

펄스 Nd:YAG 레이저를 이용한 모터용 스테이터 적층코어의 용접특성 [I] - 레이저 용접성에 미치는 가공변수의 영향 -

김종도† · 길병래* · 이창제**

(원고접수일 : 2006년 6월 30일, 심사완료일 : 2006년 7월 18일)

The Weldability of Laminated Stator Core for Motor by Pulsed Nd:YAG Laser [I] - The Effect of Processing Parameter on Weldability of Laser -

Jong-Do Kim† · Byung-Lea Kil* and Chang-Je Lee**

Abstract : Manufacture of motor by laser has been studying realization that was demands on market for lightening and miniaturization. Moreover, early in the 1980s, manufacture of parts for automobiles by laser welding was already successfully introduced. The purpose of this study was to develop production technology of the high quality laminated stator core for motor by pulsed Nd:YAG laser heat source. In the event of adjusting defocus and voltage to control humping in laser welding of the laminated core, sound bead could be obtained, but deep penetration was not. Therefore, explosive evaporating plasma was controlled by adjustment of peak power on pulse width. Particularly, because explosive evaporating plasma induced high peak power, made molten metal in keyhole scatter, a suitable adjustment of peak power was required to obtain sound bead. As a results of experiment, sound bead and deep penetration could be obtained.

Key words : Pulsed Nd:YAG laser(펄스 Nd:YAG 레이저), Laminated core(적층코어), Pulse width(펄스폭), Peak power(피크파워)

1. 서 론

모터는 펌프나 하역장치와 같은 구동부의 핵심부 품이다. 특히 이송수단의 고속화 및 고효율화의 문제와 더불어 경량화가 크게 부각됨에 따라 기존의 모터제조 공법으로는 모터의 경량화 및 콤팩트화가

어려워 새로운 가공기술이 고려되고 있는 실정이다. 더욱이 모터는 매년 소형경량화가 진행되는 가운데 고객의 요구는 점점 다양화되어 다른 제품과 마찬가지로 다품종·소량생산이라는 경향이 두드러지고 있다^[1].

특히, 모터의 주요부품인 적층코어의 외주환부쪽

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail:jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253

* 길병래(한국해양대학교 기관시스템공학부)

** 이창제(한국해양대학교 대학원)

을 최소화함으로써 코어의 경량화와 더불어 외주환 부폭 대비 코일의 감소라고 하는 이점을 얻을 수 있다. 그러나 기존의 프로세스로는 4mm이하로 외주환부폭을 가공하기 어려웠다^[2].

따라서 레이저를 이용한 모터의 제조로 경량화 및 콤팩트화라는 시장의 요구를 현실화하려는 연구가 진행되고 있으며, 1980년대 초경 자동차용 부품제조부분에서 이미 레이저용접이 도입되어 성공적으로 이루어지고 있다^{[3],[4]}.

그러나 레이저 용접기술은 기존의 가공기술과 비교하여^[5] 고정도(高精度)의 고속·저입열 용접에 따른 용접지배인자의 제어가 어려우며, 적층코어의 경우 적층판사이의 절연피막과 형성인자에 기인한 입열의 집중에 따른 제어의 어려움, 그리고 절연피막의 증발에 따른 기공 등의 결합형성이 문제시 되었다^{[6]-[8]}.

본 연구에서는 모터의 적층코어 용접에 펄스 Nd:YAG 레이저빔 열원을 적용하여, 용접수행 중 발생하는 각종 결함의 억제 및 방지를 위해, 그 발생 원인을 규명하고 적절한 가공인자를 도출함으로써 우수한 품질의 모터코어 제조기술 개발을 목적으로 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 약 0.3%의 규소(Si)가 함유된 무방향성 규소강판 PN60(JIS: 50A1300)으로 두께가 약 0.5mm^t인 모터용 규소강판이다. 그 화학적 조성을 Table 1에 나타낸다.

우선 규소강판을 외경 80mm× 80mm, 내경 ϕ 43mm의 모터코어형상으로 재단하였으며, 이때 외주환부폭은 4mm로 하였다. 다음으로 재단된 규소강

Table 1 Chemical compositions of Non-oriented Silicon Steel Sheet

Element Material	Si	C	Mn	P	S	Fe
PN60 (0.5mm ^t)	0.36	0.005	0.32	0.09	0.0087	bal.

