

열가소성 플라스틱의 레이저 투과 접합에 관한 연구

서명희[#], 류광현*, 남기중*

Study on the laser transmission-welding of thermoplastics

Myung-hee Seo[#], Kwang-hyun Ryu* and Gi-jung Nam*

ABSTRACT

Laser welding of thermoplastics is a new jointing technique with a host of advantages. It is not only another extremely useful welding method but also a cost-effective alternative to traditional techniques involving screws or adhesives. Transmission laser-welding of thermoplastics such as polycarbonate(PC), polypropylene(PP), polyvinyl chloride(PVC), low density polyethylene(LDPE) and acrylic using a high power diode laser has been studied experimentally. The optical transmission of each plastic has been measured at laser wavelength of 808nm. The weld process has been characterized by the specific energy and weld time required for each plastic. The characteristics of laser welding between same plastics have also been analyzed.

Key Words: Laser plastic welding(레이저 플라스틱 용접), High power diode laser(고출력 다이오드 레이저), Laser transmission welding(레이저 투과 용접), Thermoplastic(열가소성 플라스틱)

1. 서론

최근 고출력 다이오드 레이저 기술의 발전은 기존의 다이오드 레이저가 광통신, 분광학 등에서 응용되는 기술에서 레이저 재료 가공 분야로 확대되는 추세에 있다. 고출력 다이오드 레이저는 기존의 재료 가공에 사용되는 CO₂ 레이저 및 Nd:YAG 레이저에 비하여 에너지 전환 효율이 우수하고 운용비가 저렴하며, 장치의 소형화가

가능하여 향후 다양한 산업 분야에 대한 적용이 기대되고 있다. 특히 고출력 다이오드 레이저의 응용 기술 중 플라스틱-플라스틱 용접¹⁻³, 플라스틱-유리 용접⁴, 플라스틱-금속 및 비금속 용접⁵은 최근 디스플레이 및 전자/반도체 정밀 패키징, 바이오 디바이스 제작 등에 활용될 수 있어 매우 주목을 받고 있다. 특히 최근 개발된 레이저 플라스틱 투과 접합(Laser Plastics Transmission Welding)은 친환경적이며 용접 품질이 매우 우수하고 용접이 어려운 형태의 조에서도

접수일: 2004년 3월 3일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

[#] 고등기술연구원 레이저조정밀공정팀

E-mail sign0924@naver.com Tel. (031) 330-7579

* 고등기술연구원 레이저조정밀공정팀

정밀 용접이 가능하여 산업적으로 그 활용이 기대되고 있다.

열가소성 플라스틱은 전자, 반도체, 디스플레이 분야에서 매우 다양하게 사용되는 플라스틱으로서 레이저 투과 용접을 할 수 있는 적합한 재료이다. 열가소성 플라스틱은 파장에 따라 광학적 특성이 매우 다르기 때문에 본 연구에서는 사용된 고출력 다이오드 레이저(파장 808 nm)에 대한 각 재료의 광학적 특성을 측정하였다. 사용된 플라스틱 재료는 Polycarbonate(PC), Polypropylene(PP), Low density polyethylene(LDPE), Polyvinyl chloride(PVC), 아크릴(Acrylic)이고 두께는 약 0.5~1.3 mm 이다. 플라스틱 용접의 가공변수로서 레이저 출력 밀도, 조사 시간에 따른 용접 특성을 알아보았다.

2. 기술적 배경

레이저를 이용한 플라스틱 투과 접합 기술은 기존의 접착제를 이용한 접합을 대체하는 기술이다. 레이저를 이용한 플라스틱 접합 기술은 레이저 빔을 재료에 조사하여 플라스틱 표면에서 레이저 광 에너지 흡수에 의해서 접합되는 것이다. 가장 이상적인 레이저 접합은 Fig.1 과 같이 재료 중 하나는 레이저 파장에 투과성이 우수하고 다른 하나는 흡수성이 강한 재료의 접합이다. 재료에 수직으로 빔이 입사되면 상단의 투과성이 좋은 플라스틱은 빔이 투과하고 하단의 흡수 플라스틱에 도달하여 표면에서 흡수가 일어나 순간적으로 온도가 증가하여 표면을 녹이게 되고 녹은 플라스틱에 의해서 두 플라스틱이 결합되는 원리이다. 이러한 접합기술은 플라스틱-플라스틱, 플라스틱-유리, 플라스틱-금속 접합에 응용될 수 있는데 본 연구에서는 플라스틱-플라스틱 접합에 관하여 연구하였다

레이저를 이용한 플라스틱 접합에서는 접합표면의 표면온도와 재료의 용점이 매우 중요하며 플라스틱이 낮은 용점을 가진 경우에 접합이 잘 일어난다. 따라서 플라스틱의 레이저에 대한 흡수율과 투과율, 열의 표면 전도율이 필요하며 좋은 접합 품질을 위해서는 적절한 압력 또한 요구된다.

