2 레이저, YAG 레이저, 반도체 레이저, 파이버 레이저 등의 레이저와 TIG, MIG, MAG, 플라즈마 등의 아크열원을 복합함으로써 각기 단독의 열원에 의한 용접의 결점을 보완하여 고효율, 고품질의 용접법이다.[15] 그림 2.4는 레이저-아크 하이브리드 용접의 개략도와 시스템을 나타낸 것으로, 전극과 모재 사이에서 발생한 아크열에 의하여 모재가 가열되고 국부적으로는 재료의 용융이 발생하여 용융지가 형성된다. 용융지의 중심은 전자기력, 용융지 유동, 플라즈마의 팽창압력 및 가스의 압력 등에 의하여 물이 빠진 웅덩이와 유사하게 움푹 패인 형상이 된다. 이 위치에 레이저 빔을 조사하면 재료가 고온으로 가열되어 흡수율이 증대되며, 기하학적 형상으로도 레이저빔 집속에 유리해진다. 사용되는 전극에 따라 텅스텐과 같이 비 용융 전극을 사용하는 레이저-TIG 하이브

dCollection @ chosun

리드 용접, 자용성 전극(솔리드와이어)를 사용하는 레이저-MIG 하이브리드 용접으로 구별되며, 플라즈마 아크를 이용하는 레이저-PA 하이브리드 용접이 있다. 레이저빔은 용융지 내에 조사하는 것이 가장 유리하지만 CO_2 레이저의 경우 다량의 플라즈마가 발생하여 레이저빔의 진행을 방해하므로 용융지 중심에서 다소 거리를 두어야 한다. 하지만 레이저 복합 용접기술의 장점에도 불구하고 공정이 복잡하여 실용화에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 레이저 하이브리드 용접에 대한 명확한 용접 기구 해석 및 제반 문제점 극복을 위한 요소기술의 개발에 대한 폭 넓은 연구가 필요하다.[16]

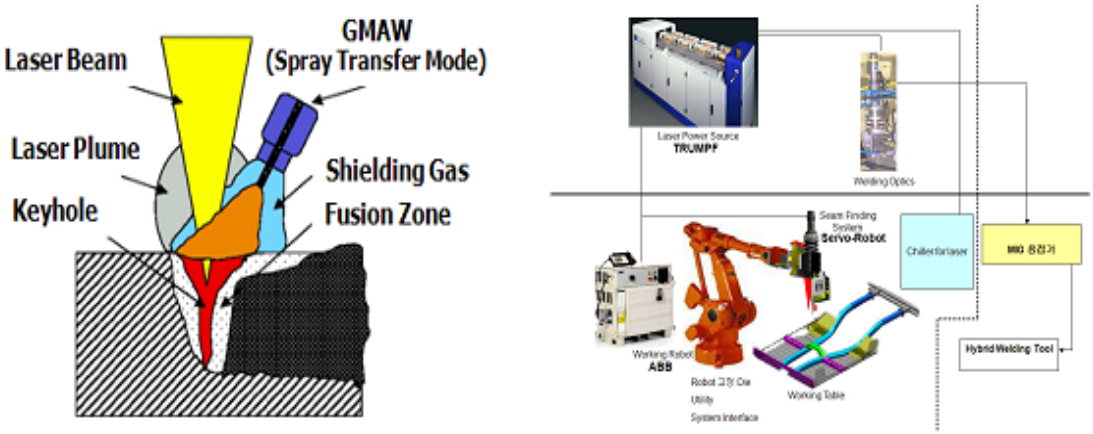


Fig 2.4 Laser-Arc hybrid welding & system

2.2.2 Advantage of Laser-Arc hybrid welding technology

레이저와 아크를 결합시킨 하이브리드 용접기술은 기존 용접 방법에 비해 용접 입열량을 33% 줄이면서 용접속도를 33% 증가시키는 효과를 과져온다. 용접 와이어를 사용하여 용착금속의 화학성분을 조절할 수 있어서 인장 강도와 피로 강도와 같은 기계적 성질의 개선이 가능하며, 용접품질이 좋아진다. 그림 2.5와 표 2.1은 기존의 아크용접과 레이저-아크 하이브리드 용접 그리고 용가재(filler wire)를 사용한 레이저 빔 용접을 비교한 것으로 레이저-아크 용접을 하면 용접 속도가 기존 용접보다는 5배 빠르며 용가를 사용한 레이저 빔 용접보다도 25% 높은 것을 알 수 있다. 효율적인 용접을 할 수 있는 시료의 두께도 3배 두꺼우며 용가재를 사용한 레이저 빔 용접보다도 33% 두꺼운 것을 알 수 있다. 한편 용접

dCollection @ chosun

이음부 루트 간격(root gap)과 용접 열에 의해 발생하는 열 변형은 레이저-아크 하이브리드 용접이 기존 용접보다 적은 것을 알 수 있다. [17]

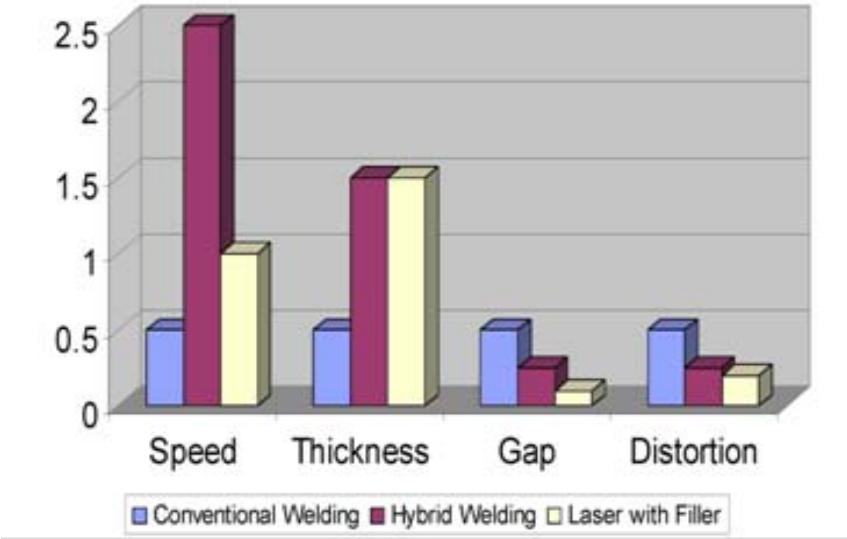


Fig 2.5 Relative comparison of weld processes

Table 2.1 Relative comparison of Laser-Arc hybrid welding

용접공정	서브머지드 아크	Laser+Arc	레이저+용가재
속도	100%	300%	150%
두께	<12mm	<15mm	<15mm
이음부 간격	2~5mm	0~1mm	0~0.4mm
변형	<1.5mm/m	<0.2mm/m	<0.1mm/m
야금적 특성	결정적이 아님	결정적이 아님	결정적임
피로 특성	양호	우수	결정적임

dCollection @ chosun

2.2.3 Development of hybrid welding technology

(1) Laser-TIG hybrid welding

◎ CO_2 Laser -TIG hybrid welding

CO_2 레이저는 절단, 열처리 및 용접 등 가공용으로 가장 먼저 상용화된 대 출력 레이저이다. 따라서 CO_2 레이저와 TIG의 하이브리드 용접에 관한 연구가 가장 먼저 상용화되었다. steen에 의하여 하이브리드 용접의 개념이 소개된 이후, 1985년 일본 GIRI의 Matsuda에 의하여 연구가 되었으며, 최대 출력 5kw CO_2 레이저 및 300A급 TIG용접기를 사용하여 레이저 출력, 아크전류, 용접속도, 레이저-아크간 거리 및 레이저빔의 초점거리 등에 관한 영향을 평가하였다. 레이저빔과 아크의 거리는 가급적 짧을수록 효과가 크며, 최대 용입을 보이는 초점거리는 아크 파워에 따라 변화하였다. 또한 하이브리드 용접에서는 고속 용접에서도 under cut 혹은 humping 비드가 형성되지 않았으며, 레이저 단독에 비하여 1.3~1.6 배의 심용입을 얻을 수 있다는 연구 결과를 발표 하였다.[18] 이후에도 1996년 독일 Fraunhofer Institute의 Beyer는 TIG 하이브리드 용접을 자동차의 TWB 판넬 제조에 적용하였다.[19]

◎ Nd:Yag Laser - TIG hybrid welding

대출력 Nd:Yag 레이저는 1990년대 이후에 용접에 본격적으로 이용되기 시작하였다. Nd:Yag 레이저는 CO_2레이저에 비하여 파장이 짧기 때문에 광섬유 전송이 가능하여 하이브리드 용접에 유리하여 최근에 가장 연구가 활발히 진행중이다. 1994년 독일 Fraunhofer Institute의 Dilthey에 의하여 2kw의 Nd:Yag 레이저와 250A의 TIG 아크를 복합하여 아크와 레이저 플라즈마의 상관성에 대하여 연구를 하여 표 2.2에서는 Nd:Yag 레이저 단독, TIG 하이브리드 및 하이브리드와 동일 출력의 Nd:Yag 레이저 단독에 의한 용접성능을 나타낸 것으로, 하이브리드 용접 시 약 5%의 추가 비용으로 1.7배 정도 절약되었으며, 용접속도 향상이 가능한 것으로 보고하였다.[20] 2000년 후에는 캐나다 Power lasers - advanced technologies center의 Hongping Gu는 3kw급 Nd:Yag 레이저와 300A급 TIG를 복합하여 70~90g/m^2의 아연이 양면에 도금된 두께 0.8mm 강판의 겹치기 이음

dCollection @ chosun

부를 용접하여, 5.5m/min의 용접속도에서도 아연증기에 의한 기공이 전혀 발생하지 않았으며, 레이저빔이 아크 중심에서 약간 떨어진 레이저 후행 용접이 적당하다는 것을 확인하였다.[21]

Table 2.2 Cost estimation between Laser and Hybrid welding

Source	Power	Costs	Efficiency	Speed
Nd:Yag	2kw	200US$	1~2%	3m/min
Nd:Yag-TIG	2+ 2kw	210US$	40~50%	5m/min
Nd:Yag	4kw	400US$	1~2%	6m/min

(2) Laser-MIG hybrid welding

◎ CO_2 Laser-MIG hybrid welding

1996년 일본 오사카대학의 N. be는 두께 16mm의 SS400 연강에 대한 하이브리드 용접 연구결과를 발표 하였으며, 용입깊이에 대한 보호가스의 유량, 용접속도, 루트간극 및 레이저빔과 아크 거리등의 영향을 평가하였으며, 레이저 선행과 아크 선행의 영향을 비교하였다.[22] 2000년 후 캐나다의 C.V.Hyatt는 레이저 출력 5kw MIG 전류 450A 및 용접속도 10.6mm/s의 조건에서 두께 25mm의 HY80 에 대한 하이브리드 용접 연구결과를 발표하여, 4패스 용접에 의하여 완전용입이 얻어 졌으며, 침상페라이트 조직이 생성되지 않고 마르텐사이트 조직으로 구성된 연구결과를 발표하였다.[23]

◎ Nd:Yag Laser -MIG hybrid welding

MIG 용접과 Nd:Yag 레이저에 의한 하이브리드 용접에 관한 연구는 TIG 용접에 비하여 늦게 시작되었다. 그 이유는 TIG에 비하여 MIG용접은 아크광의 강도가 셀뿐만 아니라 용접시 스패터가 발생하여 고가의 Nd:Yag 레이저 발진기에 손상을 줄 우려가 있기 때문이다. 하지만 최근에는 Nd:Yag 발진기의 보급이 증가하면서 발진기의 성능이 개선되어 레이저빔과 아크의 중심이 동일한 경우에도 전혀 문제가 발생하지 않았다. 이에 2001년 이후부터 독일 Fraunhofer의 E.Beyer

dCollection @ chosun

는 레이저 출력 3kw, MIG 전류 135A 및 용접속도 3.0m/min의 조건으로 S690QL 강재에 대한 하이브리드 용접 연구 결과를 발표하였다.[24] Laser zentrum hannover의 H.Hafer는 레이저 출력 3kw 및 450A급의 디지털 펄스 MIG 용접기를 사용하여 하이드로 포밍을 위한 아연도금강판의 파이프용접에 관한 연구결과를 발표하여, 레이저 단독용접과 비교하여 간극의 허용도가 크기 때문에 시스템의 안정성이 우수하며, 용접부 경화가 적어 성형성이 우수한 것으로 보고하였다.[25] 일본 닛산자동차의 K.Shibata는 알루미늄 차체에 하이브리드 용접을 발표 하였으며, 각각 2kw 및 3kw Nd:Yag 레이저 2대를 조합하여 레이저의 출력을 높이고 여기에 350A MIG 용접기를 추가하여 하이브리드 용접을 실시하여 우수한 전극허용도 빠른 용접속도로 필렛 이음부에 적합하다는 것을 보고하였다.[26]

2.2.4 Welding parameters of Laser-Arc hybrid welding

레이저-아크 하이브리드 용접공정은 레이저 용접과 아크 용접을 동시에 적용하여 하나의 용접부를 형성하는 공정이다. 이에 따라 두 가지 열원을 동시에 사용하므로 다양한 용접변수가 존재하여, 공정을 최적화하기 쉽지 않다. 따라서 용접변수를 최적화하기 위해 지속적인 연구가 진행되고 있으나 각각 적용되는 레이저와 아크 용접의 특성이 다르며 기타 변수들의 다양화로 적정화에 대한 연구가 부족한 상황이다.[27] 다음 그림 2.6은 Nd:YAG Laser와 MIG 용접을 결합한 Nd:YAG Laser-MIG hybrid 공정변수를 나타낸 것이다.

