

SM45C의 연속파형 Nd:YAG 레이저 용접시 발생하는 기공과 결함의 감소

유영태[#], 오용석^{*}, 노경보^{*}, 신호준^{*}, 임기건^{**}

Decrease of Porosity and Cracking in the cw Nd:YAG Laser Welding of SM45C

Young-Tae Yoo[#], Yong-Seok Oh^{*}, Kyoung-Bo Ro^{*}, Ho-Jun Shin^{*} and Kiegon Im^{**}

ABSTRACT

The effect of pre-heating on the mechanical properties of laser welding joints has been investigated for the case of SM45C carbon steel welded by a cw Nd:YAG laser. The occurrence of porosity and cracking was inspected in various welding conditions to find the optimal welding parameters. The results of laser welding experiment with pre-heating technique showed that porosity and cracking can be reduced significantly in most of welding conditions and the welded joints have improved mechanical properties, such as higher tensile strength and better durability.

Key Words : Laser welding(레이저용접), Welding Condition(용접조건), Hot cracking(고온균열), Porosity(기공)

기호설명

F = Optical focal length
D = Lens diameter
F# = F number : F/D
z = Focal position
s = Welding speed
HAZ = Heat affect zone
P = Laser welding power

1. 서론

별도의 용가제를 필요로 하지 않는 레이저 용접은 열영향부(Heat Affect Zone: HAZ)가 작기 때문에 변형이 작고 고정밀 용접이 가능하여 최근 산업현장에서 다양하게 응용되고 있다. 공작기계의 각종 축과 나사 기어 등에 사용되어지고 있는 SM45C는 인성, 강성이 풍부하고 시효변화가 없는 주축용 재료로써 내연기관이나 주요부품의 기계구조에 사용되고 있다. 이러한 부품의 가공을 위해 레이저 용

접수일: 2003년 3월 4일; 게재승인일: 2003년 7월 11일
교신저자: 조선대학교 기전공학과
E-mail: ytyou@chosun.ac.kr, Tel: (062) 230-7016
* 조선대학교 대학원
** 전남대학교 물리학과

접이 최근 많이 이용되고 있으나 용접시 공정변수와 작업자의 숙련정도에 따라 용접결함의 발생 유무가 달라지게 된다.

용접부의 결함은 블로홀, 균열, 언더컷, 용입부족 등의 용접결함과 각 변형과 같은 용접에 의한 변형 등이 있다. 이러한 결함은 강도 및 그 신뢰도에 영향을 미친다. 이와 같은 결함 이외에도 용접단면이 용접하는 재료와 공정에 따라 기공이 발생하기도 한다. 기공이 발생하면 용접부의 접촉하고 있는 유효 단면적이 작아져 강도가 약해진다. 이와 같은 이유로 용접부의 기공을 최소화하는 것은 금속재료 용접의 강도 문제에 있어서 중요한 요인이 된다.

기공발생 원인으로는 대기중의 습기, 모재의 내부에 함유된 수소나 표면에 부착된 수분, 이물질, 보호가스의 불순물 혼입 등을 들 수 있다.

용접부의 기공발생에 따른 문제점 때문에 기공의 발생을 억제하기 위해 Kurihara,¹ Collins²와 Fukui³는 보호가스를 변화시켜 기공최소화 연구를 실시하였다. Uchida⁴는 모재 표면에 부착된 수분이 나 이물질을 중심으로 기공발생에 미치는 영향을 연구하였다.

경험에 의하면 레이저 용접의 경우 최적의 공정변수가 아닐 경우 기공이 발생되어 용접부의 유효접촉면적이 작아져 용접부의 강도가 현저히 떨어진다.

레이저 용접의 경우 용접부의 결함으로 기공 못지 않게 용융부 중심부에 수직으로 발생하는 고온균열도 용접부 건전성 평가에 중요한 요인이 된다. 레이저 출력을 크게 하고 레이저빔 이송속도를 감소시키면 심입용접이 가능하지만 고온균열이 발생하기 때문이다.

그래서 본 연구에서는 레이저 용접시 종횡비(용입비)가 큰 용접을 할 경우 자주 발생하는 고온균열과 기공을 최소화하기 위한 용접 공정변수를 실험적으로 연구하고자 한다.

