



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2015년 2월
석사학위논문

중탄소강과 스테인리스강의 Nd:YAG
레이저 이중용접에서 입열량 변화에
따른
용접특성 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과
(정밀기계설계공학전공)

이 현 중

중탄소강과 스테인리스강의 Nd:YAG 레이저 이종용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성 연구

A Study on Nd:YAG Laser Dissimilar Metals Welding
of midium carbon steel and stainless steel of
Characteristics on Heat input Changing

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과
(정밀기계설계공학전공)

이 현 중

중탄소강과 스테인리스강의
Nd:YAG 레이저 이중용접에서
입열량 변화에 따른 용접특성 연구

지도교수 유 영 태

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2014년 10 월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과
(정밀기계설계공학전공)

이 현 중

이현중의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 부교수 심재기^인

위원 조선대학교 조교수 박설현^인

위원 조선대학교 교수 유영태^인

2014년 11 월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
LIST OF PHOTOGRAPHS	VI
ABSTRACT	VIII

제 1 장 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	6
1.3 연구목적	10

제 2 장 레이저빔 용접 원리

제 3 장 실험방법 및 기기

3.1 실험기기 및 실험재료	15
3.1.1 실험기기	15
3.1.2 실험 재료 특성	19
3.2 실험방법	
3.2.1 Bead On Plate(BOP)실험방법	21
3.2.2 이중용접 실험방법	23

3.3 실험분석 장치 및 방법

3.3.1 실험시험편 제작	24
3.3.2 용접분석용 시편 제작	27
3.3.3 시편마운팅	30
3.3.4 광택연마	32
3.3.5 에칭	34
3.3.6 조직분석	35
3.3.7 마이크로 비이커스 경도 시험	37
3.3.8 인장시험	39

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 BOP 용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성	42
4.1.1 SM45C	42
4.1.2 STS304	47
4.1.3 이중용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성	53
4.1.4 입열량 변화에 따른 이중용접조직 특성	60
4.2 입열량 변화에 따른 경도분포	
4.2.1 SM45C	61
4.2.2 STS304	67
4.2.3 이중용접	70

4.2.4 이중용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성 53
4.2.5 이중용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성 53
4.2.6 이중용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성 53
4.3 입열량 변화에 따른 인장강도 74
제 4 장 결 론 75
Reference 77

LIST OF TABLES

Table 1 스테인리스의 강종별 재질특성	5
Table 2 Recent research of Laser Dissimilar Metals Welding	9
Table 3 Schematic diagram and photo of the experimental apparatus	17
Table 4 Mechanical and physical properties of STS304 and SM45C ·	19
Table. 5 Chemical composition of STS304 and SM45C	20
Table. 6 Experimental conditions	20

LIST OF FIGURES

Fig. 1 스테인리스강의 화학성분 및 금속조직에 따른 분류	4
Fig. 2 CW 2kW Nd:YAG Laser	16
Fig. 3 CW 2kW Nd:YAG Laser	17
Fig. 4 Schematic diagram and photo of the experimental apparatus	18
Fig. 5 SM45C	25
Fig. 6 STS304	26
Fig. 7 다이아몬드 커팅기	28
Fig. 8 BUEHLER사의 Cutting Fluid	29
Fig. 9 핫 마운팅 프레스	31
Fig. 10 핫 마운팅 가공된 시편	31
Fig. 11 자동 연마기	33
Fig. 12 광소재용 미세 분석 시스템	36
Fig. 13 마이크로 비이커스 경도계	38
Fig. 14 Tensile test Specimens	39

Fig. 15 규격에 맞게 가공된 인장시험 시편	40
Fig. 16 Tensile test Experiment Equipment of Lap-Joint Welding	41
Fig. 17 Bead on plate Welding of SM45C Bead	43
Fig. 18 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters	44
Fig. 19 Influence of Welding speed on the Heat input	45
Fig. 20 Influence of Welding speed on the width ratio	46
Fig. 21 Bead on plate Welding of STS304 Bead	48
Fig. 22 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters	49
Fig. 23 Influence of Welding speed on the Heat input	50
Fig. 24 Influence of Welding speed on the Heat input	51
Fig. 25 Bead on plate Welding of DMW Bead	53
Fig. 26 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters	54
Fig. 27-a Influence of Welding speed on the Heat input	55
Fig. 27-b Influence of Welding speed on the Heat input	56

Fig. 28 With Ratio and Heat input 58

Fig. 29 Welding width Hardness to variation of welding process parameters
..... 61

Fig. 30 Heat input and Hardness parameters 62

Fig. 31 Heat input and Hardness parameters 64

Fig. 32 Welding width Hardness to variation of welding process parameters
.....66

Fig. 33 Welding width Hardness to variation of welding process parameters
..... 68

Fig. 34 Stress-Strain curve of Laser Welding 70

ABSTRACT

A Study on Nd:YAG Laser Dissimilar Metals Welding of midium carbon steel and stainless steel of Characteristics on Heat input Changing

By Lee, Hyun-Jung

Advisor : Prof. Yoo, Young-Tae, Ph. D.

Dept. Advanced Parts & Materials Engineering.

Graduate School of Chosun University.

One of the traditional manufacturing in the automotive industry and green shoes and a smart painter has turned into a mega-trends. The green car in the car is not only reducing emissions via weight reduction in the manufacturing process, green fired. Emissions reduction for fuel efficient cars in order to develop high-strength light-weight material, even with a lot of research for developing underway.

In the manufacturing process of the CO₂ gas processing technology without exhaust heat exhaustion I am interested in the manufacturing process to minimize focused. Lightweight material aspects provides a variety of features that represents a lot of the material is being developed, but got in trouble in the auto parts industry raw sexuality with much difficulty. The traditional way to process auto parts casting, forging, heat treatment, welding, etc. However, these processing methods are much heat or CO₂ emission is affecting global warming. For this reason, in this study, comparing the traditional manufacturing process and relatively high temperature of exhaust gas heat and CO₂ laser welding processing without wanting to.

SM45C of carbon steel and austenitic stainless steel type 304 S T S, butt

weld. Butt weld bead width is altered the process variables of rain, heat input, metallurgical analysis, tensile strength characteristics got the following conclusions by analyzing.

SM45C and S T S if the butt welding of 304 to DMW mouth heterogeneous calories, 0.5 m/m laser beam transfer speed is one of the most mouth n i, a figure of high calories. This experiment in the bead width ratio is S T S 304 m/m laser beam feed rate 1.5 i n SM45C is the most highly when it came out, the laser beam feed speed 0.5 m/m i n, when the DMW is transported to the laser beam is 1.3 m/m i n was the highest levels when it appeared. SM45C and S T S if a heterogeneous welded 304, butt bead STS304 why call attention towards Fe (melting temperature: 1535 ° c) with lots of SM45C and Ni (melting temperature: 1445 c) suffered a lot of S T S 304 for calories greatly when compared with big Ni element usage (specific gravity: 8.9) is a relatively small proportion of Fe element in S T S 304 pushes towards. Lee Jong-welding one Psalm beaker's hardness is transferred to the laser beam width direction, depth, direction, all speed 1.5 m/m i n was the highest levels when it appeared. SM45C and S T S 304 that the Psalms heterogeneous welded butt tensile strength as a result of the experiment, the laser beam transfer rate is 0.9 m/m i n is the highest when the results came out. SM45C and S T S if a heterogeneous welded bead width 304, butt, mouth calories, tensile strength, and when the result of the hardness to synthesize the non-Hitchhikers laser beam transfer rate is 0.9 m/m i n the optimal process conditions.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

전통 제조업중의 하나인 자동차산업에서 그린화와 스마트화가 메가트렌드로 변화하고 있다. 자동차에서 그린카는 경량화를 통한 배출가스 절감뿐만 아니라 제조과정에서 그린화도 요구되고 있다. 배출가스 저감을 위해 연비효율이 좋은 자동차를 개발하기 위하여 고강도의 경량화 소재를 개발하기 위한 많은 연구도 함께 진행되고 있다.

제조공정에서의 그린화는 CO₂ 가스를 배출하지 않고 가공하는 기술로 열소모를 최소화하는 제조과정에 관심이 집중되고 있다. 경량소재의 측면에서는 다양한 기능을 나타내는 많은 소재가 개발되고 있지만 가공성에 문제가 있어 산업현장에서 자동차 부품으로 가공하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 자동차부품을 가공하는 전통적인 방법으로는 주조, 단조, 열처리, 용접 등이 있다. 그러나 이들 가공방법들은 많은 열을 발생시키거나 CO₂ 가스를 배출하여 지구 온난화에 영향을 미치고 있다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 전통적인 제조 공정과 비교해서 상대적으로 고온의 열과 CO₂ 가스를 배출하지 않고 가공하는 레이저 용접을 하고자 한다.

레이저용접은 고밀도 에너지원으로 레이저빔이 접합하고자 하는 금속과 반응하여 열에너지로 전환되고 금속표면을 용융시킨 뒤 계속되는 레이저빔 조사에 의해 용융 금속 내 키홀(Keyhole)을 형성하게 된다. 키홀 내에 레이저빔의 다중반사 및 흡수 현상이 급격하게 일어나기 때문에 에너지가 흡수되며 주위에 열에너지가 전달되어 벽면이 용융과 응고가 주기적으로 반복되면서 용접이 이루어진다.

레이저용접은 키홀용접 특성을 가지고 직접 가열되므로, 비드의 단면은 열전도형과는 다르게 폭이 좁고 깊게 용융풀이 형성된다. 또한 증발한 금속증기가 고온의 플라즈마로 되면 레이저빔은 플라즈마에 흡수되어 재료에 도달하는 빔 에너지가 감소하기 때문에 보호가스를 분사시켜 플라즈마를 제거해야 한다. 레이저빔을 금속재료에 조사하면 초기에는 반사손실은 크지만, 일단 키홀이 형성되면 키홀 내를 다중반사하기 때문에 거의 반사손실이 일어나지 않는다.

레이저용접의 가장 큰 장점은 고에너지 밀도의 빛을 사용하기 때문에 어떤 금속이라도 고속으로 변형 없이 정밀 가공할 수 있다는 점이다. 아크 용접과 비교하면 용가

재가 필요 없으며, 한 번에 심(Seam) 용접을 할 수 있을 뿐만 아니라, 신속하게 용융된 다음 급속하게 응고되기 때문에 용접시 열로 인한 변형이 적게 발생하는 장점이 있다. 고밀도 에너지를 사용한다는 점에서 유사한 용접방식인 전자빔(Electric Beam)용접과 비교하면 전자빔 용접의 필수 조건인 진공 유지가 레이저용접의 경우 필요 없기 때문에 전자빔용접과 같이 진공 챔버 내에서 용접할 필요가 없다. 이는 가공물의 형상이나 크기에 제한이 없으며, 전자기장의 영향을 받거나 X-선을 방출할 염려가 없고 유지보수비용이 상대적으로 저렴한 이점이 있다.(1)

이와 같이 레이저용접은 전통적인 용접방법에 비해 많은 장점을 가지고 있기 때문에 레이저빔의 장점을 이용해서 본 연구에서는 재질이 다른 재료를 용접하고자 한다. 본 연구에서 용접하고자 하는 재질은 기계구조용 중탄소강인 SM45C와 오스테나이트계 스테인레스강인 STS304이다. 중탄소강인 SM45C는 산업현장에서 각종 기어나, 축, 체인, 롤러, 금형, 자동차강판 등으로 널리 쓰이는 기계구조용강이다. 부식에 강한 스테인레스강은 금속조직에 따라 나누어지는데 화학조직과 금속조직에 따른 분류를 Fig. 1에 나타냈다. 스테인리스의 강종별 재질특성은 Table.1에 나타내었다. 기계구조용강인 중탄소강은 산화에 취약한 반면 스테인리스강은 산화에 강한 성질이 있어 이들 두 재질의 강점을 활용할 수 있도록 이종용접하고자 한다.

현대의 재질별로 보유하고 있는 강점을 활용하기 위해 이종용접 하는 데에는 많은 문제점을 안고 있다. 크게는 두 재질사이의 용융과 응고하는 온도차와 재질을 구성하고 있는 화학성분들의 상이한 성질이 있을 수 있기 때문이다. 이는 각각의 금속의 화학성분의 차이에 따라 달라지는데, 용접 시 금속조직이 조대화 하거나, 고-저용융상(phase)의 분리 등이 있을 수 있다. 특히 원자 구조가 달라서 용접시 탄소강에서는 균열의 발생빈도가 높고, 기공이 발생하기 쉽다. 이종금속 용접시 가장 먼저 생각해야 할 것은 물리적·화학적 성질이 거의 비슷한 형태를 갖추고 있어야 한다. 예를 들어 두 금속간의 용점 차이를 고려 할 수 있다. 이때 두 금속의 용점 차가 100℃ 이내에 있으면 일반적으로 이종 용접이 가능하다. 그러나 일반적인 용융용접에서는 용점차가 큰 경우에는 용접부에 균열이 발생하기 쉽다. 즉, 응고시 용점차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 그리고 계면에 취약한 생성 상(phase)이 형성되거나, 두 금속의 희석에 의해 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다는 문제가 있다. 또한 시편의 가격 면에서 용접부 개선과 용가재사용으로 인한 경제적인 부담이 상당히 심하게 나타난다. 최근에는 이런 단점을 극복하기 위해서 전자빔이나 레이저빔을 이용

한 고밀도 에너지를 가지는 용융용접방법을 주로 사용하고 있다. 특히 레이저빔 용접은 에너지 밀도가 높고, 열원이 아주 가늘고, 제품의 형상에 관계없이 자유롭게 자동화를 통한 용접이 가능하다는 특징 때문에 이중용접에 가장 적합하다. 레이저 용접은 전자빔 용접과는 달리 대기 중에서 작업을 할 수 있어서 레이저를 이용한 가공기술들이 발달되고 있다.

일반적으로 레이저 용접공정은 레이저빔의 출력과 이송속도, 레이저빔의 파장, 초점거리, 보호가스 종류 및 유량의 변화, 시편의 레이저빔 흡수율과 반사율에 따라 용접결과가 달라진다. 지금까지 연구결과를 분석해보면 레이저 출력과 레이저빔의 이송속도의 변화에 따른 용접성을 분석하였다. 레이저빔의 출력의 변화에 따라 레이저빔이 시편에 조사되는 물리적 성질이 변화하기 때문에 출력을 변수로 하여 용접특성을 제시하는 것은 용접표준을 설정하는 데 취약한 점이 있다. 뿐만 아니라 레이저출력을 고정하고 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 레이저용접을 특성을 제시하는 것도 기계적 변동량 중심의 분석이기 때문에 레이저 용접에 대한 물리적 특성으로 규정하기에는 일관성이 부족할 수 있다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저를 이용하여 스테인리스강과 SM45C를 이중용접하여 입열량의 변화에 따른 용접특성을 분석하고자 한다. 입열량의 변화에 따라 인장응력, 용접단면의 조직, 경도분포를 분석하여 실험식을 제시하고자 한다. 이중용접하기 전에 스테인리스강과 SM45C를 각각 비드 온 플레이트(Bead On Plate : BOP) 용접하기 위해 레이저빔의 출력, 빔의 이송속도, 초점거리를 변화시키면서 용접한 다음 BOP용접한 용접단면을 채취하였다. 채취한 시편을 광택연마와 에칭을 하여 입열량의 변화를 변수로 해서 스테인리스강과 SM45C를 이중용접을 하였을 때 용접특성을 분석하고자 한다. 입열량 변화에 따른 이중용접의 용접부의 특성은 용접부의 용융면적, 평균경도, 인장응력, 조성분의 변화를 분석하고자 한다. 분석방법으로는 각각 오스테나이트계 STS304 스테인리스강과 SM45C의 비드 온 플레이트(Bead On Plate) 용접한 결과와 이중용접 했을 때의 용접부의 변화를 비교분석하고자 한다. 용접부의 특성은 입열량의 변화에 따라 달라지는 용접부의 용융면적(S), 용접부의 평균경도(H), 용접부 인장응력(σ)을 변수로 하여 $E \approx f(S, H, \sigma)$ 의 관계를 실험적으로 규명하고자 한다.



Fig. 1 스테인리스강의 화학성분 및 금속조직에 따른 분류

Table. 1 스테인리스의 강종별 재질특성

구분	특징	장점	단점
마르텐사이트계	-강자성체 -열처리 경화 가능	-강도가 매우 높음	-연성-취성 천이 존재 -용접부 취하 심함
페라이트계	-자성체 -열처리 경화 없음 -가공경화성 낮음	-냉간 및 고온가공 용이 -열팽창 계수 낮음 -IGSCC 저항성 우수	-고온 및 용접부 취하 - Grain growth -475℃, 시그마 취성
오스테나이트계	-비자성체 -연성-취성 천이 없음 -냉간가공 경화능 큼	-가공과 용접성 우수 -내식성과 청결성 우수 -고온강도 높음 -저온인성 높음	-Cl ⁻ 분위기에서 SCC 위험성 높음 -고합금강은 시그마상 형성가능성 높음
2상계	-페라이트와 오스테나이트상이 50 : 50	-Cl ⁻ 분위기에서의 내공식성, 내SCC성 큼 -고강도로 경량화 가능	-300℃ 이상 사용 불가 475℃ 취성 상 형성 -시그마상 형성
석출경화계	-급냉 및 시효처리를 통한 재질특성 조절	-초고강도, 고경도	-연신율이 매우 낮음

1.2 연구동향

재질에 따라 독창적인 특성을 가지는 장점은 활용하고, 재료의 단점을 보완하려는 이중용접은 그간 많은 연구가 있어왔다. 일반적인 용접방법으로는 TIG용접, MIG용접, 가스용접 등 많은 용접방법이 있다. 그러나 본 연구에서는 주로 레이저를 이용하여 이중 용접한 연구 사례를 정리하여 Table. 2에 정리하였다.

Mai(2)는 평균출력이 350W인 Nd:YAG 펄스 레이저로 두께가 1mm인 시편을 제작하여 강과 kovar 그리고 동과 알루미늄을 이중 용접하였다. 이중용접을 포인트 계산 및 라인 스캔 강도에 따라 중앙을 가로 질러 상부 표면으로부터 0.2mm 높이에서 용접을 실시했다. 레이저 빔으로부터의 열 전달이 아닌 직접 가열방식을 사용하여 Nd:YAG 펄스레이저로 세 가지 서로 다른 재료의 조합으로 용접을 실험 하였다. 이중금속을 용접할 때에는 금속의 용융점이 중요한 변수임을 나타냈다. 레이저빔으로 이중금속 간 용접할 경우 극히 제한된 에너지 밀도가 높은 열원을 집중함으로써 열분포 및 용접의 결합으로 작용하는 상호 작용을 최소화 할 수 있고, 부서지기 쉬운 금속상태의 형성을 회피 하여, 제품의 기계적 특성을 향상 시킬 수 있는 가능성을 발표하였다. 이외에도 본 연구에서 극소부위에 집중적으로 열원을 조사해서 변형을 최소화해야 하는 마이크로 시스템 구성요소의 용접에 유의함을 나타냈다.

Bruggemann(3)는 RSt37-2강과 알루미늄합금(Al-Mg-Si0.7)을 출력이 5kW의 CO₂ 레이저를 이용하여 이중용접에 대한 이론과 실험결과를 비교하였다. 이중용접할 때 공정변수는 출력, 속도와 용접조사 각도를 변화시켜 레이저 빔의 높은 용접속도에 따라 균열이 발생하는 결과를 얻었다.

