

## 차량경량화를 위한 듀얼 레이저 에너지 플라스틱 접합의 응용

한 상 배\* · 최 해 운\*\*,†

\*유로비전(주)

\*\*계명대학교 기계자동차공학과

### Dual Laser Beam Joining Process for Polymers in Automotive Applications to Reduce Weights

Sang Bae Han\* and Hae Woon Choi\*\*,†

\*Eurovision Co., LTD. Kunpo 435-833, Korea

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

†Corresponding author : hwchoi@kmu.ac.kr

(Received August 6, 2013 ; Revised August 15, 2013 ; Accepted August 16, 2013)

#### Abstract

Laser heat source was used for automotive interior and exterior parts to reduce weights. Typically, 900's nm wavelength of laser has been widely used for polymer joining, however, the transmittance of the laser beam thorough clear polymers such as PMMA or PC has been an issue to overcome. To solve this issue, 1,940nm laser was applied on the clear polymer for the better absorption and 900nm laser beam was used for main laser for the joining. Conventional Gaussian or Elliptical heat source approximation has limitation in polymer which had deeper skin depth where major laser beam absorbs. To accurately simulate the physical laser beam absorption and joining optical properties were experimentally measured for the computer FEM simulation. The simulation results showed close correlation between theoretical and experimental results. The developed laser process is expected to increase productivity and gap closing which can cause failure of joining in laser material processing.

Key Words : Laser process, Polymer joining, Skin depth, PMMA, ABS, Dual laser

#### 1. 서 론

고밀도 에너지 열원의 대표적인 레이저는 높은 신뢰도와 취급의 용이성 때문에 전자산업은 물론 자동차산업, 중공업, 전기, 반도체산업 등 산업 전반에서 그 쓰임이 증가하고 있다<sup>1)</sup>. 레이저 열원의 가장 큰 장점인 공구와 공작물의 비접촉성은 반복정밀도를 향상 시키고, 공구소모에 의한 막대한 생산비용을 절감할 수 있는 장점이 있다<sup>1-3)</sup>.

레이저장비의 신뢰도와 정밀도도 괄목할만한 성장을 이루어 최근에 많이 사용되고 있는 파이버레이저는 기존의 레이저와는 달리 높은 빔 품질을 유지하면서도 장치도 콤팩트하게 구성을 할 수 있어서 그 활용도가 점점 더 증가하고 있다<sup>2)</sup>. 레이저는 고밀도 에너지의 장점뿐

만 아니라 타 시스템과도 높은 융합성을 보이고 있으며, 온라인 가공기술도 구현할 수 있고 기존의 CNC 공작기계와의 융합에 대한 연구도 많이 진행되고 있다<sup>4-5)</sup>.

컴팩트한 레이저의 출발은 반도체를 기반으로 한 다이오드 레이저이며, 일상용 레이저 빔포인터에서부터 레이저프린터 그리고 고출력 다이오드레이저를 이용한 재료 가공 분야로 확대 되고 있다<sup>6-7)</sup>. 재료가공에 사용되는 고출력 다이오드레이저는 기존의 기체 및 고체 레이저에 비해서 운용비가 상대적으로 저렴하며 장치의 소형화가 가능하여 산업 분야에 대한 적용이 증가되고 있다<sup>4)</sup>.

최근 선진국의 이산화탄소규제로 인해서 신재생에너지 개발과 함께 차량경량화에 대한 연구가 급증하고 있다. 이러한 차량경량화를 위해서는 기존 금속재료의 한

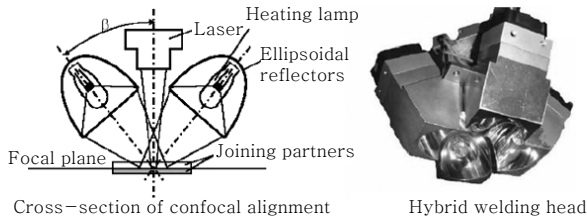


Fig. 1 Hybrid welding<sup>12)</sup>

계에서 벗어나 고강도 플라스틱을 이용한 소재개발이 절실히 요구되고 있다. 플라스틱은 금속소재에 비해서 상대적으로 강도가 낮은 점이 있지만, 소재의 경량화를 이룰 수 있고, 복잡한 형상을 상대적으로 쉽게 제작할 수 있는 장점이 있다.

