

니켈도금된 S45C강의 연속파 Nd:YAG 레이저 맞대기 용접 특성

모양우*, 유영태⁺, 신호준⁺⁺, 신병헌⁺⁺
(논문접수일 2006. 12. 13, 심사완료일 2007. 4. 5)

The Characteristics of Butt Welding Nd:YAG Laser with a Continuous Wave of Nickel Coated S45C Steel

Yang-Woo Mo*, Young-Tae Yoo⁺, Ho-Jun Shin⁺⁺, Byung-Heon Shin⁺⁺

Abstract

S45C steel has been widely used in industrial applications, such as crank shafts, gears, main spindles of machine tools, connecting rods, etc., because of its distinguished mechanical property. In the convention arc welding of S45C plates without heat treatments, it is possible for welding defects to take place, such as a void or a hot-crack, due to a high carbon composition of S45C. Laser welding process is widely used in the industrial field due to its numerous advantages: a small heat affected zone(HAZ), deep penetration, high welding speed, single-pass thick section capability, and small distortion after welding. The objective of this research works is to investigate the influence of the process parameters, such as power of laser and welding speed, on the characteristics of laser welding for the case of nickel coated and nickel uncoated S45C steel. As the result of the experiment, in case of butt welding, nickel coated S45C steel has a uniform formation of welding zone and it was judged that the welding nature was better as inner defects and the quantity of spatter were formed relatively fewer than nickel uncoated S45C steel.

Key Words : CW Nd:YAG laser welding(연속파형 Nd:YAG 레이저용접), Nickel coated S45C Steel(니켈도금된 중탄소강), Heat input(입열량), Butt welding(맞대기 용접)

1. 서론

일반기계구조용강인 S45C는 인장 강도, 연신율 및 인성이 큰 재질로 건축, 교량, 압력 용기, 차량, 선박, 기관, 보조

기계 등의 비교적 중요한 기계구조부품에 사용된다. 근래에 들어 산업의 고도화로 인한 고온, 마모, 내부식성 등에 복합적으로 작용하는 가혹한 환경하에서 사용되는 산업기계류가 증가하고 있다. 산업현장에서 중요한 기계구조부품으로 사

* 조선대학교 기계공학과
+ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375
++ 조선대학교 일반대학원 정밀기계공학과

용되는 S45C의 경우 용접에 있어서 몇 가지 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 본 실험에서 사용된 S45C는 표면층에 니켈을 도금한 시편이다. 일반적인 중탄소강은 저탄소강에 비해 탄소함유량이 많아 용접의 영향으로 열화에 따라 각종 기계적, 금속학적 특성이 저하된다. 용접부위는 고온균열과 기공이 발생하며, 급랭경화현상이 나타나므로 문제점이 많다. 이런 단점을 극복하기 위해 다양한 열원을 이용한 용융용접 기술이 사용되고 있다. 그 중 레이저용접은 많은 장점을 가지고 있기 때문에 많은 연구가 진행되었다⁽¹⁻³⁾. 레이저 용접은 고밀도 에너지 열원에 의해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 대단히 크다. 용입깊이는 깊고, 열영향부(heat affected zone: HAZ)가 작은 용접특성이 있다. 또한 용가재를 사용하지 않는 용접방법이며, 높은 출력밀도로 매우 짧은 시간 내에 용접하기 때문에 모재내부로 열확산이 적어 내부응력이 작게 형성되어 용접변형이 적다. 그래서 레이저 용접은 일반용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 용접성 평가를 받고 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

그러나 레이저 용접은 공정변수에 민감하다. 예를 들어, 레이저 출력, 용접속도, 초점거리, 보호가스의 유량 및 종류 등을 들 수 있다. 특히, 레이저빔은 전자기파이므로 금속과의 상호작용이 중요한 변수로 작용하기 때문에 레이저빔의 종류와 금속 그리고 재료의 가공 상태에 따라 용접성이 다르게 나타난다. 더욱이 본 실험에서 사용된 S45C강은 표면에 니켈 도금된 시편으로 니켈도금의 영향으로 레이저용접 특성이 달라질 것으로 판단된다. 통상적으로 니켈은 고온 환경에서 우수한 내부식성을 가지고 있어서, 상온에서 가공성이 우수하다. 그래서 일반적으로 니켈도금으로 각종 기계 부품의 내부식성을 강화시킨다. 이와 같은 이유로 부피가 큰 기계부품의 내부식성을 강화시키기 위해 니켈도금으로 표면 개질을 한다.

선행연구결과 Noh⁽⁷⁾는 펄스 Nd:YAG레이저를 이용하여 니켈 도금된 SUM24L와 니켈도금 되지 않은 시편의 용접에 관하여 연구하였다. 최적공정변수에 의해 용접했을 때 용입깊이가 적절하고, 기공나 균열 등의 용접결함이 없고, 용접부의 기하학적인 형태가 균일하게 형성되었다. 그러나 적절치 못한 공정변수로 용접했을 때 응고균열이 발생하였다. 니켈도금된 SUM24L의 경우 균열 경향이 도금되지 않은 시편보다 크게 나타났는데, 이는 니켈 도금층에 레이저빔이 조사될 때 표면반사도가 상대적으로 커서 초기 빔 흡수율이 저하되어 용융깊이가 작게 형성된 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 CW Nd:YAG 레이저를 이용해서 중탄소

강을 니켈도금한 시편의 용접특성을 연구하였다. 용접에 중요한 영향을 미치는 레이저 출력, 용접속도, 초점위치 등의 공정변수를 실험적으로 연구하여 최적의 공정변수를 제시하고자 한다. 또한, 레이저 공정변수의 변화에 따른 용접비드의 폭과 침투깊이 등을 측정하여 각각의 공정에 대한 입열량의 변화 및 내부결함 빈도수를 측정하여 레이저 맞대기 용접의 최적의 공정변수를 찾아내었다. 레이저 용접 공정변수 변화에 따른 인장시험으로 용접성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에 사용되어진 Nd:YAG레이저는 파장이 1.06 μ m 이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔발산각은 25mrad, 600 μ m인 광섬유를 통해서 전달된다. Fig. 1은 본 실험장치의 계략도이다. 광케이블에 연결되어 가공하는 CNC 제어장치는 LASMA 1054이다. 레이저 용접시 표면과 대기중의 오염물질사이의 상호작용을 방지하기 위해서 Ar가스를 45° 각도, 1bar의 가스압력으로 분사시켰다.

