[UCI]I804:24011-200000234422

2007년 8월
석 사 학 위 논 문

연속파 Nd:YAG 레이저를 이용한 냉연강판, 중탄소강 및 Inconel의 레이저용접 특성

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

신 병 헌

2007년 8월 석사학위논문 연속파 Nd:YAG 레이저를 이용한 냉연강판, 중탄소강 및 Inconel의 레이저용접 특성 신 병 헌

연속파 Nd:YAG 레이저를 이용한 냉연강판, 중탄소강 및 Inconel의 레이저용접 특성

Laser welding characteristics of cold rolled carbon steel, medium carbon steel and Inconel on continuous wave Nd:YAG laser

*2007*년 *8*월 일

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

신 병 헌

연속파 Nd:YAG 레이저를 이용한 냉연강판, 중탄소강 및 Inconel의 레이저용접 특성

지도교수 유 영 태

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2007년 4월 일

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

신 병 헌

신병헌의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교 수 심 재 기 인

위 원 조선대학교 교 수 이 동 기 인

위 원 조선대학교 교 수 유 영 태 인

2007년 5월

조선대학교 대학원

목 차

List of Figures····· Ⅲ
List of Tables····· Ⅵ
Abstract····· Ⅶ

제 1 장 서 론····· 1
제 1 절 연구배경····· 1
제 2 절 연구내용····· 4

제 2 장 실 험····· 6
제 1 절 실험장치 및 기기····· 6
1 레이저 실험장비····· 6
2 Jig 및 시편제작····· 7
제 2 절 실험방법····· 10

제 3 장 실험 결과 및 고찰····· 13
제 1 절 냉연강판의 맞대기 레이저용접····· 13
1 초점위치에 따른 출력밀도 특성····· 13
2 비드 온 플레이트를 통한 입열량····· 15
3 맞대기용접의 경도 및 인장강도 특성····· 19
4 용접미세조직 및 표면온도····· 22
제 2 절 중탄소강과 STS304의 이종금속용접····· 25
1 이종금속의 용접····· 25
2 이종금속 용접의 종횡비와 입열량····· 26

3 이종용접부의 용접단면, 인장강도 및 경도····· 30
제 3 절 Nd:YAG 레이저를 이용한 레이저 파형변화에 따른 Inconel의 상호작용····· 40
1 레이저 빔 출력과 조사시간의 조절····· 40
2 레이저빔의 파형변화 특성····· 42

제 4 장 결 론····· 55

참 고 문 헌····· 57

List of Figurers

Fig. 2-1 CW 2kW Nd:YAG Laser system····· 6
Fig. 2-2 Schematic diagram and photo of the experimental apparatus····· 7
Fig. 2-3 Welding Jig····· 9
Fig. 2-4 Experiment equipments····· 12
(a) Optical microscope(Nikon : ECLIPSE L150),
(b) Micro vickers hardness tester (SHIMADZU : HmV-2 model)
(c) Polisher (TOPMET : METPOL-1)
(d) Precision metal saw (BUEHLER : isomet 4000 precision Saw 1)
(e) Mounting pressor (R&D : MET PRESS-A)
(f) Universal Testing Machine (UTM : 4206 Instron Corporation U.S.A)
Fig. 3-1 Spot size measurement on the focus position····· 13
Fig. 3-2 Spot area distribution on the bead on plate····· 14
Fig. 3-3 Influence of welding speed on the aspect ratio····· 15
Fig. 3-4 Influence of welding speed on the heat input capacity 17
Fig. 3-5 Hardness distribution on welding area····· 18
Fig. 3-6 Develop to hardness on the welding distance····· 19
Fig. 3-7 Hardness comparison SCP1, SM45C, and STS304 on welding region according to cross sectional area····· 20
Fig. 3-8 Strain-Stress relationship for changing laser power and welded metal····· 21
Fig. 3-9 Micro structure of welding bead····· 23
Fig. 3-10 Temperature distribution to laser power and speed

relation 23····· 24
Fig. 3-11 Aspect ratio of welding bead according to welding speed (STS304)····· 25
Fig. 3-12 Heat input of capacity to welding speed variation (SM45C)····· 26
Fig. 3-13 Heat input of capacity to welding speed variation (STS304)····· 27
Fig. 3-14 Influence of Welding speed on the Heat input····· 28
Fig. 3-15 Influence of Welding speed on the Aspect Ratio····· 29
Fig. 3-16 Strain-Stress relationship for various dissimilar welding condition····· 31
Fig. 3-17 Strain-Stress relationship according to the quality of the welded parts.····· 32
Fig. 3-18 Strain-Stress relationship for various dissimilar welding condition····· 33
Fig. 3-19 Hardness distribution of cross section area of SM45C and STS304 welding bead····· 34
Fig. 3-20 Hardness distribution of DMW, SM45C and STS304 welding bead····· 35
Fig. 3-21 Hardness comparison according to welding speed····· 37
Fig. 3-22 (a) Welding cross section area(STS304)····· 38
Fig. 3-22 (b) Welding cross section area(DMW)····· 38
Fig. 3-22 (c) Welding cross section area(SM45C)····· 38
Fig. 3-23 Aspect ratio at overlap 50% (300W)····· 41
Fig. 3-24 Aspect ratio at overlap 50% (150ms)····· 42

Fig. 3-25 Fundamental wave form····· 43
Fig. 3-26(a) Pulsed wave modulation (Diameter & Depth)···· 44
Fig. 3-26(b) Pulsed wave modulation (Aspect ratio)····· 44
Fig. 3-27(a) Pulsed wave modulation -power compensation (Diameter & Depth)····· 46
Fig. 3-27(b) Pulsed wave modulation -power compensation (Aspect ratio)····· 46
Fig. 3-28(a) Pulsed wave modulation -heat input loss (Diameter & Depth)····· 48
Fig. 3-28(b) Pulsed wave modulation -heat input loss (Aspect ratio)····· 48
Fig. 3-29(a) Pulsed wave modulation -duration time compensation (Diameter & Depth)····· 50
Fig. 3-29(b) Pulsed wave modulation -duration time compensation (Aspect ratio)····· 50
Fig. 3-30 Pulsed wave modulation -Total(Aspect ratio)····· 51
Fig. 3-31(a) Pulsed wave modulation -duration time compensation - humping depth····· 52
Fig. 3-31(b) Pulsed wave modulation -duration time compensation-frequency of humping····· 52
Fig. 3-32 Inside defect (blow hole)`` ····· 53

List of Tables

Table. 2-1 Chemical composition of SCP1, SM45C, STS304, Inconel 600 (%)····· 8
Table. 2-2 Mechanical and Physical properties of SCP1, SM45C, STS304, Inconel 600····· 8

ABSTRACT

Laser welding characteristics of cold rolled carbon steel, medium carbon steel and Inconel on continuous wave Nd:YAG laser

Shin, Byung Heon
Advisor : Prof. Yoo, Young-Tae, Ph. D
Dept. of Precision Mechanical Engineering,
Graduate School of Chosun University

Laser welding of metals has been widely used to improve a wear resistance and a corrosion resistance of the industrial parts. The objective of this research works is to investigate the influence of the process parameters, such as the welding for metals with CW Nd:YAG lasers. The bead-on-plate welding tests are carried out for several combinations of the experimental conditions. In order to quantitatively examine the characteristics of the butt welding, the welding quality of the cut section, stain-stress behavior and the hardness of the welded part are investigated. From the results of the investigation, it has been shown that the optimal welding condition without defects in the vicinity of the welded area and with a good welding quality is 1325W of the laser power, and 1.4m/min of laser welding speed.

The objective of this research works is to investigate the influence of the

process parameters, such as the welding for SM45C and STS304 with CW Nd:YAG lasers. The bead-on-plate welding tests are carried out for several combinations of the experimental conditions. In order to quantitatively examine the characteristics of the dissimilar welding, the welding quality of the cut section, stain-stress behavior and the hardness of the welded part are investigated. From the results of the investigation, it has been shown that the optimal welding condition without defects in the vicinity of the welded area and with a good welding quality is 1600W of the laser power, 0.85m/min of welding speed and 4 L/min of pressure for shielding gas.

Pulsed Nd:YAG laser welding characteristics of Inconel 600 sheet material were investigated. Welds were subjected to four different Pulsed wave modulation. Pulsed wave modulation were change the four type.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

최근, 레이저용접은 다양한 금속들의 접합 가능성과 전통적인 용접들의 한계를 극복할 수 있는 특성 때문에 생산성 향상을 위한 공정에 폭 넓게 이용되고 있다. 산업사회가 발전 하면서 기계부품이 다양해짐에 따라 서로 다른 기능적 특성을 지닌 금속재료의 접합 필요성이 증가하고 있다. 과거의 전통적인 용접으로는 만족할 수 있는 정밀한 금속접합이 어려워 레이저 용접으로 대체하고 있다. 재료를 고기성능으로 개선하기 위해 합금이 이용되고 있고 더 나아가 신소재를 개발하거나 이종금속을 접합하여 그 기능을 보강하고 있다. 이에 따라 이종금속을 레이저로 용접함으로써 산업현장에서 요구하는 다양한 금속들의 접합에 대한 관심이 집중되고 있다.

금속용접은 용융용접을 주로 실시하고 있어 용접 시 표면 열전도 때문에 많은 문제점들이 발생한다. 용융전도 용접의 경우는 열영향부가 크고 응고과정에서 내부에 결함이 발생할 수 있을 뿐만 아니라 용가재(Filler wire)가 필요하다. 레이저용접은 용가재가 필요 없는 키 홀 용접의 특성을 가지고 있다. 키 홀 용접을 하는 레이저용접은 파장이 10.6㎛인 CO_2레이저와 1.06㎛인 Nd:YAG. 레이저가 주로 활용되고 있다. 탄소강의 표면에 CO_2레이저를 조사시키면 대부분의 빔이 반사되는 반면, Nd:YAG 레이저는 빔 흡수율이 CO_2레이저보다 7배 이상 높아 고효율의 금속용접이 가능하다.[1]

공정변수는 레이저빔의 파장, 레이저빔의 이송속도, 초점거리, 레이저빔의 출력, 보호가스 종류, 유량, 재료의 레이저빔 흡수율과 반사율 등이 있으며 각 공정변수의 상호작용에 따라 용접의 결과가 다르게 나타난다. 고 밀도 에너지 열원인 레이저 빔을 이용하여 용접을 하면 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(Aspect ratio)가 크고, 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)가 작은 용접이 가능하다.[2-5]

레이저 용접에 대한 선행연구를 조사해보면 Erolu[6]등은 레이저를 이용해서 저

탄소강의 열영향부 (HAZ)를 연구하였고, Murugan[7]등은 두 종류의 저탄소강을 맞대기 용접하여 온도분포를 연구하였다. Bertrand[8]등은 연속파형 Nd:YAG레이저를 이용하여 레이저 용접 시 스테인레스강의 표면온도를 연구하였다. Carmignani[9], Nam[10] 등은 얇은 판재를 레이저를 이용하여 맞대기용접에서의 유한요소법으로 연구하였다. Kim[11] 등은 CO_2 레이저를 이용하여 아연도금 강판을 연구하였고, Hu[12] 등은 알루미늄 합금의 특성을 연구하였다.

냉연강판을 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 용접한 연구는 찾을 수 없었다. 본 연구에서는 냉연강판을 Nd:YAG 레이저로 용접할 때 최적의 공정변수를 실험적으로 연구하였다. 본 연구에 이용한 냉연강판은 자동차, 조선, 가전산업 등 산업전반에 사용 되는 재질이다.

Mai[13]는 평균출력이 350W인 Nd:YAG 펄스 레이저로 두께가 1㎜인 시편을 제작하여 강과 kovar 그리고 동과 알루미늄을 이종 용접하였다. Brüggemann[14]는 RSt37-2강과 알루미늄합금(AI-Mg-SI0.7) 을 출력이 5kW 인 CO_2레이저를 이용하여 이종용접에 대한 이론과 실험결과를 비교하였다. 이[15]은 STS304와 SM45C를 평균 출력이 500~600W인 Nd:YAG 펄스레이저로 두께가 0.5㎜인 시편을 겹치기 용접을 하였다. 그러나 고출력의 CW Nd:YAG레이저로 두께가 각각 3㎜이상 되는 STS304와 SM45C를 이종 용접한 연구 결과는 찾지 못했다.

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.[16-18]

인코넬 600의 레이저용접에 관한 연구는 응력부식균열과 관련하여 발전소

증기 발생기 전열관의 슬리브 보수 작업을 위해 펄스파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 진행되어 왔다.[19-21] 최근에는 인코넬 718에 관한 연구가 많이 진행되고 있으며 전자빔용접에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[22-23] 인코넬 600은 니켈 및 크롬이 다량으로 함유된 니켈합금강으로, 인성과 Creep특성이 우수하고 특히 고온강도가 높으며 화학적으로도 안정하여 고온부식 환경에도 강한 장점을 가지고 있다. 고온내수성, 가스 분위기가 요구되는 핵발전소의 스팀 제너레이터 튜브, 열교환기, 화학 및 식품관련설비, 반도체설비부품, 전자부품 등에 사용되고 있다.

제 2 절 연구내용

연속파형(Continuous Wave : CW) Nd:YAG 레이저를 이용해 맞대기 용접을 하기 전에 최적의 용접조건을 결정하기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate) 용접하였다. 비드 온 플레이트 실험 결과로부터 종횡비가 큰 용접공정변수를 결정하고, 종횡비가 가장 큰 공정변수를 기준으로 레이저 빔 이송속도, 초점거리, 레이저 출력 등을 변화시켜 맞대기용접 특성을 실험했다.

Nd:YAG 레이저(파장 1.06㎛)를 이용하여 냉연강판을 용접하였기 때문에 레이저 공정변수 중 재료와 파장은 결정되어있다. 또한 최적의 공정변수로 레이저 빔의 출력, 빔의 초점 거리는 선행연구 Yoo[24,25]의 실험과 같은 방법으로 실험하였다. 종횡비가 가장 큰 용접 공정변수를 중심으로 맞대기 용접할 때 용융풀의 온도, 용융단면의 경도분포, 용융단면의 조직 및 인장응력을 측정하였다.

STS304와 SM45C를 이종 용접할 때 레이저 빔을 이용하면 고 에너지 밀도 열원에 의해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 크고, 용입 깊이가 깊고, 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)가 작은 용접이 가능하다. 일반적으로 이종금속 용접은 용융용접을 주로 실시하고 있으나 용접 시 많은 문제점들이 있다. 이는 각각의 금속학적성분의 차이에 따라 달라지는데, 용접 시 금속조직이 조대화 되거나, 용융 온도와 응고 온도가 달라 발생하는 문제점들이다. 특히 원자구조가 달라 용접 시 가장 먼저 생각해야 할 것은 물리적 화학적 성질이 거의 비슷한 성질을 가지고 있어야 한다. 일반적으로 용융용접에서 융점차가 큰 경우 용접부 균열이 발생하기 쉽다. 즉, 응고 시에 융점차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 또한 계면에 취약한 생성상(phase)이 형성되거나, 두 금속의 희석에 의해 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다.

레이저가 가지고 있는 장점을 이용하여 이종 용접의 문제점들을 극복하기 위해, STS304와 SM45C를 이종 용접하였다. 이종용접에 이용한 STS304는 고온 산화성이 적고 뛰어난 내식성 때문에 부식 환경에 적응성이 우수한 특성이 있다. SM45C는 피로강도가 높고 열처리하면 마모에 강한 성질이 있어 내연기관이나

공작기계의 주요 부품으로 사용한다. 두 금속 최적의 용접조건을 결정하기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate)를 실시하였다. 비드 온 플레이트 실험 결과로부터 용융 용접시 고온균열이나 기공 등 결함이 생기지 않는 조건을 찾았다.

인코넬 600은 다양한 부분에 사용되고 있기 때문에 부품의 보수나 가공을 위한 특성을 분석하는 것은 매우 중요하다. 인코넬 600을 레이저로 최적상태의 용접을 하기 위해서 레이저빔과 인코넬 600사이의 상호작용을 관찰하였다. 특히 연속파레이저인 Nd:YAG 레이저를 펄스파형으로 빔을 변형하여 레이저빔의 출력과 레이저빔이 인코넬 표면에 조사되는 시간에 따른 금속의 에너지 흡수변화를 연구하였다. 가우시안 빔의 형태를 가진 Nd:YAG 레이저를 펄스(Pulsed)파형으로 바꾸고, 사각형태의 빔 파형을 조사시간동안 변조하여 시편표면에서 흡수 및 반사되는 영향과 시편내부에서 발생하는 결함 등을 연구하였다.

제 2 장 실 험

제 1 절 실험장치 및 기기

1. 레이저 실험장비

본 연구에 이용한 Nd:YAG레이저의 파장은 1.06 ㎛이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600㎛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 1000×500×400mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5㎛, z축에 대한 위치정밀도는 1㎛, 반복정밀도는 8㎛이다.

레이저 발진기와 작업대인 LASMA의 사진은 Fig. 2-1에 나타냈으며 작업대 내부의 사진과 실험장치의 모식도는 Fig. 2-2에 나타내었다.

Fig. 2-1 CW 2kW Nd:YAG Laser system

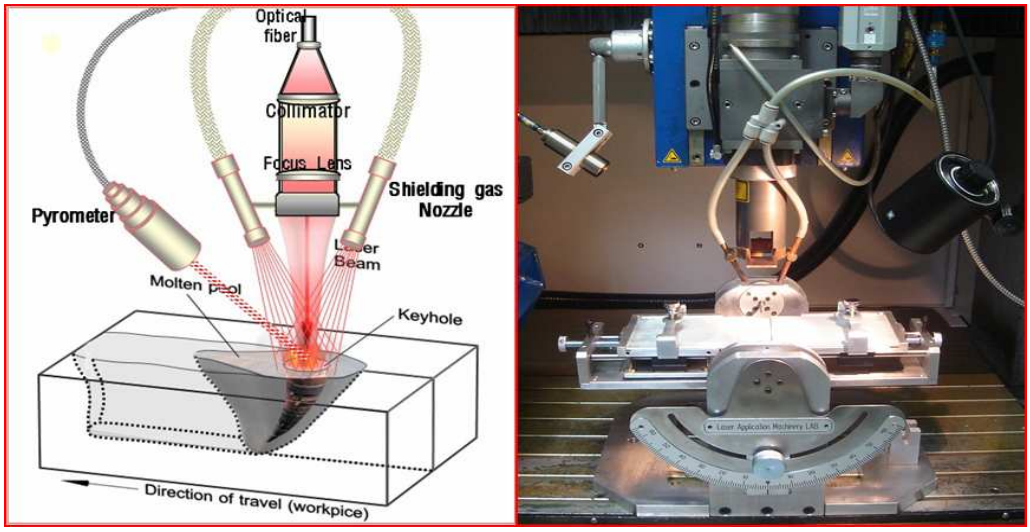


Fig. 2-2 Schematic diagram and photo of the experimental apparatus

2. Jig 및 시편제작

실험에 사용된 시편은 자동차용 금속재료인 냉연강판(Cold Rolled Carbon Steel : SCP1), 일반기계구조용강(SM45C), 오스테나이트계 스테인레스강(STS304)과 인코넬 600이다. 냉연강판 시편의 크기는 150mm(L) × 80mm(W) × 2mm(T), 일반기계구조용강인 SM45C와 오스테나이트계 스테인레스강인 STS 304 시편의 크기는 150mm(L) × 80mm(W) × 3mm(T)이며 인코넬 600 시편의 크기는 50mm(L)×2.8mm(W)×1.5mm(T)이다. 용접 시 시편 표면의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시키면서 실험하였다.

