

2. 특집기사

레이저 용접품질 모니터링 기술의 진보와 기술산업계로의 적용

Progress of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding and Its Industrial Application



김 중 도 (J-D Kim)

- 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수
- 대한용접학회 편집위원, 고에너지연구위원회
총무위원
- Editor board, International Journal of KWS
- 레이저가공학회 편집위원
- E-mail : jdkim@hanara.kmaritime.ac.kr

1. 서 론

20세기 문명의 개가라 일컬어지는 레이저열원의 기술산업계로의 응용은 우주 비행체, 원자로 등의 대형구조물로부터 IC 부품 등의 미세구조에 이르기까지 더욱더 가속화되고 있으며 급속히 팽창하고 있다.

레이저 빔은 코히런트한 고파워 밀도를 대기 중에서 얻을 수 있는 광열원으로 제어성이 우수하고 빔의 원거리 전송이 가능하며, 고품질·고속의 깊은 용입 용접이 가능하다는 점에서 주목되고 있다. 그러나, 현재로서는 대량생산에 적용할 경우 신뢰성과 안정성이 불충분하다는 등의 과제를 남겨두고 있다. 레이저 용접은 고속으로 행하여지기 때문에 용접후의 비파괴 검사는 여기에 추종하지 못하며, 비용의 증가도 무시할 수가 없다. 그래서 용접 중에 비드품질의 가부를 판정하고자 하는 것이 인 프로세스 모니터링인 것이다.

본 해설에서는, 산업계에 적용되고 있는 레이저 용접시의 인 프로세스 모니터링에 대한 문제점과 현재의 동향을 알아보고, 모니터링시 이용되는 검출인자의 특징과 상호관련성, 그리고 현장의 적용

례에 대하여 소개하고자 한다.

2. 레이저 용접의 문제점과 모니터링 기술의 현상(現狀)

2.1 레이저 용접의 문제점

레이저 가공은 고정도(high precision)· 고품질(high quality)· 고능률(high efficiency)의 응용기술로서 주목받고 있으나 현재의 기술수준은 레이저의 본질적인 잠재적 능력을 충분히 발휘하고 있다고는 볼 수 없다. 최대의 문제점은 현재의 레이저 가공기술에는 적응제어는 말할 것도 없이 인 프로세스 모니터링도 소수의 적용례를 제외하고 채용되어 있지 않다는 것이다.

여기에는 몇 가지 이유가 있는데, (1) 미소공간· 단시간에 발생하는 레이저 가공현상의 상세한 과학적 해명이 부족하여 제어인자가 명확히 규명되어 있지 않으며, (2) 비록 제어인자가 판명되어도 현재의 레이저 발전기 및 주변기기(광전송, 집광광학계, 가공테이블, 로봇, NC기기 등)의 안정성과 고속응답성 정도(精度) 등이 불충분하고, (3) 기기 시스템의 초기설치 비용 및 운영 유지비

용(running-cost)이 높아서 대량생산 이외의 분야에서는 cost-merit가 약하다는 점 등을 들 수 있다.

레이저 가공현상의 과학적 해명이 지연되고 있는 원인에는, (1) 가공 중 재료내부에서 일어나는 현상의 직접적 관찰이 어렵다는 것, (2) 또한 이미 판명되어 있는 현상이라 할지라도 이론적 설명이 되어 있지 않은 부분이 다수 있기 때문이다.

에너지 밀도가 높은 레이저 가공에서는, 재료의 증발현상이 가공현상의 주도적 역할을 하고 있으나 현재로서는 정량적으로 예측하기 어렵다. 따라서, 가공현상에 대한 실험적 해명과 이론적 정립은 레이저 가공의 적응제어 실현에 있어서 해결해야 할 최대의 과제인 것이다.

2.2 레이저 용접품질 모니터링 기술의 현상(現狀)

레이저 용접을 비롯한 레이저 가공시의 인프로세스 모니터링기술의 개발이 전세계적으로 중요 과제로 되어 있다. 지금까지 레이저 용접의 품질을 모니터링 하기 위한 검출 대상은 레이저 유기 플라즈마의 발광(LE : light emission)강도, 음향 방출(AE : acoustic emission)신호, 레이저의 반사광 강도, 플라즈마 전계강도 등이다.

분광학적 수법과 초고속 비디오 및 카메라를 이용한 고시간·공간 분해능의 계측수법, 그리고 발광다이오드를 이용하는 방법이 모니터링 기법으로서 주로 채택되고 있는데, 이는 피용접재로부터 증발하는 합금원소의 원자·분자구조를 이해하고 발광스펙트럼의 해석에 의한 증발 거동의 예측, 그리고 플라즈마와 키홀거동과의 상관성 등에 대한 모니터링의 기초적 지견을 얻는데 유용하다¹⁻⁶⁾. 또한 실제 현장에 적용하여 실용화하고 있는 사례도 보고되고 있다⁷⁻⁹⁾.

유기 플라즈마와 더불어 방출되는 음향신호(AE)를 이용한 연구도 모니터링 수법의 하나로서 이루어지고 있다¹⁰⁻¹²⁾. 주된 연구내용은 음향 발생 프로세스를 비롯하여 음향신호와 유기 플라즈마 발광강도 및 키홀 거동과의 상호 관련성, 그리고 용접 품질과의 관련성이 그것이다. 그러나 생산현장에서는 기계설비 등으로부터 발생하는 환경 등의 영향을 받기 쉬운 단점이 있다.

용접시의 레이저 반사광을 용접부의 발광강도

와 동시에 모니터링 하는 방법도 보고되고 있다⁸⁾. 그러나 레이저 빔의 반사특성은 매우 복잡하며, 신호강도와 용접성능과의 직선적인 관련성을 원리적으로 찾기 힘들며, 비드의 용입특성이 열전도형인지 또는 깊은 용입형인지 판별하는 정도의 On-Off 판정에 한정된다 할 수 있다.

플라즈마의 전계강도를 이용한 모니터링에 관한 연구도 W.M. Steen 과 M. Watanabe 등에 의해 이루어지고 있으나 실용화단계에는 이르지 못하고 있다^{13,14)}.

