특 집 : 레이저를 이용한 정밀제어 응용기술

다이오드 레이저를 이용한 플라스틱 용접기술에 관한 고찰

한 상 선 · 한 상 배 · 김 선 원

A Review on Plastic Welding Technology with Diode Laser

Sang-Seon Han, Sang-Bae Han and Sun-Won Kim

1. 서 론

근세에 들어 레이저 기술의 발달로 다양한 분야에서의 적용이 활발히 진행되는 가운데 수 백 Watt급 고출력 다이오드 레이저를 이용한 플라스틱용착 기술 역시 다양한 산업계의 관심을 받고 있다.

레이저를 이용한 플라스틱 용착의 원리는 일정한 파장을 갖는 레이저 빔의 플라스틱 재질에 대한 투과성과 흡수성을 이용한다. 투과성을 갖는 재질층을 레이저 빔이 투과하고 흡수성을 갖는 재질층에서 레이저 빔에 의해 활성화된 분자들의 진동으로 운동에너지로 변환되고 이는 다시 열을 발생시켜 두 모재를 접합시키는 것을 기본원리로 하고 있다.

플라스틱을 용착하는 기존의 공법으로는 열풍용착, 열판용착, 고주파유전가열용착, 초음파용착, 진동용착, 회전용착 등 다양한 방식이 있으나 공법의 통일화, 제품 설계 자유도 확대, 설비 투자비 절감 등이 절실히 요구되고 있었다. 특히 용착 후 외관의 품질 및 밀폐성 등에 있어 한계가 있던 기존의 공법들과는 달리 「플라스틱 레이저 용착기술」은 이러한 문제를 해결할 가능성을 열어놓았다.

이에, 본 고찰과정에서 기존의 플라스틱 용착기술인 진동 용착기술, 열판 용착기술, 초음파 용착기술 등과의 비교를 통해 다이오드 레이저를 이용한 플라스틱용착기술이 갖는 장단점 과 본 기술의 원리 및 적용방법에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 일반적인 플라스틱 접합기술

2.1 열판 용착기술

열판 용착이란 상, 하 지그(Jig)에 고정된 용착물을 재질의 용융 온도보다 약간 높은 온도로 가열된 열판으로 가압하여 가열, 연화, 용융 시킨 후 용착부 부위가 충분히 녹았을 때 열판을 제거하고 상호 가압한 후 굳을 때까지 냉각시켜 용착시키는 방법 이다.

그림 1에서와 같이 총 6단계의 기본 프로세스를 통해 두 모재를 용착시키는 원리를 가지고 있는 열판 용착방법은 용착 후 용착 부위가 모재와 동일한 강도로 유지될 만큼 우수한 접합강도를 갖는 반면 작업물의 형상, 크기 및 재질에 따른 작업가능시간의 한계가 있으며, 타 용착방법에 비해 작업시간이 긴 단점이 있다. 또한, 용착 후 그림 2에서와 같이 외부로 용융물이 세어 나와 생기는 버(Burr)나 보푸라기(Fluff)를 발생시킬 수 있는 단점이 있다.

이에, 열판 용착시 용출물이 용융 되어 나오므로 용도와 미관의 중요도에 따라 적절한 용착 부위 설계가 필요하다.