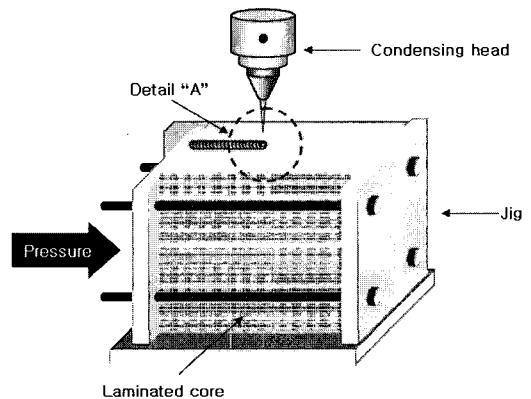
판을 적층한 후, 레이저의 가공인자 변화에 따른 적층코어의 엣지(edge)용접 특성을 각각 분석하였다.

2.2 Nd:YAG 레이저 용접장치와 실험방법

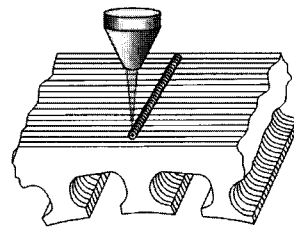
2.2.1 적층코어의 레이저 엣지용접

본 연구에 사용된 레이저용접기는 플래시램프(flash lamp) 여기방식의 펄스 Nd:YAG 레이저이다. 동축 실드가스 노즐(coaxial shield gas nozzle)을 사용하여 20 l/min의 Ar으로 용접부를 실드하였다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 적층된 규소강판에 엣지용접(edge welding)을 실시하여, 그 용접특성을 검토하였다. 재단된 규소강판을 적층한 후, 적층부에 간격이 생기거나 용접시 용접변형에 의한 적층판 사이의 간극변화를 없애기 위해 양측을 지지한 후 볼트로 고정하였다. 또한 기존의 아크용접과 달리 입열과 변형을 고려한 용접개소의 프로젝트션(projection)부를 두지 않았다.



(a) Schematic illustration of experiment



(b) Detail "A"

Fig. 1 Schematic illustration of edge welding

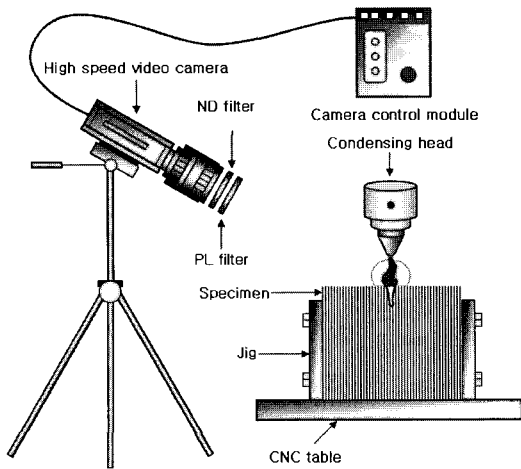


Fig. 2 Schematic illustration of high speed video observation system

2.2.2 레이저용접의 고속도 관찰

적층코어의 레이저용접시 재료표면에서 발생하는 유기 플라즈마의 동적 거동을 관찰하기 위해, 고속도 카메라를 이용하여 가시화 하였다. 본 관찰에 사용된 고속도 카메라는 Digital color CCD sensor's scanning Type을 채용하고 있으며, 최고 촬영속도는 10,000FPS(frame per second)로, 이때의 최소 셔터타임(shutter time)은 50 μ s이다. Fig. 2에 그 계측 시스템의 모식도를 나타낸다.

실험시 카메라의 시야각(viewing angle)과 해상도를 고려하여 촬영속도를 5,000FPS로 하였으며, 레이저용접시 유기하는 플라즈마의 동적거동을 관찰하기 위해 편광필터(polarizing filter)를 사용하여 플라즈마의 반사광을 제거하였다. 그리고 No.4 ND필터를 사용하여 플라즈마 전파장대역의 색온도(color temperature)를 1/4로 낮추어, 조리개에 의한 피사계 심도를 알게 함으로서 플라즈마에만 최대한 초점을 맞추었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저빔 출력특성에 따른 용입특성

3.1.1 비초점거리와 램프전압에 따른 용입특성
적층된 코어에서 재료의 용입특성을 검토하기 위해

코어의 형상인자에 따라 어떠한 영향을 받는지를 엷지용접조건에서 영역별로 조사하고 비초점거리(f_a)에 따른 용입깊이의 변화를 조사하였다. Fig. 3은 적층코어의 엷지용접시 램프전압별 비초점거리에 따른 용입깊이의 변화를 나타낸다.