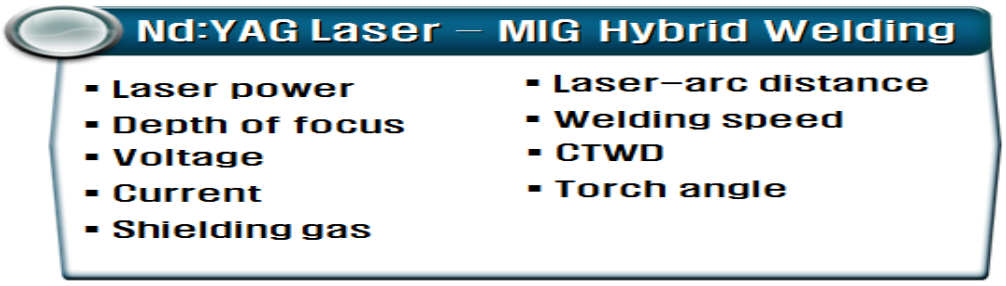


Fig 2.6 Welding parameter of Nd:YAG Laser-MIG hybrid welding

dCollection @ chosun

2.3 Characteristics of galvanized steel

2.3.1 Galvanized steel

아연도금강판은 1741년 프랑스 화학자인 Pall Jacgnes Melouin이 아연을 녹여 철 표면에 도금 시험한 기록이 남아 있으며, 1863년 프랑스 Sorel과 영국의 Crowford가 Flux의 발명특허를 취득하면서 아연도금이 산업화되었으며, 1846년 Moerwood와 Rogers는 도금가마 뒤에 롤을 부착함으로써 산업도금이 본격화 되었다. 아연도금강판은 순아연 도금 이외에 합금화 아연 도금 강판(Galvannealed steel sheets, GA), 갈바륨 강판 및 갈판 등의 아연 알루미늄 합금 도금 강판이 있다. 생활수준에 따라 강판에 대한 수요가 늘어나는 추세를 보이고 있으며 철의 최대 단점인 녹을 방지하고 철의 장점인 강성과 경제성을 최대한 살릴 수 있는 표면처리 강판의 수요가 크게 늘어나고 있다. 그 중 아연도금강판은 경제성 있는 도금성과 뛰어난 내구성을 갖고 있는 강판으로 산업계에서 각광받고 있다.

2.3.2 Type of galvanized steel

아연도금강판은 표면형태에 따라 레귤러 스팽글(Regular spangle), 미니마이즈드 스팽글(Minimized spangle), 제로 스팽글(Zero spangle), 고급 표면 아연도금강판(Extra smooth), 초 고급 표면 아연도금강판(Ultra smooth), 합금화 용융아연도금강판(Galvannealed), 고급 합금화 아연도금강판(Super galva), EGI대용 아연도금강판(Light GI) 등으로 구분 된다. 용도에 따라 구분하면 일반용 아연도금강판, 가공용 아연도금강판, 구조용 아연도금강판, 알루미늄도금강판, 아연도금후판, 합금화아연도금강판, 하이코팅 아연도금강판, UL아연도금강판 등이 있으며 형상으로 구분하면 Slited, Corrogated, Sheet, Coil 등이 있다. 그림 2.7과 같이 자동차 부품, 가정용 전자레인지 및 세탁기, 지붕 재료 등 다방면으로 사용되어지고 있다.

◎ Regular spangle

철의 부식방지를 이용한 용융아연도금강판으로 응고시 아연결정이 자연스럽게

dCollection @ chosun

꽃무늬를 형성하며, 수요자의 요구에 따라 아연 부착량을 선택할 수 있는 가공성과 일반 내식성이 대체로 양호하며 용도상 범용성이 있다.

◎ Minimized spangle

Regular spangle의 단점인 아연 층의 요철을 줄이고 외관을 미려하게 하기 위해 꽃무늬 크기를 최소로 줄인 아연도금강판이며 표면성, 상품성을 요구로 하는 제품에 사용된다.

◎ Zero spangle

고도의 표면성을 요하는 용도에 맞게 도금 욕조성을 조정하여 꽃무늬가 없는 미려하고 균일한 용융아연도금강판으로 도금층에 연(Pb) 성분이 없기 때문에 도장 후 내식성이 뛰어나며 아연부착 균일성과 미려함이 우수한 특성을 지니고 있다.

◎ Extra smooth

특별히 도장용으로 개발된 제품으로 대부분의 아연도금강판이 지니고 있는 미세한 줄무늬와 미세한 표면요철 등으로 나타나는 연신응력을 압연을 통해 제거한 아연도금강판으로 소재는 미니마이즈드 스팽글이나 제로 스팽글을 사용한다 미려한 도장면을 가질 수 있도록 표면 요철이 거의 없으나 광택이 저하되는 단점이 있으며, PCM용과 일반가정용 소재로 사용된다.

◎ Ultra smooth

고급용 도장소재로 고급표면아연도금강판이 지닌 단점인 광택을 살리고 표면이 보다 우수한 아연도금강판으로 미려한 도장면을 갖고 있으며 특히 유광 도장용으로 뛰어난 광택을 갖는 고급표면제품이다.

◎ Galvannealed, GA

용융아연도금강판이 냉연강판보다 용접성이 저하되고 있는 단점을 보완하고 간단한 전처리 설비로 우수한 도장성을 갖도록 개발된 제품으로 아연 도금 층을 철과 아연의 합금으로 변화 시킨 것으로 자동차 부품, 세탁기 및 전자레인지 등에 사용된다.

dCollection @ chosun

◎ Super galva

합금화용융아연도금강판의 단점인 아연 분말성을 극소화시키고 미려한 표면을 갖게 만든 강판으로 내식성을 요구하며 고 표면성을 요구하는 가전제품이나 자동차 부품 등에 사용된다.

◎ Light GI

전기아연도금강판에 대응하는 용융아연도금 박판으로 고광택 표면의 용융아연도금강판이다. EGI에 대응하는 표면성, 용접성, 가공성을 지니고 있으며 고광택용 도장소재 측면에서 EGI보다 우수한 표면성을 가지고 있다.

(a) Automotive parts

(b) Material for roof

(c) Furniture

(d) Home appliances

Fig 2.7 Application of galvanized steel

dCollection @ chosun

Chapter 3
Experiment method of MIG, Nd:YAG Laser and Nd:YAG Laser-MIG Hybrid welding process

3.1 Respective welding system

3.1.1 MIG welding equipment

본 연구에서 사용되어진 MIG 용접기는 DAIHEN사의 CPDP 500 펄스형 MIG 용접기로써 전류의 파형을 제어하는 펄스 전류와 베이스 전류로 구성되는 펄스 파형을 반복으로 전류가 흐르도록 하여 아크용접을 실시하는 것을 말한다. 펄스 아크 용접은 펄스 전류를 사용하므로 직류 전류에 비해 모재에 가해지는 입열량이 작고 주기적인 금속 이행으로 인하여 용접부의 품질이 향상시킨다. 특히 저전류 용접시 용접부의 용접성이 일반 직류 미그용접에 비해 우수하므로 구조물의 경량화를 위한 박판재료 용접에 적용하여 모재의 열 변형과 고온균열의 발생을 방지할 수 있는 장점 있어 본 실험 장비를 사용 하였다. 다음 그림 3.1과 표 3.1에서 MIG 용접기 장치와 구체적인 사양을 나타내었다. 또한, 얇은 박판을 용접하기 때문에 와이어는 직경 0.8mm 솔리드 와이어를 사용 하였다.

Fig 3.1 MIG welding equipment

dCollection @ chosun

Table 3.1 Specifications of MIG welding equipment

Model	input power (kVA)	Frequency (Hz)	Max output current (A)	Max output volt (V)	Temp Rise (°F)
CPDP-500	36.6	50/60	500	45	320

3.1.2 Nd:YAG Laser welding equipment

본 연구에서 사용되어진 레이저 용접기는 연속파(CW: contiuous wave) Nd:YAG Laser 용접장비를 이용하였다. Nd:YAG Laser는 빔과 시편과의 상호작용이 우수하고 금속표면에서 반사도(Reflectance)가 적어 여러 분야에 사용되어지고 있는 대표적인 Laser 용접기이다. 다음 그림 3.2와 표 3.2는 Trumpf사 모델명 HL3006D Nd: YAG Laser 장비와 구체적인 사양을 나타낸 것이다. 레이저 최대 출력 3kw, 빔 품질 25mm·mrad 레이저 광 케이블 600μm이다.

Fig 3.2 Nd:YAG Laser welding equipment

dCollection @ chosun

Table 3.2 Specifications of Nd:YAG Laser Welding equipment

Model	HL3006D	
Type	CW Nd:YAG Laser	
Function	Unit	Spec.
Wave length of the laser light	nm	1064
Maximum output power	W	4000
Laser power applied to workpiece	W	3000
Minimum output power	W	30
Beam quality	mm·mrad	25
Laser light cable	㎛	600
Length of laser light cable	m	30
Power consumption	kw	92
Cavity number	EA	6
Cooling water temp. range	℃	6-17
Weight	kg	3968
Dimensions W×H×D	mm	3850×1630×770
Ambient temp.	℃	10-40

dCollection @ chosun

3.1.3 Nd:YAG Laser-MIG Hybrid Welding equipment

Laser-Arc hybrid 용접에서 사용되어진 장비로는 그림 3.3과 같이 ABB사의 6-Axis 로봇에 Nd: YAG Laser 와 MIG 토치를 연결하여 실험을 실시하였다. MIG 용접장비와 Laser 용접장비는 전절에서와 같이 동일한 장치를 사용하였다. 6-Axis 로봇은 튼튼한 구조와 독특한 모션 컨트롤로 인해 짧은 주기 시간에 가속과 지연을 최적화 해주며 패스의 정확성과 위치 반복 정밀도가 우수하다.

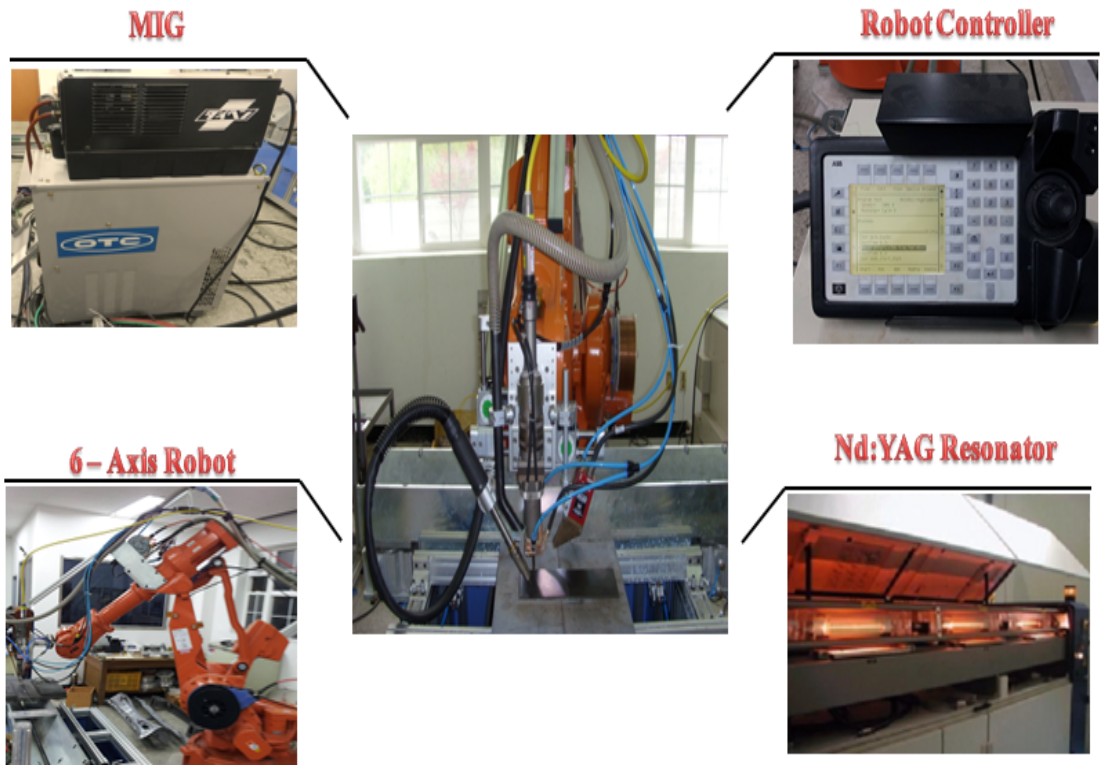


Fig 3.3 Nd:YAG Laser-MIG hybrid welding equipment

dCollection @ chosun

3.2 Objective material

본 연구에서 사용되어진 시험편은 인장규격 ASTM E8M-04에 의거하여 다음 그림 3.4와 같이 길이 150mm, 폭 75mm, 두께 0.65mm시험편을 제작하여 MIG, Laser 그리고 Laser-Arc hybrid 맞대기 용접을 실시하였으며, MIG 용접시 와이어는 KC-28 0.8mm 솔리드 와이어를 사용하였다. 다음 표 3.3과 표 3.4에서는 아연도금강판 화학적 조성치와 기계적 특성치를 나타내었으며, 솔리드 와이어 KC-28 화학적 조성치를 나타내었다.

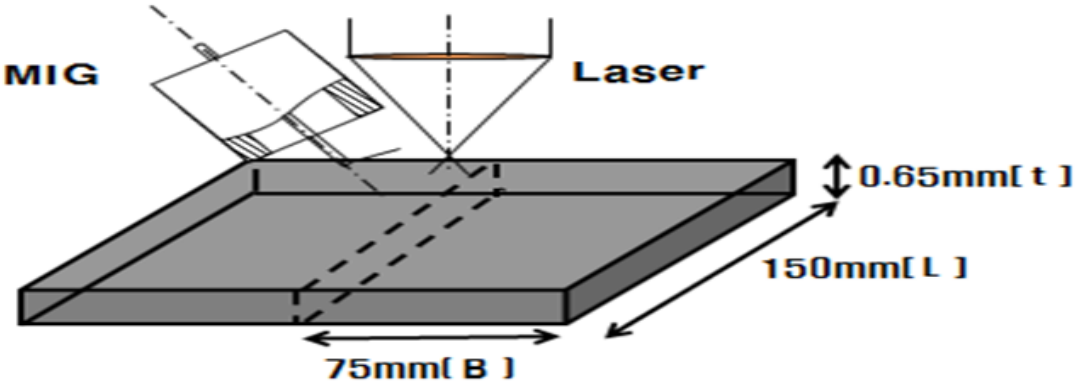


Fig 3.4 Dimension of specimen for main experiment

Table 3.3 Chemical compositions in SGACC 60/60 and KC-28 Solid wire

Material	Chemical Composition(Wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	S-AL
SGACC 60/60	0.0013	0.003	0.094	0.01	0.005	0.05
KC-28	0.08	0.5	1.05	0.014	0.01	-

Table 3.4 Mechanical properties of SGACC 60/60

Material	Y.S(N/mm²)	T.S(N/mm²)	Elongation(%)
SGACC 60/60	152	299.1	45

dCollection @ chosun

3.3 Experimental procedure

3.3.1 Respective B.O.P test

각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc Hybrid 맞대기 용접 조건을 선정하기 위해서 각각 B.O.P(Bead on plate)실험을 실시하였다. MIG 용접에서는 전압과 전류 조건을 선정하기 위해 전압 11~12V와 전류 100~ 130A, Laser 용접에서는 레이저 출력 조건을 선정하기 위해 레이저 출력 1.0 ~ 1.8kw 그리고 Laser-Arc Hybrid 용접에서는 레이저 출력 1.3kw 전압 12V로 고정시킨 상태에서 전류 110~130A에서 실험 조건을 고려하여 가장 적절한 변수를 선정하였다. 보호가스 유량은 각각의 용접 B.O.P 실험을 통하여 선정하였다. 다음 표 3.5, 3.6 그리고 3.7에서는 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 용접 B.O.P 실험조건을 나타내었다.

