특집 : 고에너지 밀도 가공공정

파형제어 기능을 탑재한 펄스 전용 Nd:YAG 레이저의 개발

정 진 호 · 內田高弘

Development of Power Feedback Nd:YAG Laser with Waveform Control Function

Jin-Ho Jung and Takahiro Uchida

1. 서 언

자동차, 전자 및 정밀가공 분야에서 용접용Nd:YAG 레이저의 보급은 급속히 증가하고 있으며 앞으로도 레이저용접을 적용하는 부품은 지속적 늘어날 전망이다. 특히 소형 정밀 부품의 펄스레이저 용접기술은 생산공정에서 가장 중요한 접합방법으로 생각되고 있다. 이와 같이 정밀용접에서 Nd:YAG 레이저가 크게 각광을 받는 가장 큰 이유는 광섬유를 이용하여 레이저 에너지를 전송할 수 있다는 것과 가공헤드의 크기가 작고 가볍기 때문에 로봇을 활용할 경우 가공 자유도를 획기적으로 확대할 수 있다는 것에 기반을 두고 있다. 한편 자동차 공업에서 소형 펄스 레이저의 가장 큰 시장은 차체용접기 보다는 오히려 소형 센서류의 제조분야를 들 수 있다.

우리 나라의 경우 전자 공업에서는 브라운관 부품인 전자총 제조 현장을 포함하여 각종 전극과 콘넥터의 생산 공정 용접, 모터의 코어 용접 및 2차 전지의 심용접용 장치의 열원으로 펄스 레이저가 보급되어 있다. 이와 같이 각 분야에서 용접용이라는 제한된 목적의 소형 Nd:YAG 레이저가 상당수 설치 운영되고 있으나 사용자 입장에서는 용접품질을 소정의 수준으로 유지하며 관리하는 것에 대한 어려움을 무시할 수 없다. 용접이 신뢰성 있게 실행되기 위하여는 용접조건 등 공정요소를 잘 관리하는 것뿐만 아니라 레이저 본체의 성능과 기능도 높여야 한다. 따라서 본문에는 이러한 목적으로 수행된 파형제어 기능 탑재의 펄스 Nd:YAG 레이저 용접 장치의 개발 결과를 소개 하고자 한다.

2. 개발 배경 및 목표

소형 부품의 고품위 용접에서 펄스 전용 Nd:YAG 레이저를 사용할 때 용접 품질과 관련한 중요 착안점은 소정의 용입 깊이와 용입의 안정성 및 용접부 균열 저감 등으로 볼 수 있다. 이러한 요인 이외에도 용접품질에 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있으나 레이저 용접기의 관점에서 보면 레이저 출력의 단기 안정성과 장기 안정성(몇 시간 또는 몇 주일)이 중요하게 다루어지고 있다. 왜냐 하면 레이저 출력의 변화는 용입 깊이를 직접적으로 변화시키기 때문이다.

한편 종래의 레이저 용접 장치는 레이저 출력 파형을 적절히 설정(또는 가변) 할 수 없었기 때문에 용접성이 불량한 소재의 용접에서 균열과 함께 기공 발생을 막기 어려웠다. 용접 품질의 향상은 레이저 출력의 안정화와 다양한 펄스 출력 제공 성능 확보로 이룩할 수 있기 때문에 본 연구에서는 레이저 출력을 실시간으로 제어할 수 있는 power feedback기술이 적용되었고 동시에 출력 파형을 임의의 형상으로 만들어낼 수 있는 기능을 갖추는 것을 가장 중요한 목표의 하나로 설정하였다.

3. 개발장치의 성능 및 용접실험 결과

3.1 레이저 출력 feedback 기술

이 기술은 실시간으로 출력되는 레이저 에너지의 파형이 제어판에서 설정한 파형과 동일한 파형이 되도록 레이저 출력을 감시하는 것이 핵심 요소이며, 그 결과를 활용할 때 레이저 출력을 단기적 또는 장기적으로 안정화시킬 수 있다. 또 이 기술을 적용함으로서 용접장치를 장시간 사용함에 따라 여기 램프가 열화된 경우에도 레이저 출력을 자동적으로 보정하여 항시 일정한 출력의 레이저를 발생시킬 수 있다. 종래의 장치에서는 레이저 발진기의 사용 시간 증가에 따라 여기 램프의 성능이 떨어지면 수동 또는 자동으로 인가 전압 설정치를 변경하는 방법이 사용되었다.