2.2 진동 용착기술

진동 용착이란 열가소성 수지 2개의 제품간에 가압을 하면서 상부지그에 좌우 진동을 통해 접촉 부위에서 발

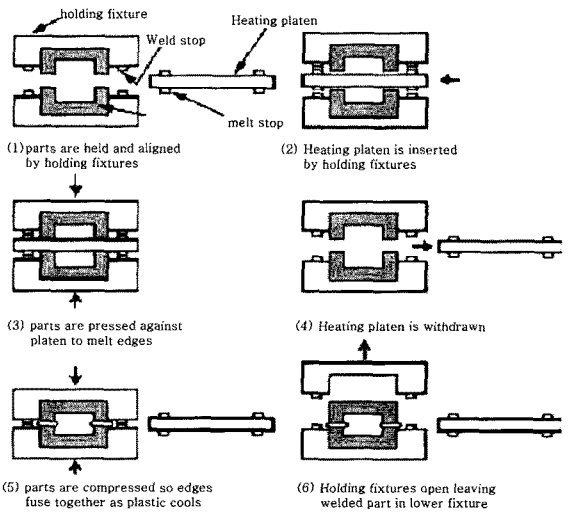

그림 1 열판용착의 원리 및 프로세스

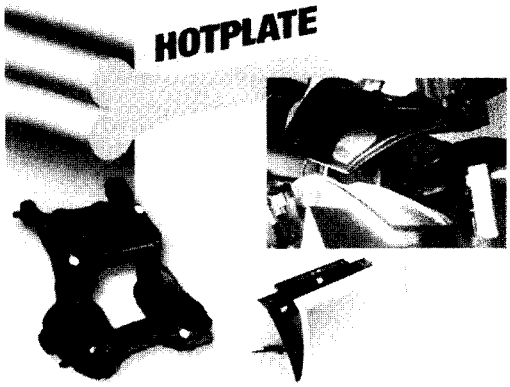

그림 2 열판용착후 외관

생되는 마찰열로 수지를 용융 시키고 충분한 용융을 얻은 후에 진동을 멈추면 제품이 정열 되고 지속적인 가압과 냉각 통해 용착시키는 방법이다.(그림 3)

제품간의 상대적인 좌우 운동을 통해 발생되는 마찰열로 용착을 시키는 진동 용착방법은 재질, 크기 및 형상에 대한 제약이 적으나, 모재가 마찰열을 이용하여 용착시키는 원리이므로 탄성이 비교적 큰 경우와 맞댄 두 모재간의 평탄도가 10도 이상의 경우에는 적용이 어려운 단점이 있다. 또한, 그림 4와 같이 용융후 모재 외측으로 용융물이 돌출되는 양상을 보이기도 한다.

2.3 초음파 용착기술

초음파의 진동이 처음 가해지면 용착면의 미세한 표면의 돌기들이 매우 빠르게 발열하게 된다. 이 표면 돌기(Asperity)부분이 다른 곳 보다 많은 응력이 집중되어 큰 변형율과 진동에너지의 대부분을 소모하게 되어 용착 부위의 돌기부분이 용융되고 그 주변부로 열이 전위된다. 이 순간 용착면 전체에 용융층이 얇게 형성 되고 초음파의 계속적인 진동으로 짧은 시간에 확산이 이루어져 용착이 되는 원리를 가지고 있다.(그림5, 6)