Fig. 3의 결과로부터, 비드가 안정화되는 비초점 영역은 양(+) f_a 의 영역이 더 크다는 것을 알 수 있다. 특히, 양(+) f_a 의 비초점영역 중 용입이 급격히 낮아지면서 스패터(spatter)만을 발생하는 스패터 영역이 존재하는데, 이 영역은 음(-) f_a 의 비초점거리에서는 발견되지 않는 특별한 영역으로 음(-) f_a 의 비초점거리에서는 집광빔이 재료표면 아래의 내부에 위치하고 있어, 에너지가 집중되는 방향으로 조사되지만, 양(+) f_a 의 비초점에서는 에너지가 확산되는 방향으로 조사되기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다. 또한 양(+) f_a 의 비초점거리에서 비드의 천이 현상을 보이고 있다. 특히, 험핑영역을 벗어나면 용입이 급격하게 떨어지는 모습을 보이는데, 이는 적층에 의한 형상인자와 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

이상의 실험결과로부터 램프전압 260V가 초점거리의 영향을 크게 받지 않고 적정한 용입깊이를 확보할 수 있는 가장 유리한 조건으로 판단되었으며, 이하의 실험에서는 램프전압을 260V로 적용하였다.

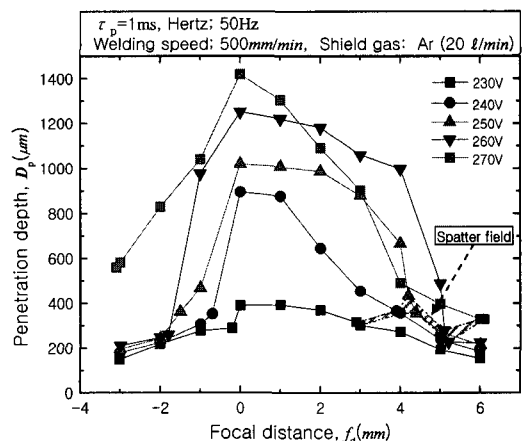


Fig. 3 Variation of the penetration depth according to focal distance and voltage

3.1.2 펄스폭에 따른 용접특성

비초점과 램프전압만으로는 깊은 용입을 갖는 건전한 비드를 얻기 어려웠다. 따라서 펄스폭을 조절하여 깊은 용입과 동시에 험핑을 제어하는 실험을 행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 여기에서는 펄스폭 1ms 이후부터 용입이 급격하게 증가하며, $\tau_p=6ms$ 부터 안정적인 비드가 나타나는 것을 알 수 있다. 이때 가장 깊은 용입을 나타내는 비초점거리 $f_d=-1\sim+3$ 의 구간을 조사하였다. 그 결

과, Fig.4(a)의 용입깊이 변화를 관찰하여 보면, 펄스폭 $\tau_p=2ms$ 에서 가장 깊은 용입을 보였으며 그 이후 용입이 점차 감소하는 모습을 나타내고 있다. 그러나 Fig. 4(b)의 비드폭 변화를 관찰하여보면 비드폭은 점점 증가하여 $\tau_p=6ms$ 을 정점으로 하여 다시 감소하는 모습을 나타내고 있다. 펄스폭 증가에 따라 용입은 감소하고 있으나 적층코어를 고정하기에는 충분한 용입을 얻을 수 있었다.

비초점거리가 $f_d=-1\sim+1$ 의 구간에서는 펄스폭 6ms에서 용입 및 비드가 안정되었으며, 비초점거리 $f_d=+2\sim+3$ 의 구간에서는 $\tau_p=5ms$ 에서 용입 및 비드가 안정화되었다. 이때 $f_d=-1$, $\tau_p=6ms$ 일 때 가장 깊은 용입과 넓은 비드폭을 얻을 수 있었으나, $f_d=+2$, $\tau_p=6ms$ 의 구간은 상대적으로 용입이 깊으나 비드의 안정성이 떨어지기 때문에 제외시켰다.