냉연강판의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table. 2-1, SM45C와 STS304의 화학조성분과 기계적 성질은 Table. 2-2, Table. 2-3에 각각 나타내었다. 인코넬 600의 화학조성분과 기계적 성질은 Table. 2-4에 나타내었다.

시편은 공작대에 부착된 지그에 고정시키고 용접헤드에서 나오는 He-Ne 레이저광(적색)을 이용하여 용접위치를 확인하였다. 용접위치의 허용오차는

Table. 2-1 Chemical composition of SCP1, SM45C, STS304 and Inconel 600 (%)

	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Fe	Cu
SCP1	≤0.12	≤0.5	≤0.04					
SM45C	0.42~0.48	0.15~0.35	0.6~0.9	0.03>				
STS304	0.08	1.0	2.0	0.04>	8.0~10.5	18~20		
Inconel 600	0.01	0.1	0.3	0.3>	76	15.5	8	0.2

Table. 2-2 Mechanical and Physical properties of SCP1, SM45C, STS304 and Inconel 600

	Tensile stress (N/mm^2)	Elongation(%)	Density (Mg/m^3)	Thermal expansion	Hardness (H_B)
SCP1	≥270	38	7.8		50~71
SM45C	48이상			10.73~10.92	220
STS304	612	40	8	18.8	210
Inconel 600	550-690	55-35	8.42		65-85

0.1mm 이하로 유지하였다. 시편을 지그로 단단히 고정시켜 용접 중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 이는 산업현장에서 용접 시 작업의 편의성 때문에 지그나 클램프 등으로 고정하는 것과 같은 현상을 재현하기 위함이기도 하다. 본 연구에 사용된 지그는 Fig. 2-3에 나타내었다.

Fig. 2-3 Welding Jig

제 2 절 실험방법

시편을 Nd:YAG 레이저로 용접 시 보호 가스는 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기를 차단하여 용접 시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 3~4 L/min로 하였다. 레이저 용접을 위한 레이저 빔 이송속도와 용접비드의 관계를 연구하기 위해 레이저 출력을 1000W로 하고 초점거리 f=200mm이고 직경 D가 60mm인 렌즈를 사용하였다. 시편표면에서 초점면이 가장 작은 초점거리인 f=200mm를 작업거리(z=0)로 하였다. 작업거리(z)를 변화시켜 공정별 종횡비를 분석하였다. 이때 용접속도는 각각 1m/min ~ 5m/min로 변화시키면서 용접 비드면과 비드 폭을 측정하였다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 정밀금속절단기(BUEHLER : isomet 4000 precision Saw 1)로 용접시편을 절단하고 사포(sand paper)로 연마 및 폴리싱 후 에칭액(Nital 5%)을 만들어 에칭 하였다. 에칭 된 용접비드 경계면은 광학현미경(Nikon : ECLIPSE L150)으로 관찰하였다. 레이저 빔을 금속 시편에 직접 조사하는(bead on plate) 방식과 맞대기 용접 후 용접단면을 절단하여 광학 현미경으로 용입 깊이를 측정하였다. 용접시 용접속도의 변화에 따른 종횡비(Aspect rato), 시편내부로 흡수되는 입열량(Heat input capacity)과 맞대기 용접 시 최적의 용접조건을 찾기 위해 레이저빔 이송속도와 작업거리를 변화시키면서 레이저 용접실험을 했다.

레이저 용접 시 열 때문에 발생하는 조직변화에 의한 경도 측정은 마이크로 비커스(SHIMADZU : HmV-2 model) 경도 시험기를 사용하여 0.5kg의 하중을 적용시켰다. 적외선 온도계를 이용하여 레이저빔 조사 시 실시간으로 표면온도를 모니터링 하였다. 적외선 온도계는 독일 Impac Inc.의 장치로 모델명은 IGAR 12-LO이다. 0.2mm의 Optical mono fiber(red)를 사용하였다. 분해능interface 0.1℃, 측정온도범위는 500 ~ 2200℃이다. 레이저빔이 시편에 조사될 때 스캐터링이 발생하여 온도계(pyrometer) 의 손상을 가져올 수 있기 때문에 렌즈보호필터를 부착하여 실험하였다.

레이저 용접을 위한 레이저 빔 이송속도와 용접비드의 관계를 연구하기 위해

레이저 출력을 1600W와 2000W로하고 초점거리 f=200mm이고 렌즈 직경 D가 60mm인 렌즈를 사용하였다. 용접할 때 작업거리는 초점거리 f= 200mm의 초점길이를 z=0으로 하여 실험하였다. 이때 용접속도는 각각 1.0m/min ~ 10m/min로 변화시키면서 용접 비드면과 비드 폭을 측정하였다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 정밀금속절단기로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 폴리싱 후 $CuSo_4$10㎎ + Hcl 50㎖ + H_2O 50㎖로 에칭 하였다. 에칭 된 용접비드 경계면은 광학현미경으로 관찰하였다. 레이저 빔을 금속 시편에 직접 조사하는(bead on plate) 방식과 맞대기 용접후 용접단면을 절단하여 전자 현미경으로 용입 깊이를 측정하였다. 용접시 용접속도의 변화에 따른 종횡비(aspect rato)와 맞대기 용접시 최적의 용접조건을 찾기 위해 공정변수를 변화시키면서 레이저 용접실험을 했다.

용접 후 레이저 빔의 이송 속도 변화에 따른 인장강도 시험은 (Universal Testing Machine:4206 Instron Corporation U.S.A.)으로 하였다. 용접하면서 열 때문에 발생하는 조직변화에 의한 경도 측정은 마이크로 비커스(SHIMADZU : HmV-2 model) 경도 시험기를 사용하여 1.0kg의 하중을 적용시켰다.

본 연구에 사용된 마이크로 광학현미경, 비커스 경도기, 자동 폴리셔, 다이아몬드 금속정밀 절단기, 마운팅프레스, 인장강도 시험기는 Fig. 2-4에 나타내었다.

Fig. 2-4 Experiment equipments

(a) Optical microscope(Nikon : ECLIPSE L150),

(b) Micro vickers hardness tester (SHIMADZU : HmV-2 model)

(c) Polisher (TOPMET : METPOL-1)

(d) Precision metal saw (BUEHLER : isomet 4000 precision Saw 1)

(e) Mounting pressor (R&D : MET PRESS-A)

(f) Universal Testing Machine (UTM : 4206 Instron Corporation U.S.A)

제 3 장 실험 결과 및 고찰

제 1 절 냉연강판의 맞대기 레이저용접

1. 초점위치에 따른 출력밀도 특성

레이저빔이 재료표면에 흡수되는 것은 재료의 물성치와 가공조건에 따라 다르다. 용접에 영향을 미치는 재료의 대표적인 물성치는 반사율과 열전도율 및 전기전도도이다. 레이저빔이 표면에 조사되면 초점위치에 따라 시편 표면에 미치는 재료별 물리적 성질이 다르기 때문에 흡수도가 달라진다. 이와 같은 이유로 금속표면에 레이저 빔이 조사되었을 때 초점면의 크기가 재료에 따라 다르다.

초점거리 변화에 따른 초점면의 변화를 분석하기 위해 레이저빔의 초점거리를 −4mm에서 +3mm까지 변화시켜 레이저빔을 조사한 결과를 Fig. 3−1에 나타내었다. 초점면의 크기는 맞대기 용접 시 레이저빔이 시편 간격 사이로 통과하는

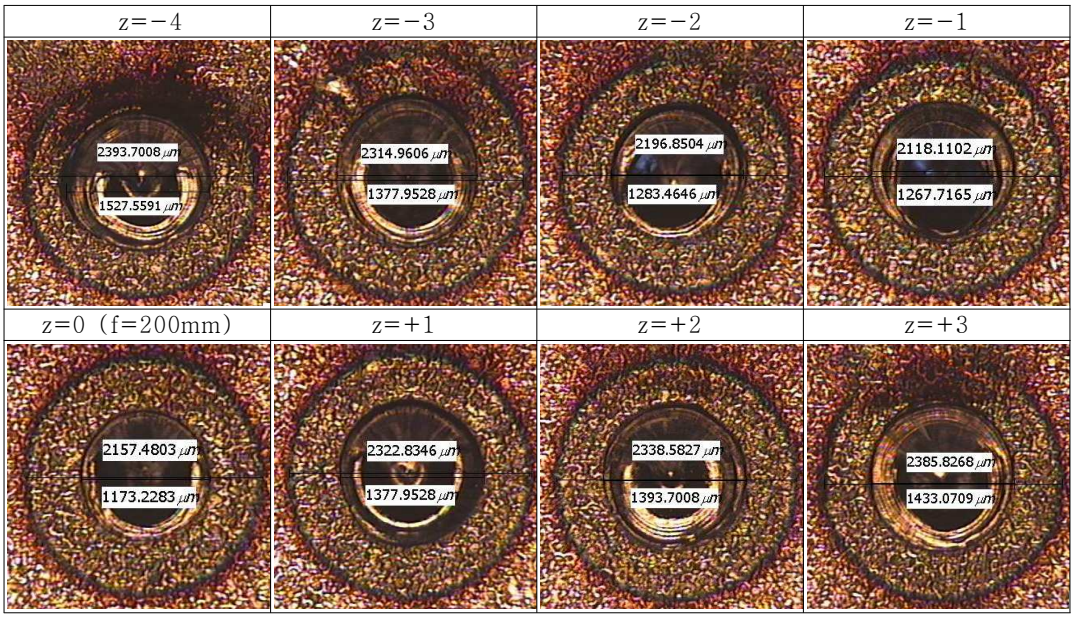


Fig. 3−1 Spot size measurement on the focus position

여부와 비드폭의 크기를 판단할 수 있는 중요한 기준이 된다. 각 초점위치에서 레이저빔의 조사시간은 180ms이고, 이때 조사한 레이저 출력은 700W이다.

Fig. 3-2에 나타낸 초점 면적은 전체적으로 에너지 출력이 큰 중앙부의 용융된 부분은 표면장력 때문에 약간 부푼 둥그런 원의 형상을 하고 있다. 이 둥그런 원을 중심으로 반지름 방향으로 온도구배가 같은 등온선(isothermal line)의 열영향부와 모재가 순환형(circulation)의 경계를 하고 있다. Fig. 3-2의 실험 결과를 이용해서 초점위치별 출력밀도와 초점면적을 Fig. 3-3에 나타냈다. Fig. 3-2의 실험결과를 이용해서 초점위치에 따라 초점면적(Spot area)과 출력밀도(P_ρ =P/A)값을 계산하였다. z=0인 초점거리 (f=200mm)에서 초점 면적이 가장 적어 출력밀도가 가장 컸다. 그림에서 (-)로 표시한 왼쪽은 초점면을 시편 표면보다 아랫방향으로 이동하면서 조사한 결과이고 (+)로 표시된 실험결과는 윗 방향으로 이동하면서 실험한 결과이다. 초점위치를 시편표면보다 아래 방향으로 진행하면서 레이저 빔을 조사하면 오른쪽에 비해 초점 면적이 작아 출력 밀도는 약간 크게 나타난다. 초점을 시편 표면보다 아래로 이동시키면 출력밀도가 가장 큰 위치인 초점위치가 시편 내부에 작용하여 깊이 방향으로 열이 침투되기 때문이다. 그러나 초점을 시편 표면보다 위 방향으로 이동시키면, 단위 시간당 에너지밀도가 아랫방향으로 하여 조사 시켰을 때 보다 작아져 초점면적은 커지고 출력밀도

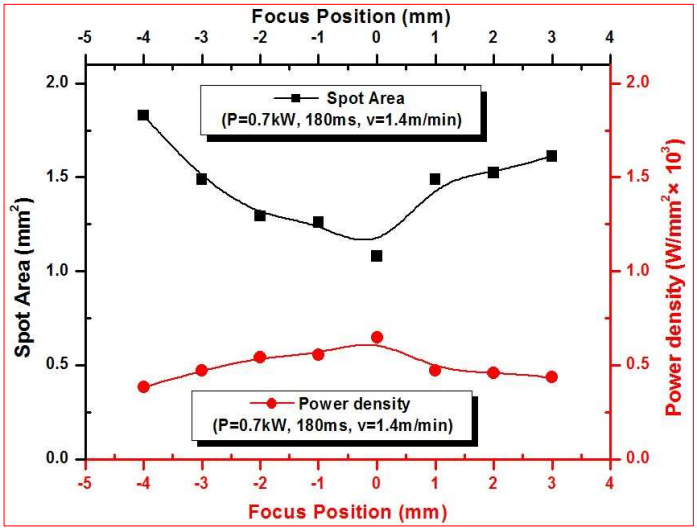


Fig. 3-2 Spot area distribution on the bead on plate

는 작아졌다.

이와 같은 현상은 레이저용접이 keyhole 용접특성을 가지고 있는 것을 고려할 때 효율적인 용접을 하기 위해서는 초점위치를 시편표면이나 약간 아래로 이동시켜 용접하는 것이 효율적임을 나타내고 있다.

2. 비드 온 플레이트를 통한 입열량

레이저용접 시 공정변수가 적절하지 않으면 열 변형과 용접 결함 등이 발생하므로 최적의 용접 공정 변수를 결정하여 용접해야 한다. 최적의 용접 공정변수를 결정하기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate)로 용접하여 입열량을 비교했다. 레이저빔의 속도 변화에 따른 용입 깊이와 용융 폭을 측정하여 식 (1)로 계산하여 종횡비를 구한 결과를 Fig. 3-3에 나타내었다. 식 (1)에서 A·R(Aspect Ratio)는 종횡비이고 H는 용입깊이(bead depth), W는 용융폭(bead width)이다.

$$A \cdot R = \frac{H}{W} \qquad (1)$$

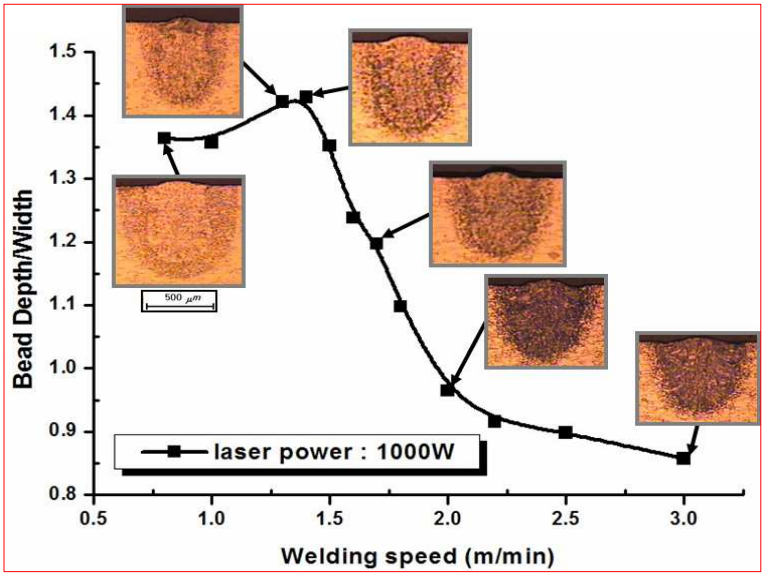


Fig. 3-3 Influence of welding speed on the aspect ratio

Fig. 3-3에서 횡축은 레이저 빔의 이송 속도이고 종축은 종횡비이다. 레이저 빔 이송속도가 느린 0.8m/min 와 1.0m/min에서는 레이저 빔이 내부로 침투되는 것 못지않게 표면으로 열전도 되는 양도 많아져 레이저빔의 이송속도가 1.4m/min 부근보다 종횡비가 작았다. Fig. 3-3에서 종횡비(Aspect Ratio: AR)가 가장 큰 레이저빔 이송속도는 1.4m/min이였다. 레이저 빔 이송속도가 1.4m/min 부근에서의 종횡비가 가장 컸기 때문에 1.4±0.1m/min로 변화시켜 확인 실험하였다. 확인 실험 결과 1.4-0.1m/min보다 1.4+0.1m/min일 때 종횡비가 더 좋았다. 레이저빔 출력이 1000W일 때 종횡비가 가장 큰 영역은 레이저 빔의 이송속도가 1.4m/min 부근임을 확인하였다. 이보다 빔 이송속도를 증가시키면 빔 이송속도가 증가할수록 단위시간당 출력밀도가 작아져 종횡비가 감소하는 현상이 나타나고 있다.

