

# 하이브리드 방식 (CNC+Laser)을 이용한 폴리머용접공정

유종기\* · 이춘우\*\* · 최해운\*\*\*,†

\*계명대학교 지능형자동차 대학원

\*\* (주) 에스엘

\*\*\*계명대학교 기계자동차공학과

## Hybrid (CNC+Laser) Process for Polymer Welding

Jong Gi Yoo\*, Choon Woo Lee\*\* and Hae Woon Choi\*\*\*,†

\*Graduate school of intelligent vehicle, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

\*\*SL Corporation, Gyeongsan-Si 712-837, Korea

\*\*\*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

†Corresponding author : hwchoi@kmu.ac.kr

(Received November 6, 2009 ; Revised December 30, 2009 ; Accepted April 27, 2010)

### Abstract

Polycarbonate (PC) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) were welded by a combination of a diode laser and a CNC machining center. Laser beam delivered through the transparent PC and was absorbed in an opaque ABS. Polymers were melted and joined by absorbed and conducted heat. Experiments were carried out by varying working distance from 44mm to 50mm for the focus spot diameter control, laser input power from 10W to 25W, and scanning speed from 100 to 400mm/min. The weld bead and cross-section were analyzed for weld quality, and tensile results were presented through the joint force measurement. With focus distance at 48mm, laser power with 20W, and welding speed at 300mm/min, experimental results showed the best welding quality which bead size was measured to be 3.75mm. The shear strength at the given condition was 22.8N/mm<sup>2</sup>. Considering tensile strength of ABS is 43N/mm<sup>2</sup>, shear strength was sufficient to hold two materials. A single process was possible in a CNC machining system, surface processing, hole machining and welding. As a result, the process cycle time was reduced to 25%. Compared to a typical process, specimens were fabricated in a single process, with high precision.

Key Words : Hybrid process, Laser process, Polymer joining, Welding speed, CNC machining

## 1. 서 론

레이저 가공 기술은 신뢰도나 고정밀도의 이유로 중공업은 물론 전기, 전자, 반도체산업 등 산업 전반에서 그 쓰임이 증가하고 있다<sup>1)</sup>. 레이저 가공은 공구와 공작물의 비접촉으로 인해서 공구마모에 의한 정밀도 저하를 막을 수 있고, 공구수명에 따른 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 절삭가공 시 발생하는 진동이나 열의 발생을 최소화 할 수 있으며<sup>2)</sup>, 동일 장비를 사용하여 절단, 표면처리, 용접 등을 할 수 있는 유연성을

가지고 있다<sup>3)</sup>. 이러한 레이저 가공 기술의 장점과 기존의 CNC 공작기계를 조합하여 생산성 향상과 정밀도를 높이는 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며, 산업 현장에서 복합가공기술의 효용성이 검증되고 있다<sup>2,3)</sup>.

최근 고출력 다이오드레이저 기술의 발전으로 다이오드레이저의 쓰임이 재료 가공 분야로 확대 되고 있다<sup>4)</sup>. 고출력 다이오드레이저는 기존의 CO<sub>2</sub> 레이저 및 Nd:YAG 레이저에 비해 운용비가 저렴하며 장치의 소형화가 가능하여 산업 분야에 대한 적용이 증가하고 있다<sup>4)</sup>. 특히 고출력 다이오드 레이저의 응용기술 중 레이

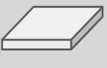
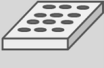


Work	Surface cutting	Hole drilling	Sort	Welding
Processe				
Existing	CNC	CNC	Operator	Laser system
Hybrid	Hybrid			

Fig. 1 Comparison of processes

저 플라스틱 투과 용접 (Through Transmission Welding)은 친환경적이며 용접 품질이 우수하고 용접이 어려운 형태에서도 용접이 가능하여 자동차 산업과 의료산업 등 많은 분야에서 활용되고 있다<sup>4)</sup>.

본 연구는 이중 폴리머를 두 개의 공정으로 가공하는 방법을 개선하여서, CNC와 레이저를 결합한 하이브리드 방식의 복합 가공법에 관한 연구이다. 이중 폴리머를 가공 시 기존 CNC공정에서는 기계가공을 마친 후 접합 공정을 위해서 별도의 정렬과 원점조정이 필요했지만, 하이브리드 방식에서는 가공 툴의 위치와 공작물의 위치를 정확히 알 수 있어서 별도의 정렬 작업에 필요한 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다(Fig. 1).