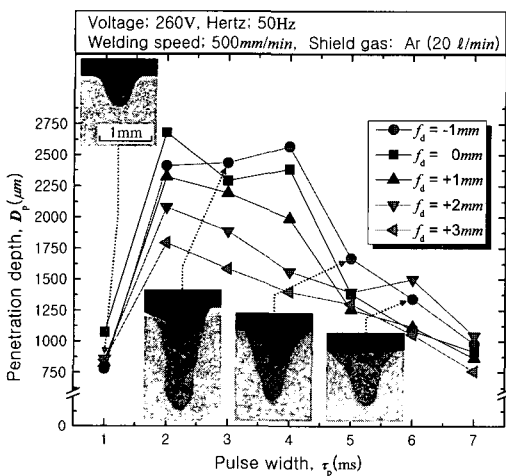
이는 펄스폭이 $\tau_p=2ms$ 이후, $\tau_p=6ms$ 까지 일정한 평균에너지를 유지하면서 피크파워만을 낮추어 높은 피크에 의한 플라즈마의 급속증발을 제어함으로써 험핑이 제어되는 것으로 판단된다.

3.2 레이저용접 현상의 분석

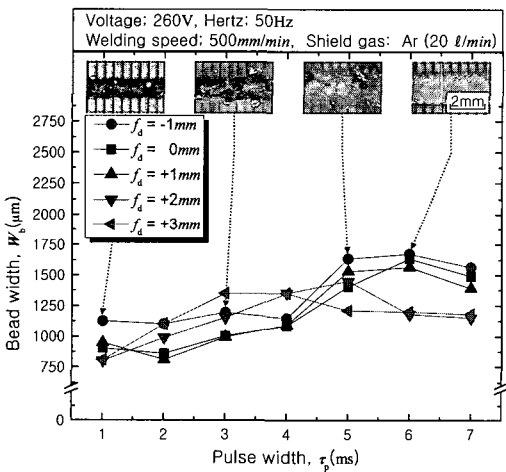
본 실험결과, 적층코어의 레이저용접시 펄스폭의 조절을 통하여 결함이 없는 건전한 비드를 얻을 수 있었다. 이때 결함제어의 주요인자는 펄스폭에 따른 피크파워의 가감으로 판단된다. 따라서 고속도 카메라 촬영을 통하여 용접현상을 가시화함으로써 적층코어와 레이저빔과의 상호관계를 조사하였다.

적층코어의 용접시 펄스폭에 따른 영향을 관찰하기 위하여 $\tau_p=2ms$, $\tau_p=4ms$ 및 $\tau_p=6ms$ 순으로 펄스폭을 조절하였다.

펄스폭 2ms로 용접시 비드 전구간에서 스패터의 비산과 함께 험핑이 유발되는 것이 관찰되었다. 레이저 조사시 일어나는 용접현상의 고속도 카메라 사진 및 레이저 출력파형을 Fig. 5(a)에 나타낸다. 레이저조사 후 용융지가 형성되고, $t+0.2ms$ 라는 매우 짧은 시간에 유기 플라즈마가 관찰되었으며, 약 $t+1.4ms$ 부터 스패터의 비산현상이 관찰되었다. 또한 $t+1.8ms$ 이후 플라즈마가 급격하게 감소하였는데, 이는 출력파형이 1.8ms 이후 급격히 감소하기 때문으로 추정된다.



(a) Penetration depth



(b) Bead width

Fig. 4 Variation of penetration depth and bead width in laminated core welded by Nd:YAG laser as a function of pulse width