레이저 출력의 변화는 램프의 성능 저하뿐만 아니라 하나의 작업을 위하여 지속적으로 긴 시간 레이저 발

진을 일으킬 때 발생하는 열렌즈(thermal lens)효과에 의하여도 발생하는데 본 연구에서 개발된 실시간 feedback 기술은 이러한 경우에도 완벽하게 제어가 가능함이 실험 결과 확인되었다. 이와 같은 제어방식을 적용함으로서 용접 전에 레이저를 발진시켜 레이저가 안정하게 된 다음(즉 warming-up을 실시한 다음) 기계적으로 작동되는 셔터를 열어 용접을 실시하는 등의 준비 작업은 필요 없게 되었다.

3.2 실시간 출력 제어 장치의 동작

3.2.1 장치의 구성

그림 1은 개발 기기의 출력 제어 원리를 간략하게 표시한 구성도이다. 본 연구에서 개발한 레이저 출력 feedback 기술은 발진기의 전반사 거울에서 일부 추출한 레이저 에너지를 이용하는 것이다. 센서로부터 출력된 빛에 상당하는 전기적 신호는 power monitor부에서 감지 및 증폭하고 그 출력이 차동 증폭기에서 사전에 설정되어 있는 레이저 파형의 기준 신호와 비교된 다음 그 차이만큼의 램프 전류를 제어함으로서 일정한 레이저 출력을 확보할 수 있다.

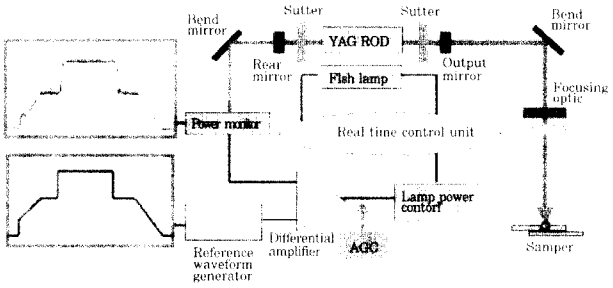

Fig. 1 Concept of waveform and power control for pulsed Nd:YAG laser system

3.2.2 펄스 성능

본 연구의 레이저 장치에는 500PPS의 고속 반복 펄스를 낼 수 있는 기능을 삽입하였으며 이 기능에 의하여 고속 및 고품위의 레이저 심용접이 가능하다. 또 각각의 펄스 사이 휴지시간을 짧게 하면(즉 펄스 duty를 크게 하면) 펄스 레이저가 아닌 연속파 레이저와 매우 유사한 성능의 용접에도 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 펄스 기울기 및 변곡점의 설정

그림 2 (a) 및 (b)는 기울기 제어를 적용하였을 때의 레이저 출력파형을 나타내 것이며 (c)는 3단 파형 제어 기법을 이용하여 5ms의 기본 펄스 출력을 4.4kW, 4.0kW, 3.5kW로 하고 각각의 펄스 사이에 펄스 폭 1ms의 1kW출력을 만들어 용접공정에서 용융지가 완전히 응고하지 않도록 하는 펄스 설정을 나타낸 것이며 그 결과는 후술하는 그림6에 제시하였다. 또 그림 2(d)는 3단 파형 제어 기능과 up slope 기능 및 down slope기능을 동시에 적용하였을 때 계측된 실제의 파형을 나타낸 것이다.

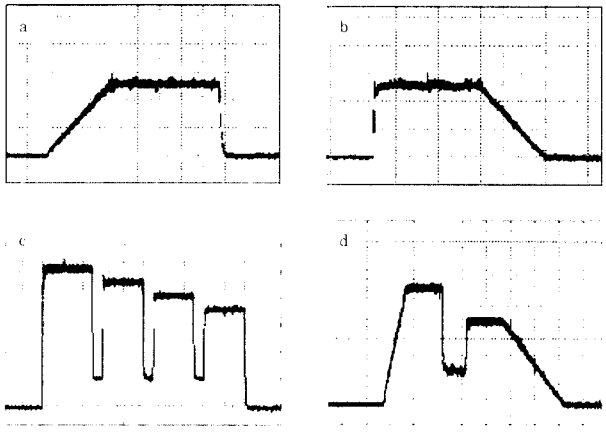

Fig. 2 Examples of output waveforms a. up slope control b. dwon slope control c. simple 3-level control d. combination of up slope and down slope functions with 3-level control

전술한 바와 같이 개발 기기에는 출력 파형을 설정할 수 있는 기능이 장착되어 있으며 출력 파형을 3단 파형을 기준으로 한 설정모드(고정모드)와 20개소의 변곡점을 설정할 수 있는 모드(가변모드)로 구분되어 있다.