YOO(7)는 초내열합금강 인코넬 600과 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이중용접 하였다. 각각의 시편을 비드 온 플레이트로 용접했을 때와 이중용접 했을 때 용접부의 용융비드모양에 커다란 차이가 있는 것을 관찰하였다. 커다란 차이가 나타난 이유는 설명 Inconel 600의 경우 Ni성분이 많고, ST304의 경우에는 Fe성분 많기 때문인 것으로 추론 발표했다.

레이저빔 이송속도가 느릴수록 온도구배가 상대적으로 작아져 결정이 다른 결정표면에서 특정방위관계를 가지면서 성장하는 현상이 둔화된 현상이 나타났다. 레이저빔 이송속도가 빠를수록 냉각속도가 증가하면 용융풀이 입자의 성장이 용융중심선에 수

직한 방향으로 발생하였고, 레이저빔의 공정변수를 각각 다르게 하더라도 입열량으로 계산한 값의 차이가 작으면, 인장강도는 근소한 값의 차이를 가진다는 것을 알아냈다. 그러나 이 연구의 방법이 입열량의 변화로 용접특성을 분석한 것이 아니고, 레이저빔의 출력과 이송속도를 변화시키면서 용접특성을 분석하였기 때문에, 레이저빔이 시편에 조사되는 입열량을 변수로 하여 분석하지는 않았다.

Shin(8)은 레이저빔의 출력과 이송속도를 변화시키면서 기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계 304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저빔으로 이중용접을 연구하였다. 이중용접시 SM45C에서 발생하는 기공과 고온균열이 거의 발생하지 않았다. 이는 오스테나이트계 고용체합금이 용융부에서 상변태가 일어나지 않고 연성이 큰 오스테나이트 상태와 혼합되어 보완하기 때문이라고 발표 하였다. 또 다른 이유로 18 ~ 20%를 포함하고 있는 Cr이 고온에서 확산속도가 빨라져 고온균열을 제어했기 때문이라고 발표하였다. SM45C면에 근접한 부분의 미세조직은 펄라이트와 페라이트조직이 레이저빔이 조사될 때 STS304와 높은 온도에서 혼합 되면서 조직의 입자크기가 조대해졌고, ST304면에 근접한 부분은 오스테나이트조직과 페라이트 상이 관찰되며, 수지상의 오스테나이트 구조를 관찰하였다. 오스테나이트조직성분인 ST304는 모재의 영향 때문에 급랭으로 인하여 모재와 용접면과의 경계면으로부터 냉각되어 용융부 중심부 쪽으로 수지상(dendrite)조직이 형성되어 모재보다 경도값이 약간 상승한 결과도 발표하였다. 이때에도 레이저빔의 이송속도와 출력을 변화시키면서 용접을 하였기 때문에 용접에 직접적으로 영향을 미치는 입열량의 변화에 대한 변화로는 분석하지 않았다.

Yoo(9)는 일반기계구조용 탄소강인 SS400과 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저빔으로 이중용접을 연구하였다. SS400의 맞대기용접시 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min로 느릴 경우 용융부에서 재결정이 발생하고 입자가 성장하여 큰입자와 작은 입자가 공존하지만, 레이저빔 이송속도가 1.4m/min로 빠르게 진행하면 충분히 입자가 성장하지 못하여 비교적 미세한 침상형 페라이트와 조밀한 페라이트 및 마르텐사이트가 혼합되어 있는 구조를 관찰하여 발표하였다. 탄소강을 레이저용접하면 발생하는 기공과 내부균열이 스테인리스강과 이중용접시 SS400에서 발생하는 기공과 고온균열이 거의 발생하지 않았다. 이는 오스테나이트계 고용체합금이 용융부에서 상변태가 일어나지 않고 연성이 큰 오스테나이트 상태와 혼합되어 보완하기 때문이다. 또 다른 이유로 18 ~ 20%를 포함하고 있는 Cr이 고온에서 확산속

도가 빨라져 고온균열을 제어했기 때문이라고 발표하였다. 오스테나이트조직성분인 STS304는 모재의 영향때문에 급랭으로 인하여 모재와 용접면과의 경계면으로부터 냉각되어 용융부 중심부 쪽으로 수지상(dendrite)조직이 형성되어 모재보다 경도값이 약간 상승하였다.

Yoo(10)일반기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이중용접한 후 최적용접 공정변수에 대해 연구하였다. SM45C에서 발생하는 고온균열은 레이저빔의 이송속도가 느릴 경우 레이저 용접 시 용접 열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성에 포함되어 있는 P, S, C성분이 원인이라고 발표하였다. SM45C는 레이저빔의 출력이 1800W이고 이송속도가 1.0m/min 이상에서는 급격히 감소하고 키 홀을 형성하지 못하여 입열량이 감소한 것으로 보인다. 이와 반대로 STS304는 빔 이송속도가 증가하면서 입열량이 선형적으로 감소하였고, 이중용접한 후 양쪽 모재에서 응고하기 시작하여 용융 풀 중심 방향으로 응고하기 때문에 용융 풀 중심부는 액체 상태로 있지만 모재부분부터 냉각에 의한 재 응고 때문에 중심부에 균열이 발생하였다.

위 사례를 정리하면 이중용접할 때 레이저빔의 출력과 이송속도를 임의로 조정하면서 시행착오 방법으로 적정한 이중용접 공정을 찾아가면서 실험하였다. 레이저빔의 출력과 이송속도를 변수로 하여 용접할지라도 레이저빔의 초점거리와 보호가스의 유량 등에도 영향을 받기 때문에 이중용접을 위한 기준으로 결정하기에는 많은 문제점을 가지고 있다.

이와 같은 문제점을 개선하기 위해 본 연구에서는 이중용접 할 때 입열량을 변수로 하여 용융부의 면적변화, 경도분포 및 인장응력을 실험하였다. 선행연구처럼 레이저빔의 출력이나 이송속도로 용접조건을 결정하면 재질에 조사되는 입열량이 용접에 미치는 중요한 변수임에도 불구하고 이를 간과할 수 있기 때문에 본 연구에서 입열량을 변수로 하여 이중용접의 특성을 분석하고자 한다. 이 실험을 바탕으로 하여 입열량의 변화에 대한 용융부의 변화와 평균경도분포 및 인장응력의 변화에 대한 실험식을 제안하고자 한다.

Table.2 Recent research of Laser Dissimilar Metals Welding

Writer/Year	Study Substance
Brüggemann [2000]	RSt37-2강과 알루미늄합금(Al-Mg-Si0.7) 을 출력이 5kW 인 CO ₂ 레이저를 이용하여 이종용접에 대한 이론과 실험결과를 비교하였다.
T.A.Mai [2004]	평균출력이 350W인 Nd:YAG 펄스 레이저로 두께가 1mm인 시편을 제작하여 강과 kovar 그리고 동과 알루미늄을 이종 용접하였다.
Y.T.Yoo [2004]	초내열합금강 인코넬 600과 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이종용접 하여 빔의 공정변수를 각각 다르게 하더라도 입열량의 차이가 작으면, 인장강도는 근소한 값의 차이를 가진다는 것을 알아냈다.
H.J,Shin [2004]	기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계 304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저빔으로 이종용접을 연구하여 이종용접시 SM45C에서 발생하는 기공과 고온균열에 대해 평가하였다.
Y.T.Yoo [2004]	일반기계구조용 탄소강인 SS400와 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이종용접비교 분석하였다.
Y.T.Yoo [2006]	일반기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이종용접한 후 최적용접 공정 변수에 대해 연구하여 SM45C의 경우 고온균열은 입열량이 클 경우 레이저 용접 시 용접 열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성에 포함되어 있는 P, S, C성분이 원인이 된다는 것을 평가하였다.

1.3 연구목적

본 연구는 탄소강인 S45C와 STS304 스테인리스강을 입열량의 변화에 따른 이중 용접의 특성을 분석하고자 한다. 이들 강들의 주성분은 탄소C, 규소Si, 망간Mn, 인P, 니켈Ni 및 크롬Cr으로 구성 되어 있다.

중탄소강인 SM45C는 기계구조용 탄소용강으로 강을 단련하여 불림 (normalizing) 처리, 즉 표준화 처리한 것을 말한다. 탄소강의 표준 조직은 ferrite로 α 철에 최대 0.025% 까지 탄소가 고용된 고용체이기 때문에 α 고용체라고도 한다. 극히 연하고 연성이 크나 인장강도는 작고 상온에서 강자성체이다. 과면은 백색을 띠며 순철에 가까운 조직이다. 탄소강 중 pearlite는 탄소 0.85%의 γ 고용체가 723°C에서 분열하여 생긴 ferrite와 cementite의 공석정으로 ferrite와 cementite가 layer상으로 나타나는 강인한 조직이다. cementite는 8.68%의 탄소를 함유한 탄화철로 경도와 메짐성이 크며 백색이다. 상온에서 강자성체이며 담금질을 해도 경화되지 않고 화학식은 Fe₃C이다. austenite는 실온에서는 존재하기 힘들고 γ 고용체로 탄소강의 물리적 성질과 화학적 성질은 순철에 가까운 ferrite와 cementite가 혼합된 것으로 비중, 열팽창계수, 열전도율은 탄소량의 증가에 따라 감소하나 비열, 전기 저항, 항자력은 증가한다. 또한 내식성은 탄소량이 증가할수록 감소하고 소량의 Cu가 첨가되면 내식성은 급증한다.

탄소강의 기계적 성질은 상온의 아공석강에서는 탄소함유량에 비례하여 거의 직선적으로 변하여 인장강도, 경도, 항복점등은 탄소량의 증가에 따라 증가하고, 공석강에서는 인장강도가 최대가 되며, 연신율 및 단면 수축율은 탄소량과 더불어 감소한다. 또한 과공석강에서는 cementite가 망상으로 나타나므로 인장강도는 탄소가 증가하여도 감소되나 경도는 증가한다.

탄소강의 온도에 따른 기계적 성질은 동일 성분의 탄소강이라도 온도에 따라 그 기계적 성질은 매우 달라지는데, 탄소가 0.25%인 강을 예로 들면 0 - 500°C 사이에서 일어나는 성질변화는 탄성계수, 탄성한계, 항복점 등은 온도의 상승에 따라 감소하고, 인장강도는 200 - 300°C 까지는 상승하여 최대가 되며, 연신율과 단면 수축율은 온도상승에 따라 감소하여 인장강도가 최대가 되는 점에서 최소값을 나타내고 다시 커진다. 충격값은 200 - 300°C에서 가장 적다.

탄소강은 온도에 따라 취성(brittleness)이 나타난다. 청열취성은 강은 200 - 300°C에서는 강도는 크지만, 연신율은 대단히 작아서 결국 취성을 나타낸다. 이 때의 강은 청색의 산화 피막을 형성하는데, 이를 청열 취성이라 한다.

적열취성은 황 (S)이 많은 강은 고온에 있어서 여린 성질을 나타내는데 이를 적열 취성이라 한다. 상온취성은 인(P)이 강의 결정 입자를 조대화시켜 강을 여리게 만들며, 특히 상온 또는 그 이하의 저온에 있어서는 특히 현저해 진다. 고온취성은 강 중에 구리 (Cu)의 함유량이 0.2% 이상이 되면 고온에 있어서 현저히 여리게 된다.

냉간취성은 일반적으로 강의 충격값은 100°C 부근에서 최대이며, 상온 이하에 있어서는 현저히 여리게 된다.

탄소강 중에 존재하는 탄소 이외의 원소 있는데 규소(Si)는 강의 경도 탄성 한계, 인장 강도를 증가시키며, 연신율 및 충격값은 감소시킨다. 결정입자의 크기를 증대시켜 가단성, 전성을 감소시킨다. 망간(Mn)은 황과 화합하여 MnS로 되어 황의 해를 제거하며, 고온 가공을 용이하게 한다. 강도, 경도, 인성을 증가시키며, 고온에 있어서는 결정입자의 성장을 방해한다. 소성을 증가시키고 주조성을 좋게 한다. 담금질 효과를 크게하며 탈산제로도 사용된다.

인(P)은 경도와 강도를 증가시키고, 가공시 균열을 일으키며, 상온 취성의 원인이 된다. 기포가 없는 주물을 만들 수 있고, 절삭성이 좋아진다.

황(S)은 적열상태에서는 취성이 커지며, 인장 강도, 연신율, 충격값을 감소시킨다. 강의 용접성을 나쁘게 하며, 강의 유동성을 해치고 기포를 발생시킨다. 망간과 화합하여 절삭성이 좋아진다. 구리(Cu)는 인장 강도, 탄성한도를 증가시키고 내식성을 증가시킨다. 압연시 균열의 원인이 된다. 그외 산소(O₂)는 적열취성의 원인이 되며, 질소(N₂)는 경도와 강도를 증가시키고, 수소(H₂)는 미세 균열의 원인이 된다.

탄소의 함유량에 따라 탄소강이 분류가 되는데 0.15%C 이하의 저탄소강은 탄소량이 적어 담금질 뜨임에 의한 개선이 어려워 냉간 가공을 하여 강도를 높여 사용할 때가 많다. 대상강 (帶狀鋼), 박강판, 강선 등에는 냉간 가공성이 좋으며 규소 함유량이 적은 저탄소강이 사용된다. 0.16 - 0.25%C 함유 된 탄소강은 강도에 대한 요구보다도 절삭 가공성을 중요시하는 것으로 0.15% C 부근의 것은 냉간 가공용 강으로 널리 사용된다. 0.25% 부근의 것은 볼트, 너트, 핀 등 그 용도는 지극히 넓다. 얇은 탄소강 관재로는 0.15 - 0.25%C 정도가 많이 사용된다.

0.25 - 0.35%C 함유 된 탄소강은 이 범위의 탄소강은 단조, 주조, 절삭 가공, 용

접 등 어떠한 경우라도 쉽다. 또한 조질에 의해 재질을 개선할 수도 있다. 담금질, 뜨임을 하면 대단히 강인해지며 차축, 기타 일반 기계 부품에서는 압연이나 단조 후 풀림이나 불림을 행하므로 열간 가공에 의해서 조대화나 불 균일하게 된 결정입자를 균일 미세화해서 그대로 절삭 가공만을 하여 사용한다.

0.35 - 0.45% C 함유 된 탄소강은 비교적 대형의 단조품에서 강도가 부족하거나 또는 조질 후 비교적 큰 강도를 요구할 때 사용된다. 즉 차축, 크랭크축 등 강인성을 요하는 부품에 적합하다. 탄소량이 많은 편이라 용접이 곤란하다.

0.45 - 0.60% C 함유 된 탄소강은 취성이 있고 담금질성은 크나 담금질 균열이 생기기 쉽다. 열 균열이 생기기 쉽고 인성도 불충분하다. 이 범위의 탄소강은 비교적 용도가 적다. 0.6% C 이상이 함유 된 고탄소강은 구조용재로서 0.6% C 이상의 고탄소강을 사용하는 일은 거의 없으나 공구강, 편, 차륜, 레일, 스프링 등과 같은 내마모성, 고향복점을 요구하는 물품에 사용된다.

STS304는 가장 널리 사용되는 강종으로 내식성, 내열성, 저온강도, 기계적 성질이 양호하고 일반적으로 가정용품, 옥내배관, 자동차부품, 의료기구, 건축자재, 식품공업, 섬유산업, 선박부품에 사용되고 있는 재료로 사용하고 있다.

금속 재료별 내식성, 내마모성, 인장강도, 압축강도 등 장점을 활용하는 기계부품이 산업현장에서 널리 쓰이고 있기 때문이다. 특히 물리화학적인 특성을 복합적으로 필요로 하는 산업현장에서 하나의 금속으로는 까다로운 조건을 완벽하게 충족할 수 없는 경우가 많다. 그래서 새로운 재료를 개발하거나 이종의 금속을 용접해서 사용하는 경우가 많다. 서로 다른 기계적 특징을 갖는 재료를 접합하는 이종용접은 사용용도, 사용 빈도, 효율적인 측면에서 매우 중요시되고 있다. 이러한 이종용접의 특성 때문에 이와 관련된 연구가 절실히 필요하다. 그래서 산업현장에서 이종 금속 용접에 대한 신뢰성과 안전성 및 생산성 향상에 기여할 수 있는 연구를 실시하였다.(4-6)

이와 같은 치명적인 단점을 보완하기 위해 STS 304와 같은 오스테나이트계 스테인리스강과 이종 금속 용접을 하려고 한다. 이런 재질을 이용한 이종용접이 국내외적으로 연구가 활발히 진행되고 있는데 아직까지 이종용접은 조성분의 화학적 물리적 차이로 인하여 많은 결함을 가지고 있다. 일반적으로 용접할 때 레이저빔의 출력과 이동속도를 변화시키면서 연구 하였지만 본 연구에서는 입열량의 변화에 따른 용접 특성을 연구하고자 한다.

제 2 장 레이저빔 용접 원리

레이저 용접은 고밀도 에너지의 레이저빔을 접합하고자 하는 금속에 조사하면 열 에너지로 전환되어 매우 빠른 시간에 금속표면을 용융시킨다. 금속표면이 용융되면 레이저빔이 반사되는 것보다 용융된 금속표면에서 흡수되는 에너지양이 급속하게 증가하면서 금속의 깊이 방향으로 키홀(Keyhole)을 형성하게 된다. 키홀이 형성되면 키홀 내에 레이저빔의 다중반사와 흡수현상이 일어나면서 에너지가 기하급수적으로 흡수되며 레이저빔이 진행하면서 주위에 열에너지가 전달되어 벽면이 용융과 응고가 주기적으로 반복되면서 용접이 이루어진다.

일반적으로 초기 레이저 파워밀도 $10^4 W/cm^2$ 에서 키홀이 수반되는 열전도 용접이 진행되고, $10^6 W/cm^2$ 이상의 파워밀도에서 깊은 용입(Deep Penetration)의 키홀 용접이 진행된다. 일반적으로 광학계에 의해 전달되는 레이저빔은 가우시안분포를 하고 있기 때문에 레이저빔 중심부 구역에서는 금속의 증발이 일어나고, 그 외곽지역에서는 용융이 일어난다. 용접부의 중심부 구역은 에너지밀도가 높아 기화된 큰 증기압이 용융금속을 레이저빔의 조사되는 중심부 구역으로부터 옆으로 밀어내므로 레이저빔은 더욱 내부로 침투되며, 중심부의 깊이를 더욱 크게 한다. 이때 금속증기가 분출하는 반동력에 의해서 용융금속면에 함몰과 용융풀이 채워지는 현상이 반복되어 용접 비드가 생성된다.

용융풀의 유동현상은 고점성 유체유동 현상으로 해석할 수 있으며, 키홀 발생시 증기제트(Vapour Jet)와 플라즈마 진동, 용융풀 내에선 모세관 파동(Capillary Waves)과 함께 기포, 기공, 다상유동(Multiphase Flow) 즉, 액상과 기체가 혼합된 형태로 존재하게 되어 용융풀 유동이 복잡해진다. 키홀 내의 유동풀에서 정수압이나 표면장력은 키홀을 함몰시키려 하지만, 내부의 증기압이 키홀을 유지하며 레이저빔이 통과한 공간을 주위의 용융물이 채워준다. 만약 키홀을 안정적으로 유지할 수 없게 되면, 용융금속이 키홀을 덮어 기포가 빠져 나가지 못하기 때문에 기공(Porosity)이 포획되어 기공결함이 발생한다. 키홀 형성시 발생한 금속증기는 용융 금속의 응고전 일정한 주기를 가지고 외부로 방출되기도 하지만, 금속외부로 방출되지 못하고 용융부의 용접 비드에 잔류하여 기공을 형성하기도 한다.