실험하는 방법으로는 용접 전 레이저빔을 디포커싱하여 표면을 열처리한 다음 레이저 용접하고 기공과 고온균열의 유무를 확인하여 최적의 용접 공정변수를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장비

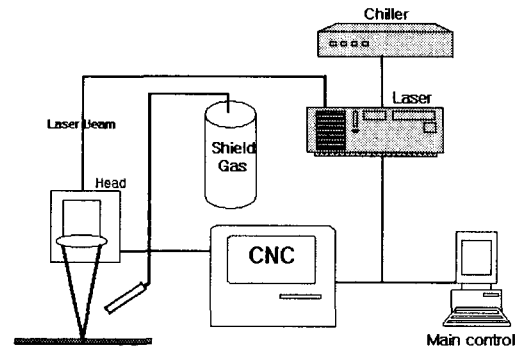


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

본 연구에 사용된 레이저는 최대출력이 2.8kW 인 CW Nd:YAG 레이저이며, 레이저빔은 직경 600 μ m인 광섬유를 통해 시편에 전달된다. 초점크기 (Spot size)는 0.6mm이다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 F=200 mm이고, 렌즈의 직경(D) 60mm인 F#(F number:F/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다.⁵

실험 장치에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타났다. SM45C를 Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스로 불활성 가스인 아르곤을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다.

아르곤 가스의 유량은 4l /min로 하였다. 이때의 용접속도를 1m/min로 하고, 초점위치를 z>0 방향으로 초점위치를 30~60mm로 변화시켜 디포커싱하면서 레이저 출력을 2kW로 하여 시편표면을 열처리하였다. 열처리한 후 레이저빔의 초점위치를 시편표면(z=0)으로 이동시킨후 레이저 용접 공정변수를 일정하게 해서 용접했다.

이와같이 Bead-on-Plate 방식으로 용접한 후 용접비드를 등간격으로 5mm씩 6개 부분으로 절단하여, 열처리하고 용접한 경우와 열처리를 하지 않고 용접한 경우의 용접단면을 관찰하였다.

용접부위 외관은 광학현미경(Olympus, 배율×10~×60)을 사용하여 관찰하였다. 용접단면의 비드모양과 단면의 조직을 관찰하기 위해 와이어 커팅으로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 폴리싱 후 5% perchloric acid + 95% methanol을 사용하여 에칭하였다. 에칭한 시편에 대해서는 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 용접부의 형상과 결함을 관찰하였다.

2.2 시편

본 연구에서 사용된 시편은 기계구조용 중탄소강(wt%: 0.42~0.48C, 0.15~0.35Si, 0.90Mn, ≤ 0.03P, ≤ 0.035S)이며, 용접 시편의 크기는 100mm(L) × 50mm(W) × 4.5mm(T)의 크기로 제작하였다.

용접시 시편 표면의 이 물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시켜 가면서 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 디포커싱된 초점크기 및 열영향부

기계구조용 중탄소강인 SM45C를 레이저 출력, 레이저빔 이송속도, 레이저빔의 초점거리등을 변화시켜가면서 용접하였다.

재료의 반사율과 열전도율 및 전기전도도에 따라 레이저빔의 흡수율이 다르고 초점위치에 따라 시편의 표면에 미치는 열영향부가 다르기 때문에 레이저빔의 초점위치를 30mm에서 60mm 까지 변화시켜가면서 레이저빔을 조사하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 각 초점위치에서 레이저빔의 조사 시간은 180ms 이다.

Fig. 2의 실험결과에 의하면 초점위치에 따라

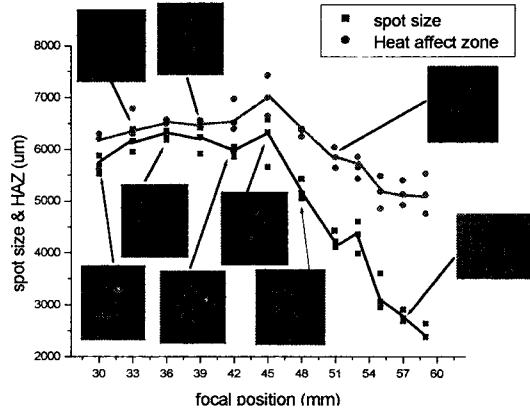


Fig. 2 Spot size & Focal position

용융부와 열영향부의 분포율이 다르게 나타났다.