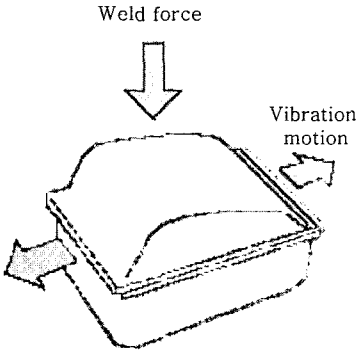

그림 3 진동용착의 원리

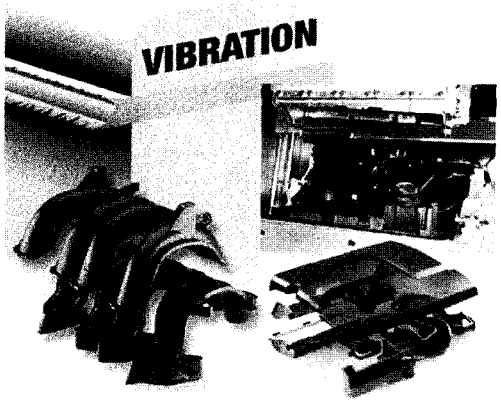

그림 4 진동용착후 외관

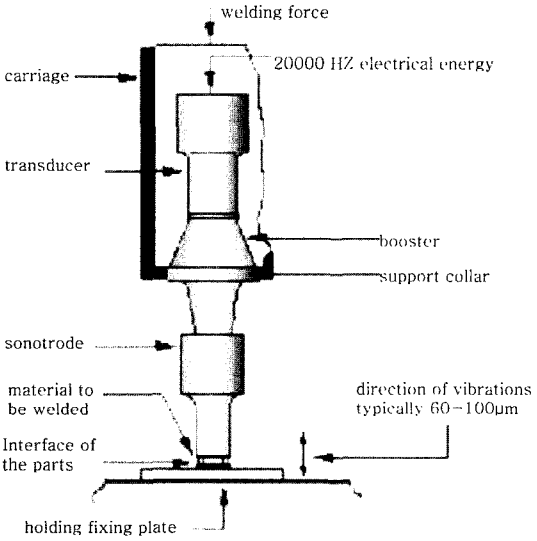

그림 5 초음파용착 시스템

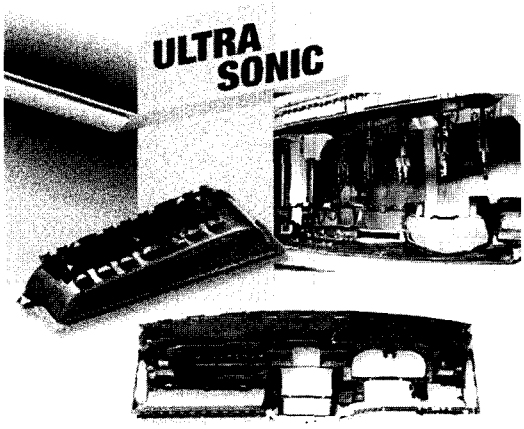

그림 6 초음파용착후 외관

이러한 초음파용착 기술은 일반적으로 플라스틱 용착용으로 널리 사용되어 왔던 기술이며, 초기투자비가 타 용착장비에 비해 저렴한 장점으로 인해 다양한 분야에 널리 적용되어 오고 있는 기술이기도 하다. 이 기술의 장점으로는 작업시간이 빠르며 소형제품에 적합한 점이 있다. 그러나 용착 후 용착강도 및 밀폐성에 있어 취약하며, 초음파를 이용한 진동 용착 방식이므로 모재의 탄성이 높을수록 용착강도 및 밀폐성의 한계를 갖는 단점이 있다. 또한, 작업시 발생되는 초음파로 인해 작업자의 청각을 자극하므로 이에 대한 주의가 필요하다.

3. 다이오드 레이저를 이용한 플라스틱 용착기술

3.1 원리

레이저 플라스틱 용착을 위해서는 레이저 빔을 흡수하는 플라스틱 재료(흡수재)에, 레이저 빔을 투과하는 플라스틱 재료(투과재)를 포개어 놓고, 클램핑지그를 통해 용착되어야 할 두 모재사이에 갭(Gap)이 최소화 될 수 있도록 유지한 상태에서 투과재 쪽으로부터 레이저 빔을 조사하는 방법으로 용착시킨다. 흡수재는 카본블랙처럼 레이저 빔을 흡수하는 물질을 혼련한 플라스틱이다.(그림 7)

레이저 빔은 투과재를 통과한 후에, 흡수재 중의 카본블랙에 흡수됨으로서 흡수재의 분자고리를 진동하여 발열하고, 그 열에 의하여 흡수재가 용융하면서 동시에 용융풀을 형성하게 되는데 이때, 투과재도 흡수재로부터 열전달을 받아 용융하면서 용착된다. 냉각과정을 거쳐 두 모재의 용착이 완료되는 원리를 갖고 있다.

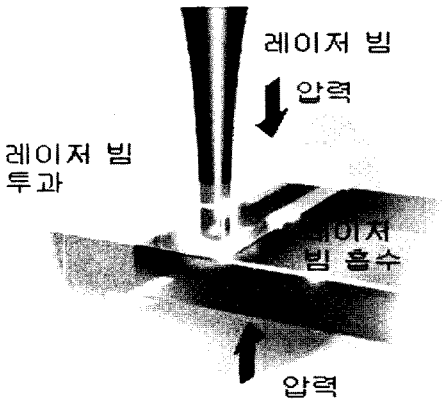

그림 7 레이저 용착의 원리

3.2 레이저 소스의 선택 (고출력 다이오드 레이저(HPDL))

HPDL은 일종의 반도체 레이저로 타 레이저에 비해 소형이며 에너지 효율면에서 50%에 달할 만큼 매우 높은 경제성을 띠고 있어 자동차 부품생산라인과 같이 높은 장비의 내구성과 신뢰성을 요구하는 양산라인에 적합한 장점이 있다.

그림 8에서와 같이 레이저 다이오드에 높은 전류를 가해 이때 발생되는 NIR영역대의 파장을 갖는 높은 출력이 발진된다.

다이오드 레이저의 파장대는 일반적으로 λ = 808~1,100 nm 이며 다이오드 레이저는 일종의 반도체로 소재는 갈륨(Gallium), 인듐(Indium) 또는 알루미늄(Aluminium)으로 만들어 진다.