Table 3.5 B.O.P conditions of MIG welding

Voltage (V)	Current (A)	Welding speed (m/min)	Shielding gas	Gas flow (l/min)
11~12	100 ~ 120	1.6	Ar	15

Table 3.6 B.O.P conditions of Laser welding

Peak power (kw)	Focal depth (mm)	Welding speed (m/min)	Shielding gas	Gas flow (l/min)
1.0 ~ 1.8	0	2.0	Ar	15

dCollection @ chosun

Table 3.7 B.O.P conditions of Laser-Arc hybrid welding

Welding speed(m/min)		2.2
Laser-Arc distance(mm)		4
Laser	Peak power(kw)	1.3
	Defocusing depth	0
	Shielding gas	Ar
	Shielding gas flow(l/min)	15
MIG	Voltage(V)	12
	Current(A)	110~130
	C.T.W.D(mm)	20
	Torch angle(Deg)	30
	Shielding gas	Ar
	Shielding gas flow(l/min)	15

3.3.2 Respective butt welding

각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc Hybrid 용접의 B.O.P(Bead on plate) 실험을 실시하여 주요 변수의 조건을 선정하고 맞대기 용접시 2.0 ~ 3.0m/min 속도를 같게 하여 각 공정별 상·하부 비드 및 횡단면부 용입 특성을 고찰하였다. 또한, 용입 깊이 및 넓이를 측정하여 비교 분석 하였다. 다음 표 3.8과 3.9 그리고 3.10은 각 공정별 맞대기 용접의 실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 3.8 Conditions of MIG welding

Voltage (V)	Current (A)	Gap size (mm)	Welding speed (m/min)	Shielding gas	Gas flow (l/min)
12	130	0.5	2.0 ~ 3.0	Ar	15

dCollection @ chosun

Table 3.9 Conditions of Laser welding

Peak power (kw)	Focal depth (mm)	Gap size (mm)	Welding speed (m/min)	Shielding gas	Gas flow (l/min)
1.3	0	0.5	2.0 ~ 3.0	Ar(95%)+CO_2(5%)	15

Table 3.10 Conditions of Laser-Arc hybrid welding

Welding speed(m/min)		2.0 ~ 3.0
Laser-Arc distance(mm)		4
Gap size(mm)		0.5
Laser	Peak power(kw)	1.3
	Defocusing depth	0
	Shielding gas	Ar
	Shielding gas flow(l/min)	15
MIG	Voltage(V)	12
	Current(A)	110
	C.T.W.D(mm)	20
	Torch angle(Deg)	30
	Shielding gas	Ar+CO_2
	Shielding gas flow(l/min)	15

dCollection @ chosun

3.3.3 Effect of welding parameters on weldability

레이저-아크 하이브리드 공정의 특성상 레이저,아크 및 하이브리드 공정변수가 각각 존재한다. 이에 따라 공정변수가의 수가 많아 산업현장에서 최적화가 쉽지 않다. 이에 아연도금 강판의 Nd:YAG Laser-MIG 하이브리드 용접에서 공정변수 레이저-아크간의 거리, 보호가스 조성비(Ar+CO_2) 그리고 전류와 용접속도에 따른 용접비드 특성을 고찰하였다. 다음 표 3.11은 공정변수별 하이브리드 용접 조건을 나타내었으며, 그림 3.5와 같이 4000 frame/sec로 고속카메라 촬영을 실시하여 변수에 따른 용융풀 현상, keyhole 형성 그리고 용접 결함 및 용입현상을 고찰하였다.

Table 3.11 Conditions of Laser-Arc hybrid welding parameters

Welding parameters		L.A.D	Shielding gas	Currents & speeds
Welding speed(m/min)		2.4	2.7	2.0 ~ 3.0
Laser-Arc distance(mm)		2 ~ 10	4	4
Gap size(mm)		0	0	0
Laser	Peak power(kw)	1.3	1.3	1.3
	Defocusing depth	0	0	0
	Shielding gas	Ar	Ar	Ar
	Shielding gas flow(l/min)	15	15	15
MIG	Voltage(V)	12	12	12
	Current(A)	120	120	110 ~ 130
	C.T.W.D(mm)	20	20	20
	Torch angle(Deg)	30	30	30
	Shielding gas	Ar	Ar, Ar+CO_2	Ar
	Shielding gas flow(l/min)	15	15	15

dCollection @ chosun

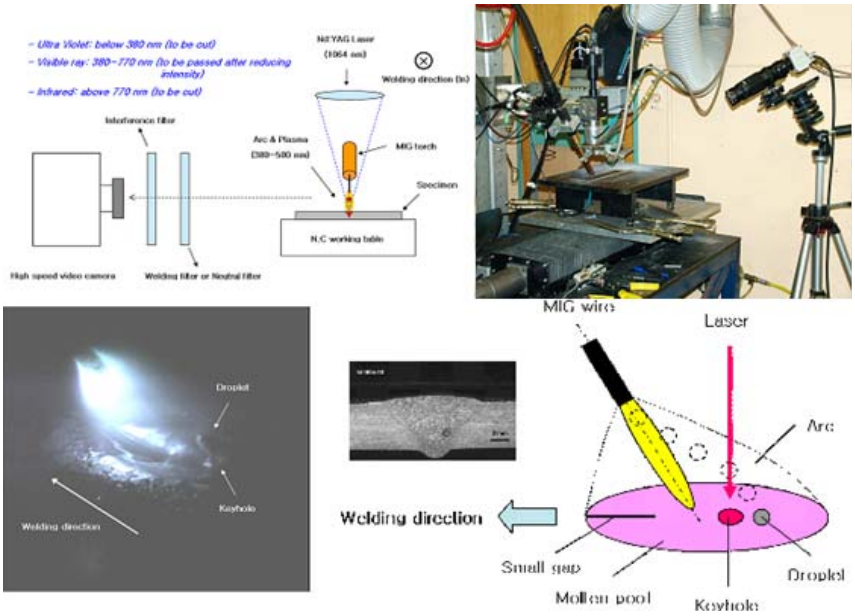


Fig 3.5 High speed camera equipment

3.4 Evaluation of mechanical and metallurgical characteristics

3.4.1 Tensile test

각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 용접부와 전류와 속도에 따른 hybrid 용접부의 인장 강도를 평가하기 위해 그림 3.6과 같이 Dongil-Simaz사 EHF-EG200KN-40L 유압식 인장 시험 장치와 WINSERVO 프로그램을 사용하였다. 인장 시험편은 ASTM E8M-04 규격에 의거하여 시험 속도 0.08333mm/sec로 실험을 실시하였다. 다음 표 3.12는 시험편의 규격을 나타내었다.

dCollection @ chosun

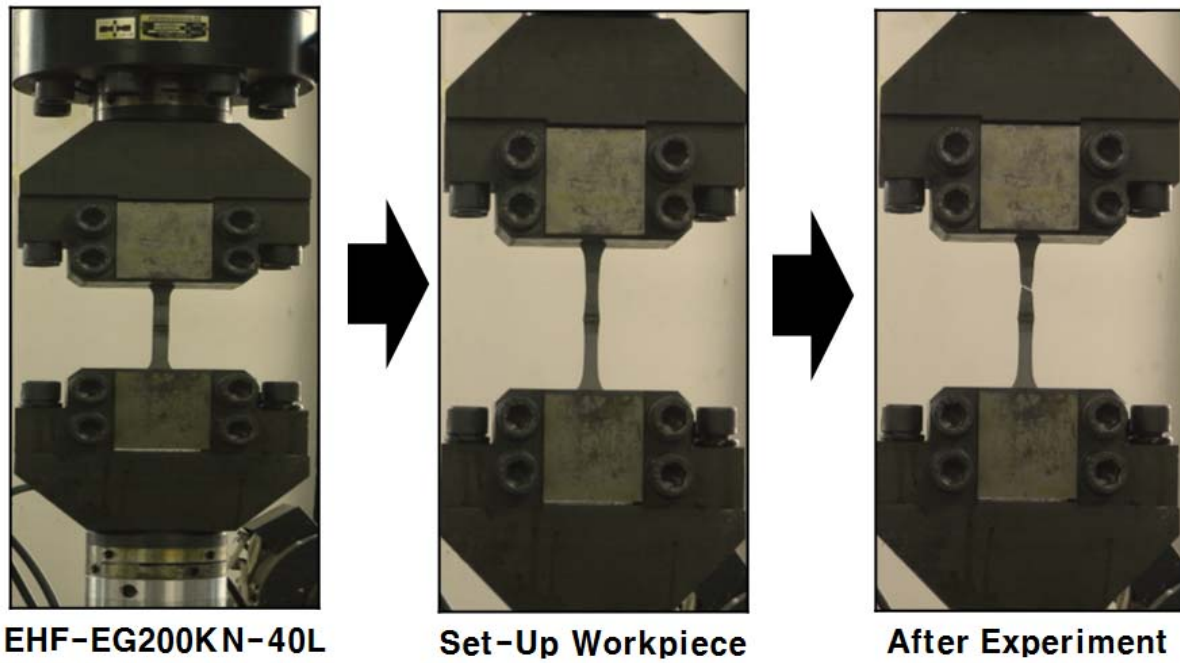
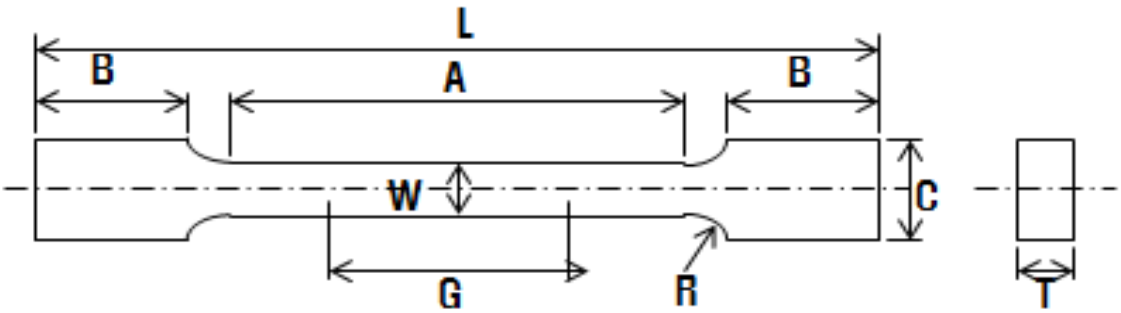


Fig 3.6 Process of tensile test

Table 3.12 Dimension of tensile test specimen



Standard	나비 (W)	표점거리 (G.L)	평행부 길이 (P)	어깨부 반지름 (R)	두께 (t)	물리부나비 (B)
ASTM E8M-04	12.5 mm	50 mm	60 mm	20 mm	0.65 mm	20 mm

dCollection @ chosun

3.4.2 Hardness test

각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 용접부와 전류와 속도에 따른 hybrid 용접부의 경도 측정은 그림 3.7과 같이 Akashi사의 모델명 HM-112의 비커스 경도 시험기를 사용하였다. 현미경 배율은 50μm이며, 135° 다이아몬드 피라미드 입자를 사용하여 접합방향 수직인 단면을 절단하여 미세연마 후 표 3.13, 3.14와 같이 에칭을 실시한 후 하중 500gf, 하중시간 10sec조건으로 각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 용접부 상부표면으로부터 0.325mm 지점에서 0.2mm간격으로 경도를 측정 하였으며, 전류와 속도에 따른 hybrid 용접부 상부표면으로부터 0.1mm, 0.3mm 그리고 0.5mm 지점에서 0.1mm 간격으로 경도를 측정하였다.

