

## 고출력 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 키홀의 불안정으로 발생한 기공의 절감방법

김정일\* · 조민현\*\*

### Reduction Method of Porosity Formed by Instability of Keyhole in High Power CO<sub>2</sub> Laser Welding

J-I Kim\* · M-H Cho\*\*

**Key words** : Pulse modulation(펄스 변조), Duty cycle(사용율), Pulse width ratio(펄스폭비), Forward angle(전진각), Forehand welding(전진용접), Penetration depth(용입깊이), Keyhole dynamics(키홀 거동)

#### Abstract

Porosity formation in partial penetration welds by high power lasers is a serious problem in industry. There are two main causes that induce porosity formation. One form of porosity is due to gases (e.g. hydrogen, oxygen) dissolving into the weld pool because of the high temperature and then the rapid solidification traps gases as a bubble in the weld metal. The second problem is voids formed by the keyhole collapsing due to unstable keyhole fluid dynamics. The voids that form at the bottom of the keyhole are relatively large and irregular in shape compared to the gas bubbles; this void formation is the primary concern in this paper.

The reduction of voids formed by keyhole collapse is achieved by improving the stability of keyhole. Two methods to improve keyhole stability are discussed in this paper: pulse modulation and beam incident angle. Pulse modulation of the laser beam was performed between 100 Hz and 500 Hz to find out the optimum frequency for the keyhole dynamics. The incident beam angle changed the impact angle of the laser beam to the work surface in a range of 0 to 25 degrees. Glycerin in a semi-solidified state is used as a medium for performing the welding because its transparency allows of visualization of the keyhole.

---

\* 목포해양대학교 기관시스템 공학부  
\*\* The Ohio State University 용접공학과

### 1. 서론

레이저(Laser)는 1960년 후게스 항공사의 마이민씨가 발명한 루비 레이저를 시작으로 1966년 전자부품의 용접에 저출력 CO<sub>2</sub> 레이저가 응용되었고, 1971년에는 Brown과 Banas에 의해 고출력 CO<sub>2</sub> 레이저가 개발되어 최근에는 소규모로부터 자동차생산, 항공기제조등에 이르기까지 고출력 레이저를 사용한 재료가공기술이 발달되어 왔다.

레이저 용접은 고 에너지 밀도 집중열원을 사용하며 금속의 용융에 열용입량이 적으므로 재료의 내부응력이나 뒤틀림이 매우 적고, 컴퓨터 제어에 의해서 쉽게 자동화가 되고 용접속도가 빠르므로 대량생산이 가능하다. 그러나 에너지 전환효율이 낮으며 용융금속의 평균온도가 높고 응고속도가 빠름으로 용접금속의 취화와 기공의 형성이 생기기 쉽다.<sup>[1]</sup>

고출력 레이저를 이용한 두꺼운 평판 용접에서 기공의 형성은 용융금속의 온도가 높고 응고속도가 빠름으로 인하여 생기는 경우외에 키홀의 불안정으로 인하여 키홀이 붕괴되어 기포가 트랩되어 생기는 경우가 있으며, 전자의 경우는 둥근 모양의 미세한 기공을 형성시키나 후자의 경우는 일반적으로 용접금속 중부와 하부에서 큰 기공으로 형성되는 것이 특징이다.<sup>[2],[3]</sup>

산업현장에서 레이저 용접의 이용이 점차로 증가하고 있으며 레이저 용접 시 발생하는 기공은 응력집중으로 인한 균열개시의 원인이 되기 때문에 기공의 형성을 절감시키는 방법을 확립할 필요가 있다.