플라스틱의 레이저 용착을 위하여는 대부분의 경우 100~300 Watts 면 일반적인 열가소성 수지를 용융시키는데 충분한 출력이라 할 수 있다.

일반적으로 그림 9에서와 같이 다이오드 레이저의 에너지 프로파일은 탑-햇(Top-Hat)분포를 나타내며, Nd:YAG레이저 등의 경우 빔 중앙의 에너지 밀도가 높은 가우시안(Gaussian)분포를 나타내는 특성을 가지고 있어 가우시안 분포를 나타내는 레이저는 주로 용

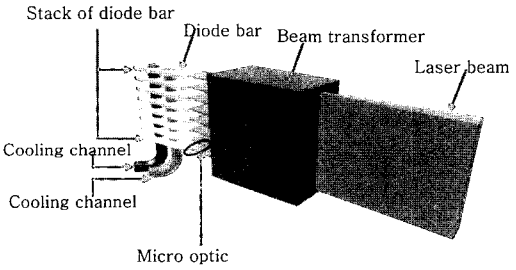

그림 8 다이오드 레이저 스택의 구성

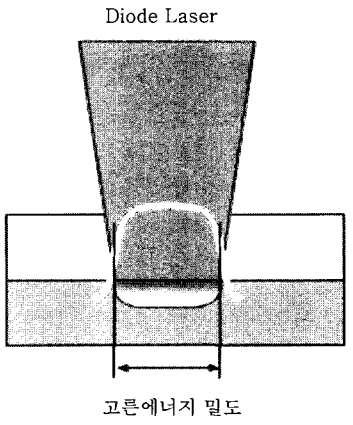

그림 9 다이오드 레이저의 빔 프로파일

착폭이 500 ㎛ 이하를 요구하는 초소형 제품에 적용이 적합한 특성이 있다. 이와 반대로 레이저 빔 중앙부의 에너지가 고른 분포를 나타내는 다이오드 레이저 빔의 경우 500 ㎛ 이상의 비교적 큰 제품의 용착에 적합한 특성을 나타내고 있다.

3.3 적용 가능한 플라스틱의 선택

레이저를 이용한 플라스틱의 용착에서는 수지의 특성이 매우 중요하다. 만약 레이저빔이 수지에 조사되면 수지와 상호작용 즉, 투과, 반사, 흡수성에 의하여 레이저빔이 약화된다. 투과율은 전체 조사된 레이저 출력중에서 실제로 소재를 통과하는 비율을 의미한다. 따라서 이 투과율이 용착될 하단부에 얼마만큼 도달하느냐가 중요한 관건인데 이는 레이저의 파장대와 수지의 특성과 밀접한 관계가 있다.

그림 10과 같은 구조를 갖는 비결정형(Amorphous structure) 열가소성수지의 경우 소재 두께 2 mm 에서 보통의 경우 투과율 90~95 % 에 이른다. 그러나 부분결정형(Semi-crystalline structure) 수지의 경우(예, PBT) 투과하는 과정에서 빔의 굴절로 인해 투과율이 저하됨을 볼 수 있으며, 통상 2 mm의 두께에서 30~40 %로 저하된다.

반사율은 레이저 빔이 제품에서 반사되는 비율을 의미한다. 이는 제품의 표면에서 반사되는 비율과 제품 내부에서 반사되는 비율을 합친 것이다. 표면의 반사는 주위의 공기와 제품표면의 굴절에 기인한 것으로 일반적으로 4~5 % 로 추정하며 내부적인 반사는 레이저가 투과하면서 제품 내부적에서 굴절되어 다시 반사되는 비율을 의미한다. 이는 특히 폴리머의 구조가 균일하지 않은 수지에서 높아지며 수지의 두께에 따라서 증가한다. 레이저가 투과되는 궤적 길이가 길수록 상호작용에 의하여 반사되는 비율이 높아진다. 따라서, 예를 들어 제품의 두께가 2 mm의 경우 파장대에 따라 다르고 또한 첨가제에 따라 다르지만 그 반사율이 80 %까지 높아질 수 있다.