본 연구는 CNC 공작기계에 레이저 투과 용접 기술을 접목한 하이브리드 (CNC+Laser) 형태의 복합 가공공정을 통해 생산성 향상과 가공정밀도의 향상을 이룰 수 있는 연구 결과를 소개한다.

## 2. 실험의 방법

### 2.1 실험 장치 셋업

#### 2.1.1 실험 소재

레이저투과용접은 레이저빔이 투과성이 우수한 플라스틱을 통과하여 흡수성이 우수한 플라스틱의 표면에 도달하면서 흡수된 열이 전도에 의해 두 플라스틱이 용융되어 접합하는 용접방법이다<sup>5)</sup>. 이러한 공정은 플라스틱 소재의 광학적 특성이 매우 중요하며, 재료는 주로 열가소성수지가 많이 사용되며, 서로 극성이 같고 용융 온도 범위가 비슷한가를 고려하여 선정한다<sup>6)</sup>. 투과층의 소재는 낮은 흡수율 또는 높은 투과율을 나타내어 투과체로 많이 쓰이는 Polycarbonate (이하 PC)를 선정하였으며, 흡수층의 소재로는 회색의 Acrylonitrile Butadiene Styrene (이하 ABS)를 선정하였다. 두 재료의 열변형 온도는 각 135℃와 109℃이며<sup>7,8)</sup>, 실험 시편은 CNC 가공과 접합 실험 시 가압을 고려하여 W40 × L120 × T3.5 mm로 제작하였다.

투과체로 사용될 실험 시편 (PC)의 광학적 특성을

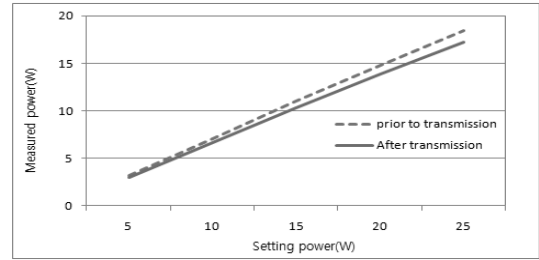


Fig. 2 Transmittance measurement

파악하기 위해 레이저빔 투과율을 측정해 보았는데, 파워미터를 사용하여 폴리머 투과 전 파워와 투과 후의 파워를 측정하여 비교해 보았다(Fig. 2).

실험 결과 투과체로 사용될 시편 (PC)의 투과율은 평균 93.6%로 측정되었다. 재료의 광학적 특성인 반사율을 알아보기 위해 입사된 후 반사되어 나오는 파워를 측정해야 하나 측정에 어려움이 있기에 폴리머가 이상적으로 매끄러운 표면을 가지고 있다는 가정 하에 매질의 굴절률의 차이에 의해 발생하는 경면 반사에 의한 반사 손실만이 발생한다고 가정하고 경면반사에 의한 손실을 식(1)에 의해 계산해 보았다<sup>9)</sup>.

$$R_L = \frac{(n - m)^2}{(n + m)^2} \times 100 \tag{1}$$

(n: polymer의 굴절지수, m: air의 굴절지수)

여기서 n은 1.58, m은 1이므로 5.1%의 반사율을 가짐을 확인하였다. PC의 투과율과 반사율을 이용하여 PC의 흡수율이 1.3%임을 확인하였다. 따라서 PC에서의 에너지 흡수는 거의 없고 대부분의 에너지가 통과 또는 반사의 형태로 전달됨을 알 수 있다.

식 (1)에서 계산된 바와 같이 PC의 흡수율은 레이저빔의 안정출력 예러범위와 비슷할 정도로 매우 낮아서, PC의 흡수는 무시하고 투과율 93.6%만이 접합에 사용된다고 가정하였다.

#### 2.1.2 실험 장치

실험에 사용된 장치는 Fig. 3에서 도시되었다. 장치는 3축 제어시스템과 ATC (Automatic Tool Changer)와 외부 I/O 포트 등의 부가 장비를 갖추고 있으며 (TNV-40M, 세일중공업), 레이저 시스템은 다이오드 레이저 (CW, 파장 808nm, LVITECH)로서 최대 출력은 30Watt이다.

