

## 레이저 가공기 주변 기술개발 현황



황 경 현

(가공기술실장)

- '76. 2 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업(학사)
- '78. 2 KAIST 기계공학과 졸업(석사)
- '86. 2 미국 O.S.U. 기계공학과 졸업(박사)
- '78-현재 한국기계연구원 책임연구원



이 성 국

(가공기술실 선임연구원)

- '83. 2 아주대학교 기계공학과 졸업(학사)
- '85. 8 KAIST 기계공학과 졸업(석사)
- '85. 9-현재 한국기계연구원 선임연구원

### 1. 머릿말

전세계적으로 20,000대 이상의 레이저 가공 시스템이 이용되고 있으며 국내에도 100대 이상의 레이저 가공기가 산업체에 재료 가공용으로 이용되고 있다. 레이저를 이용한 재료 가공 기술은 통상적인 가공 기술의 대체 기술로서 각광을 받고 있으며 레이저의 특성을 응용하여 새로운 공정이 개발되어 재료의 사용범위를 확대시키고 공장 자동화와 유연 생산 시스템을 적용시킬 수 있게 되었다. 국내에서도 레이저를 이용한 가공기술이 자동차, 전자산업, 일반산업기계분야 등에 활용되고 있으며 산업체와 연구소 등에서 응용연구와 개발을 수행하고 있다. 레이저가 갖고 있는 유연성과 장점을 최대한 활용하기 위해서는 레이저 빔을 원하는 형태로 전달하고 빔과 공작물의 상호작용에 대한 분석을 하여 이를 토대로 정확하게 조작될 수 있도록 가공기의 성능을 향상시키고 가공변수를 최적화시키는 것이 중요하다. 이러한 목적으로 이 분야에 대한 연구개발 동향과 산업체에서 응용되고 있는 사례를 살펴보도록 한다.

### 2. 빔 전달 시스템과 옵틱

레이저를 이용하여 재료 가공을 하는 경우 출력 자체도 중요하지만 빔 품질(Quality)도 큰 영향을 미친다. 레이저를 선택하는 경우 빔 품질과 빔 형태에 특별한 주의를 기울여야 하는데 빔 품질을 검증하는 목적은 빔특성, 빔전파계산, 빔라인설계, 빔 변수에 관련된 공정변수들의 보정들에 이용할 목적이다. 빔 품질(K, M<sup>2</sup>)의 정의는 근본적으로 이상적인 가우시언 모드와 관련되어 있다. 그렇

지만 대부분의 고출력 레이저에서는 이러한 특성이 충분히 없다는 것을, 재료 가공을 하는 중에 인식하게 된다. 레이저 빔의 국부적인 집속성(Coherence) 때문에 전파축에 따른 출력 분포는 현격히 변할 수 있는데 이러한 결과가 가공 품위에 영향을 크게 미친다. 더구나 고출력 레이저에서 알려진 순간적이고 국부적인 섭동은 모든 응용 분야에서 손상을 준다는 사실을 단순히 무시하는데 고속 가공속도와 고품질을 요구하는 분야에서는 특히 문제가 된다. 그렇지만 이러한 응용분야가 경제적이고 또한 레이저만이 갖는 장점 때문에 레이저가 계속 이용되고 있다. 그러므로 레이저 빔 성능과 응용분야를 확장하기 위해 빔의 전파, 출력 섭동에 관한 세부적인 정보가 있어야 한다. 따라서 레이저 빔의 국부적인 집속 특성을 고려한 빔 특성과 빔 전파에 관한 일반적인 해석에 관한 연구가 행해지고 있다. 적당한 모드 선택을 하여 평균 밀도 분포는 집속계수(MCCS)로 표현된다. 전파 경로를 따른 밀도 변화는 MCCS의 변환법칙에 의해 결정되고 이러한 방법에 의해 전파축을 따라 어떤 점에서 평균화된 출력분포는 임의 축 위치에서 MCCS가 주어지며 계산할 수 있다. 그러므로 레이저 빔의 밀도 전파를 기술하기 위해서는 MCCS의 측정이 레이저 빔을 판독하는 좋은 방법이다. 이와같이 광학장치는 출력손실, 집속성 약화, 모드 변화나 편광변화 등 빔 특성에 영향을 준다. 현재 빔 전달장치 설계의 기본적인 생각은 에너지를 전달하는 빔은 질량이 없으므로 빔 전달장치를 경량화 할 수 있다는 데 있다. 따라서 테이블과 레이저를 고정시키고 고정되거나 움직이는 거울을 이용하여 가공 헤드가 움직여 빔이 전달된다. 가볍고 횡으로 움직이는 테이블에 의해 이러한 부품들이 지지되는 갠트리는 테이블의 총중량을 감소시키고 가속력을 감소시킴으로써 가공 속도를 높일 수 있도록 하였다. 간단한 경우 움직이는 첫번째 미러에서 가공헤드가 있는 두번째 미러로 반사되고 로봇에서는 많은 미러가 이용되는데 출력, 감소를 감수해야 한다. 최소한 미러를 적게 사용해야 하며 두가지 방법에 의해 얻어질 수 있는데 움직이는 레이저 발진기를 제작하거나 빔 전달 장치의 광학장치를 향상시키는

것이다. 첫번째 방법은 조준과 배열을 유지시키기 위해 기계적인 임피던스의 불연속성을 감소시킴으로써 경량화된 발진기를 설계하는 방법이다.