초점위치가 $z < 39$ 인 경우에는 대부분의 용융부가 초점면적의 대부분을 차지하고 있다.

그러나 초점위치가 $z > 39$ 이상에서는 용융부 비율이 급속히 감소하고 상대적으로 열영향부 면적이 커지고 있다. 그 이유는 초점위치가 시편으로부터 멀어짐에 따라 레이저빔의 에너지밀도는 떨어지고 상대적으로 표면에서 반사율이 커지기 때문으로 판단된다.

focal position(mm)	30	33	36	39
spot				
focal position(mm)	42	45	48	51
spot				
focal position(mm)	53	55	57	59
spot				

Fig. 3 Focal position & Spot

Fig. 2에 나타낸 초점의 형태를 보다 자세하게 관찰하기 위해 광학현미경(Olympus, 배율× 10 ~ × 60)을 사용하여 Fig. 3에 나타냈다.

Figs. 2~3의 결과에 의하면 z=39까지는 용융부와 열영향부의 면적 차이가 크지 않으나, z=45부터는 용융부의 크기는 급속히 줄어들고 열영향부는 상대적으로 크게 나타나, 레이저빔을 흡수하는 영역은 전체적으로 급속히 줄어들고 있다. 초점거리가 시편표면으로부터 거리가 작은 30mm인 경우에는 레이저빔의 에너지밀도가 높아 증발원소의 반발력에 key hole이 쉽게 형성되는데, 완전용입이 형성되지 않을 경우 플라즈마 가스와 스페터가 위로 분출되고 다른 한편으로는 응고과정에서 수축으로 인한 가스가 분출하게 되는데 그 반발력으로 초점표면에 기공이 크게 발생하였다.

초점위치를 시편으로부터 멀리할수록 용융부의 면적은 적어지고 모재에 대한 온도구배가 매우 커서 열이 급속히 냉각하게 되는데, z=39mm에서는 용융 pool이 입열량에 비해 용융된 표면의 유동성이 떨어지면서 초점면 원주 방향으로 열이 전달되어 방사상으로 등축 수지상 조직이 초점표면에 나타났다. 그 후 z>39부터는 급속히 용융부 면적이 전체면적에 비해 줄어들어 z=53mm부터는 용융부가 거의 나타나지 않았다.

3.2 용접특성

Fig. 4는 연속파 Nd:YAG 레이저 용접에서 유량 4l/min, 빔이송속도 1m/min, 초점위치 z=0 으로 고정시켰을 경우, 레이저 출력을 1000W에서 2000W까지 증가시키면서 Bead-on-Plate 방법으로 실험한 결과를 보여주고 있다. 출력이 낮은 경우에는 일반적인 용접에서 볼 수 있는 표면열원에 의한 용접부 용입형상과 비슷한 형태를 보이다가 출력이 커지면서 용입깊이가 거의 선형적으로 깊어짐을 볼 수 있었다.

출력이 1200W인 경우에는 충분히 열을 흡수하지 못해 모재의 용융된 면적이 작고, 용융물의 유동성이 저하되어 용융 pool 내부에 발생한 기포가 확산되어 표면 위로 방출하지 못하고, 용융 표면이 급속히 응고되기 때문에 내부에 포획되었다.

레이저빔이 시편에 조사되면 재질의 입자는 입사파의 진동수로 진동하며 전자파를 재방출하고 전자-진동자가 표면가까이에 놓인 전자들이 입사된 빛에 의해 진동하게되며 복사에너지를 방출하게된

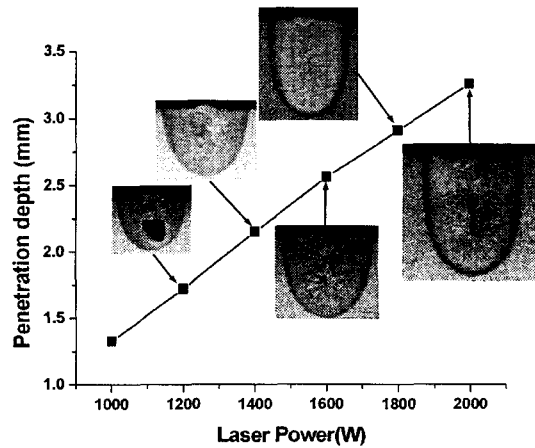


Fig. 4 Effect of laser power on the weld penetration (P=1~2kW, S=1m/min, z=0, Ar=4 l/min)

