

고속 홀로그래피에 의한 용접 플룸 거동의 가시화

백성훈* · 박승규* · 김민석* · 정진만** · 김철중**

Visualization of weld plume using high-speed holography

Sung-Hoon Baik*, Seung-Kyu Park*, Min-Suk Kim*, Chin-Man Chung** and Cheol-Jung Kim**

Key words : 용접 플룸(weld plume), 용접 플라즈마(weld plasma), 가시화(visualization), 고속 홀로그래피 간섭계(high-speed holographic interferometer), 레이저 용접(laser welding)

Abstract

The real-time holographic interferometer with digital high-speed camera is applied to the experimental study of laser induced plasma/plume in pulsed Nd:YAG laser welding. A pulsed Nd:YAG laser with 1.2 kW average power is applied to generate laser induced plume. The recording speed of the high-speed camera is 3,000 f/s. The high speed photographs of weld plume without another visualization method, are compared with the visualization photographs with holographic interferometer. The radiation intensity from the laser induced plume is recorded by the high speed photographs, which fluctuated during laser radiation and disappeared after laser end.

The density distribution of the plume is recorded by the holographic visualization method. The experimental results show the process of generation of the laser induced plasma/plume, and give the feasibility of quantitative measurement of laser induced plume in laser welding.

1. 서 론

레이저 용접은 정밀도가 높고, 자동화가 용이하며, 광섬유(optical fiber)에 의한 원격 가공이 가능하다는 장점이 있어, 정밀가공 분야에 많이 사용되고 있다¹⁾. 레이저 용접 시 발생하는 플룸은 레이저 빛의 흡수 및 키홀(keyhole) 형성에 중요한 요소로서 레이저 용접 현상을 이해하고 발전시키는데 중요한 역할을 하므로 이에 대한 많은 실험적 연구가 있어 왔다²⁾. 기존의 연

구로는 고속카메라를 사용하는 직접적인 기록방법에 서부터³⁾, 포토 다이오드 등의 광 검출 소자에 의한 측정⁴⁾, 플룸의 스펙트럼 분석에 의한 성분 및 밀도 조사⁵⁾, 조사빔(probe beam)에 의한 밀도 측정⁶⁾ 방법 등이 있으며, 시간적인 전과과정을 측정하기 위한 목적으로 스트리크 카메라가 사용되기도 한다⁷⁾.

고속 카메라를 사용하는 여기 플룸의 관찰은 가장 직관적인 방법으로 많이 활용되지만, 플룸이 빛을 발하는 동안만 관찰이 가능하고 정량적인 측정이 어렵다. 플룸과 증발된 합금원소는 주변 환경과 다른 밀도를

* 1998년 7월 1일 접수

* 비회원, 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

** 정회원, 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

• 백성훈 : shbaik@nanum.kaeri.re.kr

가지므로, 가시화 방법을 사용하여 눈으로 확실히 볼 수 있도록 하거나 보다 정량적인 측정을 할 수 있다.

레이저 여기 플룸 및 증발된 합금원소의 가시화에는 기존의 가시화 방법이 대부분 사용될 수 있다. 기존에 발표된 레이저 여기 플룸의 가시화 방법으로는 Mach-Zehnder 간섭계⁸⁾, shadowgraph⁹⁾, 층밀리기 간섭계¹⁰⁾, schlieren 가시화¹¹⁾ 등이 있다. 간섭계 방법은 감도가 좋고 상대적으로 정량적인 정보를 추출하지만, 장비가 고가이며 노이즈에 민감하여 장치 구성 및 운용이 어려워, 누구나 일반적으로 적용하기에는 어려운 점이 많다. 이에 비해 홀로그래피 간섭계에 의한 유체가시화 방법¹²⁾은 광학계의 불균일 효과를 상쇄할 수 있으므로 저가의 광학부품으로 구성이 가능하다는 장점이 있고, 광학적 투명체를 사용한 chamber 안의 현상에 적용할 수 있다는 특징도 있다.

