

폴리머 2D 캠버 보상을 위한 레이저용접 기술

이영민*, 윤진영**, 송치훈**, 최해운[✉]

*한국폴리텍 VI 대학 컴퓨터응용금형과, **계명대학교 기계자동차공학과 대학원,
계명대학교 기계자동차공학과

A Study of Laser Joining for Polymer 2D Camber Compensation

Young-Min Lee*, Jin Young Yoon**, Hae-Woon Choi

*Dept. of Computer Aided Dies and Mold, Korea Polytechnics VI,

**Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.

Abstract

A novel joining technology was developed to compensate the camber in polymers. The preheating laser beam circulates on the joining location and the accumulated heat serves to increase the flexibility of neighboring polymers. The temperature rises up to the glass transient temperature of the polymers and continually loading spring force closes the gap of camber. The irradiated laser was 808nm central wavelength and the power varied between 2Watt and 5Watt. The laps were adjusted between 3 and 10 and the optimum process parameters were 3Watt and 5 laps for the specific application. An FEM analysis was introduced to understand the mechanism of joining by the transient temperature distribution on the polymers. Thermocouples experiments were also tried to correlate the numerical analysis results and it showed the trend of heat accumulation in experiments.

Keywords: polymer joining(고분자화합물 용접), laser welding(레이저용접), laser scanner(레이저 스캐너)

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 배경

차량용 내장재 및 외장재로서 고분자화합물인 폴리머의 이용이 점차 확대 되고 있고, 차량무게의 경량화 뿐만 아니라 가격적인 면에서 경쟁력을 가지고 있기 때문에 차량용 부품으로 많이 사용되고 있는 추세이다.

최근 자동차 헤드램프 시스템은 전기·전자기술의 향상으로 인해서 그 기능이 지능화 되었을 뿐만 아니라 현대적 스타일에 맞게 3차원 자유곡면을 통한 예술적 기능도 요구받게 되었다. 이러한 3차원 가공 공정은 높은 생산시스템 난이도를 요구하게 되었고, 레이저 공정기술의 유연성이 그 해법으로 점차 대두되고 있다.

최근의 포물면경 헤드램프는 주로 최적 조명효율

성을 위해서 요구되는 사양이었지만, LED 기술의 발전으로 인해서 어느 정도 광학설계에서의 자유로움을 얻게 되었다. 하지만, 발광장치를 보호하고 3차원 외장장치와 어울리기 위해서는 여전히 복잡한 형태의 폴리머 사출공정이 요구되고 있다.

차량용 헤드램프는 그 모델과 기능에 따라서 다소 다르게 구분되지만, 일반적으로 하우징, 조명기구, 헤드램프 베젤, 렌즈, 디퓨저 그리고 커버 형태 등으로 구분이 된다. 이 중에서 투명렌즈를 하우징에 장착하는 공정에 있어서 일부 레이저 접합공정이 적용 되고 있다.

열가소성수지를 접합하는 방법에는 주로 세가지 방법을 사용하는데, 기계적 접합(볼트 & 너트), 접착제 접합, 그리고 직접접합 방식으로 나눌 수 있다. 이 중에서 기계적 접합은 클립핑이나 클램핑처럼 단순한 기계적 조합도 있지만, 대부분 분해가 가능하도록 나사나 리벳 방식이 많이 사용되고 있다. 하지만, 이러한 방법의 경우는 기밀성을 유지할 수가 없어서 주로 O링과 같은 부가적인 부품이 요

투고일 : 2012년 5월 29일 심사완료일 : 2012년 6월 22일

계재승인일 : 2012년 6월 26일

교신저자 : 최해운 ✉ hwchoi@kmu.ac.kr

구 되고 있다.

접착제를 이용한 접합도 많이 사용되지만, 시간이 지나면서 시효경화나 접착제의 접착특성이 감소하는 문제 때문에 품질의 만족도를 얻기가 어렵다. 또한, 이러한 방법은 접착제에 대한 추가적인 비용 부담이 되고 점도를 가진 접착제를 관리하는 공정 관리도 쉽지 않은 생산현장의 문제이다.

