

폴리머의 레이저 투과접합 시 접합부의 기계적 성질에 관한 연구

차상우* · 김진범** · 윤석환*** · 나석주**

*현대기아자동차 선행연구팀

**한국과학기술원 기계공학과

***한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹

A Study on the Mechanical Properties of Joints in Laser Transmission Joining of Polymers

Sang-Woo Cha*, Jin-Beom Kim**, Suk-Hwan Yoon*** and Suck-Joo Na**

*Advanced Technology & Analysis Team, Hyundai-Kia Motors, Gyeonggi, Korea

**Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

***Turbo Pump Development Group, KARI, Daejeon, Korea

Abstract

Laser Transmission Joining (LTJ) of plastics is a process in which light of suitable wavelength is transmitted through a transparent substrate that is in contact with an absorbing one. In this paper, LTJ is investigated by preliminary experiments from the viewpoint of mechanical engineering. To understand transmitting characteristics of each polymer substrate, transmission rate, reflection rate and absorption coefficient of polymer are measured by using a laser power-meter. Characteristics of joining in the spot welding and seam welding are investigated by measuring the fracture load.

Fracture load increases in accordance to the laser power and irradiation time. However, when the laser power is over 60W and irradiation time over 4seconds, fracture load decreases. This phenomenon is probably due to heat-softening of materials. Besides, cavities are generated at a joint by evaporation of water molecules, which can be suppressed by introduction of a gap between two substrates.

*Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received October 2, 2006)

Key Words : Laser Joining, Transmission Joining, Plastic Joining, Acrylic

1. 서 론

레이저투과 접합(Laser Transmission Joining: LTJ)이란 특정한 파장에 대해서 투과성과 흡수성이 다른 두 재료를 접합시키는 방법으로 플라스틱의 접합에 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되어왔다^{1,2)}. 색소 등의 흡수제를 첨가하지 않은 폴리머는 Nd:YAG 레이저와 다이오드(diode) 등 파장이 800-1000nm인 적외선 영역의 레이저 빔을 투과시키는 성질을 가지고 있는데, 이러한 천연상태의 폴리머에 흡수제를 첨가하면 적외선 영역의 레이저 빔에 대한 흡수성을 높일 수 있다³⁾. 투과성이 높은 플라스틱을 흡수성이 높은 재료 위에 올려

놓고 레이저 빔을 투과성이 높은 재료를 통하여 조사시키면 두 재료의 접촉면에서 흡수성 재료에 의해 레이저 빔이 흡수되고 투과성재료는 열전도에 의해 흡수성재료로부터 에너지를 흡수하여 온도가 상승한다. 이러한 특성을 이용하여 투과성과 흡수성이 다른 두 재료를 접합시키는 방법을 레이저 투과접합이라 한다⁴⁾.

지금까지의 투과접합(transmission joining)에 관한 연구는 투과와 흡수 등 광학적 측면과 첨가제의 영향 등과 관련된 재료적 측면의 접근방식이 집중되어 왔다⁵⁾. 본 연구에서는 기초적인 실험으로서 산업적인 활용도가 높은 대표적인 두 폴리머인 아크릴수지와 폴리아미드 6(polyamide6)의 투과특성을 알아보기 위하여 재료의 두께변화와 기울기 변화에 대하여 레이저 파워미터(laser

power meter)를 이용하여 투과율(transmission rate) 측정을 하였다. 다음으로 투과접합방식의 기계적 강도를 알아보기 위하여 점용접(spot welding)에서의 공정 변수의 값들을 변화시켜 각 경우에 대한 접합강도를 전단인장시험(shear tension test)을 통해 측정하여 주어진 조건에서의 최적의 공정 변수들의 값을 유추하였다. 또한 접합 시 수증기의 기포로 발생하는 구멍(cavity)을 줄이기 위하여 간극(gap)을 고려한 실험을 수행하고, 기밀성을 요구하는 접합에 활용도가 높은 심 용접(seam welding)에서 간극을 고려한 실험을 수행하여 적절한 접합조건을 제시하였다.

2. 광학적 특성 측정 실험

2.1 실험 방법

기초 실험으로 폴리머 재료의 광학적 특성 중 하나인 투과율을 측정하는 실험을 수행하였으며 이를 통해 재료의 흡수율(absorption rate)과 흡수계수(absorption coefficient)를 간접적으로 계산하였다. Fig. 1과 같은 실험 형태의 구성으로 레이저 파워미터를 통해 재료를 투과하기 전의 레이저 출력(P_0)과 재료를 투과한 후의 레이저 출력(P_T)을 측정하였다.