통합 시스템은 크게 구동부와 중앙제어부로 구성되어 있으며, 구동부는 CNC 구동부, 레이저 출력부 그리고 시편 고정장치로 구성되고, 중앙제어부는 레이저 제어부와 CNC 제어부로 구성된다.

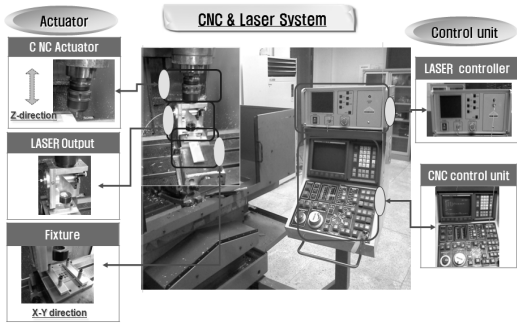
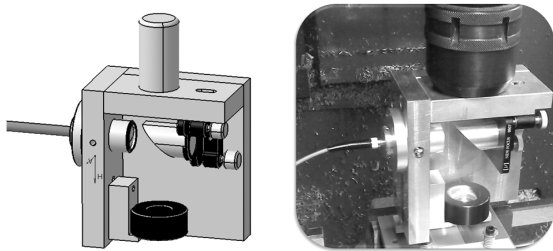


Fig. 3 Hybrid (CNC+Laser) system



(a) CATIA modeling (b) Beam delivery system in CNC

Fig. 4 Beam delivery system

본 실험 장비에서 가공물은 XY 방향으로 이동이 되고 레이저빔 및 CNC 공구는 상하방향 (Z방향)으로 이송을 하게 된다. 또한 일반 공구와 레이저 광학장치는 ATC를 사용하여 공구교환이 가능하도록 설계 되었으며, 레이저빔의 전송이 용이하도록 Fiber Optic을 사용하는 구조로 설계하였다. 또한 레이저 빔 집속을 위해서 광 집속장치를 구성하였으며, 3차원 모델링 (Fig. 4a)과 장착 모습 (Fig. 4b)이 그림에 도시되어 있다.

2.1.3 시편 고정장치

두 종류의 플라스틱의 접합을 용이하게 하기 위해 일정 이상의 압력을 가하여 접착을 유지할 수 있는 접합 지그를 Fig. 5와 같이 구성하였다<sup>6)</sup>. 스프링 상수가 비교적 선형적인 금형스프링을 사용하여 가압력이 일정하게 하였으며, 시편을 지그에 장착하여 가공함으로써 용접 표면의 평탄도를 높일 수 있게 하였다.

두 소재의 적절한 접합조건을 알아보기 위해 실험 조

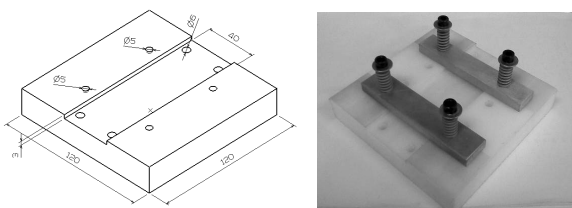


Fig. 5 Specimen mounting jig

건을 달리하여 접합 상태와 접합력을 측정하였다. 실험 변수로는 레이저의 초점위치 (mm), 레이저출력 (W), 용접속도 (mm/min)를 달리하여 진행하였으며 접합 상태 분석은 용접 비드의 크기와 단면 상태를, 인장 실험을 통하여 확인하였다.

2.2 폴리머 접합 실험

실험에 사용된 초점렌즈는 초점거리 1 inch, 색보정 렌즈 (Achromatic lens)를 사용하였으며, 용접비드 사이즈를 고려하여 레이저 초점의 위치는 44mm에서 50mm까지 2mm씩 변화 시켰으며 레이저 출력은 10W에서 25W까지 5W씩, 용접 속도는 100mm/min에서 400mm/min으로 100mm/min씩 변화시켰다.

