

S45C 기계구조용 중탄소강의 Nd:YAG Laser 용접성에 관한 연구

A Study on the Weldability of S45C Medium Carbon Steel for Machine Structural Use by Nd:YAG Laser

방 한서*, 김 영표**, 片山 聖二***

* 조선대학교 공과대학 선박해양공학과

** 조선대학교 공과대학 선박해양공학과 대학원

***大阪大學 接合科學研究所

ABSTRACT

This paper describes the weldability of JIS S45C medium carbon steel (same material with KS SM45C and SAE 1045) for machine structural use by Nd:YAG laser. This material have a limitation to the industrial application in spite of good mechanical characteristics. This is due to its difficult welding work from high carbon contents. We therefore have investigated laser weldability of this material to extend the application of medium carbon steel. The results of this study provide application possibility of Nd:YAG laser welding for medium carbon steel.

1. 서 론

내마모성 및 내구성이 요구되어지는 각종 축, 볼트, 기어, 기계부품 등의 용도로 사용되어지는 중탄소강(0.35~0.45% C)은 탄소량이 증가함에 따라 용접부위에서 수소에 기인한 저온 균열이 발생할 위험성과 기공이나 고온균열이 발생할 위험성이 많아져 용접시 충분한 주의가 필요하며 저온균열을 방지하기 위한 예열처리와 고온균열을 방지하기 위한 후열처리를 고려하는 등 일반적으로 아크 용접이 추천되어지는 탄소량 0.2% 이하의 탄소강에 비해 용접작업이 어려워 용접작업에 의한 제품 생산실적이 적다. 따라서 본 연구에서는 우수한 기계적 특성을 갖고 있음에도 불구하고 그 용도가 적은 기계구조용 중탄소강의 적용 폭을 레이저 용접을 적용 가능하게 함으로써 확대하고자 하였으며, 이를 위해 JIS S45C(KS SM45C, SAE1045 동종 강재)에 대한 기본적인 레이저 용접성을 2가지 종류의 Nd:YAG 레이저 장치를 이용하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

용접용 시편은 스미토모 금속(Sumitomo Metal Industries, Ltd)에서 생산한 S45C 중탄소강 (공업 규격대비 고온균열을 방지하기 위해 P와 S의 함량을 조절한 제품)을 사용하였고, 시편의 치수는 Fig. 1에 보인바와 같으며 화학조성은 Table. 1에 나타내었다.

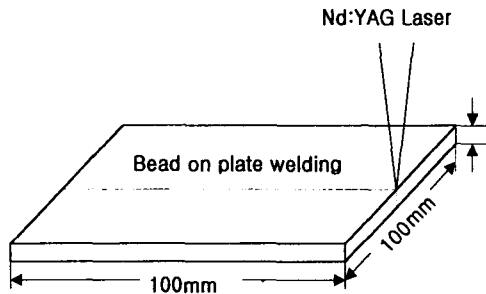


Fig. 1 Dimension of specimen

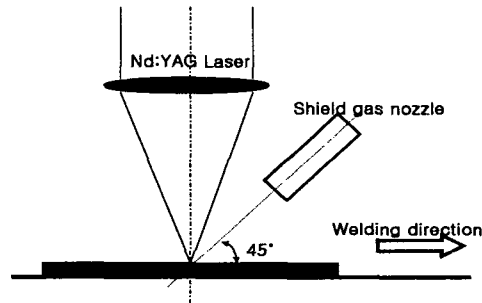


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

Table. 1 Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.45	0.22	0.78	0.009	0.004	0.02	0.02	0.08

본 연구를 수행하기 위하여 NEC 고출력 Nd:YAG 레이저 장치 및 MIYACHI Nd:YAG 레이저 장치를 사용하였으며 용접 실험장치의 모식도를 Fig. 2에 나타내었으며, 각 실험에 대한 펄스 지속 시간 및 파형은 Fig. 4 및 Photo. 3에 나타내었다.