고정모드에서는 저항 점용접 등에서 자주 사용하는 방법과 유사하게 3단파형의 조합과 기울기 제어(up slope 제어 및 down slope 제어)기법을 이용한다. 한편 가변모드에서는 목표 파형의 변곡점을 설정할 때 X-축 방향은 미리 설정된 레이저 첨두 출력을 백분율로, 그리고 Y-축 방향은 시간으로 입력한다. 가변모드에서는 최대 20점까지 출력을 설정할 수 있기 때문에 복잡한 파형이라도 간단히 입력 및 출력할 수 있다. 그림 3은 이 방법을 이용하여 실제로 얻은 출력 파형의 예로서 변곡점이 2개인 경우를 나타낸 것이다. 또 그림 4는 11개의 변곡점을 설정하였을 경우의 출력 파형이다.

출력 파형의 입력 설정은 별도의 프로그램 설정 장치에서 파형의 변곡점을 입력하는 방식이며 입력과 함께 설정된 파형은 그래픽 화면으로 표시된다. 실제 레이저출력 파형도 레이저 발진 후에 그래픽 화면으로 표시되어 확인이 가능하도록 되어 있으므로 사용의 편리성이 향상되었다.

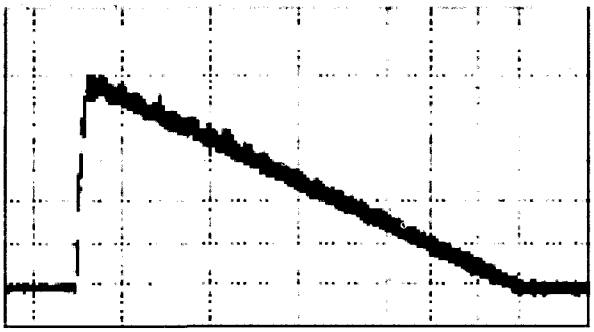

Fig. 3 An example of output waveform in FLE mode (2-point control)

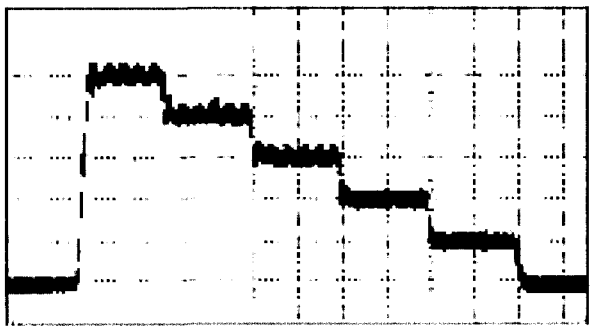

Fig. 4 An example of output waveform in FLEX mode (11-point control)

3.3 파형제어형 Nd:YAG 레이저의 적용실험 결과

3.3.1 각종 재료의 용접 결과

일반적으로 레이저 발진기의 펄스 파형 제어는 램프 방전용 에너지를 일시적으로 저장하는 장(condenser bank)를 여러 개 설치하고 순차적으로 방전시켜 파형을 만들어 내는 방법이 주류를 이루었고 일부에서는 인버터 전원으로 파형을 만드는 방법도 사용되고 있다. 그러나 거의 대부분은 전기적인 방법으로 출력 파형을 간접 제어하는 방법이었으며 설정된 파형과 동일한 레이저 출력 파형을 얻을 수 있는 장치는 본 연구가 처음이었다. 본 개발 기기에서는 하나 하나의 펄스에 실시간으로 레이저 에너지를 제어하도록 설계되어 있으므로 설정한 레이저 파형을 매우 높은 충실도로 얻을 수 있다.

田中幸治의 연구 결과에 의하면 거의 모든 금속의 용접에서 구형파 펄스 레이저로 심용입 용접을 실시하였을 때 용접부에는 큰 기공 결함이 발생하여 용접 품질의 저하를 야기하는 것으로 나타났다. 또 다른 문헌에 의하면 적절한 제어 성능을 가진 펄스파 레이저를 사용함으로서 용접부의 품질을 높이는 것이 가능하다고 알려져 있다.