레이저 용접 시 키홀의 불안정에 의하여 발생하는 기공의 형성을 절감시키는 방법에 대한 앞서의 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

A. Matsunawa<sup>[2],[3]</sup> 등은 일정한 주파수(100Hz)에서 적절한 사용율(Duty cycle)을 갖는 펄스변조(Pulse modulation)로서 CW CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 키홀의 불안정으로 발생하는 기공의 절감방법을 보였으며, S. Fujinaga<sup>[4]</sup> 등은 일정한 주파수(100Hz)에서 적절한 펄스변조 빔(Pulse modulated beam)의 모양을 갖는 펄스변조로서 Nd:YAG 레이저 용접에서 키홀 불안정으로 발생

하는 기공의 절감방법을 보였다. A. Otto<sup>[6]</sup> 등은 강제진동(Forced oscillation)에 의한 최적의 펄스변조에 의해서 더 안정된 키홀 거동을 얻을 수 있음을 보였다. 또한 N. Fukuda<sup>[6],[7]</sup> 등은 트윈 스폿 용접(Twin spot welding)을 채택하여 열용입 시간을 길게 함으로써 용융금속의 응고의 시작을 지연시킴으로써 기공의 형성을 절감시킬 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 일정한 펄스폭비(Pulse width ratio : 43%)에서 적절한 주파수를 갖는 펄스변조로서 CW CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 키홀의 불안정으로 발생하는 기공의 절감 방법을 제시하고, 또한 레이저 빔의 입사각을 변화시켜 기공이 가장 적게 발생할 시의 레이저 빔 입사각을 제시하고자 한다.

### 2. 실험 방법

본 연구는 ROFIN-SINAR에서 제작한 5kW CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였다. 레이저 발전장치는 H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 가스를 사용하였고, 초점을 맞추기 전의 레이저 빔 직경은 약 25mm 이었다. 레이저 빔 에너지를 한 점에 모으는 데는 구리로 만들어진 오목한 거울(focusing mirror)를 사용하였으며 초점 거리는 254mm이었다. 키홀의 거동을 관찰하기 위하여 1초 동안에 최고 40500frames을 기록할 수 있는 CCD (coupled charge device) 카메라 (EKTAPRO HS) 를 사용하였으며, 본 실험에서는 1초 동안에 750frames을 기록하였다.

Fig.1은 키홀의 거동을 관찰하기 위한 본 실험장

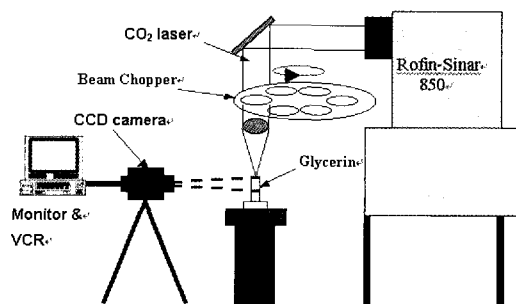


Fig.1 Schematic of experiment apparatus for observation of keyhole behavior

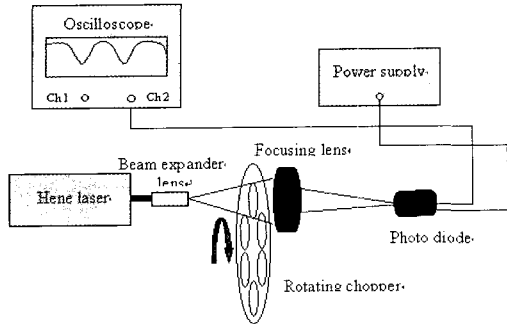


Fig.2 Schematic of experiment apparatus for measurement of laser beam power shape

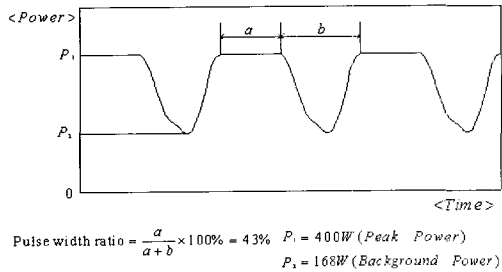


Fig.3 Pulse shape and pulse width ratio of laser beam power by rotating chopper

치의 개략도 이고 Fig.2는 펄스변조시 레이저 빔 출력모양을 측정하기 위한 장치의 개략도이다.

Fig. 3은 본 실험에서 행한 레이저 빔의 출력모양과 펄스폭비를 나타내고 있다. 레이저 빔의 펄스 변조는 100Hz에서 500Hz사이의 주파수로 행하였고 용접속도는 25mm/sec 로 행하였다.