용접은 시편의 표면을 연마 없이 아세톤으로 세척 및 건조시킨 후 비드온플레이트(Bead on plate) 용접을 행하였으며 보호가스로는 아르곤(Ar) 가스의 유량을 30 l/min로 하여 적용하였다. 또한 시편에 대한 Nd:YAG 레이저 용접의 용융 특성을 파악하기 위하여 주요 용접변수인 용접속도, 초점깊이, 레이저 출력과 특성, 펄스파형 등을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 용접이 완료된 시편에 대해서는 우선 Fig. 3에 보인 X-Ray 3차원 결함 측정기를 이용하여 기공 관찰 후 절단하여 용접부의 형상 및 균열 등을 광학현미경과 이미지 아날라이저(Image analyzer)를 이용하여 관찰하였다.

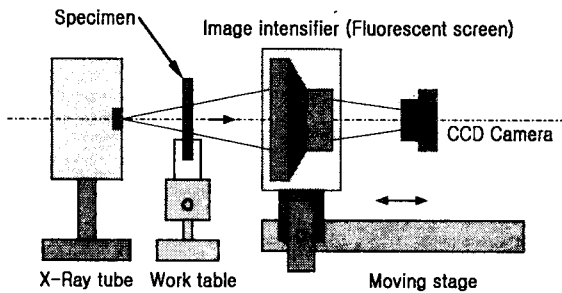


Fig. 3 Schematic arrangement of X-Ray transmission imaging system for observation of porosity

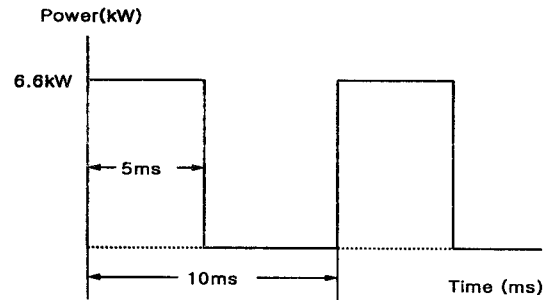


Fig. 4 Pulse condition of NEC Nd:YAG laser

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용융 현상 및 용접결함에 미치는 용접속도와 레이저 출력과 특성의 영향

연속파 Nd:YAG 레이저 용접의 출력 및 초점깊이(f_d)를 각각 3.3kW와 0mm로 고정하고 용접속도를 12.5mm/s~100mm/s 범위에서 변화시키면서 실험을 실시하였으며, 펄스파 Nd:YAG 레이저 용접의 출력 및 초점깊이(f_d)를 각각 6.6kW와 0mm로 고정하고 용접속도를 12.5mm/s~100mm/s 범위에서 변화시키면서 실험을 실시하였다. 이때 펄스파 연속 용접의 펄스 지속시간 5ms였으며 사용된 연속 및 펄스 레이저의 출력 선정은 동일한 평균 출력 값을 갖도록 고려되어졌다.

상기 실험을 통해 얻은 용입 깊이와 폭 및 단위 길이(1cm) 당 기공의 발생량과 용접속도의 관계는 Fig. 5에 나타낸 것과 같으며, 그 결과를 고찰하여 보면 용접속도가 증가할수록 용접부에 대한 입열의 감소로 인해 용입 깊이와 폭은 감소하고 있음을 알 수 있었다. 또한 펄스파 연속 용접을 12.5mm/s의 용접 속도로 실시하였을 경우 시편 두께 전체에 걸쳐 완전 용입을 얻을 수 있었으며 이때의 펄스 중첩도는 펄스 발생주파수 100Hz에 대해 약 84.4% 였다.