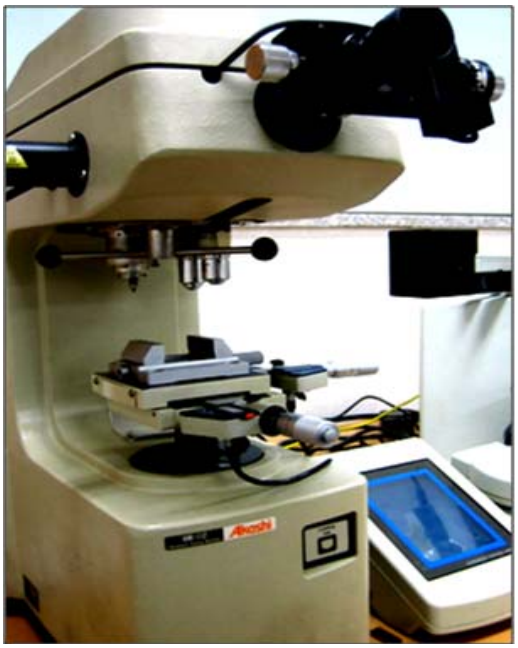


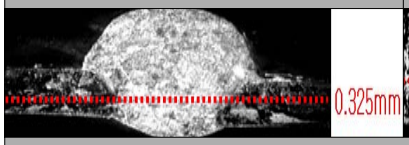
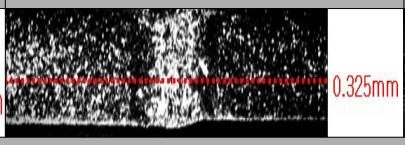
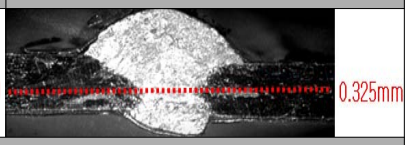
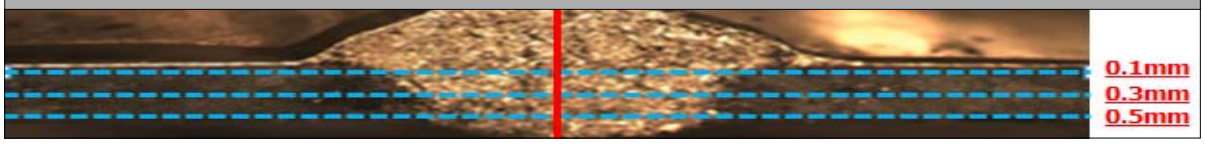
Fig 3.7 Micro vickers hardness test

dCollection @ chosun

Table 3.13 Hardness testing conditions

	Values
Model	Akashi HM-112
Type	Micro vickers hardness tester
Lode	0.5kgf
Loading time	10sec

Table 3.14 Schematics on the hardness testing positions

MIG	Nd:YAG Laser	Hybrid
		
Hybrid welded joints for current & welding speed		
		

dCollection @ chosun

3.4.3 Microstructure analysis

각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 용접부와 전류와 속도에 따른 hybrid 용접부의 미세조직 관찰을 하기위하여 용접부 횡단면을 그림 3.8과 같이 광학현미경(Optical microscope)을 이용하여 조직을 관찰하였다. 용접부의 조직을 관찰하기위해 미세 연마 후 메탄올(Methanol) 92mml + 질산(Nitric acid) 8mml 혼합시킨 나이탈(Nital) 8% 용액을 이용하여 MIG 용접부 7sec, Laser 용접부 30sec 그리고 Laser-Arc hybrid 용접부 15sec 동안 에칭 후 미세조직을 관찰하였다.

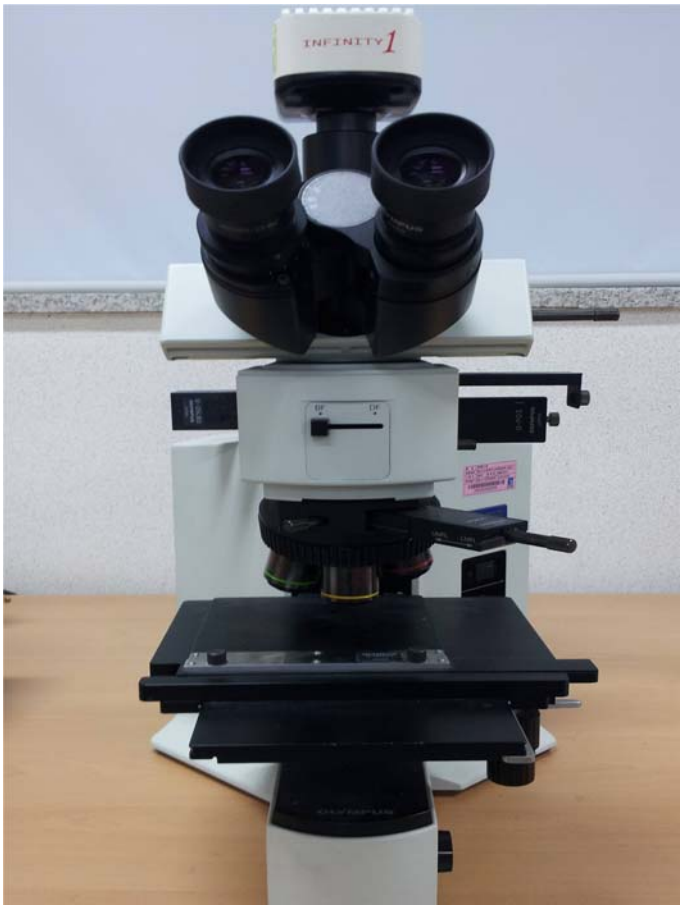


Fig 3.8 Optical microscope

dCollection @ chosun

Chapter 4
Experimental result & Discussion

4.1 Respective B.O.P result

4.1.1 Experiment by MIG welding

미그용접(Metal Inert Gas Arc Welding)의 최적의 용접조건을 선정하기위해 표 4.1과 같이 전압(Voltage) 11~12V 전류(Current) 100~120A 속도 1.6m/min에서 B.O.P(Bead On Plate)용접을 실시하여 비드형상을 관찰하였다. 전압 11V 전류 100~120A에서는 물방울처럼 용융되어 비드가 안정적이지 않았으며, 다량의 스패터가 발생한 것을 확인 할 수 있었다. 하지만, 전압 12V 전류 100A를 제외한 110~120A에서는 고른 피드표면과 소량의 스패터가 발생하였지만, 비드 형상에는 영향을 주지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4.1 Bead profiles of MIG welding for various voltages & currents

Welding conditions		Surface bead shape
Voltage	Current	
11V	100A	
	110A	
	120A	
12V	100A	
	110A	
	120A	

dCollection @ chosun

4.1.2 Experiment by Laser welding

레이저용접(Laser Welding)의 최적의 용접조건을 선정하기위해 표 4.2와 같이 레이저 출력 1.0~1.8kw 속도 2.0m/min에서 B.O.P(Bead On Plate)용접을 실시하여 비드형상을 관찰하였다. 레이저 출력 1.0kw에서는 비드형상은 고르게 나타났지만 입열량이 부족하여 부분 용입이 나타났으며, 출력 1.8kw에서는 과도한 입열량으로 비드표면이 녹아내리는 용락현상을 관찰 할 수 있었다. 출력 1.3~1.5kw에서는 스패터가 전혀 발생 되지 않았다. 또한, 적절한 입열량으로 인해 비드형상도 고르게 나타났으며, 완전용입이 된 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4.2 Bead profiles of Laser welding for peak power

Peak power	Surface bead shape
1.0kw	
1.3kw	
1.5kw	
1.8kw	

dCollection @ chosun

4.1.3 Experiment by Laser-Arc hybrid welding

레이저-아크 하이브리드 용접(Laser-Arc Hybrid Welding)에서 아크 선행일 경우에는 아크 즉 전압과 전류에 따라 비드형상에 큰 영향을 준다. 이에 본 연구에서 사용되어진 레이저-아크 하이브리드 용접 장비는 아크가 선행하기 때문에 전류(Current)에 대해 표 4.3과 같이 전압 12V 레이저 출력 1.3kw 전류 110~130A 속도 2.2m/min에서 B.O.P(Bead On Plate)용접을 실시하여 비드형상을 관찰하였다. 레이저 출력(Peak Power) 1.3kw, 전압 12V 전류 110~130A에서 안정적인 비드형상을 관찰 할 수 있었다. 하지만, 130A에서는 입열량이 증가하여 용접부 넓이가 넓어 졌으며, 비드 표면에 스패터가 발생하였지만 용접 단면 형상에는 영향을 주지 않았다.

Table 4.3 Bead profiles of Laser-Arc hybrid welding for various currents

Welding conditions			Surface bead shape
Peak power	Voltage	Current	
1.3kw	12V	110A	
		120A	
		130A	

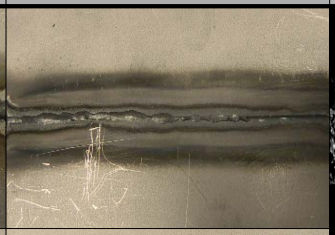
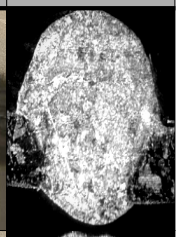
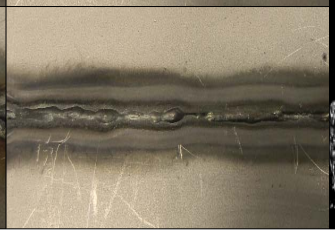
dCollection @ chosun

4.2 Respective butt welding result

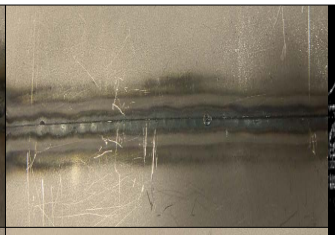
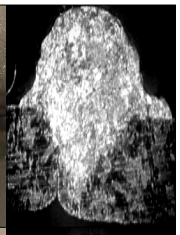
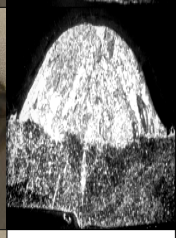
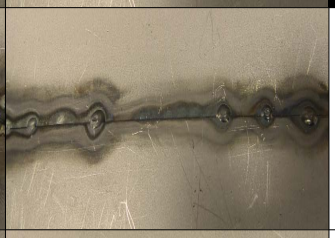
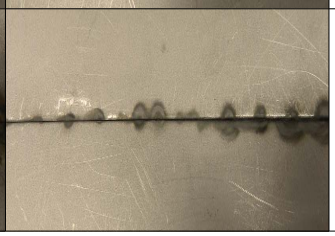
4.2.1 Experiment by MIG welding

미그 B.O.P 용접 전압(Voltage) 12V에서 최적 조건을 선정하여 표 4.4와 같이 전류(Current) 130A 용접속도(Welding Speed) 2.0~3.0m/min에서 맞대기 용접(Butt Welding)을 실시하여 상·하부 비드형상과 횡단면부 용입특성을 관찰하였다. 2.0~2.2m/min에서는 상부 비드는 안정적인 형상을 나타냈지만 하부 비드는 고르지 못한 비드형상이 나타났다. 완전 용입은 되었지만 용접부가 넓어짐에 따라 열영향부가 커진 것을 횡단면부 마크로 사진을 통해 관찰 되었다. 2.4m/min 상부 비드는 안정적인 형상이 나타났지만, 기공(Blow hole) 상부비드 형상에서 관찰 되었으며, 하부 비드와 횡단면부 마크로 사진에서와 같이 완전용입이 되지 않았다. 또한, 용접속도가 증가함에 따라 2.6m/min에서는 상·하부 비드형상이 안정적이지 못하며, 용입이 제대로 이루어지지 않는 것을 횡단면부 마크로 사진을 통해 관찰 되었다. 3.0m/min에서는 다량의 스패터로 인해 비드표면이 그을음이 발생하였으며, 상·하부 비드형상이 전혀 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4.4 Bead & Cross section profiles of MIG welding

Welding conditions		Top bead	Bottom bead	Cross section
Voltage current	Welding speeds			
12V 130A	2.0m/min			
	2.2m/min			

dCollection @ chosun

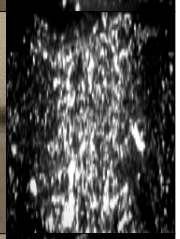
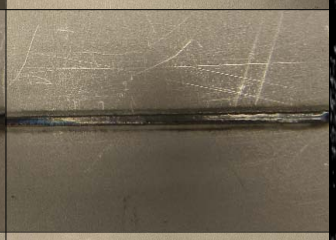
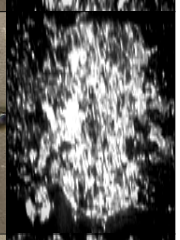
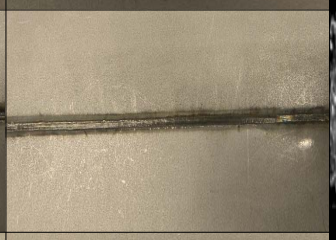
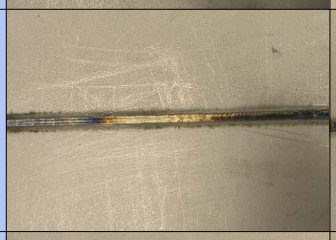
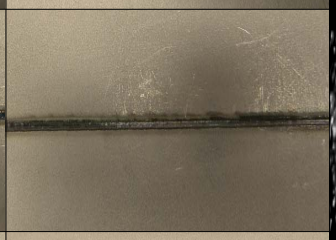
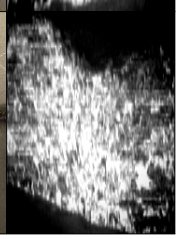
	2.4m/min			
	2.6m/min			
	2.8m/min			-
	3.0m/min			-

4.2.2 Experiment by Laser welding

레이저 B.O.P 용접 레이저 출력(Peak Power) 1.3kw에서 최적 조건을 선정하여 표 4.5와 같이 용접속도(Welding Speed) 2.0~3.0m/min 갭 0.5mm에서 맞대기 용접(Butt Welding)을 실시하여 상·하부 비드형상과 횡단면부 용입특성을 관찰하였다. 용접속도 2.0~3.0m/min에서 모두 안정적인 상·하부 비드형상이 관찰되었지만 횡단면부 모두 정렬불량(Linear Misalignment) 틀어진 용접부가 형성된 것을 마크로 사진을 통해 관찰되었다. 이에 레이저 용접의 깊고 좁은 용접특징 때문에 갭이 발생하면 산업현장에서는 적용하기가 어려운 것으로 판단된다. 또한, 2.4m/min에서는 제대로 용입이 이루어지지 않는 것을 횡단면부 마크로 사진을 통해 관찰 되었다.