빔 이송속도에 따른 입열량은 식 (2)로 계산하여 그래프를 Fig. 3-4에 나타내었다.

$$E = \frac{P}{W \cdot v} \qquad (J/cm^2) \qquad (2)$$

식 (2)에서 E는 입열량(J/cm^2), P는 레이저 출력(W), W는 용융 폭(mm), v는 레이저 빔 이송 속도(m/min)이다. 레이저 출력을 1000W로 하고 z=0 위치에서 레이저 빔 이송속도를 0.5m/min에서 3.0m/min까지 0.5m/min 간격으로 이동시켜 실험하였다. 레이저빔의 이송속도가 증가하면, 레이저빔과 재료의 상호작용 시간이 감소하여 입열량이 감소하는 형태로 나타나고 있다. 그러나 Fig.3-3에서 확인한 종횡비가 가장 큰 레이저 빔 이송속도 구간인 1.4m/min±0.1m/min에서, Fig. 3-4의 입열량 변화를 보면 잠열이 있는 것으로 나타나고 있다. 이 부근에서는 표면 열원으로 인한 표면열전도보다 깊이 방향으로 열이 침투되는 구간으로 레이저빔의 이송속도가 0.5m/min와 1.0m/min보다 입열량이 작은 특성을 나타내고 있다. 종횡비가 가장 큰 1.4m/min±0.1m/min로 실험한 결과와 비교해볼 때, 1.4m/min±0.1m/min보다 레이저 빔 이송속도를 증가시키면 입열량은 급격히 감소하였다. 레이저빔의 이송속도가 1.4m/min±0.1m/min의 속도보다 큰 경우에는 내부로 침투되는 열보다 표면으로 전도되는 양이 많고 상대적으로 속도가 빠르기

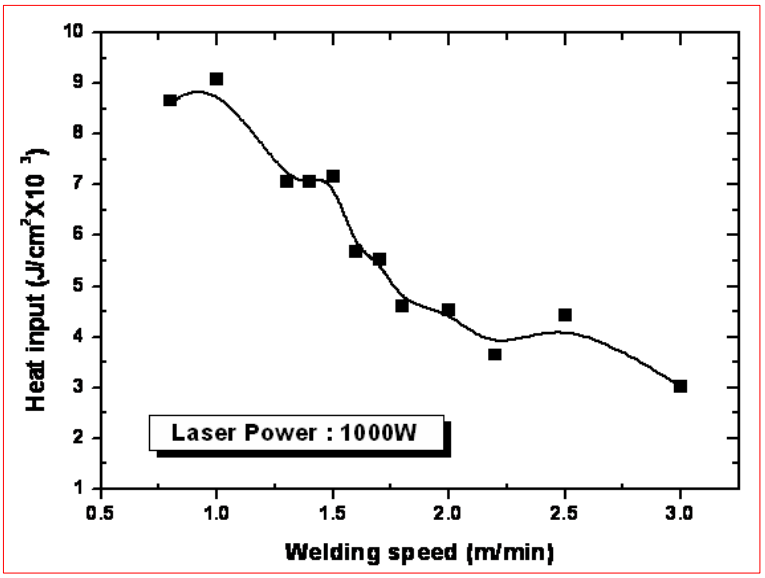


Fig. 3-4 Influence of welding speed on the heat input capacity

때문에 입열량은 계속적으로 감소하였다.

레이저 출력이 1000W일 때 레이저빔의 이송속도를 2.0m/min이상으로 하면 종횡비가 1보다 작아 열이 깊이 방향으로 침투하는 양보다 표면 열전도가 크게 나타나 키 홀 용접특성을 상실하고 있다.

Fig. 3-3과 Fig. 3-4는 시편의 두께가 2mm인 시편에 레이저빔을 조사하여 관통되지 않는 상태에서 실험한 결과를 정리한 것이다. 그러나 Fig. 3-5에서는 두께가 2mm인 시편을 관통되는 비드 온 플레이트 용접하여 용접특성을 분석하고자 한다. 그래서 Fig. 3-3과 Fig. 3-4에서 최적의 조건인 레이저빔 이송속도를 1.4m/min로 고정하고 레이저 빔의 출력을 증가시키면서 실험하였다. 레이저빔의 이송속도를 1.4m/min로 고정하고 레이저빔의 출력을 1100W 에서 1400W까지 100W씩 증가시키면서 실험한 결과를 Fig. 3-5에 나타냈다. Fig. 3-5의 실험은 레이저 출력을 증가시켜 레이저빔을 시편에 조사한 다음 시편 뒷면을 확인하여 관통용접의 여부를 확인하였다. 출력 1300W일 때 완전 관통용접이 되었기 때문에 최초 관통용접에 필요한 출력을 확인 하였다. 레이저빔의 출력을 1200W

에서 1300W사이에서 25W씩 증가시키면서 용접한 결과 최초로 시편이 관통 용접된 출력은 1275W였다. 출력 1275W에서는 용접 시편의 뒷면에 형성된 비드 모양이 일정하지 않고, 비드 모양이 물방울 모양으로 띄엄띄엄 떨어져서 형성되어 있다. 이는 출력 1275W이고 레이저빔 이송속도가 1.4m/min에서는 관통용접하기 위한 충분한 입열량이 아님을 나타내고 있다. 레이저빔의 출력을 1300W로 증가 시키면 시편 뒷면의 비드 모양이 균일한 관통용접이 되었고 이때의 입열량은 3.8×10^3J/cm^2 이였다.

Fig.3-3에서 종횡비가 가장 큰 공정조건은 출력 1000W이고 레이저빔 이송속도 1.4m/min일 때로 이때의 입열량은 7.1×10^3J/cm^{2}이였다. 그러나 Fig. 3-5에 의하면 출력 1325W일 때 레이저빔 이송속도가 1.4m/min인 경우 양호한 용접 결과를 얻었다. 이 때 입열량은 3.76×10^3J/cm^2 으로 출력이 1000W일 때보다 약 두 배가량 낮았다. 이것은 레이저 출력이 낮을 때보다 높은 출력으로 레이저빔을 시편에 조사하면 시편 내부로의 에너지 전달효율을 증가시키고, 입사에너지가 키홀에 모여 효율적으로 키 홀을 깊이방향으로 진전시키기 때문이다. 용접효율이 높다는 것은 용접에 필요한 단위부피당 에너지가 일반 용접과정보다 작다는 것을

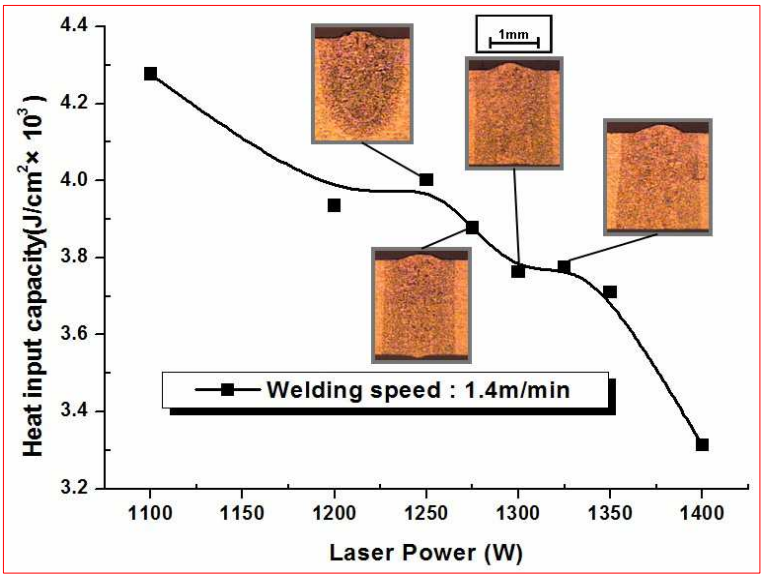


Fig. 3-5 Hardness distribution on welding area

의미한다. 즉 열을 받는 부위를 작게 만드는데 기여하여 열영향부(HAZ)의 범위를 작게 만든다. 레이저출력을 1325W로 상승시켜 용접한 결과 시편 뒷면이 균일한 비드면을 형성하였으나, 1400W에서는 레이저빔의 출력이 지나치게 커서 용융 폭이 매우 크게 형성되고 표면에서 용융에 의한 기화현상이 발생 하였다. 그래서 본 연구에서는 출력 1325W와 1275W의 중간 출력인 1300W로 실험하여 비드면을 확인한 다음 용접공정변수를 출력 1300W와 1325W로 하고 레이저 빔의 이송속도는 1.4m/min, z=0으로 하여 맞대기 용접하였다.

3. 맞대기용접의 경도 및 인장강도 특성

초점위치(Focus position) 변화에 따른 시편표면에서의 용융특성 분석실험과 비드 온 플레이트실험을 바탕으로 맞대기용접을 하였다. 레이저 빔 출력을 1300W와 1325W로 맞대기 용접한 시편의 경도를 알아보기 위해 마이크로비커스경도기를 이용하여 경도를 측정하였다. 경도측정은 시편의 단면을 측정하였으며 표면에서 700㎛만큼 떨어져서 레이저 빔의 진행방향과 수직방향으로 측정하였다. 이때 경도측정 시 단면의 굴곡이나 흠집 등으로 인한 경도 값의 오차를 없

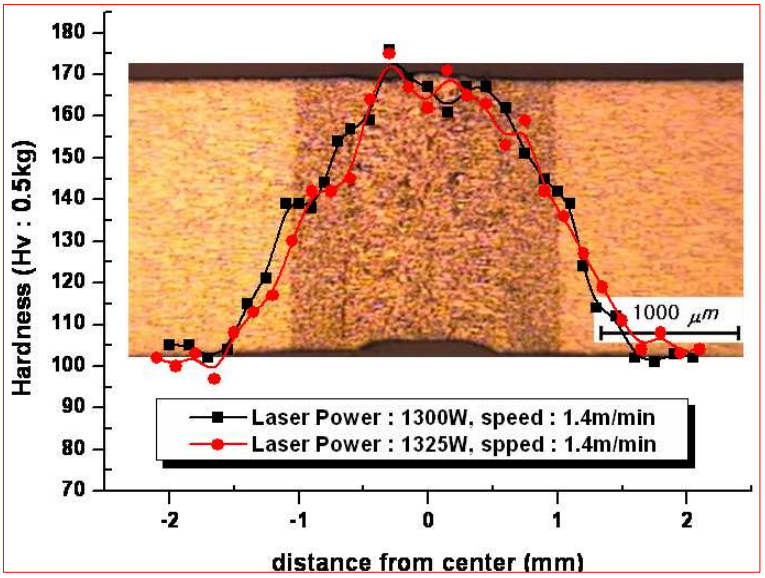


Fig. 3-6 Develop to hardness on the welding distance

애기 위해 단면을 Sand paper로 연마하였다. 사용된 Sand paper는 #120, #220, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500,
#2000이며 경면을 만들기 위해 6㎛와 1㎛의 Suspensor로 연마하였다.

Fig. 3-6에서 나타낸 것처럼 표면경도는 모재에서 열영향부(HAZ)를 지나 용융부로 갈수록 경도 값이 커짐을 알 수 있다. 모재는 100Hv에서 110Hv이며 열영향부는 110Hv에서 160Hv의 경도 값이 나타났고 용융부는 160Hv에서 170Hv의 경도 값이 나타났다. 용융부에서 최대 경도 값은 모재에 비하여 약 1.7배 정도 컸다. 그림에서 보듯이 모재와 열영향부, 용융부에서 두 출력조건 모두 비슷한 경도분포를 나타내었다. 열 영향부를 포함한 용접 폭은 약 3mm였고, 모재의 바로 옆 경계부에 경도가 약간 저하하는 자체 템퍼 구역(self-tempered zone)이 나타났다. 이 지역은 불균일한 내마모성이 나타날 수도 있다.

용접 후, 열 영향부와 용융부에서 모재보다 큰 경도 값이 나타났으며 그 변화폭은 170%였다. 이는 재료가 가진 물리·화학적인 특성 때문이며 이를 비교하기 위해 Fig. 3-7에 나타내었다. Fig. 3-7에서 보듯이 본 연구의 실험 재료인 냉연강판(SCP1), 중탄소강(SM45C)과 스테인레스 강(STS304)을 CW Nd:YAG 레

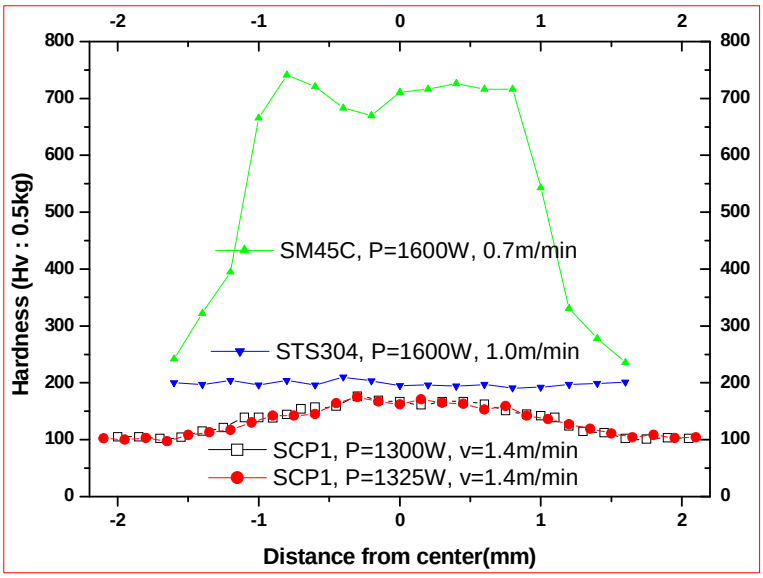


Fig. 3-7 Hardness comparison SCP1, SM45C, and STS304 on welding region according to cross sectional area

이저를 이용하여 용접한 부분의 경도변화 값들을 나타내었다. SCP1이 모재에서 용융부로 갈수록 경도 값이 증가하여 1.7배의 경도상승이 나타난 반면 STS304는 모재의 경도인 200Hv값이 계속 유지되었다.

반면, SM45C는 모재의 경도가 250Hv에서 열영향부에서 급격한 경도 상승이 나타나고 용융부에서는 700~750Hv의 경도값을 보이고 있다. 용접 후 모재보다 경도 상승이 3.5배 증가하였음을 알 수 있으며 SCP1의 경도 증가율인 1.7배의 2배가 넘는다. 이는 레이저 빔이 SM45C에 조사되어 용융·응고될 때 급 가열 되었던 오스테나이트화 되었던 조직이 급 냉각되면서 마르텐사이트화 되었기 때문이다.

빔 이송속도를 1.4m/min, 레이저 출력은 1275W, 1300W, 1325W로 맞대기 용접한 시편과 모재의 인장력 실험한 결과를 Fig. 3-8에 나타내었다. 맞대기 용접한 시편은 한국공업규격(KS B0801)에 맞혀서 인장시험편을 제작하였으며 최소한의 열 영향과 정확한 절단을 위해서 와이어 컷팅을 하였다. 이때 인장력실험은 인장시험장비(Intron Corporation U.S.A의 Universal Testing Machine 4206, 15ton)을 사용하였다. 모재와 출력을 1300W, 1325W로 하여 맞대기 용접한 시

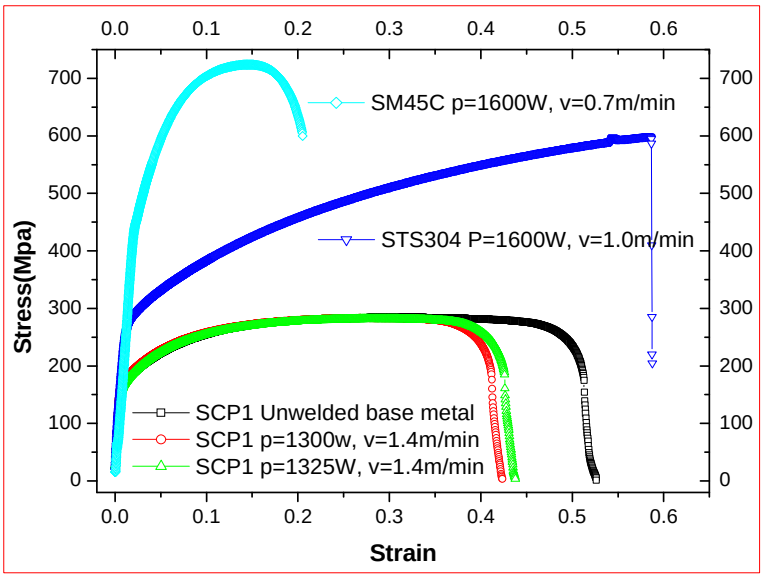


Fig. 3-8 Strain-Stress relationship for changing laser power and welded metal

편을 인장시험 한 결과 인장응력은 280Mpa로 비슷한 값을 나타내고 있다. 모재의 변형률은 0.52였다.

레이저 빔 출력이 1325W로 용접했을 때 시편의 변형률은 0.43이였으며, 출력이 1300W로 용접한 시편의 변형률은 약 0.42정도였다. 본 실험 공정변수로 맞대기용접하면 인장응력은 모재와 같지만 변형률은 0.09정도 감소하였다. 레이저 빔의 출력을 1325W와 1300W로 용접했을 때의 변형률을 비교하면 각각 0.43과 0.42로 변형률은 0.01 차이를 보인다. 이는 용접 후, 용융부를 중심으로 용융부와 열영향부에서 모재의 조직이었던 페라이트가 다량의 펄라이트조직으로 변화하여 경도는 상승하고 약간의 취성이 발생하였기 때문이다.

SM45C는 응력이 740MPa까지 증가한 반면 변형률은 0.2에 그쳤다. 이는 오스테나이트 안정화 원소인 C는 급 가열 후 급 냉각시키면 경도가 큰 마르텐사이트 조직으로 되지만 취성이 발생하여 변형률이 작게 나온 것이다. STS304는 응력은 600MPa까지 증가하고 변형률은 0.58이 나타났다. 이는 STS304에 들어 있는 Cr과 Ni성분 때문이다. Ni은 인성과 저온 충격 저항을 증가시키고 Cr은 내식성과 내마모성을 증가시키는 성분으로 강력한 탄화물 생성원소로 마르텐사이트 조직을 안정화시킨다.

4. 용접미세조직 및 표면온도

레이저 출력 P=1300W, P=1325W로 하고 레이저 빔 이송속도 v=1.4m/min으로 맞대기 용접을 한 결과를 광학 현미경(Nikon : ECLIPSE L150)으로 용융부(melting zone), 열영향부(HAZ), 모재(base metal)의 조직을 Fig. 3-9에 나타냈다. Fig. 3-9에서 (A)는 레이저출력이 1300W로 맞대기 관통용접 했을 때 조직사진이고 (B)는 1325W로 맞대기 관통용접 했을 때의 조직사진이다. 모재의 조직은 입자가 크고 흰 페라이트로 되어 있고 열영향부는 모재방향으로 급격한 냉각 때문에 입자들이 자기냉각 (Self-quenching) 효과로 변태하여 입자의 크기가 조밀해지고 소량의 검은 펄라이트가 혼합되어 나타났다. 용융부는 펄라이트의 양

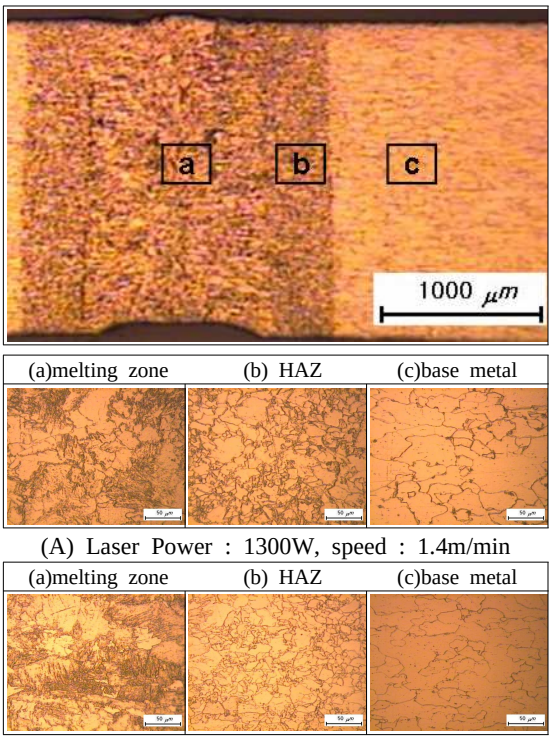


Fig. 3-9 Micro structure of welding bead

이 많아지고 불규칙하고 작은 면적의 펄라이트와 흰색의 페라이트가 혼합되어 나타났다.