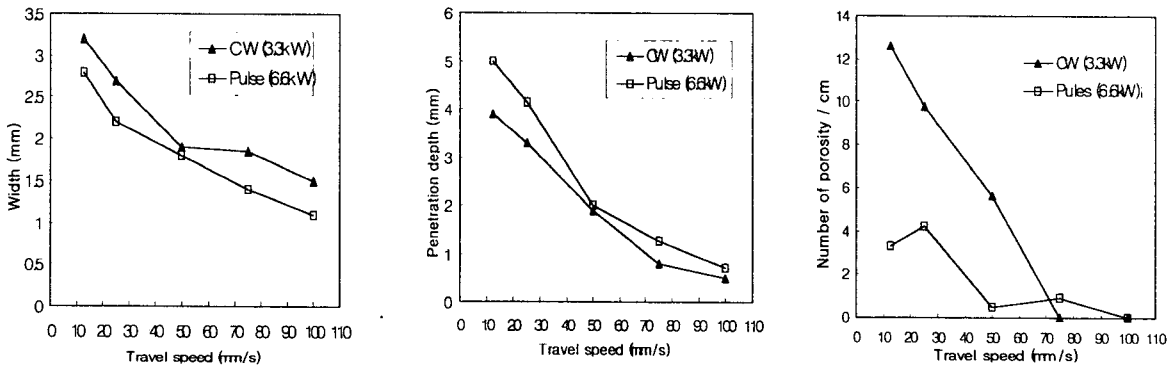


Fig. 5 Effect of travel speed on penetration depth, width and the number of porosity/cm

용입 깊이는 펄스와 연속 용접 쪽이 큰 값을 가졌으며, 폭은 연속과 용접의 값이 큰 것을 알 수 있었다. 따라서, 평균출력은 동일하더라도 짧은 시간에 큰 출력을 모재에 집중시킬 수 있는 펄스와 연속 용접 조건이 연속과 용접 조건에 비해 용입 깊이 측면에서 보다 효율적임을 알 수 있었으며, 이것은 시간 당 에너지밀도가 큰 펄스와 연속 용접 조건에서 시편의 깊이 방향으로 에너지 전달 효율이 컸기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 폭 방향으로는 연속과 용접의 경우가 에너지 전달이 더 많이 이루어졌음을 알 수 있었다. 50mm/s의 용접속도에서는 연속과 펄스와 연속 용접의 용입 깊이 및 폭의 차가 최소로 되었다.

CW, P=3.3kW, $f_d=0$, V=12.5mm/s			Pulse, P=6.6kW, $f_d=0$, V=12.5mm/s		
CW, P=3.3kW, $f_d=0$, V=25mm/s			Pulse, P=6.6kW, $f_d=0$, V=25mm/s		
CW, P=3.3kW, $f_d=0$, V=50mm/s			Pulse, P=6.6kW, $f_d=0$, V=50mm/s		
CW, P=3.3kW, $f_d=-5$, V=25mm/s			Pulse, P=6.6kW, $f_d=-5$, V=25mm/s		
CW, P=3.3kW, $f_d=-2.5$, V=25mm/s			Pulse, P=6.6kW, $f_d=-2.5$, V=25mm/s		
CW, P=3.3kW, $f_d=+2.5$, V=25mm/s			Pulse, P=6.6kW, $f_d=+2.5$, V=25mm/s		

Photo. 1 Bead surface, cross section and X-Ray transmission image of porosities

Photo. 1은 각 조건에 따른 용접부의 용입 현상 및 X-Ray 투과 사진을 통한 용접부의 기공을 보여 주고 있으며, 용접속도 변화에 따른 연속과 용접과 펄스와 연속 용접의 비드 형상을 비교하여 보면 펄스와 연속 용접의 경우가 우수한 용입 특성을 보이고 있으나 언더컷과 스파터가 발생하여 양호한 용접 비드 표면을 얻을 수 없었다. 언더컷의 경우 펄스와 연속 용접의 전체에 걸쳐 관찰되었으며 스파터의 경우는 용접속도 12.5mm/s와 25mm/s의 경우에는 나타나지 않았으며 50mm/s에서 가장 많이 발생하였으나 균열은 양쪽 모두에서 관찰되어지지 않았다.