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 일반기계구조용강으로서 니켈도금된 S45C강과 도금 되지 않은 S45C강을 비드온플레이트(bead-on-plate: BOP) 실험하였다. 이때 니켈도금의 두께는 평균 5.04 μ m이다. S45C의 화학 조성분과 물리적 성질은

Table 1 Chemical compositions of specimens(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
S45C	0.45	0.194	0.702	0.02	0.01	0.02	0.01	0.008



Fig. 1 Experimental set-up

Table 2 Physical properties of the material

S45C	specific gravity(g/cm ³)	tensile strength(MPa)	melting point(°C)	emissivity
	7.84	≥ 646.8	1450	15%
	thermal conductivity(cal/cm sec °C)		expansion coefficient(*10 ⁻⁶)	specific resistance(-cm)
	0.106		11.3	20

Table 3 Parameter of laser welding

	Bead-On-Plate(BOP)	Butt welding
Laser power	1800W, 1900W, 2000W	1800W,1900W
Travel speed(V _{is})	0.65 ~ 3.0m/min	0.9 ~ 1.5m/min
Focal position(z)	0(focal length=200mm)	0mm(focal length=200mm)
Shielding gas	Argon : 1.5bar : 3l/min	Argon : 1.5bar : 3l/min

각각 Table 1, 2와 같다. 비드온플레이트 실험에 사용된 시편의 크기는 150×80×4.5mm이다. 비드온플레이트 용접과 맞대기 용접공정은 각각 Table 3에 나타났다. 각각의 공정에 따라 입열량 변화를 계산했다. 시편에 조사된 입열량은 아래식과 같다.

$$E = \frac{P}{V \cdot W} \quad (1)$$

위 식에서는 E는 입열량(J/cm²), P는 레이저출력(Watt), W는 용접비드폭(mm), V는 용접속도(m/min)이다.

맞대기 용접에 사용된 시편크기는 100×50×3.2mm이다. 각각의 공정변수는 앞선 비드온플레이트 실험에서 얻어진 용입깊이와 입열량 관계를 고려하여 용접하였다. 용접면의 gap 편차를 줄이기 위해 sand paper로 연마한 후 아세톤으로 세척하여, 용접위치의 허용오차를 0.1mm 이하로 유지하였다. 각각의 공정변수 변화에 대한 용접부를 분석하기 위해 정밀금속절단기[Isomet 4000 precision saw]로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 폴리싱 후 Nital 2%로 에칭 하였다. 에칭된 용접부 경계면은 광학현미경[Nikon:ECLIPSE L150]으로 관찰하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기[Simadzu : HMV-2series]를 사용하여 0.3kg의 하중을 적용시켰다. 인장 시험편[KS B0833]을 제작하여 인장 시험기[Intron Corporation U.S.A의 Universal Testing machine 4206, 15ton]로 인장강도(tensile stress) 및 인장변형률(tensile strain)를 측정하였다.

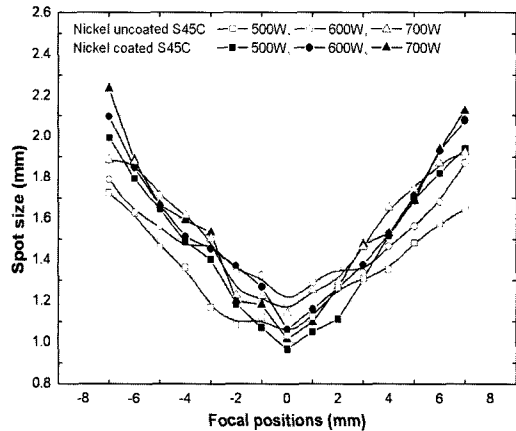


Fig. 2 Variations spot size according to focal positions of laser beam

3. 결과 및 고찰

3.1 비드온플레이트 용접특성

3.1.1 레이저출력별 초점크기 변화

레이저빔이 재료표면에 흡수되는 것은 재료의 물리적 성질과 가공조건에 따라 다르다. 용접에 영향을 미치는 재료의 대표적인 물성치는 반사율, 열전도율 및 전기 전도도이다.

레이저 빔이 시편 표면에 조사되면 표면에 미치는 재료별 물리적 성질이 다르기 때문에 표면 흡수율이 달라진다. 이와 같은 이유로 금속표면에 레이저 빔이 조사되었을 때 초점면의 크기가 재료에 따라 다르게 형성된다. Fig. 2는 레이저빔

과 재료의 상호관계를 고찰하기 위해 레이저빔 조사시 시편 표면에 흡수된 양을 고찰한 결과이다.

금속재료의 표면반사율에 따라 빔의 흡수도가 다른데, 파장이 1.06 μm 에서의 표면 반사율 값은 니켈의 경우 72%, 철의 경우 65%로 니켈이 철보다 레이저 빔 흡수가 잘 되지 않은 특징을 가지고 있다.

초점위치별 시편표면에 흡수되는 초점면의 변화 실험은 레이저출력(P)을 500W, 600W, 700W로 변화시켜, 레이저 빔을 180ms의 단 펄스(single pulse)로 조사시켰다. 니켈 도금된 시편에 레이저빔을 쬐는 시간에 조사하였을 때 초점면의 크기가 니켈 도금 되지 않은 시편보다 작았다. 니켈 도금된 시편에서 초점면이 작은 것은 니켈의 반사율이 72%로 철의 65%보다 크기 때문에 레이저 빔을 흡수하는 양이 작기 때문이다. 초점거리 즉 $z=0\text{mm}(f=200\text{mm})$ 에서 초점면의 크기가 가장 작고, 초점위치를 벗어나면서 디포커싱의 영향으로 초점면의 크기가 증가하였다.

니켈 도금된 S45C 강에 레이저 빔을 조사시켰을 때 비산(spattering)되는 양이 도금하지 않은 S45C 강보다 적었다. 레이저 빔이 시편에 조사 되었을 때 광자(photon)로부터 재료에 전달되는 운동량으로 인한 전자의 운동이 발생한다. 이와 같은 현상으로 광자가 재료의 음자(phonon) 및 자유전자들과 충돌하여 음자가 움직이는 방향에 저항하는 힘 때문에 $\sim 10^{-13}\text{sec}$ 이내에 열로 바뀌어 금속표면의 온도를 증가시키는데, 레이저 빔이 고출력으로 되면 표면으로부터 증발되는 원자들이 빠른 속도로 방출되면서 발생하는 운동량이 더욱 커진다.

니켈 도금을 했을 경우 표면 반사율이 철보다 크므로 레이저 빔 흡수율이 적고, 고유 저항값은 철이 니켈 보다 커서 열전도가 니켈보다 많이 발생하게 된다. 그러므로 니켈 도금하지 않은 시편의 스패터가 더 많이 발생하였다. 또 한가지 고려할 수 있는 사항으로는 700 $^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 물성치를 비교하면 니켈의 열전도(K)는 0.72W/cm $^{\circ}\text{C}$ 이고, 철은 0.33 W/cm $^{\circ}\text{C}$ 이다. 비열(C)은 니켈의 경우 0.56J/g $^{\circ}\text{C}$, 철은 0.98 J/g $^{\circ}\text{C}$ 이다. 재료의 열확산도(K/ ρC)가 작다는 것은 열이 금속내부로 잘 침투되지 못함을 의미한다. 반대로 열확산도가 크다는 것은 표면으로부터 열이 빨리 제거 된다는 것을 의미한다.