두번째 방법으로 앞으로의 빔 전달 장치의 개발 분야는 보통의 가공 공구로는 접근하기 힘든 공정 응용기술 개발이나 복잡한 형상을 가공하기 위한 응용기술 개발분야일 것이다. 이러한 기술의 예로서 가장 간단한 배열은 집광되지 않거나 진동되는 빔을 이용하여 공정중 평균 출력밀도가 얻어질 수 있도록 하는 기술개발이다. 레이저 빔의 분할과 균일화를 위한 연속적인 재결합에 기초를 둔 시스템은 어려운 조준과 분할된 빔에서 에너지의 불균일 분할로 인해 성능을 발휘하기 곤란하다. 다른 방법은 원통형 미러와 형태가 있는 렌즈를 사용한 정적 옵틱(Static Optic)을 사용하는 것이다. 이 방법은 효율이 좋고 비용이 적게 되는데 기하학적 제약 조건과 공작물 표면에 레이저 빔 밀도 분포가 균일하게 남아 있지 못하기 때문에 실용화 되지 못하고 있다. 그렇지만 이 방법은 빔 균일화와 결합되어 미래에는 응용이 많을 것이다. 다른 하나의 주요변수는 주 빔축과 공작물의 움직이는 방향과의 각도이다. 실제로 사각형, 원통형, 타원형의 빔 형상은 공정중 이 각도가 변할때는 오직 축대칭 빔이 이용된다. 균일화를 위한 빔 형상 광학 시스템은 미러 인터그레이터와 웨이브 가이드이다. 미러 인터그레이터는 모든 반사되는 빔이 동일한 표면에 도달되도록 출력 tilt 각을 가진 구면위의 사각 평면 미러 세트에 구성된 세그먼트 미러로 되어 있다. 웨이브 가이드 시스템은 조준된 빔이 집광되는 미러 반사가 큰 사각형 파이프에 구성되어 있다. 움직이는 옵틱은 세가지 방법이 사용되는데 두축을 따른 빔 진동과 다각형 미러를 이용한 빔 굴절과 세개의 미러를 이용한 빔 회전 방법이다.

이러한 빔 전달 방식 이외에도 Nd:YAG 레이저 등에서는 광섬유를 이용하는데 광섬유는 최소한의 간섭을 받고 빔을 전달할 수 있는 장점이 있으나 단일 모드 광섬유 이외에는 빔모드를 깬다. 매우 가는 단일 모드 섬유는 Raman과 Raleigh 스퀘터링 같은 비선형 광손실이 발생되는 공정요구 조건을 갖는다. 얇은 부품의 스팟 용접이나 표면 처리와

같은 공정에서는 광섬유를 통과함에 따라 모든 변화가 크게 문제시 되지 않으며 Nd:YAG 레이저용 실리카 섬유 뿐만 아니라 CO<sub>2</sub> 레이저용 광섬유도 개발중이다.

레이저용 옵틱의 재료도 중요한 변수로서 CO<sub>2</sub> 레이저용 반사 옵틱은 일반적으로 실리콘이나 구리로 만들어지는데 금이나 은으로 박막 코팅을 하여 절연체 필름에 의해 보호를 받는다. 전달성 옵틱은 게르마늄, 칼륨 아르세나이드, ZnSe, 카디뮴 텔루라이드나 소듐 크로라이드나 칼륨 클로라이드 같은 알카리 할로겐 화합물 중의 하나가 이용된다. 그러나 위에 열거한 재료들의 단점 때문에 GaAs와 ZnSe만 고출력 CO<sub>2</sub> 레이저의 전달성(Transmissive) 옵틱으로 이용된다.

CO<sub>2</sub> 레이저의 경우 전달성 옵틱의 파손은 주로 파괴나 열렌징에 의해 일어난다. 옵틱의 파괴는 과도한 열이 재료의 파괴 강도를 넘는 열응력을 발생시킬 때 발생된다. 열렌징에 의해 과도한 열이 옵틱의 외부 형상과 투과되는 레이저 빔을 굴곡시키는 광특성을 갖게 된다. 이러한 현상은 옵틱의 코팅과 본체에서 레이저 빔을 많이 흡수하기 때문인데 흡수를 줄이는 방법은 옵틱 재료와 코팅 재료의 흡수율을 줄이는 것으로 CVD ZnSe는 좋은 예이다. 박막 코팅 설계에서 가장 흡수가 많이 되는 층에서 전자장 강도를 최소화하는 옵틱 코팅의 흡수율이 감소되도록 하고 다른 방법은 최소 온도 상승으로 흡수된 레이저 출력을 효과적으로 분산시키는 것이다. 실제 설계를 하는 경우 GaAs의 흡수율은 0.01/cm 이상으로 하지 않고 ZnSe의 경우는 0.002/cm를 최소 흡수율로 간주한다. 박막 코팅 흡수율도 코팅된 옵틱의 성능에 중요한 역할을 한다. 열흡수와 열전도 뿐만 아니라 비열, 온도에 따른 굴절률 변화, 열 팽창계수, 탄성계수, 포아손비 등이다. 이러한 모든 변수들이 서로 결합하여 파괴나 열 렌징에 의한 손상을 발생시키는 출력범위를 결정한다. 재료들에 따라 열 흡수와 열전도도 한가지 측면에서 ZnSe나 GaAs 보다 뛰어난 성질을 보여주지만 두가지 특성을 동시에 만족시키는 재료는 별로 없다.