레이저 용접은 키홀을 통하여 직접 가열되므로, 비드의 단면은 열전도형과는 다르

게 폭이 좁고 깊게 용융풀이 형성된다. 또한 증발한 금속증기가 고온의 플라즈마로 되면 레이저빔은 플라즈마에 흡수되어 재료에 도달하는 빔 에너지가 감소하게 되어, 보호가스를 분사시켜 플라즈마를 제거해야 한다. 레이저빔을 금속재료에 조사하면 초기에는 반사손실은 크지만, 일단 키홀이 형성되면 레이저빔은 키홀 내를 다중반사하기 때문에 거의 반사손실이 일어나지 않는다.

레이저 용접은 고에너지 밀도의 빛을 사용하기 때문에 어떤 금속이라도 고속으로 변형없이 정밀 가공할 수 있다는 장점이 있다. 아크 용접과 비교하면 용가제가 필요 없으며, 한번에 심(Seam) 용접을 할 수 있을 뿐만아니라, 용접시 변형이 적게 발생하는 장점이 있다. 고밀도 에너지를 사용한다는 점에서 유사한 용접방식인 전자빔(Electric Beam) 용접과 비교하면 전자빔 용접의 필수 조건인 진공 유지가 레이저 용접의 경우 필요없기 때문에 전자빔 용접과 같이 진공 챔버 내에서 용접할 필요가 없다. 이는 가공물의 형상이나 크기에 제한이 없으며, 전자기장의 영향을 받거나 X-선을 방출할 염려가 없고 유지보수비용이 상대적으로 저렴한 이점이 있다. 레이저 용접은 집속된 빔을 사용함으로써 열영향부가 적고, 열원을 집중시켜 전도에 의한 열에너지 손실을 줄여 재료의 열 변형을 최소화 할 수 있다.

제 3 장 실험방법 및 기기

3.1 실험 기기 및 실험재료

3.1.1 실험 기기

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 $1.06 \mu\text{m}$ 이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 $600 \mu\text{m}$ 인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔 발산 각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다.

레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 $1000 \times 500 \times 400 \text{mm}$ 이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 $5 \mu\text{m}$, z축에 대한 위치정밀도는 $1 \mu\text{m}$, 반복정밀도는 $8 \mu\text{m}$ 이다.

레이저 LASMA의 사진은 Fig.3에 나타냈으며 실험장치의 모식도는 Fig.4에 나타내었다.



Fig. 2 CW 2kW Nd:YAG Laser



Fig. 3 CW 2kW Nd:YAG Laser

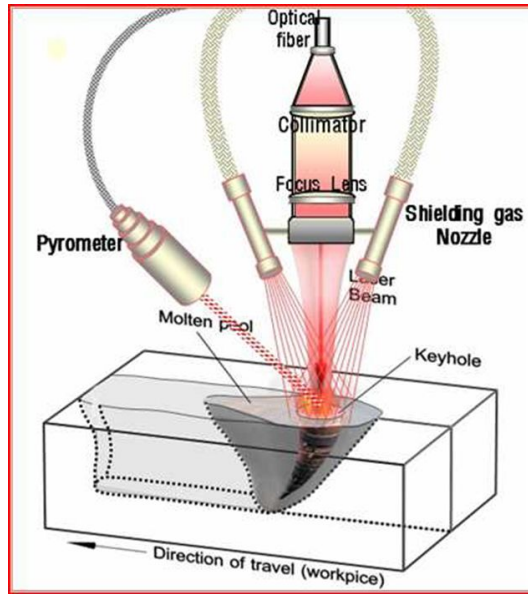


Fig. 4 Schematic diagram and photo of the experimental apparatus

3.1.2 실험 재료 특성

본 연구에 사용된 시편은 기계구조용 중탄소강인 SM45C와 오스테나이트계 스테인레스강인 STS304이다. 이 시편의 물리적성질과 화학적성질을 아래 Table 2, Table 3에 나타내었다.

Table. 4 Mechanical and physical properties of STS304 and SM45C

	SM45C	STS304
Tensile stress (MPa)	570	520
Elongation (%)	-	40
Thermal conductivity (W/mK)	36.5 ~ 43.5	14.9
Melting point (°C)	1420 ~ 1450	1400
Density (Mg/m ³)	-	8
Thermal expansion	10.73 ~ 10.92	18.8
Hardness (HB)	220	210

Table. 5 Chemical composition of STS304 and SM45C

	SM45C	STS304
C	0.42 ~ 0.48	0.08
Si	0.15 ~ 0.35	1.0
Mn	0.6 ~ 0.9	2.0
P	0.03>	0.04>
Ni	-	8.0 ~ 10.5
Cr	-	18 ~ 20

3.2 실험방법

3.2.1 Bead On Plate (BOP) 실험방법

SM45C와 STS304의 이중금속 용접을 위한 용접 공정변수를 결정하기 위해 BOP(Bead on plate) 방식으로 용접한 선행연구논문의 동종재질을 용접한 공정변수를 이용하였다. 동종재질을 BOP로 용접한 SM45C의 선행연구의 공정변수를 기준으로 STS 304와 이중용접 하였다. 이 결과를 비교하기 위해 STS304의 동종재질의 용접할 때 최적용접상태를 나타내는 공정변수로 이중 용접하여 그 특성을 분석하였다. SM45C와 STS304의 이중용접의 최적용접 공정변수는 중횡비가 크고 용접단면에 결함이 없는 경우를 용접공정조건으로 결정하기 위해서이다.

SM45C의 경우 선행논문에서 최적의 용접공정을 결정하기 위해 레이저빔 출력은 1.8kW로 하여 공정변수를 변화시켜 용접하고 빔 이송 속도를 $v=0.5\sim 1.5\text{m/min}$, $z=0\text{mm}$ 로 하였기 때문에 레이저 출력을 1.8kW로 하여 실험하였다.

BOP 용접 할 경우 관통용접이 될 때까지 레이저빔의 용접속도를 조절 하면서 용접했다. 관통용접이 되었을 경우 시편의 전면 비드폭과 후면 비드폭의 비를 아래 식 (1)로 계산하여 그 변화를 측정하여 전면 비드를 중심으로 측정한 입열량의 변화를 비교 분석하였다. 입열량의 변화에 따른 용접특성을 분석하기 위해 입열량을 계산하는 식은 아래 식 (2)로 계산하여 그 특성을 분석하였다.

$$WR(With\ Ratio) = \frac{W_2}{W_1} \dots\dots\dots(1)$$

$$E(Heat\ input) = \frac{P}{w \times v} [J/cm^2] \dots\dots\dots(2)$$

- E : 입열량
- WR : 비드폭비
- P : 레이저 빔 출력
- w : 전면 비드폭
- v : 레이저 빔 이송속도
- W_1 : 전면 비드폭
- W_2 : 후면 비드폭

3.2.2 이중용접 실험방법

선행 연구에서 BOP(Bead on plate) 방식으로 용접한 결과와 레이저빔의 출력이 1.8kW일 때 이송속도가 1.5m/min이상 증가시키면 관통용접이 되지 않았기 때문에 본 연구에서도 레이저 빔의 이송속도는 1.5m/min까지 증가시켰다. 이때 레이저빔을 출력을 1.8kW이고 초점위치는 시편표면 $z=0\text{mm}$ 에 위치하도록 조사하였다. 레이저 빔의 이송속도 범위는 각각 $v= 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5\text{m/min}$ 을 변화시켜 중심으로 이중용접을 하였다. 이중용접하여 관통 용접되어 형성된 용접단면을 측정하여 입열량으로 계산한 다음 이중용접특성을 분석하였다.

Table. 6 Experimental conditions

	Welding
Laser Power(W)	1.8 kW
Travel Speed(m/min)	0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5m/min
Focal Position (z)	0 mm

3.3 실험분석 장치 및 방법

3.3.1 실험시편 제작

이종금속의 입열량의 변화에 따른 용접특성을 분석하기 위해 기계구조용 중탄소강인 SM45C와 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304의 시편을 제작하였다. 실험에 사용된 SM45C(Fig, 5)와 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304(Fig, 6) 시편은 각각 두께 2mm, 가로 150mm, 세로 60mm의 시편으로 가공하였다. 시편을 제작한 후 용접하기 전에 용접과정에서 발생 할 수 있는 이물질의 영향을 제거하기 위해 깨끗한 물로 세정을 하고 아세톤으로 오염물질을 처리 하였다.



Fig.5 SM45C

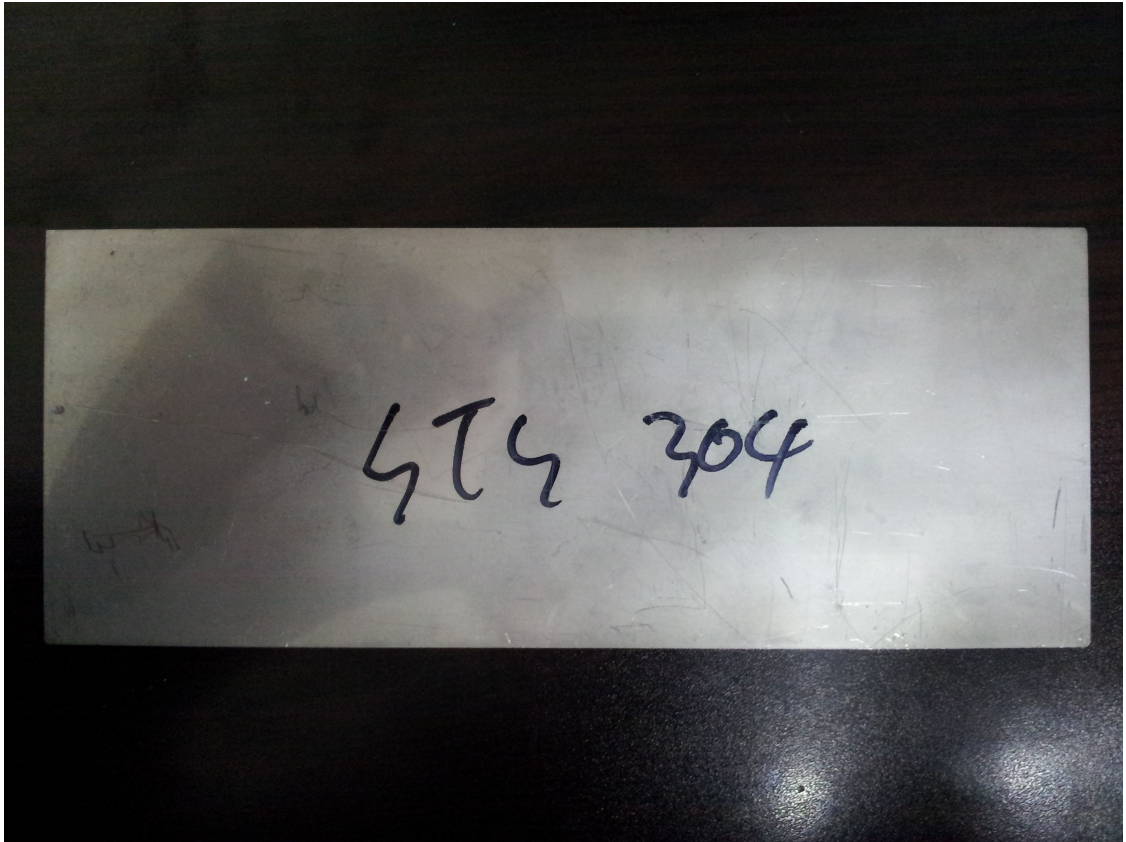


Fig.6 STS304

3.3.2 용접분석용 시편 제작

용접한 후 용접단면의 결함이나 조직의 변화를 분석하기 위해 레이저 용접된 BOP 시편과 이중용접된 시편을 Fig. 7의 다이아몬드 커팅기를 사용하여 용접시편단면을 채취하였다. 다이아몬드 커팅기는 모델명 ISOMET 4000으로 커팅날 속도(BLADE SPEED)는 200~ 5000RPM, 커팅 이송속도(FEED SPEED)는 1.2~19mm/min이고, 커팅날 조정거리 (DISTANCE REMAINING) 84.83~86.61mm 범위 내에서 제어 가능한 원형의 다이아몬드 커팅날을 사용하여 절단 할 수 있는 정밀절단기이다. 용접이 끝난 순수시편을 절단기 내부의 고정하는 곳에 시편을 추출할 부위를 다이아몬드 커팅 날과의 거리를 조정하여 이송속도(FEED SPEED)를 선정하여 절단하였다. 커팅 전 원활한 커팅을 위해 커팅전 BUEHLER사의 Cutting Fluid(Fig. 8) 를 병 뚜껑 기준 6번 정도 용액을 투하하여 마찰에 의한 열의 영향을 최소화 하면서 절단하였다. 절단은 시편의 재료마다 강도가 다르면 적절한 이송속도(FEED SPEED)를 결정해야 한다. 시편을 절단하면서 마찰열 때문에 용접단면에 영향이 미치지 않도록 속도를 조절하고 생각하면서 절단하였다. 다이아몬드 절단기를 사용하여 STS304는 1.7mm/min SM45C는 1.5mm/min의 속도로 절단하여 용접단면을 채취한 다음 조직분석하기 위해 마운팅 프레스기로 핫 마운팅하였다.

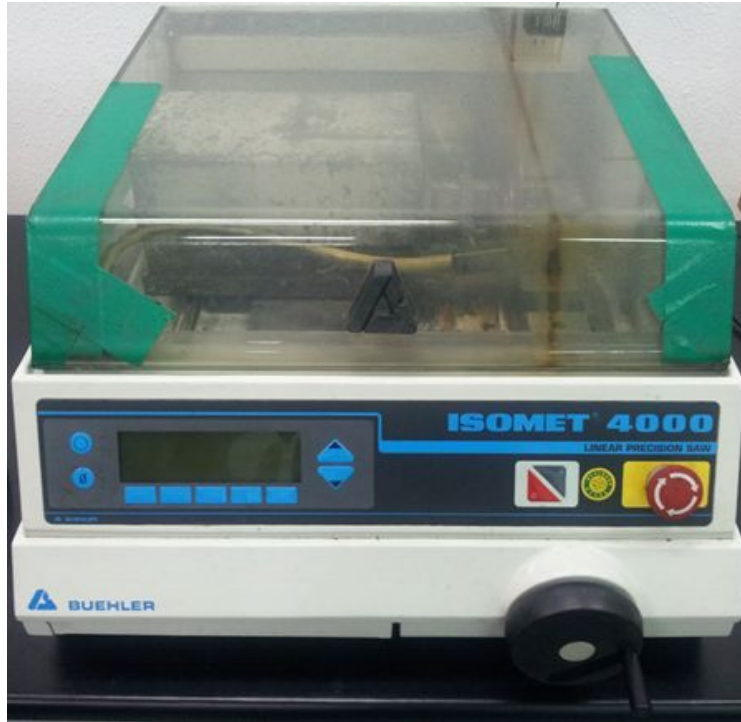


Fig. 7 다이아몬드 컷팅기



Fig. 8 BUEHLER사의 Cutting Fluid

3.3.3 시편마운팅

시편을 절단하여 채취한 용접단면을 분석하기 위해 시편을 핫 마운팅하였다. 여기에 사용된 장비는 Fig. 9의 핫 마운팅 프레스(Automatic Mounting Press)으로 (주)R&B의 제품으로 상부의 레버를 열어 시편을 올려서 핫마운팅 프레스용 전용 백색 파우더(acrylic resins 성분)를 사용하여 큰수저 2스푼(15ML) 작은수저 1스푼(5ML)을 투하하여 시편단면을 분석할 수 있도록 마운팅 처리 하였다. 이때 올려놓은 시편이 기울어지면 시편이 경사지기 때문에 단면측정이 어려워질 수 있어 수평을 유지하기 위해 시편 고정 클립인 Sample Holding Clips을 시편에 고정을 시켜서 마운팅을 실시한다. 핫마운팅 전용 백색 파우더(acrylic resins 성분)의 투하가 끝난 후 기기의 제어장치중 하나인 down 버튼을 눌러 시편을 하강시키면 고온의 프레스 작업이 자동으로 진행된다. 30분정도의 시간이 지나면 종료와 함께 마운팅이 끝났다는 벨이 울리면 종료시키고, 마운팅기와 수도와 연결된 냉각수 호수를 사용하여 마운팅할 시 시편의 고온상태를 냉각시시켜 온도가 25~30도 될 때까지 대기한 후 원형으로 가공된 지름 35mm, 높이 20mm 의 마운팅 시편을 추출 할 수 있다. 시편을 마운팅 프레스로 가공한 시편을 Fig. 10 에 나타냈다.



Fig. 9 핫 마운팅 프레스

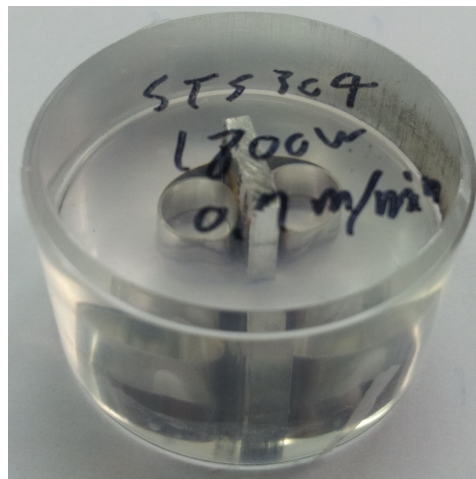


Fig.10 핫 마운팅 가공된 시편

3.3.4 광택연마

용접단면의 조직을 분석하기 위해 핫 마운팅해서 원형기둥에 삽입된 시편을 광택연마를 하였다. 광택연마로 사용된 장비는 Fig. 11 의 TOPMET METPOL-1으로 헤드는 10~140RPM과 하부의 원형판이 50~500RPM으로 제어 할 수 있는 연마기를 사용하여 절단하면서 표면이 거칠어진 용접단면을 연마함으로써 조직분석이 용이하게 하였다. 마운팅 된 시편을 자동 연마기 홀더를 홀더케이스에 올려놓는다. 마운팅 된 시편을 홀더 안에 끼워 넣고 육각렌치를 이용하여 마운팅 시편을 단단히 고정한다. 자동 폴리싱 헤드에 마운팅 홀더를 체결하고, 사포(Sand paper)를 부착한다. 폴리싱 장치의 전원을 공급하고 연마하면서 용접단면이 연마열에 변화되는 것을 방지하기 위해 냉각수를 흘려보낸다. 냉각수가 흐르면서 시편과 사포가 고체마찰을 하여 열변형이 발생하지 않도록 물이 전면에 골고루 흐르게 한다. 자동 폴리싱헤드 시간, 부저, 모터를 순서대로 클릭한다. 초기에는 사포의 표면에 거친 것부터 시작하여 광택연마가 되도록 사포를 교체하면서 연마한다. 사포(Sand paper)는 #220, #400, #800, #1000, #1200로 폴리싱 한다. 사포의 번호가 증가할지라도 각각 sand paper만의 흔적이 남기 때문에 사포(sand paper)로 연마한 다음 suspension 6 μ m 을 사용하기 위해 흰색의 연마 종이를 사용하여 폴리싱한다. 이때 suspension 6 μ m용액으로 광택 연마하여 사포의 미세한 흠집이 남지 않도록 한다. 한번정도로 분무기를 뿌린 후 연마종이에 물기가 마르지 않도록 물을 조금씩 적셔준다. 연마하면서 광택의 정도를 확인한다. 연마 후 알코올을 사용하여 표면을 깨끗하게 처리 한다. 드라이기를 사용하여 표면에 물기 및 알코올을 없앤다. suspension 6 μ m의 연마가 끝난 후 suspension 1 μ m을 사용하기 위해 광택전용연마 종이를 사용하여 연마한다. 이때 suspension 1 μ m용액으로 광택연마 한다. 한번정도로 분무기를 뿌린 후 연마종이에 물기가 마르지 않도록 물을 조금씩 적셔 준다. 연마하면서 광택의 정도를 확인한다. 연마 후 알코올을 사용하여 표면을 깨끗이 해준다. 드라이기를 사용하여 표면에 물기 및 알코올을 없앤다.