용접속도 변화에 따른 단위 길이(1cm) 당 기공의 발생량 측면에서는 연속과 용접 및 펄스와 연속 용접 모두 용접 속도가 증가함에 따라 기공의 발생이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 용접속도 증가에 따른 입열량의 감소에 기인한 것으로 생각되어진다. 그리고 75mm/s 이하의 범위에서는 연속과 용접의 경우가 펄스와 연속 용접의 경우보다 기공이 많이 발생함을 알았다. 또한, 용접 속도 12.5mm/s에서의 기공 발생정도가 25mm/s에서 보다 적은 이유는 모재의 완전 용입으로 인해 용접 작업 중 발생한 가스의 배출이 부분 용입의 경우보다 용이하였음을 알 수 있다. 또한 용접 단면 관찰 결과 기공의 위치가 주로 용접 단면의 중앙부 아래에 위치해 있음을 알 수 있었다.

3.2 용융 현상 및 용접결합에 미치는 초점깊이와 레이저 출력과 특성의 영향

연속과 Nd:YAG 레이저 용접의 출력 및 용접 속도를 각각 3.3kW와 25mm/s로 고정하고 초점깊이를 -5mm~+2.5mm 범위에서 변화시키면서 실험을 실시하였으며, 펄스 파 Nd:YAG 레이저 용접의 출력 및 용접 속도를 각각 6.6kW와 25mm/s로 고정하고 초점깊이를 -5mm~+2.5mm 범위에서 변화시키면서 실험을 실시하였다.

상기 실험을 통해 얻은 용입 깊이와 폭 및 단위 길이(1cm) 당 기공의 발생량과 초점깊이의 관계는 Fig. 6에 나타난 것과 같으며, 이때 초점깊이 -2.5mm~0mm의 범위에서 용입 깊이는 최대 값을 가지며 폭은 0mm로부터 벗어날 수 록 레이저빔의 에너지밀도가 작아져 큰 값을 갖는 경향을 나타내고 있다. 또한, 초점깊이의 변화에 따른 용입 깊이는 펄스와 연속 용접의 경우가 연속과 용접에 비해 큰 값을 가졌으며, 폭은 연속과 용접의 값이 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 3.1항의 경우와 마찬가지로 연속과 용접에 비해 펄스 파 연속 용접에서 시편의 깊이방향으로 효율적인 에너지 전달이 이루어 졌음을 알 수 있었으며, 폭 방향으로는 연속과 용접의 경우가 에너지 전달이 더 많이 이루어졌음을 알 수 있었다.

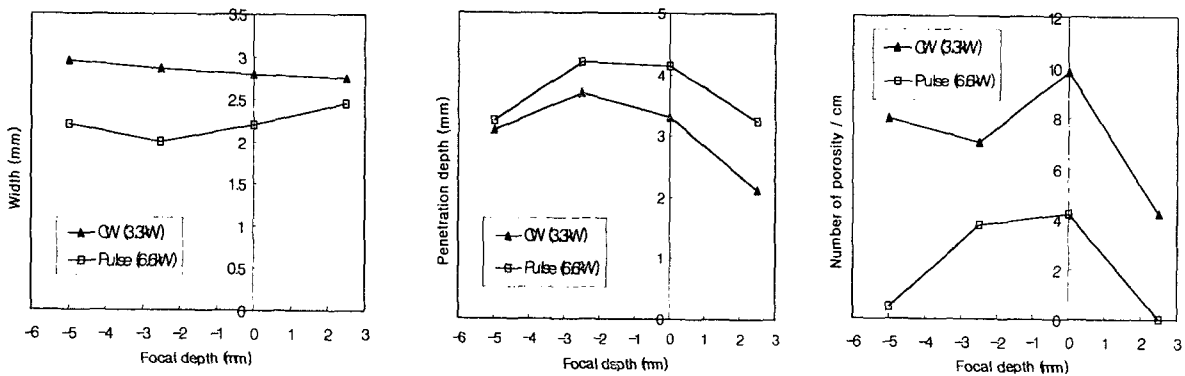


Fig. 6 Effect of focal depth on penetration depth, width and number of porosity/cm