고출력 CO<sub>2</sub> 레이저용 빔전달 장치는 단인 다이아몬드 선반에 의해 제조되는 비구면 렌즈, 빔

인터그레이터, 고출력 CO<sub>2</sub> 레이저 공동(Hollow) 금속섬유, 고출력 후반사 isolator, 고출력 능동 냉각 ZnSe window, 원통형 집속 반사경, 다면 반사경 등에 관한 연구개발이 많이 행해지고 실용화 되고 있다. 소위 '회절한계(diffraction limited)'라 불리는 스팟 크기까지 회절에 의한 빔 크기를 최소화하기 위해 비구면 초점 렌즈의 사용이 증가하고 있다. 다이아몬드 선삭에 의하면 요철 렌즈의 예리한 곡선형태의 빔 스팟 크기  $d_1$ 는 회절( $d_{d1}$ )과 구면수차( $d_{s1}$ )에 의해

$$d_{d1} = 1.27 \times (f/D) M^2, \quad d_{s1} = kd^2/f^2$$

$$d_1 = d_{d1} + d_{s1}$$

로 주어지며  $f$ 는 초점거리,  $D$ 는 렌즈위에서의 레이저 빔 직경,  $K$ 는 상수로서 ZnSe Po/Cx는 0.0286, ZnSe 페니스커스는 0.0187, 비구면 렌즈는 0이다.  $M^2$ 은 'quality factor'로  $M^2=1/K$ 이다.

최근에는 고출력용 저 흡수 전달 빔 인터그레이터의 새로운 선을 개발하기 위해 다이아몬드 선삭 ZnSe 옵틱을 사용한다. 전에는 반사 빔 인터그레이터나 "Homegenizer"가 사용되었는데 로보트 암등에 사용되기에는 크고 무거웠다. 전달 인터그레이터는 렌즈와 비슷하나 한점에 집광되지 않고 입사되는 빔을 분할하여 공작물 표면위의 표적 안에 여러개의 분할 조각을 겹쳐 균일한 사각형태의 빔을 얻을 수 있다. 이탈리아에 있는 CISE에서는 6×6mm<sup>2</sup> 스팟 크기를 가진 전달 인터그레이터와 2.5Kw 다중모드 레이저로 AISI 저합금강을 25cm 거리에서 열처리 할 수 있었다. 다른 주요 개발 분야는 유연 공동 금속 섬유분야이다. 미국의 Laser Power Cooperation과 Luxar사에서 개발하였는데 100W까지의 의료 및 산업용에서 사용되며 비 냉각용은 250W 연속파까지, 냉각용은 2Kw까지 개발중이며, 통과율은 95% 정도이다.

고출력 후반사 isolator가 개발되어 사용되는데 알루미늄이나 구리와 같은 반사율이 높은 금속에서는 후반사에 의해 옵틱이 손상을 입게되어 이러한 금속들이 가공을 할때 많이 이용된다. 발전기에서 선풍광된 빔은 선풍광과 폴러라이저를

통과시키고 공작물 도달직전에 원편광시킨다. 후 반사된 원편광 빔은 원편광 폴러라이저에 의해 다시 입사되는 선 편광 빔에 비해 90° 각도로 선 편광되어 선 편광 폴러라이저가 모든 반사 출력을 흡수하게 된다.

레이저 출력이 증가하면 ZnSe 출력 커플러에서 열 수차는 레이저 빔의 품질 즉 M<sup>2</sup>값을 저하시킨다. 3~10Kw 레이저에서 이러한 현상이 많으며 10Kw 이상에서는 ZnSe가 사용되지 않으며 복잡한 공기역학 window가 사용된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 Radius Engineering사에서 정밀 다이아몬드 선반을 이용하여 ZnSe을 선삭하였다. 정밀 구르브가 선삭에 의해 ZnSe위에 만들어지고 냉매가 출력 커플러의 중앙부까지 들어오게 하는데 이 장치를 이용하면 20Kw 이상까지 ZnSe가 이용될 수 있다. 금속 표면에 포물선이 만들어지면 입사빔은 한점에서 만나고 원추형을 사용하면 원통형 렌즈에 의해 만들어진 것과 유사한 선 집속이 만들어진다. 이러한 원통형 집광 반사경은 입사빔을 빔 직경과 같은 길이의 선으로 집광한다. 원통형 렌즈에 비해 원통형 집광 반사경은 다이아몬드 선반에서 제작하기 쉬우며 90° 빔을 바꿀 때 터닝 미러를 사용하지 않아도 된다. 가변 반사 미러는 가우시언 반사 형태를 가진 ZnSe 출력 커플러이다. VRM은 Nd:YAG 레이저에서는 많이 이용되며 CO<sub>2</sub> 레이저에서는 M<sup>2</sup> 값이 낮기 때문에 많이 이용되지 않지만 3~5Kw CO<sub>2</sub> 레이저에서는 많이 이용된다.

