

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.7.701>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 3차원 광경화성 수지와 폴리아세테이트 수지의 레이저 접합해석

최 해 운\* · 윤 성 철\*\*

\* 계명대학교 기계자동차공학과, \*\* 계명대학교 대학원 기계공학과

### Laser Welding Analysis for 3D Printed Thermoplastic and Poly-acetate Polymers

Hae Woon Choi\*† and Sung Chul Yoon\*\*

\* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.

\*\* Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung Univ.

(Received March 11, 2015 ; Revised April 29, 2015 ; Accepted May 2, 2015)

**Key Words:** Laser Welding(레이저 용접), Polymer Joining(폴리머접합), Poly-acetate(폴리아세테이트)

**초록:** 본 논문에서는 격자가 있는 광경화성수지와 폴리아세테이트 수지의 레이저 접합해석에 대한 실험적 결과와 컴퓨터시뮬레이션 결과를 비교분석하였다. 3차원 격자형상은 MJM 방식의 3D 프린터를 사용하였고, 접합은 다이오드 레이저를 사용하였다. 5Watt ~ 7Watt 범위에서 경계면에 조사된 레이저는 유리 천이온도에 도달 후 상면의 격자사이로 침투되어 기계적인 접합이 이루어졌다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 분포 온도를 통해서 열유동방향을 예측할 수 있었으며 분석을 통해서 접합의 원리를 이해할 수 있었다. 접합실험에서 최대 입열조건인 고출력 저속에서의 2scan 접합이 최소 입열조건이 저출력 고속 조건의 4 scan 보다는 훨씬더 효과적인 것으로 나타났고, 일정수준(Threshold) 이상의 최소에너지 즉, 유리 천이온도 이상이 되어야만 효과적인 것을 알 수가 있었다

**Abstract:** In this study, experimental and computer simulation results are compared and analyzed. Three-dimensional (3D) fabricated matrices from an MJM 3D printer were joined with poly-acetate thermoplastic polymers using a diode laser. A power range of 5-7 W was used to irradiate the boundary of two polymers. The heated polymers flowed into the matrices of the 3D fabricated structure, and reliable mechanical joining was achieved. Computer simulation showed the temperature distribution in the polymers, and flow direction was estimated based on the flux and temperature information. It was found that the more than the minimum energy threshold was required to effectively join the polymers and that two scans at low-speed were more effective than four scans at high speed.

- 기호설명 -

- $\rho$  : 밀도(SI unit: kg/m<sup>3</sup>)
- $C_p$  : 정압에서의 비열(SI unit: J/(kg·K))
- $k$  : 열전도 계수(SI unit: W/(m·K))
- $T$  : 절대온도(SI unit: K)
- $u$  : 속도벡터(SI unit: m/s)
- $q$  : 열전도에 의한 단위열 플러스(SI unit: W/m<sup>2</sup>)
- $Ac$  : 감소계수(SI unit: 1/m)

$Q_0$  : 소입레이저 출력(SI unit: Watt)

$R_c$  : 표면반사계수(SI unit: none)

#### 1. 서 론

일반적으로 폴리머 접합은 그 종류에 따라서 다르게 행해진다. 열경화성수지(Thermoplastics)는 단분자(Monomer)에 경화제를 혼합시 고분자(Polymer)의 상호 결합에 의해서 강도가 아주 큰 소재로 성형되지만, 이후 서로 다른 두 형상을 결합하기가 곤란하다. 하지만 열가소성수지(Thermosets)는 고분자 상태라 할지라도 외부의 열에 의해서 그 형상이 쉽게 변화될 수 있다.