다음 장에서는 레이저 용접품질의 모니터링 적용 사례에 앞서 지금까지 많은 연구가 이루어지고 있는 유기 플라즈마 및 키홀 거동의 직접적 관찰 예와 상호 관련성, 그리고 플라즈마로부터의 광신호와 음향신호로부터의 계측 결과를 소개하고자 한다.

3. 레이저 용접품질 모니터링에 이용되는 검출인자

3.1 레이저 유기 플라즈마와 키홀의 거동

고에너지밀도 열원에 의한 용접에서는 미소영역에서 단시간에 현상이 완료하기 때문에 용접현상에 관한 이해가 부족한 것이 현상(現狀)이다. 특히 증발원소의 반조력에 의해서 형성되는 키홀현상은 입사레이저 빔과 플라즈마, 또는 플라즈마와 재료와의 상호작용, 키홀내의 빔의 반사 및 흡수형태가 고려되어야 하므로 실험적·이론적 연구가 심도있게 이루어지고 있다.

본 절에서는 인프로세스 모니터링 및 적응제어

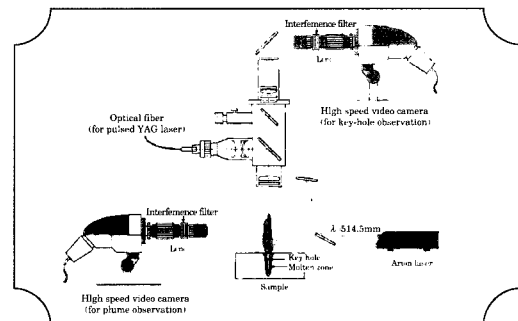


Fig. 1 Schematic optical arrangement for observation of plasma and keyhole

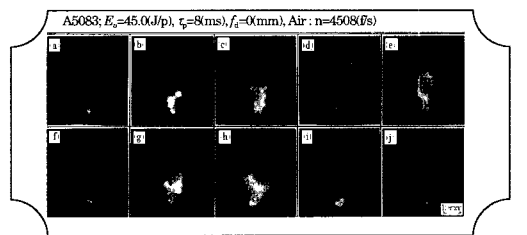
에 관한 기초적 지견이 되는 레이저 유기 플라즈마와 키홀의 거동에 관하여 설명한다.

Fig. 1에 펄스YAG레이저 용접시 유기하는 플라즈마와 키홀거동의 동시계측에 이용한 초고속 계측 시스템의 모식도를 나타낸다. 본 계측에 이용한 비디오 카메라의 최대촬영 속도는 40,500 f/s이며, 키홀 관찰시의 조명용 광원으로는 Ar⁺레이저 ($\lambda=514.5\text{nm}$, $P_o=2\text{W}$)를 이용하고 집광 및 관찰 광학계는 직접 설계한 것이다.

Fig. 2에는 레이저 유기 플라즈마의 거동을 계측한 한 예를 나타내고, Fig. 3에는 Fig. 1의 특수 광학계를 이용하여 용융 풀에 형성되는 키홀의 거동을 상부에서 관찰한 예를 각각 나타낸다. 단시간의 레이저 조사중에도 유기 플라즈마는 전반에 걸쳐서 격심한 변화를 보이고 있으며, 키홀의 거동 또한 레이저 조사 후 다소 지연되어 형성되어 시간의 경과와 더불어 그 직경과 형상이 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 또한 10ms의 레이저 조사가 종료

된 직후부터 용융 풀에 형성되어 있던 키홀이 주변의 용액의 급격한 함몰에 의하여 600 μs 라는 짧은 시간에 소실되며, 용접 후에 키홀이 형성되었던 하부에는 기공이 형성되어 있음을 알 수 있었다.

유기 플라즈마와 키홀거동의 동시 계측 결과, 사용하는 피용접재의 종류에 따라 유기 플라즈마는 성장거동과 발광강도에 있어서 일정 주기를 가지고 변화하였으며, 저자의 계측결과로는 상기의 레이저 조사조건에서 알루미늄 합금 A5083의 경우 약 450 μs , STS304 스테인리스강의 경우 약 150 μs 의



(a) 0.18ms (c) 1.51ms (e) 3.51ms (g) 5.51ms (i) 6.84ms
(b) 0.41ms (d) 2.18ms (f) 4.8ms (h) 6.17ms (j) 7.73ms

Fig. 2 High speed photographs of laser induced plasma of A5083 alloy in air

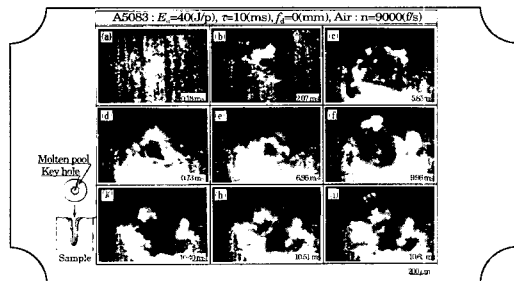
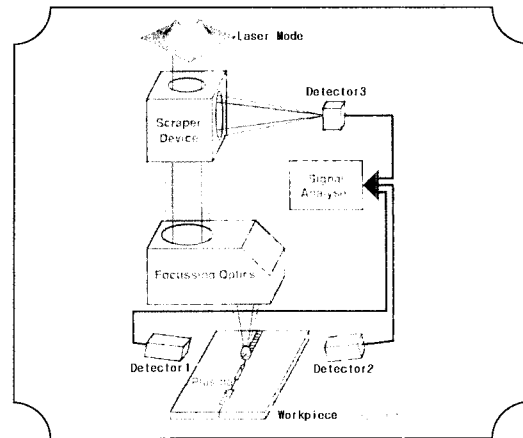
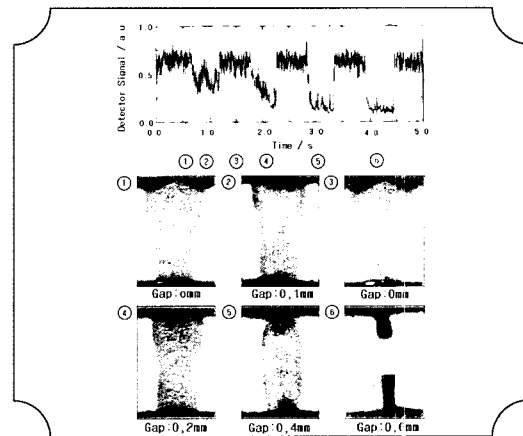


Fig. 3 Typical temporal change in keyhole surface geometry in molten pool during YAG laser spot welding



(a)



(b)

Fig. 4 Experimental setup(a) and detection results(b) of the gap in butt welding of 3mm thick mild steel by monitoring the plasma light

주기적 변화를 보이며 용접이 이루어지고 있음을 확인하였다.