### 3. 레이저 로봇릭스

레이저 로봇 시스템은 레이저 거동, 레이저 빔과 공작물 움직임에 포함된 레이저 가공용 다축 거동을 제어하는 시스템을 의미한다. 다축 로봇을 이용하여 빔을 원하는 공작물에 전달하기 위해서는 가속도, 속도, 경로 정확도 등이 레이저 절단, 용접등의 경우에 대해 데이터 베이스로 제공되어야 한다. 레이저 로봇 시스템은 레이저가 지니고 있는 유연성과 로봇이 보유하고 있는 유연성을 결합하여 가장 빠르고 정확하게 공작물에 빔을 전달하는 목적으로 사용된다. 그러므로

이러한 유연성을 극대화 하기 위해서 가속도, 속도, 경로 정확도에 대한 요구 조건이 결정되며 복잡한 형상과 빠른 가공 속도를 요하는 경우 이러한 조건이 더욱 까다로워진다. 가속도의 경우 원운동을 하는 경우 절단 속도의 제곱으로 증가하는데 예를들어 절단속도 10m/min으로 가공하는 경우 반경 3mm이하의 원호를 가공하기 위해서는 가속도가 1g를 넘게 된다. 각 로봇축의 필요한 속도는 공구 중심점에서 필요한 가공 속도보다 높은데 곡선을 따라 가공하는 경우 로봇 헤드의 회전은 곡선 중심 점간의 거리를 늘려 조인트 속도를 증가시키기 때문이다. 경로 정확도는 많은 경우에 0.1mm 여유를 필요로 하기 때문에 고 동적(Dynamic) 강도(Stiffness)를 필요로 한다. 0.1mm 정확도를 유지시키고 원호를 운동하기 위해서는 필요한 속도증가(Gain)가 보통의 속도 증가값보다 10배 이상이 되어야 한다. 기구부의 탄성과 감쇠 특성 때문에 보통 로봇의 평균 속도 증가는 1~1.5m/min mm이다. 서보 컨트롤러의 해상과 보간(Interpolation)률이 주요한 변수인데 0.1mm 정확도를 유지하기 위해서는 mm당 100 임펄스 해상과 mm당 10보간을 요구한다. 6m/min 피이드 룰에 대한 최소 보간율은 초당 1000 사이클이다. 이러한 로봇의 요구조건을 만족시키는 로봇의 개발 현황과 발전 추세를 살펴보고 현장에서 응용예를 소개한다. 로봇을 최초로 사용한 곳은 1974년 FORD사에서 자동차 하체의 박판을 용접하기 위해서 4축의 빔 구동과 6Kw CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 4개의 박판을 용접하는 작업대는 일축구동을 하였는데 6~12m/min로 용접하였다. Gilman Engineering사에서 갠트리 타입으로 X축 5.4m Y축 3m Z축 1m와 로봇 헤드는 ±115°A와 ±180°B로 작동되는 시스템이었다.

절단의 경우 1979년 Prima Industries사의 ZAC 시스템이 이탈리아 플라스틱 제조업체에서 이용되었는데 500W CO<sub>2</sub> 레이저로 X=3.2m, Y=1.8m, Z=0.95m, A=360°, B=±90°의 운동을 하였다. 1982년과 1984년 사이에 Control Laser Corp.의 5축 갠트리 타입이 항공기 판넬과 자동차 시제품 부품 제조에 이용되었다. 이때는 4축의 빔 헤드 운동과 1축 갠트리 운동을 결합하여 3차원 절단을 하였다.

1984년 최초로 관절 암(Articulated arm) 빔 전달 시스템이 Coherent, Rofin-Sinar, Lumonics 등에 의해 개발되었는데 각 관절마다 미러를 사용하였으며 Ferranti는 450W CO<sub>2</sub> 레이저를 BMW에서 응용하기 위하여 13개의 미러를 사용하였다. 1980년대 후반부에 Laserdyne는 이축 회전운동을 하고 3축 x, y, z 운동을 하는 캔티레버 암을 갠트리 타입과 결합하여 항공기 엔진 부품을 개발하는데 사용하였다. 1985년 GM에서 5축 빔 이송과 2개 post 갠트리 이송 타입이 개발되어 자동차 부품의 스텝핑에 이용되었다.

1986년 4개의 post 타입 갠트리 타입이 개발되어 용접에 이용되었다. 1989년에는 Douglas Aircraft Company 공장에서 세계에서 가장 큰 5축 갠트리 시스템이 개발되어 400W CO<sub>2</sub> 레이저를 x방향 12m, y방향 3m로 움직이고 빔 집광 헤드는 1.5m, z운동과 A, B, W의 3개의 부가적인 운동을 하는데 W는 빔 집광을 유지하기 위해 빔 경로에 평행하게 50mm운동을 하게끔 한 것이다. 1980년 후반기에 GMF Robotics는 3개 미러를 이용한 through-the-arm 로봇을 GM에 이용하였고 Robomatrix 사는 3개의 미러만을 이용하여 5축 제어를 할 수 있는 모듈 설계를 하여 자동차 산업에서 이용하고 있다.