† Corresponding Author, hwchoi@kmu.ac.kr

이러한 이종 폴리머(열경화성 수지와 열가소성 수지)는 그 특성의 차이 때문에 화학적인 접합이 대단히 어려워져서, 주로 나사나 리벳 등의 기계적 결합이나 본드나 높은 열원(레이저) 등을 이용한 접합이 많이 이용이 되고 있다.<sup>(1)</sup>

일반금속과는 달리 폴리머를 열원을 이용하여 접착시 계면(Boundary laser)에 열을 가하여 온도를 유리전이온도(Glass Transition)온도 이상으로 상승시킨 후 가압하여 접합하는 것이 일반적인 방법이다. 이러한 방법이 열가소성 수지에서는 가능하지만 열경화성수지는 일정온도이상에서 발화되거나 표면손상이 발생되기 때문에 매개물질인 접착제를 통해서 두 물질을 접합하는 것이 더 이상적이다. 열경화성 수지나 열가소성수지 접합은 모두 계면에서 일어나며 그 계면의 두께(Boundary Thickness)가 금속의 용접방법에 비해서 매우 얇은 것이 특징이다.<sup>(2)</sup>

레이저열원은 높은 에너지 밀도를 가지는 열원을 국소영역에 조사할 수 있는 획기적인 접합열원이다. 레이저는 그 광원의 파장이 다양하여서 일반금속에 비해서 조사(Irradiation)되는 파장에 민감하게 반응되는 폴리머의 경우에 매우 유용하게 선택될 수 있다. 또한 그 조사되는 영역이 다양한 모션시스템(스캐너, 모션스테이지)에 따라서 자유롭게 정해 질 수 있기 때문에 생산기술의 유연성(Flexibility)를 기할 수 있다.

폴리머의 광학적 특성은 표면의 형상이나 조도(Surface Roughness)뿐만 아니라 폴리머내부의 화학적 조성에 따라서도 다양하게 정해지게 된다.<sup>(3,4)</sup> 폴리머내부의 화학적 내부의 조성은 그 목적과 필요에 따라서 정해져 있지만, 접합시에 필요한 파장은 다양한 방법으로 선택이 가능하다. 일반적으로 폴리머 접합시 가장 많이 사용하는 레이저는 다이오드레이저인데, 이는 상대적으로 장치비용이 저렴하고, 빔의 품질이 레이저 용접용으로 적절하며, 파장선택이 넓고 유지보수가 쉬운점이 그 특징이다.<sup>(5,6)</sup>

본 논문에서는 3D 프린트된 복합형상의 광경화성 수지와 열가소성수지로 구성이 된 이종폴리머 접합의 특성과 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 다양한 분석을 통해서 최적의 접합을 위한 이론 및 실험결과를 보고한다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치의 구성

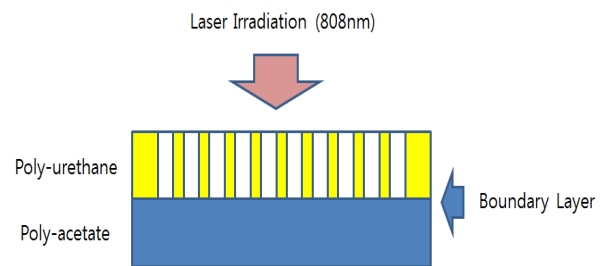
실험장치는 레이저 발진장치, 빔 이송장치, 시

편 고정장치, 데이터 취득장치(DAQ) 그리고 시스템 제어장치로 구성이 되어 있다. 발진된 레이저는 빔 이송장치를 통해서 상부의 Poly-urethane에 조사되어서 하부의 Poly-acetate 계면에 전달되며, Poly-acetate 계면에서 빔이 흡수되는 원리가 되도록 구성하였다(Fig. 1(a)). 하부 Poly-acetate는 약 3mm 이며, 상부 Poly-urethane은 약 2.5mm 로 제작이 되었으며, 일정한 힘으로 가압하였다.