이와 같은 이유로 니켈도금된 S45C 강의 경우 초점면이 작은 것으로 판단된다. 또한 니켈과 철의 용점을 비교했을 때 니켈은 1455 $^{\circ}\text{C}$ 이고, 철은 1535 $^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 니켈도금된 S45C 강에 레이저빔을 조사했을 때 니켈이 기화되면서

열을 손실하기 때문이라 사료된다.

3.1.2 중형비와 입열량 특성

레이저용접 공정변수가 적절하지 않으면 열 변형과 용접 결함 등이 발생하므로 최적의 용접 공정 변수를 결정한 후 용접해야 한다. 최적의 용접 공정변수를 결정하기 위해 비드 온플레이트실험을 통해 입열량을 식 (1)로 계산하여 비교했다. 레이저빔이 재료표면에 흡수된 입열량을 결정하는 변수로 용입폭과 용입깊이가 중요한 변수이다. 그러므로 용접속도에 따른 용입폭과 용입깊이를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다.

Fig. 3은 레이저출력과 용접속도 변화에 대한 용입깊이를 관찰한 결과이다.

니켈을 도금한 경우와 니켈을 도금하지 않았을 경우 용입 깊이를 비교하면 용접속도가 증가하면서 입열량과 용입깊이가 감소하는 경향이 비슷하다. 용접속도와 출력이 동일했을 때 니켈도금한 시편의 용입깊이가 니켈도금을 하지 않은 시편보다 컸다. 이것은 시편성분의 대부분을 차지하는 철의 비중은 7.86이고, 표면에 도금된 니켈비중은 8.845 인 점을 고려하면, 표면에서 용융된 니켈성분의 비중이 철에 비해 크기 때문에 중력의 영향을 받으면서 깊이방향으로 용융물이 성장했기 때문이다.

용접속도를 느리게 진행시켜 입열량을 증가시켰을 경우 니켈 도금된 S45C강과 니켈도금 되지 않은 S45C강의 용융 깊이 차이가 크게 나타났다. 이와 반대로 용접속도를 빠르게 변화시켜 입열량을 감소시키면 철의 용점(1535 $^{\circ}\text{C}$)과 니켈의 용점(1455 $^{\circ}\text{C}$)의 차이에서 발생하는 영향 때문에 니켈성분에 비해 충분히 철성분이 용융되지 않아 용융깊이차이가 발생하였다.

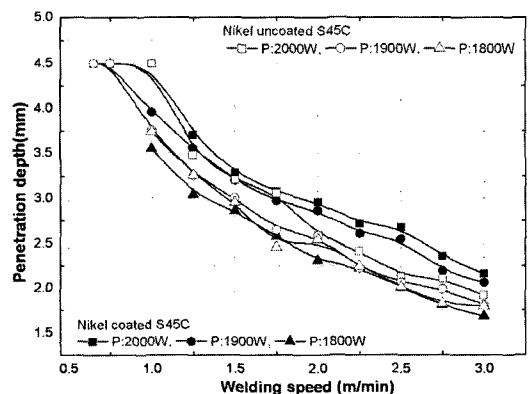


Fig. 3 Effect of welding speed on the weld penetration

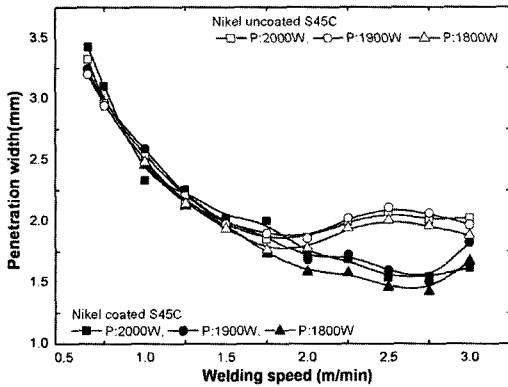


Fig. 4 Effect of welding speed on welding width

Fig. 4는 용접속도에 대한 용입폭의 변화를 고찰한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 입열량이 클 경우에는 레이저 빔의 에너지가 충분히 시편에 전달되어 도금한 시편과 도금하지 않은 시편의 용융폭이 비슷하였다. 그러나 용접속도를 2.0m/min~2.75m/min로 증가시켜 입열량을 감소시키면 니켈 도금하지 않은 시편의 용융폭이 니켈 도금했을 때보다 크게 나타났다. 이와 같은 이유는 입열량이 감소하면 충분히 철을 깊이방향으로 용융시키지 못하고, 주위로 열이 전달되기 때문이다. 그러나 용접속도가 3.0m/min로 입열량이 줄어들면 니켈도금한 시편과 도금되지 않은 시편의 용융폭 차이는 감소하였다.

용접속도 변화에 따른 용입 깊이와 용융 폭을 측정하여 종횡비를 식 (2)로 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 식 (2)에서 A·R(Aspect Ratio)는 종횡비이고, H는 용입깊이, W는 용융폭이다.

$$A \cdot R = \frac{H}{W} \quad (2)$$

니켈 도금된 시편과 니켈 도금 되지 않은 시편의 종횡비를 비교하면 니켈 도금한 시편의 종횡비가 니켈 도금하지 않은 시편보다 종횡비가 컸다. 이와 같은 현상은 니켈성분과 철성분의 용융점과 비중의 차이 때문에 니켈 도금 했을 경우 용융폭은 작고 반대로 용융깊이는 상대적으로 크기 때문이다. 용접속도가 2.0m/min까지는 시편 표면에 니켈도금 유·무에 따라 입열량 차이는 크지 않았다. 용접속도를 크게 하여 입열량을 줄이면 니켈 도금한 시편의 입열량이 크게 나타나고 있다. 이와 반대로 입열량을 작게 하여 레이저 빔을 시편표면에 조사할 경우 초기에 반사되는 양이 니켈도금 되지 않은

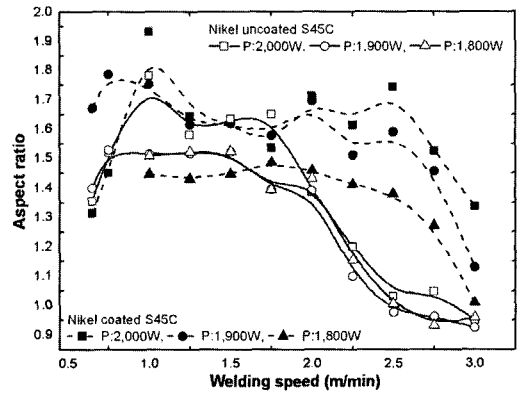


Fig. 5 Influence of welding speed on the aspect ratio

S45C강보다 많아 용융폭이 작게 형성되었다.