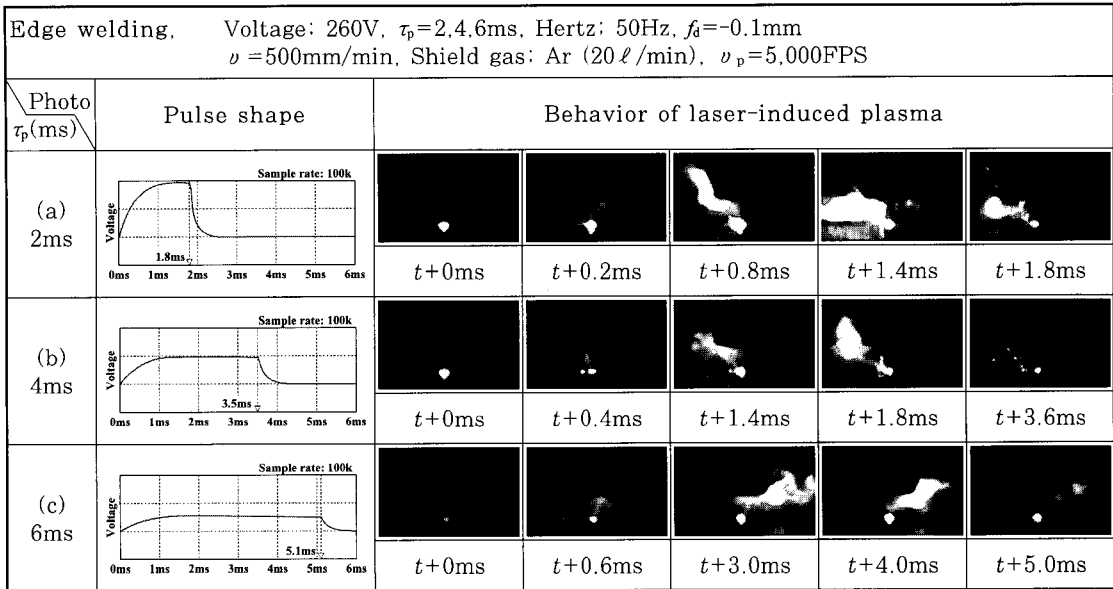


Fig. 5 High speed photographs of laser-induced plasma in edge welding of silicon steel sheet

펄스폭 4ms의 경우도 비드 전구간에서 스패터의 비산과 함께 험핑비드가 관찰되었으며, 그 결과를 Fig. 5(b)에 나타낸다. 시간에 따른 플라즈마의 외관상 발광정도는 $\tau_p=2\text{ms}$ 보다는 약하게 관찰되었다. 또한, 상대적으로 낮은 피크파워에 의해 스패터의 비산시기는 레이저 조사 후 $t+1.8\text{ms}$ 로서 펄스폭 2ms의 경우보다 다소 늦게 발생하여, 전체적으로 스패터의 비산현상이 감소하고 있음을 확인하였다. 이후 3.5ms부터 급격히 감소하는 레이저출력에 의해 $t+3.4\text{ms}$ 에서 $t+3.6\text{ms}$ 를 전·후하여 플라즈마는 급격히 감소하였다.

펄스폭이 6ms가 되면서부터 건전한 비드가 얻어졌으며, 스패터 없이 플라즈마는 안정적인 거동을 보였다. 그 결과를 Fig. 5(c)에 나타낸다. 플라즈마의 발생시기는 $\tau_p=2\text{ms}$ 와 $\tau_p=4\text{ms}$ 보다 지연되어 나타났으며, 빔조사 기간 동안 실드가스의 영향으로 플라즈마가 용접진행방향의 반대편으로 편향되는 현상도 관찰되었다. 또한 레이저의 출력은 5.1ms부터 급감하기 때문에 $t+5.0\text{ms}$ 와 $t+5.2\text{ms}$ 를 전·후하여 강한 휘도의 플라즈마는 관측되지 않았다.

지금까지의 관찰결과, 피크파워가 높을수록 재료의 가열과 증발이 급격하게 일어난다는 것을 알 수

있다. 이때 급격히 팽창하는 플라즈마는 키홀내의 용융금속을 비산시키면서 용접결함을 유발하는 것으로 사료된다. 그러나 펄스폭이 증가함에 따라 스패터의 비산시기는 지연되었으며, 험핑의 정도는 점차로 감소하는 경향을 보였다. 따라서 펄스폭 증가에 따른 피크파워의 감소는 플라즈마의 급격한 팽창을 억제한 것으로 판단된다.