Photo. 1에서 초점변화에 따른 연속과 용접과 펄스와 연속 용접의 비드 형상을 비교하여 보면 펄스와 연속 용접의 경우가 우수한 용입 특성을 보이고 있으나 언더컷과 스패터가 발생하여 양호한 용접 비드 표면을 얻을 수 없었다. 언더컷의 경우 펄스 파 연속 용접 전체에 걸쳐 관찰되었으며 스패터의 경우는 초점깊이 -5mm와 -2.5mm의 경우에 발생하였으나 균열은 양쪽 모두에서 관찰 되지 않았다.

초점깊이 변화에 따른 단위 길이(1cm) 당 기공의 발생량을 살펴보면 연속과 용접 및 펄스 파 연속 용접 모두 초점깊이 0mm에서 기공이 가장 많이 발생하였으며 초점깊이가 멀어질 수록 기공 발생이 감소하고 있는 경향을 보이고 있다. 이것은 초점깊이가 멀어질 수록 에너지 밀도의 감소에 따른 입열량 감소에 기인한 것으로 생각되어진다. 또한 연속과 용접의 경우가 펄스 파 연속용접에 비해 기공 발생량이 많음을 알 수 있었다. 또한, 용접 단면관찰 결과 기공의 위치가 주로 용접 단면의 중앙부 아래에 위치해 있음을 알 수 있었다.

3.3 레이저 용접부의 매크로 금속조직 특성

연속파 레이저 용접과 펄스파 연속 용접부의 매크로 조직을 관찰한 결과 양쪽 모두 용융금속 부위에서는 모재로의 빠른 열전도를 통한 급냉에 의한 비평형 조직인 마르텐사이트 조직이 전체적으로 관찰되어지고 있으며, 열 영향부에서는 용융 금속에 비해 그레인 경계가 조대화 되어졌음을 알 수 있다. 한편, 연속파 레이저 용접과 펄스파 연속 용접부의 매크로 조직은 거의 동일하였다.

CW, P=3.3kW, $f_d=0$, V=12.5mm/s, Shield gas : Ar (30 ℓ /min)	W.M	H.A.Z	B.M
Pulse, P=6.6kW, $f_d=0$, V=12.5mm/s, Shield gas : Ar (30 ℓ /min)	W.M	H.A.Z	B.M

Photo. 2 Macrostructure of Nd:YAG laser welds

3.4 펄스 레이저 점 용접시 균열 발생에 미치는 펄스 파형 및 에너지의 영향

용접 시편에 대한 용접균열(고온균열) 감수성을 추정하기 위해 펄스 레이저 점 용접을 실시하였으며, Photo. 3은 펄스 레이저의 파형 및 에너지 변화에 따른 레이저 점 용접부의 비드 표면과 균열 등을 매크로 사진을 통해 나타낸 것으로 사용된 펄스 지속시간은 직각파 및 변조파 모두 7ms 이며, 균열은 직각파 점 용접부의 비드 표면 중앙부에서 관찰되어졌으며, 이는 용접시 질량효과에 의해 표면과 중심부의 냉각속도 차이로 인한 표면에서의 인장응력에 기인한 소입균열로 생각되어진다. 한편, 각각의 직각파를 아래에 보인 것과 같이 파형 변조(0ms~2ms: 에너지 증가, 2ms~4ms: 에너지 유지, 4ms~7ms: 에너지 감소)를 시켜 용접한 결과 용접부 비드 표면에서 균열이 관찰되어지지 않았으며 이는 펄스 파형 변조에 따른 계단소입 효과에 기인된 것으로 추정되어진다.