이에 비해서 직접접합 방식은 상대적으로 저비용으로 생산성 향상을 이룰 수 있으며 성능이나 외관 품질의 높은 만족도를 얻을 수 있다. 직접접합방식의 대표적인 예로는 고온 플레이트방식 (Hot-plate), 고온가스 (Hot-gas), 레이저, 마찰, 진동, 초음파, 전자기파 및 저항용접 등을 이용할 수 있다.³⁾

이 중에서 레이저 용접은 그 완성품의 신뢰도가 높고 공정의 자동화가 용이 할 뿐만 아니라 완제품의 품질 균질도도 향상 할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 레이저 용접공정이 높은 신뢰도를 확보하려면 접합부분의 맞춤 (fit up)이 좋아야 하는데, 일반적으로 많이 사용하는 폴리머 성형사출된 제품의 경우 냉각과정에서 발생하는 수축 (shrinkage)로 인해서 레이저 공정시 갭으로 인한 불량률이 빈번히 발생하기 때문에 생산된 제품을 별도의 추가공정을 레이저 용접전 시행하는 경우가 많다.

다이오드레이저는 파이버레이저나 CO₂ 레이저 또는 Nd:YAG 레이저 보다 빔의 품질 (M^2)은 다소 떨어지지만, 효율이 높고 가격이 상대적으로 저렴하여서 플라스틱 용접 등에 쉽게 이용될 수 있으며, 자동차 산업과 의료산업 등 많은 분야에서 활용이 되고 있다.

본 논문은 차량용 또는 일반 조명제품에 사용되는 투명폴리머와 불투명폴리머 접합공정에서 많이 사용되는 적외선 투과 (TTIr, Through Transmission Infrared) 용접 방법에서 발생하는 2D 캠버내 에어 갭을 최소화 하기 위한 레이저 용접기술에 대한 연구결과를 수록 하였다.

2. 본 론

2.1 실험의 장치

실험에 사용된 장치는 크게 모션제어 (2차원 스캐너)장치, 카메라, 2D 레이저 스캐너 및 고정지그로 구성을 하였다. 또한 실시간 녹화를 위해서 영상기록장치를 별도의 PC에서 진행 하였다(Fig. 1).

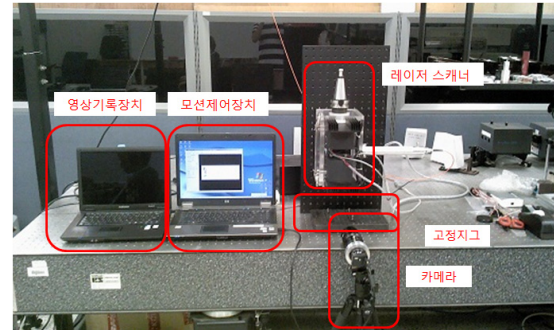


Fig. 1 Experiment setup.



Fig. 2 Example of Rear Lamp Set.

실험에 사용된 2D 레이저 스캐너는 수평축과 수직축형태로 구성된 두 개의 Galvanometer에 조사 레이저 빔에 맞게 특수 코팅된 미러를 포함하고 있다. 이러한 Galvanometer를 제어하기 위해서 아날로그 신호를 실험조건에 맞게 발생시키는 모션 제어장치가 PC에서 프로그램 되었다.

실험에 사용된 샘플은 상부 투명재질로서 PC (poly-Carbonate)가 사용되었으며, 하부 재질로서는 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 재질이 사용되었다.

투과 층의 소재는 낮은 흡수율 또는 높은 투과율을 나타내는 재질로 선택하였고, 흡수 층의 소재로는 레이저 광원이 상대적으로 흡수가 잘되는 재질로 선정하였다. Fig. 2에는 실제 차량에 장착되는 램프 셋트를 보여주고 있으며, 실험의 편의상 동일재질의 시편을 평면 가공하여서 사용하였다.