기홀의 거동이 확실하게 관찰되는 반고상 상태의 글리세린 (Glycerin)을 본 실험재료로 사용하였으며, Table1은 실험에 사용된 글리세린의 물리적 성질을 나타내고 있다. 또한 Fig.4는 본 실험에서 행한 레이저 빔의 경사도와 용접방향의 관계를 나타내고 있다.

레이저 빔 입사각이 후진각(backward angle) 시에는 가스의 침입이 쉬워 기공의 형성이 많아지나 전진각(forward angle) 시에는 가스나 기포가 기홀 상단으로부터 쉽게 빠져나가기 때문에 기공의 형성이 적어짐으로<sup>[2],[3]</sup> 본 실험에서는 레이저 빔 입사각이 전진각인 전진 용접 법(forehand welding)으로 하였다.

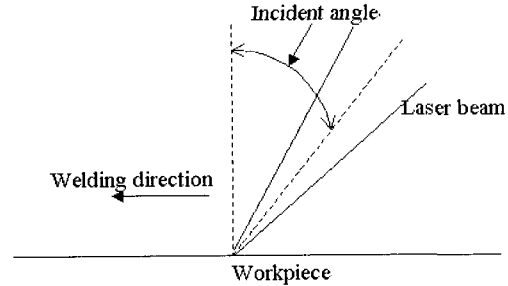


Fig.4 Schematic diagrams of forehand welding

Table 1 Physical properties of glycerin used in experiment

Heat of Fusion	196J/g
Specific gravity (20 °C)	1.26 g/cm <sup>3</sup>
Boiling point (760 mmHg)	290° C
Melting point	18° C
Surface tension(150 °C)	0.052N/m
Viscosity	152mPa.s(50 °C)
	15mPa.s(100 °C)

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3. 1 주파수와 레이저 빔 입사각의 변화에 따른 용입의 깊이

Fig.5는 펄스 빔 형태(Pulsed beam shape)의 주파수와 레이저 빔 입사각의 변화에 따른 용입깊이의 변화관계를 나타낸 것으로, 주파수를 변화시키는 펄스변조 시가 펄스변조를 하지 않을(no modulation : no chopper)시 보다도 용입의 깊이가 감소함을 알 수 있으며 이는 펄스변조의 경우 초퍼(chopper)를 이용하여 레이저 빔의 양을 줄였기 때문으로 사료된다. 또한 레이저 빔 입사각이 증가할수록 용입의 깊이가 감소함을 본 실험을 통해서 명확하게 증명할 수 있었다. 이때의 용입의 깊이는 20 frames의 간격마다 측정하여 평균한 값이다.

100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz, 500Hz의 주파수를 갖는 펄스변조의 경우의 각각의 용입 깊이는 거의 같음을 알 수 있는데, 이는 각 주파수에서의 펄스폭비가 동일하여 출력의 크기가 같기 때문인 것으로 사료된다.

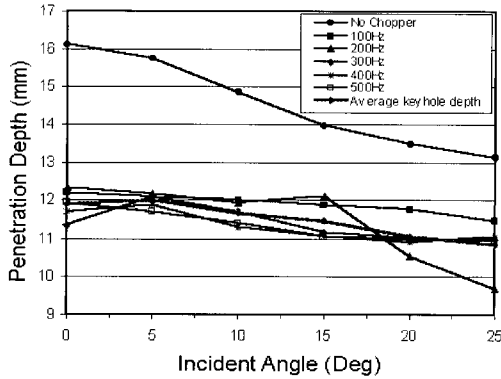


Fig.5 Penetration depth with various frequency and beam incident angle

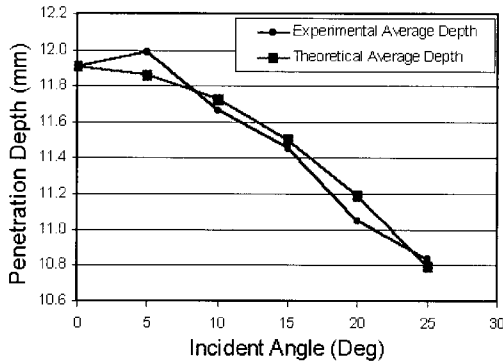


Fig.6 Comparison between experimental and theoretical penetration depth with various beam incident angles