용접과정에서 생성된 펄라이트는 열영향부를 거쳐 용융부로 갈수록 단위 면적당 차지하는 비중이 커진다. 경도측정과 인장시험에서 보았듯이 펄라이트의 함량이 높아질수록 경도 값은 상승하고 변형률은 감소함을 알 수 있다. 즉, 레이저를 이용해 SCP1의 용접을 통해 생성된 펄라이트 용접부위와 그 주변에 경도의 상승을 가져오지만 인장응력을 받는 상태에서는 나쁜 영향을 주어 용접부위의 파괴원인이 될 수도 있음을 보여주고 있다.

빔 이송속도를 1.4m/min, 초점위치를 z=0mm (Lens focal length : 200mm), 빔 조사 길이(L)는80mm로 고정하고, 레이저출력은 1300W, 1325W, 변화시켜 용접할 때 표면온도를 측정하였다. 이때 적외선온도계의 측정각도는 45° 이다. 레이저빔이 시편에 조사될 때 적외선온도계(Infrared pyrometer)로 표면용융온도

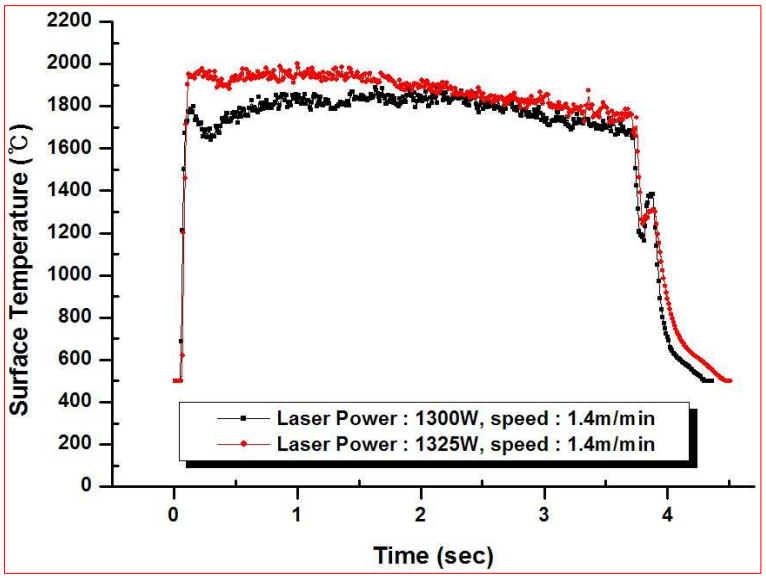


Fig. 3-10 Temperature distribution to laser power and speed relation

를 측정한 결과를 Fig. 3-10에 나타냈다.

Fig. 3-10에 나타난 것처럼 레이저 빔 출력이 1325W일 때, 1300W보다 표면의 온도가 전체적으로 높게 나타났다. 레이저빔 출력이 1300W일 때 초기의 표면온도가 높았다가 차츰 낮아지는 것은 레이저빔이 조사될 때 piercing 이후 내부로 흡수된 에너지가 모재로 열전달이 이루어지는 과정에서 레이저빔이 이동될 때 초기 키 홀 내부로의 입열량보다 주변부로의 열 전달량이 많기 때문이다. 대부분의 적외선은 금속 표면에서 반사하기 때문에 레이저 용접 초기에 금속표면을 변화시켜 반사율을 감소시켜 레이저빔의 흡수율을 증가시킨다. 금속표면의 반사율을 낮추기 위해 Piercing할 때 레이저 출력이 순간적으로 금속 용융온도까지 상승시키면 Piercing영향을 받지 않음을 나타내고 있다.

이는 용접구간인 80mm에서 일정한 표면온도를 가지고서 용접결함이 없는 안정적인 용접을 위해서는 초기 Piercing 이후 레이저 빔이 나올 때까지 충분한 입열량이 주어지는 1325W가 안정적인 조건이라 하겠다.

제 2 절 중탄소강과 STS304의 이종금속용접

1. 이종금속의 용접

이종용접에 앞서 STS304와 SM45C의 각각 최적의 용접조건을 결정하기 위해 예비실험을 하였다. SM45C의 용접특성과 STS304의 용접특성을 비교하기 위해 출력을 2kW 초점면의 위치는 시편표면보다 0.5㎜ 아래인 z=-0.5㎜에서 레이저 빔의 이송속도 변화에 따른 비드 단면의 변화를 bead on plate로 실험하여 Fig. 3-11에 나타내었다. 이때 사용한 보호 가스는 Ar이고 유량은 4L/min으로 일정하게 유지하였다. 이송 속도가 낮으면 시편 표면의 용융부위가 커지기 때문에 종횡비는 오히려 레이저빔의 이송속도가 4m/min 일 때 보다 작았다. 빔의 이송속도가 커지면서 용입 깊이가 줄어들고 있는데, 이런 현상은 표면에서 키 홀이 잘 형성되지 않아 레이저빔이 용융 풀에서 다중 반사될 확률이 줄어들어 흡수 에너지양이 줄어들기 때문이다. 용접공정 변수를 Fig. 3-11의 결과를 근거로 판단하

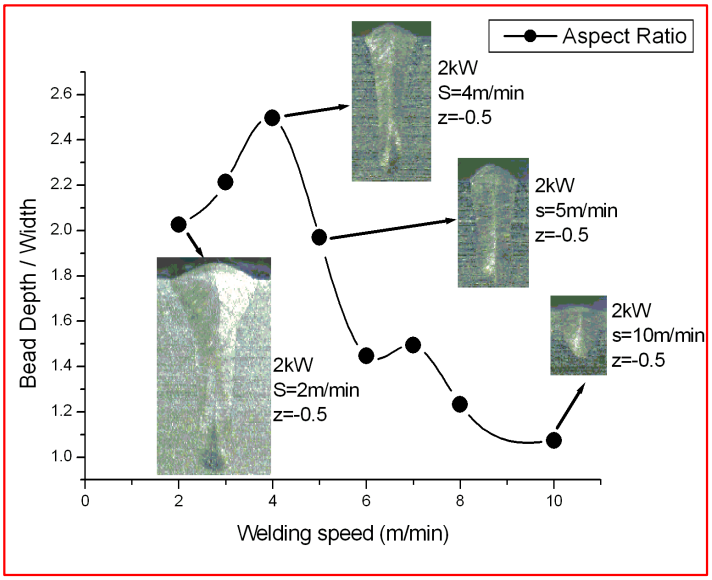


Fig. 3-11 Aspect ratio of welding bead according to welding speed (STS304)

면 STS304의 경우 출력 2000W에서는 빔 이송속도를 1000mm/min으로 했을 경우 초점거리z=-0.5㎜에서 두께 4㎜까지 용접이 가능함을 알 수 있다. 용접단면 전체가 내부결함이 없이 양호한 상태를 나타내고 있다. 이것은 SM45C보다 탄소성분은 적고 Ni과 Cr성분이 많아 열확산속도가 빠르기 때문이다.

2. 이종금속 용접의 종횡비와 입열량

레이저 빔의 출력과 이송 속도 변화에 따른 SM45C와 STS304의 입열량 변화를 비교하기 위해 식 (1) 로 계산하여 각각 Fig. 3-12와 Fig. 3-13에 나타내었다. SM45C의 실험 결과인 Fig. 3-12는 레이저 빔 이송속도가 0.8m/min까지는 레이저 빔 이송속도가 증가 할수록 입열량이 증가 하지만 0.9m/min이상에서는 급격히 감소한다.

STS304는 Fig. 3-13에 나타낸 것처럼 본 실험 조건에서는 이송속도가 증가함에 따라 입열량이 감소함을 보여준다. Fig. 3-11의 실험결과는 빔의 이송속도

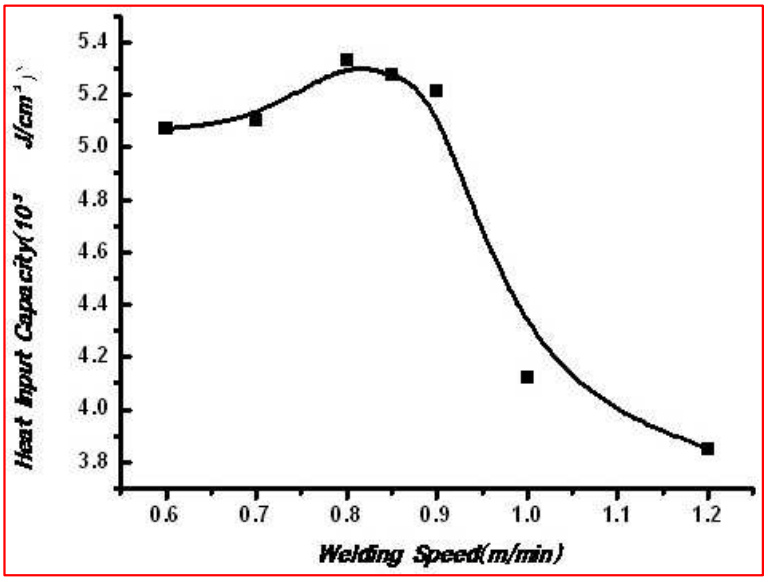


Fig. 3-12 Heat input of capacity to welding speed variation (SM45C)

를 2m/min이상으로 비교적 빠르게 하여 실험하였으나, Fig. 3-13에서는 레이저 빔의 이송속도를 1.5m/min 이하로 하여 실험하였다. 그 이유는 SM45C와 STS304를 이종 용접 했을 때 빔의 이송속도가 같을 경우 용접 비드면을 관찰하기 위해서이다. Fig. 3-13에서 빔의 이송속도를 0.6m/min 이하로 하지 않는 이유는 이종용접 하고자 하는 시편의 두께가 3mm인데 STS304와 SM45C 두 종류 전부 레이저 빔 이송 속도가 0.6m/min에서는 관통 용접이 돼 있기 때문이다. 특히 레이저빔의 이송속도를 0.6m/min로 했을때 시편표면의 용접폭이 다른 용접 속도에 비해 매우 크고 SM45C의 경우 열영향부가 상대적으로 크게 증가하였기 때문이다.

전체적으로 SM45C의 경우 레이저빔을 시편표면에 조사 하였을 때 STS304보다 표면에 흡수하여 전달되는 열량이 많아 용접폭이 열영향부를 고려했을 때 상대적으로 크다. 그러나 STS304는 레이저빔이 표면에 조사 되었을 때 주위로 열을 빠르게 전달하기 때문에 용접폭은 레이저빔의 이송 속도가 작을 때를 제외하고는 작고 용입 깊이가 큰 용접 결과를 나타내고 있다. 그래서 레이저 용접할 때 SM45C의 경우 내부 결함이 없고 입열량이 가장 크게 나타나는 용접 공정변수에

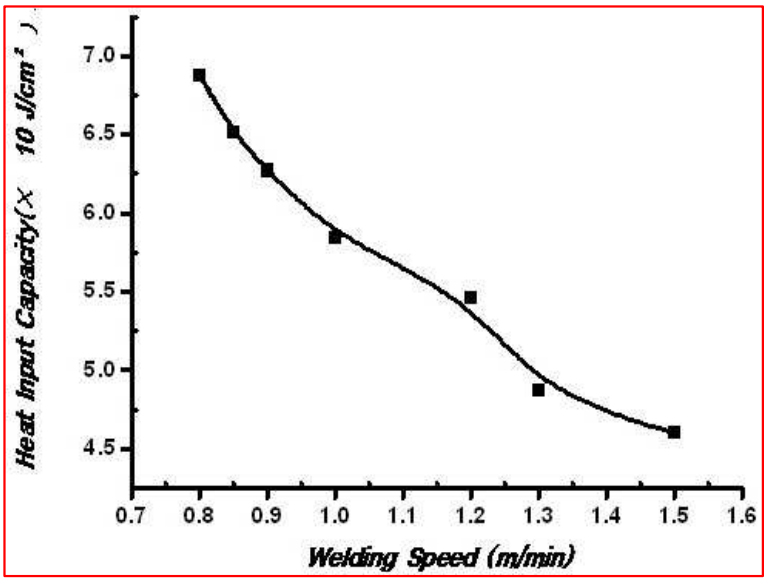


Fig. 3-13 Heat input of capacity to welding speed variation(STS304)

서 이종 용접하였다. 그리고 이종 용접이 가능한 용접 공정 조건은 레이저빔의 출력은 1600W, 초점거리는 시편표면(z=0)으로 하고, 보호가스인 Ar의 유량은 4 L/min로 하였다. 레이저빔 이송속도의 변화에 대한 입열량의 변화를 나타낸 Fig 3-12와 Fig. 3-13의 실험결과에 의하면 레이저빔의 이송속도가 0.8m/min 일 때 최대 입열량이 SM45C의 경우 5.275×10^3J/cm²이고 STS304는 6.5×10^3J/cm² 이였다. 레이저빔의 이송 속도가 0.9m/min 일 때는 SM45C의 입열량은 5.213×10^3J/cm²이고 STS304는 6.27×10^3J/cm²이였다.

입열량에 따른 용접의 특성을 실험하기 위해 STS304와 SM45C 동종의 재료를 맞대기용접하고 이종 재료를 맞대기 용접하였다. 용접 공정변수가 적절하지 않으면 열변형과 용접 결함 등이 발생하므로 최적의 용접 공정 변수를 결정하여 용접해야 한다. 그래서 빔 이송속도에 따른 입열량을 식 (1)로 계산하여 그래프를 Fig. 3-14에 나타내었다.

Fig. 3-14에서 횡축은 레이저 빔의 이송 속도이고 종축은 입열량이다. DMW는 이종용접(Dissimilar Metal Welding)결과이고 STS304와 SM45C는 동종 재료를 맞대기 용접 했을 때 결과이다. STS304와 SM45C의 맞대기 용접

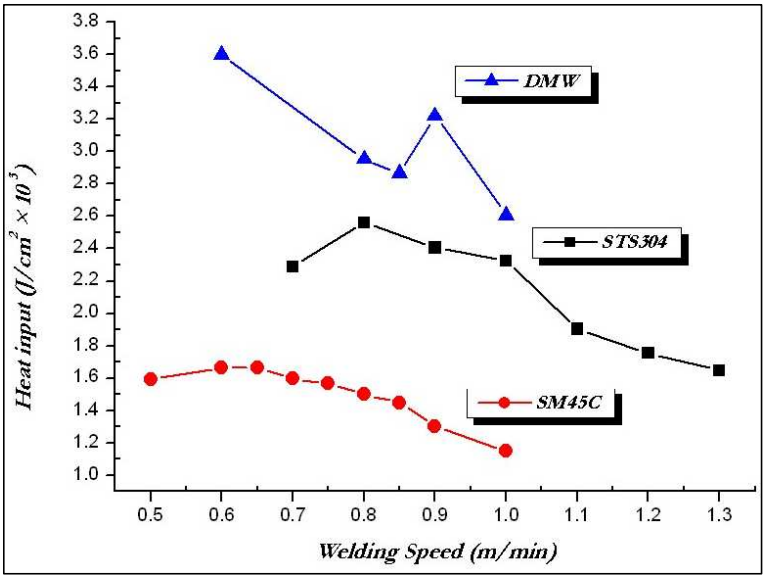


Fig. 3-14 Influence of Welding speed on the Heat input

시작 속도가 다른 이유는 STS304의 경우 레이저 빔의 이송 속도는 0.7m/min 이하로 했을 경우 관통 용접되어 용접시편 뒷면의 용융부가 지나치게 크기 때문이다. 그러나 SM45C는 STS304와는 다르게 레이저 빔의 이송 속도가 0.5m/min로 입열량이 커도 시편 뒷부분의 용접 단면이 과 용융 후 재 응고가 심하지 않았다. 이것은 STS304는 융점이 1400℃이고 열팽창 계수가 18.8인데 비하여 SM45C는 융점 온도가 1420~1450℃로 온도는 높고 열팽창 계수는 10.73~10.92로 STS304보다 낮기 때문이다. 그래서 같은 공정 변수일 때 STS304가 SM45C보다 용융되는 양이 많다. 레이저 빔의 이송 속도가 증가 하면서 용접 단면의 용융폭이 감소하고 시편의 깊이 방향으로 열이 전달되면서 STS304는 레이저 빔의 이송 속도가 0.8m/min일때, SM45C는 0.6m/min일때 용융폭이 가장 작아 입열량이 크게 나타났다. 그러나 속도를 더욱 증가시키면 시편 표면에 조사되는 레이저 빔이 시편 표면에서 열전달 때문에 용융폭이 증가하여 입열량은 감소하였다. 이와 같은 특성을 지닌 SM45C와 STS304를 이종 용접한 결과를 DMW로 표시하였다. 실험 결과에 의하면 이종 용접했을 때 입열량이 STS304와 SM45C의 중간 값을 나타내는 것이 아니라 크게 상승하였다. 이것은 SM45C와 STS304를 같이 용접 했을 때, SM45C의 주성분인 C와 SM45C의 주성분인 Ni과 Cr이 서로 용융되면서 열전도량이 증가되는 것으로 판단한다.

레이저빔의 속도 변화에 따른 용입 깊이와 용융 폭을 측정하여 식 (2)로 계산하여 종횡비를 구한 결과를 Fig. 3-15에 나타내었다.