dCollection @ chosun

Table 4.5 Bead & Cross section profiles of Laser welding

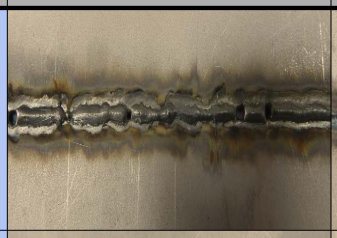
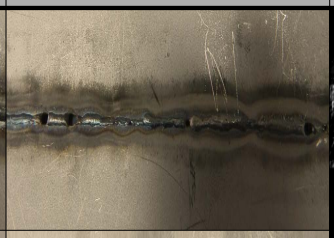
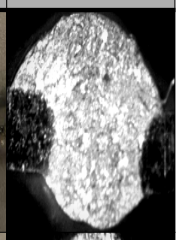
Welding conditions		Top bead	Bottom bead	Cross section
Peak power	Welding speeds			
1.3kw	2.0m/min			
	2.2m/min			
	2.4m/min			
	2.6m/min			
	2.8m/min			
	3.0m/min			

dCollection @ chosun

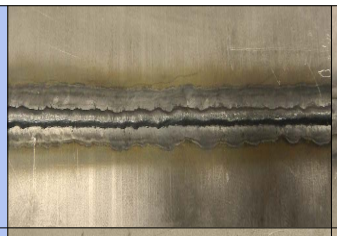
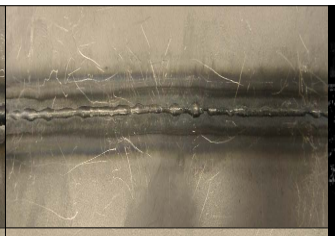
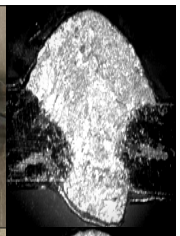
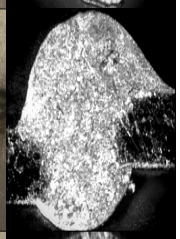
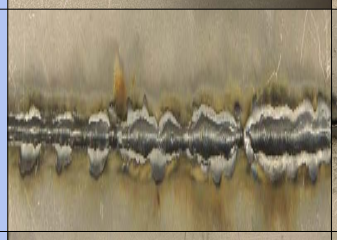
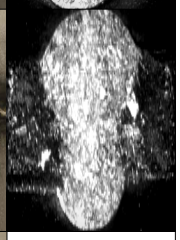
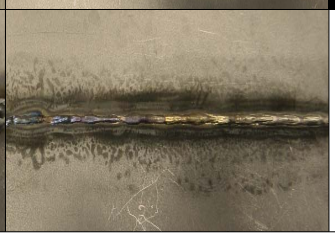
4.2.3 Experiment by Laser-Arc hybrid welding

레이저-아크 하이브리드 B.O.P 용접 레이저 출력(Peak Power) 1.3kw 전압(Voltage) 12V 전류(Current) 110A에서 최적 조건을 선정하여 표 4.6과 같이 용접속도(Welding speed) 2.0~3.0m/min 갭 0.5mm에서 맞대기 용접(Butt Welding)을 실시하여 상·하부 비드형상과 횡단면부 용입특성을 관찰하였다. 용접속도 2.0m/min에서는 과도한 입열량으로 인해 용접부가 녹아내리는 용락현상이 상·하부 비드 표면에서 나타났으며, 용입부 넓이 또한 가장 넓은 것을 확인 하였다. 2.4m/min에서는 가장 안정적인 상·하부 비드형성과 완전 용입이 된 것을 횡단면부 마크로 사진을 통해 관찰 되었다. 하지만 2.6m/min에서는 정렬 불량(Linear Misalignment)가 발생 하였으며, 속도가 증가하여 입열량 감소로 인해 2.8m/min에서는 안정적인 상·하부 비드형성이 되지 않았지만 횡단면부를 관찰한 결과 완전용입 된 것을 확인하였다. 하이브리드 용접의 아크 열원과 레이저 열원의 시너지 효과로 갭이 발생하여도 건전한 용입부 형성이 된 것으로 판단되어 산업현장에 적용하기가 용이하다고 판단된다.

Table 4.6 Bead & Cross section profiles of Laser-Arc hybrid welding

Welding conditions		Top bead	Bottom bead	Cross section
power Voltage current	Welding speeds			
1.3kw 12V 110A	2.0m/min			
	2.2m/min			

dCollection @ chosun

	2.4m/min			
	2.6m/min			
	2.8m/min			
	3.0m/min			-

dCollection @ chosun

4.2.4 Comparison result of respective welding

각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 맞대기 용접을 실시하여 그림 4.1과 같이 용입깊이(Penetration Depth), 넓이(Width)를 비교 분석하였다. 먼저 용입깊이에서는 하이브리드 용접 1.3kw 12V 110A 2.0m/min에서 용입깊이 1.109mm이지만 용락 현상이 발생하여 가장 깊다고 판단하기가 어렵다. 이에 하이브리드 용접 1.3kw 12V 110A 2.2m/min 용입 깊이 1.045mm로 가장 깊은 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 각 공정별 용접부 용입깊이를 평균값으로 비교해 보았을 때 평균 약 미그 용접부, 레이저 용접부 용접부에 비해 하이브리드 용접이 평균 3배, 2배 정도 깊은 것은 아크 열원에 의해 용융되어 있는 지점에 레이저 열원 조사되기 때문에 키홀 형성으로 용입성이 깊은 것으로 판단된다. 넓이부분에서 MIG 용접에서 평균 2.8mm로 가장 넓은 용접부를 형성 하였으며, 레이저 용접의 깊고 좁은 용접성 때문에 0.6mm로 넓이가 가장 좁은 것을 확인 하였지만 정렬 불량이 발생하여 적절한 용접부 형성이 되지 않았다.

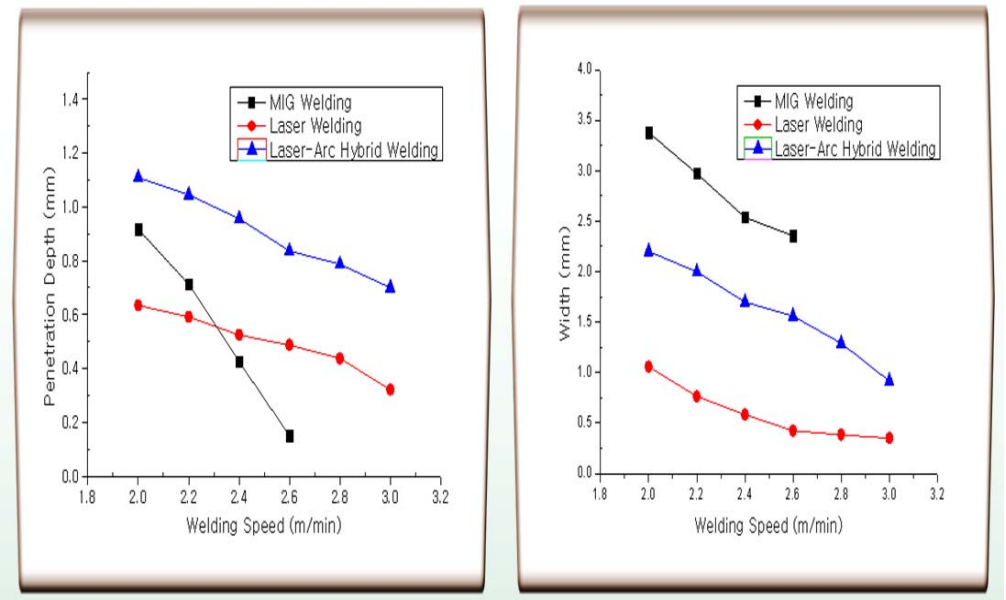


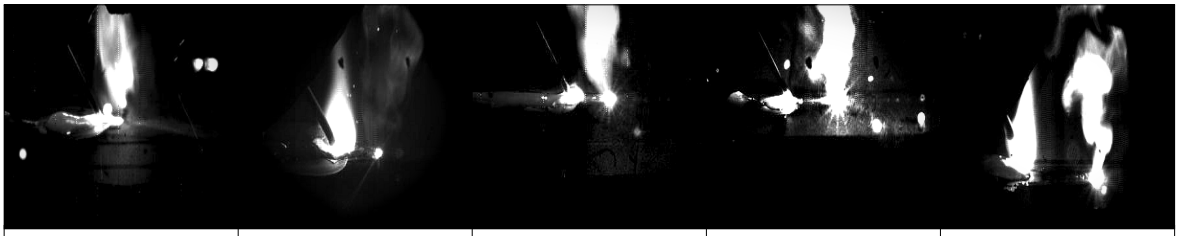
Fig 4.1 Comparison of penetration depth & width

dCollection @ chosun

4.3 Effect of hybrid welding parameters on weldability

4.3.1 Effect of Laser - Arc distance parameters

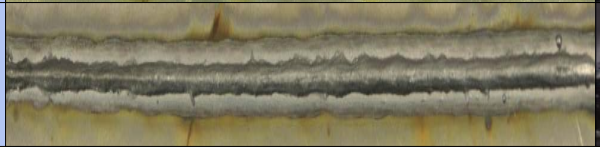
레이저-아크간의 열원간 거리 2~10mm에서 그림 4.2, 표 4.7과 같이 4000frame/sec로 고속촬영과 비드형상 그리고 횡단면부 용입특성을 관찰하였다. 열원간 거리 4mm 떨어진 위치에서 안정적인 비드형성과 키홀 형성으로 인해 용입성이 가장 깊었으며, 8mm일 때부터 아크의 용융풀과 레이저 플라즈마가 닿지 않는 것을 고속카메라 촬영을 통해 관찰 되었다. 또한 고른 비드형성과 용입성 또한 좋지 않는 것을 확인 하였다.



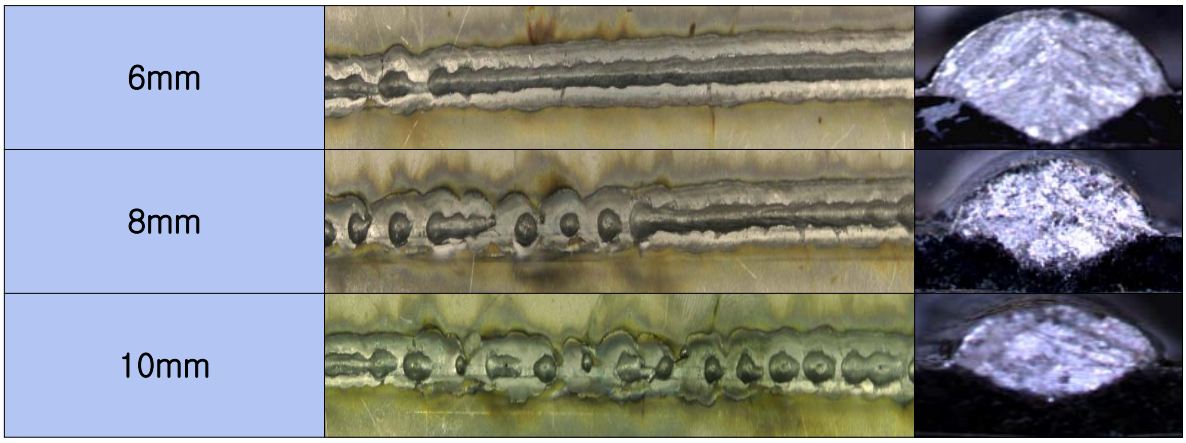
2mm	4mm	6mm	8mm	10mm

Fig 4.2 High speed photography of Laser-Arc hybrid welding for various LAD

Table 4.7 Bead surface appearance & cross section of Laser-Arc hybrid welding for various Laser-Arc distance

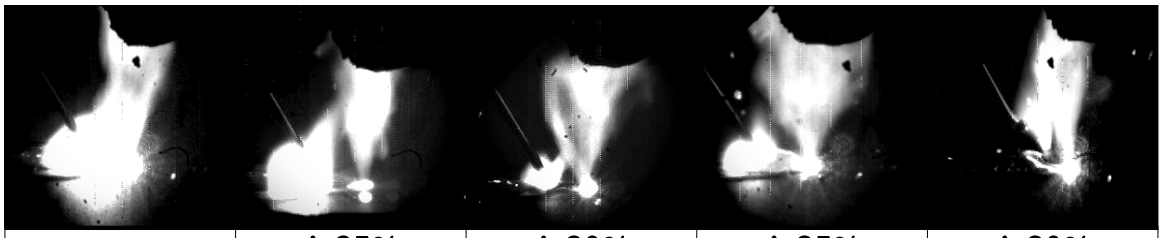
L.A.D	Surface bead shape	Cross section
2mm		
4mm		

dCollection @ chosun



4.3.2 Effect of shielding gas parameters

보호가스 Ar100%, 혼합가스 Ar(95~80%), CO_2(5~20%)에서 그림 4.3 표 4.8과 같이 4000frame/sec로 고속촬영과 비드형상 그리고 횡단면부 용입특성을 관찰하였다. 혼합가스 비율 Ar95%+$CO_2$5%, Ar90%+$CO_2$10%에서 spray 이행과 아크 안정성으로 고른 비드형상을 관찰 할 수 있었으며, 키홀 형성으로 인해 용입성이 가장 깊었다. CO_2가스 10%일 때 $CO_2$5% 비해 CO_2보호가스 량의 증가로 레이저 에너지 흡수율이 증가하여 용융 폭이 증가 하였다. Ar80%+$CO_2$20%에서는 다량의 스패터가 발생하였으며, 기공(Blow hloe) 용접결함 현상을 고속카메라 촬영과 마크로 횡단면부 사진에서도 관찰 되었다.

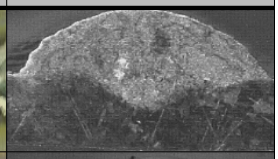
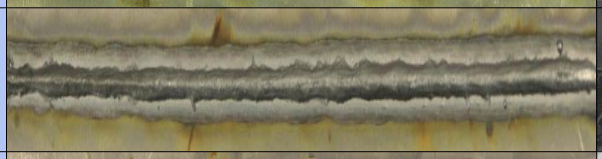
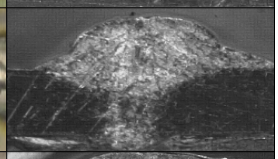
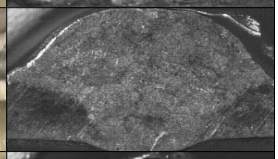
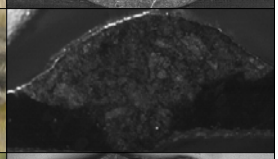
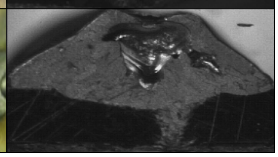


Ar100%	Ar95% $CO_2$5%	Ar90% $CO_2$10%	Ar85% $CO_2$15%	Ar80% $CO_2$20%

Fig 4.3 High speed photography of Laser-Arc hybrid welding for various Ar-CO_2 shielding gas compositions

dCollection @ chosun

Table 4.8 Bead surface appearance & cross section of Laser-Arc hybrid welding for various Ar-CO_2 shielding gas compositions

Ratio of shielding gas	Surface bead shape	Cross section
Ar100%		
Ar95% + $CO_2$5%		
Ar90% + $CO_2$10%		
Ar85% + $CO_2$15%		
Ar80% + $CO_2$20%		

4.3.3 Effect of various currents & various speeds

하이브리드 용접에서 아크 열원이 선행하기 때문에 레이저 출력 1.3kw 전압 12V로 고정하여 표 4.9와 같이 용접전류 110~130A와 용접속도 2.0~3.0m/min에 따른 용접부의 상·하부 비드 형상을 고찰한 결과 용접 전류가 증가 할수록 비드 폭이 증가 되었으며, 용접속도 2.0~2.2m/min에서는 용접전류가 너무 높아 비드 폭이 불균일하고 입열 과다로 용락 현상이 1.3kw 12V 110~130A에서 모두 똑같이 관찰되었다. 1.3kw 12V 110A 2.6m/min 상부 비드형상에서 기공(Blow hole) 용접결함이 발생 하였는데, 이는 용접속도가 빨라 단위 길이당 입열량이 감소하여 기화된 아연 층이 충분히 제거되지 못하여 용접결함이 발생 된 걸로 판단된다. 또한 1.3kw 12V 110A 2.4m/min, 120A 2.6~2.8m/min, 130A 2.4~2.8m/min에서 기공형성과 용융불량, 크랙이 발견되지 않았다. 이는 각각의

dCollection @ chosun

용접전류에 대한 적절한 용접속도가 아연증기 배출에 필요한 시간을 확보할 수 있었기 때문에 양호한 상·하부 비드형상을 관찰 할 수 있었다.