이러한 주기적 변화는 용융부에 형성되는 키홀의 거동을 그대로 반영하고 있었으며, 광다이오우드 등을 이용한 플라즈마의 발광 강도 신호의 시간 변화에도 그대로 리얼하게 표현되고 있음을 알 수 있었다.

이것은 플라즈마로부터의 발광강도 신호를 분석함에 따라 용접시의 용접상황을 실시간으로 감시 할 수 있음을 의미하는 것이며, 키홀을 얼마나 안정하게 제어 할 수 있느냐 하는 것이 용접품질을 좌우하는 변수임을 알게 해 주는 것이다.

Fig. 4에는 E. Beyer와 P. Abels 이 두 개의 피용접재를 맞대기 용접(butt welding)하고, 용접선 갭(gap)의 차이에 따른 유기 플라즈마의 발광강도 차이를 모니터링 하는데 사용한 장치의 개략도와 그 결과를 나타낸다¹⁾. 용접선의 갭이 커짐에 따라 용접개소의 플라즈마 강도가 약해지며 건전한 비드가 형성되지 못하고 있음을 보여준다. 용접시 유기되는 플라즈마의 강도 또는 온도변화는 용접공정 중의 비드형태의 변화를 실시간으로 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 음향 방출신호의 특성

레이저 용접시에는 유기 플라즈마의 발광뿐만 아니라 음향도 방출된다. 이러한 음향신호의 변화 또한 용접현상을 잘 나타내는 검출인자로서 인프로세스 모니터링 기술에 이용된다. 그러나 가공현장에서는 잡음원(noise source)이 많으므로 경우에 따라서는 광을 검출하는 것이 유리할 수도 있다는 것을 우선 지적하고자 한다.

본 절에서는 지면관계상 음향 방출의 물리적 발생 메커니즘에 대해서는 깊이 있게 논하지는 아니하나, 모니터링시의 기초적 지식으로서 유기 플라즈마로부터의 광신호와 음향신호와의 관련성 측면에서 설명하고자 한다^{6,10,15)}.

Fig. 5는 연속 CO2 레이저빔을 100Hz로 펄스화하여 피용접재에 조사하였을 때 플라즈마로부터의 광신호와 음향신호의 거동을 나타낸다. 또한, Fig. 6에는 Fig. 5의 신호를 고속 푸리에 변환(FFT)에

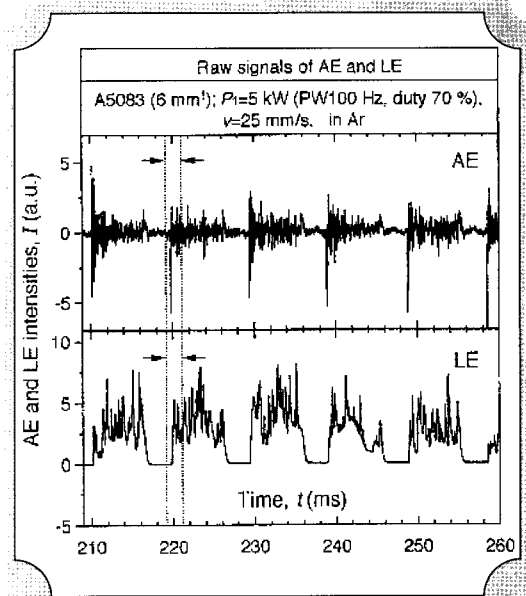
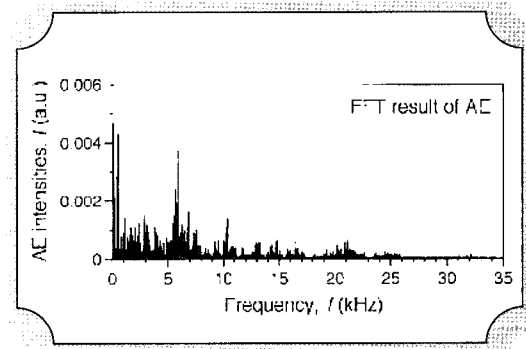
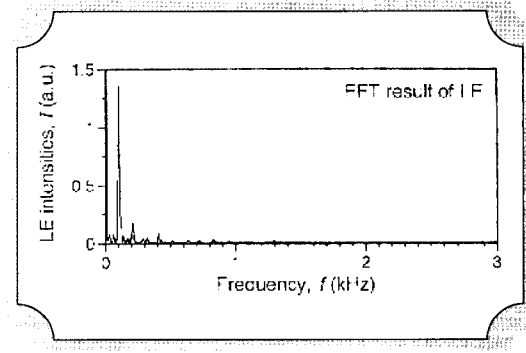


Fig. 5 Raw signals of AE and LE measured during pulsed CO2 laser welding(duty:70%)



(a)



(b)

Fig. 6 FFT results of AE (a)and LE (b)in Fig. 5

의해 주파수 분석한 결과를 각각 나타낸다.

각 신호의 주파수분석 결과, 100Hz로 조사되고 있는 레이저의 펄스 성분이 높은 피크 강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 음향 파형에는 다수의 공명선도 보이고 있다. 급속하게 상승하는 높은 피크의 강도변화는 용융부내에 형성되어 있는 킨홀로부터 방출되는 순간적인 물질이송의 변화에 기인하는 것으로 추정된다^{6, 15)}.