두 재료의 열변형 온도는 각 135°C와 109°C이며, 실험 시편은 CNC 가공과 접합 실험 시 가압을 고려하여 W40 × L120 × T6.5 mm (ABS)와 T4.0mm(PC)로 제작하였다.

시편을 고정하고 균일한 가압을 위해서 금형스프링을 이용한 특수 지그를 Fig. 3과 같이 제작하였으며, 균일한 압력을 4군데의 스프링으로 가하였다.

가압에 사용된 금형스프링은 내경 6mm 외경 12mm 자유장 40mm 이고 탄성계수 (스프링상수)

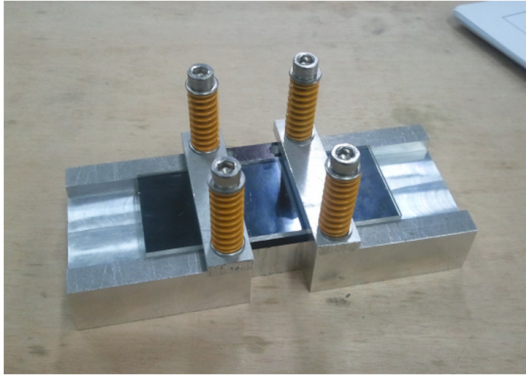


Fig. 3 Sample holding tool.

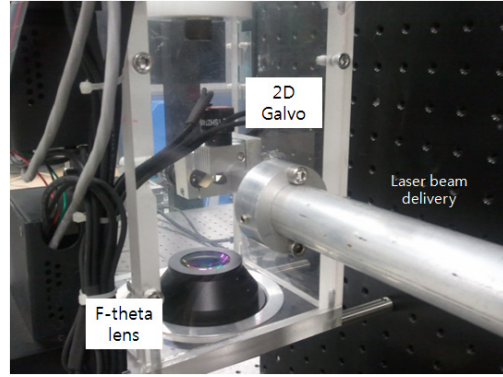


Fig. 5 Laser head with 2d Galvanometer.

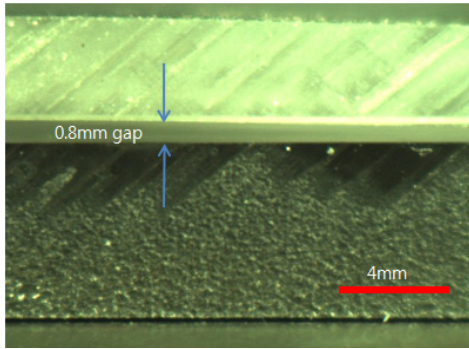


Fig. 4 Air gap by the camber.

0.7kgf/mm를 사용하였다. 가압 스프링의 자유장을 측정 후 가압 볼트의 회전 수를 통해서 피치에 의한 변형량을 계산하여 가압력을 간접적으로 계산 할 수 있었다. 가압력은 볼트당 평균 14kgf를 가하였고, 가압력은 모든 실험에서 동일하게 적용하였다.

이때 사용한 가압력 설정은 실험의 목적상 PC와 ABS가 완전히 밀착되지 않고 일정량의 갭이 발생하도록 하는 범위에서 설정하였으며, 결과적으로 Fig. 4에서 예시된 바와 같이 중심부에서 약 0.8mm 정도의 캠버가 생성 되었다.

캠버의 생성은 측면부분의 접촉이 먼저 이루어진 후 중앙부의 갭이 발생하는 것으로서 본 실험을 위해서 상부 PC를 일부 변형시켜서 의도적으로 캠버를 발생시켰다.

투과체로 사용될 실험 시편 (PC)은 그 광학적 특성이 좋지만, 레이저 광원의 중심파장 808nm에 대한 해당소재의 레이저빔 투과율을 측정해 보기 위해서 파워미터를 사용하여 폴리머 투과 전 파워와 투과 후의 파워를 측정하여 비교해 보았다.