용접부의 용접결함 평가를 표 4.10과 같이 레이저 및 전자빔 용접에 대한 용접결함 평가 규격 EN ISO 13919-1 의거하여 4가지 항목(Reinforcement, Undercut, Excess weld metal, Excessive penetration) 육안검사를 실시한 결과 1.3kw 12V 130A 2.6m/min에서 실제 현장 적용에 가능한 Very stringent(Quality B')의 건전한 용접부를 확인 할 수 있었다. 또한 정렬 불량(Linear misalignment) 있어 측정한 결과 1.3kw 12V 110A 2.4m/min, 120A 2.6m/min, 130A 2.8m/min에서 모두 현장에 적용할 수 없는 부적합 한 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4.9 Bead appearance Laser-Arc hybrid welding for various currents & welding speeds

Current	Welding speed	Top bead	Bottom bead
110A	2.0m/min		
	2.2m/min		
	2.4m/min		
	2.6m/min		
	2.8m/min		
	3.0m/min		
120A	2.0m/min		
	2.2m/min		
	2.4m/min		
	2.6m/min		
	2.8m/min		
	3.0m/min		

dCollection @ chosun

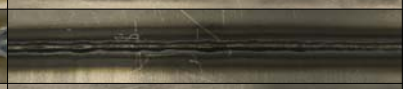
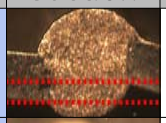
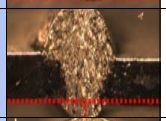
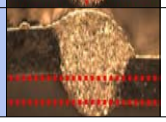
130A	2.0m/min		
	2.2m/min		
	2.4m/min		
	2.6m/min		
	2.8m/min		
	3.0m/min		

Table 4.10 Quality levels in Laser-Arc hybrid welding for various currents & welding speeds

Current	Speed	Cross section	Excessive penetration		Misalignment	
			h(mm)	level	h(mm)	level
110A	2.4m/min		-	-	0.321	-
120A	2.6m/min		-	-	0.395	-
120A	2.8m/min		0.294	[B]	-	-
130A	2.4m/min		0.385	[D]	-	-
130A	2.6m/min		0.213	[B']	-	-
130A	2.8m/min		-	-	0.512	-

dCollection @ chosun

4.4 Tensile test Results

4.4.1 Comparison of tensile test of MIG & Laser and Laser-Arc hybrid welded joints

각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 용접부의 건전성을 확인하기 위하여 인장시험 규격 ASTM E8M-04 규격에 의거하여 그림 4.4와 같이 인장강도 값을 나타내었다. MIG 용접 12V 130A 2.0m/min의 최대 인장강도 237MPa로 모재(아연도금강판 299.1MPa)인장강도 대비 79%, Laser 용접 1.3kw 2.0m/min의 최대 인장 강도 221MPa로 모재(아연도금강판 299.1MPa)인장강도 대비 73%로 MIG, Laser 용접에서는 우수한 인장 강도를 확인 할 수 없으며, MIG, Laser 용접부 모두 열영향부에서 파단이 난 걸로 보아 취성 파단이 난 걸로 확인된다. 하지만, Laser-Arc hybrid 용접 1.3kw 12V 110A 2.4m/min의 최대 인장강도 300.1MPa로 모재(아연도금강판 299.1MPa) 인장강도 대비 100,4%라는 우수한 인장 강도를 확인 할 수 있었으며, 모재에서 파단이 난 걸로 보아 취성 파단이 아닌 연성 파단이 난 걸로 확인된다. 또한 Hybrid 용접이 MIG, Laser 용접에 비해 평균 인장강도 31%, 27% 향상된 우수한 인장강도를 확인 할 수 있었다.

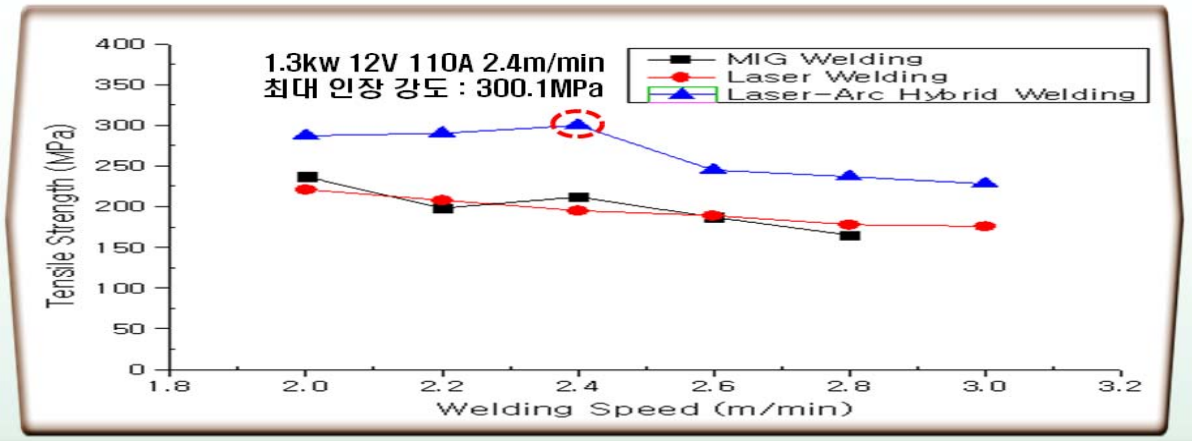


Fig 4.4 Comparison of tensile strength of respective welded joints

dCollection @ chosun

4.4.2 Tensile test of hybrid welded joints for various currents & welding speeds

안정적인 여성(Reinforcement) 비드형상이 관찰되는 1.3kw 12V 110A 2.4m/min, 120A 2.6~2.8m/min, 130A 2.4~2.8m/min에서 그림 4.5와 같이 ASTM E8M-04 규격에 의거하여 인장강도를 고찰한 결과 용접조건 1.3kw 12V 130A 2.6m/min에서 강도 값은 모재(아연도금강판 299.1MPa)대비 강도 302MPa의 우수한 인장강도 값을 얻을 수 있었으며, 모재 파단이 발생한 걸로 보아 취성 파단이 아닌 연성 파단이 난 걸로 사료된다. 용접조건 1.3kw 12V 130A 2.6m/min을 제외한 용접조건에서는 모두 용융부(W.M) 또는 열영향부(HAZ)부분에서 파단이 발생하였지만 인장강도는 246~298MPa로 모재대비 82.2~99% 강도 값을 확인 하였다.

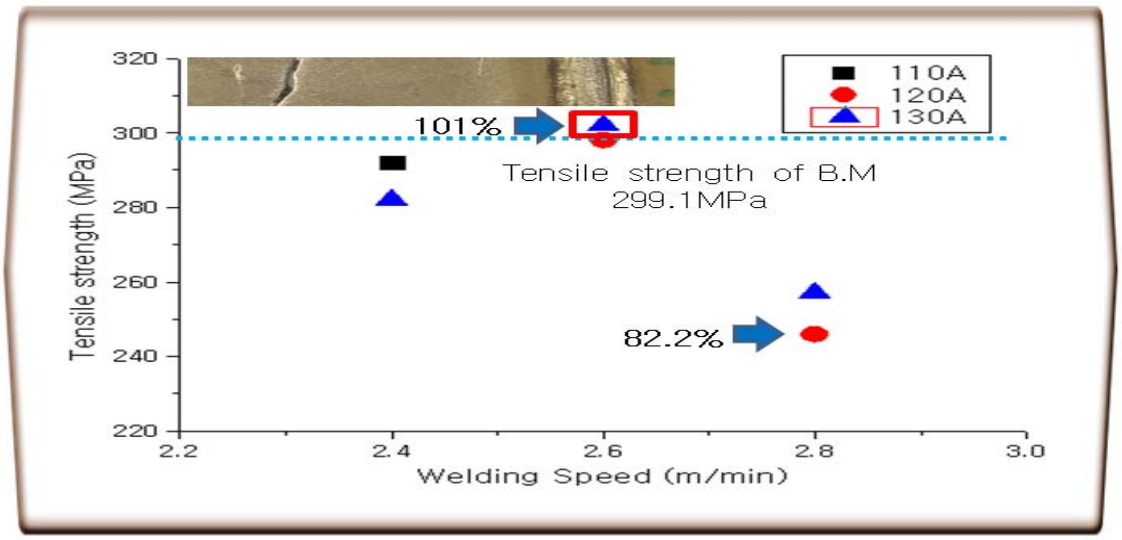


Fig 4.5 Tensile strength of Laser-Arc hybrid welded joints for various currents and welding speeds

dCollection @ chosun

4.5 Hardness test results

4.5.1 Comparison of Hardness test of MIG & Laser and Laser-Arc hybrid welded joints

각 공정별 용접의 최대 인장 강도 값을 나타내는 MIG 용접 12V 130A 2.0m/min, Laser 용접 1.3kw 2.0m/min 그리고 Laser-Arc hybrid 용접 1.3kw 12V 110A 2.4m/min의 조건에서 그림 4.6, 4.7 그리고 4.8과 같이 용접부의 상부표면으로부터 0.325mm 위치에서 용접부 단면의 횡방향으로 0.2mm 간격으로 경도를 측정하였다. MIG 용접 최대 경도 158.7HV, Laser 용접 최대 경도 255.8HV 그리고 Laser-Arc hybrid 용접 최대 경도 218.5HV로 안정적인 경도분포 값을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 각 공정별 열영향부 모두에서 모재로 갈수록 경도 값이 크게 감소하였다. 이는 모재부분으로 갈수록 페라이트 조직이 증가하여 조직이 연화되었기 때문이라 사료된다. 그림 4.9와 같이 각 공정별 경도 분포를 비교해 보았다. 레이저 용접부에서는 급속한 냉각 속도로 인해 경도 분포 값이 가장 높게 나왔으며, 깊고 좁은 용접특성 때문에 열영향부 또한 좁은 걸 확인 할 수 있었다. 또한 하이브리드 용접이 MIG 용접에 비해 용융부 폭이 좁아 HAZ부가 감소하였는데, 하이브리드용접이 차체 경량화에 좀 더 효과적이라 할 수 있다고 사료된다.