본 논문에서는 일반적으로 구할 수 있는 광학부품으로 실시간 홀로그래피 간섭계를 구성하고, 레이저 용접시 발생하는 플룸과 냉각된 증발 합금원소의 거동을 가시화하고 간섭무늬로 기록할 수 있음을 실험적으로 보였다. 홀로그래피 간섭계의 구성과 성능, 그리고 가시화 촬영 과정을 기술하였다. 간섭무늬는 그 자체로도 정량적인 정보를 가지고 있지만 보다 정량적인 분석을 위해서는 위상이동 방법이나, FFT에 의한 간섭무늬의 해석 등이 수반되어야 하는데, 본 연구에서는 별도의 간섭무늬 처리 과정을 도입하지 않고 단지 간섭무늬의 고속/연속 기록에 주안점을 두었다. 실험 결과는 Nd:YAG 레이저가 금속 표면에 조사될 때 발생하는 플룸과 증발된 금속원소를 직접 고속카메라로 촬영하였을 때와 홀로그래피 간섭계로 가시화 시킨 후 고속카메라로 촬영한 결과를 비교하였다.

2. 실험

2.1 홀로그래피 간섭계 가시화 장치

실험에 사용된 실시간 홀로그래피 간섭계 및 고속 카메라 장치의 구성은 Fig.1과 같다. 그림에서 점선으로 그려진 부분이 홀로그래피 간섭계 장치로 주변 진동의 영향을 줄이기 위하여 1.5 m × 3 m 크기의 방진 광학테이블 위에 구성되었다. 홀로그래피 간섭계의 광원은 Spectra Physics사의 5 W 급 Ar+ 레이저로, 실험에서는 단일모드 514.5nm에서 200mW의 출력을 사용하였다.

홀로그래피 간섭계는 시준(collimated) 물체빔을 사용하는 방식으로 구성하였는데, 이 방식은 고속 촬

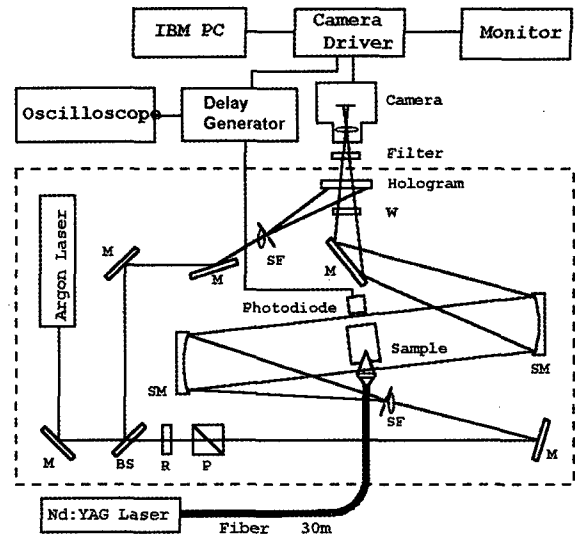


Fig.1 Schematic diagram of holographic interferometer for visualization of laser induced plume

영시의 노출량과 간섭무늬의 위치(fringe localization) 이탈 문제에서 유리하다. Fig.1의 SM은 물체빔에 사용된 schlieren 거울로, 초점거리가 2m이고 직경이 200mm인 구면 반사경이다. 용접시편은 이 두 schlieren 거울 사이의 빛의 경로가 서로 겹치지 않는 영역에 놓여졌다. 물체 경계 면에서의 회절에 의한 간섭무늬 왜곡을 없애기 위해, 고속카메라의 렌즈로 용접 시편을 정확히 결상하였다.

홀로그래피 건판은 노출 후 화학처리 과정을 거쳐 홀로그램을 형성한 후, 제자리에 다시 고정된다. 홀로그래피 건판은 100mm × 125mm 크기의 Agfa 8E56HD를 사용하였으며, 노출은 0.06 J/m²를 주었다. 화학 처리는 Kodak D19 현상액과 Ilford SP679C 표백액을 사용하였으며, 수세 후에는 Kodak Photo Flo 처리를 하였다. Fig.1의 빔 분할기 뒤의 R과 P는 각각 위상 지연판과 편광판으로 물체빔의 세기를 조절하여 간섭무늬의 콘트라스트를 높이는데 사용되며, 홀로그램 앞의 광학 웨지(W)는 기준 간섭무늬를 조절하기 위해 설치하였다.

2.2 고속 카메라 및 기타 장치

용접 시편 위의 테스트 구역을 지난 레이저빔은 고속 카메라로 입사시켜 센서에 시편의 상이 맺히도록 하였다. 플룸 및 증발합금원소의 밀도에 의한 간섭무늬를 관찰할 때에는 카메라 앞에 514.5nm (FWHM = 10nm)의 투과 간섭필터를 사용하여 레이저 이외의 빛을 차단하여 간섭무늬의 가시도를 높였으며, 레이저

여기 플룸을 직접 관찰할 때는 카메라 렌즈의 조리개를 사용하여 빛의 밝기를 조절하였다. 상의 기록은 디지털 방식의 Kodak Ekta-pro 1012 고속카메라를 사용하였다. 이 카메라는 전체 화면을 사용할 때 초당 1000 프레임의 속도로 촬영할 수 있으나, 본 실험에서는 카메라 센서의 1/3 만을 사용하여 초당 3000 프레임의 속도로 사용하였다.