본 실험에 앞서 용접 비드의 크기를 예측하기위하여 번페이퍼(Burn paper)를 이용 레이저 초점의 위치와 레이저 출력에 따른 초점의 크기를 측정하였다. 측정 결과 동일 출력에서 레이저 초점 위치에 따른 초점 크기 그래프는 Fig. 6과 같다. 초점위치에서 거리가 멀어질수록 레이저 빔의 크기 또한 커지며 일정 거리 이상이 되면 빔의 크기는 커지지만 면적 당 에너지가 줄어들어 측정되는 초점의 크기는 줄어들게 된다.

동일한 레이저 출력에서는 초점거리에서 48mm 떨어진 지점에서 용접 비드의 크기가 가장 클 것이라고 예상할 수 있다.

초점위치와 출력에 따라 조건이 다른 60가지 경우에 대해 각 3회의 실험을 하였으며, 용접 비드와 용접된 시편의 절단면을 분석하였다.

Fig. 7는 레이저 초점 위치에 따른 레이저 출력과 용접속도에 따른 비드크기의 비교 그래프이다. 결과에서 나타난바와 같이 용접 속도가 증가함에 따라 비드의 크기가 줄어들고, 레이저 출력을 증가함에 따라 비드의 크기가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 레이저 출력과 용접 속도에서는 초점 크기로 예상했듯이 초점

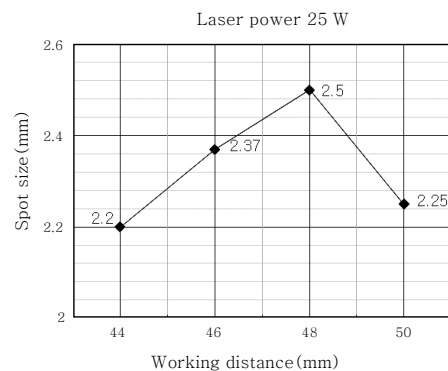
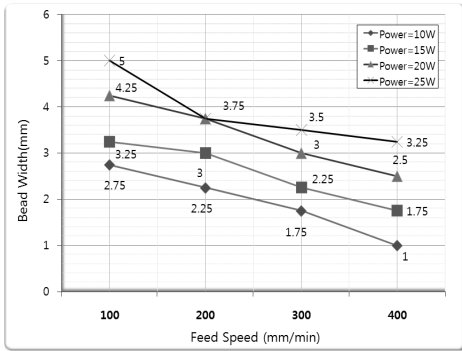
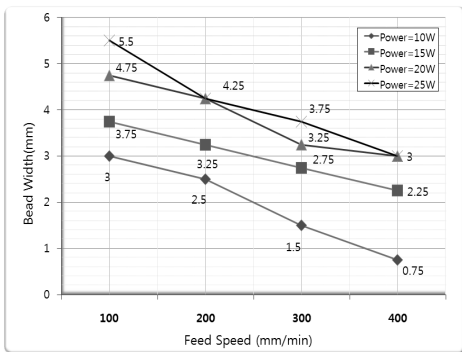


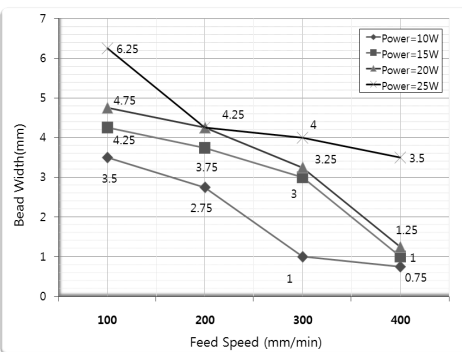
Fig. 6 Spot size with respect to working distance (Power and Focus distance)