고출력 레이저를 이용한 플라스틱 필름 접합 방법은 비슷한 재질의 재료일 때와 다른 재질의 재료일 때 중요한 차이를 보인다. 비슷한 재질의 플라스틱의 경우는 흡수 플라스틱 표면의 온도가

상승하여 상/하단의 플라스틱이 서로 녹으면서 접합이 일어나지만 다른 재질의 플라스틱의 경우 흡수 플라스틱이 열에 의해 녹으면서 상단의 플라스틱 접촉면까지 녹여 접합이 일어난다

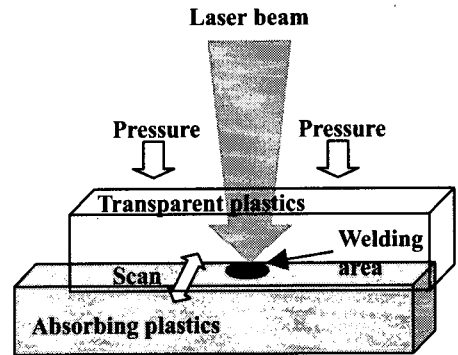


Fig. 1 The principle of laser transmission welding

레이저를 이용한 플라스틱 접합 방법은 가능한 많은 열에너지가 있어야 한다. 그러므로 레이저의 광 에너지를 보다 많이 열 에너지로 변환시키는 일이 중요하다. 그렇기 때문에 플라스틱이 레이저에 대해 흡수율이 좋아야 한다. 이렇게 광 에너지에서 열 에너지로 변환된 에너지는 열 전달에 의해 접합표면을 활성화시키면서 플라스틱이 접합된다.

3. 실험

3.1 실험 장치

본 연구에서는 고출력 다이오드 레이저를 이용한 플라스틱 접합을 수행하였다. 플라스틱 접합 공정 실험 장치는 Fig.2 와 같다. 하단에는 상하로 높이가 조절되는 스테이지가 있고, 스테이지 위에는 압력 클램프가 있다. 이 압력 클램프에는 808 nm 파장에 대한 투과율이 높은 창이 있어 레이저가 에너지 손실 없이 통과할 수 있도록 되어있다. 투과창 위에는 레이저의 조사시간을 조절할 수 있는 셔터 카운터가 있으며 레이저는 파이버를 통해 샘플에 수직으로 입사된다. 압력은 조절할 수 있게 설치되어 있고 압력 센서를 이용하여 MPa 단위로 측정된다.

스테이지 위에 접합하기 위한 플라스틱 재료

를 놓고 압력 클램프를 이용하여 압력을 주면 빔 전달 파이버를 통하여 나온 레이저가 렌즈를 지나 투과창을 통과하여 접합 플라스틱 표면에 일정한 직경으로 맺힌다. 빔 직경은 렌즈의 초점거리를 이용하여 가변 할 수 있다. 투과 창을 통과한 빔은 상단의 플라스틱에서 거의 흡수 없이 통과하고 하단의 플라스틱 표면에서 빔을 흡수하게 된다. 흡수된 빔에 의해 열이 발생하면서 접합 표면이 녹게 되고 접합이 된다. 본 연구에서는 코히런트사의 고풍력 다이오드 레이저를 사용하였으며 레이저의 파장은 808 nm 이고 최대 출력은 30 W 이다.

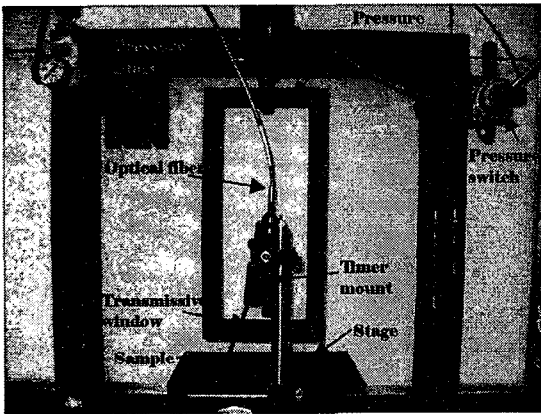


Fig. 2 Experimental set-up for laser plastic welding

3.2 광학적 특성

본 연구에서 사용된 각 플라스틱의 물리적 특성을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Material property