레이저 용접 시편 위에는 포토다이오드를 설치하여 Nd:YAG 레이저 펄스를 측정하였고, 이 신호와 지연 펄스 발생기를 사용하여 고속 카메라를 동기 시켰다. 사용된 고속카메라는 3000 f/s의 속도로 촬영할 경우 3000여 프레임의 영상을 메모리에 저장할 수 있으며, GPIB를 사용하여 촬영한 영상을 컴퓨터에 전송한다.

용접 시편은 STS 304 판재를 사용하였으며, 이외의 광학적인 실험 조건은 Table 1에 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

레이저를 조사할 때 발생하는 플룸과 냉각된 플룸을 구성하는 증발된 합금원소를 고속카메라로 직접 촬영했을 때와, 홀로그래피 간섭계를 사용하여 가시화 시

킨 후 고속카메라로 촬영한 결과를 비교하였다. 두 실험은 동일한 실험조건 하에서 수행되었으나, 시편의 재질 및 표면 상태의 미소한 차이, 분위기 가스 상황 등에 의해 완전히 동일한 상태라고는 볼 수 없다. 그러나 전체적인 경향을 관찰하여, 간섭계의 적용을 실험적으로 보이는데는 별 무리가 없다고 할 수 있다. Fig. 2에서 Fig. 5까지의 사진은 실험 결과로, 그림의 scale은 모두 Fig.2에서 표시한 것과 동일하다.

Fig.2와 Fig.3은 펄스 당 에너지가 10.5J 일 때의 실험 결과이다. Fig.2는 플룸의 고속카메라 사진으로 렌즈의 조리개 값은 5.6이었으며, Fig.3은 이것을 홀로그래피 간섭계로 가시화 시킨 후 고속카메라로 촬영한 결과이다. 고속카메라는 레이저 출력 펄스를 사용하여 동기 시켰고, 기록 속도는 초당 3,000 프레임으로 하나의 간격은 1/3000초의 간격을 나타낸다. Fig.2의 (f)는 23번째 사진으로, 촬영순간은 $1/3000 \text{ s} \times 23 = 7.7 \text{ ms}$ 가 되어 레이저 펄스 폭 7.5 ms를 바로 지나 레이저의 조사가 끝난 직후이다. 사진에서 촬영된 것은 여기 플룸이 냉각과정중 일부가 카메라에 기록된 것이라 할 수 있다. 그 이후의 사진에서 플룸은 대기 중에서 냉각되어 비 발광 상태로 사라지고 있는

Table 1. Specifications of laser welding

	Specifications
Laser	Pulsed Nd:YAG laser (average power 1.2 kW, Rofin-Sinar)
Optical fiber	Core diameter : 0.8 mm, Delivery : 30 m
Optical system	F-number : 3, Focal length : 150 mm
Laser pulse	Pulse width : 7.5 ms Intensity distribution : Circular (multi-mode) Energy per pulse : 7J, 10.5J, 15J, 19J Spot size : 0.72 mm ² Peak intensity : 130kW/cm ² , 195kW/cm ² , 278kW/cm ² , 352kW/cm ²