하지만, 차량용 전조등이나 계기판 등과 같은 특수한 용도의 부품인 경우 단일 플라스틱재질로서는 구현하지 못하는 복합플라스틱에 대한 필요성 (투명성 및 강도)이 요구된다. 이러한 부품의 경우 고출력 다이오드 레이저를 이용하여서 레이저 플라스틱 투과 용접을 사용하는데, 접착제 등을 사용하지 않고 순수한 고에너지만 사용하는 형태이므로 친환경적이며 용접 품질이 매우 우수하다<sup>7-8)</sup>.

하지만 레이저 용접시 투과부와 흡수부는 공기 갭이 없어야 흡수부에서 발생한 열에너지가 투과부에 전도 (Conduction)에 의해서 충분히 전달되는데, 일반적으로 사출 성형시 발생하는 소재의 갭으로 인해서 접합 불량률이 많이 발생하고 있다. 이러한 해결책의 하나로 고출력의 가열장치인 할로겐 램프를 통해서 플라스틱에 인위적인 변형을 가하고 가압하여서 소재간의 갭을 최소화 하기도 한다. 이러한 가압의 경우는 소재의 변형으로 인해서 외관형상의 불량 및 이송속도 감소의 원인이 되기도 한다.

본 논문은 서로 다른 광학적 특성을 가지는 플라스틱을 투과용접을 수행할 때 고려해야할 광학 및 기계적 특성을 고찰하고, 컴퓨터시뮬레이션시 열원이 이러한 광학적 특성을 잘 반영할 수 있도록 고려해야할 기법 등을 중심으로 연구결과를 소개하고자 한다.

## 2. 실험의 방법

### 2.1 실험 장치 셋업

#### 2.1.1 실험 소재 및 장치

본 연구에 사용한 레이저투과용접은 레이저빔이 투과성이 우수한 플라스틱 (PMMA)를 통과하여 흡수성이 우수한 플라스틱(ABS)의 표면에 도달하면서 흡수된 열이 전도에 의해 두 플라스틱이 용융되어 접합되는 용접

Table 1 Optical characteristics of polymers

Description	Material	Thickness	Color	Transmission (980nm)	Transmission (1940nm)
Transmission Part	pc	3.2mm	Clear	90-92%	72-80%
Transmission Part	PMMA	3.2mm	Clear	72-80%	51-60%
Absorption Part	ABS	3.2mm	Gray	-	-
Absorption Part	ABS	3.2mm	Black	-	-

방법이다<sup>9-10)</sup>. 본 공정에서는 플라스틱의 광학적 특성과 함께 극성에 대한 친화성이 매우 중요하며, 재료는 주로 열가소성수지가 많이 사용된다. 또한 접합되는 두 소재는 서로 극성이 같아야 하고 비슷한 용융온도범위의 소재를 선정하여야 한다<sup>6-7)</sup>. Table 1에는 일반적으로 많이 사용하고 있는 소재 및 본 연구에 사용된 소재의 광학특성치가 정리 되어 있다.

실험에 사용된 다이오드 레이저는 980nm와 1940nm의 서로 다른 2개의 파장을 사용하였으며, 레이저는 미국 nLight사의 980nm파장영역의 레이저와 독일 Dilas사의 1940nm파장의 레이저를 동시에 사용하였다(Fig. 2a).

시편은, 서로 다른 종류의 2가지 시편을 각각 상부층과 하부층으로 사용하였으며 상부층으로는 3mm두께의 투명한 PMMA시편을 사용하고 하부층으로는 3mm두께의 회색ABS시편을 사용하여 각각 10mm 크기와