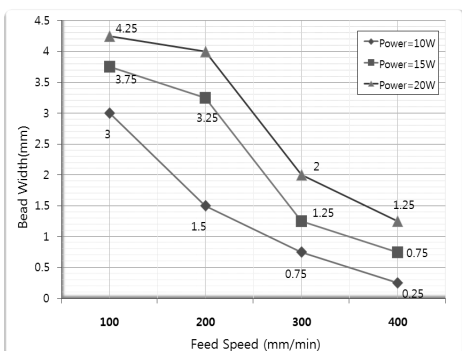
(a) Focus distance 44mm



(b) Focus distance 46mm



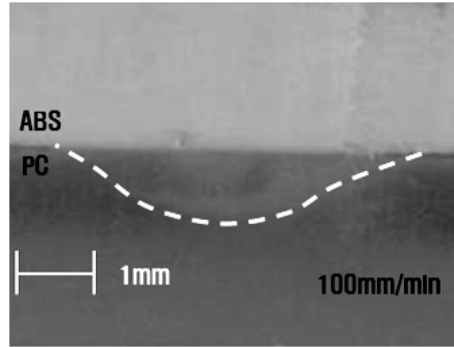
(c) Focus distance 48mm



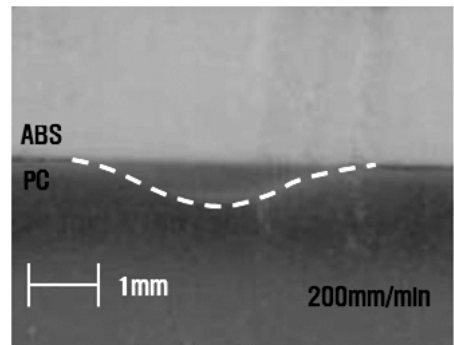
(d) Focus distance 50mm

**Fig. 7** Bead size with respect to power and scanning speed

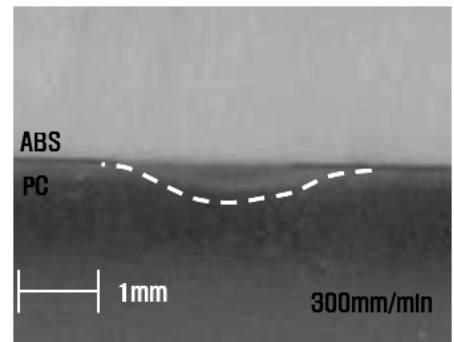
위치 48mm에서 용접 비드의 크기가 가장 크게 나타났다.



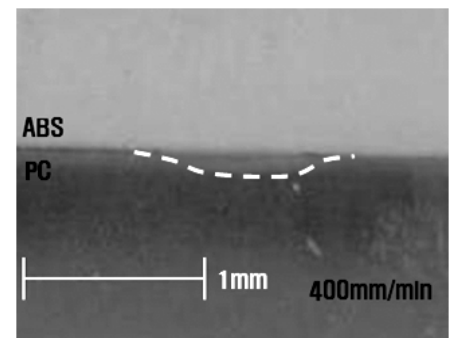
(a) Scanning speed 100mm/min



(b) Scanning speed 200mm/min



(c) Scanning speed 300mm/min



(d) Scanning speed 400mm/min

**Fig. 8** cross section of welded samples with various scanning speed

Fig. 8은 레이저 출력 20W, 초점거리 48mm일 때 용접 속도에 따른 단면의 사진이다. 용접 속도 100mm/min에서는 overflow가 일어나 미세한 균열을

보였으며 400mm/min에서는 빠른 용접 속도에 의해 용접이 제대로 이루어지지 않았다. 회색의 ABS는 육안으로 열 변형에 대해 관찰하기 힘들었으나 PC의 경우 Gaussian 분포의 형태로 열변형이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

두 개의 폴리머 시편의 경계면 접합은 열에 의한 분자 간 확산 (intermolecular diffusion)과 이로 인한 고분자의 재결합 (polymer entanglement)에 의해서 일어나는데, 이는 표면에너지 또는 이차 화학결합에 의해 접합되는 접착제를 이용한 접합과는 구분이 된다<sup>10)</sup>. 일반적으로 레이저를 이용한 폴리머접합의 단계는 표면재배치 (surface rearrangement), 표면근접 (surface approach), 젖음 (wetting), 확산 (diffusion) 및 임의화 (randomization)의 단계로 이루어지는데, 용접에서는 표면재배치, 표면근접 및 젖음은 압력을 가하는 단계에서 일어나고, 레이저빔이 가해졌을 때 주로 일어나게 된다<sup>10)</sup>.