이 측정된 값들을 사용하면 투과율(T)은 다음과 같은 식에 의해서 간접적으로 계산할 수 있다. 이때의 레이저 출력, P_0 값은 30W로 일정하게 두었다.

$$T = 100 \times \frac{P_T}{P_0} \quad (T, \text{in } \%) \quad (1)$$

재료의 반사율(reflection rate)은 재료의 상단부에서 반사되는 레이저의 출력을 측정하여야 계산할 수 있다. 반사되는 레이저의 파워를 측정하는 데 있어 어려

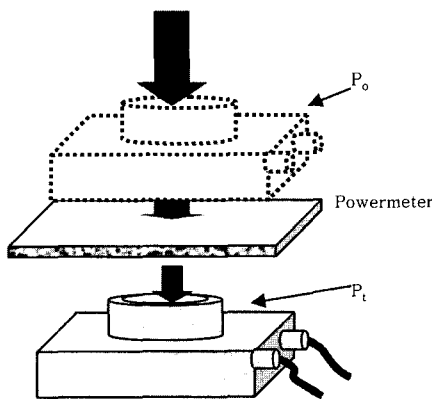


Fig. 1 Experimental set-up for laser power measurement

움이 크기 때문에 반사효과(reflection effect)에 있어서는 재료의 표면 거칠기가 레이저의 파장보다 작다고 가정하고 굴절률의 차이에 따른 경면반사(specular reflection)만을 고려하여 다음과 같은 식의 반사 손실(R_L)만을 고려하였다⁶⁾. 레이저가 재료를 투과할 때 일어나는 상호작용은 흡수, 반사, 투과이므로 이러한 관계를 통해 다음과 같은 식으로서 흡수율(A)을 구할 수 있다.

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

(n: 플라스틱의 굴절지수, m: 공기의 굴절지수) (2)

$$A = 100 - T - R_L \quad (3)$$

또, 흡수계수(α , mm^{-1})는 다음과 같이 구해 질 수 있으며, 이러한 흡수계수는 접합부의 열해석에 사용될 수 있다⁷⁾. 흡수계수의 역수, 즉, $\frac{1}{\alpha}$ 는 물리적으로 입사하는 레이저 출력이 $\frac{1}{e}$ 로 떨어지는 두께를 의미한다.

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{P_0}{P_T}\right) \quad (t: \text{재료의 두께}) \quad (4)$$

실험을 하기 위해 유리 섬유(glass fiber)의 성분비가 각각 0, 30%이고, 색깔이 천연색과 주황색(orange)인 네 가지 종류의 아크릴수지와 유리 섬유의 성분비가 각각 0, 30%이며, 색깔이 천연색과 파랑색(blue)인 네 가지 종류의 폴리아미드 6에 대해서 실험을 수행하였다. 각 재료의 두께는 아크릴수지는 2mm, 폴리아미드 6은 3.5mm이다. 레이저가 수직으로 입사하는 경우뿐만 아니라 기울기를 준 상태에서의 각 각도에 대하여 측정을 하였다. 투과접합의 맞대기 용접(butt welding)에 대한 적용에 있어서 레이저가 기울어져 조사 되어야 하기 때문에 이러한 기울기를 주었을 때의 투과율 측정값은 실제 응용에 있어서 유용하게 이용될 것이다. 사용한 레이저 시스템은 180W급이며 TEM₀₀ 모드인 CW Nd:YAG 레이저이다.

2.2 실험 결과

투과율 측정의 실험결과는 다음 Fig. 2와 같다. 아크릴수지나 폴리아미드 6에서 천연색이거나 유리섬유 첨가제가 없는 재료일수록 높은 투과율을 보이고 있으며 첨가제의 양이 많은 경우 투과율이 낮게 나왔다. 첨가제가 많이 들어갈수록 레이저의 진행에 있어서 산란과

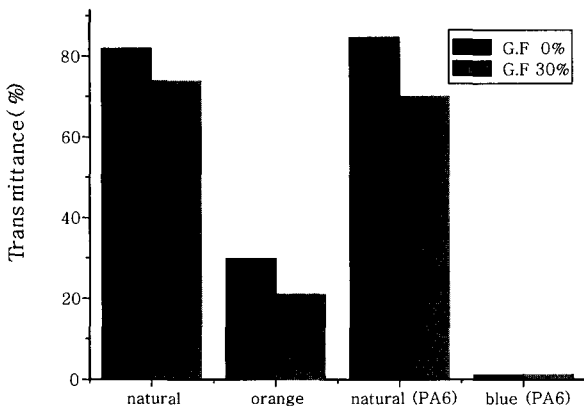


Fig. 2 Transmission rate of various polymers

첨가제의 레이저 흡수 등으로 인해 방해 받는 요소가 많아지고 이로 인해 재료를 투과한 후의 레이저 출력인 P_T 값은 낮아진다는 것을 확인할 수 있다⁸⁾.