용접속도가 0.65m/min로 입열량이 클 경우, 종횡비가 작은 현상은 용융폭과 깊이가 동시에 크기 때문에 용접속도가 1.0m/min 일 때보다 종횡비가 크지 않았다. 그러나 용접속도가 1.0m/min인 지점을 기준으로 종횡비를 비교하면 레이저 출력이 증가할수록 종횡비가 증가하였다. 니켈 도금된 S45C강과 니켈도금 되지 않은 S45C강의 종횡비를 비교했을 경우 니켈 도금된 경우의 종횡비가 크지만 출력을 낮추어 1800W로 하면 오히려 니켈 도금한 경우가 종횡비가 작았다. 이런 현상은 니켈 도금했을 경우 충분한 출력으로 시편을 조사하지 않으면 니켈도금 표면에서 반사되는 에너지양이 상대적으로 많기 때문이다.

니켈 도금하지 않았을 경우 용접속도가 1.0m/min에서 1.75m/min까지는 종횡비가 상대적으로 크지 않았다. 또한 니켈 도금 했을 경우에는 2.5m/min까지 종횡비의 변화가 크지 않았다. 니켈도금된 S45C강은 용접속도가 2.5m/min보다 빠를 경우, 니켈 도금 되지 않은 S45C강은 각각 1.75m/min보다 용접속도가 빠르게 하여 입열량을 감소시키면 종횡비가 급격히 작아지고 있다. 그러나 종횡비가 크게 형성될 경우 내부기공이 크게 발생하는 용접결함이 나타났다. 특히 종횡비가 가장 크게 형성되는 부분에서는 매우 큰 기공이 발생하였다. 종횡비가 클 때 기포에 의한 기공이 많이 형성되는 이유는 키홀 용접시 용융점이 비교적 낮은 Mn, Cu, P, S등이 기화하여 발생한 기포가 레이저빔이 이동되면서 표면이 응고될 때 분출되지 못하고 키홀이 닫히면서 포획되었기 때문이다.

입열량 변화를 나타낸 Fig. 6에서 용접속도가 빠를 경우 니켈 도금한 시편의 입열량이 크게 계산된다. 이와 같은 현

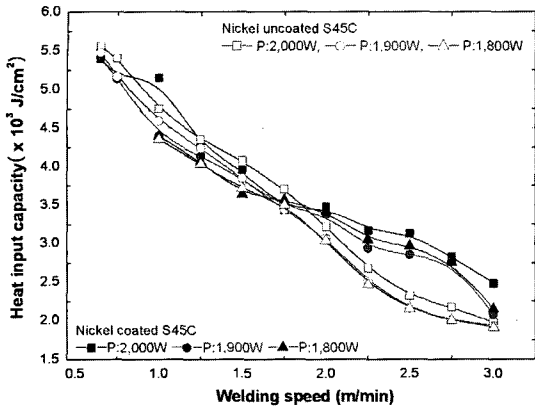


Fig. 6 Variations for heat input capacity according to welding speed and laser beam

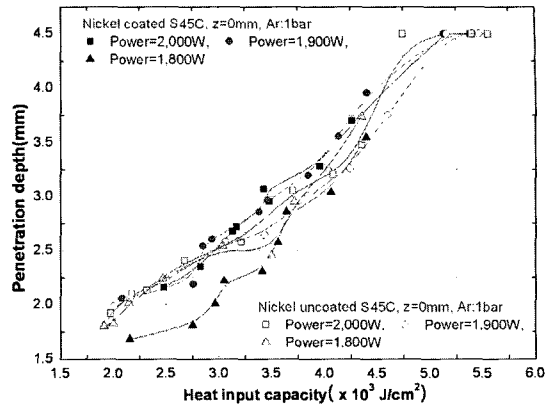


Fig. 7 Influence of Penetration depth according to heat input capacity

Bead on plate welding : P=1900W, z=0mm, Ar : 1bar						
V(m/min)	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25
Ni coated S45C						
Ni uncoated S45C						

Fig. 8 Shape of the cross-section according to welding speeds

상을 입열량에 대한 침투깊이의 양으로 나타낸 Fig. 7과 비교하였다. Fig. 6에 나타난 것처럼 용접속도가 낮아 입열량이 클 경우에는 니켈 도금된 시편과 니켈 도금하지 않은 시편의 침투깊이 차이가 크지 않았다.

그러나 용접속도가 빠를 경우 Fig. 6에서는 니켈도금한 경우가 입열량이 크게 계산되었지만, Fig. 7에는 시편에 흡수되는 출력이 상대적으로 낮아 오히려 침투깊이가 작았다. 이것은 Fig. 6에서 설명한 것처럼 레이저출력이 상대적으로 낮을 경우 니켈도금의 영향으로 레이저 빔의 반사 되는 양이 많아 레이저 빔 흡수율이 작은 용접폭 식 (1)로 계산했기 때문이다.

Fig. 8은 레이저출력 1900W, 초점위치 z=0mm로 고정하고 용접속도를 변화시켜 용접부 형상을 나타냈다. 각각 스케일 bar의 크기는 1000μm이다.

용접속도를 변화시켜 용접한 단면을 관찰한 결과 용접단

면에 기공 등 결함이 발견되는 경우가 많았다. 니켈을 도금한 시편이 니켈도금을 하지 않은 시편보다 용접부에 포획된 기공크기가 크게 나타났다. 종횡비가 클 경우 기공이 포획되는 경우가 많은데 이것은 Fig. 3에서 설명한 것처럼 S45C를 구성하고 있는 조성분의 용융온도차이 때문에 발생한다.

3.2 맞대기 용접특성

맞대기 용접은 Table 3과 같이 실시하였다. 각각의 변수는 레이저출력은 1800W, 1900W, 용접속도를 0.75~1.75m/min으로 0.25m/min씩 증가 시켜 맞대기 용접하였다. 그 결과로서 용접속도가 각각 1.25m/min, 1.0m/min 일 때 용접비드가 균일하게 형성되었다. 레이저 출력이 1800W, 용접속도 1.25m/min일 때, 니켈도금 시편의 입열량은 $3.771 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이고, 니켈도금 되지 않은 시편은 $3.837 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이다. 용접속도를 1.25m/min으로 고정하고, 레이

저 출력이 1900W로 증가시켰을 때 니켈도금 시편은 $3.521 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 니켈도금 되지 않은 시편은 $3.913 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다. 용접속도를 1.0m/min으로 감소시켜 용접했을 경우 입열량값은 레이저 출력이 1800W 일 때 니켈도금 시편은 $3.37 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 니켈도금 되지 않은 시편은 $3.606 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 였다. 레이저 출력을 1900W로 증가시켜 용접했을 경우 레이저 빔 이송속도가 1.0m/min일 때, 니켈도금 시편은 $3.703 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 니켈도금 되지 않은 시편은 $3.77 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 의 입열량값을 가졌다.