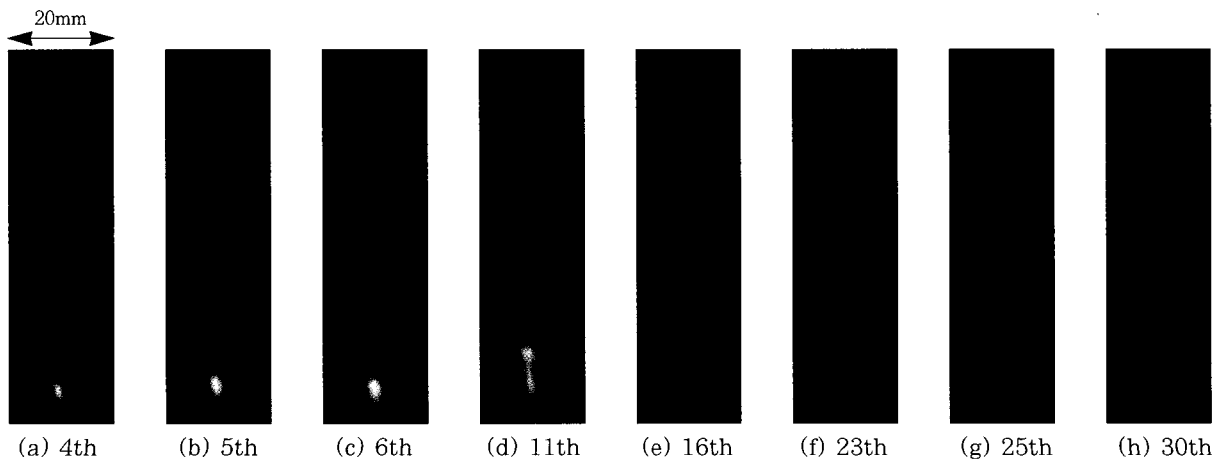


Fig.2 Laser induced plume recorded by high-speed camera (Pulse energy = 10.5J)

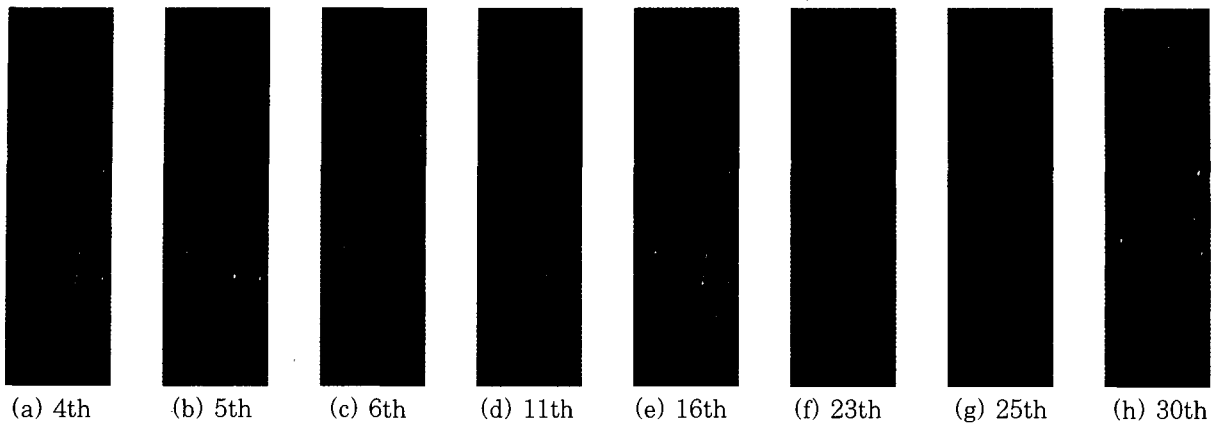


Fig.3 Holographic fringe patterns of laser induced plume and vaporized metal (Pulse energy = 10.5 J)

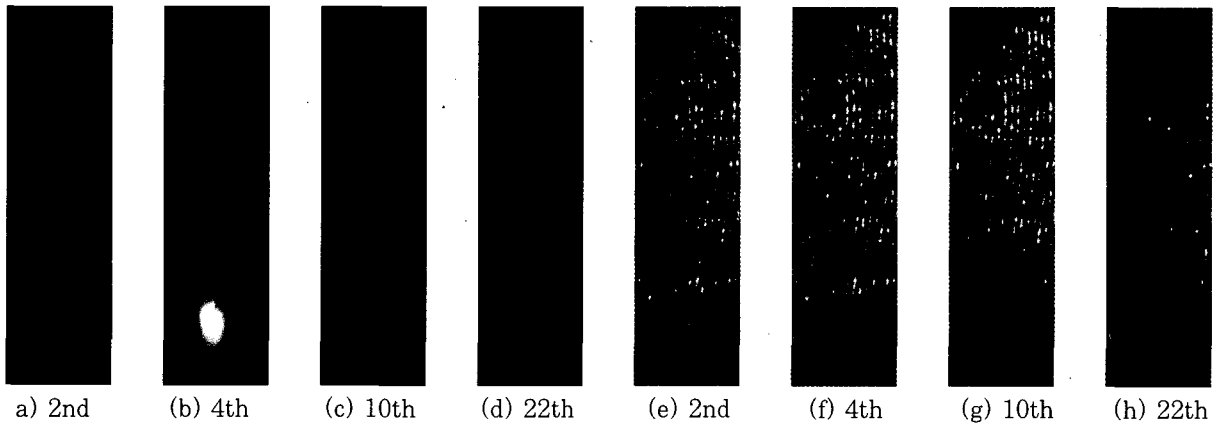


Fig.4 Laser induced plume and Holographic fringe patterns (Pulse energy = 15 J)