	Melting temp. (°C)	Tensile strength (Mpa)	Thermal conductivity (W/mK)
PC	155	62	0.195
LDPE	110	11	0.33
PP	164	48	0.117
Acrylic	266	54	0.19
PVC	182	48	0.16

3.2.1 광학적 투과 특성

열가소성 플라스틱의 레이저를 이용한 접합⁶을 하기 위해서는 재료에 대한 광학적 특성을 알아야

한다. 접합 하기 위한 플라스틱 중 어떠한 것을 투과체로 혹은 흡수체로 사용할 수 있는지를 조사하기 위하여 투과 실험이 필요하다. 그렇기 때문에 각 플라스틱 재료에 대해서 808 nm 파장에 대해서 투과 특성을 측정하였으며 또한 각 재료의 두께나 색에 대해서도 투과 특성을 측정하였다. 열가소성 플라스틱의 두께는 사용 용도에 따라 다양하지만 본 실험에서는 0.5~1.3 mm 두께의 재료를 사용하였다. 레이저의 출력은 1~30 W/cm²의 범위에서 실험하였다.

본 실험에 사용된 플라스틱은 PC, LDPE, PP, Acrylic, PVC 이며, 이 가운데 색이 다양한 PP에 대해서 색에 따른 투과 특성을 조사하였다. 두께 별 특성 실험은 PVC 를 사용하여 두께 0.15~1 mm 사이의 재료로 측정하였다.

Fig.3 은 각각의 플라스틱 재료에 대한 투과 특성을 나타낸다. 플라스틱 중 비교적 투명한 재질의 Acrylic, PC, PVC 에 대해서는 90%이상의 높은 투과율을 나타내었다. PC 에 약간의 흑색이 첨가된 흑투명의 PC 는 흑색으로 인해 투과율이 떨어지는 것을 알 수 있다. 플라스틱에 대한 투과 특성 결과 808 nm 파장에 대해서는 투명한 플라스틱에 대해서는 높은 투과 특성을 보이면서 불투명할수록 투과율이 떨어짐을 알 수 있다. PP 플라스틱의 경우는 투명하지 않기 때문에 가장 낮은 투과율을 나타내었으며 Acrylic, PC, PVC 경우도 색이 첨가되어 투명도가 떨어지게 되면 투과율이 떨어지게 된다.

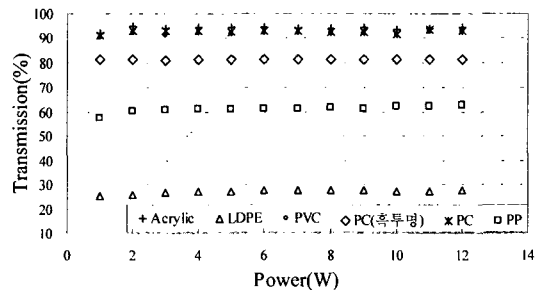


Fig. 3 Transmission of thermoplastic materials

Fig.4 는 PP 의 색에 대한 투과 특성 결과를 나타낸다. 전체적으로 PP 은 10% 미만의 낮은 투과율을 갖고 있다. 본 실험에 사용된 레이저의 파장

이 808 nm이기 때문에 붉은색의 PP 이 그 중에서 가장 높은 투과율을 나타내며 상대적으로 녹색은 거의 투과하지 못하였다.

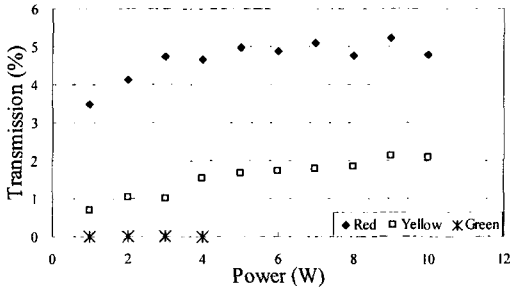


Fig. 4 Transmission of polypropylene with color

Fig. 5 는 플라스틱의 두께에 대한 투과 특성을 조사한 결과이다. 두께가 일정하게 증가할수록 투과율이 일정하게 감소함을 알 수 있다. 두께가 증가하면 레이저 투과율은 감소되면서 흡수되는 에너지의 양은 증가하면서 열 발생이 많이 일어나게 된다.