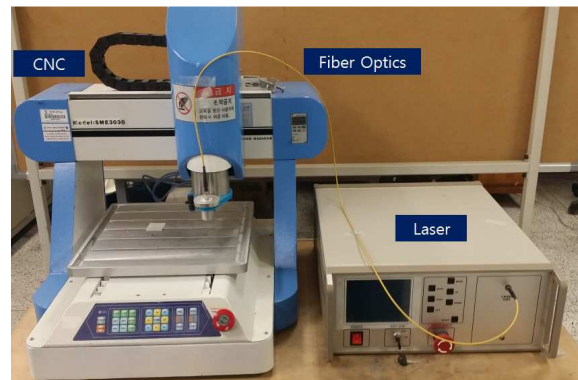
사용된 레이저는 808nm 파장을 발생시키며 최대 60Watt의 출력을 낼 수 있도록 자체 제작하였다. 광원은 광섬유를 통해서 전송되며 소형 CNC 머신에 준비된 폴리머 접합장치에서 접합이 이루어지도록 하였다(Fig. 1(b)). 전송된 레이저빔은 808nm 파장에서 95% 이상의 투명성을 가지는 상부의 Poly-urethane 영역을 통과하여, 하부에 생분해성 아세테이트 수지 계면에 도착하는 구조로 제작하였다.

### 2.2 실험소재

3D 프린터는 PROJET HD3500(미국 3D systems Inc.) 이며, 소재(Mold)는 우레탄 계열의 Urethane acrylate oligomers(20~40%), Ethoxylated bisphenol A diacrylate(15~35%), 그리고 Tripropyleneglycol



(a) Schematic of polymer joining workpiece setup



(b) Schematic of laser system

Fig. 1 System setup

diacrylate(1.5~3%)로 구성된 것이다. 고상 Polyurethane의 비등점은 200°C 이상이며 비중은 1.1이다. 서포트(Support)는 Hydroxilated wax가 60 ~ 100% 첨가되어 있으며, 녹는점 55~65°C 이고 후처리 공정은 오븐과 초음파 세척기에서 행한다.

하부 열가소성수지 소재인 생분해성 셀룰로오스/아세테이트는 안경테 제조에 있어 가장 좋은 특성을 가진 유일한 천연섬유로서 원자재는 모두 천연섬유소이며 천연섬유소와 빙초산을 화학반응 시켜서 제조하였다. 비중은 약 1.22이며 유리전이 온도(Glass Transition)는 약 85°C 이다.

2.3 컴퓨터시뮬레이션

본 실험을 이론적으로 분석하기 위한 분석소프트웨어로 COMSOL Multiphysics(Ver. 4.2a)를 사용하였다. 이를 통해서 접합시 일어나는 다양한 현상 및 변수에 따른 접합특성을 예측하였고, 실험값과 비교 검증하였다.

열입력을 나타내는 방정식으로는 2차원 타원열원(2D Elliptical heat source) 모델을 사용하였으며, 식 (1)에 나타내었다. 또한 깊이 방향의 열원의 분포는 지수함수 형태로 구성이 되며, 감소계수(A<sub>c</sub>)를 통해서 결정된다.

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

여기서, Q<sub>0</sub>는 열원의 침투출력, x, y, z는 공간 좌표, R<sub>c</sub>는 표면반사도, σ<sub>x</sub>, σ<sub>y</sub>는 x 및 y 방향의 빔 반경, 그리고 A<sub>c</sub>는 표면 흡수층 두께이다.

경계조건으로 상부에서 레이저가 조사되고 여섯 면은 상온에서 자연대류 조건으로 설정하였다. 또한 폴리머 내부의 열전달 지배방정식은,

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2)$$

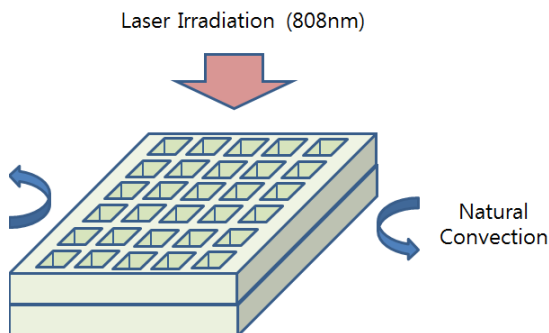


Fig. 2 Boundary conditions of simulation

여기서 ρ 밀도, C<sub>p</sub> 비열, T 절대온도, u 속도 벡터, Q 열 플럭스이다.