다. 이때 SM45C의 조성분중에 MnS와 FeS의 용융점은 1100~1200℃인데 비해서, Fe는 1538℃이기 때문에 철이 용융되기 전에 MnS와 FeS가 용융되어 기포가 형성되고, 이 기포가 부력 때문에 용융풀에서 상승한다. 이때 레이저빔이 빠른 속도로 진행하면 열의 냉각속도가 빠르기 때문에 용융풀이 표면에서 냉각되어 기포가 중간에 포획된 것이다.

출력 1800W 이상에서는 최종 응고부인 용접금속 중앙부에 수직으로 고온균열(Hot Cracking)이 발생하였다. 이는 용접열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성분에 포함되어있는 P, S, C 성분이 원인이라 사료된다.

즉, P는 용점이 낮아 국부적으로 응고온도를 낮추어 고온균열 감수성을 증가시키고, S은 C와 비교해서 확산에 의한 이동속도가 늦어서 응고중에 편석이 심하게 일어나기 때문에 균열감수성을 증가시킨다. 또한 C는 오스테나이트 안정화원소로 고온균열을 촉진하는데 Borland는 0.15%C 이상에서는 고온균열이 발생한다고 하였다.^{6,7}

특히 2000W로 하여 용접폭에 비하여 용접깊이가 깊어지면 고온균열현상이 현저하게 관찰되고 있다. 이것은 레이저빔이 시편에 조사되었을 때 가열 및 냉각 사이클에서 모재가 가지고 있는 온도에 비해 용융부의 온도는 매우 높기 때문에 온도구배가 급격하여 응고시 조직사이에 미세응력이 국소적으로 존재하게되고, 용접부가 응고하는 단계에서 용융부의 상부와 하부가 응고하면서 중심부에 아직 용액으로 잔류해 있는 액상에 의해 메워지지 못하

고 균열이 발생하였다.

용접 고온균열은 용융pool의 경계면인 고-액 경계면에서 응집력이 용접부와 수직방향으로 가해진 응력보다 낮을때 용접선 중심을 따라 균열이 발생되는 현상을 반드시 최소화해야 한다.

그러므로 본 연구에서는 Fig. 4에 나타나있는 고온균열을 최소화하기 위해 시편을 디포커싱하여 열처리한 다음 용접을 실시하였다.

3.3 고온균열

Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 고온균열의 발생에 대한 모식도와 고온균열이 발생한 비드 종단면과 횡단면을 나타내었다. 비드의 중심부를 용접방향과 동일한 방향으로 절단한 횡단면의 모식도와 사진에서 고온균열이 비드의 모든 부분에서 발생하지 않고 용접비드의 일부 구간에서 불규칙적으로 발생함을 알 수 있다.

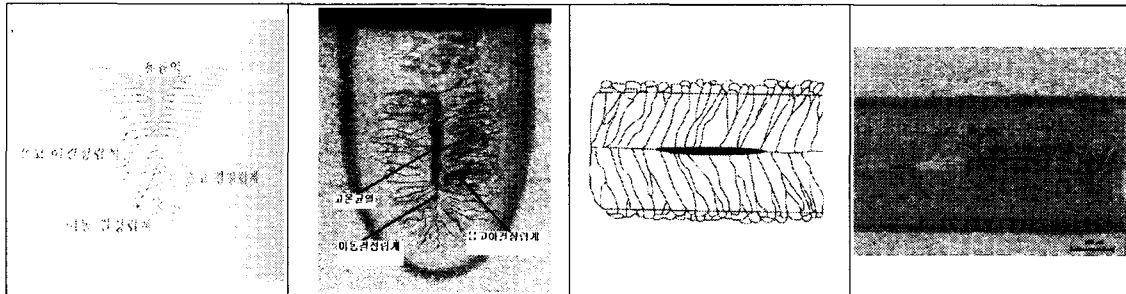


Fig. 5 Schematic and picture of welding hot cracking

Defect type	Hot cracking	Hot cracking	No defect
2kW, z=0, s=1m/min, Ar=4 ℓ/min (fixing by a Jig)			
Defect type	No defect	Porosity Transvers crack	Hot cracking
2kW, z=0, s=1m/min, Ar=4 ℓ/min (fixing by a Jig)			