Fig.6은 레이저 빔 입사각의 변화에 따른 이론적인 용입깊이와 실험에서 구한 용입깊이(각 주파수에서의 평균값)를 비교한 것으로 거의 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있으며 이는 용입 깊이의 변화는 글리세린 자체의 중량에 많은 영향을 받지 않기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2 주파수와 레이저 빔 입사각의 변화에 따른 기공의 양

혼돈의 시스템으로 정의되는 키홀거동(keyhole dynamics)은 불규칙적으로 움직인다<sup>8)</sup>. 이런 혼돈의 시스템은 불안정한 상태의 키홀거동을 보여 주는데 이런 시스템의 불안정성을 극복함으로써 키홀 불안정으로 인한 기공을 절감시킬 수 있다. 본 논문에서는 시스템의 불안정성 극복의 방법으로

펄스 변조를 사용 하였는데 실제로 키홀의 안정성을 유도하는데 결정적인 요소가 되었음을 후술하는 Photo. 2에서 확인 할 수 있었다.

Fig.7, Fig8, Fig.9은 주파수와 레이저 빔 입사각의 변화에 따른 기공의 양, 기공의 수, 키홀 붕괴의 수를 각각 나타낸 것으로 300 frame 에서 900 frame 까지의 키홀 거동사진에서 구하였다. 기공의 양, 기공의 수, 키홀 붕괴의 수는 항상 키홀의 안정성과 관계가 있으며 키홀이 불안정하면 기공의 수와 양이 증가하고 또한 키홀 붕괴의 수도 증가한다. 주파수를 변화시키는 펄스 변조 시가 변조를 하지 않을 시 보다 전반적으로 키홀이 안정되는 것을 볼 수 있는데 특히 주파수400Hz, 레이저 빔 입사각 15° 에서 키홀이 가장 안정됨을 알 수 있다.

변조를 하지 않을(no chopper, P1=400W) 시에는 레이저 빔 입사각이 증가 할수록 발생하는 기공의 양이 적음을 알 수 있다. 이는 레이저 빔 입사각이 전진각 시에는 입사각이 클수록 키홀의 상단으로부터 가스나 기포가 원활하게 제거되기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 적절한 주파수에서 레이저 빔 입사각의 변화에 따른 기공의 양의 변화가 거의 없음을 알 수 있는데 이는 적절한 주파수를 갖는 펄스 변조시 레이저 빔 입사각은 키홀 붕괴를 방지하는데 결정적인 역할은 하지 못하고 있다고 사료된다.

Fig.3 에서 최저의 레이저 빔의 양을 0으로 두지 않고 168W정도 주었는데 이는 완전히 키홀이 없어지는 것을 방지 하였으며 또한 키홀 붕괴를 방지 하는데 많은 도움을 주게 된 것으로 사료된다. 그리고 키홀 다이내믹 시스템에 알맞은 적절한 주파수도 중요한 변수중의 하나이다. 이 실험에서는 레이저 빔 각도 보다는 주파수(400Hz)가 키홀의 불안정성을 극복하는데 가장 중요한 요소라고 사료된다. 그러므로 어떤 변수를 사용하느냐에 따라서 키홀 시스템에 많은 변화가 야기되는데 가장 적절한 변수를 주어서 키홀이 안정한 상태를 유지함으로써 인해 기공의 형성을 적게 할 수 있었다. 본 실험에서 펄스 주파수가 레이저 용접에서의 기공형성을 줄이는데 결정적인 역할을 한다는 것을 확인 하였다.