dCollection @ chosun

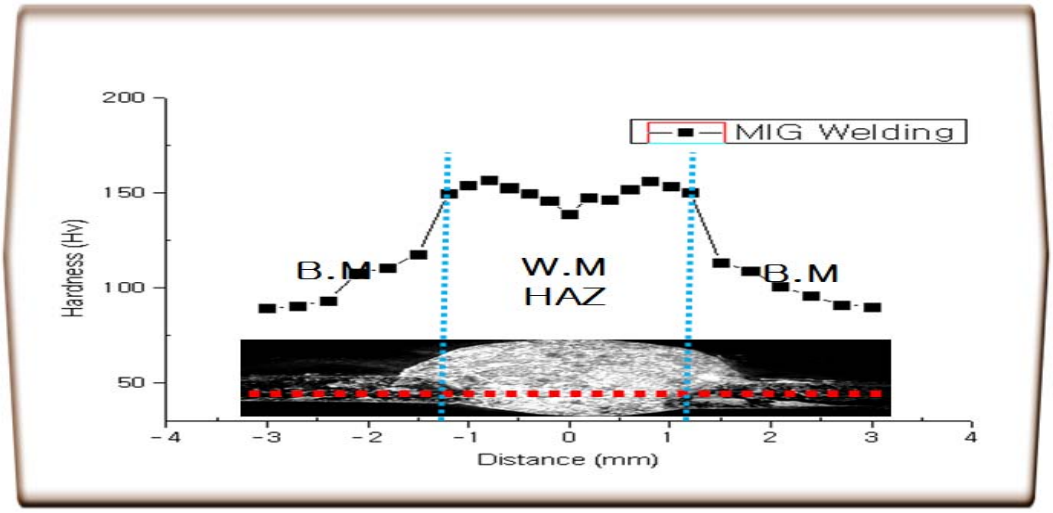


Fig 4.6 Hardness distribution of MIG welded joints

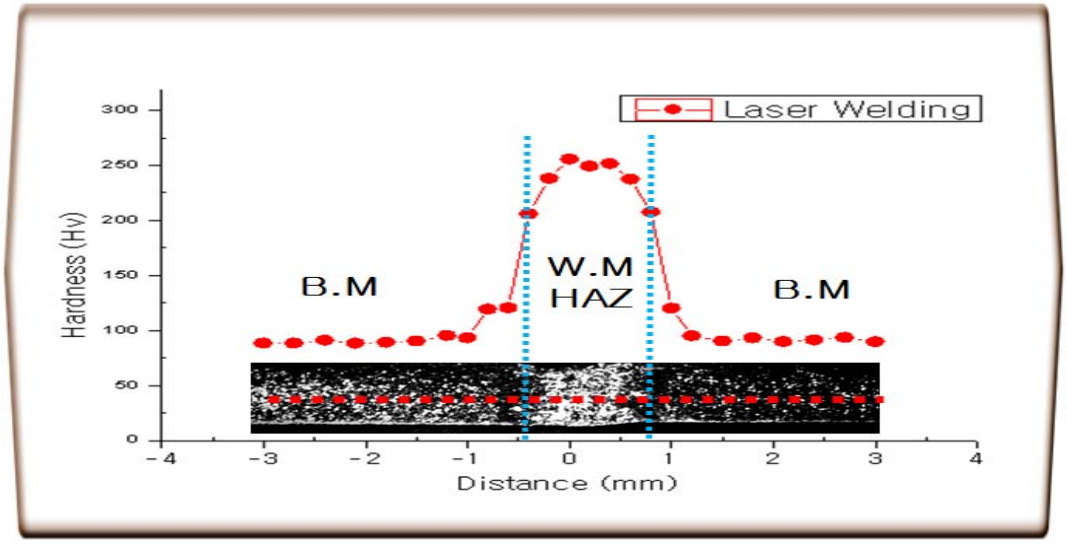


Fig 4.7 Hardness distribution of Laser welded joints

dCollection @ chosun

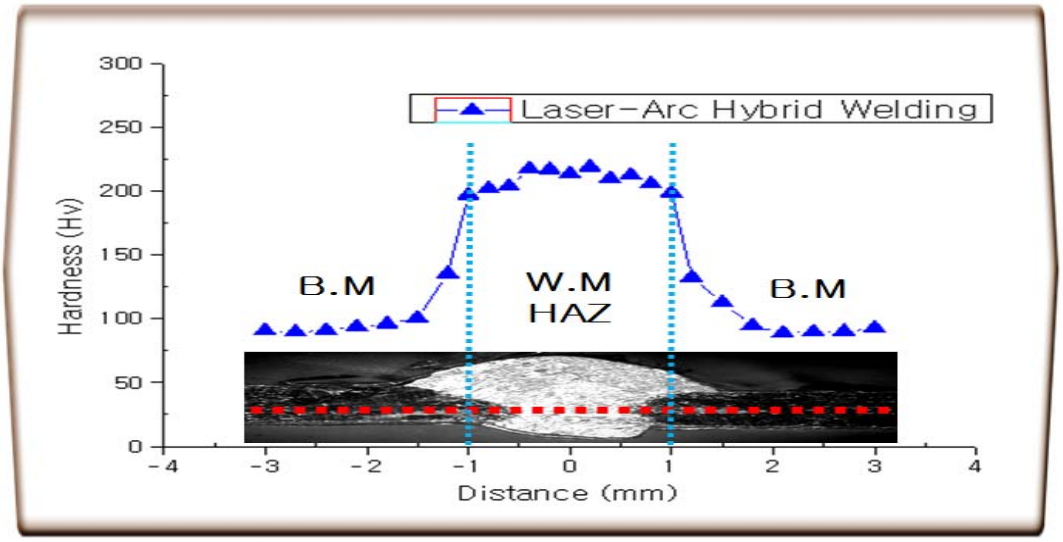


Fig 4.8 Hardness distribution of Laser-Arc hybrid welded joints

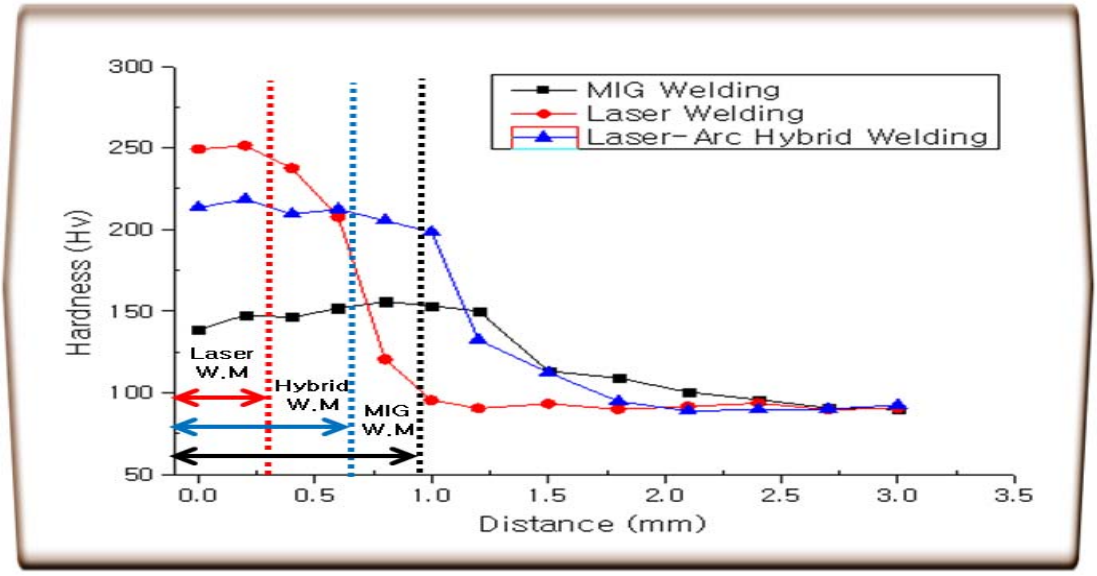


Fig 4.9 Comparison of hardness distribution of MIG & Laser and Laser-Arc hybrid welded joints

dCollection @ chosun

4.5.2 Hardness test of hybrid welded joints

최대 인장강도 값을 나타내는 1.3kw 12V 130A 2.6m/min의 조건에서 그림 4.10과 같이 용접부의 상부표면으로부터 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm 위치에서 용접부 단면의 횡방향으로 0.1mm 간격으로 경도를 측정한 결과 용융부 상부표면으로부터 0.5mm떨어진 위치에서 최고 경도 값 238.4HV, 상부표면으로 0.1mm 떨어진 위치에서 최고 경도 값 209.4HV 나타나 0.5mm떨어진 위치에서 비해 약 30HV 낮은 경도 값을 확인 할 수 있었다. 이러한 경도차는 하이브리드 빠른 용접속도에 따른 냉각 속도 차이로 인하여 0.5mm위치에서 급속한 냉각작용으로 판상 마르텐사이트조직이 생성되었기 때문이라 사료된다. 모재부 평균경도 값은 85.1HV으로 열영향부에서 모재로 갈수록 페라이트 인해 조직인 연화되었기 때문이라 사료된다.

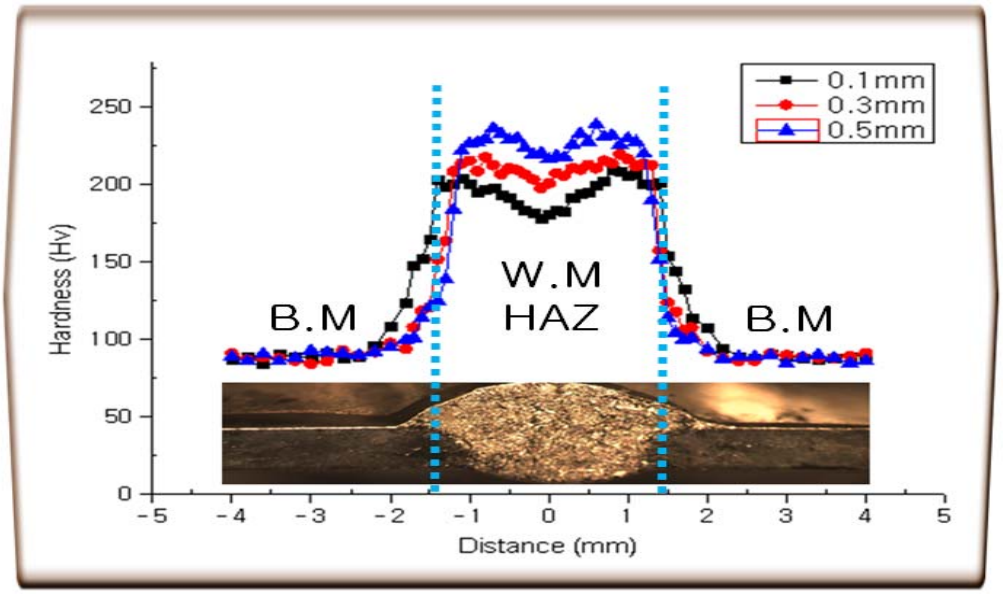


Fig 4.10 hardness distribution of Laser-Arc hybrid welded joints for current and welding speed

dCollection @ chosun

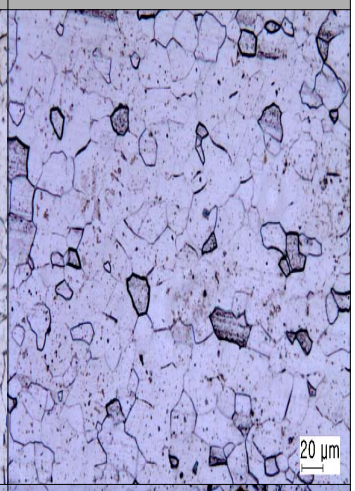
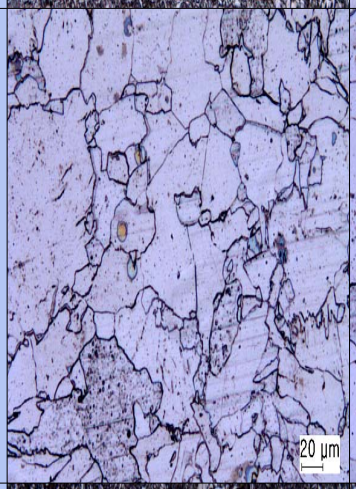
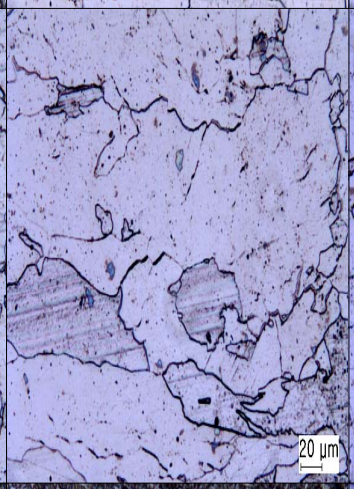
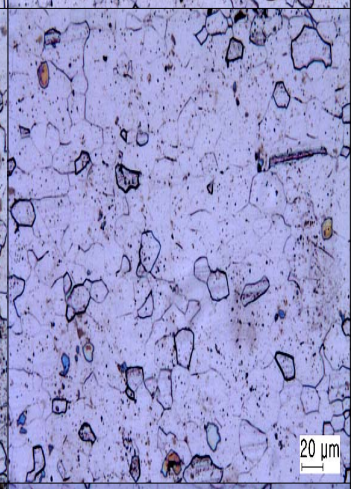
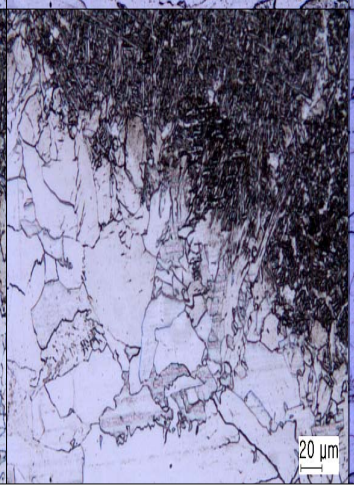
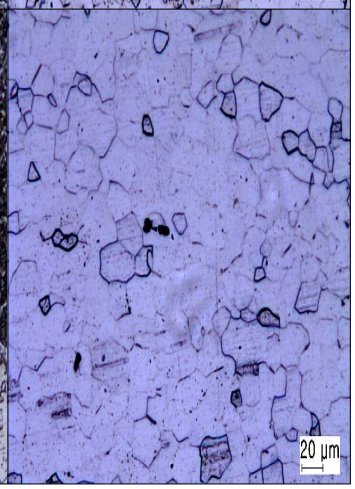
4.6 Microstructure analysis

4.6.1 Microstructure of respective welding

표 4.10은 각 공정별 용접의 최대 인장강도 값을 가지는 MIG, Laser 그리고 Laser-Arc hybrid 용접조건 용접부의 각 영역에 해당하는 미세조직(Microstructure)을 나타낸 것이다. 먼저 MIG 용접부의 용융부에서는 Lamellar상의 페라이트(Ferrite)와 시멘나이트(Cementite)가 교대로 이루어져 있는 피얼라이트(Pearlite) 조직이 생성되었으며, 열영향부에서는 피얼라이트(Pearlite)와 마르텐사이트(Martensite) 중간에서 생성되는 베인나이트(Bainite) 조직이 생선된 것을 확인 할 수 있었다. Laser 용접부의 용융부에서는 다각형 페라이트(Polygonal Ferrite, PF)로 구성된 조직이 나타났다. Laser-Arc hybrid 용접부의 용융부에서는 침상특성을 보이는 세지상 마르텐사이트(Martensite)조직이 나타났으며, 열영향부에서는 베인나이트 조직이 관찰되었다. 각 공정별 용접부의 열영향부에서 모재로 갈수록 조직이 조대화 된 것을 확인 하였으며, 모재부분에서는 페라이트 조직이 생성되었다. 또한 Laser 용접부의 열영향부에서 급속한 냉각속도의 영향으로 임계결정립성장(Critical grain growth)으로 결정립이 가장 크게 조대화 된 것을 확인 할 수 있었다.

dCollection @ chosun

Table 4.10 Optical microstructure of respective welded joints

Welding Process	Weld Metal	Heat Affected Zone	Base Metal
MIG Welding			
Laser Welding			
Hybrid Welding			

dCollection @ chosun

4.6.2 Microstructure of hybrid welded joints for current & speed

그림 4. 10은 전류와 속도의 용접성 평가에 대한 최대인장 강도 값을 보이는 용접조건 1.3kw 12V 130A 2.6m/min에서 용접부의 각 영역에 해당하는 미세조직(Microstructure)을 나타낸 것이다. (A)와(B)는 용융부 상·하부, (C)는 열영향부(HAZ) 그리고 (D)는 모재(B.M)를 나타냈다. 용착금속(A)는 침상 특성을 보이는 세지상 마르텐사이트 조직이, (B)는 격자불변 변형의 혼합체 판상 마르텐사이트 조직이 나타났다. 용착금속에서 열영향부(C)로 갈수록 조직이 조대화 됨에 따라 경도 값이 감소한 걸로 사료 된다. 모재부(D)는 페라이트 조직을 관찰할 수 있었다.