금속에서는 조직분석을 통해서 용접성을 예측해 볼 수 있는 반면, 폴리머는 결정변형으로 인한 예측의 어려움이 있어서, 일반적으로 접합경계면 (fusion boundary)의 범위를 파악하여서 용접의 견고성을 간접적으로 예측해 볼 수 있다. 이러한 방법의 일환으로, 용접시편을 절단 후 단면을 조사한 결과가 Fig. 8에 도시되어 있다.

폴리머 용접의 기계적강도 (접합력)를 측정하기 위하여 인장실험을 수행 하였다. MTS 810 (10T)의 장비로 인장 실험을 실행 하였는데, 시편은 각 용접 조건에 따른 용접 상태를 육안으로 확인하여, 용접이 양호한 시편 19가지 조건에 대하여 인장실험을 실시하였다. 용접강도를 비교하기 위해 ABS와 PC 단일 재질에 대한 인장실험을 실시한 결과, PC는 인장강도 59N/mm<sup>2</sup>이었으며, ABS는 인장강도가 43N/mm<sup>2</sup>으로 측정이 되었다.

Fig. 9에 초점거리 48mm에서의 레이저출력과 용접 속도에 따른 용접 상태와 측정된 전단 강도를 도시하였

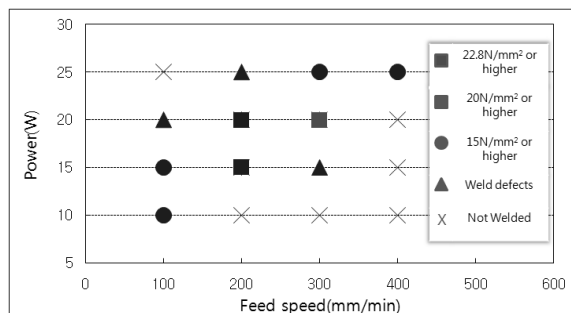


Fig. 9 Shear strength results (Focus distance 48mm)

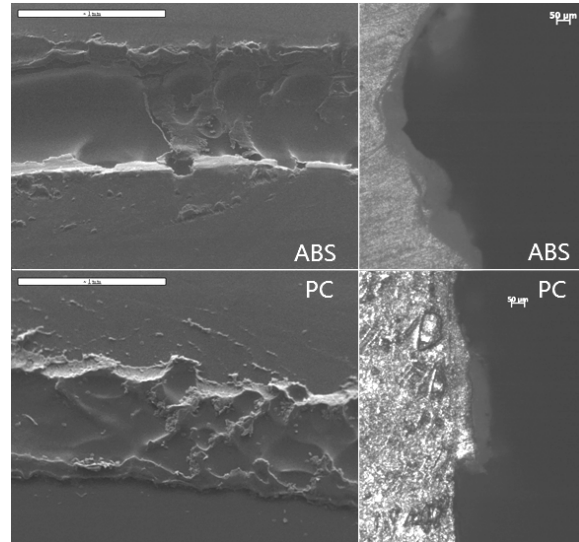


Fig. 10 Surface of tensile test specimen (SEM and optical microscope)

다. 레이저 용접한 경우는 두 소재를 오버랩하여 용접하기 때문에 용접 부위에서는 전단 강도의 값을 가진다.

인장실험 결과 초점 위치 48mm, 출력 20W, 용접 속도 300mm/min일 때 용접 비드 크기는 3.25mm이었으며 전단 강도는 22.8N/mm<sup>2</sup>으로 최대 전단강도를 보였다. ABS 단일 재질의 인장 강도 43N/mm<sup>2</sup>와 비교 하였을 때 0.5배 이상의 값을 가지므로 충분한 강도를 보임을 확인하였다.

인장 실험한 시편의 표면을 SEM (Scanning Electron Microscope) 촬영한 사진과 단면을 광학현미경으로 관찰한 사진을 Fig. 10에 도시하였다. 시편이 분리 될 때 ABS 재질이 PC에 붙은 상태로 파단됨으로서, 상대적으로 인장 강도가 약한 소재가 강한 소재와 결합된 채로 분리 되었으므로 적절하게 용접이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

### 2.3 하이브리드 방식의 접합 실험

앞절에서 기술된 폴리머 접합실험 조건을 바탕으로 하이브리드 방식을 이용하여 폴리머의 가공과 접합을 동시에 수행하였다. 의료용 혈액샘플 검사장비로 사용될 수 있는 가상의 시료 분석 기구를 이용하여, 하부 시편에 3×3 매트릭스 형태의 5mm 직경의 홀을 가공한 후, 상부 시편을 접합하는 2단계의 공정을 사용하지만, 하이브리드 시스템을 이용하여 한 공정으로 구성하는 공정 단일화를 시도하였다.