Fig. 11 자동 연마기

3.3.5 에칭

광택연마된 시편의 조직을 분석하기 위해 화학용액을 사용하여 에칭 하였다. 에칭은 마이크로 피펫을 사용하여 에칭액을 제조하였다. 작은 비이커에 parafilm을 사용하여 비이커 윗면을 봉한 다음에 에칭용액이 증발하지 않도록 한다. 에칭용액은 $CuSO_4$ 10mg + Hcl 50ml + H_2O 50ml 비율로 혼합해서 제조하였다. 광택연마 한 시편을 흐르는 물에 약간의 제조한 에칭용액을 이용해서 에칭을 한다. 에칭의 정도를 확인하면서 에칭액을 조금씩 사용하여 에칭하여 조직이 나타날 때까지 반복한다. 길 다란 면봉에 에칭액을 묻혀서 최종적으로 연마된 시편에 골고루 묻질러 준다. 이때 시편 표면에 발생하는 에칭정도를 파악한다. 흰색 광택이 나타나면 에칭이 완료 되지 않은 것이고, 회색과 약간의 어두운색이 조합되면 에칭이 된 걸로 생각하여 현미경으로 관찰한다. 에칭 상태를 육안으로 완벽하게 판단 할 수 없기 때문에 광학현미경으로 조금씩 에칭 되는 상태를 순간순간 관찰하면서 조직이 선명하게 나타나는 것을 확인하면서 에칭한다.

3.3.6 조직분석

에칭된 시편의 조직을 분석하기 위해 고배율 광학현미경으로 용접단면의 조직상태를 분석을 하였다. Fig. 12는 용접단면의 조직을 분석하기 위해 사용한 광학현미경이다. 광학현미경은 OLYMPUS 사의 GX51 모델을 사용하고 Operating Manual for Application Software Version 2.0을 적용시켜 iMT Technology의 프로그램인 i-solution 프로그램을 사용하여 용접단면 조직을 분석하여 에칭된 시편의 용접 단면을 정밀분석 하였다.

먼저 저배율로 용접부의 열영부, 용접부 등을 전체적으로 관찰 한 다음 조금씩 고배율로 렌즈를 교환하면서 용접부의 조직 상태변화를 관찰하였다.



Fig. 12 광소재용 미세 분석 시스템

3.3.7 마이크로 비이커스 경도 시험

레이저로 용접할 때 용융된 후 냉각되면서 조직의 변태에 따른 경도변화를 분석하기 위해 용접단면의 경도를 측정하였다. 용접단면은 모재부분, 열영향부분, 용융부분으로 분류될 수 있고 이들 사이에 레이저빔에 의한 용융과 냉각되면서 발생하는 상변태의 결과에 따른 경도변화를 분석하기 위해서이다.

경도측정은 용접단면의 횡방향과 용접단면의 중심부에서 깊이 방향으로 경도를 측정하였다. 시편을 경도기에 잘 고정 시킨 후 기준점을 정하여 모재, 열영향부, 용접 중심부로 이동하면서 횡방향으로 경도를 측정하였다. 경도값을 측정하기 위해 사용된 장비는 Fig. 13에서 나타낸 것과 같이 마이크로비커어스경도시험기 (Simadzu:HMV-2series)를 사용하였으며, 다이아몬드 인텐터(diamond indenter)의 하중은 알루미늄의 경우 490.3mN(Hv 0.05kg)을 적용시켰고, 니켈의 경우 980.7mN(Hv 0.1Kg)을 적용시켰다.

입열량의 변화에 따라 횡방향의 경도와 용접 중심부의 종방향의 경도값의 변화를 비교 분석하였다.



Fig. 13 마이크로 바이커스 경도계

3.3.8 인장시험

레이저 용접부의 기계적 성질을 측정하기 위해 인장시험을 실시하였다. 인장시편은 용접부를 중심으로 인장시험편을 준비하였다. 본 시험에 사용된 Fig. 16의 인장시험기는 SHIMADZU CORPORATION 사의 AG-I/100kN 이다. 이 인장 시험기는 최대 100kN 규모의 인장 시험기이다. 시편은 KS규격에 따라 한국 산업규격에서 제공하는 금속재료인장시험편 13B호로 제작하였다. 절단한 시편(Fig.14)을 인장 시험기에 단단히 고정한 후 컴퓨터에 있는 프로그램을 가동시켜 인장실험을 실시하였다. 여기서 주의할 점은 시편고정을 잘못된 경우 인장시험 결과에 문제가 생길 수도 있다. 그래서 인장시험기와 인장시험편을 고정시키기 위해 펜으로 시험편에 표시를 하여 시험편을 고정 시켜서 인장시험도중 발생하는 슬립현상을 제재하였다. 시험편 인장시험의 시편은 KS 규격에 따라 시편을 Fig. 14 와 같이 제작하였다. 인장 시험은 같은 실험 조건으로 3번 측정하여 평균값을 제시하였다.

Fig. 15는 규격에 맞게 가공된 인장시험 시편이다.

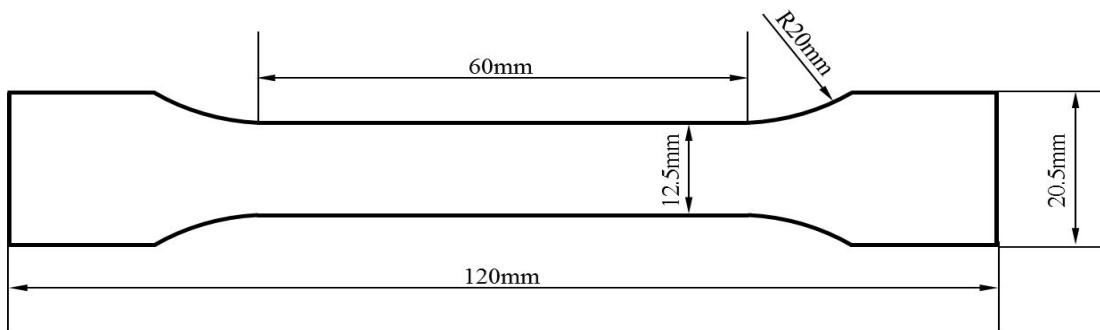


Fig. 14 Tensile test Specimens

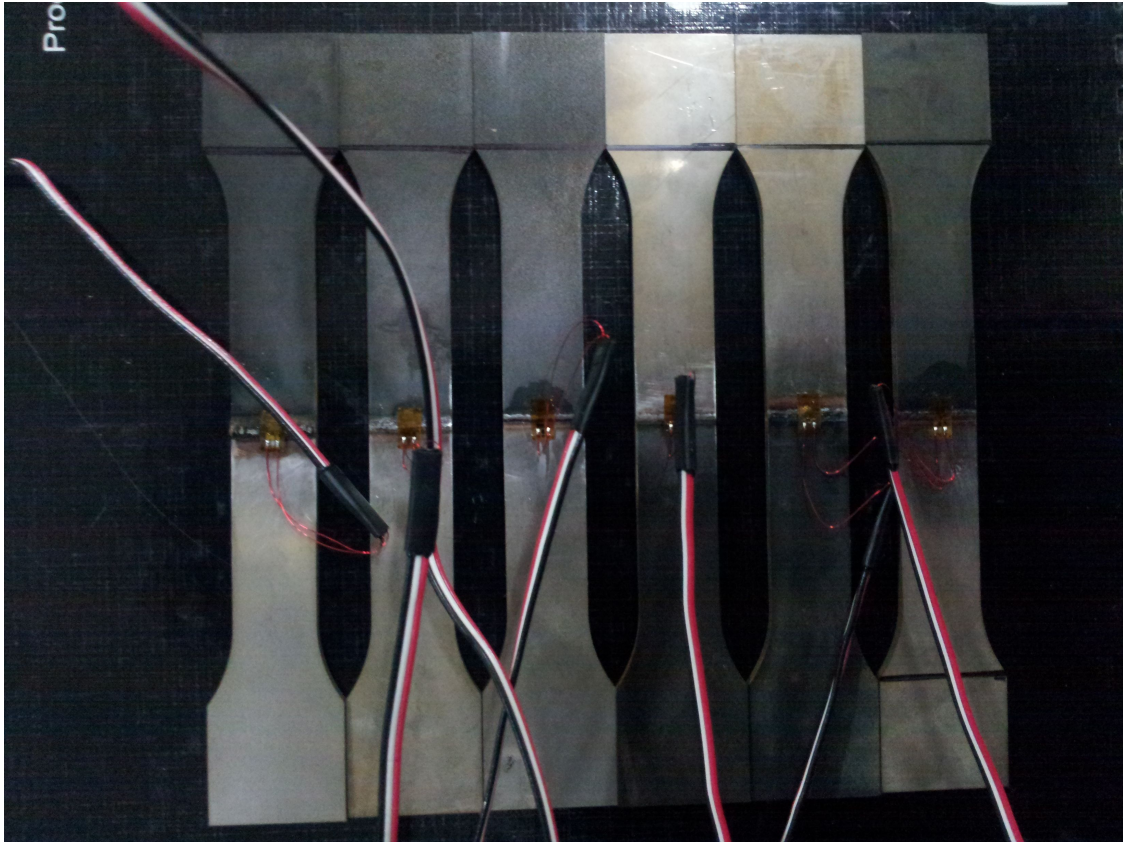


Fig. 15 규격에 맞게 가공된 인장시험 시편

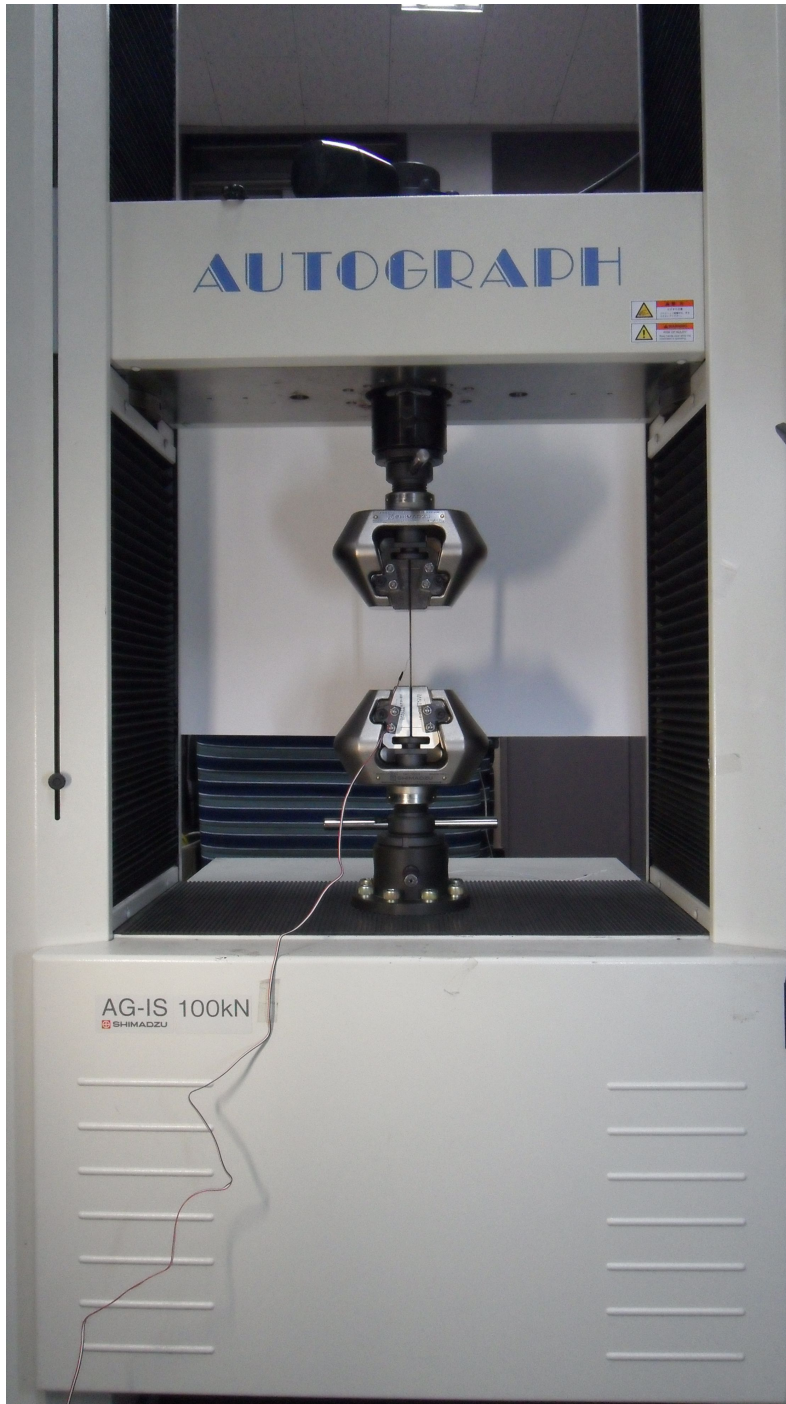


Fig. 16 Tensile test Experiment Equipment of Lap-Joint Welding

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 BOP 용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성

4.1.1 SM45C

Fig. 17 와 Fig. 18 는 레이저빔의 출력을 1800W로 하고 레이저빔의 이송속도를 0.5m/min에서 1.5m/min까지 0.2m/min 씩 증가하면서 BOP 용접 했을때 전면 비드 폭과 후면 비드폭의 변화를 나타냈다. 레이저빔이 시편표면에 조사되면서 전면비드에서 에너지를 흡수하여 모재에 전달 되는 용접단면의 변화를 나타내기 위해서이다.

Fig. 18 에 나타낸 SM45C의 경우 시편 표면에 레이저 빔이 조사되었을 때 신속하게 깊이 방향으로 열이 전달 되면서 후면비드에 용융물이 집중되는 현상을 볼 수 있다. 반면에 STS304의 특성을 나타낸 Fig. 18 의 경우에는 대부분 표면에는 열이 흡수된 다음 모재 내부로 에너지가 전달되는 용접단면을 보이고 있다. 이와 같이 나타낸 이유는 SM45C의 경우 열전도율이 36.5 ~ 43.5W/mK 인 반면 STS304는 14.9W/mK로 상대적으로 STS304가 낮기 때문에 레이저 빔이 직접 조사되는 시편 표면에서 열이 흡수되기 때문이다. SM45C의 경우 레이저빔의 이송속도가 0.7m/min 으로 증가하여 입열량이 36419 J/m^3 일 때 전면비드와 후면 비드 폭비가 최고치에 도달한 다음 레이저 빔의 이송속도가 1.5m/min 으로 입열량이 36255 J/m^3 일 때 까지 폭비가 감소한다. 이는 시편의 표면에서 조사되는 시편 표면에서 흡수되는 에너지가 감소하면서 모재내부로 전달되는 에너지로 함께 감소하기 때문이다.

그러나 STS304의 경우는 레이저 빔의 이송속도가 0.5m/min 으로 입열량이 36874 J/m^3 일 때 전면비드 폭이 크기 때문에 전면비드와 후면 비드 폭비가 작다. 그런 뒤 레이저 빔의 이송속도가 증가하여 레이저빔의 이송속도가 1.5m/min 일 경우 입열량이 25838 J/m^3 으로 되어 시편표면에서 흡수되는 에너지와 내부로 전달되는 에너지가 균형을 이루면서 전면비드와 후면비드 폭비가 1에 가까워지고 있다. 위 두시편의 특성을 비교하면 열전도율이 높은 시편은 용융에너지가 모재 내부로 전달되는 양이 많고, 열전도율이 낮을 경우에는 시편 표면에 흡수되어 시편표면의 용융 부가 많이 형성되는 특성이 있음을 나타내고 있다.













Power	SM45C											
	0.5m/min		0.7m/min		0.9m/min		1.1m/min		1.3m/min		1.5m/min	
	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead
1800W												