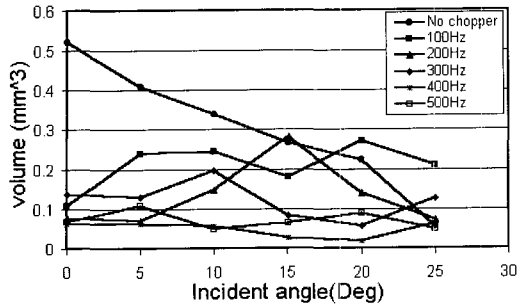


Fig.7 Volume of pores with various beam incident angle and frequency

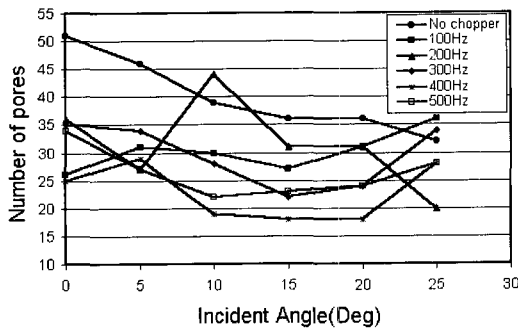


Fig.8 Number of pores with various beam incident angle and frequency

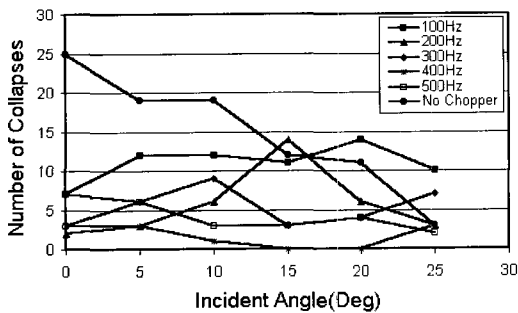


Fig.9 Number of keyhole collapse with various beam incident angle and frequency

3.3 용입깊이(Penetration depth)의 균일성

펄스변조를 한 경우보다 변조를 하지 않는 경우가 용입이 깊은 것은 펄스변조의 경우 초퍼를 이용하여 레이저 빔의 양이 줄어서 입열량이 감소하였기 때문이다. 따라서 동일한 평균 용입깊이 하에서 펄스변조를 한 경우와 변조를 하지 않은 경우의 용

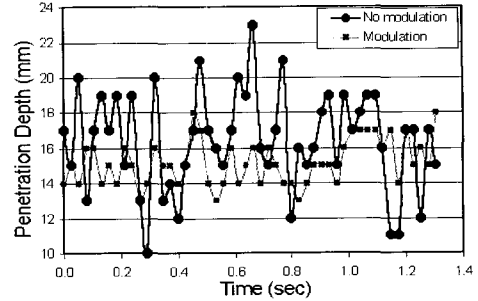


Fig.10 Comparison of penetration depth between no modulation and modulation

입깊이의 균일성을 비교하기 위하여 펄스변조 경우의 동력을 750W로 하였다.

Fig.10은 기공이 가장 적게 발생하는 펄스변조 (PW, 400Hz, P1=750W, beam 입사각15° 경우와 변조를 하지 않은 (CW, P1=400W, beam 입사각 0° 경우의 시간의 경과에 따른 용입깊이가 변화를 나타낸 것으로 펄스변조의 경우가 변조를 하지 않은 경우보다 더 균일한 용입깊이가 얻어짐을 알 수 있다. 이는 주파수 400Hz 레이저 빔 입사각15° 에서 키홀이 가장 안정적이고 키홀의 붕괴가 거의 발생하지 않기 때문에 균일한 용입깊이가 얻어짐을 알 수 있다.

Photo. 1은 변조를 하지 않은 경우(CW, P1=400W, beam 입사각 0°의 키홀거동을 1/750 sec간격의 사진으로 나타낸 것으로 세번째 사진에서 네번째 사진으로의 과정에서 키홀의 붕괴가 발생되었고 키홀로부터 분리된 부분은 기공으로 남았다. 일반적으로 철강재료에서 키홀의 붕괴로 형성된 기공은 불규칙한 모양으로 형성이 되는데 본 실험에서는 글리세린의 물리적 특성상 둥근 모양의 형태로 남았다. 그리고 연속적인 레이저 빔에 의해 키홀은 다시 형성하게 되는데 이 같은 반복적인 키홀의 붕괴와 키홀의 재형성은 키홀의 불안정성을 초래하게 된다.