이상과 같이 현재 이용되고 있는 레이저 로봇 시스템은 미러오탁을 가진 갠트리와 로봇 타입과 관절 로봇 타입이다. 관절 로봇에 비해 갠트리 타입은 작업공간이 넓고 기계 구조물이 견고하여 로봇의 운동을 위한 변환율(transformation rate)이 10배 정도 높고 경로 정확도도 높다. 그러나 갠트리 타입은 7~10배정도 가격이 비싸다. 5축 갠트리 로봇을 이용하여 10mm 직경의 원을 1.6m/min의 속도로 절단하면 오차는 0.1mm 이내이고 속도가 2.4m/min이면 0.15mm에 이르지만 관절 로봇은 오차가 0.7mm에 이른다.

갠트리 로봇이 정확도에서 앞서기 때문에 많이 이용되는데 두기둥 갠트리, 4기둥 갠트리가 이용된다. 두 기둥 갠트리는 두 기둥에 기울어져 회전운동과 Z운동을 하는 빔헤드 운동과 공작물이 이송하는 운동을 결합한 것인데 작업대는 무겁거나 부피가 큰 공작물을 처리할 수 있고 로딩과

언로딩(Unloading)을 쉽게 할 수 있다. Laser Lab, Mazak, Nippei Toyama, Trumpf 제품등이 이러한 타입이다.

4기둥 갠트리 시스템은 플라잉 오탁으로 구성되었는데 자동차의 시제품을 제작하는데 유용하며 20m 정도의 대형 공작물을 가공할 수 있다. 플라잉 오탁에서는 빔 전달 오탁을 줄이기 위해 레이저를 x, y 방향으로 움직이게 하는데 rugged, compact, 가동 CO<sub>2</sub> 레이저가 Kw급 범위에서 개발되어 실용화 되었다.

현재는 550대 근방의 레이저 로봇 시스템이 이용되고 있는데 거의 과거 2년간 설치된 것이며 일본에서는 한달에 12~15대의 갠트리 시스템이 공급되어 박판 절단에 이용되고 있다. 앞으로는 정확도와 속도를 향상시키는 방향으로 연구 개발이 진행될 것이다. 공구 중심점에 빛을 도달시키기 위한 자동화를 위한 제어에 대한 연구가 진행중이고 속도 증가(Gain)에 관한 연구와 6축 관절 로봇의 비선형 운동에 관한 연구와 체계적인 오차에 대한 연구로 공구 중심점의 오차를 줄이려는 노력이 시도되고 있다. 기계적인 면으로는 로봇 부품의 경량화에 대한 연구가 진행중이며 암과 슬라이드가 폴리 카보네이트로 교체될 수 있을 것이다. 직접구동이 기어구동으로 바뀌질 수도 있을 것이다.

#### 4. 센싱과 모니터링

적당한 광학장치와 빔 전달 장치를 사용하여 빔을 공작물에 정확하게 전달시킬 수 있는 연구 개발이 많은 성과를 거두었으나 실제 상황에 있어서는 예측값과 다른 경우가 발생하여 이를 보완하기 위하여 센싱과 모니터링이 필요하다. 또한 우수한 품질의 가공 상태를 얻기 위하여 최적 가공 조건에 관한 데이터가 이용되지만 주위의 환경과 교란에 의해 수정을 요구하는 경우가 발생한다. On-line 공정 제어와 리얼 타임 제어 기술은 특히 100% 품질 보증을 요구하는 자동차 산업등에서 특히 요구된다. 레이저 용접의 경우 레이저에 의해 발생된 플라즈마에 의한 방출을 찾아내어 공정 제어를 하는데 사용한다. 플라즈마 상태는 공작