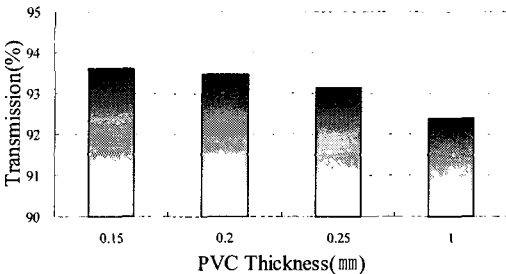


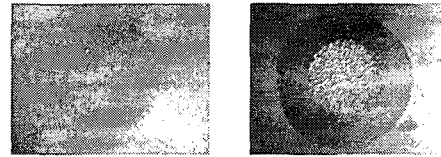
Fig. 5 Transmission of PVC with thickness

광학적 투과 특성 결과로 레이저를 이용한 플라스틱 접합에서는 투과율이 높은 투명한 플라스틱은 투과체로 사용하는 것이 좋으며 상대적으로 투과율이 낮은 불투명이나 색이 첨가된 플라스틱, 두께가 두꺼운 플라스틱은 흡수체로 사용하면 좋은 접합 품질을 얻을 수 있다.

3.2.2 광학적 손상 특성

레이저를 이용한 플라스틱 접합은 레이저의 특성상 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 재료가 손상을 입을 가능성이 있다. 그렇기 때문에

광학적 손상 실험이 필요하다. 레이저의 높은 에너지 밀도에 의해서 단시간에 많은 열을 발생시키기 때문에 접합에 좋은 요인이 되지만 한편으로는 이것이 재질에 물성 변화를 야기할 수도 있다. 플라스틱 접합손상은 일단 시각적으로 변화된 모습을 통하여 차후 플라스틱 접합 시 접착력을 측정하는 테스트 요건으로 삼을 수 있다.



(a) No damage (3 sec) (b) Damage (7 sec)

Fig. 6 Thermal damage of PC/PVC bonding (6 W)

Fig. 6 은 PC(상단)/PVC(하단)를 6 W의 레이저 출력으로 접합할 때 레이저 조사시간 3 초와 7 초의 결과를 비교한 것이다. 플라스틱의 열적 손상이 일어날 때 보통 녹는점에서 처음 열적 손상이 일어나 접합 과정에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 가운데 부분에서 녹아 버블이 용융 부분 내부에 형성되어 있고 출력을 더 높이면 표면이 타버린다.

3.3 접합에 관한 특성

3.3.1 각 재료의 접합 특징

레이저를 이용한 플라스틱 접합에서 레이저 조사시간, 빔 크기, 출력을 이용하여 최적의 접합 공정을 찾았다. 레이저를 이용한 플라스틱 접합 실험은 재료에 압력을 가한 후 레이저의 조사시간을 조절하여 접합 결과를 얻었다. 접합을 마친 후 약 3 초 후에 가해진 압력을 제거하는 것이 분당력을 높이고 손상을 줄이는데 도움이 된다. PC/PC의 경우 흑색이 아닌 흑투명 PC를 흡수체로 접합을 하였더니, 레이저 출력이 10 W를 넘어야 접합이 잘 일어난다. PVC(투명)/PVC(흑색)의 경우, 접합은 잘 되었지만 조사시간이 길어지면 흑색 PVC의 강한 흡수로 인하여 손상이 발생하였다. 따라서 짧은 조사시간으로 용융 면적이 작기 때문에 접합 구간은 짧았다.

PP의 경우에는 색에 따른 접합 정도가 레이저 출력에 따라 다르게 나타나는 특성을 보였다. 하

단의 흡수체로서 흑색 PP 를 사용하고 상단은 색을 변화시켜 실험한 결과, Fig.7(a)에서 보는 바와 같이 녹색의 경우에는 상층의 녹색 플라스틱이 먼저 녹으면서 손상이 일어나는 것에 비하여 Fig.7 (b)처럼 다른 색의 플라스틱은 하단의 흡수플라스틱이 먼저 손상되는 특성을 보여주었다.