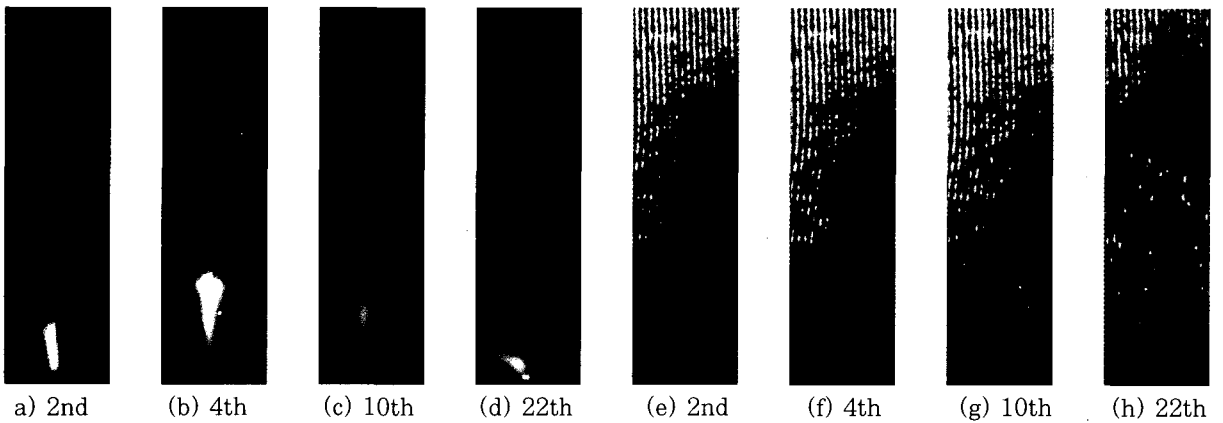


Fig.5 Laser induced plume and Holographic fringe patterns (Pulse energy = 19 J)

며, 단지 플룸을 형성하였던 증발된 합금원소들이 대기 중에 확산되어 팽창하는 것을 Fig.3에서 알 수 있다. Fig.3 에 나타난 세로 방향의 가는 간섭무늬는 carrier fringe가 아니고, 홀로그램 판의 앞/뒤 면에서 반사된 레이저빔들의 간섭무늬로, 플룸의 유동과는 무

관하다.

Fig.4는 펄스 당 에너지가 15J 일 때의 실험 결과이다. Fig.4의 고속카메라 사진은 조리개를 8로 놓고 촬영한 것으로 Fig.2의 사진에 비해 노출량이 1/2이다. Fig.2, Fig.3의 결과와 비교하여 상대적으로 고 휘도

의 플룸이 생성되고, 레이저 조사 방향으로 급히 확산됨을 알 수 있다. 특히, 고속카메라 사진에서는 레이저 조사 초기에 강한 빛을 발하며, 레이저가 안정적으로 조사되는 동안에는 발광량이 많지 않음을 알 수 있다.

Fig.5는 펄스 당 에너지가 19J 일 때의 실험 결과로 렌즈의 조리개를 11로 놓고 촬영한 것이다. 고속카메라 사진에서 플룸의 발광은 4번째 프레임에서 강하게 나타나고 10번째에서는 상대적으로 약하며, 22번째 프레임에서는 용접 풀 부분에서만 약간 발생하고 있다. 그러나 실제 플룸을 이루는 증발원소의 양은 우측의 홀로그래피 간섭무늬 사진에서 알 수 있듯이, 앞에서 발생한 플룸은 냉각되며 대기 중으로 확산하고 용접 풀에서는 계속적으로 플룸이 발생하고 있음을 알 수 있다.

레이저 펄스 에너지가 7 J 일 때의 실험 결과에서는 고속카메라에 의한 촬영과 홀로그래피 가시화 촬영 결과 모두 레이저 용접 풀 부근에서만 약간의 플룸 및 간섭무늬가 형성되고 레이저 조사 시간동안이나 레이저가 멈춘 후에도 전파되지 않았다. 즉, 이 조건에서는 플룸이 거의 발생하지 않았고 따라서 플룸이 냉각된 증발 합금원소도 거의 발생하지 않았다. 이 실험 결과는 본 논문에 신지 않았다.