Fig. 7에는 레이저 용접시 사용하는 분위기 가스의 종류에 따라 변화하는 음향신호의 변화(a)와

FFT분석 결과(b)를 나타낸다. He 가스의 경우, 저주파수 측에 피크 강도를 나타내고 있으나, N₂ 및 Ar가스를 사용함에 따라 저주파수 영역의 강도는 약하게 되고 고주파수 측으로 피크강도가 이동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 다른 재료에도 동일하게 나타나고 있다. 즉, 사용하는 실드가스(shielding gas)에 따라 용융부에 형성되는 킨홀의 주기적 변화가 고주파수 영역으로 이동하고 있음을 반영하며, 이것은 용융부의 깊이가 얕아짐에 따라 킨홀의 변동주기가 짧아지는 것을 시사하는

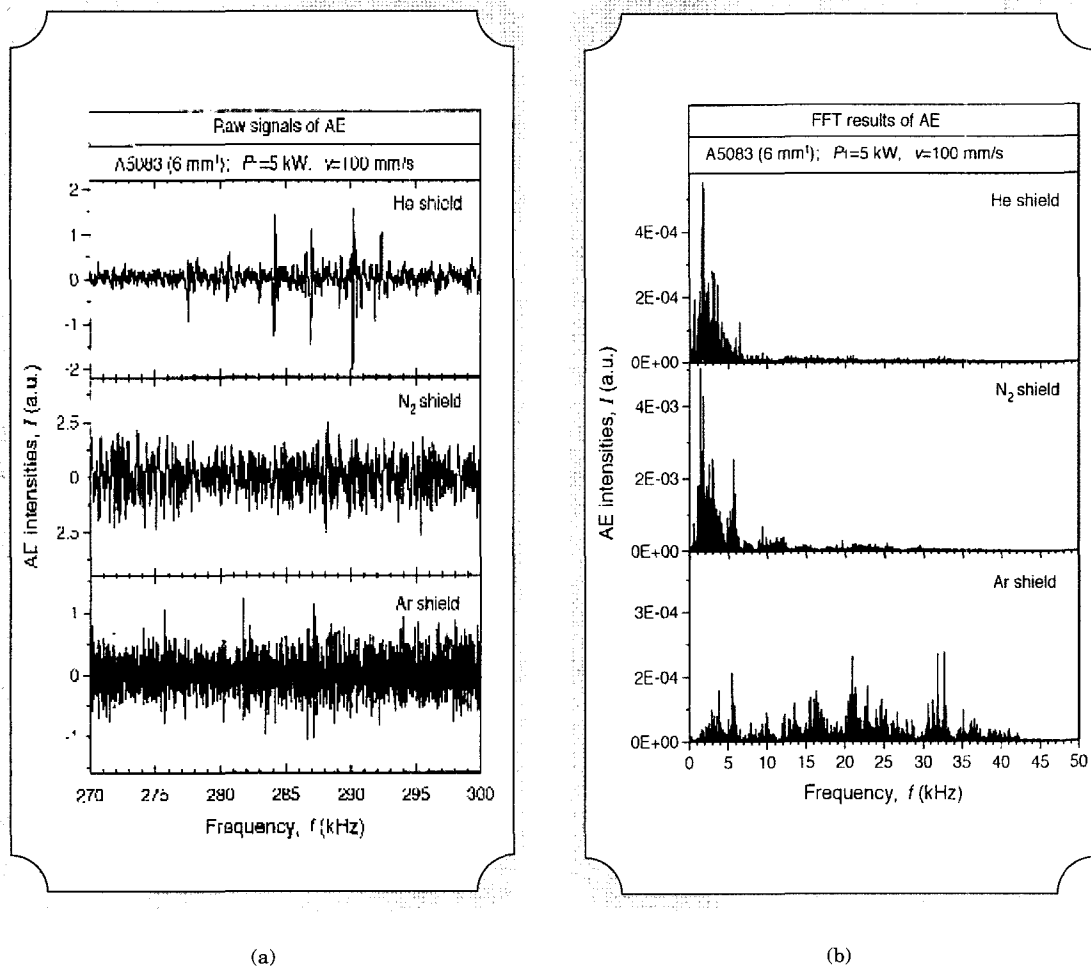


Fig. 7 Comparison of raw signals(a) and its FFT results(b) during CO₂ laser welding in He, N₂ and Ar shielding gases

것이다¹⁵⁾.

4. 레이저 용접품질 모니터링 시스템의 적용 사례

4.1 자동차 산업에 있어서 tailored blank 용접에의 적용

자동차 업계에 레이저 가공을 적용한 것은 1980년대부터 레이저 절단과 트랜스미션 기어의 용접으로부터 시작되었다. 근년에 와서는 충돌안정성, 높은 차체강도·강성의 향상, 저연비, 경량화를 위한 차량구조의 실용화 검토가 활발하게 이루어지고 있으며 그러한 응용의 대표적인 실례로서는 자동차 차체의 패널부품에 대한 tailored blank 공법을 들 수 있다⁷⁾.

Tailored blank 용접은 프레스 가공전의 소재를

평판의 상태에서 맞대기 용접을 하여 일체로 프레스 성형하는 공법이다. 이렇게 함으로써 대형 패널 부품의 필요한 부위에만 판 두께, 강도, 그리고 표면처리가 다른 강종(鋼種)을 이용 할 수 있게 되어 부품설계의 합리화와 코스트 저감이 가능하게 된다.

Fig. 8은 자동차 차체의 측방향 대형 패널 부품에 대한 tailored blank 용접의 실례를 나타내며, 방수성능(防銹性能: 녹을 방지하는 성능)이 필요한 하부를 표면처리 강판으로 하고 상부의 보통강판과 레이저 용접을 하고 있다. 단일 강종을 사용하는 종래의 blank재에서는 방수성능이 불필요한 상부까지 고가의 표면처리 강판을 사용하였던 것에 비해서 재료비의 비용절감이 되고 있다.