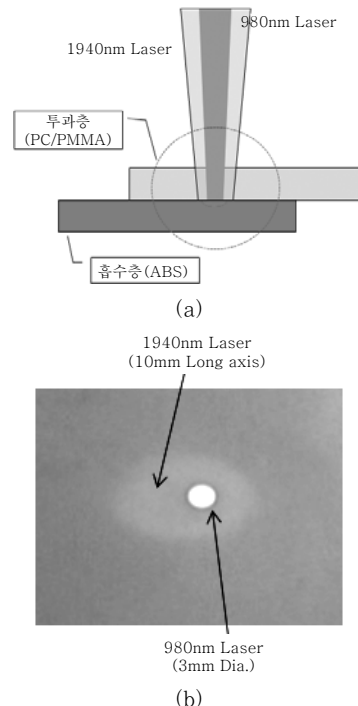


Fig. 2 Concept of dual laser (a) Laser beam absorption on PMMA and ABS (b) Dual laser

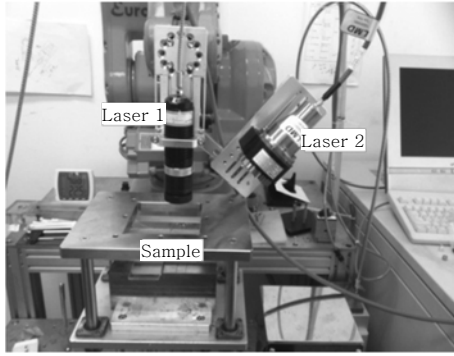


Fig. 3 System setup

3mm 크기의 레이저 빔을 조사 하였다(Fig. 2b).

광학적 특성을 알아보기 위하여, 상용으로 양산되는 자동차 헤드램프와 리어램프의 렌즈재질로 사용되는 PC와 PMMA의 투과율을 측정하였다. 실험의 방법은 레이저파장을 단일파장과 듀얼파장으로 나누어서 각각의 실험을 진행하였으며, 공정변수로는 레이저출력, 이송속도를 주 변수로 가변하면서 실험을 진행하였다.

고에너지 레이저빔의 이송은 ABB사의 6축 다관절로봇 IRB16을 이용하였다. 레이저빔 조사에 따른 소재의 온도변화는 미국 Palmer-Wahl사의 적외선카메라인 Thermal Imaging camera A50을 사용하여 모니터링 하였다. 또한, 실험결과를 이론적 검증 및 컴퓨터시뮬레이션으로 해석하기 위해서 다중물리해석 툴인 COMSOL™ Multiphysics가 사용되었다.

2.1.2 투과율 측정결과

소재의 광학적 특성을 알아보기 위해서 1,900nm영역의 파장을 PC, PMMA와 같은 비정질 플라스틱에 조사하였고, 이때 레이저빔의 투과 및 흡수되는 양을 알아보았다. 실험 결과 투과체로 사용된 3mm 시편(PMMA)의 평균 투과율은 51%로 측정되었다.

이를 통해서 재료내부의 흡수 및 산란 그리고 표면의 반사도의 합은 49%가 되는 것을 알 수가 있었다. 재료의 광학적특성인 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>11)</sup>.

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

(n: polymer의 굴절지수, m: air의 굴절지수)

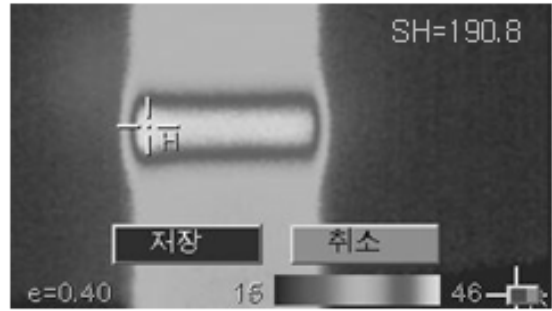


Fig. 4 Temperature measurement by IR camera

여기서 PMMA의 경우 표면의 상태나 제조사별 조성의 차이로 인해서 변하므로 1.4~1.6라고 가정을 하고, 공기의 굴절지수 m은 1이라고 가정을 하면, 반사율은 2.8~5.3%이 되는 것을 알 수가 있다. 이러한 소재의 투과율과 반사율을 이용하여 PMMA의 흡수율을 계산할 수 있다.

2.2 플라스틱 접합 실험

장치를 셋업한 후 1,940 nm영역의 단일파장만을 이용하여 10 ~ 20 mm/sec의 속도로 시편을 용접했을 때 우수한 강도를 얻기 위해서 요구되는 레이저출력은 약 30 ~ 70W 범위인 것으로 파악이 되었다.