열원은 표준정규분포(Gaussian) 형태의 열원으로 가정을 하고, 빔의 형태를 형상계수(Shape Factor)를 사용하여서 고에너지빔의 형태를 실제 실험결과와 근접하게 검증하였다. 수치해석 툴의 검증(Numerical Solution Validation)은 선행연구<sup>(5)</sup>에서 열전대(Thermal Couple) 및 열화상카메라(IR Camera)로 수행하였다.

3. 결 과

3.1 실험결과

초기 변수설정을 위해서 실험은 다양한 범위에서 선행실험을 하였고,<sup>(5)</sup> 접합에 주요최적 조건인 5Watt에서 7Watt 영역범위에서 수행을 하였으며, 이송속도는 500mm/min에서 1,000mm/min 영역에서 수행하였다. 결과적으로 전영역에서 접합이 이루어짐이 확인되었으나, 소입된 에너지의 양은 다르게 설정하였다.

본 논문에서는 최소소입에너지 조건인 P=5Watt, v=1,000 mm/min의 조건과 최대소입에너지 조건인 P=7Watt, v=500mm/min의 조건을 비교하면서 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다.

열소입량(J/mm)은 식 (2)와 같이 계산될 수 있다.

$$E(J/mm) = \frac{P \cdot 60}{v} \quad (2)$$

여기에서 E는 단위길이당 소입된 에너지, P는 레이저출력 그리고 v는 접합속도이다.

결과적으로 최저 열소입량 조건인 P=5Watt, v=1,000mm/min에 비해 최고 열소입량 조건 P=7Watt,

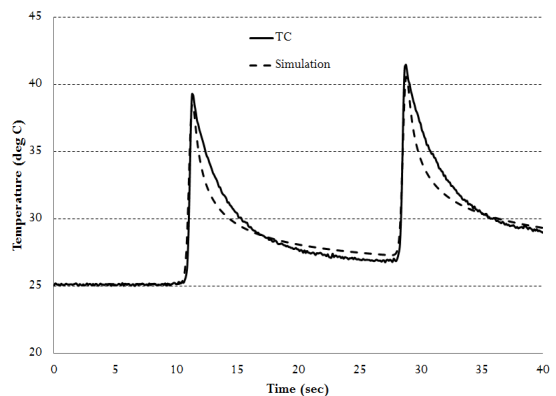
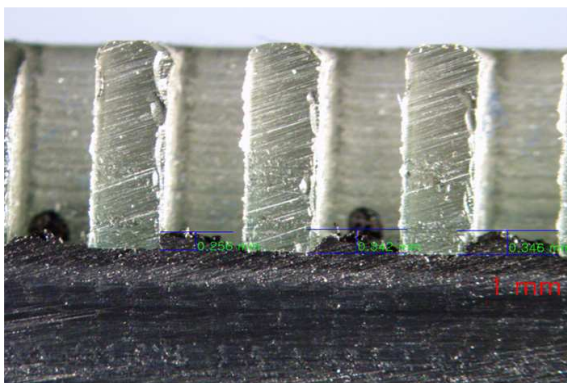