본 실험에서 실제 소입되는 레이저 빔의 양을 계산하기 위해서 선행 실험 결과인 시편 (PC)의 평균

투과율을 93.6%로 가정하였고, 반사율은 경면 반사에 의한 반사 손실만을 가정하여 아래의 식으로 하였다.

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

여기에서, n은 polymer의 굴절지수이고 m은 공기의 굴절지수 이다. 여기서 n은 1.58, m은 1이므로 5.1%의 반사율을 가짐을 확인하였다. PC의 투과율과 반사율을 이용하여 PC의 흡수율이 1.3%로 가정하였다. 이를 통해서 PC내부의 에너지 흡수는 미미하고, 대부분의 에너지가 ABS층으로 도달하는 것으로 가정하였다.

레이저빔은 808nm 다이오드 레이저를 사용하였으며, Fig. 5에 보여진 바와 같이 Collimator를 거쳐 2D galvanometer로 조사 되었고, 이후 F-theta 렌즈를 통해서 공작물에 집속 되었다.

2.2 접합실험

본 실험의 기본 의도는 접합시 필요한 에너지를 분산하여서, 예열 (preheating)을 통해서 발생한 열 에너지로 접합할 폴리머를 유리전이온도 (glass transient) 이상으로 상승 시킨 후 폴리머의 유동성을 좋게하여 가압된 힘으로 에어갭을 줄이고, 이후 조사된 레이저를 통해서 접합하는 방법이다.

예열의 방법으로는 동일한 에너지를 1회에 걸쳐서 조사하지 않고, 나누어서 3회에서 10회에 걸쳐 분산하여 조사하는 방법을 취하였다. 초기 수 회에 걸쳐서 조사되는 레이저 빔이 재료의 표면을 일부 가열하여서 예열을 시키고 예열을 통해서 폴리머의 유동성이 좋은 상태까지 천이 시키는 역할을 하도록 기대 하였다.

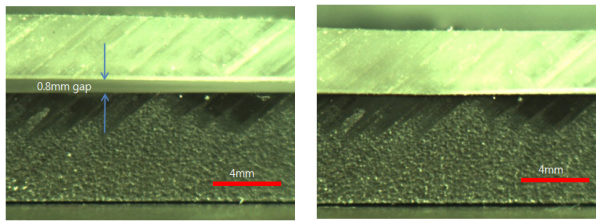


Fig. 6 Air gap closing and welding process (10 laps).

Table 1 Experiment schedule.

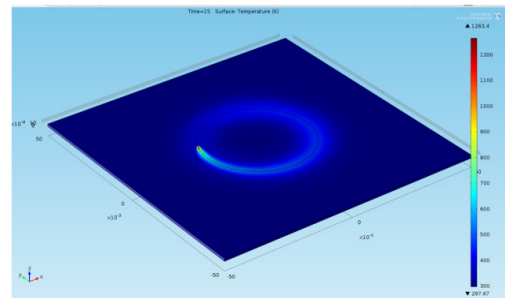
| 출력 (W) | 회전 수 | feed (mm/min) | 시간 (sec) | 소입량 (J) |
|--------|------|---------------|----------|---------|
| 2 | 3 | 340 | 33 | 67 |
| 2 | 5 | 565 | 33 | 67 |
| 2 | 10 | 1130 | 33 | 67 |
| 3 | 3 | 340 | 33 | 100 |
| 3 | 5 | 565 | 33 | 100 |
| 3 | 10 | 1130 | 33 | 100 |
| 5 | 3 | 340 | 33 | 166 |
| 5 | 5 | 565 | 33 | 167 |
| 5 | 10 | 1130 | 33 | 167 |

Table 1에서 나타난 바와 같이 소입된 에너지는 3단계로 동일하게 설정하고, 회전수와 Feed속도를 다르게 하여서 에너지를 분산하는 실험을 수행 하였다. 예를 들어 에너지 소입량이 67J인 실험에서 출력을 2Watt로 고정을 하고 회전수를 3회, 5회, 10회로 조정을 하였다. 동일 시간에 회전 수를 다르게 하기 위해서 feed를 다음과 같이 계산하였다.