시편표면의 편평도를 위해 표면을 평면 절삭바이트 (Face cutter)로 가공하고 엔드밀을 이용하여 샘플 홈

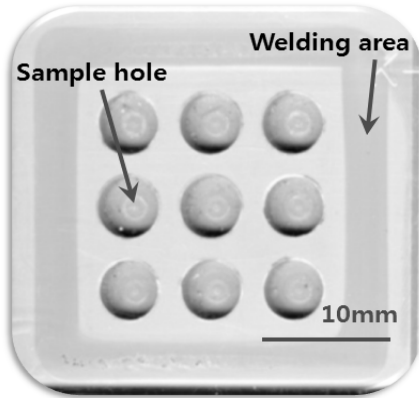


Fig. 11 Hybrid processed sample

가공 후 레이저를 이용한 접합을 순차적으로 진행하였다. Fig. 11에서 보여진 바와 같이 하이브리드 방식을 사용하여 샘플 홈 가공과 접합이 이루어짐을 확인하였다. 용접상태를 확인하기위해 비드 크기가 이전 실험에서의 조건과 일치함을 확인하였고 침수 (waterproof) 검사를 통해 밀봉상태를 확인하였다.

일반적인 방식과 제안한 하이브리드 방식의 공정시간을 비교해 보기위해서, 제작자가 취하게 되는 각 행위에 따라 동일한 경과 시간으로 5분을 부여하여 계산하였다.

기존의 일반적인 방식의 경우 제작자가 취하게 되는 행동이 12가지 동작으로 총 60분으로 계산되었고 제안한 하이브리드 방식의 제작 공정의 경우는 9가지 동작으로 공정 시간이 45분으로 계산되었다.

두 공정시간을 비교한 결과 제안된 하이브리드 방식이 25%의 공정시간을 절약할 수 있었다. 실제 시편의 제작 과정에서 CNC에서 가공한 시편을 용접 가공을 하기 위해 시편을 재 고정 후 가공 좌표를 재설정하는 과정에서는 5분이상의 시간이 경과 되었고, 사용한 투과 용접은 폴리머 내부에서 용접이 이루어지므로 후처리 과정이 생략되어 실제 25% 이상의 공정시간을 절약할 수 있다.

또한 일반적인 공정에서는 가공물의 고정과 가공 좌표를 잡는 과정에서 정밀도의 저하가 발생된다. 1000mm 크기의 가공물의 경우 공차인  $\pm 0.5\text{mm}$ 의 오차를 허용할 수 있지만 100mm 크기의 가공물의 경우  $\pm 0.5\text{mm}$ 의 오차는 허용범위를 초과하게 된다. 제안된 하이브리드 방식을 사용할 경우 단일 공정으로 가공이 완료되기 때문에 기존의 공정에 비해 가공 오차를 줄일 수 있어 의료 산업과 같이 고정밀도를 요구하는 산업에서 높은 활용도를 기대할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문은 레이저 투과 방식의 용접 기술을 이용하여 이중 폴리머의 최적 접합조건을 실험적으로 도출하고, 이를 응용하여 하이브리드 방식에 적용하였다. 폴리머 접합 실험 결과 초점위치를 48mm, 레이저 출력을 20W, 용접 속도를 300mm/min으로 하였을 때 비드 크기는 3.75mm이고 전단강도는  $22.8\text{N/mm}^2$ 의 최적 결과를 도출하였다. 향후 두 폴리머를 접합할 경우 실험에서 도출된 데이터를 기준으로 공정속도나 장치상황에 맞게 조건을 선택하여 사용할 수 있다.