STS304와 SM45C의 종횡비 특성을 관찰하면 STS304는 열팽창 계수가 크기 때문에 시편 내부로 열 침투깊이가 커서 SM45C보다 종횡비가 크게 나타났다. SM45C와 STS304를 용접할 때 용접 속도를 증가 시켜 입열량을 감소시키면 용접 폭이 줄어들어 종횡비가 크게 나타난다. STS304의 경우 종횡비가 가장 큰 레이저빔 이송 속도는 1.0m/min일때 가장 크고 SM45C는 0.85m/min일때 종횡비가 가장 컸다. 그러나 이 속도 범위를 지나면 종횡비는 오히려 감소하였다. 이것은 재료별 레이저 빔에 의한 열침투 깊이에 대한 레이저 용접폭에 관련된 최적의 조건이 존재함을 의미한다. 종횡비가 STS304가 SM45C에 비해

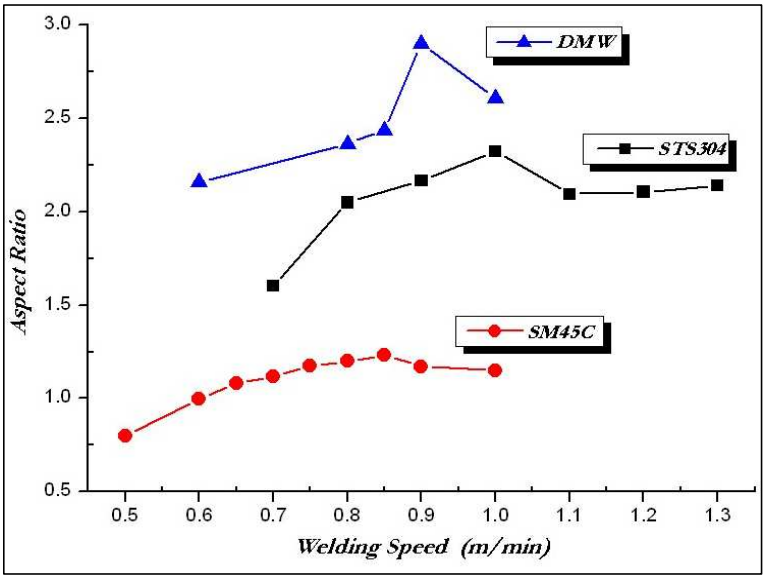


Fig. 3-15 Influence of Welding speed on the Aspect Ratio

서 큰 이유는 STS304의 주성분인 Ni과 Cr성분 때문이고 Fig. 3-14에서 설명한 내용과 같다.

STS304와 SM45C를 이종 용접했을 때 동종 재료를 용접 했을 때보다 용융폭이 작아 종횡비가 컸다. 종횡비가 가장 큰 레이저빔 이송 속도는 동종 재료 용접 시 종횡비가 가장 큰 SM45C는 0.85m/min, STS304는 1.0m/min 중간 값인 0.9m/min에서 가장 컸다. 이것은 Fig. 3-14의 결과에서 언급한 것처럼 Ni, Cr, C가 서로 혼합 용융되면서 시편 표면에서의 열전달 보다 깊이 방향의 열 침투깊이가 크기 때문이다.

3. 이종용접부의 용접단면, 인장강도 및 경도

STS304와 SM45C를 이종 용접한 같은 조건의 공정 변수로 용접하여 인장시편을 만들었다. 우선 100m×200m×3m(두께)의 시편을 맞대기 해서 출력 P=1600W, 초점거리 z=0, 보호가스 Ar의 압력은 4 L/min으로 하고 빔 이송속도는 0.8m/min, 0.85m/min, 0.9m/min으로 변화를 주어서 세 번을 용접하였다. 이

렇게 맞대기 용접한 시편을 최소한의 열 영향과 정확한 절단을 위해서 와이어 컷팅을 하였다. 또한 모재와 이종용접한 부분의 인장력을 비교하기 위해 STS304와 SM45C 모재를 각각 인장시편 규격으로 와이어 컷팅 했다. 이렇게 와이어 컷팅한 인장시편 5개를 인장테스트 하였다.

STS304와 SM45C의 레이저 빔의 이송 속도에 따른 입열량을 확인하고 용접 단면의 조직을 촬영하여 레이저 이종 용접의 최적의 공정 변수를 찾았다. 이를 다시 인장 강도와 경도를 확인해서 이종 용접 시 용접 금속의 정확한 물리적 값을 확인했다. Fig. 3-16을 보면 레이저 빔의 출력 P=1.6kW, 초점 z=0으로 고정하고 빔 이송 속도 V=0.8m/min, 0.85m/min, 0.9m/min으로 변화하면서 용접한 시편을 인장시편의 규격으로 와이어 컷팅하여 인장테스트를 하여 결과 값을 나타내었다. 이때 이종 용접한 금속과 모재를 비교하여 용접 후 금속의 물리적인 성질변화를 알아보기 위해 모재 즉, STS304와 SM45C를 같은 조건으로 컷팅하여 인장 실험하여 그 결과를 비교하였다.

각각 모재의 인장강도와 이종 용접했을 때의 인장강도의 크기를 비교하여 Fig. 3-16에 나타냈다. 인장강도는 STS304의 모재가 가장 크고 레이저 빔의 이송

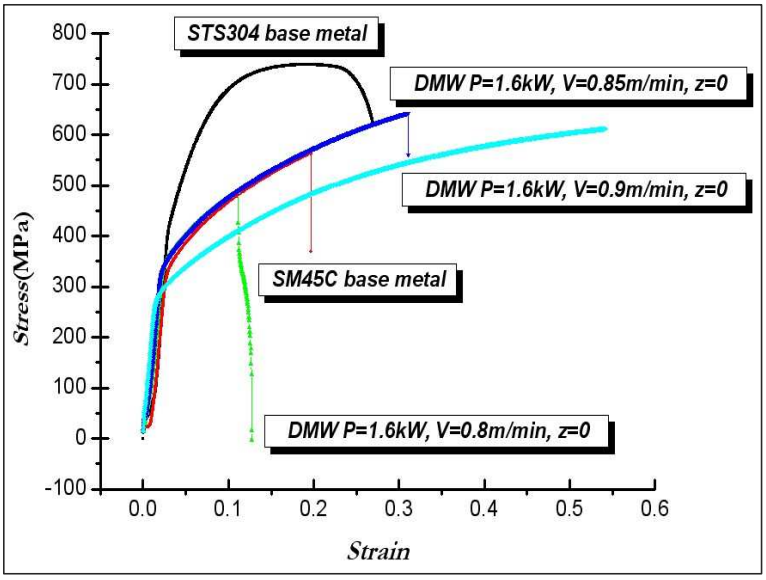


Fig. 3-16 Strain-Stress relationship for various dissimilar welding condition

속도가 0.9m/min 로 이종 용접 했을 때의 인장 강도와 변형률이 가장 작았다. 변형률은 이종 용접 했을 때 내부의 결함이 없는 부분을 인장 시편으로 제작하여 인장 시험했을 때 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min일 때 가장 적다. 변형률과 인장 강도는 SM45C에 레이저빔이 전달되는 열영향부의 크기에 따라 영향을 받고 있다. 레이저 빔의 이송 속도를 0.85m/min 로 하여 이종 용접했을 경우 SM45C의 모재보다 변형률과 인장강도가 증가하였고 STS304의 모재 보다는 인장강도는 감소하였으나 변형률은 약간 증가 하였다. 이것은 STS304에 포함되어 있는 Ni과 Cr 및 SM45C의 주성분인 C성분이 혼합되어 나타난 현상으로 판단된다.

STS304와 SM45C를 이종 용접했을 때 STS304의 주성분인 Ni은 용융온도가 1455℃이고 Cr은 1905℃이다. 반면에 SM45C의 주성분인 C는 융점이 3350℃이기 때문에 레이저 빔의 이송 속도가 느린 0.8m/min에서는 탄소의 융점보다 낮은 Ni과 Cr의 기화되는 양이 상대적으로 많아 모재에 비하여 변형율과 인장강도가 하락하였다. 레이저빔의 이송 속도를 0.9m/min로 했을 경우에는 Ni과 Cr 성분이 이종 용접이 용융 풀에 상대적으로 많이 용융되어 혼합되기 때문에 변형률이 증

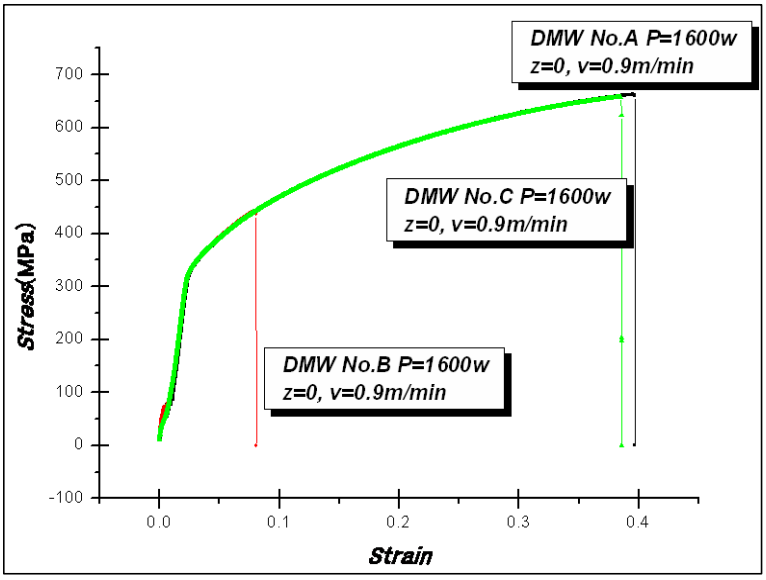


Fig. 3-17 Strain-Stress relationship according to the quality of the welded parts.

가 하였다고 판단된다.

Fig. 3-16에 나타난 결과를 보면 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min에서 가장 작은 변형률 값을 얻었다. 이는 내부에 결함이 없는 부분을 컷팅하여 인장 테스트한 결과이다. 레이저빔의 이송속도가 0.85m/min 일 때 조직사진 결과가 최상의 용접결과를 보여준 것과는 다른 내용이었다. 따라서 레이저 빔의 이송속도가 0.9m/min에서 추가적으로 실험을 하였다. 결과의 객관성을 유지하기 위해서 기존의 실험조건과 같은 조건으로 용접하여 컷팅, 인장테스트까지 같은 조건으로 실험을 하였다. Fig. 3-17에서 보듯이 레이저빔 이송속도가 0.9m/min에서 3번의 실험을 하였다. 3번의 실험에서 A번과 C번은 Fig 3-16과 같은 결과가 얻어졌다. 하지만 0.9m/min에서는 급격한 강도의 저하를 보여준다. 이는 용접 시편 내부에 결함이 있음을 의미하고 0.9m/min의 용접 조건에서는 항상 좋은 용접의 결과를 얻을 수 없음을 의미한다. 이 두 실험을 통하여 최상의 용접조건을 얻을 수 있고, 항상 믿을 수 있는 결과를 얻기 위해서는 레이저 빔의 이송속도를 0.85m/min으로 하여 용접해야 함을 알 수 있다.

Fig. 3-18에서 횡축은 레이저빔 이송 속도이고 종축은 인장응력이다. 그림

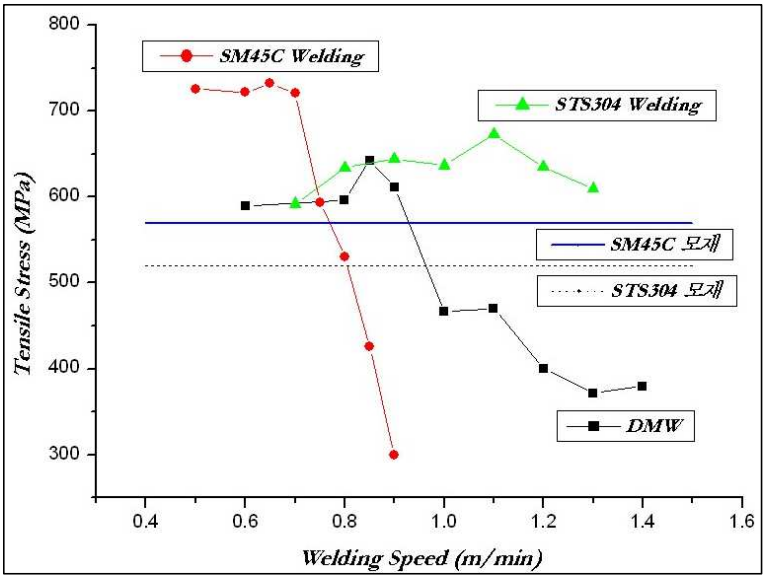


Fig. 3-18 Strain-Stress relationship for various dissimilar welding condition

에서 점선은 STS304모재의 인장응력이고 실선은 SM45C 모재의 인장응력이다.

SM45C를 동종 용접하였을 경우 레이저빔의 이송 속도가 0.7m/min 이하에서는 모재의 인장 강도보다 크지만 레이저빔 이송 속도가 더 증가하면 입열량의 부족으로 모재보다 인장응력이 작았다. 그러나 STS304의 경우에는 본 실험 범위 내에서는 전부 인장강도가 모재보다 크게 나타나 레이저 용접의 강점을 나타내고 있다. STS304와 SM45C를 이종 용접했을 경우에는 레이저빔 이송 속도가 0.6m/min에서 0.9m/min이하에서는 SM45C와 STS304모재의 인장강도보다 컸다. Fig. 3-18를 기준으로 할 때 레이저빔의 이송 속도가 0.6m/min, 0.7m/min, 0.8m/min, 0.9m/min에서는 두 모재의 인장 강도보다 크지만 Fig. 3-15에서 나타낸 바와 같이 종횡비도 크고 인장강도도 큰 레이저빔의 입열량 값은 레이저빔 이송 속도가 0.9m/min일 때이다. 오스테나이트 안정화 원소인 C는 고온균열을 촉진하여 용융풀의 급속한 냉각 때문에 마르텐 사이트를 형성시킨다. 또한 내마모성을 증가 시키는 성질이 있다. Ni은 인성과 저온 충격 저항을 증가시키고 Cr은 내식성과 내마모성을 증가시키는 성분으로 강력한 탄화

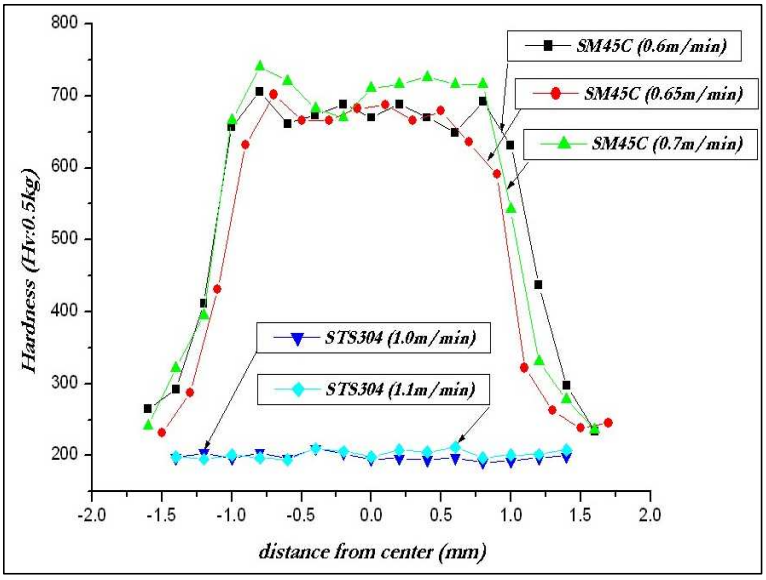


Fig. 3-19 Hardness distribution of cross section area of SM45C and STS304 welding bead

물 생성원소로 마르텐사이트 조직을 안정화시킨다. C는 급가열한 후 급냉각시키면 경도가 큰 마르텐사이트 조직으로 되지만 취성이 발생한다. 이 때문에 SM45C를 맞대기 용접하였을 경우 레이저빔의 이송 속도가 0.4m/min에서 0.7m/min까지는 인장강도가 모재보다 크지만 이 조건을 벗어나면 인장강도가 급격히 떨어진다. 그러나 SM45C와 STS304를 같이 용접했을 경우에는 인성이 큰 Ni성분과 혼합되어 0.9m/min까지 레이저빔 이송 속도를 증가 시켜도 모재의 인장강도보다 큰 값을 나타내고 있다.

SM45C와 STS304를 맞대기 용접한 용접단면의 경도분포를 Fig. 3-19에 나타냈다. Fig. 3-19에서 SM45C와 STS304 동종재질을 맞대기 용접한 레이저빔의 이송 속도는 Fig. 3-18에 나타낸 인장강도가 모재보다 큰 범위에서 실험한 결과를 측정한 값이다. SM45C의 경우 레이저빔의 이송 속도가 실험 범위 내에서 가장 빠른 0.7m/min일 때 표면경도 값이 모재의 약 3배정도 컸다. 특히 레이저빔의 이송 속도가 빠른 경우에는 급가열하여 오스테나이트화 되었던 재질이 급 냉각되면서 조밀한 마르텐사이트가 되었기 때문이다. 이 조밀한 마르텐사이트는 인성은 작지만 경도는 크게 나타난다. 그러나 Fig. 3-18에서

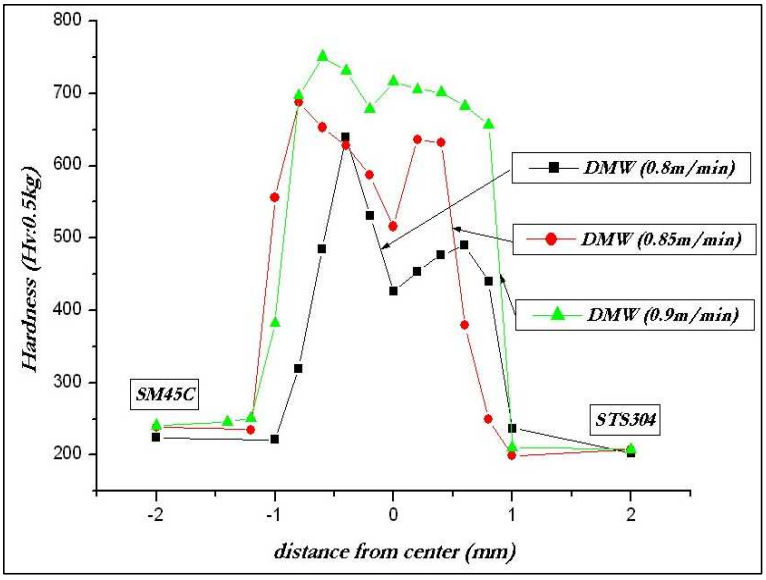


Fig. 3-20 Hardness distribution of DMW, SM45C and STS304 welding bead

STS304의 맞대기 용접 인장강도가 가장 큰 레이저 빔 이송속인 1.0m/min와 1.1m/min로 용접한 용접단면의 경도를 측정한 결과 용접부의 경도는 모재의 경도와 변화가 없다.