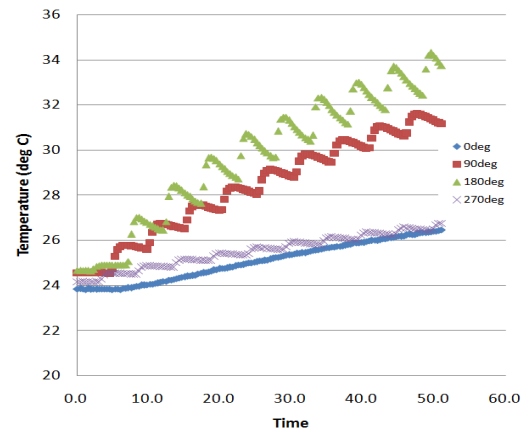
소입된 에너지는 $E = \int p dt$ 이고, 조사시간은 $t = \frac{E}{p}$ 이므로, feed 는 $f = \frac{\pi DN}{t}$ 로 계산 될 수 있다.

여기서, E는 에너지, p는 레이저 조사단에서의 출력, D는 가공 원의 직경, t는 조사시간, 그리고 N은 회전수를 의미한다.

출력범위를 2Watt에서 5Watt 범위에서 수행하였으며, 2Watt에서는 실험조건에서 접합이 잘 이루어지지 않은 반면 3Watt와 5Watt에서는 신뢰도가 높은 접합이 이루어 졌다. 동일한 용접결과라고 가정할 때 용접열효율이 좋은 3Watt 실험 샘플이 생산공정에서 추천 되며 용접공정에 대한 실시간 단면촬영 영상이 Fig. 6에 예시되어 있다.



(a) FEM Simulation (P=3Watt, 5laps)



(b) Temperature measurement

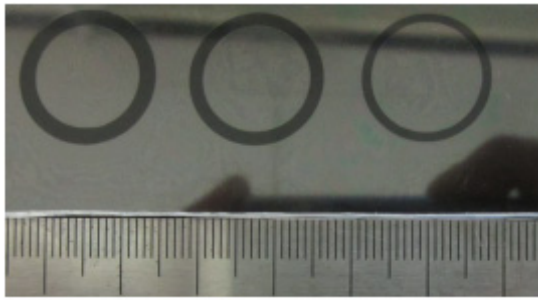
Fig. 7 Heat accumulation at polymers.

캠버로 인한 에어 갭은 초기 수 회전에서 줄어드는 것을 관찰 할 수가 있었고, 이후 접합이 이루어 지는 것을 알 수가 있었다. 이러한 누적 열 (Heat accumulation)에 의한 효과를 간단한 FEM 시뮬레이션을 통해서도 확인 할 수 있었으며, 열전대 실험을 통해서도 그 경향을 발견 할 수가 있었다(Fig. 7).

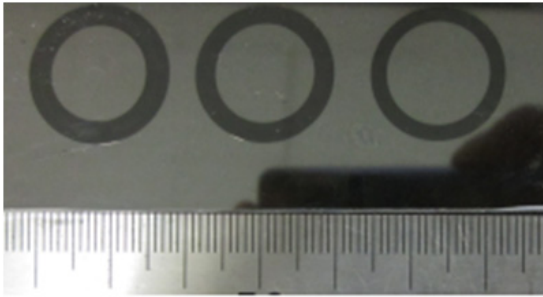
실험을 위해서 열전대는 6.5mm 두께의 하부 ABS 뒷면에서 드릴링 작업 후, 열전대를 삽입 하여 측정 하였다. 실제 가열부와외의 거리가 1mm 이상인 관계로 정확한 측정은 이루어지지 않았으나, 열축적에 대한 그 전반적인 경향은 알 수가 있었다.