실험 결과에서 얻은 간섭계 무늬는 유체 밀도에 대한 정량적인 정보를 가지고 있으므로, 기존의 shadow-graph나 schlieren 가시화 방식에 비하여 가시화 결과가 정량적이라 할 수 있으며, 또한 가시화 감도가 좋다는 장점이 있다. 그러나 실시간 간섭무늬의 연속 촬영에 의한 본 실험 결과는 간섭무늬의 정량적 해석이 제한적이어서 정량적인 결과를 얻지는 못했다.

4. 결 론

실시간 홀로그래피 간섭계와 고속카메라를 사용하여, 레이저 여기 플룸을 가시화하고 고속으로 연속 촬영하였다. 별도의 가시화 장치를 사용하지 않은 고속카메라에 의한 촬영된 플룸의 사진과, 홀로그래피 간섭계에 의해 가시화 된 냉각된 플룸을 이루는 증발 합금원소의 촬영결과를 비교하였다. 고속 사진에서는 레이저 조사시간 동안 플룸을 관찰할 수 있었으며, 홀로그래피 가시화 사진에서는 레이저 펄스 이후의 플룸이 냉각된 증발 합금원소의 거동에 대한 정보를 간섭무늬 형태로 볼 수 있었다.

홀로그래피 간섭계에 의한 용접 현상의 가시화 및 기록은 일반 간섭계와 마찬가지로 정량적인 정보를 보유하고 있다는 점에서 기존의 가시화 방법이나 직접적인

촬영 방법을 보완하는 또 하나의 방법으로 활용 가치가 있다. 또한 대부분의 간섭계가 고품질/고가의 광학부품을 사용하는데 비해, 본 실험에서는 고가의 광학부품을 사용하지 않고, 간섭계를 구성하여 가시화 결과를 얻을 수 있었다.

추후에는 분위기 가스에 의한 플룸의 제거 현상연구 등에 본 방법을 계속적으로 활용할 예정이며, 이중 기준빔을 사용하는 펄스 홀로그래피 간섭계 방법으로 정량적 측정을 시도할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 정진만, 권성욱, 김철중, "Nd:YAG 레이저를 이용한 증기발생기 전열관 sleeve 보수 용접 연구," 한국원자력학회 '95 추계학술발표회 논문집 II, (1995), pp. 961-966
2. W. Catzweiler, D. Maischner, F.J. Faber, c. Derichs, E. Beyer, "Model of dynamic behaviour in laser beam welding," Proceedings of SPIE, Vol. 1132, (1989), pp.157-165
3. Takashi Ishide, Yasumi Nagura, Osa Matsumoto, Tadashi Nagashima, Takuya Kidera, Akira Yokoyama, "High power YAG welded sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plants," Proceedings of LAMP '92, (1992), pp.957-962
4. Isamu Miyamoto, Kiyokazu Mori, "Development of in-process monitoring systems for laser welding," Proceedings of ICALEO '95, (1995), pp.759-767
5. Akira Matsunawa, Jong-Do Kim, Tadashi Takemoto, Seiji Katayama, "Spectroscopic studies on laser induced plume of aluminum alloys," Proceedings of ICALEO '95, (1995), pp. 91-100
6. H.C. Peebles, R.L. Williamson, "The role of the metal vapor plume in pulsed Nd:YAG laser welding on Aluminum 1100," Proceedings of LAMP '87, (1987), pp.19-24
7. W. Gatzweiler, D. Maischner, E. Beyer, "On-line plasma diagnostics for process-control in welding with CO₂ lasers,"

- Proceedings of SPIE, Vol. 1020, (1988), pp.142-148
8. Jian Lu, Chang Xing Wang, Xiao Wu Ni, An Zhi He, "Optical measurement for the initial stage of laser-produced-plasma and shock wave on the surface of an aluminum target," Proceedings of SPIE, Vol. 1553, (1991), pp.430-433
 9. A. Matsunawa, S. Katayama, "High speed photographic study of YAG laser materials processing," Proceedings of ICALEO '85, (1985), pp.41-48
 10. Yuan Yonghua, Liu Changling, "Shearing interference diagnosis of laser induced vapor plume," Proceedings of SPIE, Vol. 1553, (1991), pp.670-675
 11. M. Essien, D.M. Keicher, "Enhanced imaging of a pulsed Nd:YAG metal vapor plume," Journal of Laser Applications, Vol. 10, (1998), pp. 85-89
 12. 백성훈, 홍석경, 김철중, "실시간 홀로그래피 간섭계를 이용한 충격파의 가시화," 응용 물리, Vol. 6, No.2, (1993), pp.198-203