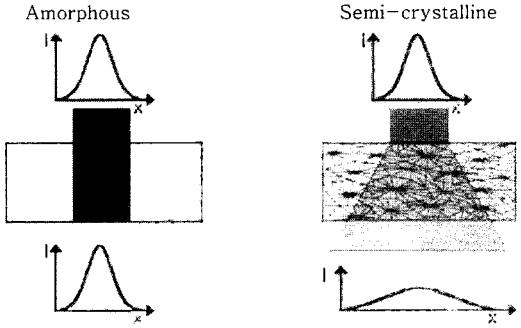

그림 10 비결정형 및 결정형 구조에서의 빔 투과 특성

비결정형 구조의 열가소성 수지의 경우 내부 구조가 균일하여 반사가 거의 없으며 표면에서의 반사만이 있을 뿐이다.

투과층과는 반대로 흡수를 요하는 흡수층의 경우 흡수율을 높이기 위해 흑색의 카본블랙 또는 각 종의 색상을 나타내는 특수 첨가제를 소량 첨가하여 사용하기도 한다.

3.4 레이저 플라스틱 접합법

3.4.1 반-동시용착법(Quasi-Simultaneous Welding)

반-동시용착법은 레이저 빔이 일정한 영역내에서 스캐너를 이용하여 매우 빠른 속도(예. 최대 10m/sec)로 용착부위를 따라서 수 회에 걸쳐 조사하는 방식이다. 이때, 매우 빠른 속도로 수 회에 걸쳐 용착부위에 조사하므로 거의 동시에 용착부위가 용융되면서 용착이 가능한 장점이 있다. 또한, 이 경우 용착부위의 갭(Gap)을 어느 정도 극복할 수 있으며 동시용착법과 비교하여 상당히 높은 작업의 유연성을 가지고 있다.

그러나, 단점은 스캐너의 위치가 고정되어 제품의 위치와 항상 최적의 위치는 아닐 수 있고 작업영역이 제한적이므로 대형제품인 경우 또는 형상이 복잡한 경우에는 적용이 어려운 특징이 있다.

전체 용착부위와 동일한 초점을 형성하며 용착시 제품 및 레이저는 모두 고정된 상태이다.(그림 11)

3.4.2 궤적이동용착법(Contour Welding)

가장 많이 사용되는 공법중에 하나인 궤적이동용착법은 용착부에 레이저 빔을 순차적으로 전달하는 공법으로 국부적으로 에너지가 전달되어 용융되는 범위가 적으므로 수지가 용융되어 흐르는 것을 최소화 할 수 있

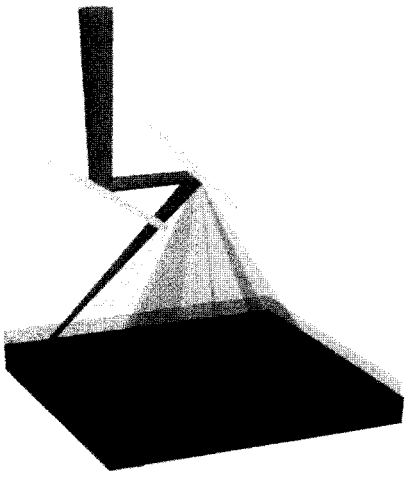

그림 11 반-동시용착법

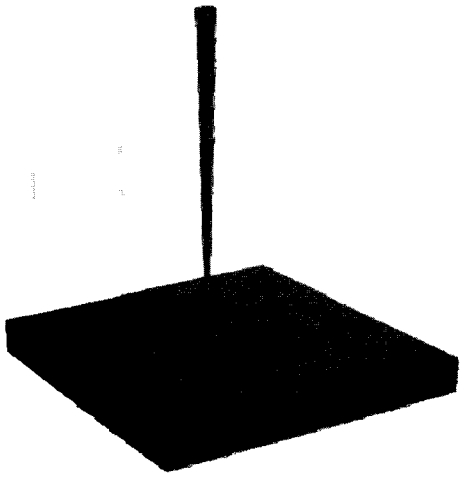

그림 12 궤적이동용착법

다. 이런 장점들이 높은 유연성과 3차원 형상과 같은 복잡한 형상의 제품에 적용하는데 용이하다. 이 방법의 경우 별도의 용착 돌기의 디자인을 통해 갭(Gap)을 최소화 하여 100 μm를 초과하지 않도록 주의해야한다. 이는 제품 사출 시부터 허용공차범위의 일정한 관리가 필요하다.(그림 12)

3.4.3 동시용착법(Simultaneous Welding)

용착부위 전체가 동시에 용융되어 용착되는 동시용착법은 여러 개의 다이오드레이저를 제품의 용착부위와 동일하게 정렬하여 동시에 조사하는 방식이다.