FEM의 결과로 미루어 보면 ABS수지는 열전도성이 작아서 비교적 가열부에 열을 비교적 오랫동안 축적하고 있었으며, 축적된 열이 0.8mm 에어갭을 통해서 PC에 전달되고, 이후 PC가 유리천이온도 이상으로 가열되면서 두재료의 접촉이 좋아진 것으로 해석이 된다.

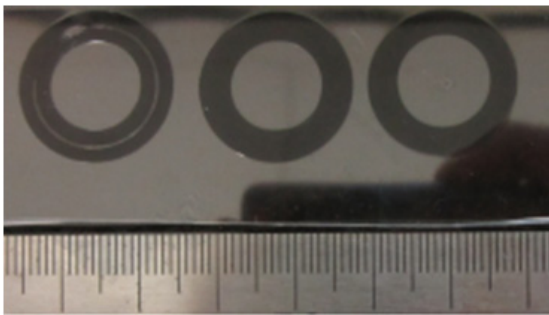
FEM 시뮬레이션 결과와 열전대 실험결과를 비교하여서 유효성을 검증하고 해석해야 하는 과정을 거쳐야 하지만, 본 논문에서는 방법론적인 과정만 설명하는 것으로 한정을 하였다. 초기실험에서



(a) P=2Watt, 3, 5, 10 laps



(b) P=3Watt, 3, 5, 10 laps



(c) P=5Watt, 3, 5, 10 laps

Fig. 8 Welding samples for (a) P=2Watt (b) P=3Watt (c) P=5Watt.

얻은 결과를 바탕으로 전범위의 실험을 진행하였다(Fig. 8).

레이저 출력을 2W에서 5W로 변화 시키고, 회전수를 3에서 10회전 변화시키면서 용접시편의 접합상태를 육안으로 관찰하였다. 출력이 2Watt로 고정시킨 상태에서 전 구간에서 접합이 이루어 졌으나, 용접비드 폭이 상대적으로 좁고 용접의 신뢰도도 낮았다. 3Watt 출력으로 접합한 용접시편의 결과를 분석해 보면, 비교적 저속인 3 lap의 경우 일부 과다한 접합이 초기에 일어났고, 접합부위 (링 모양)의 일부에서는 기포도 일부 감지 되었다. 반면 10 lap의 경우에는 용접부위의 비드폭이 다소 작아짐이 확인되었으며, 최적의 용접 조건은 5 lap으로 확인이 되었다.

5Watt 출력에서의 결과를 보면 전 범위에서 과

다 접합이 발견이 되었고, 특히 3 lap의 경우에는 높은 에너지 밀도로 인해서 기화가 발생이 되고, 이로 인한 하부 재료에 기포가 발생하는 현상이 발견되었다. 반면 5 lap과 10 lap 실험에서는 상대적으로 높은 신뢰도의 접합결과를 얻을 수가 있었다.

3. 결론 및 고찰

본 논문에서는 차량용 헤드램프 또는 리어램프 등의 고분자 폴리머제품을 사출금형 제작할 때 발생 할 수 있는 캠버보상을 극복하는 레이저 접합기술에 대해서 기술 하였다. 사출금형 제품이 냉각시 발생하는 수축 (Shrinkage)으로 인해서 접착부에 캠버가 발생하게 되고, 이때 캠버로 인해서 에어갭이 발생되게 된다. 이러한 에어갭으로 인해서 레이저 접합시 접합효율이 나빠지게 되고, 용접불량의 원인이 된다.