3.3 레이저용접부와 기존 용접부의 특성

레이저용접과 기존 용접인 아크용접은 그 열원의 특성상 상이한 용접특성을 보여준다. 레이저용접은 용입이 깊고 열영향부가 작다는 특징이 있는 반면, 아크용접은 레이저에 비해 입열의 범위가 넓기 때문에 용입은 얇고 열영향부가 크다. 따라서 모터코어의 아크용접시 열영향을 최소화하면서 깊은 용입을 얻기 위하여 용접개소에 별도의 프로젝션부를 두고 있다. 이러한 아크용접부의 설계개선에도 불구하고 용접부의 결함은 지속적으로 발견되었다.

Fig. 6은 레이저용접부와 아크용접부의 횡·종단면 현미경관찰 사진을 나타낸 것이다. 레이저용접부는 결함이 없는 건전한 비드와 1,300 μm 정도의 용입을 얻을 수 있었다. 반면, 아크용접은 용접부에

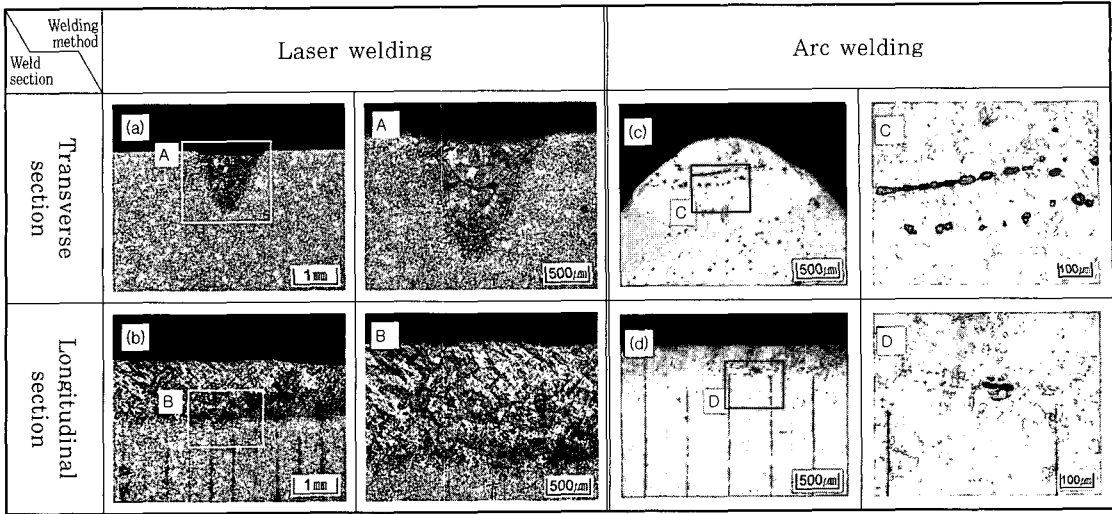


Fig. 6 Appearance and defects of weldment by pulse laser and arc heat source

서 가장 취약한 용융경계부를 따라서 기공이 생성되었으며, 약 700 μm 이내의 용입깊이를 나타냈다. 또한 열영향부의 범위로 아크용접이 레이저용접에 비해 2배 이상 크게 나타났으며, 비드폭 또한 아크용접이 약 400 μm 정도 큰 값을 보였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타낸다.

입열을 최소화하기 위한 프로세스부의 영향으로 아크용접부의 비드폭과 열영향부는 일반적인 아크용접에 비해 대단히 작음에도 불구하고, 레이저보다는 큰 값을 보였다. 그러나 레이저용접은 입열을 고려한 별도의 구조 없이도 깊은 용입과 작은 열영향부를 얻을 수 있었다.

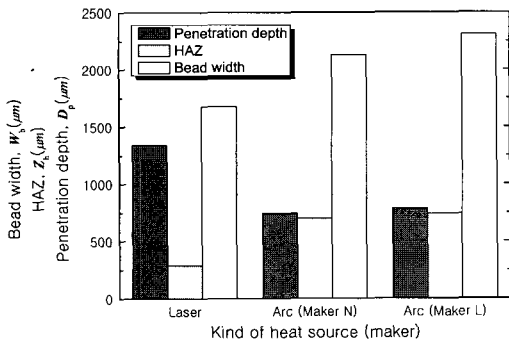


Fig. 7 Comparison of weldment formed by laser and arc heat source

4. 결 론

펄스 Nd:YAG 레이저 열원을 이용한 스테이터 적층코어용 무방향성 PN60규소강판의 적층 엣지용접시, 레이저빔의 출력특성에 따른 용접특성과 고속도 카메라 분석 및 용접부의 특성에 대하여 검토한 결과를 다음에 정리한다.