Fig. 6 Welding cross-sectional area fixing by a Jig in case of no heat treatment

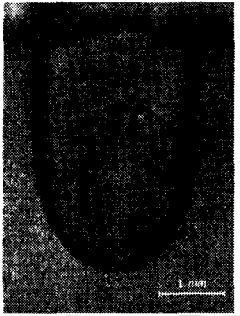
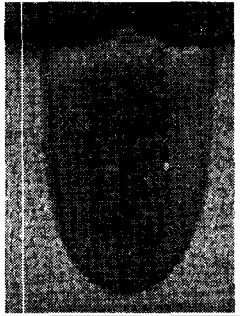
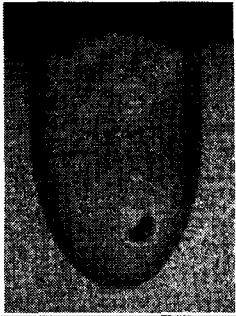
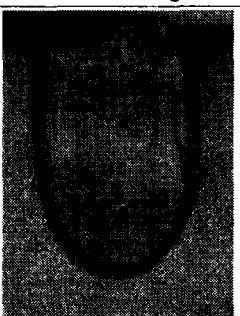
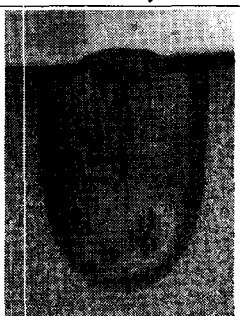
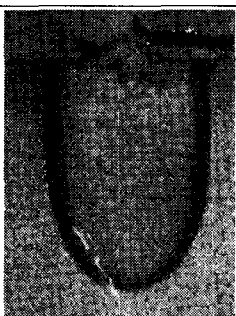
Defect type	Porosity	Porosity	Porosity
2kW, z=0, s=1m/min, Ar=4 l/min (no fixing by a Jig)			
Defect type	hot cracking	Porosity	No defect
2kW, z=0, s=1m/min, Ar=4 l/min (no fixing by a Jig)			

Fig. 7 Welding cross-sectional area in case of no heat treatment and Jig

이 고온균열을 최소화하기 위해 시편 표면을 디포커싱하여 열처리 한 다음 용접 공정변수를 변화시키면서 용접하고, 각각 시편의 비드면을 5mm씩 6개 부분으로 시편을 절단하였다. 절단된 비드면에서의 기공 및 고온균열 등의 결함을 분석하기 위해 Figs. 6~10에 나타내었다.

용접부의 고온균열 감수성에 영향을 미치는 금속학적인 인자는 소재 및 용접재료의 화학조성, 용입률, 용접부에서 응고 마지막 단계까지 남아있는 액상의 조성 및 입계젖음성(wettability), 용접부의 응고모드, 불순물 원소 및 합금원소의 편석등 대단히 많으며 용접방법과 용접조건, 지그 등의 용접시공조건도 소재의 균열감수성에 영향을 미친다.

Fig. 4에 나타난 용접 공정변수를 중심으로 고온균열을 분석하기 위해 레이저 출력력을 2kW, 초점 위치를 z=0, 빔이송속도를 1m/min, 보호가스는 Ar=4l/min로 하여 레이저빔이 조사된 비드를 6개 부분으로 절단하여 Figs. 6~7에 나타내었다.

Fig. 6은 시편을 지그(Jig)로 고정하지 않고 용접한 경우이고, Fig. 7은 시편을 지그로 고정한 다음 지그 고정여부에 따른 용접결과를 나타낸 것이다.

시편을 지그로 고정한 경우와 고정하지 않고 용접한 경우 모두 내부에 고온균열이 발생하였다.

그러나 지그로 시편을 고정하고 용접을 실시할 경우 외부의 구속조건 때문에, 지그를 고정하지 않고 용접했을 때 보다 균열이 더 심하게 발생하였다. 산업현장에서는 작업의 안전성이나 반복 정밀성 때문에 지그로 고정한 다음 용접하는 경우가 대부분이기 때문에 지그를 사용했을 때의 용접영향을 주로 분석했다. 이때 발생할 수 있는 고온균열을 대표하는 응고균열의 경우 비드의 중앙부에서 용접 방향에 평행으로 발생한다.