Fig. 17 Bead on plate Welding of SM45C Bead

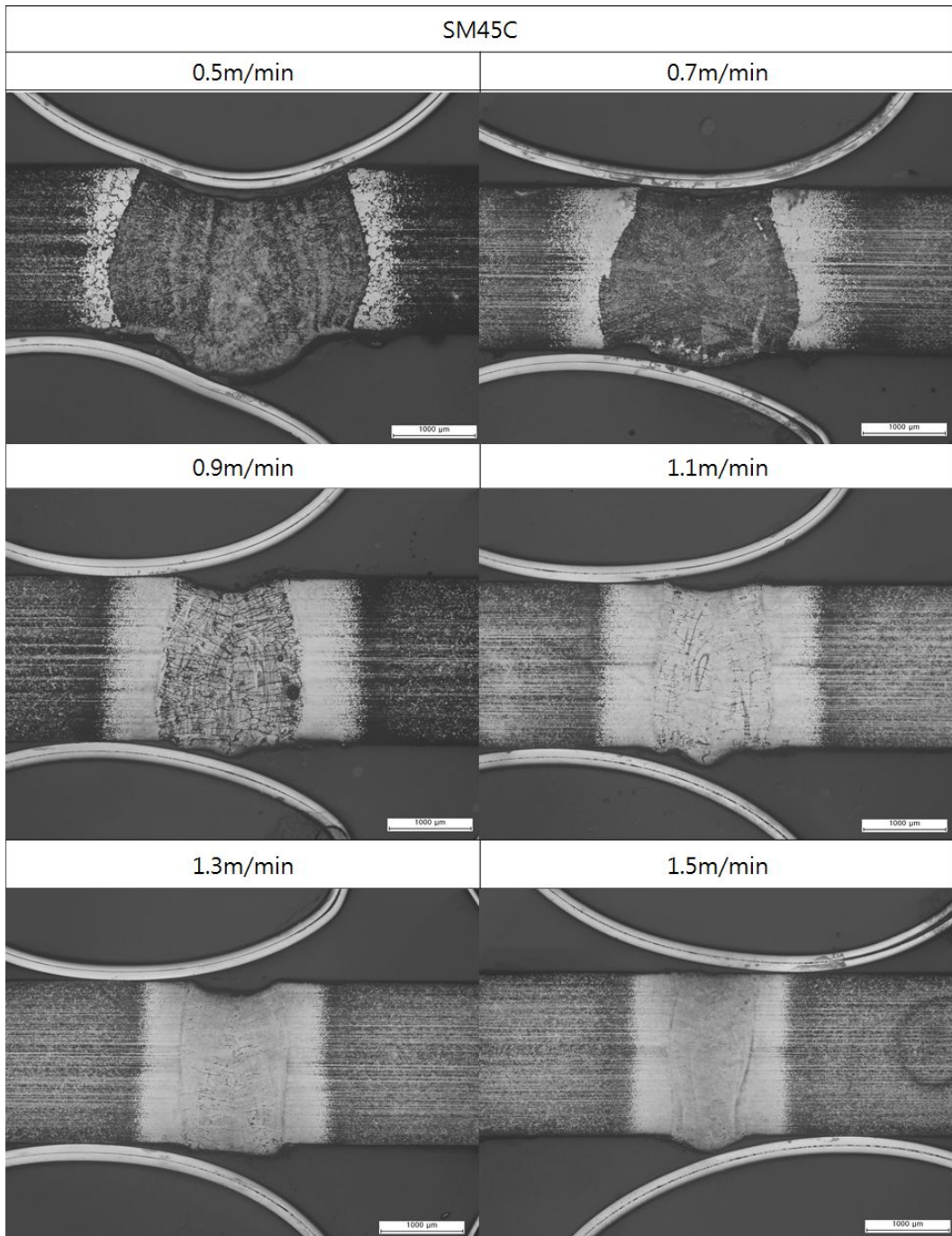


Fig. 18 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters

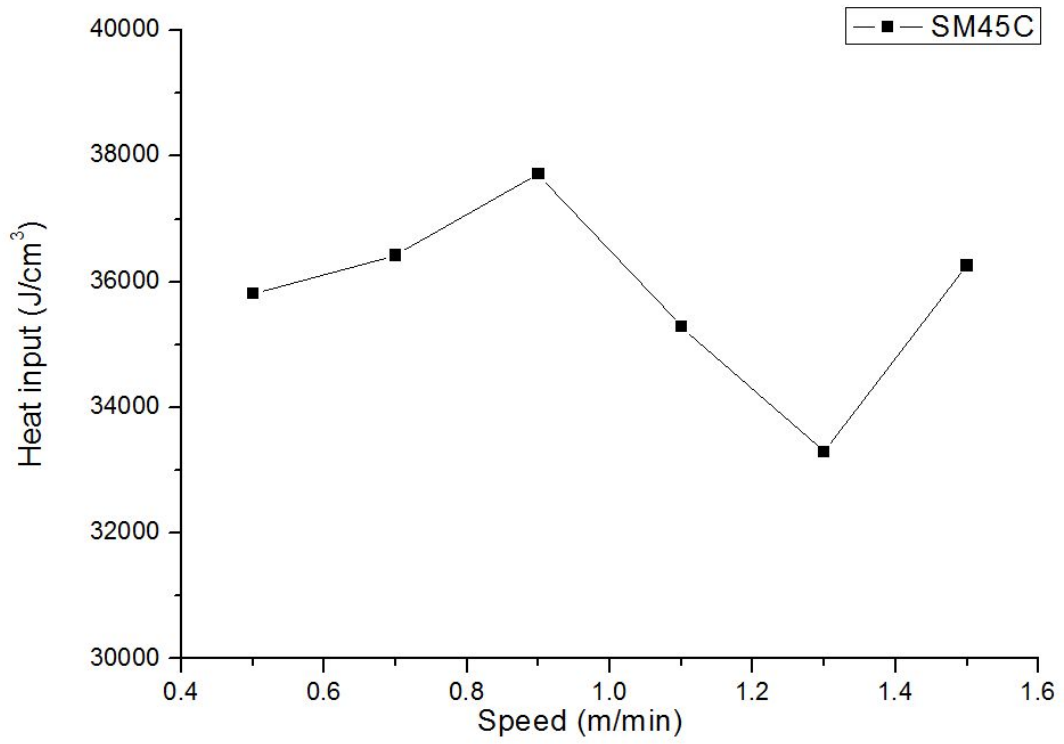


Fig. 19 Influence of Welding speed on the Heat input

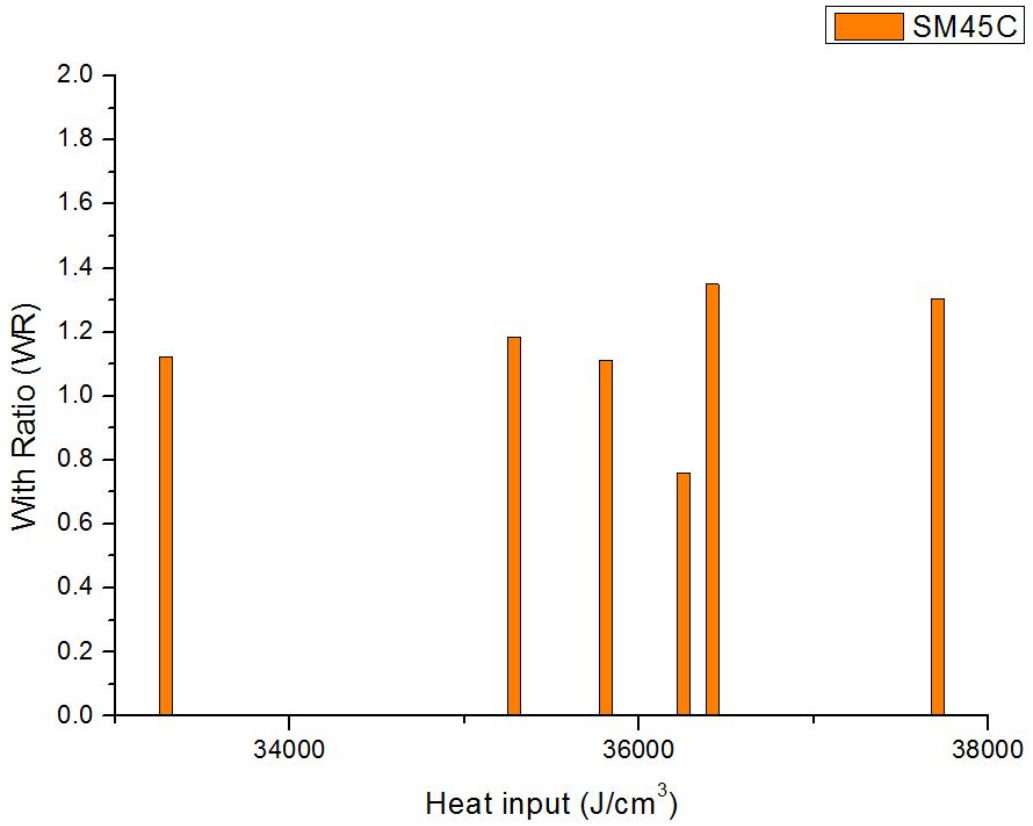


Fig. 20 Influence of Welding speed on the width ratio

4.1.2 STS304

STS304를 BOP 용접했을 때의 결과를 Fig. 19에 나타냈다. 레이저빔의 출력과 이송속도는 SM45C와 같이 조건으로 실험하였다. 용접비드 폭과 용접단면이 전체적으로 STS304가 SM45C에 비해 크게 형성되었다. 그 이유는 SM45C의 열전도도는 31.5~43.5W/mk인 반면 STS304는 14.9W/mK이기 때문에 레이저빔이 조사되면 대부분 모재 주변으로 열이 전도되는 것보다 조사면적 내에서 열을 흡수하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

STS304를 BOP용접했을 때 용접단면과 용접폭을 기준으로 입열량을 계산하여 Fig. 22에 나타냈다. w 는 용접 폭을 기준으로 입열량을 계산한 것이고 p 는 용접단면을 기준으로 해서 입열량을 계산한 것이다.

Fig. 22는 레이저빔의 출력을 1800W로 하고 레이저빔의 속도를 증가하면서 용접했을 때 용접단면의 변화를 나타냈다. 레이저빔의 속도가 0.5m/min일 때 용접단면적은 5857.681 mm^2 이고 레이저빔의 속도가 1.5m/min일 때는 2786.583 mm^2 이므로 52 % 감소하였다. 이것으로 기준으로 했을 때 레이저빔의 이송속도가 0.5m/min일 때의 입열량은 용접단면적을 기준으로 했을 때는 0.614578 이고 용접폭을 기준으로 했을 때는 1.043686 였다. 레이저빔의 이송속도가 1.5m/min일 때는 용접단면적을 기준으로 했을 때는 0.430635 이고, 용접폭을 기준을 했을 때는 0.984242 로 레이저빔의 이송속도가 3배 증가하면 입열량은 용접단면적이 감소할수록 입열량이 감소되는 모습으로 변화하였다.













Power	STS304											
	0.5m/min		0.7m/min		0.9m/min		1.1m/min		1.3m/min		1.5m/min	
	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead
1800W												

Fig. 21 Bead on plate Welding of STS304 Bead

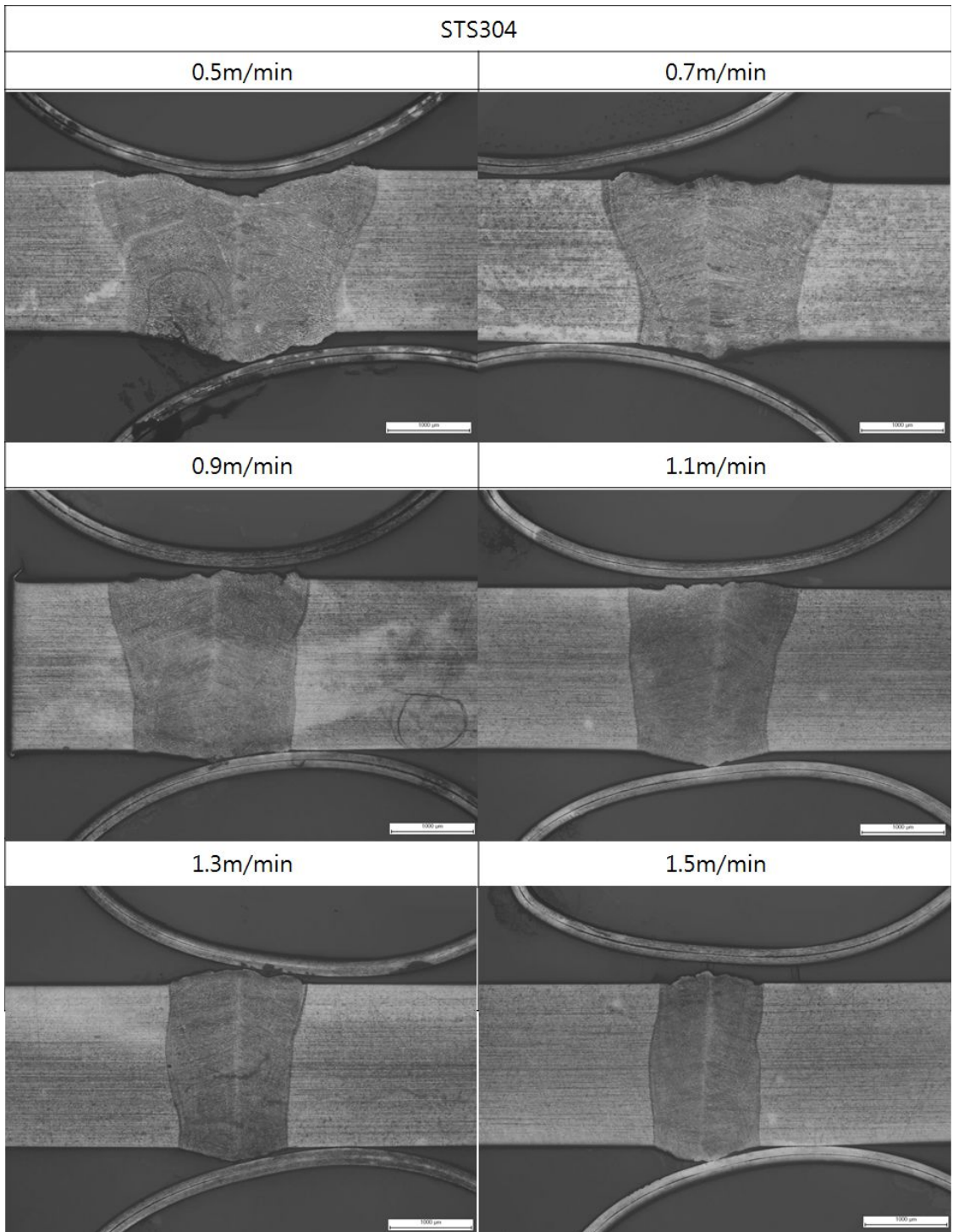


Fig. 22 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters

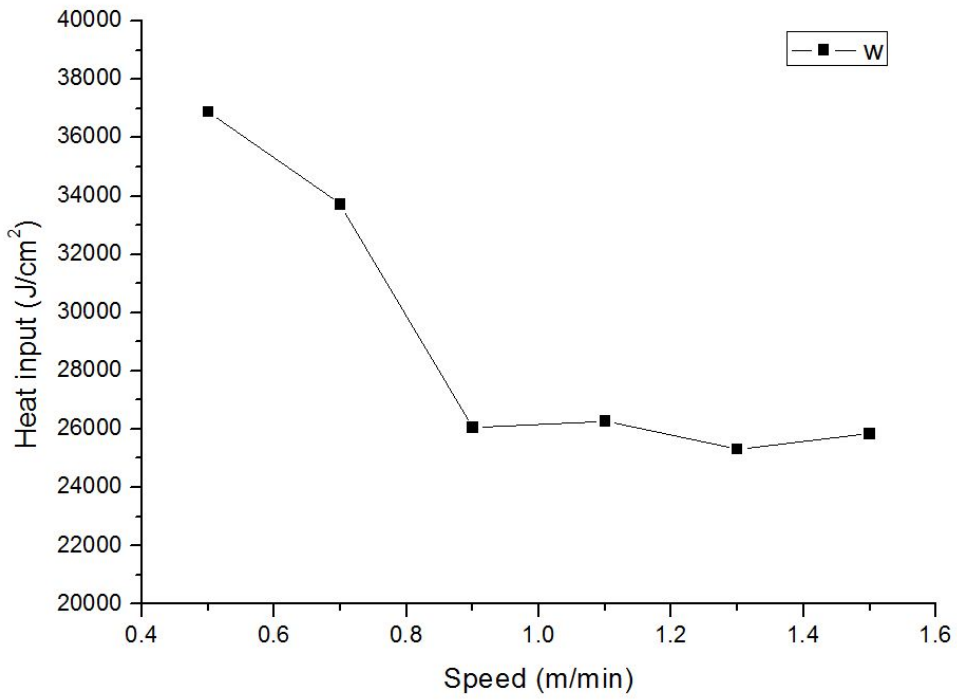


Fig. 23 Influence of Welding speed on the Heat input

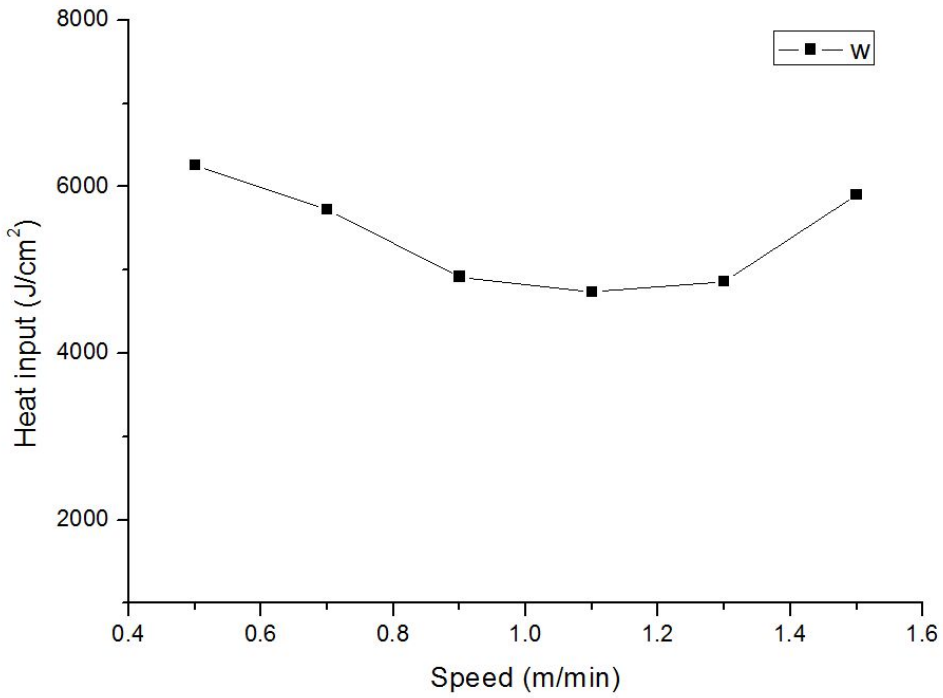


Fig. 24 Influence of Welding speed on the Heat input

4.1.3 이중용접에서 입열량 변화에 따른 용접특성

STS304와 SM45C와 맞대기 이중 용접하였을 때 의결과를 Fig. 25 에 나타냈다. 레이저 빔의 출력과 이송 속도는 STS304와 SM45C의 Bead on plate Welding과 동일한 조건으로 실험하였다.

STS304와 SM45C를 BOP용접했을 때 용접단면과 용접폭을 기준으로 입열량을 계산하여 Fig. 27에 나타냈다. Fig. 27-a는 용접 폭을 기준으로 입열량을 계산한 것이고 Fig. 27-b는 용접단면을 기준으로 해서 입열량을 계산한 것이다.

Fig. 27-b는 레이저빔의 출력을 1800W로 하고 레이저빔의 속도를 증가하면서 용접했을 때 용접단면의 변화를 나타냈다. 레이저빔의 속도가 0.5m/min일 때 용접단면적은 5854.464 mm^2 이고 레이저빔의 속도가 1.5m/min일 때는 2453.954 mm^2 이므로 41.9 % 감소하였다. 이것으로 기준으로 했을 때 레이저빔의 이송속도가 0.5m/min일 때의 입열량은 용접단면적을 기준으로 했을 때는 0.614915 이고 용접폭을 기준으로 했을 때는 1.128161 였다. 레이저빔의 이송속도가 1.5m/min일 때는 용접단면적을 기준으로 했을 때는 0.489007이고, 용접폭을 기준을 했을 때는 0.912199 로 레이저빔의 이송속도가 3배 증가하면 입열양은 용접단면적 기준으로는 20% 감소하고, 용접폭 기준으로는 19% 감소하는 것을 알 수 있다.