또한 980nm파장의 레이저와 1,940nm파장의 레이저를 동시에 사용하도록 장치를 셋업 후에 980nm파장의 출력은 고정한 후 1,940nm 파장을 가지는 레이저의 출력만을 변화시키면서 PMMA시편의 표면온도변화를 측정하였다. 이때 1,940nm파장의 레이저출력이 증가할수록 상층부로 사용되는 PMMA시편의 온도가 상승되었으며, 전체적인 용접속도도 향상되는 것으로 조사되었다.

3. 실험의 결과 및 컴퓨터 시뮬레이션

일반적으로 고에너지열원을 이용한 열전달해석에서 에너지소스 표현은 Gaussian 형태의 열원으로 가정을 하고, Shape Factor를 사용하여 고에너지빔의 형태를 실제 실험결과와 근접하게 해석을 수행 한다. 좀 더 현실적인 방법으로 원형의 Gaussian이 아니라 타원형(Elliptical heat source)으로 가정하기도 한다. 이러한 고에너지 표현식은 표면 가열(Surface heating)에는 적합하나, 표면의 얇은 부분까지 시뮬레이션 해야 할 경우에는 3차원 타원형태(Double Elliptical heat source)를 사용하기도 한다.

하지만, 플라스틱의 경우는 열원의 소입깊이(Penetra-

tion)가 깊기 때문에 2D 또는 3D 형태의 열원으로 해석하기에 한계가 있다. 본 연구에서는 두 가지 종류의 재료를 사용하였는데, ABS의 경우 표면의 얇은 층에서 대부분의 열원흡수가 일어나는 반면, PMMA는 3mm 전 두께에서 일어나고, 일부는 투과되는 것을 실험결과 (Table 1)에서 알 수가 있었다. 이러한 플라스틱만의 특수한 흡수현상을 시뮬레이션을 하기 위해서 식 (2)에서 제시된 바와 같이 표면 흡수층 두께를 변화시켜서 실제 레이저빔 흡수상황을 시뮬레이션 하였다<sup>11)</sup>.

$$Q(x, y, z) = Q_0(1 - R_c) \frac{1}{\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]} \cdot e^{-A_c z} \quad (2)$$

여기서,  $Q_0$ 는 열원의 침투출력,  $x, y, z$ 는 공간좌표,  $R_c$ 는 표면반사도,  $\sigma_x, \sigma_y$ 는  $x$  및  $y$  방향의 빔 반경, 그리고  $A_c$ 는 표면 흡수층 두께 이다.

일반적으로 플라스틱의 표면 흡수층은 표면의 상태나 제조사의 미소한 성분차이로 인해서 차이가 나지만, 표면 흡수층 두께의 원래의 의미인 미소두께의 범위를 벗어나 전 범위로 투과되기 때문에 플라스틱에서의 표면 흡수층 두께는 의미가 없다. 따라서 본 연구에서 사용된  $A_c$ 는 표면 흡수층 두께의 의미보다는 투과 및 흡수

도 반영을 위한 시뮬레이션 변수로 보는 것이 합당하다. 표면에서의 열원분포는 열원분포식에서  $\sigma_x, \sigma_y$  변수를 통해서 표현 할 수 있다.

기술된 내용을 바탕으로 레이저 광원과 광학적물성치를 반영하여서 COMSOL™ Multiphysics 4.2a RF module을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 PMMA의 투과도를 측정하고 이에 맞게 시뮬레이션 변수  $Az$  값을 설정하였고, 이에 대한 결과가 Fig. 5a에 기술되어 있다.

예측된 바와 같이 레이저빔은 두께의 전범위를 통해서 투과 및 흡수가 이루어지는 것을 확인할 수 있었고, 시간이 0.4 sec 가 지난 후 중간부의 온도분포에서 실제 열화상카메라에서 나타난 온도분포와 유사함을 알 수가 있었다 (Fig. 5b). 동일한 수행방법으로 반투명 ABS수지에 열원을 조사하였고, 이에 대한 레이저빔 흡수현상 (온도분포)이 Fig. 5c에 도시되었다. 이를 토대로 상부 PMMA와 하부ABS를 겹친 후 시뮬레이션을 수행하였으며, 이에 대한 결과가 Fig. 5d에 도시되었다.