STS304와 SM45C를 DMW용접 했을 때 용접면의 경도값을 측정하여 Fig. 3-20에 나타냈다. Fig. 3-20에서 횡축은 용접단면 중앙부를 0으로 하여 왼쪽은 SM45C, 오른쪽은 STS304의 경도값이다. Fig. 3-19와 비교하여 큰 차이점은 동종 용접할때에는 용융단면이 3mm이지만 DMW용접에서는 2mm정도로 용접단면이 줄어들었다. 이것은 Cr과 Ni이 C성분과 혼합되면서 횡방향의 열전도보다는 열이 깊이 방향으로 침투가 더 크다는 의미이다. 횡방향의 열 침투보다 종 방향의 열 침투가 더 큰 것은 비중이 큰 Ni(비중 8.845)과 Cr(비중 7.188), 비중이 가벼운 탄소(비중 1.5~2.1)가 용융풀에서 부력과 중력의 교반작용이 효과적으로 발생하기 때문이다. Fig. 3-20의 실험 결과를 관찰하면 STS304와 SM45C가 용융풀에서 혼합되었지만 경도 크기는 SM45C쪽이 STS304보다는 약간 크게 나타났다. 동종 재료를 용접한 실험결과인 Fig. 3-19의 경도 분포값은 대칭적이지만 DMW용접은 비대칭적으로 나타났다. DMW용접에서 레이저빔 이송 속도가 빠를수록 경도 분포의 비대칭성이 커진다. 레이저빔 이송속도가 늦어지면 STS304 모재쪽의 경도가 작아졌다. 용융온도가 Ni은 1455℃, Cr은 1890℃이기 때문에 레이저빔의 이송 속도가 증가하면 용융온도가 3550℃인 C성분이 용융되면서 Cr성분이 경화를 촉진하기 때문이다. 그러나 레이저빔의 이송 속도가 느려지면 Cr성분이 기화하여 경화를 촉진하는 Cr성분이 부족하기 때문이다.

Fig. 3-21은 DMW용접한 용융단면을 표면으로부터 깊이 방향으로 용접 중앙부에서 경도 값을 측정한 결과이다. 용접 용융단면 표면보다는 용융풀 표면에서 약 0.5~0.6mm 아래 부분의 경도가 약간 컸다. 그 이유는 레이저빔이 시편 표면에 조사될 때 용융풀 표면에는 재 용융되는 양이 많아 냉각 속도가 모재 양쪽으로 냉각되는 속도보다 작아 마르텐사이트 조직이 조밀하지 않기 때문이다.

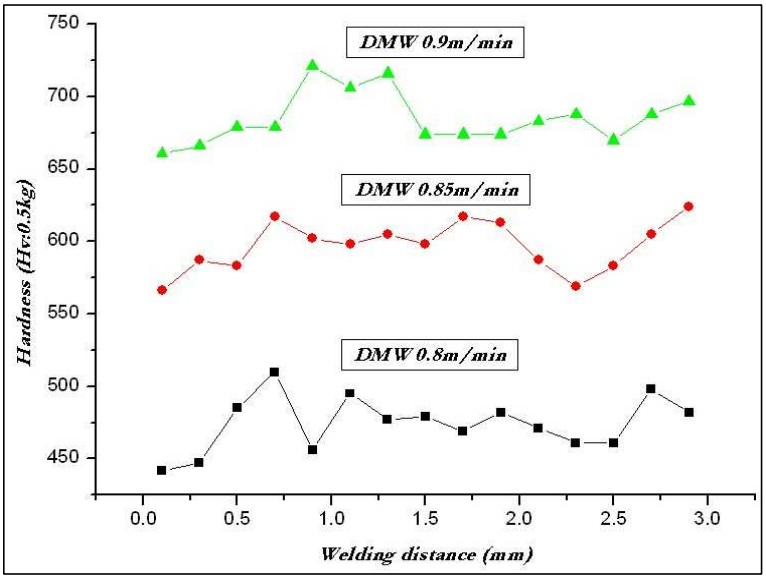
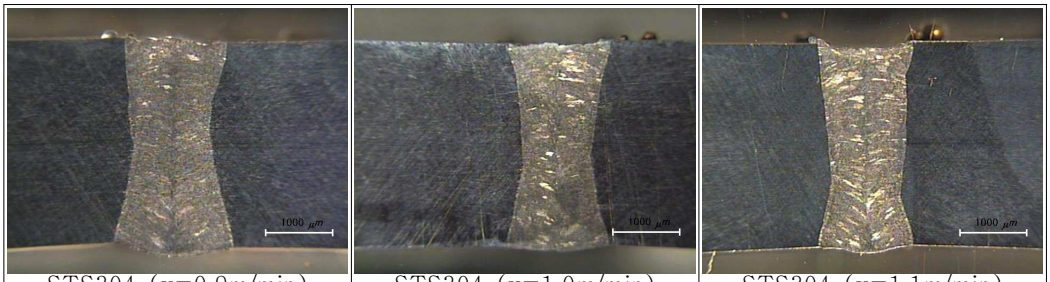


Fig. 3-21 Hardness comparison according to welding speed

인장강도 실험결과를 나타낸 Fig. 3-18에서 모재의 인장강도보다 큰 DMW 용접 이송 속도를 중심으로 Fig. 3-22에 나타냈다. (a)는 STS304의 용접단면이고 (b)는 DMW용접 단면 (c)는 SM45C의 용접단면이다. STS304는 용접단면 내부에 결함이 없지만 SM45C는 용접단면 내부에 기공 등 내부결함이 발생하였다.

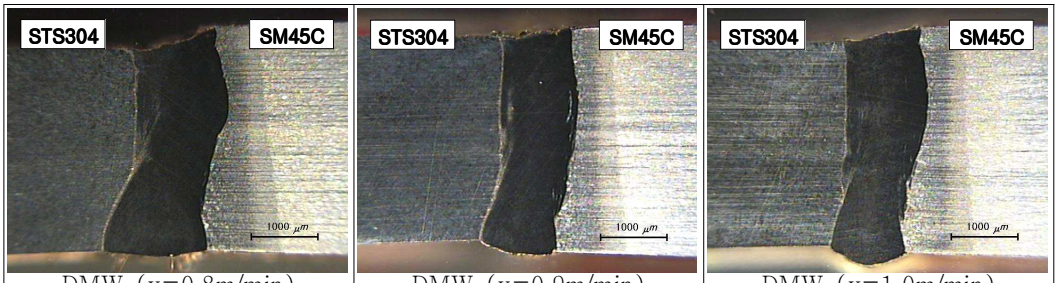
SM45C의 경우 용접 공정값이 적절하지 않을 경우 용접부분의 고 액계면에서 응집력이 용접부와 수직 방향으로 가해진 응력보다 낮기 때문에 용접부 중심에 따라 고온 균열이 발생할 수 있다. 키 홀(Key hole) 용접을 하는 레이저 용접은 용융온도가 낮은 성분이 기화된 성분의 부력에 의해 용접부 표면에서 탈출하지 못하여 기포로 포획된 형태도 SM45C 용접시 나타난다. 이처럼 내부결함이 발생하면 용접부의 유효 접촉 면적이 작아 인장응력이 급격하게 떨어진다. SM45C와 STS304 용접단면 모두 용접부 중심에서 모재 경계부로 급속한 냉각 때문에 수지상 조직을 나타내고 있다. STS304의 경우는 Ni과 Cr성분 때문에 열확산이 잘되어 용접단면의 결함 없이 양호한 용접단면을 형성하고 있지만 SM45C는 C의 탄화작용으로 미소하게 내부균열이 발생하였다. 그러나

STS304와 SM45C를 DMW용접한 (b) 그림을 보면 STS304의 모재가 SM45C으로 용융되어 혼합된 모습을 하고 있다. 이로 인하여 STS304성분 중 인성을 보강해주는 Ni성분과 혼합하여 DMW용접의 경우 레이저빔 이송 속도가 0.6m/min, 0.7m/min, 0.8m/min, 0.9m/min까지 증가하여도 모재의 인장강도보다 크게 나타나고 있음을 Fig. 3-22에 나타냈다. 그리고 STS304성분 중 오스테나이트안정화 원소인 Mn이 S와 반응하여 FeS보다 먼저 MnS를 형성하기 때



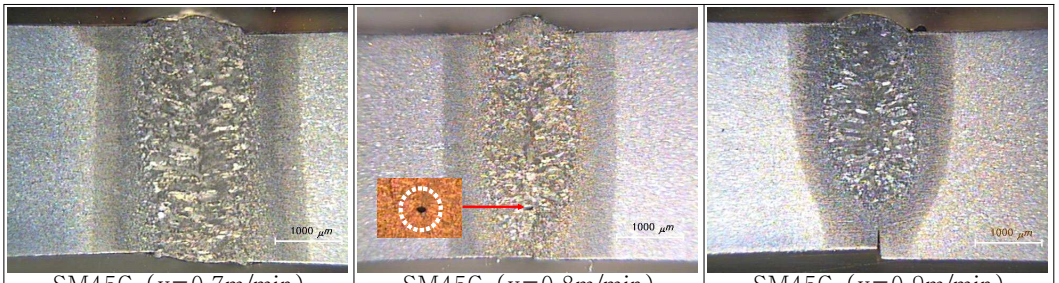
STS304 (v=0.9m/min)	STS304 (v=1.0m/min)	STS304 (v=1.1m/min)

Fig. 3-22 (a) Welding cross section area (STS304)



DMW (v=0.8m/min)	DMW (v=0.9m/min)	DMW (v=1.0m/min)

Fig. 3-22 (b) Welding cross section area (DMW)



SM45C (v=0.7m/min)	SM45C (v=0.8m/min)	SM45C (v=0.9m/min)

Fig. 3-22 (c) Welding cross section area (SM45C)

문에 S편석에 의한 저 융점 화합물 형성을 방지할 수 있기 때문이다. 형성된 MnS는 용융온도가 1620℃로 높아 강중에 Mn양이 증가하면 입계의 액상 필름 형상이 어려워지기 때문에 고온 균열을 피할 수 있다.

제 3 절 Nd:YAG 레이저를 이용한 레이저 파형변화에 따른 Inconel의 상호작용

1. 레이저 빔 출력과 조사시간의 조절

레이저빔으로 금속용접할 때 영향을 미치는 가장 중요한 공정변수는 초점거리, 레이저빔의 파장, 레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도이다. 레이저빔의 출력과 이송속도를 조절하면 금속표면에 전해지는 에너지의 양을 조절할 수 있기 때문이다. 금속표면에 전해지는 입열량의 값이 같더라도 레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도에 따라 용융특성이 달라진다.

1절과 2절에서 연구한 내용은 동종재질과 이종재질에서 두 개의 금속시편에 연속파(CW)의 레이저빔을 조사하여 그때의 레이저빔과 시편과의 상호작용을 분석하였다. 용접부위가 작고 열영향에 민감한 시편을 연속파 파형으로 용접하면 용접변형이 발생하기 때문에 양질의 용접품질을 얻을 수 없다. 용접하고자 하는 금속이 열영향에 민감할 때는 점용접(Spot welding)형태의 용접하거나 매우 빠른 속도로 용접해야한다. 레이저빔을 펄스파형으로 하여 금속용접할 때 영향을 미치는 공정변수로는 레이저빔의 출력과 레이저빔의 조사시간(Duration time)이다.

연속파와 달리 펄스형태의 레이저빔을 조사할 때 동일한 출력에서 입열량의 강도분포를 조절하기 위해서 레이저빔의 이송속도가 아닌 레이저빔의 조사시간을 이용하여 레이저파형을 제어하여 금속표면에 조사하는 에너지 값을 조절 할 수 있다. 제 3 절에서는 미소범위의 용접부위를 가진 금속시편에 펄스파형의 레이저빔을 조사하여 레이저 빔의 출력과 레이저빔의 조사시간에 따른 상호작용을 분석하였다.

인코넬 600표면에 레이저빔의 출력을 300W로 고정하고 레이저빔의 조사시

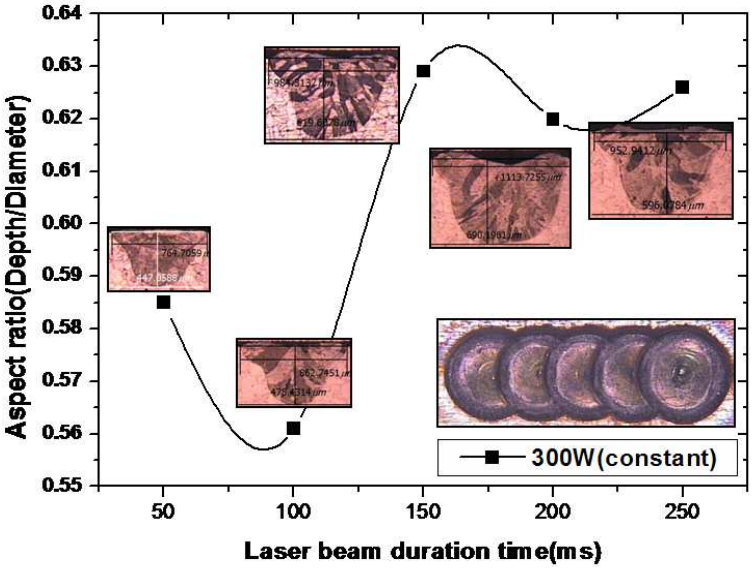


Fig. 3-23 Aspect ratio at overlap 50% (300W)

간을 50ms에서 250ms까지 50ms 간격으로 늘리면서 레이저빔을 5회 조사하여 표면에서 흡수되는 결과를 Fig. 3-23에 나타내었다. 레이저 빔을 시편표면에 5회 조사 시 레이저빔의 중첩율은 50%로 하여 조사하였다. 중첩율을 50%로 하여 5회 조사한 시편을 레이저빔 조사방향과 같은 방향으로 용융부 지름과 용입깊이를 각각 5번씩 측정하여 평균값을 취하여 종횡비를 나타내었다.

레이저빔의 출력을 300W로 고정하고 조사시간을 증가시켜 레이저빔을 조사한 결과 150ms에서 종횡비가 0.63으로 가장 컸으며 200ms, 250ms에서는 대략 0.62의 종횡비가 나타났으며 150ms이하에서는 종횡비가 현저히 떨어졌다. 레이저빔의 조사시간이 150ms보다 짧으면 시편주변으로 열이 전도되어 깊이방향으로 에너지가 전달되지 못하기 때문이다. 이와 반대로 레이저빔의 조사시간이 250ms로 증가하면 시편표면적의 용융부분이 깊이방향으로 열이 전도되는 것 보다 커서 상대적으로 200ms보다 종횡비가 오히려 작아진다.

Fig. 3-23에서 종횡비가 가장 크게 나타난 150ms의 레이저빔 조사시간으로

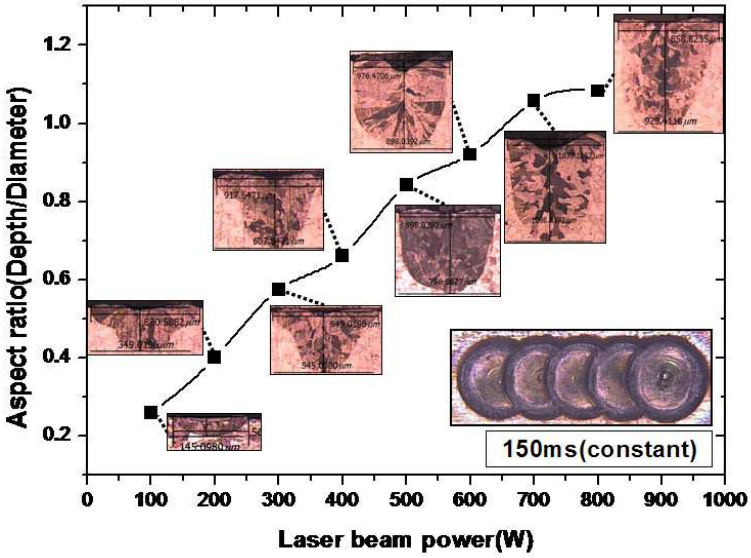


Fig. 3-24 Aspect ratio at overlap 50% (150ms)

출력을 100W단위로 증가시키며 용융지름과 용입깊이를 측정하여 Fig. 3-24에 나타냈다. 측정범위구간의 100W에서 900W내에서 출력이 증가하면 종횡비는 거의 선형적인 증가를 보였으며 700W이상에서는 종횡비가 1보다 컸다. 출력 500W이상부터는 시편표면에 움푹패인 현상인 험핑(Humping)이 나타났으며 출력이 증가할수록 험핑의 깊이도 커짐을 알 수 있다. 험핑이 발생하는 이유는 레이저빔의 중심부의 에너지강도가 가우시안 레이저빔의 형태로 1/e영역내에 에너지가 86%를 차지하고 있기 때문에 중심부에서 과입열량 때문에 용융온도가 낮은 시편의 조성분의 일부가 증발되기 때문이다.

2. 레이저빔의 파형변화 특성

가우시안 레이저빔을 가진 펄스 레이저빔을 시편에 조사하면 시편표면의 용융부 중심에서 과 입열양으로 인해 험핑이 발생했다. 레이저빔의 특성상 레이저빔의 중심부가 주변부보다 에너지밀도가 높아 용융부 중심에서 험핑이 발생

하는 원인이 되었다. 용접 시 발생하는 험핑을 줄여주기 위해서는 레이저빔의 중심부와 주변부의 에너지밀도의 차이를 줄여야 한다. 레이저빔의 에너지밀도 차이를 줄이기 위해 사각형태의 레이저빔의 파형을 변형시켜 실험하였다.

파형변조는 사각파형을 기준으로 레이저빔 지속시간(duration time)과 레이저빔의 출력을 변화시켰으며 Fig. 3-25는 사각형 형태의 기본파형이다. ①과 ③영역의 출력은 ⑤영역의 출력에 2배되도록 조절하였고 ④, ⑤, ⑥에서의 레이저빔의 지속시간(duration time)은 50ms, 100ms, 150ms를 기본파형으로 설정했다. Fig. 3-26은 레이저빔 파형의 전체지속시간은 총 150ms이고 ①, ②, ③영역의 출력은 100W에서부터 800W까지 100W씩 증가시켰다.

레이저빔의 형태는 사각형태이지만 레이저빔의 조사시간 중심부분에서 에너지가 가장 크고 주변부로 갈수록 급속히 에너지가 감소하는 가우시안빔의 형태를 갖는다. 레이저빔 조사시간을 150ms로 고정하고 출력을 조절하여 15J/cm^2, 30J/cm^2, 45J/cm^2, 60J/cm^2, 75J/cm^2, 90J/cm^2, 105J/cm^2, 120J/cm^{2}의 입열량으로 시편표면에 레이저빔을 조사하였다.