Power	DMW(SM45C + STS304)											
	0.5m/min		0.7m/min		0.9m/min		1.1m/min		1.3m/min		1.5m/min	
	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead	Front Bead	Back Bead
1800W												

Fig. 25 Bead on plate Welding of DMW Bead

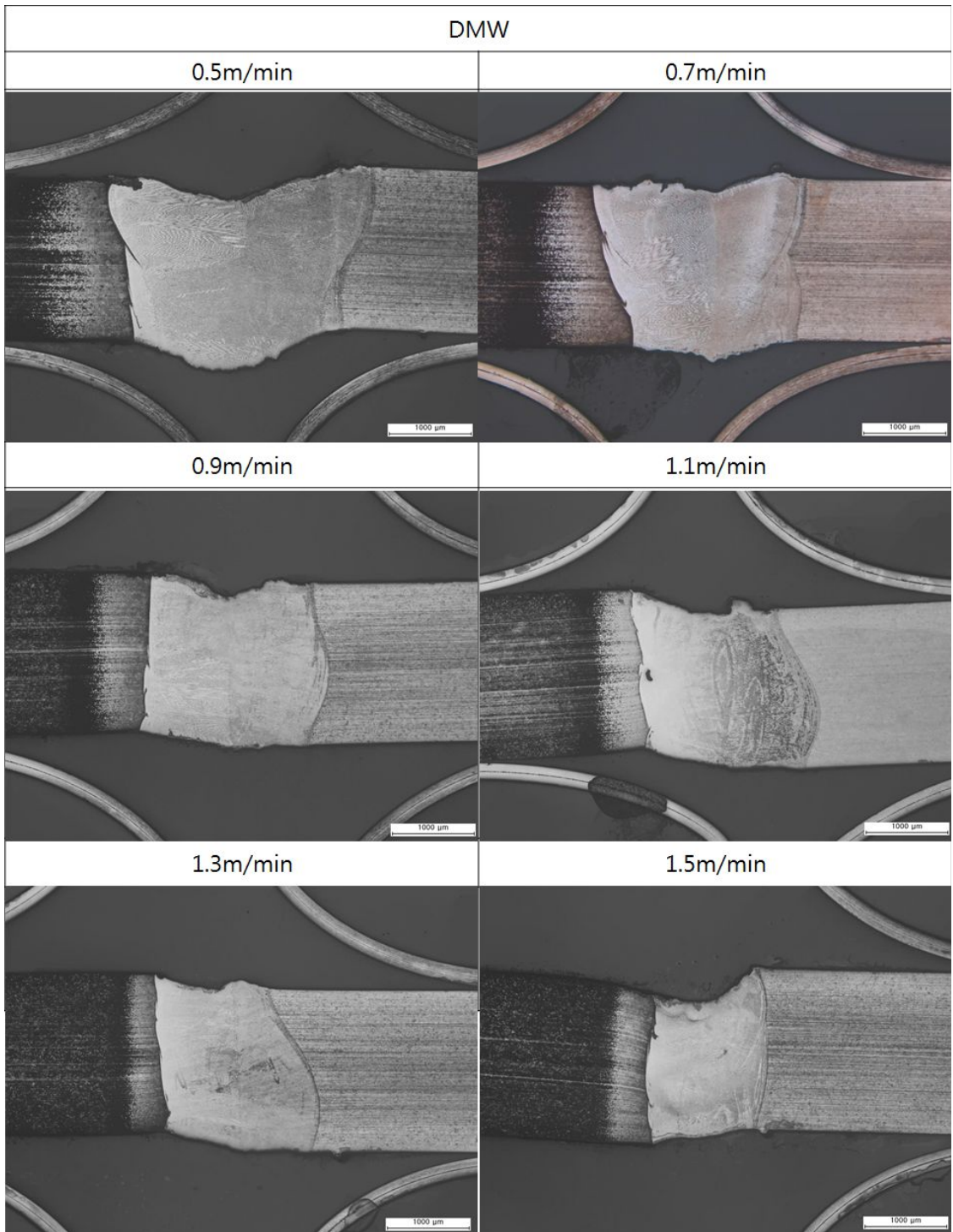


Fig. 26 Welding cross-sectional area to variation of welding process parameters

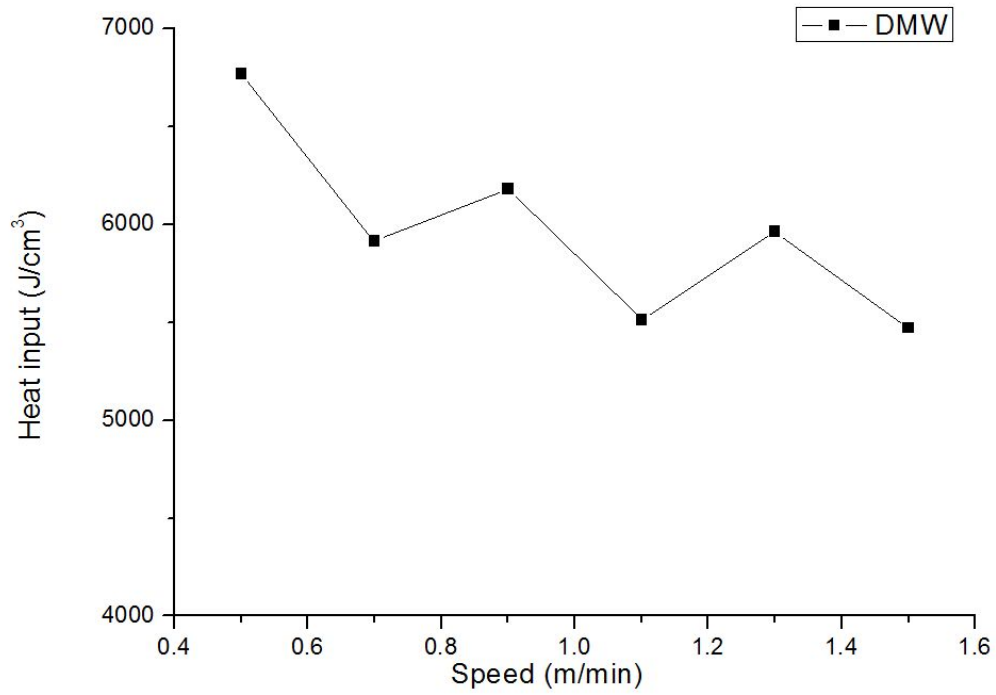


Fig. 27-a Influence of Welding speed on the Heat input

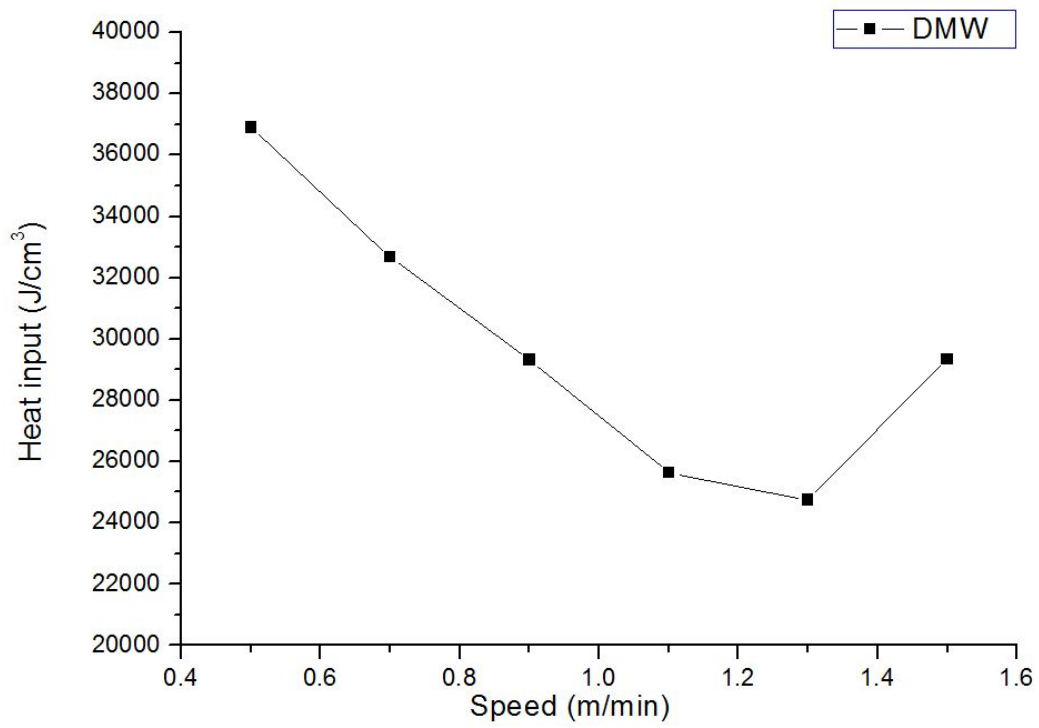


Fig. 27-b Influence of Welding speed on the Heat input

Fig. 28 은 관통용접했을 때 입열량의 변화에 대한 전면비드의 폭과 후면 비드의 폭 비를 나타냈다.

레이저빔의 이송속도가 0.5m/min 으로 입열량이 36894 J/cm^3 일때는 전면비드의 폭과 후면비드의 폭 차이가 거의 없어 오히려 후면 비드의 폭이 약간 크게 형성 되었다. 이는 용접 면적이 모재로의 열전달 때문에 후면 비드가 성장하였기 때문이다. 그러면서 레이저빔의 이송속도가 증가하면 모재로의 열전달 때문에 후면 비드 폭이 감소하면서 전면비드와 후면 비드 비가 증가하고 있다. 전면 비드 폭과 후면 비드 폭이 가장 큰 경우는 레이저빔의 이송속도가 1.3m/min으로 입열량이 25635 J/cm^3 일 때이다. 이때 폭비는 1.274911 이다. 전면비드와 후면비드의 폭이 비슷한 경우는 레이저빔의 이송속도가 0.9m/min 와 1.3m/min으로 이때 입열량은 각각 29323 J/cm^3 와 24752 J/cm^3 이었다.

레이저빔의 이송속도가 1.5m/min 일 때도 폭비가 1에 근접하지만 이것은 레이저빔의 이송속도가 증가하면서 전면비드 폭과 후면 비드 폭이 동시에 감소하였기 때문이다.

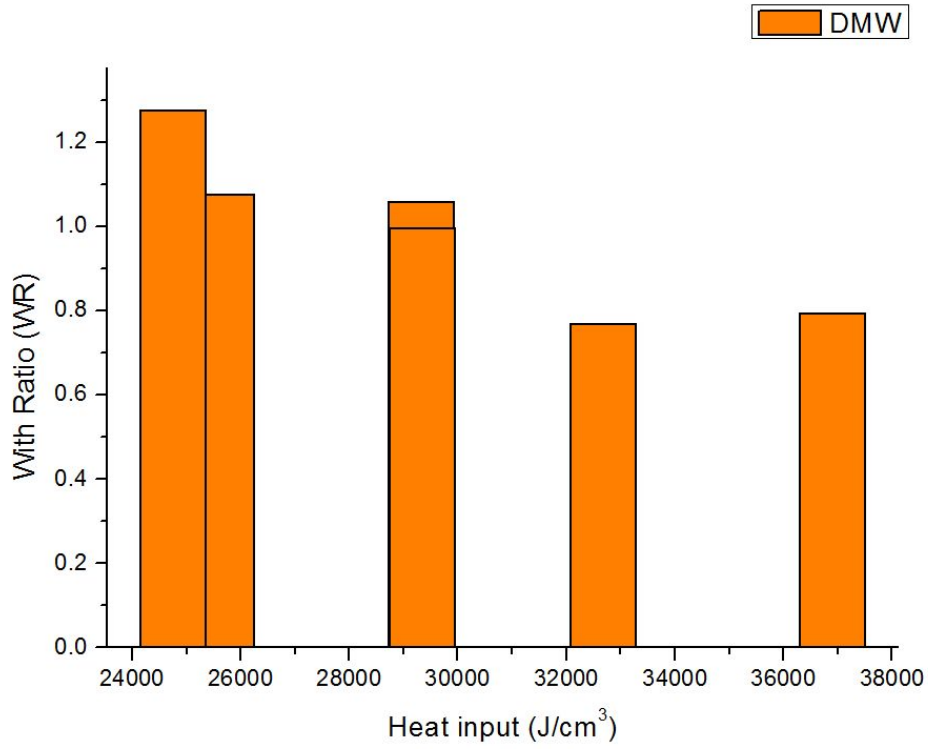


Fig. 28 With Ratio and Heat input

4.1.4 입열량 변화에 따른 이중용접조직 특성

STS304와 SM45C를 DMW용접한 그림을 보면 STS304쪽 으로 용접비드가 형성 되는데 이는 Fe(용융온도:1535℃)이 많은SM45C와 Ni(용융온도:1445℃)이 많은 STS304를 용입 열량이 크게 용범 했을 때 비중이 큰 Ni성분(비중:8.9)이 상대적으로 비중이 작은 Fe성분(비중:7.87)을 가지는 STS304시편 쪽으로 쏠리는 현상이 발생된다. 이처럼 내부결함이 발생하면 용접부의 유효 접촉 면적이 작아 인장응력이 급격하게 떨어진다. SM45C와 STS304 용접단면 모두 용접부 중심에서 모재 경계부로 급속한 냉각 때문에 수지상 조직을 나타내고 있다. STS304의 경우는 Ni과 Cr성분 때문에 열확산이 잘되어 용접단면의 결함없이 양호한 용접단면을 형성하고 있지만 SM45C는 C의 탄화작용으로 미소하게 내부균열이 발생하였다. 그러나 STS304와 SM45C를 DMW용접한 그림을 보면 STS304의 모재가 SM45C으로 용융되어 혼합된 모습을 하고 있다. 그리고 STS304성분 중 오스테나이트 안정화 원소인 Mn이 S와 반응하여 FeS보다 먼저 MnS를 형성하기 때문에 S편석에 의한 저융점 화합물 형성을 방지할 수 있기 때문이다. 형성된 MnS는 용융온도가 1620℃로 높아 강중에 Mn양이 증가하면 입계의 액상필름형상이 어려워지기 때문에 고온 균열을 피할 수 있다.

4.2 입열량 변화에 따른 경도분포

STS304와 SM45C의 BOP용접한 시편과 STS304와 SM45C의 맞대기 이중 용접한 DMW 시편을 가지고 비이커스 경도 실험을 실시하였다.

Test Force는 4.903N(HV0.5)로 설정하여 전면비드 기준으로 비이커스 경도 장치의 측정기로 전면 비드의 중앙에서 0.2mm하단 위치에 영점을 잡아 용접부 단면부 비드의 폭과 깊이를 0.2mm 간격으로 비이커스 경도 실험을 실시하였다.

4.2.1 SM45C

SM45C의 Bead on plate용접한 시편을 비이커스 경도 실험을 실시하였다.

레이저빔의 이송속도가 0.5m/min도 입열량이 35808 J/cm^3 j/cm^2 일 때 평균경도값은 280.5 HV였다.

레이저빔의 이송속도가 1.5m/min도 입열량이 36255 J/cm^3 일 때 평균경도값은 694.4 HV이었다.

레이저빔의 이송속도가 0.5m/min도 느릴 경우 레이저 빔과 시편에 작용하는 시간이 상대적으로 길어져 용융 후 냉각하는 시간이 길어져 조직이 성장하면서 경도 값이 본 실험조건에서 는 가장 작았다. 그러나 레이저 빔의 이송속도가 1.5m/min 도 빠를 경우 용융 후 레이저빔이 진행하면서 모재부위도 빠른 냉각이 이루어져 매우 단단하고 미세한 조직이 형성되었기 때문에 경도값이 743 Hv로 가장 크게 나타났다. 경도 값이 작은 경우는 모재에 비해 2 배 증가 하였고 경도 값이 큰경우는 3.4 배 모재보다 증가하였다. 위와 같은 내용을 입 열량 변화에 대한 평균 경도 값을 Fig. 30 에 나타냈다.

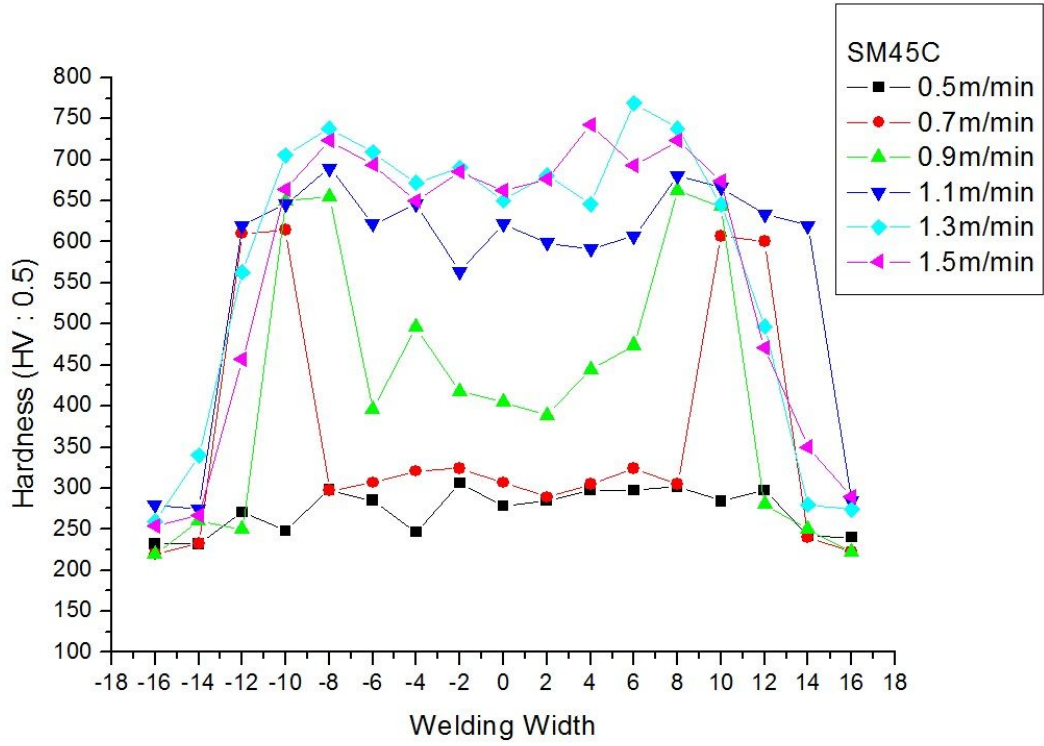


Fig. 29 Welding width Hardness to variation of welding process parameters

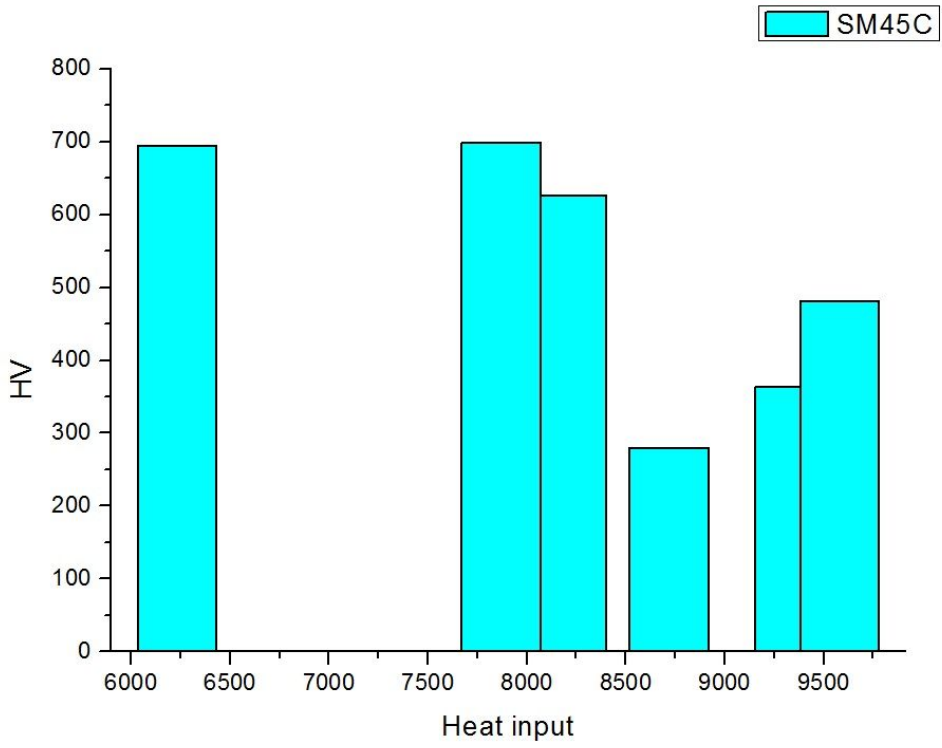


Fig. 30 Heat input and Hardness parameters

SM45C의 용접부 부위의 중앙에서 깊이 방향 경도값을 측정하여 Fig. 31 에 나타냈다.