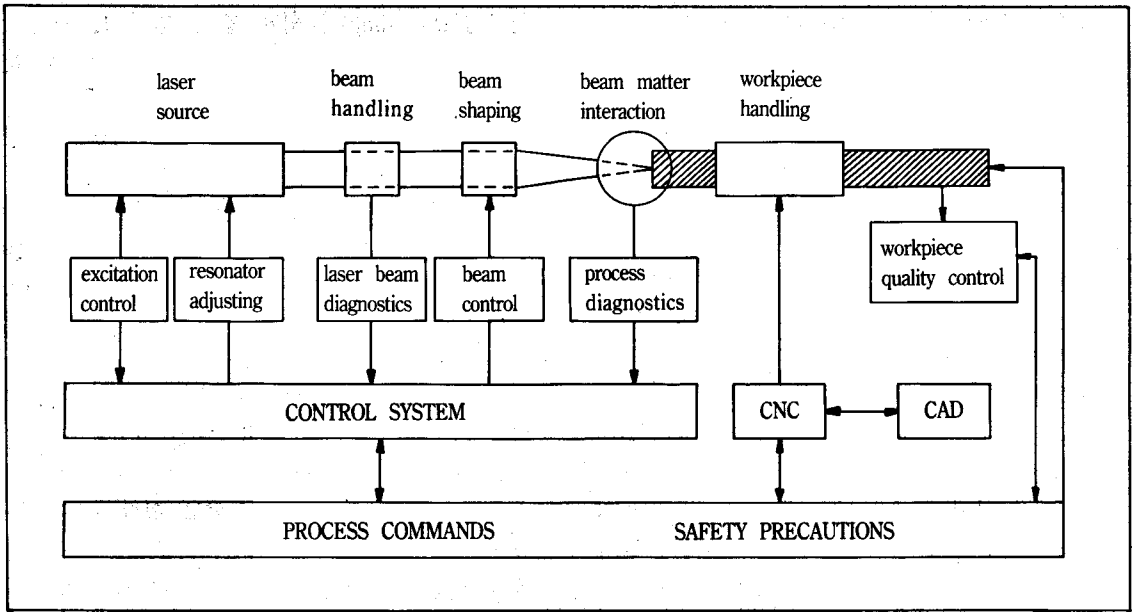


그림 1) 레이저 공정 제어 시스템

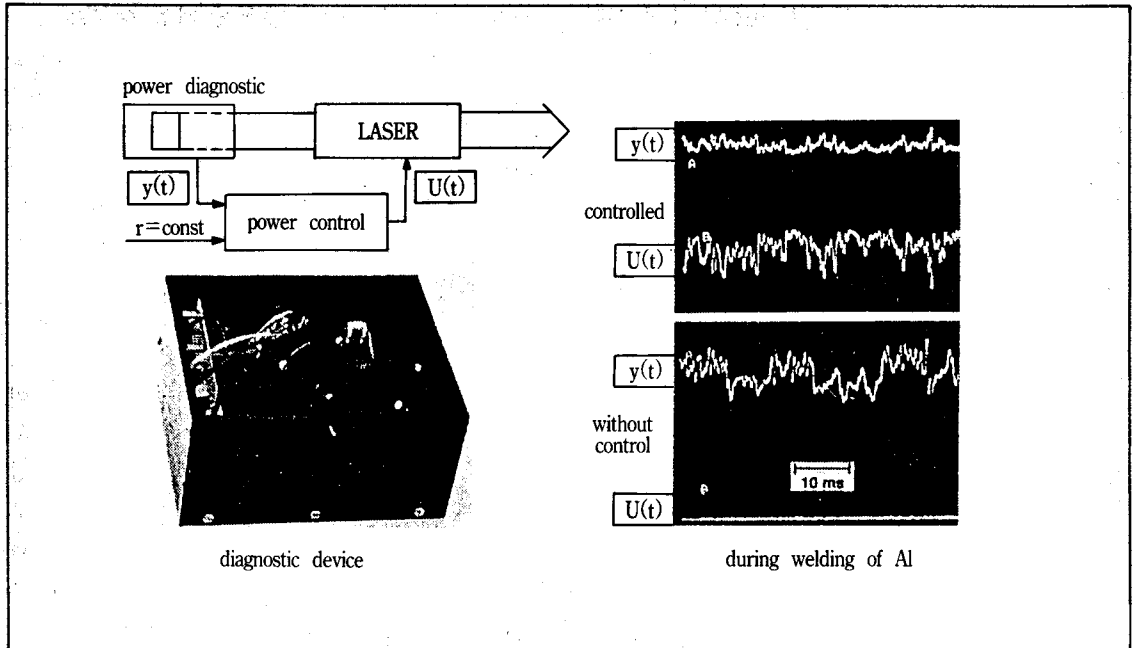


그림 2) 출력제어 컨트롤러

물에 에너지 전달 지표이고 따라서 공정 효율을 가능할 수 있다. 온라인 검출은 광이나 음향에 의한 방법이 있는데 보통은 광을 많이 이용하는데 검출 속도가 빠르기 때문이다. 그림(1)에 총체적

으로 제어되는 레이저 공정의 개략도를 보여준다. 레이저 재료공정은 집적 온라인 품질관리(Integrated On-line Quality Control)가 적당하다. 집광을 하는데 콜리메이팅 옵틱이 사용되고 작용이 발