Fig. 7 (a) Polypropylene bonding shape by color (Green:upper / Black:bottom)



Fig. 7 (b) Polypropylene bonding shape by color (Red, Blue, Yellow:upper / Black :bottom)

또한 녹색 이외의 다른 색과 흑색 PP 와의 접합은 하층 플라스틱이 녹아 상층까지 녹이면서 접합이 되었으나, 녹색의 경우에는 상층도 동시에 녹아 표면이 다소 침몰하는 경향을 보였다. 서로 다른 재료를 접합할 경우에는 같은 재료간의 접합보다 접합력이 낮아지는데, 이는 동일한 재료의 경우 서로 폴리머가 엉키면서 결합이 되기 쉬운데 반하여 다른 재료나 재질간에는 특성이 달라서 접합력이 떨어진다. PC 와 Acrylic 접합의 경우를 보면 PC 는 흑투명의 재료로 다른 흡수체보다 얇지만 흑색보다 현저하게 접합력이 떨어져 접합에 필요한 레이저 출력이 훨씬 높고 접합 넓이도 작다.

3.3.2 조건에 따른 접합 면적

레이저를 이용한 플라스틱 접합 후 접합 면적에 관하여 조사하였다. 레이저의 직경은 약 5 mm 이고 조사시간을 1~10 초까지 변경하면서 실험을 하였다. 레이저의 출력은 1~30 W 범위에서 가변을 하였다.

Fig.8 은 Acrylic(투명)/Acrylic(흑색) 접합 특성을 보여준다. 하단의 흑색 Acrylic 의 좋은 흡수 특성으로 낮은 출력에서도 접합이 이루어졌고 접합 면적도 조사시간에 따라 표면 손상 없이 일정하게 증가하였다.

Fig.9 는 PP(적색)/PP(흑색) 접합 특성을 보여주는데 Acrylic(투명)/Acrylic(흑색)에 비하여 접합에 필요한 레이저 출력과 접합 면적이 작음을 보여주고 있다. 이것은 PP(흑색)의 흡수 및 열전도도가 Acrylic(흑색)에 비하여 낮은 데서 기인한 것으로 보인다.

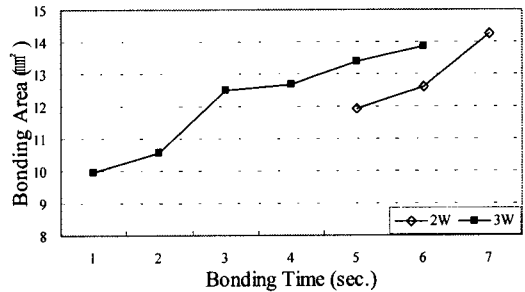


Fig. 8 Bonding area of Acrylic (Transparent/Black)

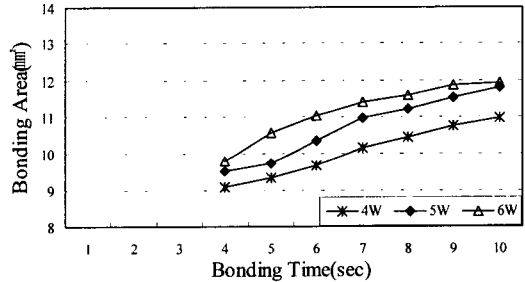


Fig. 9 Bonding area of PP (Red/Black)

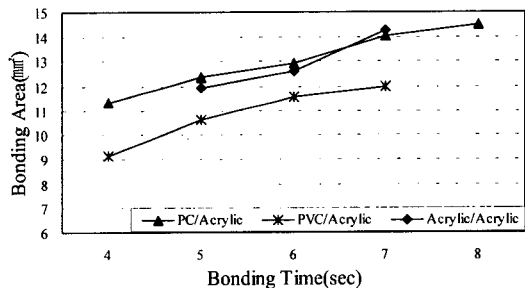


Fig. 10 Bonding area between different transparent plastics and same absorbing plastics

Fig.10 은 흡수체로서 Acrylic(흑색)를 사용하고 투과체로서 PC, PVC, Acrylic 을 사용하였을 때 접합 면적 특성을 보여준다. PC 가 PVC 및 Acrylic

에 비하여 짧은 조사시간에 비하여 접합 면적이 넓은 것은 낮은 용융점(155 °C)과 높은 열전도도에 기인한 것으로 보인다. Acrylic 이 다른 플라스틱보다 높은 레이저 출력에서 접합되는 것은 용융점(266 °C)이 PC 및 PVC(182 °C)보다 높기 때문이다.