횡 방향에서 경도 값을 측정한 것과 비슷하게 레이저빔이 이송속도가 느린 경우 용융되어 응고 할 때까지 조직이 성장하는 시간이 상대적으로 길어져 경도 값이 낮게 측정되어 모재의 경도보다도 상승 폭이 적다. 이 때 평균 경도 값은 279.8 Hv이었다. 레이저빔의 이송속도가 1.5m/min 의 입열량이 $36255 J/cm^3$ 일 때는 평균 경도 값이 676 Hv이었다. 이는 레이저 빔이 이송속도가 0.5m/min 의 입열량이 $35808 J/cm^3$ 일 때 보다도 2.4배 정도 경도값이 크게 측정되었다.

용접단면의 횡 방향에서 의 경도 값과 종방향에서의 평균경도 값은 Fig. 32 에 나타냈다. w 는 종방향의 경도값이고 d 는 횡방향의 평균 경도값이다.

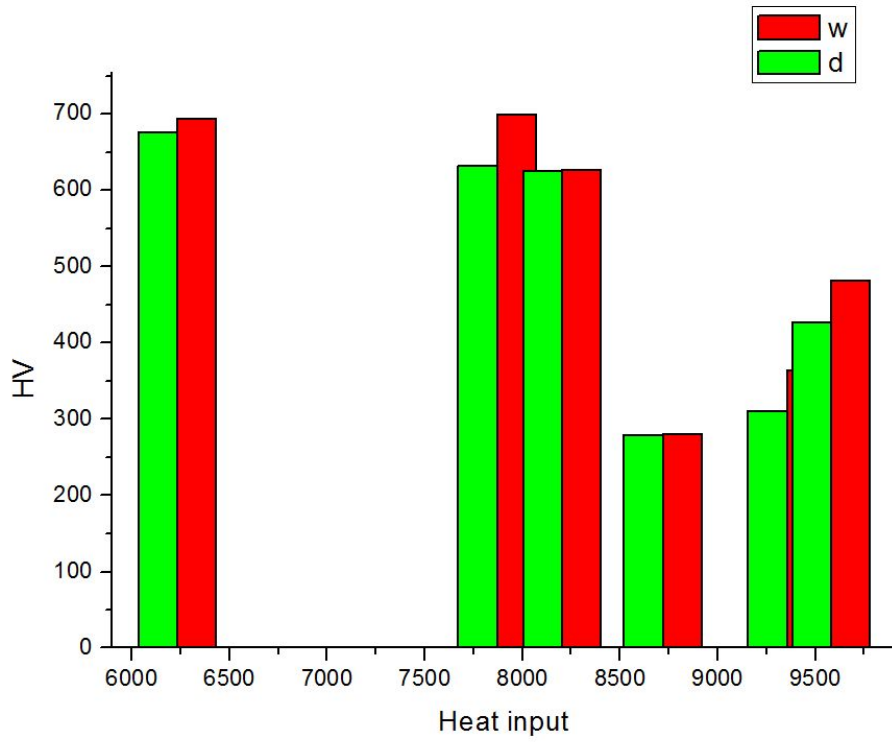


Fig. 31 Heat input and Hardness parameters

4.4.2 STS304

STS304의 Bead on plate용접한 시편을 비이커스 경도 실험을 실시하였다.

STS304 일 경우 경도 실험한 값을 Fig 31 와 Fig 32 에 나타냈다.

Fig 31 는 횡방향으로 측정된 경도 값이고 Fig 32 는 종방향으로 경도 값을 측정된 것이다.

횡방향으로 측정된 경도값은 가장 큰 값은 레이저빔의 이송속도가 0.7m/min으로 입열량이 $33709 J/m^3$ 일 때의 경도값은 276 Hv 이었다 이는 모재의 경도값 250 Hv 이 26 증가한 값이다. 레이저 빔의 이송속도가 0.5m/min 으로 입열량이 $36874 J/m^3$ 일 때 평균 경도값은 208 Hv이고, 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min 으로 입열량이 $26051 J/m^3$ 일 때 평균 경도값은 199 Hv으로 그차이가 크지 않았다.

용접단면의 중앙부에서 깊이 방향으로 측정된 경우 레이저 빔의 이송속도가 0.7m/min 으로 입열량이 $33709 J/m^3$ 일 때 평균 경도값은 252 Hv 이었다.

레이저빔의 이송속도가 1.1m/min이고 입열량이 $26279 J/m^3$ 일 때 평균 경도값은 216 Hv이고, 레이저빔의 이송속도가 1.3m/min이고 입열 량이 $25311 J/m^3$ 일 때 평균 경도 값은 217 Hv으로 그차이가 1 Hv로 크지 않았다. 이와 같은 현상은 횡방향의 경도 값을 나타낸 Fig. 31 의 결과와 비슷한 실험결과를 나타냈다.

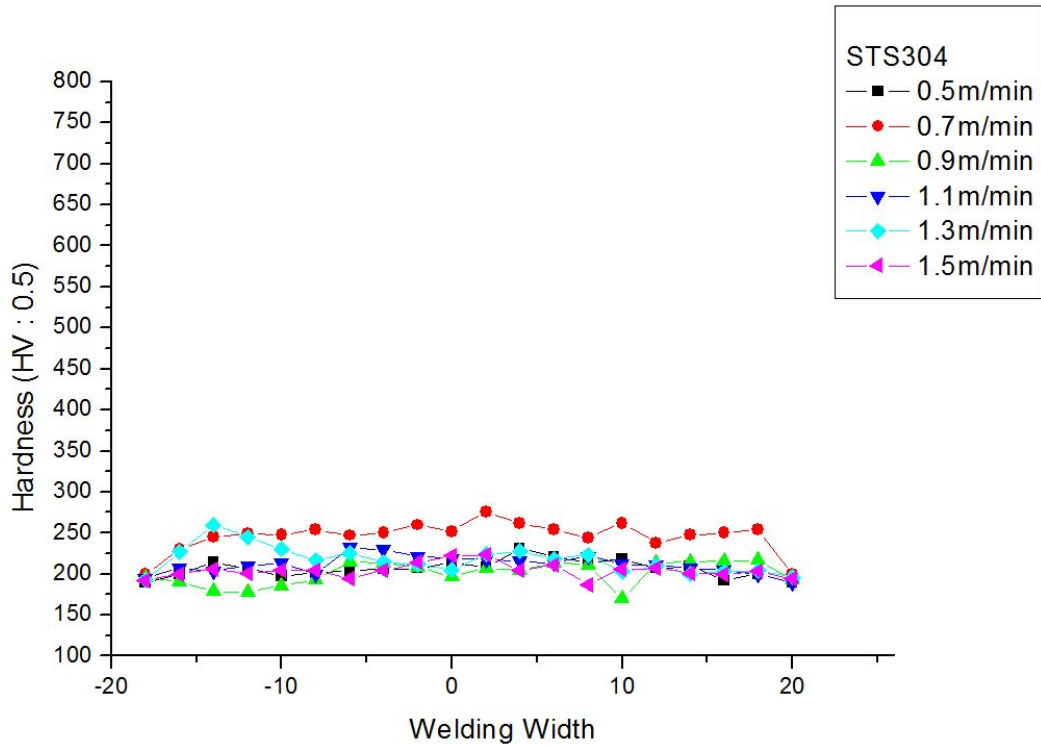


Fig. 32 Welding width Hardness to variation of welding process parameters

4.4.3 이중용접

STS304와 SM45C를 DMW한 시편을 비이커스 경도 실험을 실시하였다.

이중용접했을 경우 경도 분포값은 Fig. 33 에 나타있다. Fig. 33는 횡방향으로 경도값을 측정된 결과 값이고 fig. 34는 용접 단면의 종방향으로 경도값을 측정된 값이다.

횡방향으로 경도값을 측정된 Fig. 33 의 결과를 살펴보면 레이저 빔의 이송속도가 느린 경우 STS304와 SM45C 가 동시 용융되어 교반된 결과 경도값이 크게 측정되었다. 그러나 레이저빔의 이송속도가 빨라지면 SM45C의 특성인 경도 증가가 크게 나타나지 않았다. 일반적으로 탄소강을 레이저로 열처리 하거나 용접하면 탄소의 영향 때문에 마르텐사이트 조직이 침상으로 나타나면서 경도값이 증가하는데, 레이저 빔의 이송속도가 1.1 m/min 로 입열량이 $25635 J/cm^3$ 이하가 되면 탄소강의 탄소 성분이 조직을 단단하게 하는 영향이 현저하게 저하 되었다.

레이저 빔의 이송속도가 0.5 m/min에서 0.9 m/min 으로 입열량이 $36894 J/cm^3$ ~ $29323 J/cm^3$ 범위 내에서는 경도값이 258 Hv ~ 567 Hv 범위 였다.

그러나 레이저 빔의 이송속도가 1.1 m/min 에서 1.5 m/min 까지는 입열량의 범위가 $25635 J/cm^3$ ~ $29340 J/cm^3$ 으로 평균경도 값은 294 Hv에서 545 Hv범위 였다.

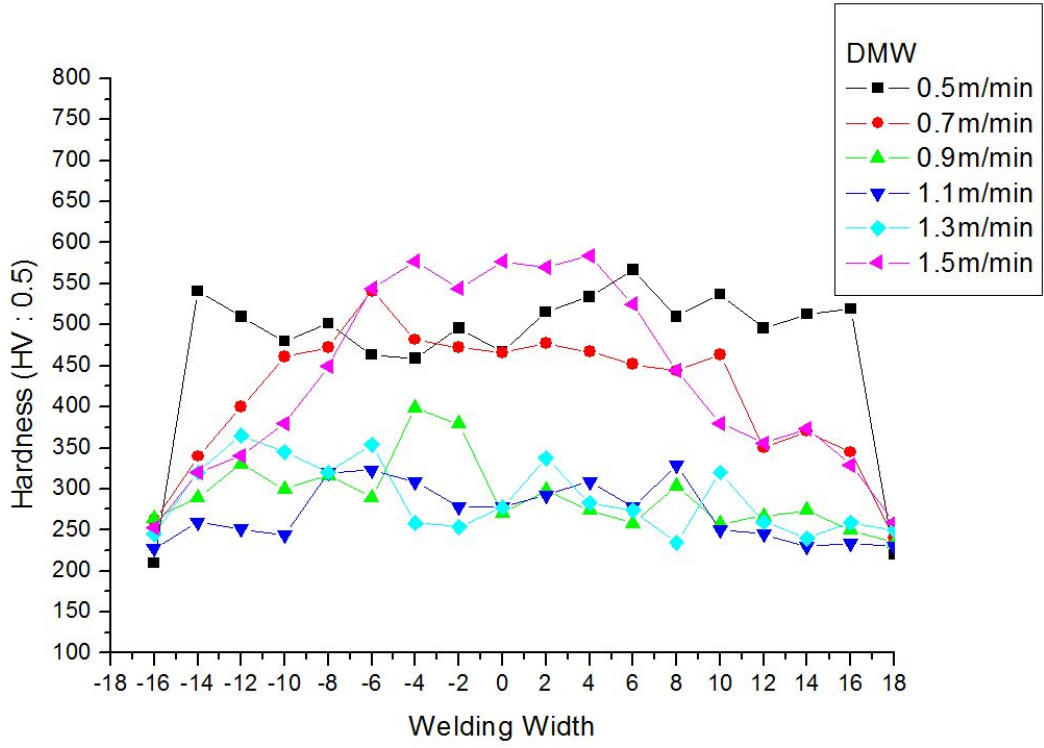


Fig. 33 Welding width Hardness to variation of welding process parameters

4.3 입열량 변화에 따른 인장강도

이중 용접의 용접성 평가는 인장응력 시험으로 했다. 이중용접의 입열량 변화는 레이저빔의 이송 속도를 변화시켜 입열량을 변화시켰다. 인장응력의 기준은 SM45C와 STS304의 맞대기 용접한 시편을 인장시험편을 제작하여 인장 시험하여 인장응력 기준값으로 하였다. 인장시험편은 한국공업규격(KS B080113B)에 맞도록 와이어 커팅하여 만든 후 인장시험 장비를 이용하여 실험하였다.

레이저빔의 출력이 1800W이고 레이저 빔의 이송속도를 0.5m/min에서 1.5m/min 까지 0.2m/min 씩 증가 시키면서 SM45C와 STS304를 이중용접 했을 때 인장강도 시험결과를 Fig. 35 에 나타냈다. 인장강도 값이 가장 큰 경우는 레이저빔의 이송속도가 0.9m/min 로 입열량이 J/cm^3 일 때이다. 이때 인장강도 값은 22.32 kN이었다.

그러나 인장강도 값은 전체적으로 21.746kN 범위 내에 있어 본 실험 조건에서는 인장강도의 변차는 크지 않았다.

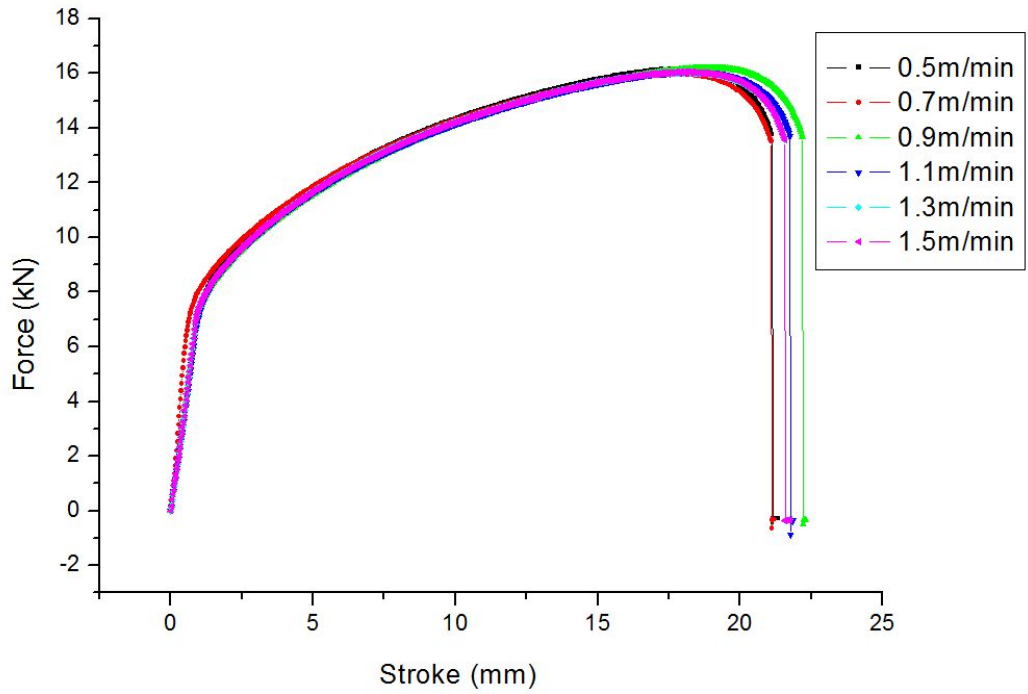


Fig. 34 Stress-Strain curve of Laser Welding

제 5 장 결 론

본 연구에서는 전통적인 제조 공정과 비교해서 상대적으로 고온의 열과 CO₂ 가스를 배출하지 않고 가공하는 레이저 용접공정에서 연속파형 Nd:YAG Laser를 이용하여 중탄소강 SM45C와 오스테 나이트계 스테인리스강 STS304을 레이저빔의 이송속도를 변화시켜서 맞대기 용접하였다. 맞대기 용접의 공정변수를 변화시켜 비드폭비, 입열량, 금속학적 분석과 인장강도 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SM45C와 STS304을 맞대기 이중 용접하였을 경우 DMW 입열량은 레이저빔의 이송속도가 0.5m/min 일때 가장 입열량의 수치가 높게 나타났다.
2. 본 실험에서 비드폭비는 STS304는 레이저빔의 이송속도가 1.5m/min일 때 가장 높게 나왔고, SM45C는 레이저빔의 이송속도가 0.5m/min일 때, DMW는 레이저빔의 이송속도가 1.3m/min 일 때 가장 높은 수치가 나타났다.
3. SM45C와 STS304을 맞대기 이중 용접하였을 경우 비드가 STS304 쪽으로 쏠리는 이유는 Fe(용융온도:1535℃)이 많은 SM45C와 Ni(용융온도:1445℃)이 많은 STS304를 용입 열량이 크게 용범 했을 때 비중이 큰 Ni성분(비중:8.9)이 상대적으로 비중이 작은 Fe성분이 있는 STS304쪽으로 쏠리기 때문이다.
4. 이중용접을 한 시편의 비이커스 경도는 폭방향, 깊이방향 모두 레이저 빔의 이송속도가 1.5m/min 일 때 가장 높은 수치가 나타나였다.
5. SM45C와 STS304을 맞대기 이중 용접한 시편을 인장강도 실험 한 결과 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min 일 때 가장 높은 결과 값이 나왔다.
6. SM45C와 STS304을 맞대기 이중 용접하면 비드폭비, 입열량, 인장강도, 비이커스 경도 의 결과 값을 종합할 때 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min 이 최적의 공정 조건을 갖는다.

7. 단면적 기준으로 측정한 입열량과 폭길이를 기준으로 측정한 입열량의 수치를 확인하면 단면적기준으로 측정한 입열량의 수치가 높게 측정되었다.

8. SM45C와 STS304을 맞대기 이중 용접한 시편의 전체적인 인장강도 값은 공정 변수가 달라도 변차는 크지 않음을 알 수가 있다.

Reference

1. Ga. Ram. Lee, Comparison of Continuous Wave Fiber Laser Welding Characteristics of Thin Plate Based on Al and Ni for Secondary Battery Material, Master's Thesis, Chosun University, 2013
2. T.A.Mai, A.C.Spowage, "Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum," Materials Science and Engineering Vol 374 pp. 224-234, 2004.
3. G. Bruggemann, A.Mahrle, Th.Benziger, "Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at laser beam welding of steels and aluminum alloyings," ND&E International Vol 33 pp. 453-463, 2000
4. F. M. .HOSKING, J.J.STEPHENS and J.A.REJENT, "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," WELDING JOURNAL, pp. 127-136, 1999.
5. M.QIAN, J.C.LIPPOLD, "Liquation Pheno-mena in the Simulated Heat-Affected Zone of Alloy 718 after Multiple Postweld Heat Treatment Cycles," WELDING JOURNAL, pp. 145-150, 2003.
6. C.S.KUSKO, J.N.DUPONT and A.R.MARDER, "The Influence of Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds," WELDING JOURNAL pp. 6-15, 2004.
7. Young-Tea Yoo, Ho-Jun Shin and Seong Wook Song "Welding

Characteristics of Dissimilar Metal by Continuous Wave Nd:YAG Laser”
 Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 11,
 pp.53~60, 2004

8. Young-Tea Yoo, Ho-Jun Shin “Dissimilar Metal Welding of SM45C and STS304 by means of Laser” 조선대 에너지 자원신기술연구소, Vol. 26, No. 2. pp.105~119, 2004

9. Young Tae Yoo, Ho Jun Shin, Dong-Gyu Ahn, Kiegon Im, Dissimilar Metal Welding of Austenite Stainless Steel and Low Carbon Steel using CW Nd:YAG Laser, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.22 No.8, 2005

10. Young Tae Yoo, Ho Jun Shin, Dong Gu Ahn, Kie Gon Im, Byung Heon Shin, Dissimilar Metal Welding of Medium Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel utilize CW Nd:YAG Laser, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.23 No.3, 2006

11. [네이버 지식백과] 네이버 캐스트

탄소(C)의 성질

탄소 원자의 전자배치는 헬륨의 전자배치에 추가로 4개의 전자가 보다 높은 에너지 상태에 들어가 있는 것이다. 화합물에서 가장 흔한 산화상태는 +4이나, 일산화탄소(CO)에서처럼 +2를 갖기도 하고, 화합물에 따라서 0, -1, -2, -3, -4의 다양한 산화 상태를 갖기도 한다. 이온화 에너지는 다른 14족 원소들에 비해 월등히 높다.