Fig. 9 와 Fig. 10은 tailored blank 용접시에 이용되는 모니터링 시스템의 신호흐름을 나타내는 개

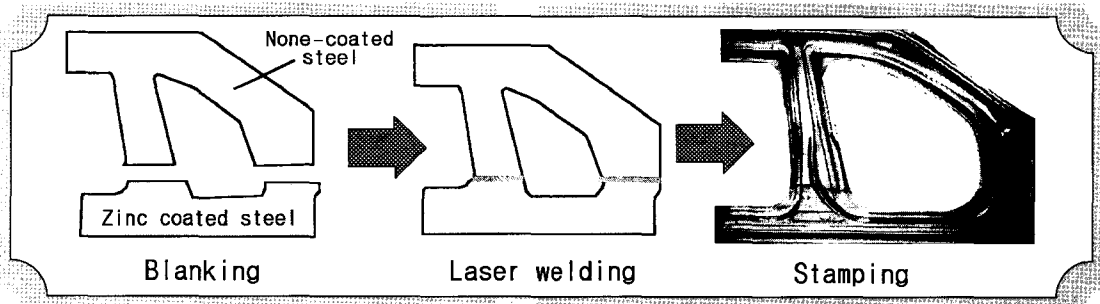


Fig. 8 Laser welded tailored blanks

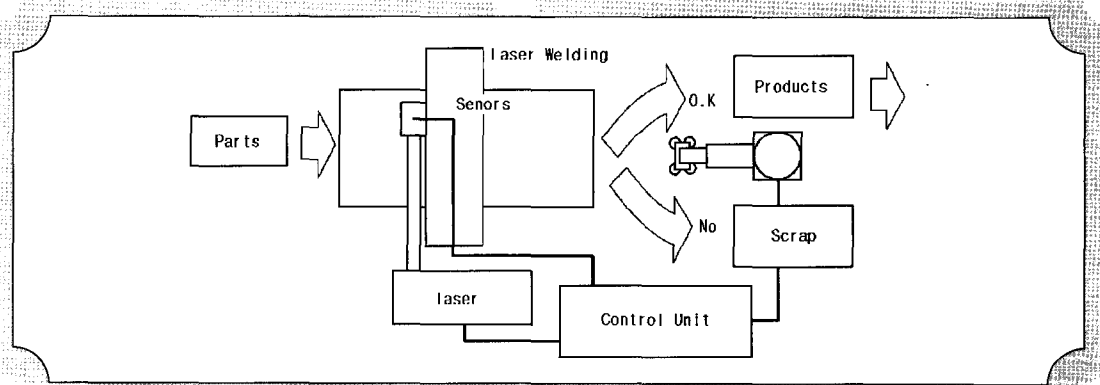


Fig. 9 Schematic diagram of laser welding system developed for production line of automotive parts

략도와 복수의 플라즈마 광센서 시스템의 모식도를 각각 나타낸다. 검출각도가 다른 복수의 센서로 수광된 플라즈마로부터의 광신호를 동시에 계속하여 동축케이블로 처리장치에 보내지는데, 아날로그 필터 및 계장앰프로 전처리한 후에 A/D 변환하여 컴퓨터에 입력하고 있다. 모니터링에 의해서 용접품질의 가부가 판정된 부품만이 다음의 공정으로 보내지며

불량품은 라인으로부터 배제된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 피용접재의 겹치기 및 맞대기 용접시에 underfill 결함이 발생한 경우의 용접단면과 플라즈마로부터의 광신호 변화를 각각 나타낸다. 광센서의 검출각도는 $\theta=10$ 도와 55도의 경우이다. Underfill 결함이 발생한 부분에서는 광강도 변화에 큰 차이를 보이고 있는데, 이것은 관찰각도가 높을

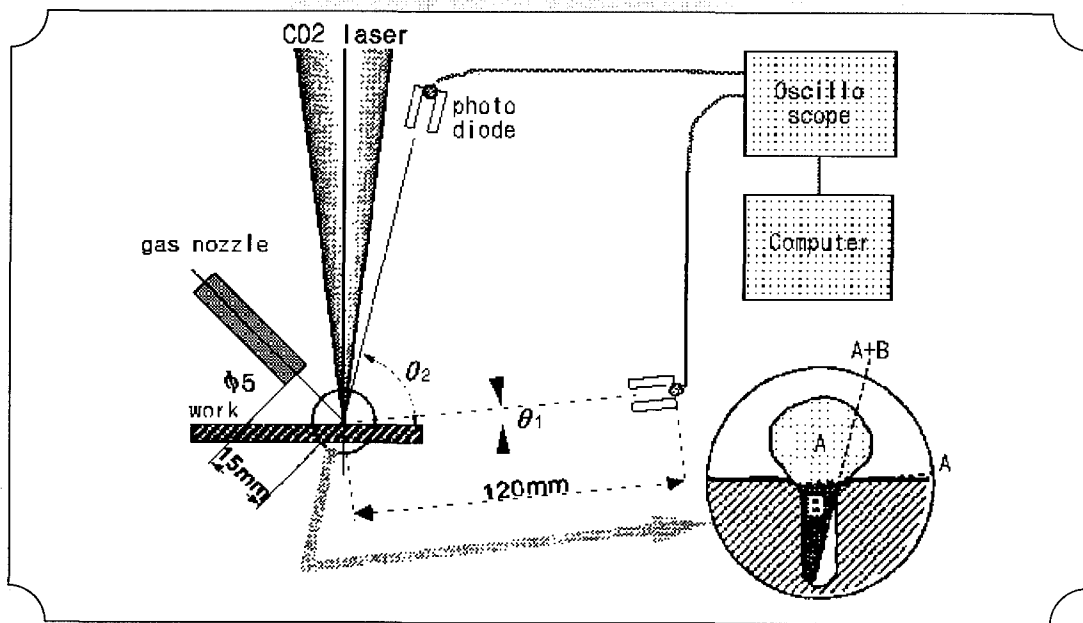


Fig. 10 Schematic diagram of multi-photosensor system

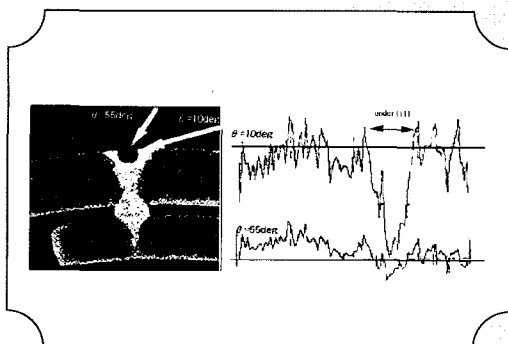


Fig. 11 Example of underfill defect in lap joint

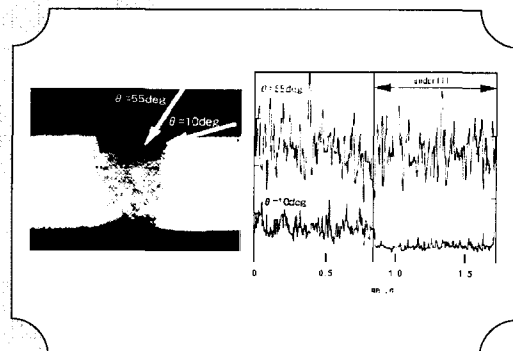


Fig. 12 Example of underfill defect in butt joint

수록 키홀 벽면에서의 차폐효과가 적기 때문이다.