이러한 응고균열의 발생기구는 수축-취성이론(shrinkage brittlement theory), 변형이론(strain theory), Borland 이론(generalized theory), 수정된 Borland 이론(modified generalized theory), 강도이론(technical strength theory)이 있다. 이들 이론의 공통점은 응고의 마지막 단계에서 액상 필름이 응고 결정립계를 따라서 존재함으로써 입계를 약화시켜 균열 발생한다는 것이다.

균열발생에 영향을 미치는 금속학적 인자로는 응고 초기의 상(相), 응고모드(solidification mode),

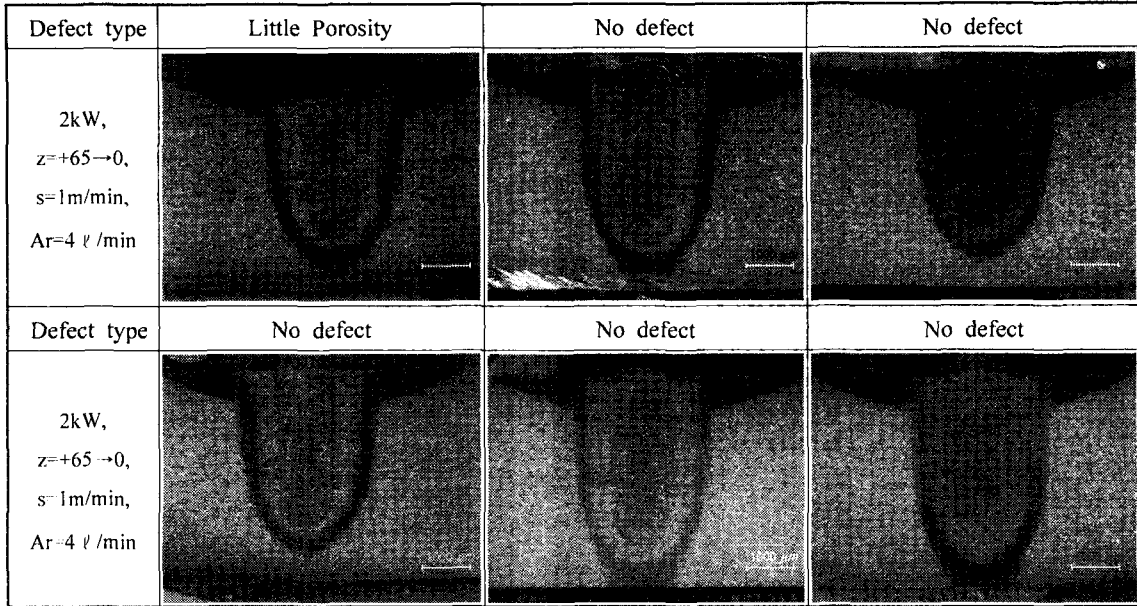


Fig. 8 Welding cross-section area after heat treatment ($z= +65 \rightarrow 0$)