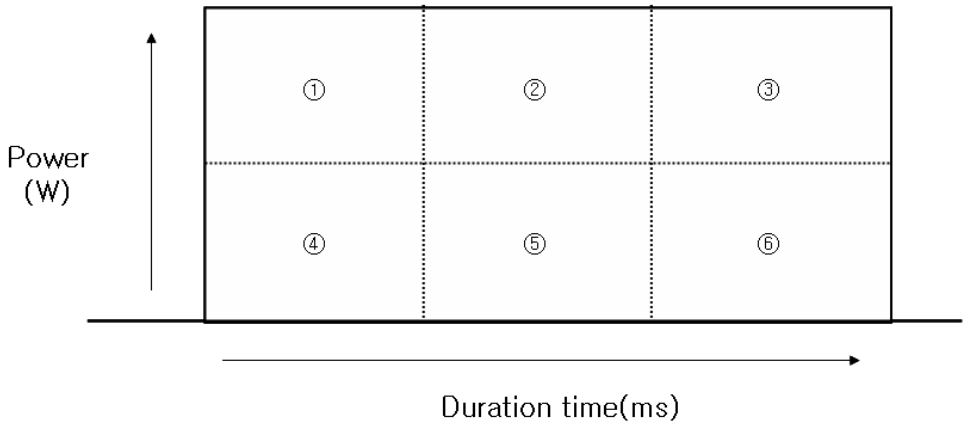


Fig. 3-25 Fundamental wave form

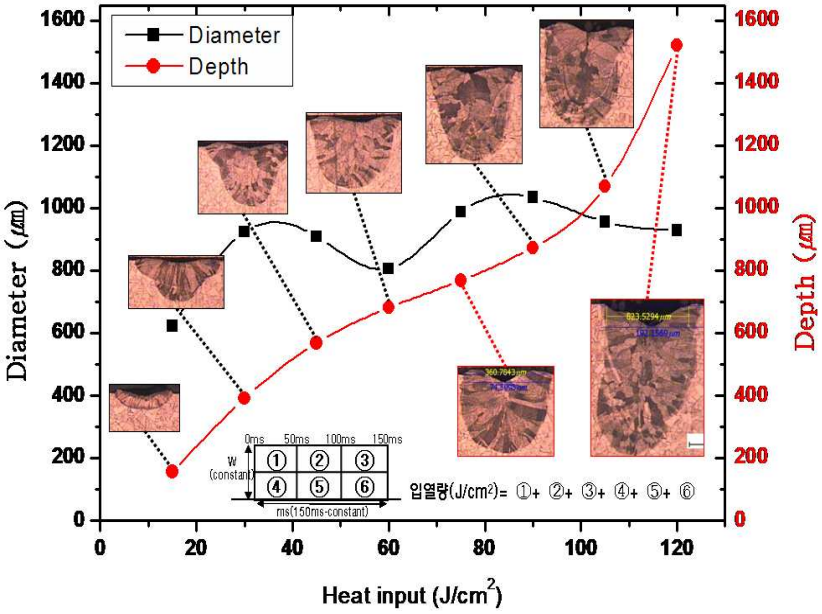


Fig. 3-26(a) Pulsed wave modulation (Diameter & Depth)

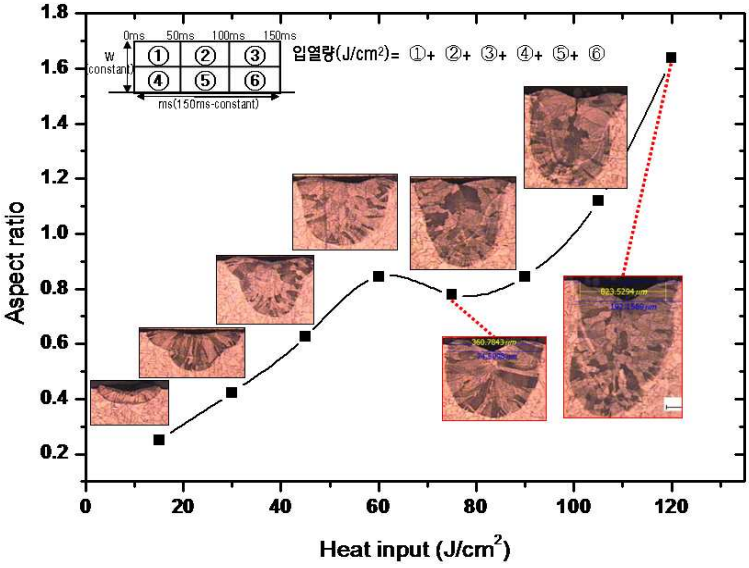


Fig. 3-26(b) Pulsed wave modulation (Aspect ratio)

레이저빔이 조사되는 150ms동안 레이저빔의 입열량은 Fig. 3-26과 같은 15J/cm^2, 30J/cm^2, 45J/cm^2, 60J/cm^2, 75J/cm^2, 90J/cm^2, 105J/cm^2, 120J/cm^{2}의 입열량을 가지고 있다. 그림 3-26(a)에 나타난 것처럼 입열량이 30J/cm^{2}에서 120J/cm^{2}까지 증가하는 동안 시편표면에 조사된 용융부의 직경의 증가는 크지 않았다. 표면 용융부 직경증가는 거의 없었지만 시편의 깊이방향증가는 입열량 증가에 따라 급격히 증가하였다. 험핑현상은 80J/cm^{2}에서 발생하여 120J/cm^{2}에는 크게 나타났다. 깊이방향(H)으로 증가에 대한 험핑(h)비율은 75J/cm^{2}에서는 10%, 120J/cm^{2}에서는 6%이었다.

입열량 증가에 따른 종횡비는 60J/cm^{2}까지 입열량의 증가에 따라 종횡비가 커진 후 90J/cm^{2}까지는 증가율이 줄어들면서 용융표면이 과열되며 약간의 험핑이 발생하는 용융풀의 잠열 영역에 이르게 된다. 105J/cm^{2}에서부터는 급격하게 깊이방향으로 에너지가 전달되면서 종횡비가 증가하게 된다.

사각형태의 가우시안 빔의 중심부의 에너지 값을 낮추기 위해 전체 입열량은 Fig.3-26과 동일하게 하고 출력을 증가시켜 실험한 것을 Fig. 3-27에 나타내었다. Fig. 3-27은 파형 Fig. 3-25에서 레이저빔의 지속시간은 Fig. 3-26과 동일하게 하였고, 중심의 출력을 낮추기 위해 파형 Fig. 3-25에서 ②영역부분의 지속시간 50ms에서 100ms기간의 출력을 ①과 ③영역 출력의 반(1/2)으로 감소시켜 파형을 조절하였다. ①과 ③영역의 출력은 120W에서 840W까지 120W씩 증가 시켰고 ②영역의 출력은 60W씩 420W까지 60W씩 증가시켰다.

Fig. 3-27에 의하면 30J/cm^{2}에서 105J/cm^{2}까지 레이저빔의 에너지를 증가시켜도 시편표면의 용융직경의 변화는 거의 없다. 용융표면의 직경변화는 거의 없지만 에너지가 깊이방향으로 진전되어가는 한편 용융표면에 75J/cm^{2}부터는 현저하게 험핑현상이 관찰되었다. 75J/cm^{2}에서는 h/H는 0.12, 90J/cm^{2}에서 h/H는 0.14, 105J/cm^{2}에서는 0.08이였다.

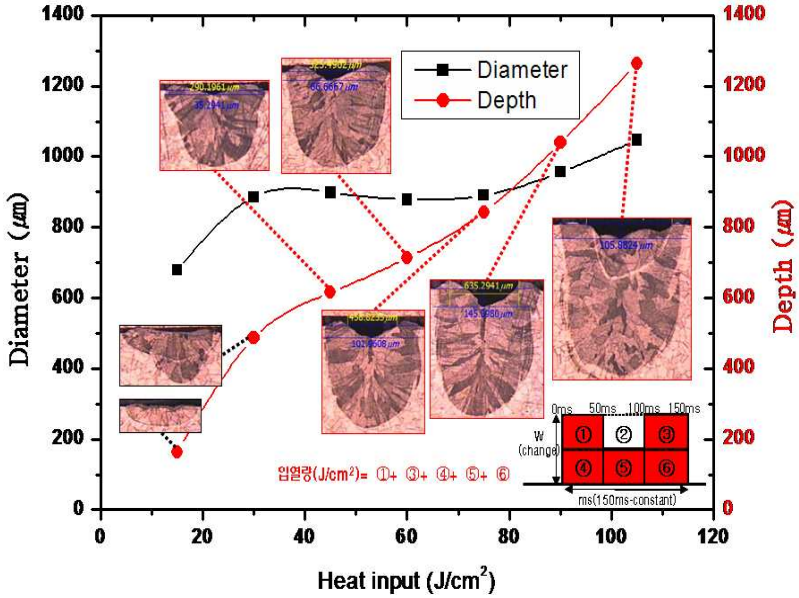


Fig. 3-27(a) Pulsed wave modulation -power compensation (Diameter & Depth)

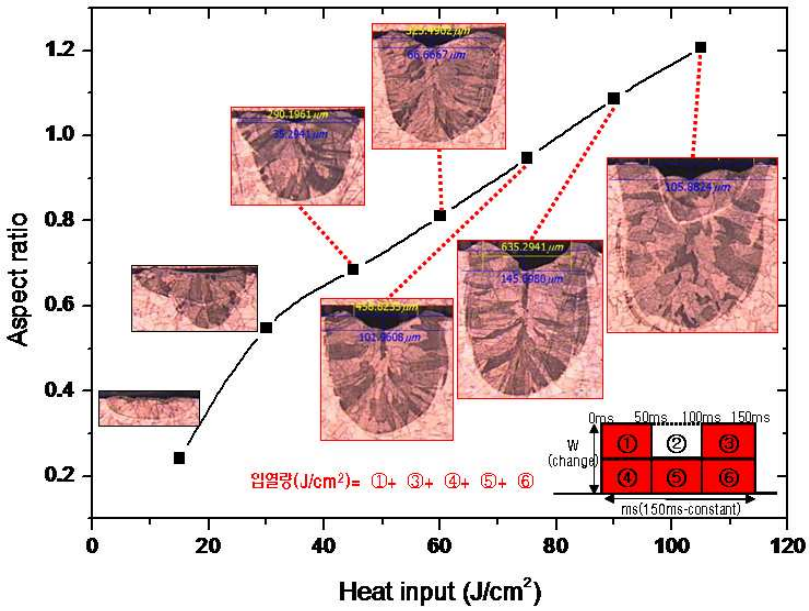


Fig. 3-27(b) Pulsed wave modulation -power compensation (Aspect ratio)

Fig. 3-28은 Fig. 3-25에서 ①과 ③영역의 출력은 100W에서 800W까지 100W씩 증가시켰고 50ms에서 100ms사이인 ②영역의 출력은 ①과 ③영역의 출력의 1/2인 50W에서 400W까지 100W씩 증가시켜 파형을 조절하였다.

최초의 험핑이 75J/cm^{2}부터 발생했는데 h/H는 0.11로 Fig. 3-25의 75J/cm^{2}일 때 h/H는 0.1로 차이가 거의 없다.

Fig. 3-28의 입열량은 12.5J/cm^2, 25J/cm^2, 37.5J/cm^2, 50J/cm^2, 62.5J/cm^2, 75J/cm^2, 87.5J/cm^2, 100J/cm^{2}로 레이저빔을 시편에 조사하였으며 Fig. 3-26, Fig. 3-27보다 2.5J/cm^2, 5J/cm^2, 7.5J/cm^2, 10J/cm^2, 12.5J/cm^2, 15J/cm^2, 17.5J/cm^2, 20J/cm^{2}의 입열량을 나타내고 있다. Fig. 3-28에서 시편표면의 용융된 직경은 25J/cm^2~75J/cm^{2}까지 큰 변화가 없지만 용융깊이의 변화는 점진적으로 증가하고 있다. 종횡비는 37.5J/cm^{2}에서 50J/cm^{2}사이에는 종횡비의 증가가 거의 없는 잠열영역이 존재한 후 종횡비가 증가하였다.

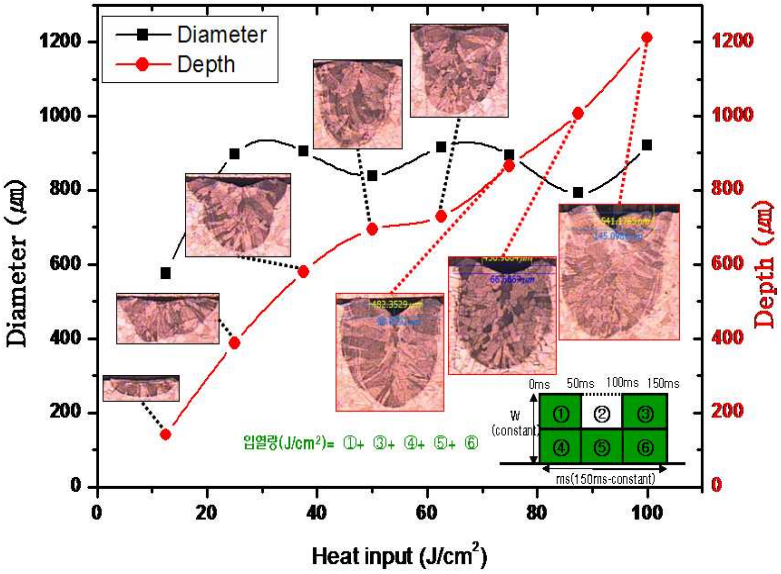


Fig. 3-28(a) Pulsed wave modulation -heat input loss (Diameter & Depth)

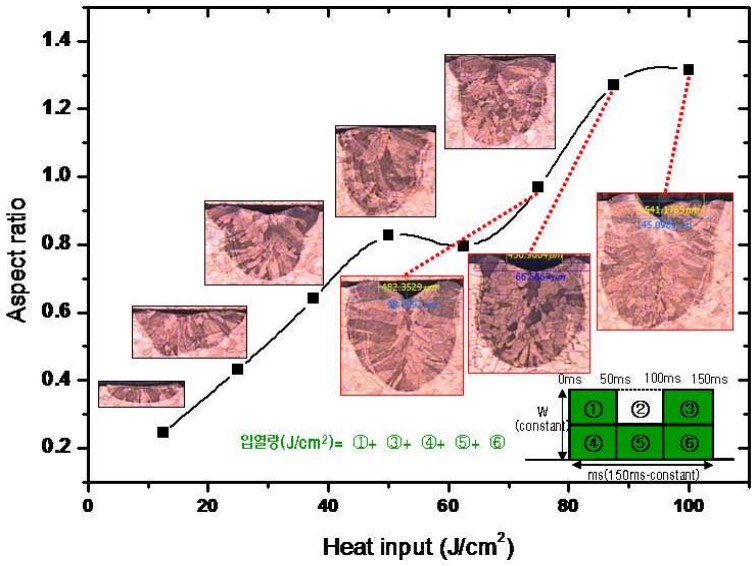


Fig. 3-28(b) Pulsed wave modulation -heat input loss (Diameter & Depth)

레이저빔 조사시간을 150ms에서 180ms로 늘려 입열량은 15J/cm^2, 30J/cm^2, 45J/cm^2, 60J/cm^2, 75J/cm^2, 90J/cm^2, 105J/cm^2, 120J/cm^{2}로 Fig. 3-25와 Fig. 3-26과 동일하다. 45J/cm^{2}에서 120J/cm^{2}까지 증가시키면서 레이저빔을 시편표면에 레이저빔을 조사했을 때 용융표면단면의 직경이 요동하면서 미세한 증가를 보이고 있다. 입열량이 증가하면서 용융깊이가 증가하고 있고 입열량이 75J/cm^{2}일 때 h/H는 0.15이고 120J/cm^{2}일 때 h/H는 0.07이었다.

Fig. 3-29의 출력은 Fig. 3-28과 같이하고 펄스지속시간을 60ms씩 전체 펄스지속시간을 180ms로 하여 레이저빔을 시편표면에 조사하였다. 입열량이 75J/cm^{2}에 비해 120J/cm^{2}일 때 h/H의 비가 작은 이유는 시편의 깊이방향으로 용융된 증가량과 험핑된 깊이를 비교하면 용융깊이 증가량에 비해 험핑깊이의 증가량이 작기 때문이다.

Fig. 3-28(b)는 Fig. 3-27에서처럼 입열량 75~90J/cm^{2}사이에는 종횡비의 변화가 없는 잠열로(latent heat) 작용하는 부분이 있다.