캠버로 인한 에어갭을 보상하기 위해서 접합 전체 공정 중 초기 몇회에서 예열이 이루어지고 이후 공정에서 접합이 수행되는 형태로 실험을 진행 하였다. 실례로, 예열을 하기 위한 방법으로 2D 레이저 스캐너를 이용하여서 동일 접합경로를 2~3회 정도 예열 (pre-scan)하였고, 이후 추가 3회 ~ 7회 레이저 조사를 통해서 접합을 하는 형태로 공정을 진행하였다. 결과적으로 동일한 에너지를 짧은 시간 소입하는 것 보다, 저출력으로 분산해서 반복횟수를 늘이는 것이 캠버로 인해서 발생된 에어갭을 줄이는데 효과가 탁월한 것으로 조사 되었다.

레이저 출력은 주로 저출력인 2W에서 5W내외에서 조사되었으며, 대부분의 경우 반복회수 5 laps에서 신뢰도 높은 접합결과가 나타났다. 실험의 결과 최적의 결과는 3W 반복회수 5 lap에서도 출 되었으며, 육안검사결과 기포발생도 없고 용접비드의 폭도 응용제품의 충분한 전단강도를 보장하는 2mm 이상으로 조사되었다.

FEM 시뮬레이션을 통해서 열전대실험을 통해서 온도분포를 측정하여 경로에 축적된 에너지 양을 추적하였으며, 분석의 결과 접합폴리머가 초기 첫 lap에서 유리전이온도 이상으로 상승되어 예열 되는 것이 관측되었으며, 이후 추가로 조사된 레이저로 인해서 폴리머의 녹는점 이상으로 상승되는 것을 확인 할 수 있었다. 열전대 실

험을 통해서 시뮬레이션결과와 실제 샘플에 발생하는 온도분포의 상관관계를 규명하려 하였으나, 폴리머 열전대 부착위치의 벗어남에 대한 문제들이 있어서 정확한 상관관계를 나타내지 못하였다. 하지만, 전반적인 소입에너지 축적에 대한 경향은 알 수 있었다.

추가적인 실험을 통해서 FEM 시뮬레이션 결과를 다양화 하고, 열전대 실험의 결과와 상관관계를 통해서 최적의 용접조건을 시뮬레이션에서 찾을 수 있도록 연구를 향후 수행할 계획이다. 또한, 용접시편의 신뢰도를 육안이 아닌 인장 및 전단강도 시험을 통해서 확인하고, 시간에 따른 단면의 수축량이나 냉각에 대한 전반적인 내용을 이론 및 실험으로 실증을 해야 할 것으로 생각되며, 향후 추가연구내용으로 계획한다.

또한, 실제 차량용 헤드램프 및 리어램프는 3차원 형상이므로 가압용 지그의 설계가 평면형태보다 난해하다. 곡면 접합을 위한 고정지그는 투명 공기주머니를 이용한 방법이나, 두 개의 롤러가 자유곡면을 따라가면서 가압하는 형태도 구상해 볼 수 있으며, 현장 상황에 맞는 최적지그설계가 본 연구결과의 활용을 극대화 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4. 후 기

본 연구는 2012년 비사연구과제비로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- 1) C. Lee, S. Nam, and H. Shin: Ministry of, Laser material processing technology trend, Ministry of Science and Technology, 2006.
- 2) J. Seo, and Y. Han, "Laser Welding in Automotive Industry," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 12, No. 2, pp. 49-63 1994.
- 3) N. Amanat, N. James and D. McKenzie, "Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure for medical devices," Medical Engineering & Physics, Vol. 32, pp. 690-699, 2010.
- 4) M. Seo, K. Ryu, Y. Hong, S. Moon and K. Nam, "Study on Laser Transmission Welding of Thermoplastics," Proc. of Optical Society of Korea Summer Meeting, pp. 136-137, 2004.
- 5) J. Yoo, C. Lee and H. Choi, "Hybrid process for polymer welding," Korean Welding and Joining Society, Vol. 28, No. 3, pp. 42-48, 2010.
- 6) MatWeb, (Polycarbonate material properties), www.matweb.com
- 7) MatWeb, (ABS material properties), www.matweb.com
- 8) Hecht, E. : Hecht Optics, Addison Wesley, forth edition, pp. 129-135.