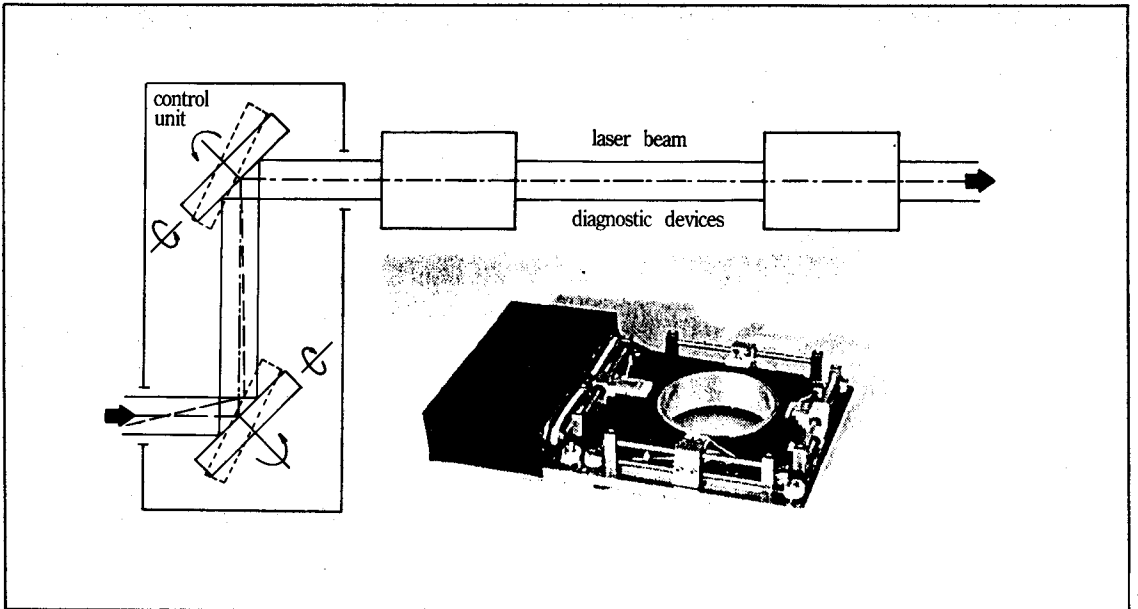


그림 3) 빔 위치 모니터링 시스템

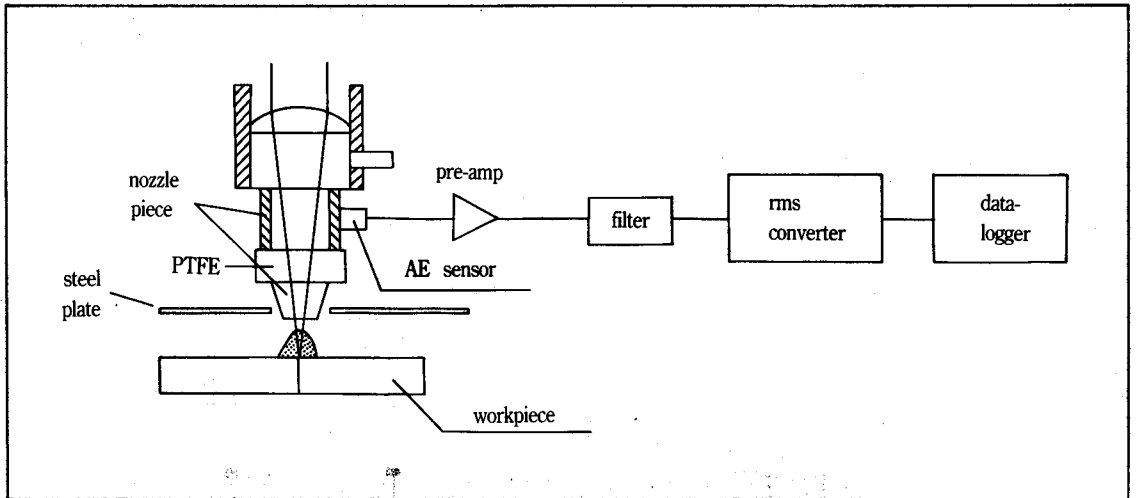


그림 4) Acoustic Nozzle

생되는 구간에서 반대 방향으로 방출되는 방사를 검출하기 위해 같은 옵틱이 사용된다.

여러가지 진단 기구들이 개발되었는데 출력을 모니터링 하기 위해 다른 시간 상수를 가진 두개의 검출기에 기초를 둔 컨트롤러가 개발되었다. 그림 2)에서 출력 제어 컨트롤러를 보여주고 폐쇄 출력 조절 회로를 사용한 경우와 사용치 않은 경우의 용접 공정 결과를 보여준다.

고출력 CO<sub>2</sub> 레이저 빔은 off-axis 미러 시스템에 의해 집광된다. 이러한 미러의 집광특성은 빔의 위치와 빔과 집광축의 각도에 따라 다르다. 그러므로 빔 위치를 제어하는 것은 정밀 레이저 가공에서는 필수적인데 그림 3)에 두개의 가동 미러를 이용한 빔 위치 모니터링 시스템을 보여준다. 이외에도 그레이팅 상수 1000/mm를 가진 구리 그레이팅 미러는 0.3 $\mu$ m 구르브 깊이를 갖는데 빛의

파장에 따라 산란각이 달라지며 검출선을 이용하여 파장을 검출할 수 있다. In-Process에 사용되는 센서는 음향미러(Acoustic Mirror), 음향노즐(Acoustic Nozzle), 플라즈마 차지센서(Plasma Charge Sensor), 이중 파장 광센서(Dual Wavelength Optical Sensor)등이 있다.

고출력 빔이 미리 표면위에 조사되면 표면 전자는 양자와 상호작용을 하여 이 전자중 일부가 스트레스 파를 발생시키는 표면 양자에 영향을 준다. 이러한 현상이 피조일렉트릭 센서에 의해 검출된다. AM은 단순한 비 침입 keyhole 모니터이고 가이드스 미러에 명확한 표시를 할 수 있는 출력세기가 변하는 레이저 빔 모니터에 이용될 수 있다.

그림 4)에 Acoustic Nozzle을 보여주는데 AM과 비슷한 것처럼 보이지만 다른점이 있다. 첫번째로 조사 막(Radiation Shield)이 AM에서의 발생되는 표시의 제공원인 직접 조사를 막아준다.

두번째로 AM과 반대는 아니지만 keyhole이 있을 때 시그널 강도가 크다. 시그널은 keyhole로부터 나오는 충격파에 의해 발생하는 압력에 의한 것

으로 간주된다. 이 시그널의 주파수 스펙트럼은 플라즈마와 증기에 변화를 보여주지 못하므로 이러한 플라즈마나 증기에 관련이 없다. 이 검출기의 반응시간은 ps order이고 시그널은  $\mu s$  응답 시간을 주면 매끄러워 진다. 그러므로 real time 공정 측정기로 가능하다.

플라즈마 차지 센서는 그림 5에 표시되어 있는데 가장 견고한 센서로 알려져 있다.