세번째와 네번째의 사진에서 키홀의 붕괴로 인해 용입깊이는 갑자기 작아짐을 알 수 있는데 이 같은 현상은 불규칙한 용입깊이의 원인이 됨을 알 수 있다. 이는 키홀의 붕괴와 용입깊이의 변화가 밀접한 관계가 있음을 보여 준다. 그러므로 용입깊이의 변화를 보여주는 Fig.10으로 키홀붕괴의 빈

도를 대략적으로 알 수 있다.

Photo.2은 가장 기공이 적게 발생하는 펄스변조의 경우(PW, 400Hz, P<sub>1</sub>=750W, beam 입사각15°)의 키홀 거동을 사진으로 나타낸 것으로 펄스변조 시가 키홀 붕괴와 기공의 형성이 적음을 알 수 있

다. 글리세린을 사용하여 키홀의 거동이 확실하게 관찰됨으로써 키홀 붕괴를 직접 눈으로 볼 수 있는 것이 글리세린을 이용한 본 실험의 최대의 장점으로 사료된다.

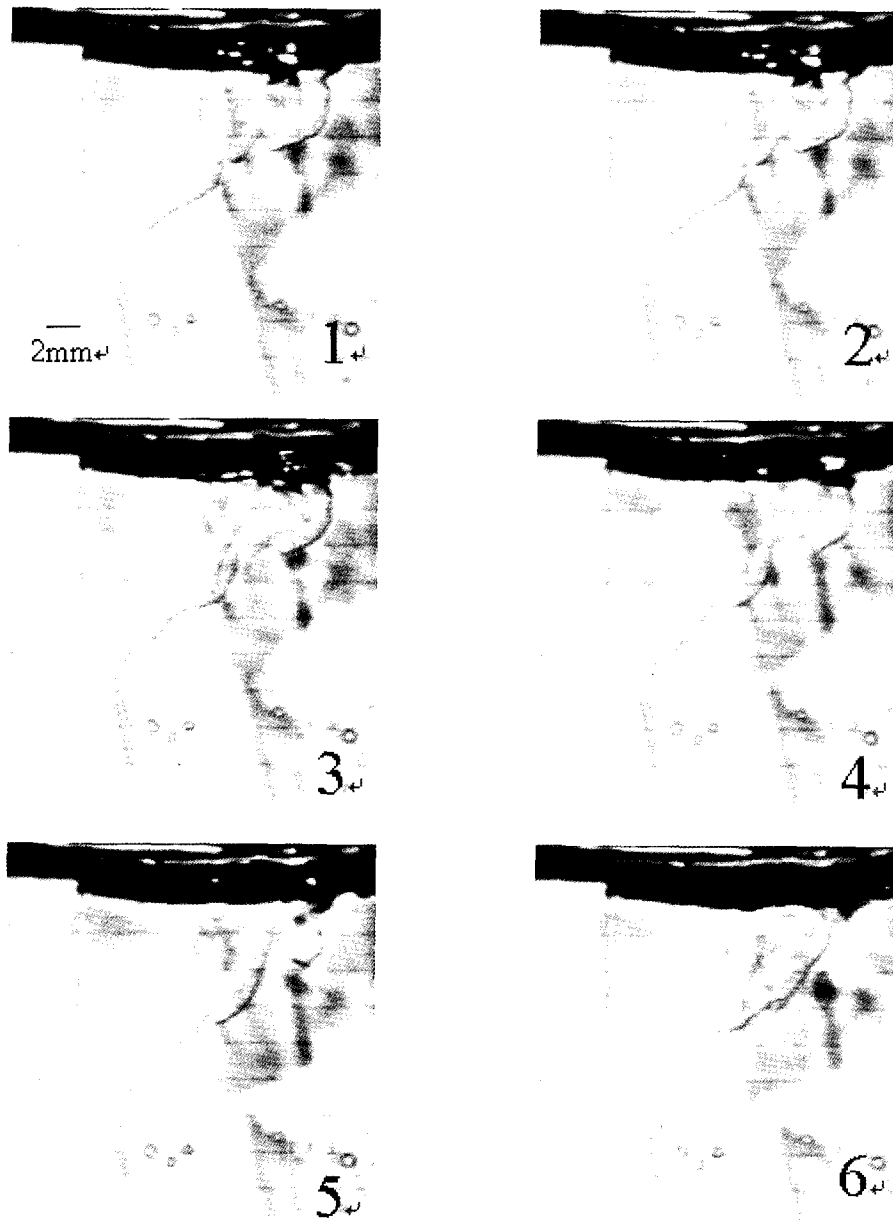
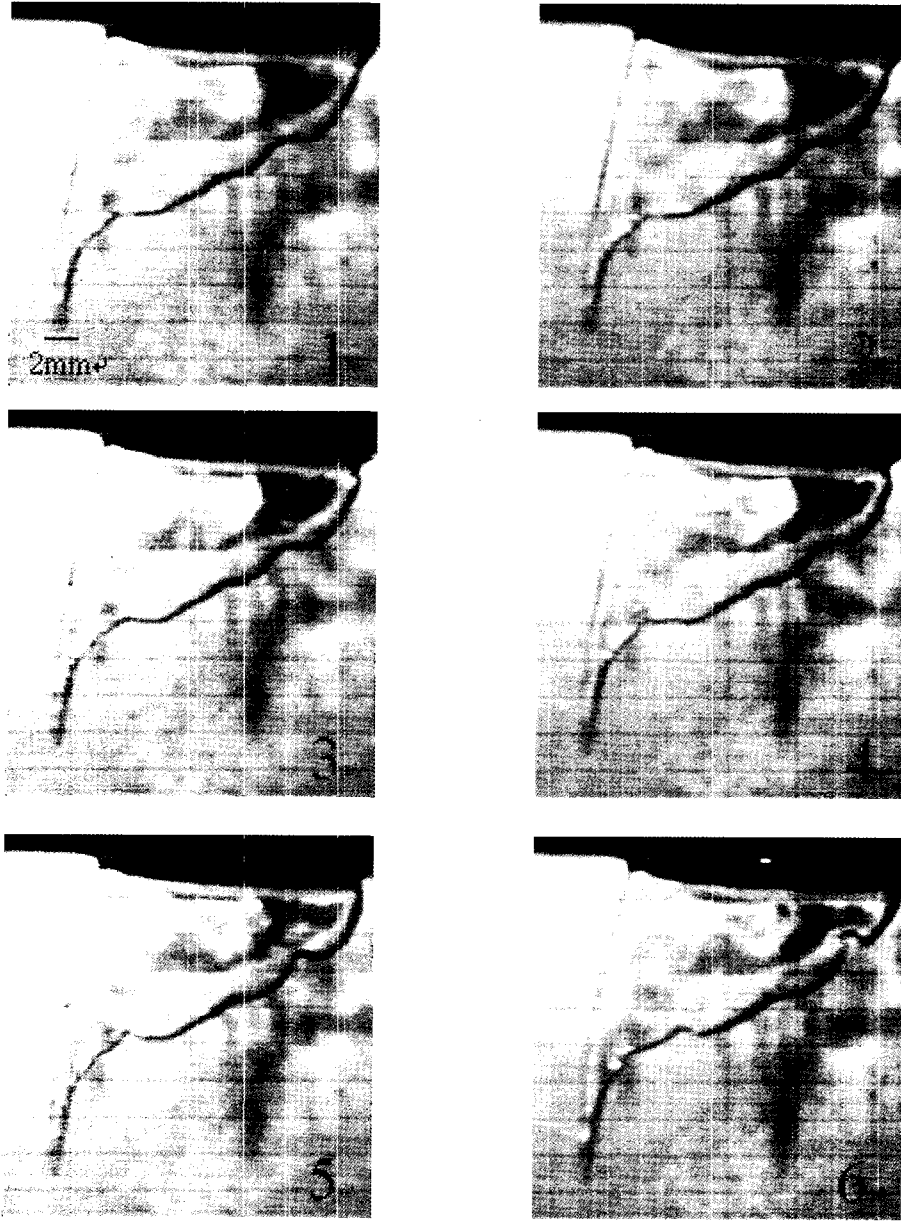