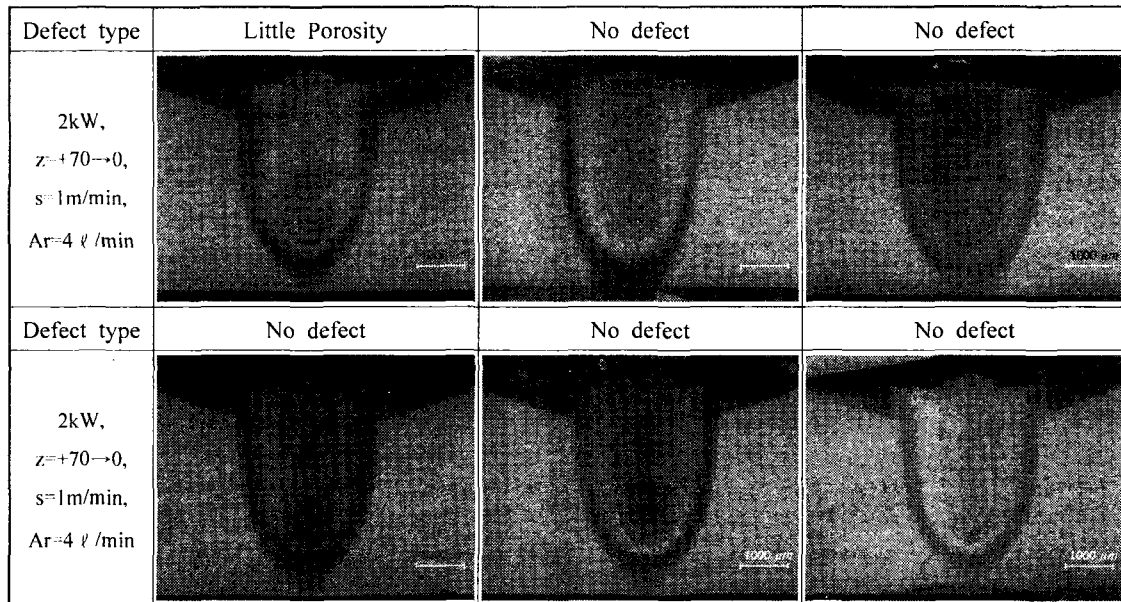


Fig. 9 Welding cross-sectional area after Heat treatment ($z= +70 \rightarrow 0$)

입계 편석물 및 저융점 개재물, 용접바드의 응고형태 등을 들 수 있다.

시공적인 측면에서는 용접조건, 지그에 의한 구속상태 등이 영향을 미친다. 이 중에서도 주된 발생

원인은 강중에 함유되어 있는 P, S, Cu 등의 불순물의 편석에 따라 형성되는 저융점 개재물로서, 이들의 최종 응고부의 입계에 존재함으로써 입계를 저온까지 취약하게 하는 것이다.

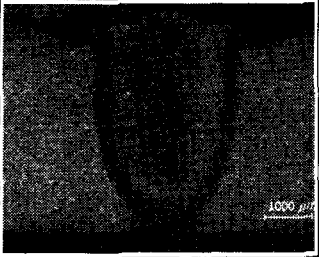
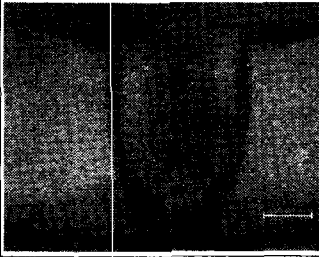
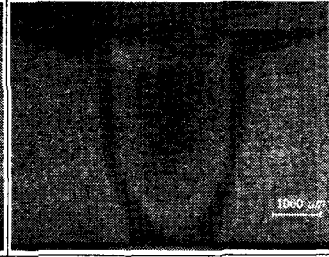
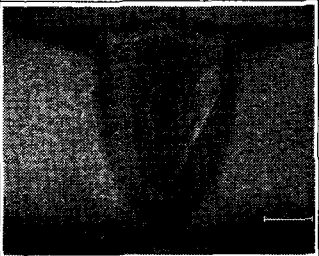
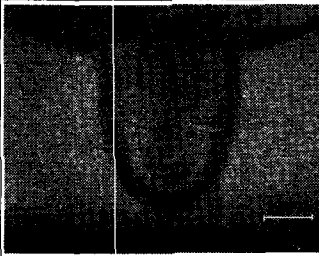
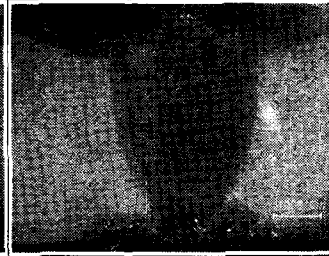
Defect type	No defect	Little Porosity	No defect
2kW, z=+75→0, s=1m/min, Ar=4 ℓ/min			
Defect type	No defect	No defect	Little Porosity
2kW, z=+75→0, s=1m/min, Ar=4 ℓ/min			

Fig. 10 Welding cross-sectional area after Heat treatment ($z= +75 \rightarrow 0$)