위에서 설명한 것과 같이 니켈 도금했을 경우의 입열량이 약간 작게 나타났다. 이와 같은 현상은 표면에 도금된 니켈의 열전도영향으로 용융폭이 약간 크기 때문이다.

Fig. 9은 니켈 도금된 시편과 니켈 도금되지 않은 시편을

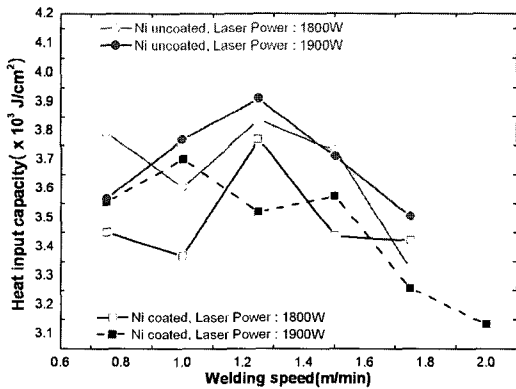


Fig. 9 Variation of heat input capacity according to welding speed

용접속도 대한 입열량 변화를 계산한 결과이다. 레이저빔의 이송속도가 느릴 경우 레이저빔이 시편에 조사되면서 표면 용융에 의한 주위로의 열전달 때문에 비드면이 커져 입열량이 작게 계산되었다. 니켈 도금된 시편과 니켈 도금되지 않은 시편의 입열량을 비교하면 니켈도금한 경우의 시편에 조사된 입열량이 작았다.

이것은 니켈의 용점이 철보다 작아 레이저빔이 조사될 때 니켈이 용융되어 용접부의 모재방향으로 열이 전달되어 용융폭 증가에 따른 입열량이 감소하기 때문이다.

니켈도금 되지 않은 시편은 레이저 출력이 1900W이며, 용접속도가 1.25m/min일 때, 가장 큰 입열량 값을 가졌다. 이때 입열량(E)은 $3.913 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이며, 이는 레이저 출력을 각각 1800W와 1900W로 변했을 때 큰 차이를 보이지 않았고, 입열량 차이값은 약 7.6 J/cm^2 으로 변화량은 극히 작다. 니켈 도금된 시편 경우에는 니켈표면에서 레이저 빔 반사율 때문에 레이저 출력이 1800W일 때는 반사에 의한 레이저 용접 비드폭이 작아져 1.25m/min일 때 입열량이 가장 컸다. 레이저 출력이 1900W일 경우에는 용접속도가 1.0m/min일 때 입열량값은 $3.703 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 으로 가장 크게 나타났다. Fig. 10은 레이저출력을 1900W, z=0mm로 하여 용접속도 변화에 따른 맞대기 용접 단면이다. 니켈 도금했을 때 용접단면이 니켈도금하지 않은 시편보다 크게 나타났다. 특히 용접속도가 1.25m/min일 때는 용융풀이 모재방향으로 급냉 각되면서 중앙부분의 접합이 불안정한 형태를 나타내고 있다. 레이저빔이 이동하면서 용융풀의 응고가 비드중심을 향하여 거의 직선적으로 성장한다. 직선적으로 성장한 주상정은 비드중심부의 서로 마주치는 부분에서 불순물원소들의 편석이 심하게 일어나 저융점화합물의 액상이 형성되어 용

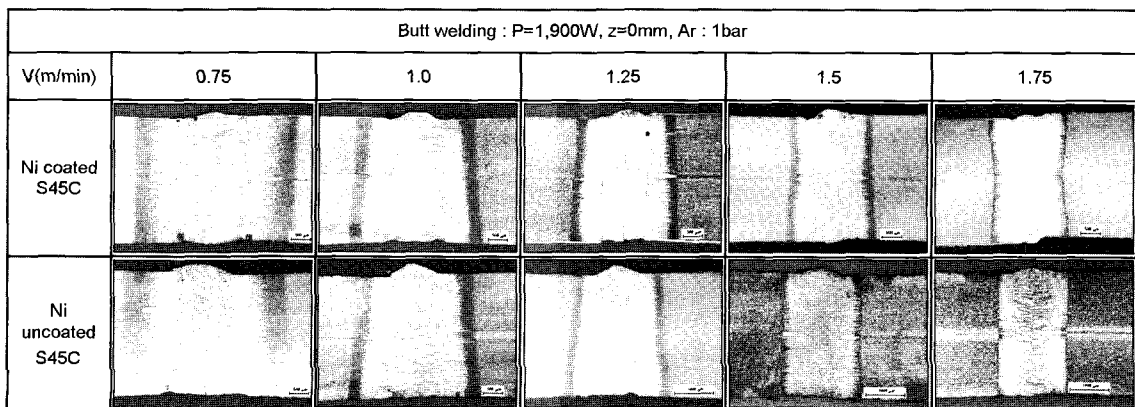
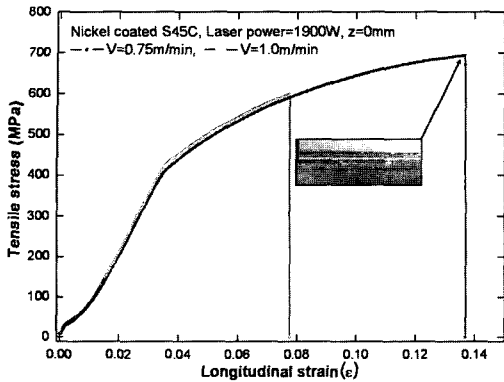
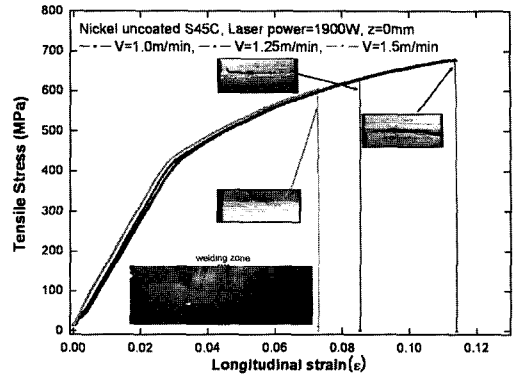


Fig. 10 Shapes of the cross-section according to welding speeds



(a) Nickel coated S45C steel



(b) Nickel uncoated S45C steel

Fig. 11 The relationship between tensile stress and longitudinal strain according to welding speeds

용접의 수직으로 결합이 발생하였다. 용접속도를 느리게 하여 입열량을 증가시키면 용융풀의 온도구배가 연속적으로 변하기 때문에 비드중심부의 수지상은 서로 평행하게 성장하여 고온균열과 같은 결함 발생빈도가 감소한다.