동시용착법의 장점은 전체 용착부위가 동시에 용융되고 가압력이나 용착할 제품간의 갭(Gap)이 고정적이여서 용착품질을 관리하기가 용이하나 초기 투자비용이 높으며 제품의 형상 변경이 불가능하다는 단점이 있다. 그러나 궤적이동용착법과 비교하면 동시용착법의 경우 용착 시간이 상당이 짧기 때문에 생산량이 많은 제품의 경우의 적용이 적합하다.(그림 13)

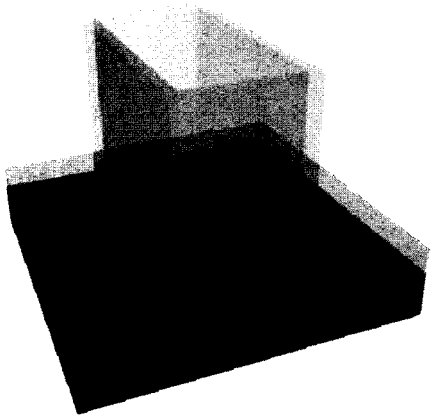

그림 13 동시용착법

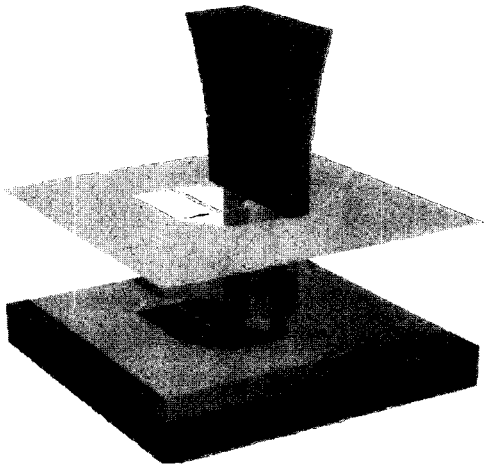

그림 14 마스크용착법

3.4.4 마스크용착법(Mask Welding)

마스크용착법이란 필요한 부분만이 열려있는 마스크를 레이저헤드와 제품사이에 위치시켜 제품의 원하는 부분만을 조사하여 용착시키는방법이다. 즉, 레이저가 조사되지 않아야 할 부분은 마스크에 의하여 레이저 빔이 차단되는 효과를 볼 수 있다.

이때, 제품의 크기와 용착형상 등은 일차적으로 마스크와 레이저 빔의 품질에 의하여 좌우되며, 마스크의경우 최소 100 μm 정도까지 제작이 가능하다. 또한 한 번의 마스크 이동으로 여러 개의 복잡한 용착부위의 용착이 가능한 장점이 있다.

주로 적용분야는 아주 정밀한 용착선이 필요로하는 초소형 제품에 적용될 수 있다.

마스크 방식에는 일반적으로 다이오드레이저를 이용한 선형빔(Line beam)을 사용하는데(예, 20×1 mm^2) 레이저 빔이 마스크에 도달하기 전에 필히 에너지가 균일한 평행광의 조사가 필수적인 조건이다.

마스크의 제작은 레이저 절단을 이용하거나 포토마스크 방식으로 크롬 도금된 유리로 제작되며, 포토마스크 방식으로 제작된 마스크가 형상이나 유연성 면에서 장점이 있다.(그림 14)

3.5 레이저 플라스틱 용착 거동

레이저 용착을 위한 플라스틱 재질이 선정이 되고 프로세스 파라미터가 최적화 되었을 때 용착할 준비는 끝이 난다. 그 후 레이저 빔이 설정된 속도로 원하는 용착 라인을 따라가며 조사를 하게 되는데 이 모든 경우에 매우 중요한 것 중의 하나는 흡수모재 층에 용융을 시킬 만큼의 충분한 에너지를 공급하는 것이다. 이는 두 모재의 분자고리간의 완전한 결합을 위해 분자의 운동에너지를 높이기 위함이다.