따라서 응고균열은 통상 조직입계를 따라 진전 된다. 응고 이동 결정입계(solidification migrated grain boundary)는 용접금속이 응고할 때 생긴 수지 상들이 마주쳐서 생긴 응고 결정입계이다. 응고후 냉각도중에 입계의 계면에너지를 최소화시키기 위해 이동되며 직선화된 결정입계를 응고 이동 결정입계라고 하는데 이때 용접부의 응고이동 결정입계에서 지그 등의 고정장치에 의해 발생하는 외부 구속력에 의해 구속도가 클수록 이동 결정입계에서 응고균열이 발생이 됨을 알수 있다. 이와같이 여러 가지 복잡한 현상 때문에 발생하는 고온균열과 기공을 최소화하기 위해 시편 표면이 용융되지 않도록 초점위치를 디포커싱하여($z=+65, +70, +75\text{mm}$) 열처리한 다음 초점위치를 $z=0$ 으로 하여 용접을 실시하였다.

이 경우도 역시 용접면을 등간격으로 6등분하여 용접단면을 Figs. 8~10에 나타내었다.

Figs. 6~7은 시편표면을 열처리하지 않고 용접할 경우 고온균열 및 기공의 결함이 6개 단면에서 1곳이나 2곳을 제외하고는 대부분 나타났다.

그러나 디포커싱으로 열처리한 후 용접을 한 Figs. 8~10의 경우 1곳이나 2곳의 용접바드에서 미세기공이 발생한 것을 제외하고는 결함이 없었다. 그 이유는 대부분 용접금속의 산소함유량은 모재에

비해 10배 이상 높은데 디포커싱으로 열처리하여도 레이저 열원에 의해 표면에 산소가 용입되었기 때문이다.

산소량이 증가하면 표면장력을 감소시켜 액상의 점성(viscosity)을 감소시키기 때문에 액상이 이동하기 쉽게 되어 이미 형성되어 있는 고온균열과 기공에 액상이 충전되어 균열과 기공이 개선된 것으로 판단된다.

4. 결론

연속파형 Nd:YAG 레이저로 SM45C의 용접시 발생하는 고온균열과 기공을 최소화 하기 위해 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열처리를 하지 않고 용접을 실시했을 경우 매우 조대한 기공과 고온균열이 발생하였지만 열처리후 용접을 실시했을 때는 몇몇 미세한 기공만 발생하였다.
- 2) 열처리 후 용접을 실시한 용접시편에서는 고온균열이 발생하지 않았다.
- 3) 용접시 지그 고정에 의해 발생한 시편의 외부 구속력은 용접부의 균열 발생에 영향을 미친다.

후 기

위 논문은 조선대학교 2002년 교비연구비 지원으로 연구하였습니다.

참고문헌

1. Kurihara, "The study of Inhibition of Blow hole in Corrosion- Resistant Aluminum Alloy Weld," *Welding of Metal*, Vol. 68, pp. 361-390, 1958.
2. Collins, F. R., "Porosity in Aluminum-Alloy Welds," *Welding Journal*, Vol. 37, No. 6, pp. 582-593, 1958.
3. Toshiyasu Fukui, Yoshihiko Sugiyama and Shiro Teral, "Effects of Nitrogen Gases Added to Argon Gas on MIG-Welding of Aluminum Alloys," *Transaction of the Japan Welding Society*, Vol. 1, No. 1, pp. 19-27, 1970.
4. Uchida, A., "Welding of Aluminum Alloys," *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 38, No. 9, pp. 955-969, 1969.
5. Kim, J. H., Park, D. H., "Porosity in Thick Aluminium Alloy Welds," *Korean Welding Society*, pp. 7-15, 1994.
6. The Korea Welding Society, *Welding & Conjugation Dictionary*, pp. 21, January 2001.
7. Jeong, H. C., "Weld Hot Creaking in C-Mn Steel," *Korean Welding Society*, Vol. 17, No. 5, 1999.
8. Borland, J. C., "Suggested Explanation of Hot Creaking in Mild and Low Alloy Steel Welds," *British Welding Journal*, Vol. 8, pp. 526, 1961
9. Lee, J. S., Hong, J. W., "Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds," *Korean Welding Society*, Vol. 17, No. 5, pp. 10-19, 1999.
10. Cho, W. K., Oh, T. Y., Kwak, D. S., "The Fatigue Crack Growth Behavior of Laser Welding Sheet Metal Due to Single Overload," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, pp. 854-858, 2002.