Fig. 11에서는 맞대기 용접한 시편을 인장시험 규격[KS B0833]으로 제작한 후 인장시험한 결과이다.

니켈도금된 S45C강의 경우 0.75m/min, 1.0m/min을 제외하고 시험편제작을 위해 절단할 때 파단 되었다. 이런 현상은 Fig. 10의 미세조직을 분석했을 때 예상된 결과이다.

특히 1.25m/min일 때 용접선 중심으로 냉간균열이 발생된 것을 볼 수 있다. 니켈 도금하지 않은 시편의 경우 레이저빔 이송속도가 1.75m/min일 때 입열량이 충분하지 않아 정밀 절단시 자연적으로 판단되었다.

Fig. 11는 용접부의 인장강도를 고찰하기 위해 인장시험편[KS B0833]을 제작하여 실험한 결과이다. Table 2에서 보는 바와 같이 일반적으로 현장에서는 S45C강의 인장강도값은 686MPa 이상으로 사용된다. Fig. 11와 비교 했을 때 인장강도의 범위는 최소 598MPa, 최대 693MPa값이 측정되었다. 그리고 용접속도가 1.0m/min일 때 니켈 도금된 시편과 니켈도금 되지 않은 시편의 인장강도값은 각각 627MPa, 598MPa로 29MPa의 인장강도 차이를 보였다. 용접한 시편의 인장강도가 모재에 비하여 작은 것은 레이저빔 조사시 용접부의 급가열·급냉각으로 인하여 미세조직의 팽창과 수축이 매우 짧은 시간내에 작용하기 때문에 용접부 취성이 증가하였기 때문이다.

Fig. 12은 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금 되지 않은 S45C강의 경도분포이다. 그 결과 니켈도금을 하지 않은 시

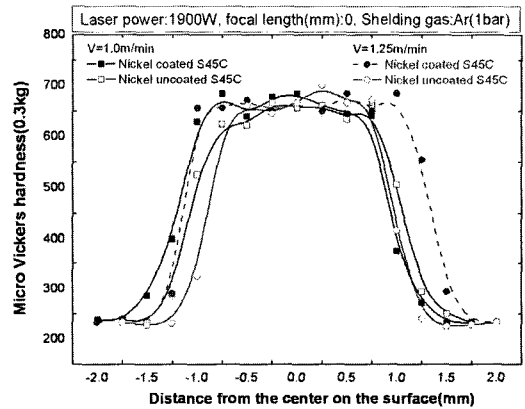


Fig. 12 Hardness profiles of cross section after laser welding

편의 경우 경도분포가 작게 형성되고 있다. 경도를 측정할 위치는 시편표면에서 깊이방향으로 100um지점이다. 니켈 도금하지 않았을 경우의 경도값이 니켈 도금했을 때 보다 경도값이 약간 크지만 그 차이는 평균 경도값의 차이가 1.0m/min일 때 12Hv이고, 1.25m/min일 때 20.8Hv로 모재와 용접부의 경도값의 크기가 약 3배정도 되는 것을 고려하면 아주 작다. 경도분포는 니켈도금 시편이 표면용융면적이 넓어 경도분포가 도금하지 않았을 때 8% 정도 넓게 분포되었다. 용접속도가 1.0m/min(평균 경도값 629Hv)일 때보다 1.25m/min(평균 경도값 652Hv) 일 때 경도분포가 크게 형성되었다.

3.3 용접부 미세조직 특성

중탄소강의 기본조직은 페라이트와 시멘타이트(Fe3C)로서 이루어진 혼합조직을 갖고 있고, 이조직의 혼합비율은 탄소량에 의해서 결정되기 때문에 탄소강의 물리적 성질은 탄소량에 따라 변화된다. Fig. 13은 레이저출력을 2000W, 초점위치를 z=0mm으로 고정하고, 용접속도를 각각 1.25, 1.5, 1.75, 2.0m/min 변화시켰을 때 용접부를 관찰한 결과이다. 탄소강을 용접할 경우 용접부가 조대한 마르텐사이트를 가지게 된다. S45C와 같이 중탄소강 일 경우 용접부에서 균열과 기공이 발생하기 쉽다. 특히 고온균열은 고온(1000℃)에서 발생하며, 연성이 거의 없고, 입계균열로 발전한다. 또한 S 및 P 등의 불순원소의 편석으로 인하여 저용점화합물 또는 저용점공정물을 형성한다.

레이저용접의 경우 A₃ 변태온도까지 순식간에 상승하기 때문에 고상선온도 이상에서 발생하는 고온균열로 대표되는 응고균열이 많이 발생한다. 응고균열은 용접역에 의해 용융되었던 금속이 응고되는 과정에서 용접금속내의 최종 응고부에서 발생하기 쉽고 일반적으로 비드 중앙에 용접방향과

평행하게 발생하는데 주로 강중에 함유되어 있는 P, S, Cu 등의 불순물원소가 최종 응고부의 입계의 편석에 기인한다.

고온균열은 용융풀의 경계면인 고-액계면에서의 응집력이 용접부와 수직방향으로 가해진 응력보다 낮을 때 발생하며, 용접선 중심을 따라 형성된 중심선 균열이다. 응고균열 파단면의 표면이 매끄러운 것은 인장응력에 의하여 균열이 형성되고 성장할 시기에 그 표면에 액상이 잔류하고 있기 때문이다. 일반적으로 응고균열을 발생시킬 수 있는 불순물이나 합금원소들은 대부분 다음과 같은 특성을 가진다.

낮은 평형분배계수(k), 다른 원소와 반응하여 쉽게 화합물을 형성, 생성된 화합물은 용점이 낮거나 모재와 반응하여 공정상을 형성, 화합물이 모재와 이루는 이면각(Dihedral angle)이 작으므로 결정입계를 따라 균열이 쉽게 진행된다⁽⁸⁾. 이중 평형분배계수가 작은 원소들로는 S, P, O, B 등이 있으며, 강의 용접부에서 이 원소들은 평형분배계수 k의 값이 큰 원소들보다 액상에 용질원자들은 방출량이 많기 때문에 편석이 심하다.