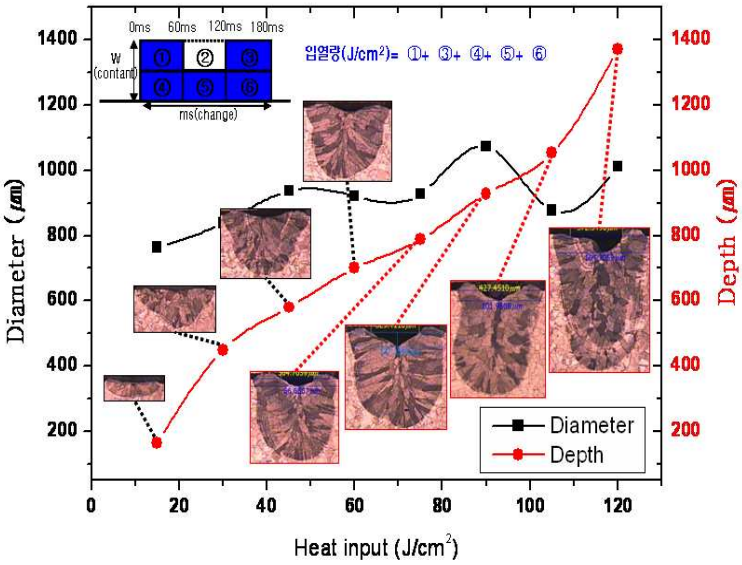


Fig. 3-29(a) Pulsed wave modulation -duration time compensation (Diameter & Depth)

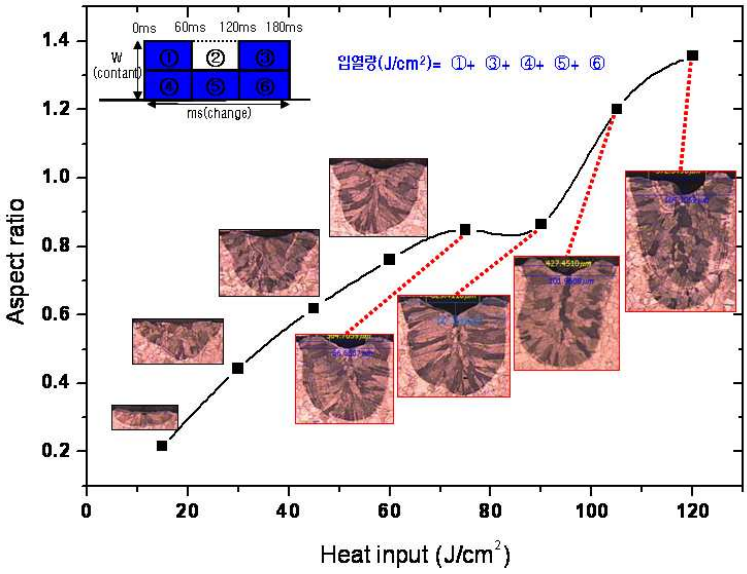


Fig. 3-29(b) Pulsed wave modulation -duration time compensation (Aspect ratio)

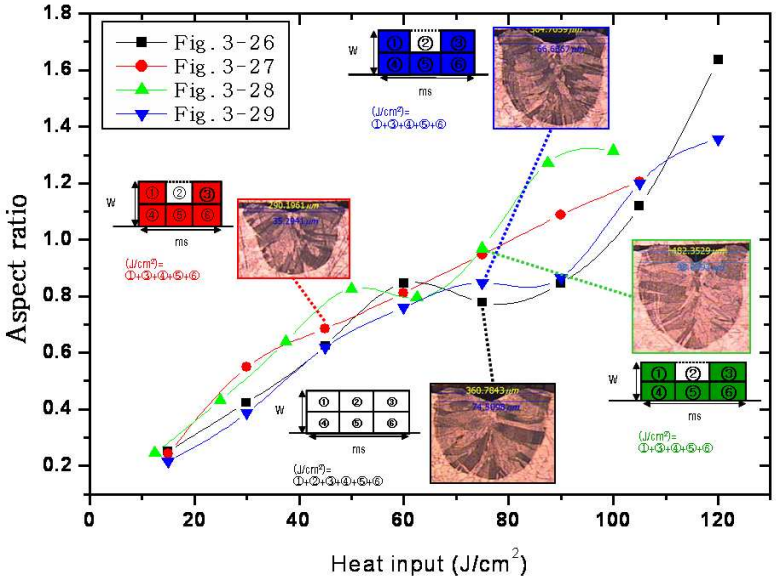
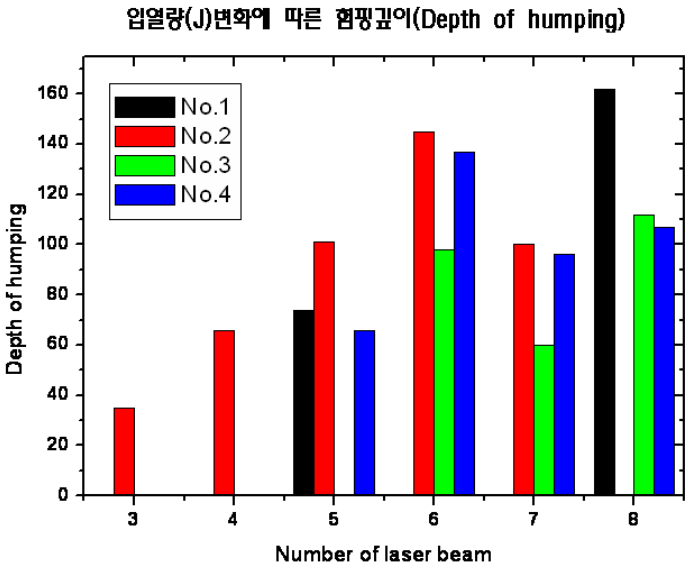


Fig. 3-30 Pulsed wave modulation -Total(Aspect ratio)

Fig. 3-26, Fig. 3-27, Fig. 3-28, Fig. 3-29의 실험에서 나타난 종횡비를 하나의 그래프로 묶어서 Fig. 3-30에 나타냈다. Fig. 3-26, Fig. 3-28, Fig. 3-29의 실험은 입열량 75J/cm^{2}에서 험핑이 발생되었으나 Fig. 3-27은 그보다 낮은 45J/cm^{2}의 입열량에서부터 험핑이 나타났다. Fig. 3-28은 75J/cm^{2}이상의 입열량에서 험핑이 나타났으며 종횡비 1을 넘었으며 종횡비의 급격한 상승이 나타나고 있어 심입용접이 가능함을 보여준다. 반면 Fig. 3-26와 Fig. 3-29의 실험은 100J/cm^2 이상의 입열량에서 종횡비 1을 넘었으며 험핑은 75J/cm^{2}의 입열량에서 나타나 결함없는 조건의 입열량에서 레이저 용접을 하면 시편표면에 전달되는 용융부가 시편깊이방향으로 침투하는 용입깊이보다 커지게 되어 심입용접에 적합하지 않음을 알 수 있다. Fig. 3-27은 75J/cm^{2}부근의 입열량에서 종횡비 1을 넘었으나 험핑이 45J/cm^{2}의 입열량에서 나타나 종횡비 1이상의 영역에서 결함 없는 용접을 하기가 어렵다.

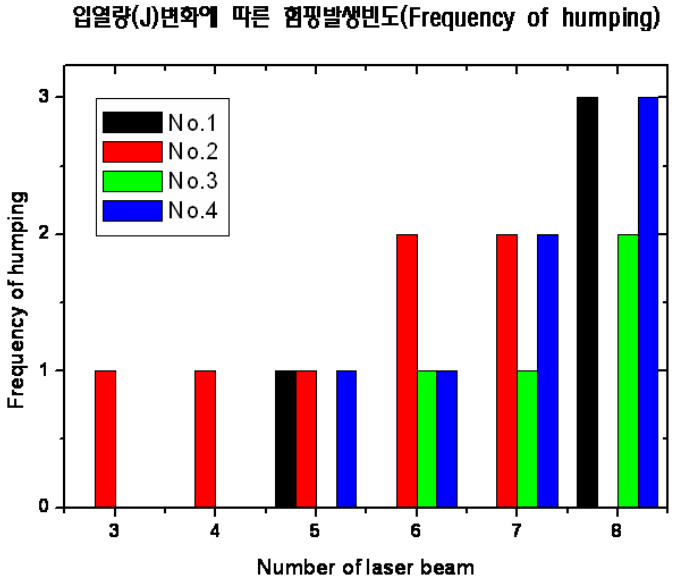
레이저빔의 파형을 입열량, 출력, 레이저빔 조사시간으로 조절하여 실험한 결



각 실험 조건별 입열량(J/cm²)

	No.1	No.2	No.3	No.4
1	15	15	12.5	15
2	30	30	25	30
3	45	45	37.5	45
4	60	60	50	60
5	75	75	62.5	75
6	90	90	75	90
7	105	105	87.5	105
8	120	120	100	120
9	135	135	112.5	135

Fig. 3-31(a) Pulsed wave modulation -duration time compensation-humping depth



각 실험 조건별 입열량(J/cm²)

	No.1	No.2	No.3	No.4
1	15	15	12.5	15
2	30	30	25	30
3	45	45	37.5	45
4	60	60	50	60
5	75	75	62.5	75
6	90	90	75	90
7	105	105	87.5	105
8	120	120	100	120
9	135	135	112.5	135

Fig. 3-31(b) Pulsed wave modulation -duration time compensation-frequency of humping

과 파형변조전보다 침투깊이와 종횡비의 향상이 진행되었다. 반면 용접 후 시편표면이나 내부에서 나타나는 치명적인 결함은 용접성능향상과는 다르게 나타났다. 시편내·외부에서 나타나는 험핑의 깊이와 그 발생빈도는 Fig. 3-31에 나타내었다. Fig. 3-31에서 보듯이 험핑의 깊이와 발생빈도는 Fig. 3-27에서 깊은 험핑과 많은 수의 험핑이 발생했음을 알 수 있다. Fig. 3-29는 험핑이 나타나는 구간이 넓게 퍼져 있으며 입열량이 증가할수록 발생빈도수도 증가하였다. Fig. 3-26은 낮은 입열량과 높은 입열량에서 관찰되었으며 120J/cm^{2}의 입열량에서 관찰된 험핑은 160㎛이상의 험핑깊이를 보였다. 처음 험핑이 발견된 입열량과 최고의 입열량사이에서도 관찰이 되지 않았지만 험핑이 존재할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3-28은 험핑의 깊이가 100㎛내외로 깊지 않으며 발생빈도수도 가장 낮음을 알 수 있다.

Fig. 3-29의 135J/cm^{2}의 입열량에서는 완전 관통용접 되었는데 이때 용융부

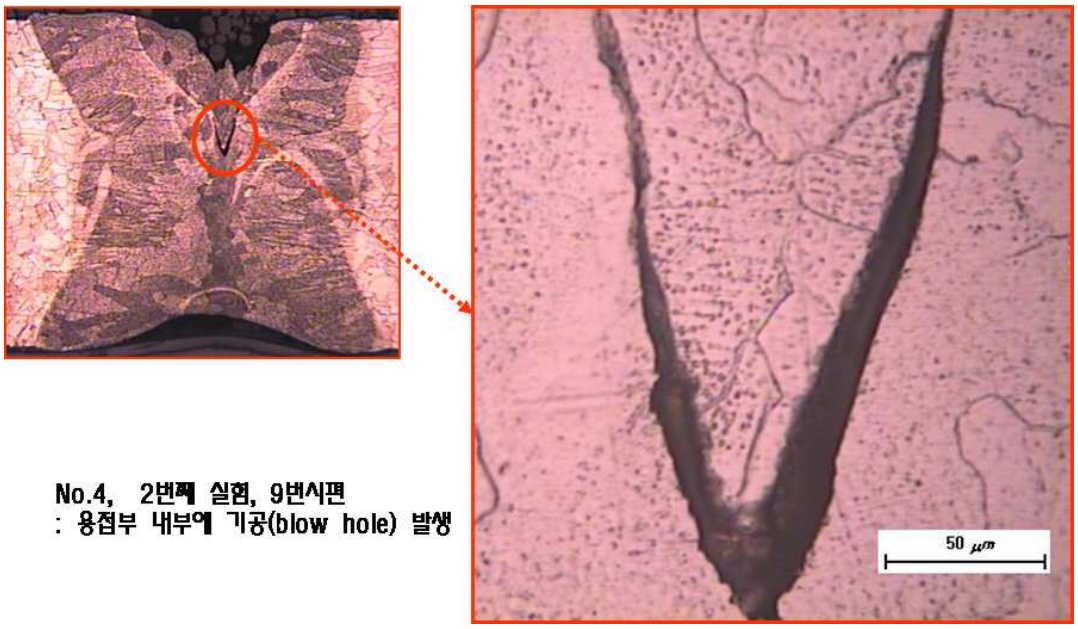


Fig. 3-32 Inside defect (blow hole)

의 중간지점에서 큰 험핑과 함께 V자 모양의 기공이 발생하였으며 Fig. 3-32에 나타내었다. 이는 중첩하여 레이저빔을 조사할 때 선행 용융부에 50%의 중첩율을 가지고서 레이저빔을 다시 조사하면서 두 용융부가 겹치는 지점에서 재용접으로 인해 기공이 발생한 것으로 생각된다.

험필발생을 최소화하면서 종횡비와 용융폭을 제어하기 위해서는 펄스파형의 중첩율을 50%에서 25%, 30%로 조절하여 규명하는 것은 다음 연구과로 한다.

제 4 장 결 론

냉연강판, 중탄소각과 인코넬600을 레이저용접했을 때 용접공정변수 변화에 따른 결과를 아래와 같이 얻었다.

1) 냉연강판에 Bead on plate를 실시하여 최고의 종횡비와 충분한 입열량을 기준으로 레이저 출력 1000W에서 레이저빔 이송속도가 1.4m/min일 때 최적의 공정조건을 얻을 수 있었다.

2) 이때 경도와 인장강도 측정결과 레이저빔 이송속도가 1.4m/min일 때 레이저 출력이 1300W, 1325W에서 최적의 값을 얻었으며, 용접 시 발생하는 표면의 온도를 측정한 결과 1325W에서 가장 안정적임을 알 수 있다.

3) STS304와 SM45C를 이종 용접했을 때 동종재료를 맞대기 용접했을 때보다 용융폭이 작아 종횡비가 크게 향상되었다. 각각 SM45C는 0.85m/min, STS304는 1.0m/min, 이종용접은 0.9m/min일 때 가장 큰 종횡비를 갖는다. 이종 용접했을 때 레이저빔 이송속도가 0.6에서 0.9m/min 이하에서는 SM45C와 STS304모재의 인장강도보다 컸다.

4) 레이저빔 이송속도가 0.8m/min와 0.9m/min일 때는 약 610MPa 값을 가진다. 레이저빔 이송속도가 증가할수록 경도값의 크기가 증가하였으며, 0.9m/min일 때 약 720Hv 값을 갖는다. 이종 용접한 결과 SM45C의 동종 용접시 발생하는 고온균열은 STS304 성분 중 오스테나이트 안정화 원소인 Mn이 S와 반응하여 FeS보다 먼저 MnS를 형성하기 때문에 S편석에 의한 저융점 화합물형성을 방지할 수 있어 입계의 액상 필름형상이 어려워지기 때문에 고온균열이 발생하지 않았다. SM45C와 STS304를 이종 용접하면 레이저빔 출력 : 1.6kW, 레이저빔 이송속도가 0.9m/min, 초점위치를 0mm, 보호가스 : 1bar가 최적의 용접조건을 갖는다.

5) Pulsed Nd:YAG 레이저를 이용하여 레이저빔을 조사시, 레이저빔의 출력(W)과 레이저빔의 조사시간(ms)을 증가시켜 전체입열량(J/cm^2)을 맞추면 용접깊이 (Penetratio depth)와 종횡비(Aspect ratio)는 비슷하거나 향상되지만 용접시 가장 문제되는 기공(Blow hole), 험핑(Humping)과 같은 주요 결함의 발생빈도와 그 크기가 증가할 수 있음을 보여준다.

6) 입열량 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120J/cm2으로 펄스파형의 레이저빔을 조사한 후 1/6만큼 입열량손실을 보상하기 위해 출력을 20%, 레이저빔 조사시간을 20%증가하여 보상한 결과 용입깊이, 종횡비와 같은 용접성능은 향상된 반면 기공, 험핑의 발생을 증가시켰다. 사각파형의 가우시안 빔을 1/6만큼의 입열량 손실인 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20J/cm2을 주어 레이저빔을 조사하면 용입깊이, 종횡비는 동일하거나 약간 상승하였고, 기공, 험핑과 같은 용접결함의 발생을 감소시켰다.

참 고 문 헌

1. Hitz, B., "Introduction to laser technology," IEEE Press, U.S.A, pp. 1-6, 1998.
2. HOSKINGF, M. and REJENT, A., "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," WELDING JOURNAL, pp. 127-136, 1999.
3. Olabi, A. G., Gasalino, G., Benyounis, K. Y. and Hashmi, M. S. J., "An ANN and Taguchi algorithms integraed approach to the optimization of CO2 laser welding," Advances in Engineering Software, pp. 1-6, 2006.
4. Sun, Z. and Kuo, M., "Bridging the joint gap with wire feed laser welding," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, No. 1, pp. 213-222, 1999.
5. Suh, J., Kang, H. S., Lee, J. H., Park, K. T., Lee, M. Y. and Jung, B. H., "Minimization of Welding Defect in CO2 Laser Welded Tube," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 6, No. 3, pp. 19-23, 2005.
6. Eroglu, M., Aksoy, M. and Orhan, N., "Effect of coarse initial grain size on microstructure and mechanical properties of weld metal and HAZ of a low carbon steel," Material Science and Engineering, Vol. A269, No. 1, pp. 59-66, 1999.
7. Murugan, S., Kumar, P. V., Raj, B. and Bose, M. S. C., "Temperature distribution during multipass welding of plates," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, No. 12, pp. 891-905, 1998.
8. Bertrand, Ph., Smurov, I. and Grevery, D., "Application of near infrared pyrometry for continuous Nd:YAG laser welding of stainless steel," Applied Surface Science, Vol. 168, No. 1, pp. 182-185, 2000.
9. Carmignani, C., Mares, R. and Toselli, G., "Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass

butt-welded thick steel plate," Comput. Method Appl. Mech. Engrg, Vol. 179, No. 3, pp. 197-214 ,1999.

10. Nam, G, J., Kim, K, W., Hong, J, U., Lee, J, H., Suh, J. and Cho, H, Y., "Finite Element Analysis of Nd:YAG Pulse Laser Welding for AISI 304 Stainless Steel Plate," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 30, No. 4, pp. 428-434, 2006.

11. Kim, C, H., Choi, W, Y., Chae, H, B., Kim, J, H. and Rhee, S, H., "A Study on CO_2 Laser-TIG Hybrid Welding of Zinc-Coated Steel Sheet," The Korean Welding Society, Vol. 24, No. 4, pp. 306-310, 2006.

12. Hu, B. and Richardson, I, M., "Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminum alloys," Materials Science and Engineering, A 429, No. 1, pp. 287-294, 2006.

13. 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.

14. G. Brüggemann, 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

15. 이철구, 강창규, “스테인레스강과 탄소강의 Nd:YAG 레이저 용접특성에 대한 연구,” 대한 용접학회 춘계 학술발표대회 발표, 2004

16 F. M. .HOSKING, J.J.STEPHENS and J.A.REJENT, "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," WELDING JOURNAL, pp. 127-136, 1999.

17. 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.

18. 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.
19. Kim, J. D., Kim, C. J., and Chung, C. M., 2001., "Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, pp. 51~56.
20. Han, W. J., Byeon, J. G., and Park, K. S., 2001, "Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd:YAG laser beam," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 234~237.
21. Kim, J. D., and Moon, J. H., 2000, "C-ring stress corrosion test for Inconel 600 and Inconel 690 sleeve joint welded by Nd:YAG laser, " Corrosion Science, Vol. 46, pp. 807~818.
22. G. D. Janaki Ram,, A. Venugopal Reddy., K. Prasad Rao., G. M. Reddy., J. K. Sarin Sundar., 2005, "Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd:YAG laser welds," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, pp. 73~82.
23. C. A. Huang., T. H. Wang., C. H. Lee and W. C. Han., 2005, "A study of the heat-affected zone(HAZ) of an Inconel 718 sheet welded with electron-beam welding," Materials Science and Engineering A, Vol. 398, pp. 275-281.
24. Yoo, Y. T., Shin, H. J., Ahn, D. G. and Im, K. G., "Dissimilar Metal Welding of Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel using CW Nd:YAG Laser," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 17-26, 2005.
25. Yoo, Y. T., Shin, H. J., Ahn, D. G., Im, K. G. and Shin, B. H., "Dissimilar Metal Welding of Medium Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel utilize CW Nd:YAG Laser," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 47-55, 2006.