3.3.3 동일 재질간의 접합 특성 비교

레이저를 이용하여 플라스틱을 접합할 경우 조사시간에 따라 접합 특성이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Laser bonding property

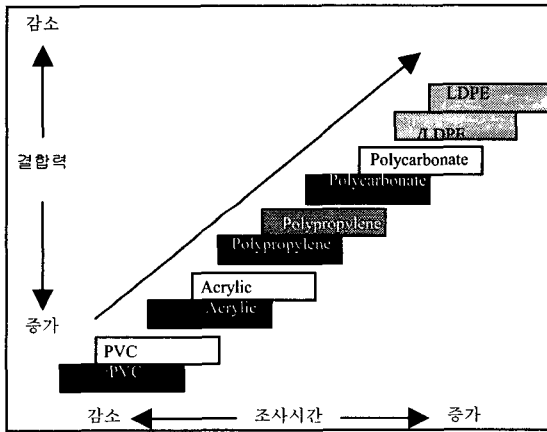


Table 2 는 동일 재질의 플라스틱을 가지고 서로 접합하여 접합 구간별로 순차적으로 나타낸 것인데 어느 플라스틱의 결합이 가장 잘 일어나는지 접합 특성을 보여준다. PP 의 경우, 투명한 플라스틱이 아닌 적색과 흑색을 각각 투과체와 흡수체로 사용하였다. PC 는 Acrylic 이나 PVC 와는 달리 흡수체로 흑색이 아닌 흑투명 플라스틱을 사용하였는데, 접합을 하기 위해 레이저 출력을 높이는 요인이 되었으며, 접합력도 두 재료에 비하여 낮게 나타났다. LDPE 의 경우 흑색과 불투명 플라스틱만을 사용하여 접합 실험을 하였는데 접합력이 매우 약하게 나타났다.

4. 결론

본 연구의 결과 기존의 방식인 접착제를 이용하는 것을 대체하여 레이저를 이용한 플라스틱 투

과 접합 공정이 가능함을 확인하였다.

레이저를 이용한 플라스틱 접합에서는 레이저 출력과 조사시간이 중요한 요소임을 확인하였고, 적절한 압력도 필요하다. Table 3 는 본 연구를 통하여 동일 및 다른 재질간의 플라스틱간 접합 특성을 정리한 결과이다. 접합의 용이성은 이중 플라스틱간의 접합보다 동일 재질간의 접합이 유리하였다.

투과성이 서로 다른 플라스틱의 접합에서는 하단의 표면에서 흡수가 일어나면서 용융점이 낮은 재질의 표면에서 용융이 발생하며 접합이 이루어진다. 용융점이 낮고 열전도도가 우수한 재질이 낮은 출력과 짧은 조사시간에서도 충분한 넓이의 접합이 이루어짐을 확인하였다. PC, PVC, Acrylic 는 서로 특성이 비슷하여 비교적 접합이 잘 일어나고, LDPE, PP 두 재질간에도 접합이 잘 되었다.

레이저 투과 접합 기술이 플라스틱간의 접합에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였고 향후 전자/반도체, 디스플레이등의 산업 분야에서 환경 친화형의 패키징 기술로서 활용될 수 있으리라 본다.

Table 3 Material bonding compatibility

Trans. Absorb.	PC	PP	PVC	Acrylic	LDPE
PC	Yes	No	Yes	Yes	No
PP	No	Yes	No	No	No
PVC	Yes	No	Yes	Yes	No
Acrylic	Yes	No	Yes	Yes	No
LDPE	No	Yes	No	No	Yes

후 기

본 연구는 환경부 차세대 환경 핵심 기술 개발 사업 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Hoult, A.P., "Using Diode Lasers for Welding Thin

- Polymer Films,” Proc. ANTEC 03, Nashville, TN, May 2003.
2. Hoult, A.P., Pelaprat, J.M., Tsui, S.W., White, H., Johnson, A.F., “Bonding Polypropylene and Polypropylene to Metals Using Diode Lasers and Tailored Hot Melt Adhesives,” 7-th Int. Welding Symposium, Kobe, Japan, Nov. 2001.
 3. Hoult, A.P., Burrell, M., “The Effect Diode laser wavelength on the Clearweld Welding Process,” Coherent Inc. Laser applications Center, Gentax Corporation.
 4. Mark Douglass, D., Wu, Chung-Yuan, “Laser Welding of Polyolefin Elastomers to Thermoplastic Polyolefin,” Visteon Corporation, Dearborn, Michigan, USA, LMP Section A 118 of 316.
 5. Nam, G.J., Seo, M.H., Hong, Y.S., Lee, S.U., Moon, S.W., Ryu, K.H., Kwon, N.L., Kwak, N.H., SPIE, Vol. 5662, pp. 319, 2004.
 6. Grimm, Robert A., “Welding processes for plastics,” Advanced materials and processes, Vol. 147, 1995.