4.2 원자력 발전플랜트의 증기발생기 전열관 용접에의 적용

원자력 분야에서의 레이저 가공은, 제도가공인 가압수형 원자로(PWR)의 제어봉 클러스터 안내관의 레이저 용접을 비롯하여 발전소 현장의 증기 발생기 전열관 보수 등에 실용화 되어 있으며, 앞으로 그 적용 범위가 확대 될 것으로 예상된다. 여기에서는 고출력 레이저 빔의 집광기술 및 광화이버 전송기술의 개발에 의해 전송특성이 우수한 YAG레이저를 사용하여 원자력 플랜트 증기발생기 전열관의 보수 용접에 적용되고 있는 모니터링 법에 대하여 설명한다^{8,9)}.

Fig. 13에 실제의 원자력 플랜트에서 실용화되어 있는 시공시스템의 조감도를 나타내고, Fig. 14에 증기발생기 전열관의 레이저 슬리브(sleeve) 용접법의 개략도를 나타낸다. 레이저를 탑재한 컨테이너(container)는 정기검사가 행해지는 플랜트로 트럭에 탑재되어 운반된다. 컨테이너 내에서는 증기발생기 내부와의 통신이 음성과 모니터 화상에

의해 가능하며, 발전기의 제어와 더불어 용접공구의 제어를 행한다. 또한 용접상황의 모니터링 결과도 컨테이너 내부의 컴퓨터로 보내어져 용접의 양부(良否)를 판정한다. 트레일러(trailer)에는 로봇 아암(arm)이나 보행 로봇 및 각종 공구를 제어하기 위한 컨트롤러가 탑재되어 있다. 이러한 컨테이너와 트레일러는 증기발생기 1기에 대해서 각각 1대가 로(爐)의 격납용기 외부에 배치되어, 모든 작업이 원격조작으로 행해진다.

증기발생기는 원자력 발전 플랜트에서 가장 중요한 열교환기이며 원자로에서 얻어진 열에너지를 증기의 형태로 더어빈에 보내고 있다. 증기 발생기는 1 플랜트에 2~4기 설치되어 있으며 높이가 약 20m 정도의 구조물로서 내부에는 전열세관(傳熱細管)이 수천개 삽입되어 있다. 이러한 전열세관의 보수 용접은, Fig. 14에 나타내는 것과 같이, 전열세관의 손상부에 내경 약 17mm의 슬리브를 삽입하여 이 내면으로부터 2개소를 겹치기 용접하는 것으로 협소하고 또한 방사능 분위기의 용접이기 때문에 화이버 전송에 의한 YAG 레이저 용접이 필요 불가결한 수법이다. 2kW급의 YAG