검출기는 전자봉에 연결된 단순 절연 노즐이다. 시그널은 플라즈마 근방에 있는 Space charge에 의한다. 노즐 검출기는 공작물 표면에서 15mm까지 들 수 있으나 시그널은 작용이 발생하는 지역에서 강하다. 시그널은 저속에서 움직이는 이온의 확산율에 비해 고속 이온의 확산율이 높기 때문에 발생된다. 플라즈마가 발생하는 레이저 용접에서 공작물은 양전하이므로 플라즈마 근방은 음전하를 띤다.

이러한 전장의 세기는 플라즈마 온도 크기 체계에 따라 다르다. 키홀(keyhole)이 발생되면 이러한 변화가 검출된다.

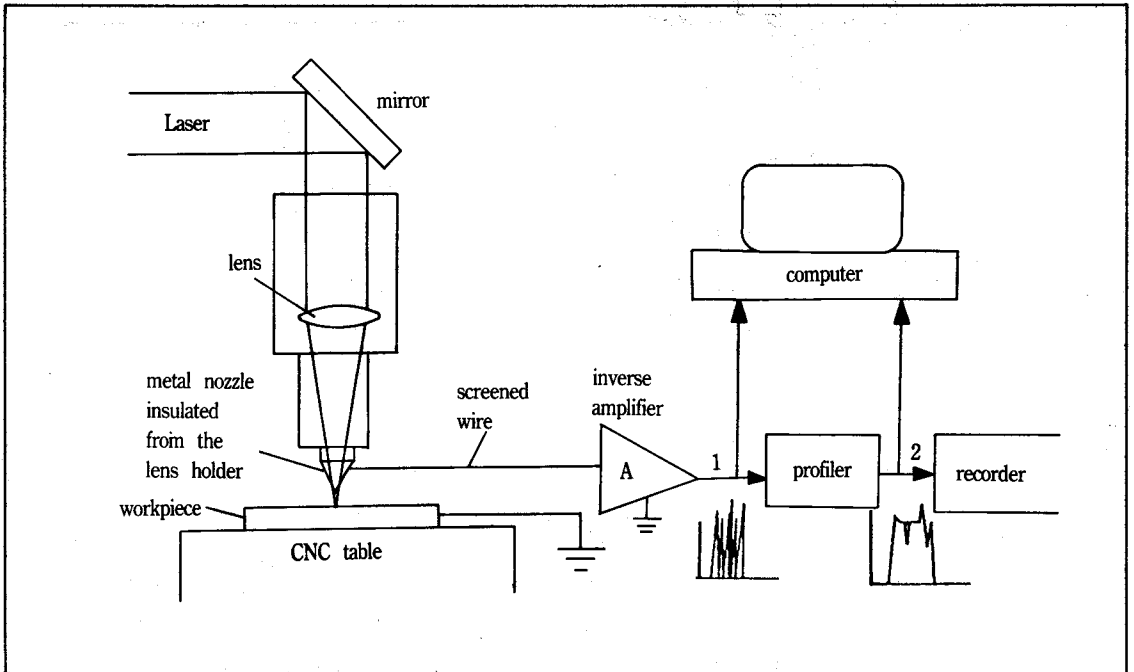


그림 5) 플라즈마 차지 센서



## 참 고 문 헌

- [1] D.A. Belforte, "Laser/robotics in the 1990s", SPIE, Vol. 1276, 2-16, 1990.
- [2] D. Tanimoto, "Advances in High Power CO<sub>2</sub> Laser Optics", '92 LAMP Proceedings, 185-190, 1992.
- [3] I. Kaimakanov, "Applications of Method for Laser Beam Analysis", Proceedings of '92 LAMP, 201-206, 1992.
- [4] I. Bakalski, "Laser Beam Analysis", Proceedings of '92 LAMP, 201-206, 1992.
- [5] Adolf Giesen, "Optics and Beam Delivery for High Power Lasers for Materials Processing", Proceedings of '92 LAMP, 213-218, 1992.
- [6] G. Sepold, M. Zierau, "Present State of the Art of Laser Robotics," Proceedings of '92 LAMP, 219-224, 1992.
- [7] T. Matsumoto, Y. Seki, "Evaluation of the Transmission Characteristics of CO<sub>2</sub> Laser Beam in a Hollow Waveguide", Proceedings of '92 LAMP, 225-230, 1992.
- [8] F.O. Olsen, "Recent Investigations in Sensorics for Adaptive Control of Laser Cutting and Welding", Proceedings of '92 LAMP, 405-414, 1992.
- [9] E. Beyer, "Process Monitoring in Laser Materials Processing", Proceedings of '92 LAMP, 433-438, 1992.
- [10] W.M. Steen, "Adaptive Control of Laser Material Processing", Proceedings of '92 LAMP, 439-444, 1992.
- [11] H.E. Reedy, "Comparison of GaAs and ZnSe for High Power CO<sub>2</sub> Laser Optics", SPIE, Vol. 1020, 180-191, 1988.
- [12] L.H.J.F. Beckmann, "Retrofocus Optics for the Focusing of CO<sub>2</sub> Laser Radiation", SPIE, Vol. 1020, 192-195, 1988.
- [13] H.B. Chen, "Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors", ICALEO '91, 113-122, 1991.
- [14] K.D. Hachfeld, "Laserbeam Quality and Brightness in Industrial Applications", The Industrial Handbook, 48-54, 1992.