이러한 시뮬레이션 기법을 이용하여서 시뮬레이션을 한 결과가 Fig. 6에 도시되어 있다. 이러한 시뮬레이션 결과는 실제 접합시 나타나는 온도분포와 비교적 잘 일치하며, 정량적결과도출을 위해서 추가적으로 시뮬레이

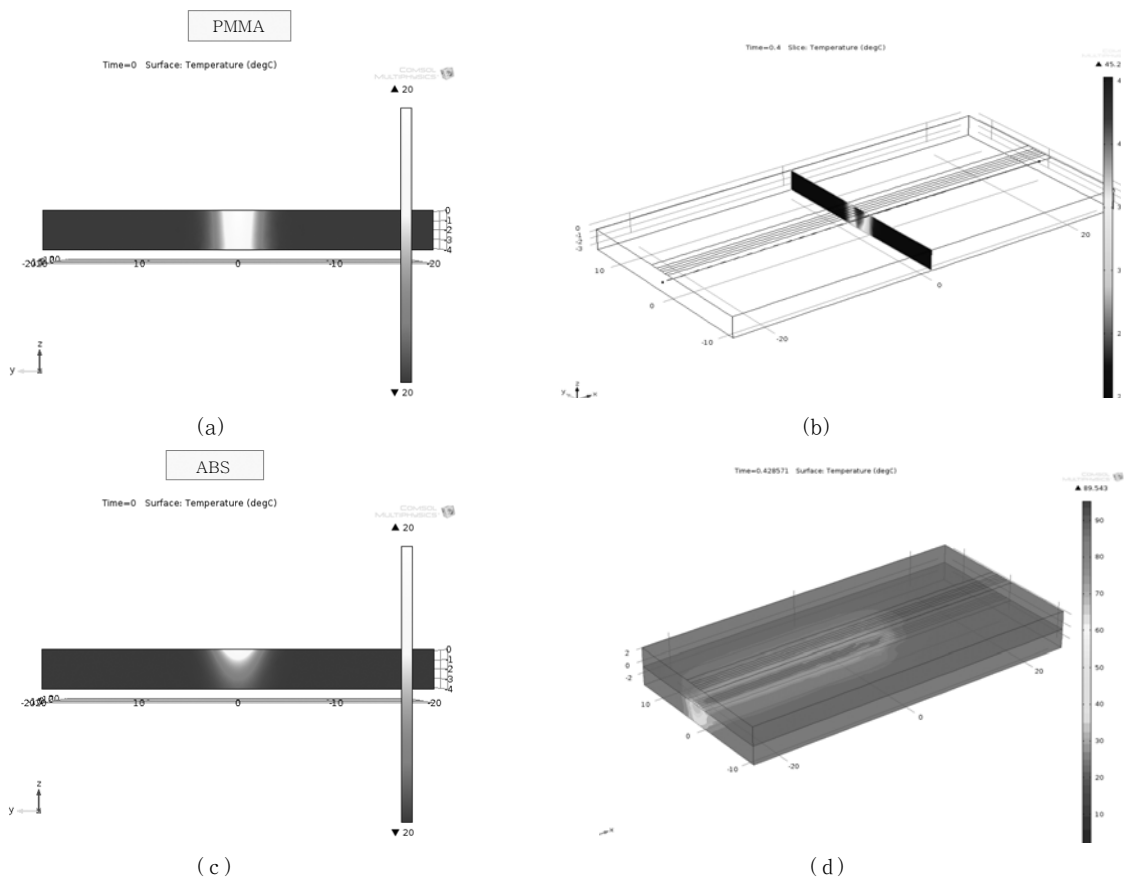


Fig. 5 Laser beam absorption in (a) PMMA, t=0, (b) PMMA, t=0.4s (c) in ABS (d) PMMA+ABS