유리섬유가 첨가되지 않은 천연색의 아크릴수지를 대상으로 여러 크기의 P_0 값에 대해서 측정한 P_T 값을 정리해 보면 Table 1 과 같다. P_0 값이 증가할수록 일정한 투과율을 보이는 것이 아니라 조금씩 투과율이 높아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인은 투과성 재료내의 유리 섬유가 아닌 다른 종류의 첨가제가 높은 출력의 레이저에 의해 흡수 및 가열로 분해되어 산란의 요소가 줄어들기 때문에 레이저 출력이 높아질수록 투과율이 증가되는 것으로 여겨진다.

입사각의 변화에 대한 투과율의 변화는 Fig. 3과 같

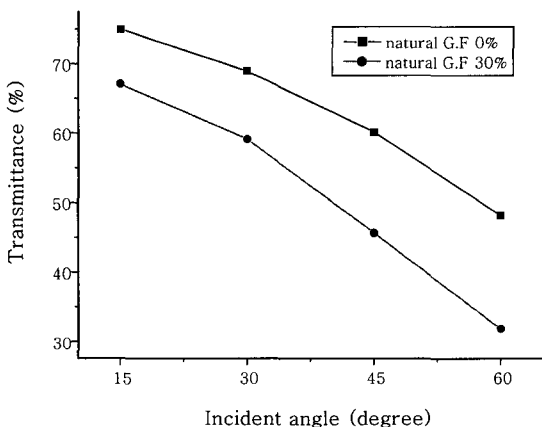


Fig. 3 Transmission rate for various angles

다. 첨가제가 들어가지 않은 천연색의 아크릴에 대해서 30W의 레이저 빔을 조사시키며 측정하였다. 측정된 결과부터 기울기가 증가할수록 반사되는 레이저 출력이 증가하여 투과율이 감소함을 알 수 있었다. 앞서 설명한 바와 같이 맞대기 용접에 투과접합이 적용되는 경우에는 구조의 특성상 레이저가 기울어져서 조사되어야 하므로 투과율 변화에 대한 고려가 필요할 것이다.

3. 접합강도 측정 실험

레이저 출력과 빔의 조사시간을 공정변수로 선정하여 용접을 수행한 후 전단인장시험을 통해 파단하중을 측정하였다. Fig. 4와 같은 겹치기 접합형태(lap joint)에 점용접(spot welding)을 수행하였으며 그림과 같이 레이저 빔은 접합면에 대하여 수직으로 조사하였다. 조사된 빔의 면적은 1.13mm²이었으며, 레이저 조사시간은 초 단위로 변화시키며 실험을 수행하였다. 사용된 재료는 유리 섬유의 성분비가 0%이며 색소가 첨가되지 않은 2mm 두께의 아크릴수지와 유리 섬유의 성분비가 30%인 주황색의 2mm 두께의 아크릴수지이며, 기초실험의 결과에 근거하여 전자를 투과성 재료로 후자를 흡수성 재료로 사용하였다. 사용한 재료의 파단하중은 첨가물에 상관없이 두 재료 모두 393.6N이다.

Fig. 5는 각각 레이저 출력을 높여가면서 측정한 파단하중(fracture load)을 나타내고 있다. 그래프의 X축에 명시된 레이저의 출력은 상부 재료에 닿기 전 위치에서의 P_0 값들이다. 그래프에서 알 수 있듯이, 레이저 출력의 증가에 따라 파단하중도 증가하는 것과 일정 출력 (60W)과 일정 조사시간 (4sec)을 넘어서면 부분의 파단하중은 점차 줄어드는 것을 알 수 있다.