탄소 원자는 다른 탄소 원자를 비롯하여 여러 원자들과 결합을 한다. 단일결합 이외에 이중결합과 삼중결합을 하기도 하며, 한 탄소 원자 주위의 결합 수는 대부분 4이다. 탄소는 원소 중에서 녹는점과 승화점이 가장 높다. 1기압에서는 온도가 아무리 높아도 녹지 않으며, 고체-액체-기체가 평형을 이루는 삼중점은 흑연의 경우 100기압, 4600 K이다. 승화 온도는 약 3900 K로, 탄소 아크에서 승화한다.

탄소의 물리적 성질은 동소체에 따라 아주 다르다. 예로, 흑연은 검은색이나 다이아

몬드는 투명하다. 흑연은 모스 경도가 1 이하로 무르나, 다이아몬드는 10으로 가장 경도가 높은 물질이다. 흑연은 좋은 전기 도체이나 다이아몬드는 부도체이고, 흑연보다 다이아몬드가 열을 월등히 잘 전달한다.

규소(Si)의 성질

물리적 성질

규소 원자는 14개의 전자를 가지고 있다. 이는 네온(Ne)에 4개의 전자가 더해진 것으로, 바닥 상태 전자배치는 $[Ne]3s^23p^2$ 가 된다. 화합물에서 규소의 주된 상태는 +4이나, 경우에 따라서는 -4~+3 사이의 다른 산화수를 갖기도 한다. 규소는 탄소보다 훨씬 휘발성이 크고(녹는점 1420oC) 증발열도 작다. 이는 Si-Si 결합에너지가 C-C 결합에너지보다 작음을 반영한다. 끓는점은 약 3,280oC로 아주 높은 편이다. 밀도는 2.336g/cm³로 탄소족 원소 중에서는 가장 작다. 전기 저항은 순도에 따라 크게 다르고 온도가 높을수록 작아지는데, 실온에서의 비저항은 저마늄(Ge)과 비슷한 약 1000 Ω ·cm이다. 이는 다이아몬드의 1/1012 정도에 불과하나, 주석과 납에 비해서는 약 108 배가 큰 전형적인 반도체 성질을 보인다. 규소 단결정은 기계적 힘을 주면 전기 저항이 상당히 변하는데, 이는 압전효과에 의한 것이다.

규소는 실온에서 분말형과 결정형의 두 동소체가 존재하는데, 결정형에서는 다이아몬드처럼 각 규소 원자에 4개의 규소 원자들이 정사면체 형태로 결합되어 있다. 압력이 아주 높아지면 다른 결정 구조를 갖는 동소체로 전환된다.

자연상태에서 규소의 동위원소로는 ²⁸Si(92.23%), ²⁹Si(4.67%), ³⁰Si(3.10%)의 세가지가 있다. ²⁹Si는 핵 스핀이 1/2로 핵자기공명(nmr) 분광학에 사용된다. 이외에 20여 가지의 방사성 동위원소가 얻어졌는데, 가장 반감기가 긴 것이 ³²Si(반감기 170년)로 작은 에너지의 β 선을 내며 붕괴한다. 반감기가 2.62시간인 ³¹Si은 ³⁰Si에 중성자를 쬐어 만들며, 큰 에너지의 β 선을 내고 붕괴하기 때문에 중성자활성화(neutron activation)에 의한 규소 정량 분석에 유용하게 이용된다.

화학 반응성

결정성 덩어리 형태의 규소는 온도가 높지 않으면 화학 반응성이 거의 없다. 산소, 물, 수증기 등이 거의 영향을 미치지 않는데, 이는 원자 몇 개 두께의 SiO₂ 보호 피막이 생기기 때문으로 여겨진다. 950oC 이상에서는 공기 중에서 산화되어 유리질

SiO₂를 만들고, 1,400°C 이상에서는 공기 중의 질소와도 반응하여 SiN과 Si₃N₄를 만든다. 유황(S)과는 약 600°C에서, 인(P)과는 약 1,000°C에서 반응한다.

규소는 산 수용액에도 거의 녹지 않으나, 진한 질산(HNO₃)과 HF의 혼합물과는 반응하여 SiF₄를 만든다. 뜨거운 알칼리 수용액에서는 다음 반응이 일어나면서 녹는다.



할로젠 원소들과는 비교적 쉽게 반응하는데, F₂와는 실온에서도 격렬하게 반응하며, 온도가 높으면 다른 할로젠 원소들과도 반응한다. 구리(Cu) 촉매 존재 하에서는 높은 온도에서 할로젠화 알킬(RX)과도 반응하는데, 염화메틸(CH₃Cl)의 경우 반응식은 다음과 같다.



고체 상태와는 달리, 용융된 규소는 아주 반응성이 크며 대부분의 금속과 합금이나 규소화물을 만든다. 또 금속 산화물을 금속으로 빠르게 환원시키고 자신은 SiO₂가 된다.

망간(Mn)의 성질

물리적 성질

망간은 단단하나 쉽게 부서지는 은색 금속이다. 금속 Mn과 대부분의 Mn 화합물은 불균일한 자기장에 끌리는 상자기성(paramagnetic)을 보인다. 녹는점은 구리나 아연 보다는 높지만, 다른 4주기 전이금속들보다 낮은 1,246°C이고 끓는점은 2,060°C이다. 4가지 동소체가 있는데, 등축정계 구조를 갖는 α형(밀도 7.44 g/cm³)은 700°C에서 같은 결정구조를 갖는 β형(밀도 7.26 g/cm³)으로, β형은 1,079°C에서 면심입방구조를 하는 γ형(밀도 7.21 g/cm³)으로, 그리고 γ형은 1,143°C에서 체심입방구조의 σ형(밀도 7.21 g/cm³)으로 전이된다. α형과 β형은 단단하나 잘 부서져 성형 가공이 되지 않고, γ형은 유연하여 가공이 쉽다.

망간은 거대한 초신성(supernova) 폭발 직전에 합성된 것으로 여겨진다. 천연 상태

에서는 안정한 동위원소인 ^{55}Mn 으로만 있다. 여러 인공 동위원소들이 합성되었는데, 그 중 반감기가 긴 것은 ^{53}Mn (반감기 370만 년), ^{54}Mn (반감기 312.3 일), ^{52}Mn (반감기 5.59일)이다. ^{53}Mn 는 암석에 들어있는 철에 우주선이 작용하여 극미량 생성되는데, ^{53}Cr 으로 붕괴된다. 방사성 Mn 동위원소가 실용적으로 사용된 예는 아직 거의 없다.

화학적 성질

망간은 주기율표에서 이웃하는 다른 원소들에 비해 전자를 잃는 성질(전기양성)이 크고, 따라서 반응성이 크다. 특히 불순물이 들어있으면 반응성이 더욱 커진다. 25개의 전자를 갖고 있어, 바닥 상태 전자배치는 $[\text{Ar}]3d^54s^2$ 이다. 산화수가 -3에서 +7에 이르는 여러 가지 산화 상태의 화합물들이 있지만 흔한 산화 상태는 +2, +3, +4, +6, +7이다. Mn^{2+} 의 이온(6 배위체) 반경은 67pm로, Mg^{2+} 의 72 pm와 비슷하여 이들 두 이온은 쉽게 서로 대체된다. 가장 안정한 상태는 +2이며, 산화수가 이보다 큰 화합물들은 강한 산화력을 보인다. 망간 금속이 공기 중에 노출되면, 덩어리 상태로는 천천히 산화되지만 고운 가루는 불이 붙기도 한다. 물과 반응하여 수소 기체를 내어 놓으며, 묽은 산 수용액에 녹아 수소 기체를 내어놓고 Mn^{2+} 염이 된다. 비금속 원소들과는 실온에서는 잘 반응하지 않으나, 가열하면 가끔 격렬하게 반응한다. 산소(O_2), 질소(N_2), 염소(Cl_2), 플루오린(F_2)과 반응하여 각각 Mn_3O_4 , Mn_3N_2 , MnCl_2 , MnF_2 가 된다. 또한 붕소(B), 탄소(C), 규소(Si), 인(P), 황(S), 비소(As)와도 직접 반응한다.

인(P)의 성질

원자 및 물리적 성질

인광석의 약 90%는 인산 제조에 사용되고, 인산의 약 95%는 비료 생산에 사용된다. 인 원자는 15개의 전자를 갖고 있다. 이는 네온(Ne)에 5개의 전자가 더해진 것으로, 바닥 상태 전자배치는 $[\text{Ne}]3s^23p^3$ 가 된다. 주된 산화수는 +5과 +3이다. 그러나 인보다 전기 음성도가 작은 원소와의 화합물에서는 -3의 산화수를 갖는다.

흰인(α -P4)은 녹는점이 44.2°C이고 끓는점은 280.5°C이며, 40°C에서의 승화 증기압은 0.122mmHg이다. 검은인은 610°C에서 녹는다. 붉은인과 보라인은 각각 416~590°C와 620°C에서 승화 증기압이 1기압이 된다. 흰인은 전기 비저항이

110C에서 약 $1011\Omega \cdot \text{cm}$ 인 반도체이고, 검은인은 반도체이다. P4 분자의 P4O10로의 연소와 무정형 붉은인으로서의 전이 시에는 각각 2,971kJ/mol과 29kJ/mol의 열을 내어 놓는다.

인의 안정한 동위원소는 31P뿐이고, 자연 상태에서는 모두 31P로 존재한다. 31P는 1/2 핵 스핀을 갖고 있어 인을 포함하는 화합물을 핵자기공명(nmr) 분광학으로 분석할 수 있다. 20종이 넘는 방사성 인 동위원소들이 만들어졌는데 이중 32P와 33P이 특히 유용하게 사용된다. 32P는 32S나 31P에 중성자를 쬐여 만들며, β -붕괴를 하고 반감기는 14.26일이다. 33P는 반감기가 25.4일로 낮은 에너지의 β -선을 내어 놓는다. 이들 방사성 인 동위원소들은 생물 분자들에 방사능 표지를 달아 이들을 추적 가능하게 함으로써 반응 메커니즘이나 DNA 염기 서열을 규명하는데 요긴하게 이용된다.

화학적 성질

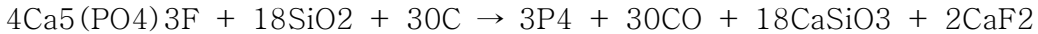
인은 같은 족의 질소에 비해 반응성이 크며, 반응성은 동소체에 따라 크게 다르다. 질소의 $\text{N}\equiv\text{N}$ 삼중 결합 에너지는 945kJ/mol로 $\text{N}-\text{N}$ 단일 결합 에너지의 3.2배인 반면에, 인의 $\text{P}\equiv\text{P}$ 삼중 결합에너지는 490kJ/mol로 $\text{P}-\text{P}$ 단일 결합 에너지의 2.45 배이다. 따라서 질소의 경우는 원자끼리 서로 연결되어 3개의 단일 결합을 만들기 보다는 2원자씩 N_2 로 결합되어 1개의 삼중 결합을 갖는 것이 안정한 반면, 인은 3개의 단일 결합을 갖는 것이 1개의 삼중 결합을 갖는 것보다 안정하게 된다. 이것이 질소는 N_2 분자로 존재하나, 인은 원자끼리 단일 결합을 통해 여러 형태로 연결된 여러 가지 동소체로 존재하는 이유가 된다.

인은 안티모니(Sb), 비스무트(Bi), 그리고 비활성 기체 원소들을 제외한 거의 모든 원소들과 이성분 화합물을 만든다. 실온에서는 산소나 할로젠과 자발적으로 반응하며, 보다 높은 온도에서는 황(S), 알칼리 금속들과 격렬히 반응한다. Bi, 수은(Hg), 납(Pb)을 제외한 모든 금속들과 직접 반응한다. 흰인은 수용액과 반응하여 다양한 화합물들을 만든다.

인의 생산과 이용

현재 인은 인광석을 전기로에서 모래(SiO_2), 코크스(C)와 함께 1,200~1,500oC로 가열시켜 P4 증기를 만들고, 이를 물에서 응축시켜 흰인을 얻는 방법으로 제조된다.

플루오르화인회석을 광석으로 사용하는 경우의 반응식은 다음과 같다.



이렇게 얻은 인을 붉은인으로 변환시켜 성냥을 만드는데 사용하였으며, 제1차 및 2차 세계대전시에는 소이탄, 연막탄, 예광탄에 사용하였다. 제2차 세계대전시에 영국은 특수 민간인에게 벤젠에 인을 녹인 화염병을 나눠주기도 하였다.

현재는 생산된 원소 인의 약 80%는 순수한 인산(H_3PO_4)을 제조하는데 사용되며, 나머지는 인황화물, 인염소화물, 유기-인 화합물 등을 만드는데 사용된다. 또한 인은 강철 생산, 인청동의 제조 등에 요긴하게 사용된다. 그리고 구리의 야금 과정에서 불순물인 산소를 제거하기 위해 인을 첨가하는데, 이렇게 해서 얻은 무산소-인함유 구리는 보통 구리보다 열과 전기전도도가 높은 특성을 보인다.

니켈(Ni)의 성질

물리적 성질

니켈은 은백색을 띠며, 대부분의 금속과 마찬가지로 광택이 나고, 연성과 전성이 있어 쉽게 가공될 수 있다. 철, 코발트와 마찬가지로 강자성을 띠나 자성을 띠는 최대 온도인 퀴리 온도가 380°C 로 낮다. 녹는점은 $1,455^\circ\text{C}$ 이고, 끓는점은 약 $2,900^\circ\text{C}$ 이며, 20°C 에서의 밀도는 $8.908/\text{cm}^3$ 로 코발트와 거의 같다. 결정은 면심입방(fcc) 구조를 갖는다. 전기 전도도는 구리의 약 1/5이다.

천연 상태의 니켈에는 5가지 동위원소가 있는데, 이들은 ^{58}Ni (68.08%), ^{60}Ni (26.22%), ^{61}Ni (1.14%), ^{62}Ni (3.64%), ^{64}Ni (0.93%)이며, 이들은 모두 안정한 동위원소이다. ^{59}Ni (반감기 76,000년)와 ^{63}Ni (반감기 100일)을 비롯한 여러 방사성 니켈 동위원소들이 알려져 있는데, ^{59}Ni 는 운석의 연대 측정, 얼음과 침전물에 들어있는 외계 먼지의 양을 측정하는 데 사용된다.

화학적 성질

니켈은 비교적 반응성이 작은 금속 원소이다. 폴링의 전기음성도는 1.91로 철(1.83), 코발트(1.88)보다 크다. 덩어리 상태로는 실온에서 물이나 공기(산소)와 거

의 반응하지 않는다. 대부분의 묽은 산에도 잘 녹지 않으나, 질산(HNO₃)에는 잘 녹는다. 가성소다(NaOH) 수용액과도 거의 반응하지 않아 NaOH 생산 장치의 제조에 사용된다. 가열하면 반응성이 커지는데, 공기 중의 산소와 반응하여 산화물(NiO) 피막을 만들며 수증기와도 반응하여 NiO가 되면서 수소 기체를 발생시킨다. 레이니 니켈처럼 가루 상태에서는 불이 붙기도 한다. 또한 가열하면 B, Si, P, S, 할로젠 원소 등과도 반응한다.

니켈 원자는 28개의 전자를 갖고 있어, 바닥 상태 전자 배치는 [Ar]4s13d9 또는 [Ar]4s23d8 이다. 가장 흔하고 안정한 산화 상태는 +2이며, 니켈 전지의 양극 물질로 사용되는 NiOOH에서 Ni의 산화 상태는 +3이다. 25oC 수용액에서 Ni²⁺/Ni 반쪽 전지와 NiOOH/Ni(OH)₂ 반쪽 전지의 표준전위는 각각 -0.23V와 +0.49V이다.

크롬(Cr)의 성질

물리적 성질

크롬은 단단하고, 푸른빛을 띠는 금속으로 쉽게 부서지는 성질이 있다. 표면을 닦으면 밝은 광택을 낸다. 녹는점은 1,907oC이고, 끓는점은 2,671oC이며, 밀도는 7.19g/cm³이다. 광석에서 화학적 환원 과정을 거쳐 얻는 크롬(α 형 크로뮴)은 체심입방구조(bcc)를 하나, 크로뮴염 수용액을 전기분해시켜 얻는 β 형 크롬은 육방정계 구조를 한다. β 형은 800oC에서 α 형으로 전이된다. 실온에서 반강자성 배열을 하는 유일한 고체 원소이며, 38oC에서 상자성으로 전환 된다. 천연 상태의 크로뮴에는 4가지 동위원소가 있는데, 이들은 50Cr(4.35%), 52Cr(83.79%), 53Cr(9.50%), 54Cr(2.36%)이다. 이중 50Cr만 방사성 원소인데 반감기가 1.8x10¹⁷년으로 아주 길며, 50Ti으로 붕괴된다. 여러 방사성 크로뮴 동위원소들이 인공적으로 합성되었는데, 이중 반감기가 가장 긴 것이 51Cr(반감기 27.7일)이며, 주로 전자포획과 감마(γ)선 방출로 51V가 된다. 51Cr은 적혈구에 방사성 표지를 하는 데 쓰이는데 이를 통해 적혈구의 양과 체내 수명을 연구하고, 장 출혈을 진단하며, 태아로 출입하는 혈액의 흐름을 조사할 수 있다.

화학적 성질

크롬은 비교적 반응성이 큰 금속으로, 천연 상태에서는 원소 상태로 존재하지 않는다. 공기 중에서 산소와 반응하여 아주 조밀하고 산소 분자가 침투되지 않는 얇은 산화물 보호피막을 만들기 때문에, 공기 중에서 녹 슬지 않고 그대로 있다. 이런 성질 때문에 크롬이 도금에 많이 쓰인다. 물과는 반응하지 않으나, 대부분의 산과는 반응한다. 그러나 진한 황산(H_2SO_4), 질산(HNO_3), 염소산($HClO_3$), 왕수(진한 염산과 진한 질산의 3:1 혼합물) 등 산화력이 있는 산에는 부동화 층을 만들기 때문에 잘 녹지 않는다. 높은 온도에서는 산소, 질소, 염소, 황 등과 반응하여 산화 상태가 +3인 이성분 화합물(Cr_2O_3 , CrN , $CrCl_3$, Cr_2S_3)을 만든다.

크롬은 24개의 전자를 갖고 있어 바닥 상태 전자배치는 $[Ar]3d^54s^1$ 이다. 화합물에서 가장 흔한 크로뮴의 산화 상태는 +3과 +6이고, 열역학적으로 가장 안정한 상태는 +3이다. 다른 전이금속들과 마찬가지로, 크로뮴은 여러 가지 배위 착화합물들을 만든다. Cr의 원자 반경은 128pm이고, 6배위체의 Cr^{3+} 이온 반경은 62pm로 Al^{3+} 의 이온 반경 54pm과 비슷하다. 이 때문에 화합물에 있는 일부 Al^{3+} 이 Cr^{3+} 로 치환될 수 있는데, 루비 보석에 들어있는 Cr^{3+} 불순물도 이렇게 들어간 것이다.