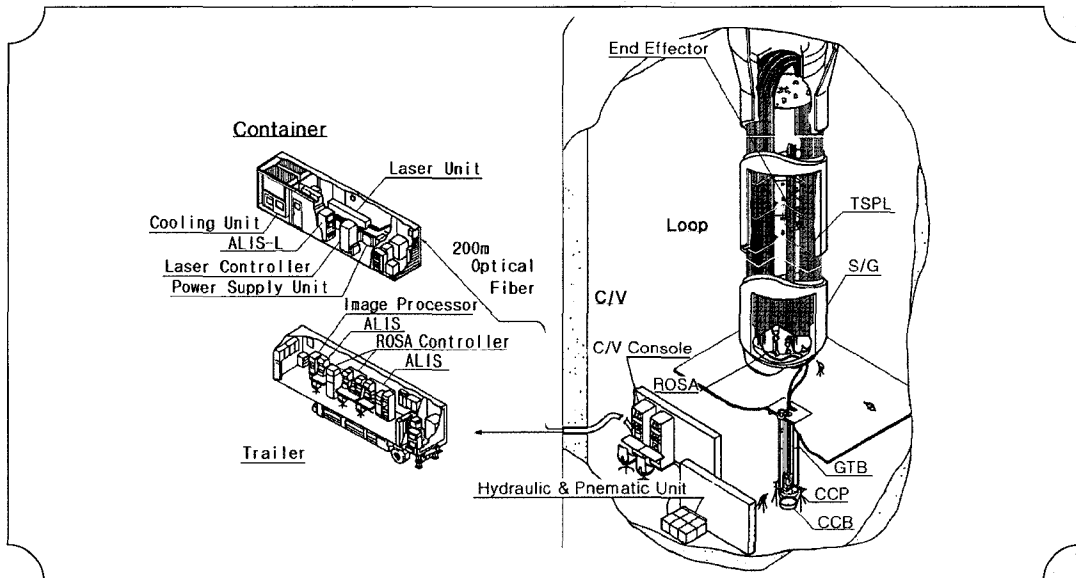


Fig. 13 S/G Laser welding sleeve repair system

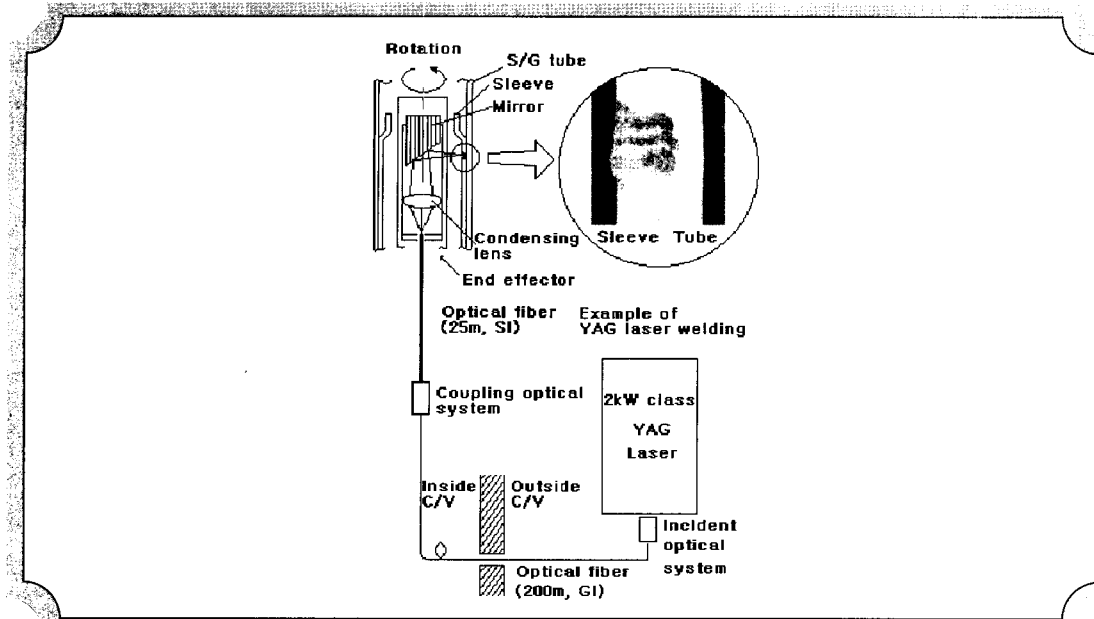


Fig. 14 Outline of laser welding sleeving technology

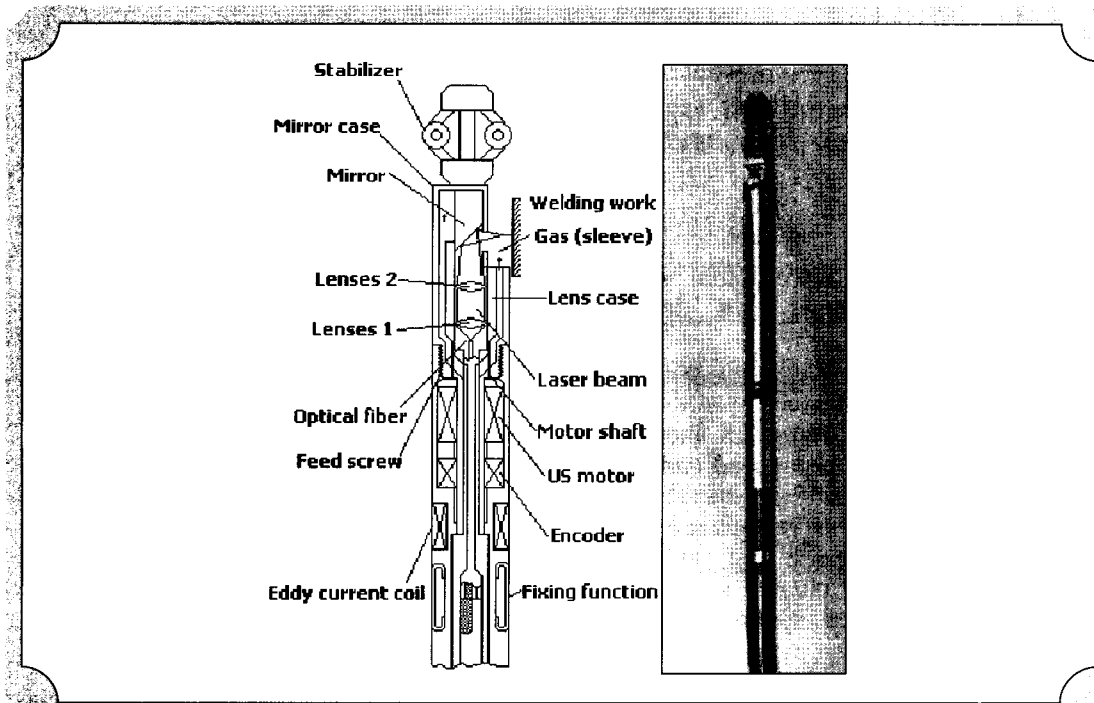


Fig. 15 Laser weld tool

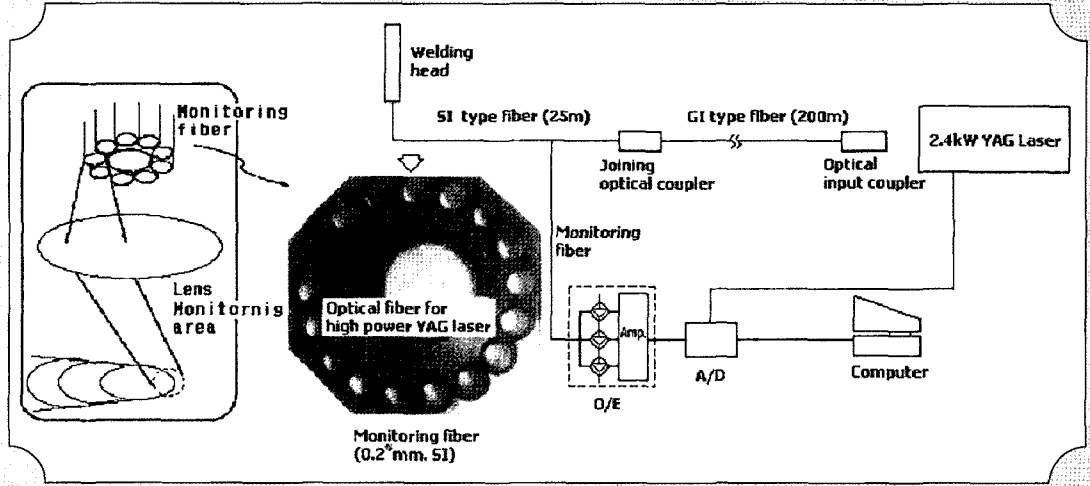


Fig. 16 Monitoring system of welding condition

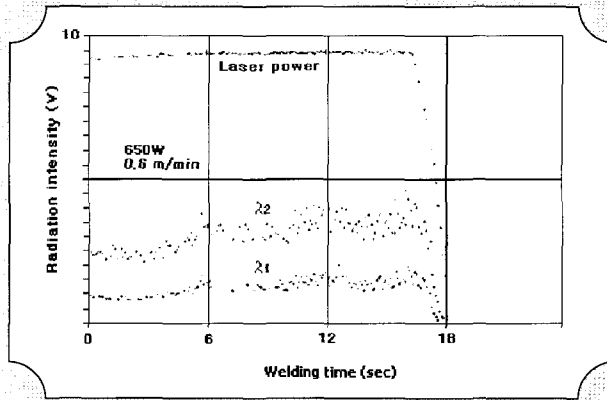


Fig. 17 In-process monitoring example

레이저 연속 빔은 코아직경 0.55mm의 GI형 화이버 또는 코아직경 0.6mm의 SI형 화이버에 의해 원자로의 격납용기내에 전송된다. 여기에서 25m의 SI형 화이버에 의해 접속되어 용접공구의 선단까지 전송된다. 전송된 빔은 소형 용접용 광학계에 집광되면서 급속 미러로 90도 반사되어 슬리브면에 집광된다. 용접은 슬리브 원주 방향으로 빔을 스파이어럴상으로 회전시켜 3패스 용접을 행하며, 회전은 중공(中空)의 초음파 모니터를 이용하고, 용접공구의 외경은 16mm ϕ 이하로 슬리브 내면에

삽입 가능하도록 되어있다. Fig. 15에는 용접에 이용한 공구의 구성을 나타낸다.

용접시의 상황은, Fig. 16의 모니터링 시스템을 이용하여 광학계의 열화현상과 용접의 안정성을 연속적으로 감시하고 있는데, 용접공구의 빔 전송용 화이버의 주변에 코아직경 0.2mm의 SI형 모니터링 화이버를 17개 배치하고, 이 모니터링 화이버에 의한 모니터 광으로부터 특정 파장대의 광을 추출하여 광다이오드에 의해 검출한다.

Fig. 17에는 전열세관내에서 이루어지는 3패스

용접 현상에 대한 모니터 결과의 한 예를 나타내고 있는데, 레이저 발전기 출력(laser power), 용접부의 특징과장대의 발광(λ_1, λ_2)이 모니터 되어 있다. 이외에도 레이저 반사광(λ_3), 용접공구의 회전을 위한 초음파 모터의 회전속도(speed), 모터의 부하비(duty)를 동시에 모니터하고 그 결과를 바탕으로 다변량해석(多變量解析)을 행하여 용접품질의 가부를 판정하며, 이상이 발생하는 경우 neural network에 의해 이상의 원인을 추정하게 된다. 레이저 용접결과에 대한 양부(良否)의 판정결과는, 숙련자와 본 시스템을 이용한 경우의 일치도가 90%이상인 것으로 보고되고 있다.

5. 결 론

레이저 기술을 중심으로 하는 광자 테크놀리지는 21세기의 중심적 기반 기술의 하나임을 직시한다면 레이저 가공현상의 철저한 해명과 그 메커니즘을 설명할 수 있는 물리·화학이론의 확립, 그리고 신학리와 발상에 근거한 고도 적응제어 기술의 개발이 무엇보다 선행되어야 할 것이다.

본 해설지면을 통하여 다소 부족하나마 레이저 용접시의 해결하여야 할 문제점과 인프로세스 모니터링 기술의 연구동향에 대하여 현상을 설명하였다. 또한 용접품질의 모니터링에 이용되는 검출인자에 대한 기초적 물성을 알아보고 용접품질과의 상관관계에 대해서도 약술하였다. 그리고 생산현장에서의 적용사례를 들어 비록 지면상 개괄적인 내용밖에 서술할 수 없었으나 용접품질의 최적화를 꾀하고자 하는 레이저 가공관련 연구자 및 기술자들에게 조금이라도 도움이 되었으면 하는 바램이다.

참 고 문 헌

1. E. Beyer and P. Abels : Process Monitoring in Laser Materials Processing, Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), (1992), 433-438.