본 연구도 이상과 같은 기존의 연구 결과를 적극적으로 활용한 것이며 용접 실험에 사용된 각종 조건들은 다음과 같다.

1) 시험재
   - 알루미늄 합금 : 1050 및 5083
   - 티타늄 합금 : 순금속, Ti-6Al-4V
   - 철강재료 : 구조용강, SUS 304
2) 이음조건 : 맞대기 이음
3) 용접 광학계 및 출력
   - 초점거리 : 120mm
   - 출력 : 38.3 J
   - 펄스 폭 : 10ms
4) 보조가스 : 아르곤
5) 초점 설정위치 : +5mm(A1050 합금은 표면에 설정)

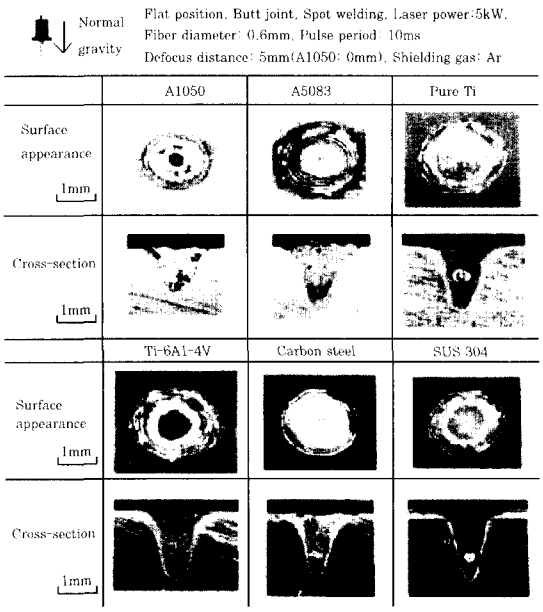

Fig. 5 Weld quality with standard rectangular pulse waveform

그림 5는 구형파 레이저 출력을 사용한 알루미늄 합금과 티타늄 소재 등의 용접부 특성을 보인 것이다. 구형파 레이저 용접에서는 사진에 나타나 있는 바와 같이 티타늄 순금속을 용접하였을 경우 비교적 양호한 용접부를 얻을 수 있었으나 다른 재료의 용접부에서는 많은 수의 기공이 발견되고 있었다.

또, 많은 재료의 용접에서 이러한 용접 품질 저하는 그림 2의 (a) 또는 (b)와 같이 단순한 기울기 제어를 적용한 다른 실험에서도 여전히 나타나고 있었으므로 기울기 제어 기법만으로 용접 품질을 높이는 것은 한계가 있음을 알 수 있었다.

한편 그림 6은 파형 제어 레이저에 의한 용접실험의

예로서 각종 재료의 용접에서 3단 기울기 제어 기법이 적용된 용접부의 형태를 나타내고 있다. 이 실험에서는 앞에서 구형파 레이저를 이용한 용접부에서 나타났던 용접부 기공은 발견되지 않는다.

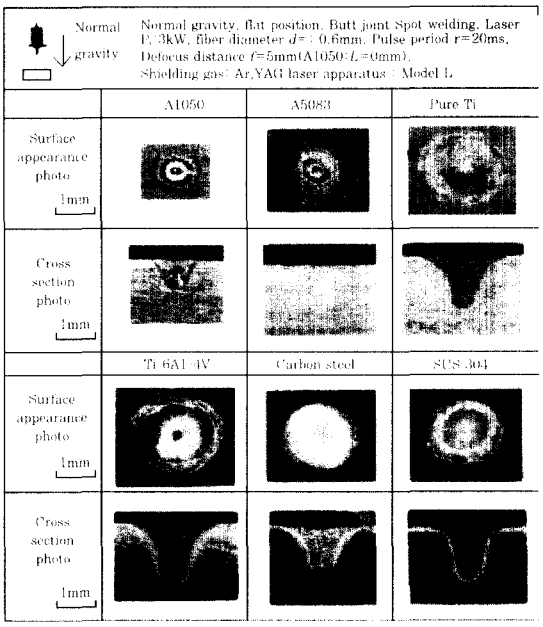

Fig. 6 Effect of FLEX mode application on weld qualilty

3.3.2 Fade in 및 fade out 기능의 효과

Fade in 및 fade out 기능을 간단히 정의하면 기울기 제어의 특수한 형태라고 할 수 있다. 이 기능에 의해서 연속적으로 펄스 에너지를 서서히 증가시키거나 서서히 감소시키는 것이 가능하다. 이러한 성능은 레이저 심용접에서 용접 종료점의 흔적(일종의 crater)을 줄일 수 있고 또 파이프 용접 등 원주방향으로 레이저 심용접을 실시할 경우 발생하는 용접 종료점의 중첩부분을 깨끗하게 마무리 할 수 있으므로 고품위 용접이 가능하다.