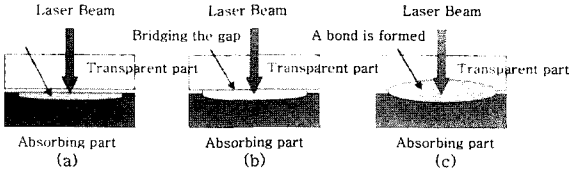

그림 15 플라스틱 용융 과정

그러나 모재의 과다한 온도증가는 색의 변화 및 분해 등 물성변화를 야기하므로 제한적일 수 밖에 없다.

그림 15에서 보는 바와 같이, 첫 번째 (A) 흡수층에서 레이저 빔이 흡수가 되어 용융이 시작된다. 용융될 때, 모재의 단위 체적이 증가되고 용융된 흡수층은 두 모재간의 작은 갭(Gap)을 매워가기 시작한다. 두 번째 (B)와 같이 용융된 흡수층이 투과층에 닿게 되면 열은 투과층으로 전도되고 투과층 역시 용융되기 시작한다. 이러한 과정을 통해 두 모재간의 충분한 기계적, 화학적 결합이 이루어지게 되어 용착 강도가 증가하게 된다. 특히 이 경우 두 모재간의 상호 결정화 구조가 형성하게 되면 그 용착 강도는 더욱 증가하게 된다.

열전도가 낮은 모재일수록 원하는 용착폭으로 용착이 가능하며, 이로 인해 용융 후 경화되는 속도를 낮추어 잔류응력을 감소시켜주는 효과를 얻을 수 있다.

기본적으로 조사방식에 따라서 레이저의 출력(P) 와 조사시간(t), 가압력(p) 등을 조합하여 최적의 작업조건을 설정할 수 있으며 이 파라미터는 단위거리당 에너지, Es=P/v [J/m]이다.

다시 말해서, 모재에 단위거리당 에너지를 전달하였을 경우 일정한 곡선을 가진다.

일정한 조건 (즉, 레이저 파워, 빔 사이즈, 가압력, 조사시간 등)에서 단위거리당 에너지가 증가하거나 또는 이동속도가 낮아지면 용착이 양호하나 점차 단위거리당 에너지가 적정치 이상 증가하면 발포가 발생하거나 타는 흔적이 남는다. (그림 16참조) 특히 발포가 발생되면 다공성 재질로 변하여 이로 인해 용착 강도가 떨어지고 모재의 품질저하를 초래하므로 발포현상은 반

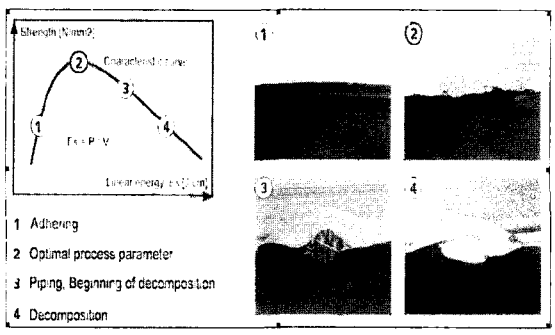

그림 16 단위거리당 에너지에 따른 플라스틱 용착 거동

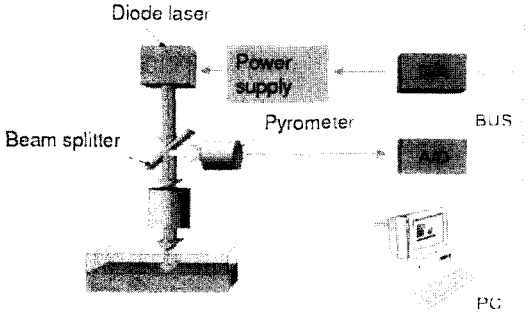

그림 17 플라스틱 용융온도 실시간 제어방법

드시 억제되어야 할 요인이다. 여기서 발포현상은 가열된 용착부에서 용융된 플라스틱의 열분해 반응으로 가스가 발생하여 다공질로 변하는 것으로 추정된다. 이를 해결하기 위하여 용융된 부분에 적정한 압력을 가하면 발포가 억제될 수 있는데, 이는 분해된 가스가 끓는 상태로 방출되기 때문에 압력을 가하면 비등점이 높아져 발포가 억제되는 것으로 추정하고 있다.

3.6 플라스틱 용융온도 실시간 제어방법

모든 종류의 플라스틱은 각기 고유의 용융점을 가지고 있는데 레이저 빔에 의해 용융되는 플라스틱 모재의 녹는 온도를 적절히 관리하게 되면 최적의 용착 품질을 얻을 수가 있다.