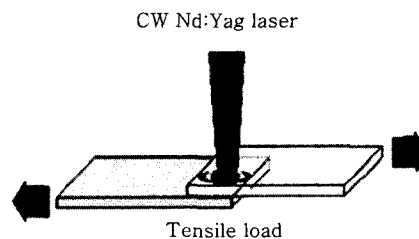


Fig. 4 Schematic of experiments for shear tensile test

Table 1 Irradiated laser power at joining area of various laser power (thickness of substrate: 2mm)

Laser power (P_0 ,W)	15	20	30	40	45	50	60	70	75
Irradiated laser power at joining area (P_T ,W)	12.3	16.6	25.3	33.3	38.3	42.7	51.4	60.1	65.5
Transmission rate (T,%)	82.0	83.0	84.3	84.3	85.1	85.4	85.7	85.9	86.0

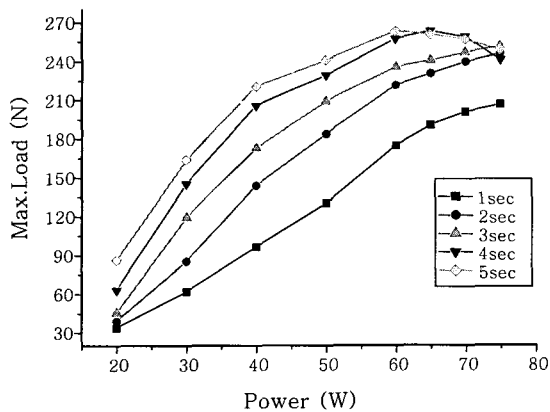


Fig. 5 Fracture load for various powers and welding times

일정 레이저 출력 이상인 조건에서 파단하중 값이 감소하는 현상은 조사시간이 길수록 현저하게 나타난다. 파단하중의 감소는 파워와 조사 시간의 증가에 따라 열영향부(heat affected zone)도 증가함으로 인해 재료의 연화된 부분도 같이 증가하고 가열 후 수축의 범위도 증가하기 때문에 발생하는 것으로 여겨진다. 또한, 레이저 빔의 조사시간이 길수록 열영향부가 증가하므로 조사시간이 긴 경우에 파단하중의 감소가 현저하게 나타나는 것으로 판단된다. 재료가 가열이 되면 폴리머의 분자가 무질서한 상태가 되고 냉각과정 중 재배열에 의해 초기의 분자상태가 흐트러지게 되기 때문에 가열 전 초기의 재료와 기계적 성질이 달라지므로 열영향부의 증가는 파단강도의 감소를 유발할 수 있다⁹⁾. 또한, 접합부의 파단은 파단하중 200N을 기준으로 다른 양상으로 나타났다. 조사된 레이저의 출력이 낮고 조사시간이 짧아 파단하중이 200N미만인 영역에서는 전단인장시험 중 접합된 면이 분리가 되었다. 그러나 파단하중이 200N 이상인 조건에서는 접합부 근처에서 흡수성 재료의 파단이 일어났다. 이러한 현상은 레이저의 출력이 낮고 조사시간이 긴 경우 접합력은 높아지나 접합이 이루어지지 않은 부분의 기계적 성질이 변화되어 일어나는 현상으로 판단된다.

4. 간극이 있는 경우의 접합

4.1 실험 방법

간극을 두고 실험을 하지 않았을 때의 접합 단면은 Fig. 6과 같다. 하단부의 팽창으로 인한 용기 현상과 수증기의 발생으로 인하여 구멍이 형성됨을 알 수가 있다¹⁰⁾. 이러한 문제점을 줄이기 위하여 Fig. 7과 같은 형태로 투과성 재료와 흡수성 재료의 사이에 레이저 빔