앞서 서술한 내용은 Fig. 13에서와 같이 대부분의 공정에서 용접부 중심선을 기준으로 고온균열 및 기공이 발생하였다. 그러나 Fig. 14와 같이 레이저 출력을 1800, 1900, 2000W일 때 니켈도금 시편은 용접속도가 1.0m/min, 니켈도금 되지 않은 시편은 1.5m/min 었을 때 균열이 발생하지 않았다. 고온균열이 발생하지 않은 이유는 키홀 하단부 및 상부의 경우에는 응고속도가 중심부에 비해 빨라서 균열이

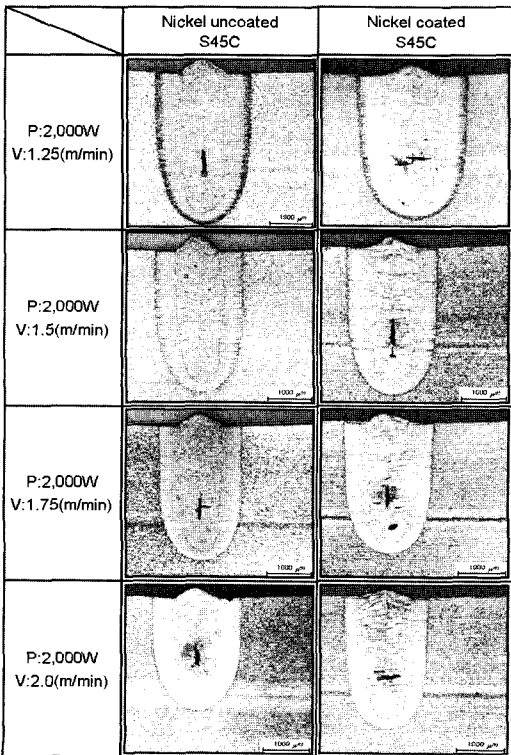


Fig. 13 The cross-sections of welding speed(BOP)

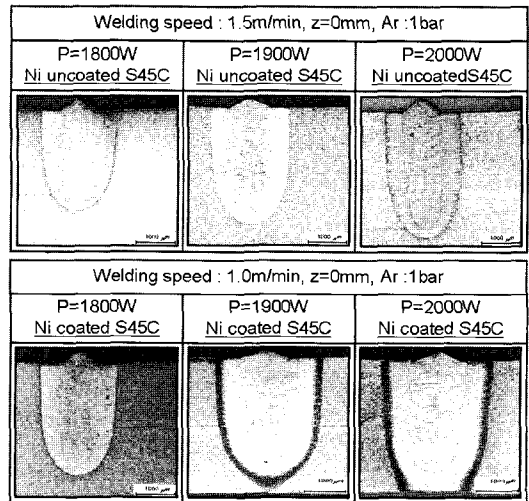


Fig. 14 optimum welding process parameter after bead on plate welding

발생할지라도 중심부에 아직 용액으로 잔류해 있는 액상에 의해 쉽게 매워졌기 때문이다. 그러나 Fig. 14의 결함이 있는 결과는 용융풀의 급냉각에 의한 수축응력만으로 균열이 발생할 때는 용접부 중심에서만 back healing 효과를 받지 못하여 고온균열이 발생한다.

Fig. 15은 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금 되지 않은 S45C강을 맞대기 용접한 후 단면조직을 관찰한 결과이다.

용접속도가 0.75m/min일 때 니켈 도금된 시편의 경우 용접선 중심부는 침상 마르텐사이트가 모재쪽으로 방향성을 가지면서 성장하고 있다. 열영향부 즉 모재와 가까워 질수록 마르텐사이트 조직이 입상정 형태로 변화된 것을 알 수 있다. 이것은 에너지 밀도가 높은 레이저 빔이 시편에 조사되어 용융된 시편에 대해 빠른 속도로 레이저 빔이 진행하면 시편이 급랭되면서 γ -격자는 작은 α -격자에 겹치게 되고 하

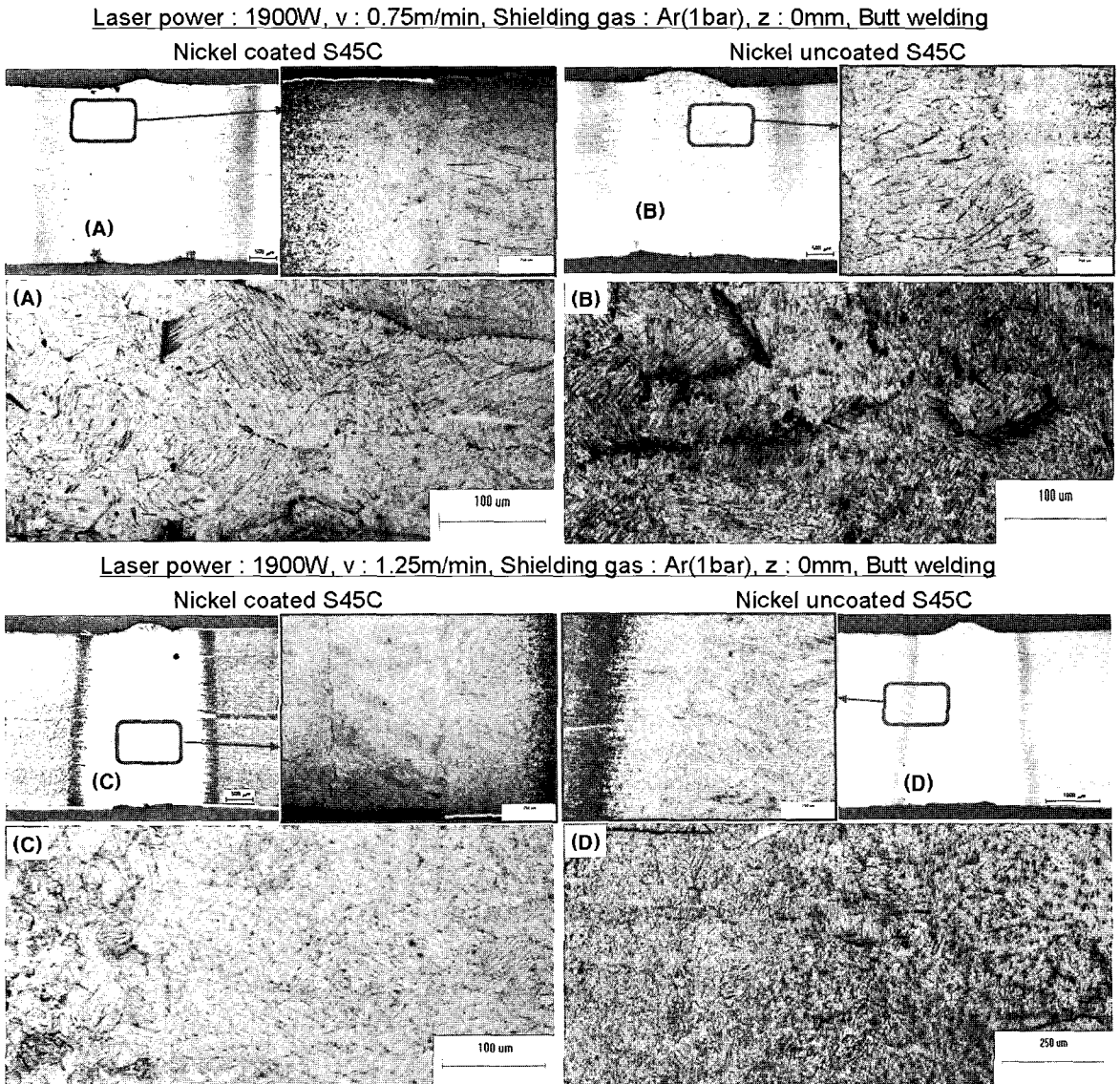


Fig. 15 Influence of the micro structure for welding zone according to welding parameters