Photo.1 Keyhole motion and porosity formation observed by CCD camera at no modulation



**Photo. 2 Keyhole motion and porosity formation observed by CCD camera at pulse modulation**

#### 4. 결 론

고출력 CO<sub>2</sub> 레이저 용접장치를 사용하여 주파수를 변화시킨 펄스변조(펄스 폭비 : 43%)와 레이저 빔 입사각이 키홀의 붕괴, 기공의 형성, 용입깊

이의 균일성 등에 미치는 영향을 글리세린을 이용하여 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주파수를 변화시킨 펄스변조의 경우가 변조를 하지 않은 경우보다 기공의 형성과 키홀의 붕괴

가 적으며, 주파수 400Hz 레이저 빔 입사각 15°에서 기공의 형성과 키홀의 붕괴가 가장 적다.

2) 변조를 하지 않은 경우에는 레이저 빔 입사각이 증가할수록 기공의 형성과 키홀의 붕괴가 적다. 그러나 펄스변조의 경우에는 레이저 빔 입사각의 증가에 따른 기공의 형성과 키홀의 붕괴는 거의 일정하다.

3) 주파수 400Hz의 펄스변조의 경우 레이저 빔 입사각15°에서 변조를 하지 않은 경우보다 키홀의 거동이 훨씬 안정되었으며, 용입 깊이도 균일하다.

### Reference

- 1) "Welding Handbook", Eighth Edition, Vol.2, American Welding Society. pp.723-725, 1991
- 2) A. Matunawa, S. Katayama, N. Seto, J. D. Kim and M. Mizutani, "Porosity Formation and Solidification Cracking in Laser Welding", Proceedings of Taiwan International Welding Conference '98, pp.47-57, 1998, Taipei
- 3) A. Matunawa, J. D. Kim and S. Katayama, "Porosity Formation in Laser Welding - Mechanisms and Suppression Methods -", Proceedings of ICALEO'97, Vol.83, LIA, Section G, pp.73-82, 1997, San Diego
- 4) S. Fujinaga, H. Takenaka, T. Narikiyo, S. Katayama and A. Matsunawa, "Direct Observation of Keyhole Behavior during Pulse Modulated High-power Nd:YAG Laser Irradiation", J. Phys. D:Appl. Phys., 33, pp.492-497, 2000
- 5) A. Otto, M. Geisel and M. Geiger, "Nonlinear Dynamics during Laser Beam Welding",

Proceedings of ICALEO'96, Vol.81, LIA, Section B, pp.30-39, 1996, Detroit

- 6) N. Fukuda, T. Matsumoto, Y. Kondo, A. Ohmori, K. Inoue and Y. Arata, "Study on Prevention of Welding defects for thick plates with high power CO<sub>2</sub> Laser" Proceedings of ICALEO98, Vol.85, LIA, Section F, pp.267-276, 1998, Orlando
- 7) N. Fukuda, T. Matsumono, Y. Kondo, A. Ohmon and Y. Arata, "Study on Prevention of Welding Defects in High Power CO<sub>2</sub> Laser Materials Processing", Proceeding of ICALEO'97, Vol.83, LIA, Section G, pp.272-281, 1997, San Diego
- 8) M. H. Cho, D. Farson, "Non-Linear Dynamics Signal Analysis for Quality Monitoring", Proceeding of ICALEO'00, Vol.89, LIA, Section E, pp.1-10, 2000, Dearbone

### 저 자 소 개



#### 김정일(金正一)

1944년 7월생. 1967년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(석사). 1982년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(석사). 1993년 한국해양대학교 대학원 선박기계공학과 졸업(박사). 2001년 Ohio state university 객원교수. 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수.



#### 조민현(曹珉鉉)

1973년 10월생. 1999년 Ohio state university 용접공학과 졸업. 2001년 Ohio state university 대학원 용접공학과 졸업(석사). 현재 Ohio state university 대학원 용접공학과(박사과정)