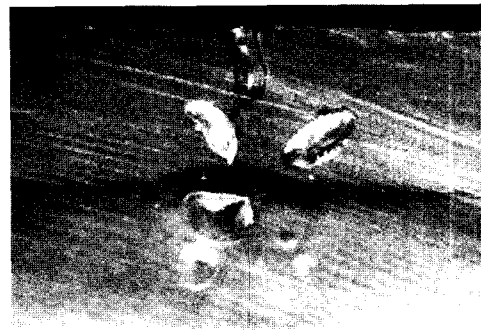


Fig. 6 Cross section of joints without gap

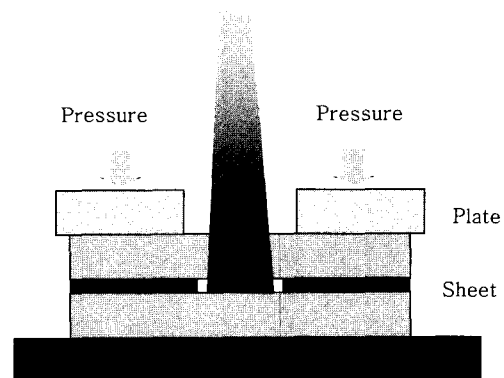


Fig. 7 Schematic of experiments considering gap sizes

이 조사되는 부분의 가장자리에 얇은 판을 두고 압력을 가함으로써 간극을 부여한 실험을 하였으며 접합성을 알아보기 위하여 전단 인장시험을 통하여 접합강도를 측정하였다. 이러한 실험을 통해 용융된 폴리머가 간극을 통해 퍼져나감으로써 접합면적의 증가를 예상할 수가 있으며 간극을 통해 수증기를 제거할 목적으로 이러한 실험은 효과적이라고 여겨진다. 두 재료 사이에 끼여 넣은 판의 두께는 80 μ m 이다.

4.2 실험 결과

간극을 두고 실험을 한 재료의 단면의 모습은 Fig. 8과 같다. 간극을 두지 않았을 때에 비하여 구멍의 형성이 현저히 줄어드는 것을 알 수가 있고, 간극을 통해 용융된 폴리머가 퍼져나간 것을 알 수가 있다. 레이저의 조사 시 흡수성 재료의 가열로 재료 내에서 발생된 수증기는 간극을 통해 빠져 나감으로 인해 구멍이 형성되지 않는 것으로 여겨진다. 그리고 흡수성재료의 용기 현상보다는 재료의 고체 상태에서 액체 상태로의 상변태로 인해 간극을 통한 모세관 현상과 스퀴즈(squeeze) 유동 현상에 의해 재료의 접합 면적이 점점 넓어지고 평탄한 접합면을 이루는 것으로 여겨진다.

이렇게 접합된 시편을 가지고 전단 인장시험을 수행

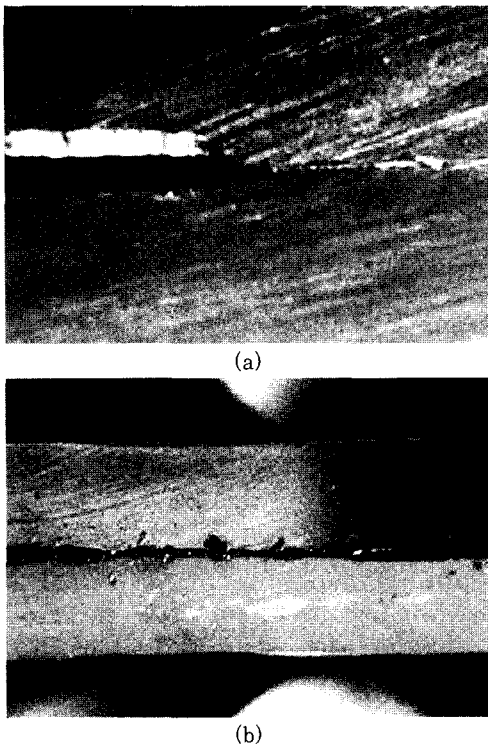


Fig. 8 Total cross section and magnified cross section with gap size of 80um

하였으며 Fig. 9에 그 결과를 제시하였다. 시편의 크기와 규격은 앞서 간극을 고려하지 않은 실험과 같은 형태를 취하였다. 처음 예상했던 접합면적의 증가로 인한 강도의 증가 현상은 일어나지 않았으며, 오히려 간극을 두지 않고 실험하였을 때보다 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 간극이 있기 때문에 투과성 재료와 흡수성 재료가 접촉을 이룰 시 부여되는 압력이 작아지므로 접합강도에 있어서 감소를 보이는 것으로 여겨진다.

점용접 실험결과에서 볼 때에 접합강도의 측면에서는 접합될 시편 사이의 간극이 없는 경우가 더 우수하지만, 간극이 없는 경우에는 기포의 발생으로 인해 기밀

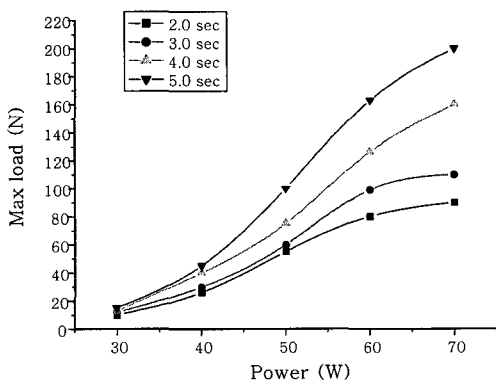


Fig. 9 Fracture load for various welding times : spot welding (gap size : 80 μ m)