나의 철원자로 채워진 공간격자에는 속박용체를 가진 탄소 원자가 채워진다. 이 강박상태가 격자를 왜곡시킴으로써 재질이 매우 강하게 되고 침상조직인 마르텐사이트로 된 것이다. 열 영향부의 경우 용접금속은 대기에 열이 손실되는 것은 물론 금속이 용접됨으로써 전도에 의한 금속 열 추출 때문에 매우 급속한 냉각상태로 응고된 부분이다. 모재는 페라이트와 펄라이트조직으로 구성되어 있다.

합금원소의 영향으로 니켈은 오스테나이트 안정화원소로 연강에서 고온균열감수성을 증가시킨다. Rollason과 Roberts는⁽⁶⁾ 정해진 S함량에서 니켈이 결정입계에서 황화물을 증가시켜 고온균열을 조장한다고 하였다. 용접금속의 모양의 경우에 단면적에 대한 용접금속의 크기가 큰 경우 작은 경우에 비하여 고온균열의 위험성이 큰 것으로 보고 있다.

Fig. 15는 입열량이 큰 공정과 입열량이 낮은 공정에서 각각의 맞대기 용접부의 미세조직을 고찰한 것이다. 그리고 각각의 니켈 도금된 S45C와 니켈도금되지 않은 S45C를 비교하였다. Fig. 15 (A)와 Fig. 15 (B)는 입열량이 큰 공정일 때 용접부 입계면에 형성된 조직을 나타낸 것이다. 용접속도가 느리게 진행함으로써 높은 입열량이 발생되어, 용융부의 입계면에 미세한 마르텐사이트가 형성되었다. 그리고 니켈 도금 되지 않은 시편의 경우(B) 용융부에 입계면에서 탄화물이 모재방향으로 형성되는 것을 볼 수 있다. 이와 다르게 니켈 도금된 시편의 경우(A) 니켈 도금되지 않은 시편에 비해 이런 현상이 뚜렷히 관찰되는 않는다.

Fig. 15 (C)와 Fig. (D)는 입열량이 낮은 공정에서 용접부 입계면을 고찰한 것이다. Fig. 15 (C)는 Fig. 10에서 설명한 내부결함 때문에 인장시험편 제작 작업시 자연적으로 파단되었던 공정이다. 용접중심으로 2/3가 균열이 중앙선 방향으로 형성되었다. 이런 현상은 레이저빔이 맞대기 용접시 맞대어지는 부분의 계면에서 난반사가 일어나는데 니켈성분의 영향으로 키홀발생을 억제하여 용접부의 결함을 유발시켰다.

용접속도가 증가할수록 입열량이 작아져 대부분 발생된다. 그리고 Fig. 15 (D)와 달리 용접선을 중심으로 균열이 발생하였고, 용접부의 입계면에 기공이 발생하였다. 일반적으로 용접금속의 주상정이 미세하면 할수록 고온균열의 발생가능성은 크게 감소하게 된다. 이것은 주상정이 미세할수록 입계에 편석 되는 양이 줄어들게 되어 저용점화합물을 형성하는 양이 줄어들기 때문이다.

후 기

위 논문은 조선대학교 2006년 교내학술연구비지원으로 연구하였습니다.

4. 결 론

본 연구에서는 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강의 맞대기 용접 특성을 고찰하였다.

- (1) 니켈 도금된 S45C강과 니켈 도금되지 않은 S45C강의 레이저 용접특성을 비교했을 때 내부결함 즉 고온균열 및 기공의 발생의 빈도수는 차이가 나타나지 않았다. 그러나 레이저빔이 조사되는 표면비드에서는 니켈 도금된 시편이 스패터 현상이 다량으로 발생하여 용접부의 열화현상을 증가시켰다.
- (2) 맞대기 용접시 니켈 도금된 S45C의 경우 용접속도가 1.25m/min으로 증가할 경우 냉간균열 및 용입불량이 발생하여 자연적인 파단현상이 발생하므로 적절한 용접 공정을 선택하는 것이 매우 중요하다.
- (3) 니켈 도금된 S45C강의 최적 레이저 용접공정은 입열량 (E)이 $3.5 \sim 3.9 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이다.
- (4) 니켈도금은 레이저빔의 파장 $1.06 \mu\text{m}$ 일 때 아연이나 프 라이머 도금에 비해 용접성은 그다지 나쁜 편은 아니다. 그러나 레이저빔의 반사되는 양이 철에 비해 많기 때문에 불연속으로 레이저빔이 전도되면서 고온균열의 발생 빈도가 높다.

참 고 문 헌

- (1) Benyounis, K. Y., Olabi, A. G. and Hashmi, M. S. J., 2005, "Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 978~985.
- (2) Benyounis, K. Y. and Olabi, A. G., 2005, "Optimizing the laser-welded butt joints of medium carbon steel using RSM," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 986~989.
- (3) Olabi, A. G., Casalino, G., Benyounis, K. Y. and Hashmi, M. S. J., 2006, "An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO2 laser welding," *Advances in Engineering Software*.
- (4) Sun, Z. and Kuo, M., 1999, "Bridging the joint gap

- wire feed laser welding,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, pp. 213~222.
- (5) John F. Ready, 2001, “LIA Handbook of Laser Materials processing,” LIA. Magnolia Publishing Inc., pp. 223~262.
- (6) Khallaf, M. E. and Ibrahim, M. A., 1997, “On crack susceptibility in the submerged arc welding of medium-carbon steel plates,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 43~49.
- (7) Noh, Y. T. and Kim, B. C., 2001, “Welding behavior between Zn-coated steel plate and free cutting carbon steel rod by Nd:YAG laser beam,” *Journal of KSLP*, Vol. 4, pp. 30~39.
- (8) Jeong, H. C., 2002, High Temperature Crack on Welding Parts of Carbon Steel, Welding Research Team of Technology Research Center of POSCO.