CNC 제어장치는 일반 G-Code나 CAD 시스템과 연동이 편한 장점이 있고, 레이저가공은 가공공구의 마모로 인한 정밀도 저하가 없어서 하이브리드 시스템으로 연동 되었을 때 많은 장점을 도출 할 수가 있었다. 2단계의 공정을 단일화 함으로써 25% 이상의 공정 시간을 절약할 수 있고, 높은 정밀도를 얻을 수 있는 장점을 확인하였다. 또한 두 대의 장비를 다른 공간에 설치하였을 때에 비해 한 공간 내에 설치함으로 50%의 공간적 효율성과 레이저 용접 시 필요한 모션 테이블이 제거되어 장치 비용을 절감할 수 있다. 개발된 하이브리드 시스템은 또한 의료용 샘플 검사용 디바이스 제작의 가공 및 접합을 위한 폴리머 접합시스템에 응용이 되었는데, 접합강도가 우수하고 생산성이 향상됨이 실험적으로 증명되었다.

투과층의 소재는 조사된 레이저파장을 대부분 통과시키는 (평균 93.6%이상) 재질을 선정하였지만, 일부 반사 또는 흡수가 진행되어서 물성치를 변화시킬 수도 있을 것으로 사료된다. 하지만, 본 실험에서 개발된 공정 변수 에러범위 내에서 큰 무리없이 접합이 이루어짐을 알 수 있었다. 일례로, 20W 기준 용접시 조사 에너지의 93.6%인 18.7W에서도 충분한 용접 접합력을 지닌이 실험적으로 확인 되었다.

### 후 기

본 결과물은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업과 신진교수지원 (KRF2008-331-D00097)의 연구결과입니다. 본 실험을 위해서 장비를 지원해준 (주)LVITECH에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. C. Lee, S. Nam, H. Shin[Co-authors] : Ministry of Science and Technology, Korea Institute of Science and Technology Information[Co-editor], Laser Processing

- Technology Trends, (2006) (in Korean)
2. J. Lee, J. Seo, D. Shin, S. Kim : Trend of Laser Assisted Machining, Journal of Korean Society of Laser Processing, **10-1** (2007), 1-10 (in Korean)
  3. J. Seo, Y. Han : Laser Welding in Automotive Industry, Journal of the Korean Welding Society, **12-2** (1994), 49-63 (in Korean)
  4. M. Seo, K. Ryu, Y. Hong, S. Moon, K. Nam : Study on Laser Transmission Welding of Thermoplastics, Optical Society of Korea Summer Meeting 2004, **7.8~9** (2004), 136-137(in Korean)
  5. S. Han, S. Han, S. Kim : A Review on Plastic Welding Technology with Diode Laser, Journal of the Korean Welding and Joining Society, **26-4** (2008), 14-20 (in Korean)
  6. D. Cho, C. Jung, I. Jang, S. Do : The study on the optimization of the laser welding for plastic, Proceedings of the Korean Society of Laser Processing annual spring Conference, (2008), 189-192 (in Korean)
  7. MatWeb, (Polycarbonate material properties), www.matweb.com
  8. MatWeb, (ABS material properties), www.matweb.com
  9. Hecht, E. : Hecht Optics, Addison Wesley, forth edition, 129-135
  10. D. Grewell, A. Benatar, J. Park : Plastics and Composites Welding Handbook, Hanser, **11-28**, 271-293
  11. Q. Wu, J. Gong, G. Chen, L. Xu : Research on laser welding of vehicle body, Optics & Laser Technology, **40** (2008), 420-426
  12. S. Choi, T. Kim : Plastic Welding with LASER, Proceedings of the Korean Society of Laser Processing annual spring Conference (2004), 88-91, (in Korean)
  13. D. Lee, S. Na, J. Kim, Y. Kim, J. Choe : A Study on Heat Source Modeling of Laser Plastic Transmission Welding, Korea Society of Machine Tool Engineers annual spring Conference, (2007.5) 383- 388, (in Korean)
  14. J. Kim, J. Lee, J. Seo, J. Jung : The latest application of laser cutting technology, Journal of Korean Society of Laser Processing, **5-1** (2002), 7-12 (in Korean)
  15. Brian G. Bryden : Welding of plastics with high power diode lasers, Industrial Robot, **31-1** (2004), 30-33
  16. M. Ilie, E. Cicala, D. Grevey, S. Mattei, V. Stoica : Diode laser welding of ABS, Optics & Laser Technology, **41** (2009), 608-614