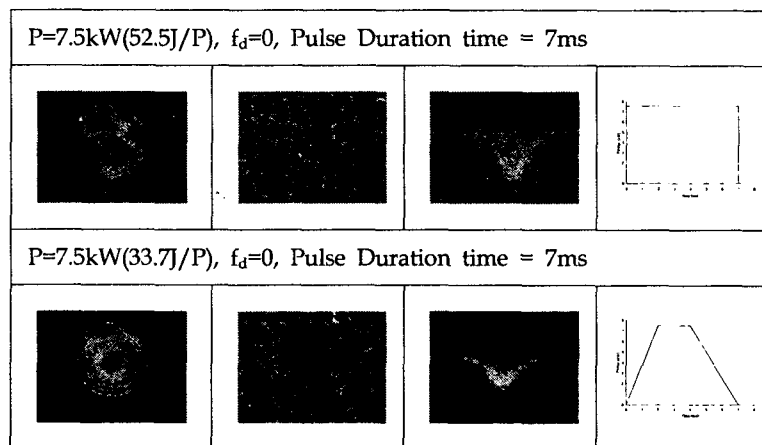


Photo. 3 Bead surface, Cross Section and Pulse Shape

이와 같은 파형 변조의 경우 전체 펄스에 대한 에너지 감소로 용입 특성은 직각파에 비해 용입특성은 저하되나 용접시 모재에 대한 급격한 열 사이클을 완화시킴으로서 균열을 제어할 수 있으며 합금성분 조절과 더불어 균열 제어를 위한 효과적인 방법임을 확인하고 이 두가지가 병행될 경우 그 효과가 큼을 알 수 있었다. 한편, 레이저 점 용접시 일정 강도 이상의 에너지가 모재에 투입될 경우 양호한 비드 표면을 얻을 수 없었다.

4. 결 론

S45C 기계구조용 중탄소강을 Nd:YAG 레이저로 비드온플레이트(Bead on plate) 용접을 실시하여, 용융 특성 및 용접결합에 미치는 주요 용접변수에 대해서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) Nd:YAG 레이저의 용입 특성 측면에서는 펄스 파 연속용접이 우수하였다.
- 2) 용접결합 중 기공 측면에서는 펄스 파 연속용접의 결과가 양호하였으며, 기공의 위치가 주로 용접부 단면의 중앙 아래에 위치하고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 용접결합 중 언더컷과 스파터 측면에서는 연속파 용접의 결과가 양호한 특성을 나타내었다.
- 4) 연속파 용접과 펄스 파 연속용접의 경우 모두 균열이 발생되어지지 않은 것은 합금성분(P와 S)의 조절에 기인한 것으로 사료되어진다.
- 5) 용융 금속부의 전반에 걸쳐 급냉으로 인한 비평형 조직인 마르텐사이트 조직이 관찰 되었다.
- 6) 직각파에 의한 레이저 점 용접시 균열이 비드 표면에서 관찰되었으나, 파형 변조를 통해 균열이 제어되었으며 이는 합금성분 조절과 함께 용접부 균열제어의 효율적인 수단임이 확인되었다.

참고문헌

1. W. W. Duley : Laser Welding, John Willy & Sons, Inc. pp25-63, pp114-136
2. Christopher Dawes : Laser Welding, McGraw-Hill, Inc. pp51-116
3. ASM : Metals Handbook, 8th Edition, Vol.6 Welding and Brazing, pp187-199
4. 김도훈 : 레이저가공학, 경문사, pp235-272
5. 대한용접학회 : 용접 · 접합 편람, pp46-55
6. S. Katayama and A. Matsunawa : Formation Mechanism and Prevention of Defects in Laser Welding of Aluminium Alloys, Proc. CISFFEL, IS, CEA&TWI, Toulon, France, Vol.1(1998), pp215-222
7. Fukuhisa Matsuda : Solidification Crack Susceptibility of Weld Metal, Recent Trends in Welding Science and Technology, International Conference Proceedings(1990), pp127-136
8. K.W.Carlson : The role of heat input in deep penetration laser welding, ICALEO 1985, pp49-57