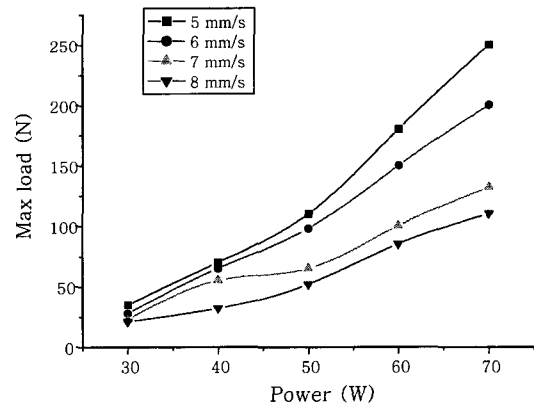


Fig. 10 Fracture load for various scanning : seam welding (gap size: 80 μ m)

성에 문제가 발생할 수 있다. 심 용접의 경우 기밀성을 요하는 경우에 적용되는 경우에 활용도가 높으므로 간극이 있는 경우에 대해서 용접을 수행하고 파단강도를 측정하였다. 공정변수로는 레이저의 출력과 레이저 빔의 이송속도(scanning velocity, mm/s)를 선정하였다. Fig. 10은 파단강도의 측정결과이다. 출력의 증가와 더불어 레이저 빔의 이송속도가 느릴수록 파단강도가 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과를 놓고 보았을 때 적절한 접합변수로는 70W의 레이저 출력과 5mm/s의 이송속도라는 것을 판단 할 수 있다. 레이저 출력, 이송속도 이외에도 재료를 눌러주는 압력과 투과성 재료와 흡수성 재료사이의 간극도 주요한 변수로 판단되며, 간극과 압력의 최적화를 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 주어진 재료의 광학적 성질을 측정하고 이를 바탕으로 레이저 투과접합방식에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 레이저 투과접합방식의 접합성을 판단하기 위하여 점용접을 수행하고 접합부의 파단강도를 측정하다. 레이저 출력과 조사 시간을 공정변수로 선택하여 실험을 수행하였으며, 두 재료 사이에 간극이 있는 경우와 없는 경우에 대한 실험을 수행하여 간극의 영향이 접합부에 미치는 영향을 비교하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 레이저 출력과 조사 시간을 공정변수로 선택하여 실험을 수행하여, 적절한 강도를 보이는 영역을 찾을 수가 있었다. 이러한 결과를 이용하여 아크릴수지 재료의 적절한 접합 변수들의 범위를 가늠할 수 있을 것이다.

(2) 시편 사이에 간극이 없는 경우 접합면에서 구멍이 발생하는 것이 확인되었다. 이는 완전밀봉이 요구되는 구조물의 접합에서 문제를 일으킬 수 있다.

(3) 시편 사이에 간극이 있는 경우에는 접합면에서 구멍이 발생되지 않았으나 접합강도는 간극이 없는 경우에 비해서 약 80%의 약한 접합강도를 보였다. 그러므로 큰 부하가 걸리는 대형 구조물에서의 이용보다는 완전밀봉을 요구하는 소형구조물의 접합에 있어서 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. J. Ian : Laser Welding for Plastic Component, Assembly Automation, **22-2** (2002), 129-135
2. J. -H. Kim, K. -H. Shin : Analysis of Transmission Infrared Laser Bonding for Polymer Micro Devices, Journal of KWS, **23-5** (2005), 463-468
3. B. Bryan : High Power Laser Transmission Welding of Plastics, Assembly Automation, **20-2** (2000), 136-139
4. O. Karger, G. Fiegler : Laser and Microwave Welding- The Applicability of New Process Principles, Macromolecular Materials and Engineering, **7-8** (2002) 734-744
5. M. Kalpana : Plastics Welding Technology for Industry, Assembly Automation, **17-3** (1997), 236- 47
6. E. Hecht : Hecht Optics, Addison Wesley (1997) 213-214
7. H. Potente : A Step Towards Understanding the Heating Phase of Laser Transmission Welding in Polymers, Polymer Engineering and Science, **42-2** (2002), 123-135
8. R. Grimm : Infrared Welding of Polymers, Polymer Engineering and Science, **20-3** (2000), 236-243
9. D. William : Materials Science and Engineering An Introduction, Wiley (2002) Fifth Edition
10. H. Potente, F. Becker, G. Fiegler, J. Korte : Investigations towards Application of a New Technique on Laser Transmission Welding, Welding in the World, **45** (2001), 15-20