2. A. Matsunawa, J.D. Kim and S. Katayama : Porosity Formation in Laser Welding -Welding Mechanism and Suppression Methods-, ICALEO '97, Laser Institute of America, 82(1997), G73-82.
3. A. Matsunawa, J.D. Kim, T. Takemoto and S.

Katayama : Spectroscopic Studies on Laser-induced Plume of Aluminum Alloy, ICALEO'95, Laser Institute of America, 80(1995), 719-728.

4. J.D. Kim, S. Katayama and A. Matsunawa : Laser-Induced Plume and Keyhole Dynamics in Laser Welding, 대한용접학회 1993년도 춘계학술 발표대회, (1996), 79-81.
5. 김종도, 김영식, 조상명 : 레이저 용접시 유기 플룸에 관한 분광학적 연구, 한국레이저가 공학회 1998년도 추계 학술 발표대회, (1998), 10-13.
6. W. Gatzweiler, D. Maischner, E. Beyer : On-line Plasma Diagnostics for Process-Control in Welding with CO2 Laser, SPIE, 1020(1998), 142-148.
7. I. Miyamoto and K. Mori : Development of In-Process Monitoring System for Laser Welding, ICALEO '95, Laser Institute of America, 80(1995), 759-767.
8. T. Ishide et al. : High Power YAG Laser Welding and Its In-Process Monitoring Using Optical Fibers, Proc. ECLAT, (1994), 183-192.
9. T. Ishide, Y. Nagura et al. : High Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants, Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), 2(1992), 957-962.
10. 金鍾道, 水谷正海, 片山聖二, 松繩朗 : レーザ溶接時における發光?音響特性, 日本溶接學會全國大會講演概要, 61(1997), 316-317.
11. L. Li, W.M. steen : Non-Contact Acoustic Emission Monitoring during Laser Processing, ICALEO'92, Laser Institute of America, (1992), 719-728
12. H. Gu and W.W. Duley : Resonant Acoustic Emission during Laser Welding of Metals, J. Physics. D : Appl. Phys., 29(1996), 550-555.
13. L. Li, W. M. steen, K. Shi and D.J. Brookfield : Sensor Development for In-Process Quality Inspection and Optimization of High Speed Laser Can Welding Process, Laser Advanced Materials Processing(LAMP92), (1992), 415-420.
14. M. Watanabe, H. Okado, T. Inoue, S. Nakamura and A. Matsunawa : Features of Various In-Process Monitoring Methods and Their Applications to Laser Welding. ICALEO'95, Laser Institute of America, 80(1995), 553-562.
15. 김종도 : 레이저 용접시 용접결함의 실시간 모니터링법 개발에 관한 연구, 대한용접학회지, 20-1(2002),26-33.