이를 위해 그림 17과 같이 적외선 온도센서를 레이저 빔이 조사되는 동축에 위치시켜 실시간으로 용융부위의 온도를 측정한다. 이때 수집된 아나로그 데이터를 아나로그-디지털 변환기를 통해 디지털신호로 변환하여 레이저출력을 제어하는 레이저 시스템부에 전달하게 되면 실시간으로 레이저 출력을 조절하여 용융부위의 온도를 항시 설정된 온도로 유지시켜주어 우수한 용착 품질을 얻을 수 있다.

4. 결 론

국내외 레이저 산업은 지난 20여 년간 괄목할 만한 성장을 이루었다. 21세기는 레이저시대라고 할 만큼 광통신으로부터 생산기술의 핵심에 이르기까지 산업전반에 걸쳐 레이저 응용이 확대되고 있다. 또한 레이저가 기존 기계 화학적 다단계 공정의 소요 비용을 단축시키면서, 레이저에 대한 업계의 선호도가 상승하고 있어 그 시장도 점점 넓어지리라고 예상된다. 이는 레이저 발진기 자체의 기술 발달로 인해 고품질의 레이저가 안정적으로 상용화되고, 적용 제품의 고집적, 고정밀도가 요구되는 산업 추세의 영향으로 당연한 결과이다. 지금

도 산업 생산의 각종 현장에 레이저 가공 기술을 이용한 레이저 설비들이 들어가고 있으며 전자 산업, 반도체 산업의 미세 정밀가공부터 자동차, 조선업에 이르기까지 산업의 전 분야에 레이저 가공기술이 필수적인 기술로 자리 잡고 있다.

특히, 산업계 전 범위에서 없어서는 안 될 플라스틱 접합가공 기술은 플라스틱의 사용범위가 급격히 넓어짐에 따라 많은 연구와 함께 발전해 오고 있으나 제품의 용도에 따라 개발된 수많은 플라스틱 재료의 특성별로 그에 맞추어서 용착법이 개발되어야 하고 소재의 특성과 용착과의 관계를 이해해야 적용이 가능하기 때문에, 표준화, 통일화는 해결해야 할 매우 중요한 과제로 남아 있다.

최근 개발된 레이저를 이용한 플라스틱의 용착기술은 기존의 접합방식을 대체하는 것이 아니라 장점과 단점을 동반하는 새로운 방식의 접합기술이다. 특히, 기존의 용착 방식과 대비하여 용착 강도, 기밀성 및 외관이 우수하고 생산성과 원가 절감을 가능케 하며, 내부에 기계적, 열적 충격을 주지 않으면서 복잡한 형상의 접합가공이 가능해 졌다.

이러한 장점을 최대한 이용하여 레이저 용착공정을 최적화하여야 하며 레이저 용착에 맞도록 제품이 설계되어야 하며, 수지 역시 레이저 용착에 적합한 것으로 선택되어야 한다. 또한, 제품 디자인 초기부터 이런 조건들을 고려하여 설계되어야 하고 적합한 작업자를 선정하여 작업장의 안전에 신경 써야 한다.

이런 기술적인 발전은 새로운 추가수요를 유발시켜 이에 대한 호응도 역시 높아져 많은 시장확대가 기대된다.

참 고 문 헌

1. Dr.M.Warwick, TWI, Application studies using through-transmission laser welding of polymers, Joining Plastics 2006
2. Dr.D.Hansch, Prolas GmbH, Laser welding of plastics - Process and production technology, Joining Plastics 2006
3. Dr. R. Klein, Gentex coporation, Creating transparent laser weldings on thermoplastics components, Joining Plastics 2006
4. Dr.M.Van, DSM research, Engineering plastics for laser welding, Joining Plastics 2006
5. Ian Jones, TWI, Process monitoring methods in laser welding of plastics, Joining Plastics 2006

• 한상선
• 1975년생
• 유로비젼(주) 기술영업
• 레이저 플라스틱 용접
• e-mail : robin@eurovision.co.kr

• 한상배
• 1969년생
• 유로비젼(주) 기술영업
• 레이저 용접 및 열처리
• e-mail : sbhan@eurovision.co.kr

• 김선원
• 1979년생
• 유로비젼(주) 선임연구원
• 레이저 용접 및 열처리
• e-mail : swkim@eurovision.co.kr