다각형 용접선을 가진 부품의 레이저 용접에서 모서리 부분을 용접할 경우에는 열 평형을 잘 유지하여야 목표로 하는 품질의 용접부가 얻어진다. 이러한 용접부에서 품질을 일정하게 하기 위하여는 소정의 방법으로 용접 입열량을 제어하여야 한다. Fade in 및 fade out 기능은 이러한 목적에 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 나타났으며 이 기능에서도 하나의 용접 패스에 대하여 20의 서로 다른 입열제어 장소를 설정할 수 있다.

그림 7은 평판의 펄스 레이저용접에서 fade out 기능의 활용성을 비교한 실험 결과로서 (a)는 이 기능이 없는 경우의 용접 종료부 형상이며 (b)는 Fade out 기능을 적용하며 용접이 실시된 예다. 사진에서 알 수 있듯이 Fade out기능은 crater 감소에 탁월한 효과가 입증되고 있다. 또 그림 8은 파이프재를 원주 용접할 때 Fade out 기능을 적용하면 용접 종료점의 crater를 제거할 수 있음을 보여주는 설명도이며 Fade in 및 Fade out 기능은 이러한 용접 이음에서 용접 개시 및 종료점의 품질을 크게 높일 수 있는 것으로 나타났다.

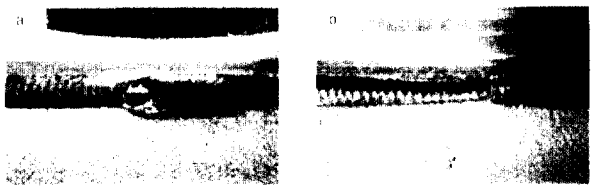

Fig. 7 Bead appearance a. welding with standard pulse wave b. welding with FADE OUT mode

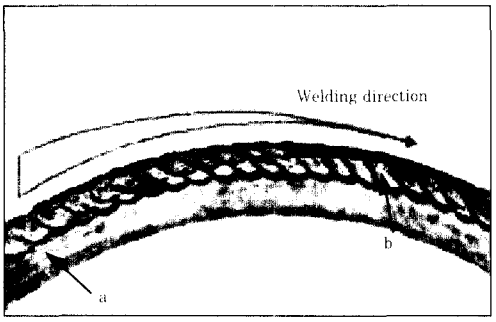

Fig. 8 Application of FADE OUT mode in circumferential weld
a. welding start b. welding end

4. 맺 음 말

펄스 파형을 융통성 있게 제어하는 기능의 탑재와 함께 레이저 출력을 직접 제어하는 기술이 적용된 펄스 전용 레이저 용접 장치의 개발은 궁극적으로 용접 품질과 생산성을 향상시키는데 큰 역할을 할 것으로 판단된다. 본 연구가 용접기술 개발보다는 용접용 레이저 장치 개발에 목표를 두었기 때문에 적용된 소재, 용접 조건 및 용접 품질 평가 항목의 제한점은 있으나, 개발 기기를 사용하였던 소정의 실험에서 매우 만족스러운 결과를 얻었다는 것은 이 장치를 생산 라인에 투입하였을 경우의 활용 전망을 밝게 한다. 그러나본 연구팀은 현재의 개발 결과에 만족하지 않고 지속적으로 장치의 고급화는 물론 환경 친화적 system의 개발에 노력함으로서 산업현장의 needs에 대응 하고자 한다.

참 고 문 헌

1) 田中幸治: 微小重量下におけるパルスNd:YAGレーザ溶接, 學位論文, 大阪大學 (1999)
2) 內田高弘: 波形制御機能付きレーザパワーフィードバックNd:YAGレーザの開發, 金屬プレス, 第9號 (1998)

· 정진호(鄭鎭虎)
· 1961년생
· 미야찌코리아(주)
· Laser 응용기술
· jinhojeong@miyachikorea.co.kr

· 內田高弘(TAKAHIRO UCHIDA)
· 1954년생
· 미야찌테크노스(주)
· Laser 開發
· uchida@miyachitechnos.co.jp