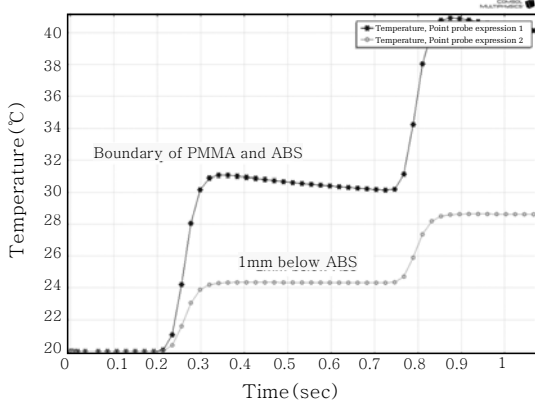


Fig. 6 Temperature distribution by laser welding

선 및 실험을 진행 중에 있다.

시뮬레이션의 최대장점은 실제 접합시 발생하는 온도 분포를 다양한 영역에서 모니터링 할 수 있는데, Fig. 6에 나타난 예시는 PMMA와 ABS 접합부의 온도와, 접합부 1mm 하부의 온도를 추적한 결과이다.

#### 4. 결 론

레이저를 이용한 플라스틱의 접합공법에는 일반적으로 900nm파장 영역의 반도체레이저가 주로 사용된다. 그러나 900nm영역의 파장은 투명한 재질의 비정질계열의 플라스틱에는 과도한 투과가 일어남으로 플라스틱 접합시 아무리 높은 레이저출력이 조사되더라도 흡수하는 에너지가 거의 없어 온도가 상승되지 않는다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 1940nm영역의 파장을 가시광 영역에서 투명재질인 PC나 PMMA 등에 조사하면 레이저빔의 흡수율이 높아 재료의 온도를 상승시켜 주는 역할을 하여 사출변형에 따른 갭의 보상, 품질산포 최소화, 접합강도향상, 잔류응력제거를 위한 어닐링 효과 등을 기대 할 수 있다.

본 연구에서는 1,940nm영역의 파장을 가지는 레이저를 조사하였을 때 비정질계열의 투명PMMA재료에 흡수되어 모재의 온도가 상승되는 것을 확인하였고 이로 인하여 용접속도를 향상 시킬 수 있음을 알 수 있었다.

유한요소 시뮬레이션을 통해서 실험에서 나타나는 물리적 현상을 이해할 수 있었고, 실험적으로 찾은 광학 특성치를 시뮬레이션에서 3차원 열원모델로 변환하여

온도분포도 예측할 수 있었다. 접합강도의 향상 및 갭 보상에 따른 품질안정 그리고 어닐링효과 등에 대해서는 추가 실험을 통하여 검증하는 것이 필요하며, 시뮬레이션과 실험적 방법을 반복적으로 서로 비교 검증하는 추가연구도 필요할 것으로 전망된다.

#### 후 기

본 결과물은 계명대학교 비사연구과제로 수행되었습니다.

#### Reference

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. Yoo, C. Lee, H. Choi, Hybrid Process for Polymer Welding, Journal of Korean Society of Laser Processing, **28-3** (2010), 47-53 (in Korean)
3. 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)
4. J. Seo, Y. Han : Laser Welding in Automotive Industry, Journal of KWS, **12-2** (1994), 49-63 (in Korean)
5. H. Shin, H. Choi, S. Kim, Hybrid process for lubricant groove on linear guides, Int. J. Adv. Manf. Technol., **46** (2010), 1001-1008
6. 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)
7. S. Han, S. Han, S. Kim : A Review on Plastic Welding Technology with Diode Laser, Journal of KWJS, **26-4** (2008), 14-20 (in Korean)
8. 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)
9. MatWeb, (Polycarbonate material properties), www.matweb.com
10. MatWeb, (ABS material properties), www.matweb.com
11. Hecht, E. : Hecht Optics, Addison Wesley, forth edition, 129-135
12. www.eurovision.co.kr, technical brochure



- 한상배
- 1969년생
- 유로비전(주) 대표이사
- 레이저응용기술, 플라스틱용접
- e-mail : sbhan@eurovision.co.kr



- 최해운
- 1972년생
- 계명대학교 기계자동차공학과
- 용접공학, 레이저용접, 용접자동화
- e-mail : hwchoi@kmu.ac.kr