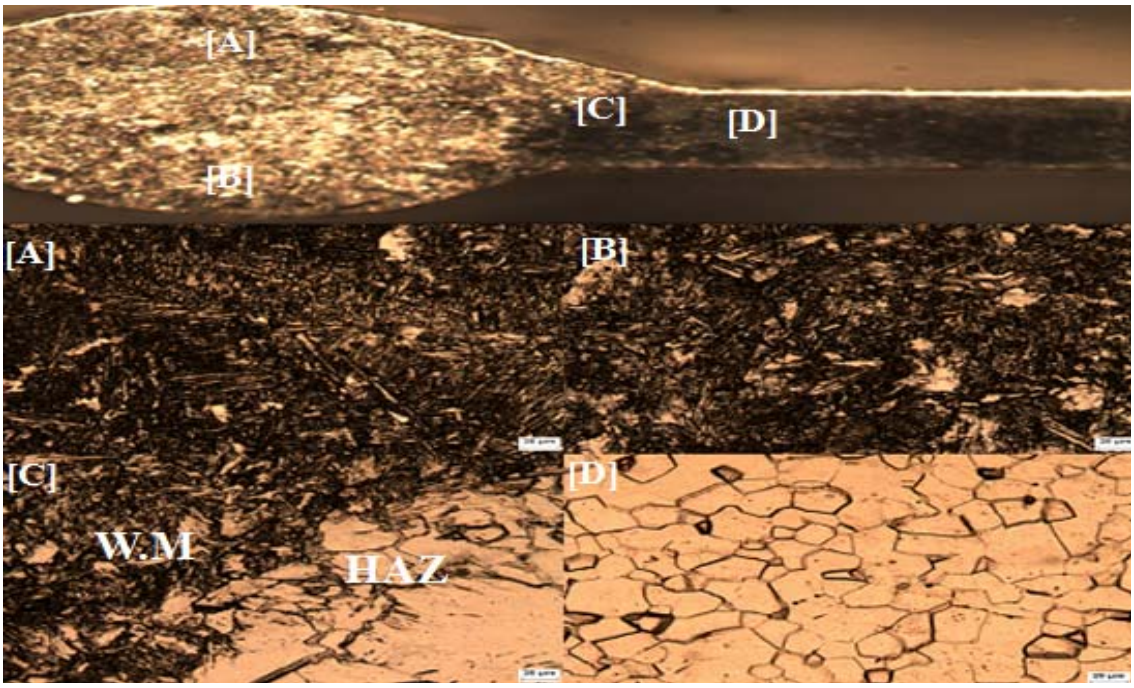


Fig 4.11 Optical microstructure of Laser-Arc hybrid welded joints for current & speed
(A),(B) W.M, (C) W.M and HAZ (D) B.M

dCollection @ chosun

Chapter 5
Conclusion

본 연구에서는 자동차 카울 부품에 적용되는 두께(0.65mm) 아연도금강판(SGACC60/60)에 대하여 각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 맞대기 용접을 실시하여 용입 깊이 및 넓이, 기계적 특성 평과와 금속학적 특성을 비교 실험하였으며, Hybrid 용접변수에 따른 용접성 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 각 공정별 MIG, Laser, Laser-Arc hybrid 맞대기 용접을 실시하여 용접부에 대한 용입깊이, 넓이를 비교한 결과 Hybrid 용접부가 MIG 용접부에 비해 평균 3배, Laser 용접부에 비해 평균 2배 정도 용입이 깊었으며, 넓이부분에서 레이저 용접의 깊고 좁은 용접성 때문에 평균적으로 가장 좁았으나, 정렬 불량이 발생하여 적절한 용접부 형성이 되지 않은 걸 확인하였다.

2) 각 공정별 인장시험을 비교한 결과 Laser-Arc hybrid 용접이 Hybrid 용접이 MIG, Laser 용접에 비해 평균 인장강도 31%, 27% 향상된 우수한 인장강도를 확인 할 수 있었으며, Laser-Arc hybrid 용접조건 1.3kw 12V 110A 2.4m/min의 최대 인장강도 300.1MPa로 모재(아연도금강판 299.1MPa) 인장강도 대비 100,4%라는 우수한 인장 강도를 확인 할 수 있었다.

3) 각 공정별 경도 분포를 비교한 결과 MIG, Laser 그리고 Laser-Arc hybrid 용접 모두 용접부 중앙부에서 경도 값이 가장 높게 나왔으며, 레이저 용접부에서는 급속한 냉각 속도로 인해 경도 분포 값이 가장 높게 나왔다. 또한 하이브리드 용접이 MIG 용접에 비해 용융부 폭이 좁아 HAZ부가 감소하였는데, 하이브리드용접이 차체 경량화에 좀 더 효과적이라 할 수 있다고 사료된다.

dCollection @ chosun

4) 아크와 레이저 열원간 거리와 혼합가스 변화에 따라 고속촬영을 실시하여 비드표면과 용입부를 관찰 한 결과 열원간 거리 4mm에서 안정적인 비드표면과 keyhole 형성으로 용입이 가장 깊었으며, Ar90%+$CO_2$10%에서 용착금속부 폭이 증가 하였는데, 이는 CO_2 보호가스의 양의 증가로 레이저 에너지 흡수율이 증가 하였다고 사료된다.

5) 전류와 용접속도 변화에 따라 맞대기 용접을 실시하여 EN ISO 13919-1 규격에 의거하여 4가지 관점에서 육안검사를 고찰한 결과 하이브리드 용접조건 1.3kw 12V 130 2.6m/min에서 Excessive penetration이 0.213mm으로 실제 산업현장에 적용한 0.235mm 규격을 만족한 Very stringent(Quality B')에 해당하는 건전한 용접부를 확보 할 수 있었다.

6) 안정적인 여성(Reinforcement) 비드형상이 관찰되는 전류와 속도에 대한 하이브리드 용접조건에서 인장시험을 실시한 결과 1.3kw 12V 130A 2.6m/min에서 모재 파단이 났으며, 아연도금강판(모재 인장 강도 299.1MPa)대비 101%의 302MPa의 우수한 인장강도 값을 확인 할 수 있었다.

7) 전류와 속도의 용접성 평가에 대한 최대인장 강도 값을 나타내는 용접조건의 용접부의 각 영역에 해당하는 미세조직(Microstructure)을 고찰한 결과 용착금속부에서 세지상마르텐사이트와 판상마르텐사이트 조직이 나타났으며, 하이브리드 빠른 용접속도에 따른 냉각 속도 차이로 인하여 상부 0.1mm 위치 보다 하부 0.5mm위치에서 급속한 냉각작용 현상으로 용착금속부와 열영향부에서 경도 값이 약 30Hv 높게 나타났다. 또한 열영향부에서 모재로 갈수록 페라이트 조직이 증가하여 경도 값이 감소함을 확인 할 수 있었다.

dCollection @ chosun

Reference

1. Bley H, Weyand L, Luft A. An alternative approach for the cost-efficient laser welding of zinc-coated sheet metal. Annals of the CIRP 2007;56:17-20.
2. Wu Qiang, Gong Jinke, Chen Genyu, et al. Research on laser welding of vehicle body. Optics & Laser Technical 2008;40:420-426.
3. Asgari H, Toroghinejad MR, Golozar MA. Effect of coation thickness on modigying the texture corrosion performance of hot-dip galvanized coating, Current Applied Physics 2009;9(1):59-66
4. Kolodziejczak Pawel, Kalita Wojciech. Properties of CO_2 laser-welded butt joints of dissimilar magnesiumalloys. Journal of Materials Processing Technical 2008;3(72):1-7
5. Yoo-Chan Kim, Jong-Do Kim, and Herbert sstaufer. Laser Hybrid Welding and Laser Brazing, Journal of the KWJS 2004;22-2:111-116 (in korea)
6. E. Le Guen, R. Fabbro, M. Carin, F. Coste, P. Le Masson. Anlausis of hybrid Nd:YAG Laser-MAG Arc welding process. Optics & Laser Technical 2011;43:1155-1166
7. Cheol-Hee Kim, Woong-Tong Choi, Hyun-Byung Chae, Jeong-Han Kim and Se-Hun Rhee. A Study on CO_2 laser-tig hybrid welding of zinc-coated steel sheet. Journal of the KWJS 2006;24-4:311-315

8 송문종 : A Study on Remote CO_2 Laser Welding for development of the high-strength and light weight parts of an automobile 울산대학교 자동차 선박기술대학원 석사학위논문 (2010) in korea

9. Fukami K, Setoda K : Development of High efficiency MIG-Laser Hybrid welding Technology, Light metal welding,48-11(2010) 413-418 (in japan)

dCollection @ chosun

10. 황용화 : “Nd:YAG 레이저를 이용한 Zircaloy-4 판재의 맞대기 용접 관한 연구 “,한국 기술교육대학교, 석사 2005
11. E.L. Baardsen, D.J Schmatz and R.E.Bisaro, Welding J, 52, pp.227-229 1973
12. 김형일: Mechanical characteristics on welded joints of automative cowl by Nd:YAG Laser stitch welding 2013
13. AWS, welding hanbook, American Society, 1987
14. W. steen M. Eboo : Arc aumegmented laser welding , Metal construction 11-7, 1979 pp.332-335
15. Youngsik kim, and sangcheol kil : Recent technological Tendency of Laser/Arc hybrid welding , Journal of KWJS Vol.31 No.2(2013) pp.4-15
16. M.Y. Lee, K.C. Kim and Y. G. Kwon : Laser-Arc Hybrid welding, Journal of KWJS Vol.18 No.1(2004) pp.16-23
17. H.T. Kim : 21세기의 용접기술 레이저-아크 Hybrid welding , 한국생산기술정보연구원 2004 62-67 in korea
18. J Matsuda, A Utsumi, M Katsumura, M Hamasaki and S Nagata : TIG or MIG arc aumented laser welding of thick mild steel plate, Joining & Materials, July 1988, PP. 31-34
19. E.Beyer, B.Brenner,R.Poprawe : Hybrid laser welding techniques for enhanced welding efficiency, ICALEO section D, 1996, pp.157-166
20. E.Beyer, U.Dilthey, R.Imhoff, C.Major, J.Neuenhahn, K.Behler : New Aspectes in laser welding with an increased effciency, ICALEO, 1994, PP.183-192
21. Hongping Gu and Robert Mueller : Hybrid welding of galvanized steel sheet, ICALEO 2000
22. N.Abe, Y.Agano, M.Tsukamoto, T.Makino, M.Hayashi and T.Kurosawa : Effect of CO_2laser irradiation on arc welding, ICALEO 1996, section D, pp.64-73

dCollection @ chosun

23. C.V.Hyatt, K.H.Magee, J.F.Porter, V.E.Merchant and J.R.Matthews : Laser-assisted fas matal arc welding of 25mm thick HY-80 plate, welding Journal, July(2001), pp.163-172s
24. E.Beyer : Survey of laser hybrid processes, Laser 2001, Munich
25. H.Haferamp, P.Cordini, M.Fersini and J.Szinyur : Laser MIG hybrid welding of zinc coated steel for hydroforming apllication, Laser 2001, Munich
26. K.Shibata, H.Sakamoto and T.Iwase : Laser-MIG hybrid welding of aluminium alloys, Laser 2001, Munich
27. Young-su Park : A study on the processing variavles of Nd:YAG hybrid Laser welding, Journal of KSLP, 2005 June 10 pp.48-52

dCollection @ chosun

감사의 글

대학원 생활에 이제 좀 익숙하다 싶었더니 벌써 2년이 지나 졸업을 하게 되어 아쉬움이 많이 남습니다. 저에게 고마움이라는 마음을 항상 품을 수 밖에 없도록 만들어주었던 시간이었습니다.

무엇보다도 물심양면으로 학문적 지식뿐만 아니라 저의 인생의 길을 열어주신 지도 교수님이신 방한서 교수님께 진심으로 감사말씀 드립니다. 그리고 지금의 논문이 나오기까지 조언과 힘이 되어주신 방희선 교수님께도 감사 말씀 드립니다.

대학원연구실 2년 동안 함께한 선후배님들에게도 감사 말씀드리며, 열정적으로 저에게 항상 힘을 보태주려하고 항상 모든일에 도움을 주고 싶어라 하는 박사 용형이형 감사합니다. 정작 저는 형에게 도움을 받기만 했지 도움을 주지못해 미안하고 고맙습니다. 항상 궂은일 마다하지 않고 내가 어려운 일이 있으면 서슴없이 도와주고 나를 격려해준 대학교 후배이지만 대학원 선배인 경학이게도 진심으로 고맙다 말 전한다. 힘든 일이 있어도 항상 밝은 미소와 긍정적인 마인드를 가지며, 나의 일에 조금이나 보탬이 되어주려고 도와준 제 동기인 용선아 동인아 고맙다. 나의 논문이 나오기까지 궂은일 도맡아 해오고 항상 실험하면 같이 도와준 국성아 진심으로 고맙다. 엉뚱하지만 밝은 미소를 가지며 순수한 마음을 가진 승엽아 형 실험 같이 도와줘서 고맙고 형 장난쳐도 항상 웃어주고 잘 받아줘서 고맙다. 작년 겨울부터 옆에서 꾸준히 제 실험을 같이 도와준 우람아 고맙다. 활기와 열정이 넘치는 종희야 앞으로 실험실 생활 잘 하거라 믿어 의심치 않는다.

dCollection @ chosun

끝으로 오늘의 제가 여기에 있기까지 항상 저의 뒤에서 묵묵히 힘을 보태주고 항상 격려해주고 용기를 불어넣어준 저의 가족인 할머니 부모님 제 동생에게도 사랑한다는 말과 감사의 말 전합니다.

2014년 6월

한 준 의 올림

dCollection @ chosun

저작물 이용 허락서

학 과	선박해양공학과	학 번	20127102	과 정	석사
성 명	한글: 한준의 한문 : 韓 俊 毅 영문 : Han Jun-Ui				
주 소	전라남도 해남군 해남읍 고도리 103-2번지				
연락처	E-MAIL : onlyhan1336@hanmail.net				
논문제목	한글 : 자동차 카울 부품(SGACC60/60) 적용을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접부 기계적 특성 영어 : Mechanical characteristics in laser-arc hybrid welded joints for the application of automotive cowl parts(SGACC60/60)				

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(O) 반대( )

2014 년 8 월

저작자: 한 준 의 (인)

조선대학교 총장 귀하

dCollection @ chosun

dCollection @ chosun