- 1) 적층코어의 레이저 엣지용접시 비초점거리에 따라 “험핑 + 스페터영역”, “스페터영역” 그리고 “정상영역”으로 나눌 수 있다. 비드가 안정화되는 정상영역은 음(-)의 영역보다 양(+)의 영역이 더 컸으나, 비드안정화에 따른 깊은 용입은 얻을 수 없었다.
- 2) 엣지용접시 전압증가에 따른 험핑을 제어하기 위해 비초점거리를 줄 경우, 건전한 비드를 얻을 수는 있었으나, 깊은 용입은 얻지 못하였다. 그러나 펄스폭에 의해 피크파워를 조절함으로써 급격히 팽창하는 플라즈마를 제어할 수 있었다. 그 결과 260V, 50Hz, $\tau_p=6\text{ms}$ 에서 $f_d=-1\text{mm}$ 일 때 결함이 없고 용입이 깊은 건전한 비드를 얻을 수 있었다.
- 3) 레이저용접의 고속도카메라 관찰결과, 펄스폭에 따른 피크파워의 강도는 유기플라즈마의 발생시기 및 결함의 정도에 영향을 미치는 것으로 사료

된다. 특히, 높은 피크파워는 플라즈마의 급격한 팽창을 유발시켜 키홀내의 용융금속을 비산시키기 때문에, 건전한 비드를 얻기 위해서는 적절하게 피크파워를 조절할 필요가 있다.

- 4) 레이저용접의 경우 전형적인 깊은 용입용접을 나타낸 반면, 열영향부는 매우 작았다. 그러나 아크용접은 입열을 최소화하기 위한 프로텍션 구조를 갖고 있음에도 불구하고 레이저용접부보다 2배 이상의 열영향부를 나타내었다.

참고문헌

[1] 高木勝美, 後藤 徹, “レーザ溶接によるモータ鋼板フレーム生産ライン”, 용접技術, Vol. 42, No. 11, pp.62-68, 1994.

[2] Yoshio Iwai, Nozomu Okumura and Osamu Miyata, “Application of Laser Processing for Automotive Parts Manufacturing”, Proc. of LAMP'87, Osaka, pp.517-523, 1987.

[3] 김종도, 마쯔나와 아끼라, “레이저 용접현상과 산업계로의 응용”, 박용기관학회지, 제 22권, 제 6호, pp.744-753, 1998.

[4] 김종도, 오진석, 이창제 “Nd:YAG 레이저를 이용한 마린 스테이터 적층코어용 무방향성 규소강판의 용접성”, 한국마린엔지니어링학회지, 후기학술대회 논문집, pp.27-28, 2005.

[5] G. Marinoni, A. Maccagno, E. Rabino : Technical and economic comparison of laser technology with the conventional technologies for welding, Proc. 6th Int. Conr. Lasers in Manufacturing, pp.105-120, 1989.

[6] 新美 友治, 夏見 文章 “CO₂ 레이저 용접의自動車ボディーへの應用”, 第28回 레이저熱加工研究全論文集, pp.171-184, 1992.

[7] H. SIMIDZU, F. YOSHINO, S. KATAYAMA and A. MATSUNAWA “Pulsed Nd:YAG Laser Spot Welding of Aluminum Alloys”, Proceedings of LAMP'92, Nagaoka, June, pp.511-516, 1992.

[8] I. NORRIS, T. HOULT, C. PETERS and P. WILEMAN “Material Processing with a 3kW Nd:YAG Laser”, Proceedings of LAMP'92, Nagaoka, June, pp.489-494, 1992.

저 자 소 개



김종도 (金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 사업이사겸 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집위원, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



길병래 (吉炳來)

1957년 11월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 부경대학교 대학원 기계공학과(공학박사수료), 1996년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 정회원. 관심분야 : 프로세스 제어



이창제 (李昶濟)

1977년 7월생, 2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2006년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 2006년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, 관심분야 : 레이저용접, 레이저가공사의 실시간 모니터링

시간 모니터링