Fig. 3 Validation of numerical simulation<sup>(5)</sup>

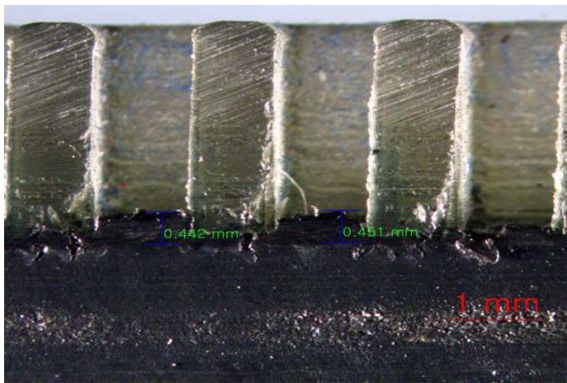
v=500mm/min에서 높은 접합력을 보였다. 하부 아세테이트의 평균 충전높이가 300 μm 에서 450 μm 로 약 50%정도 증대가 되었다.

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션의 결과를 3차원으로 도식화하여 Fig. 5와 같은 결과를 얻었지만, 분석의 편의를 위해서 상부 Layer를 생략하고, 경계면의 온도분포와 열유속방향에 대해서 집중 고찰하였다.



(a) P=5Watt, v=1,000mm/min



(b) P=7Watt, v=500mm/min

Fig. 4 Cross section of polymer joining<sup>(6)</sup>

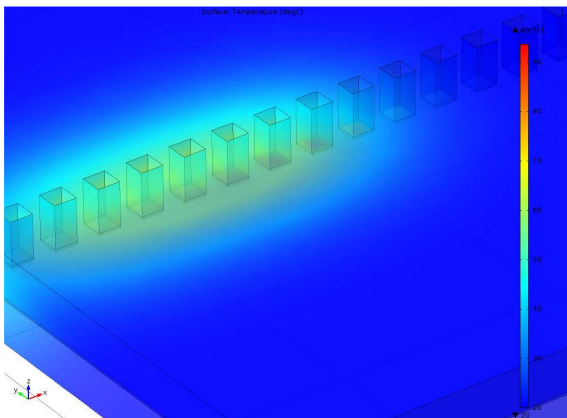
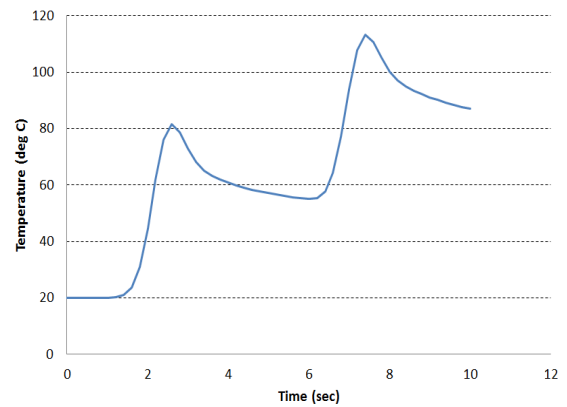


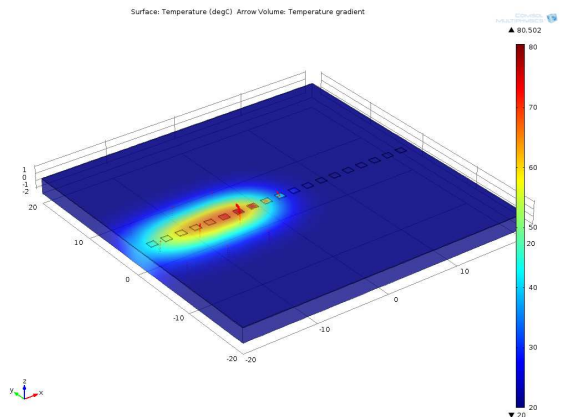
Fig. 5 Simulation result

최대 입열량인 P= 7Watt와 v=500mm/min의 조건에서에서 시뮬레이션하고, 경계면에서의 온도 분포를 알아보았다. 약 10초간의 시뮬레이션하였을 때, 1차 열원 통과시 접합시 경계면 최고온도가 약 82°C 였고, 2차 열원으로는 113°C까지 상승하였다.

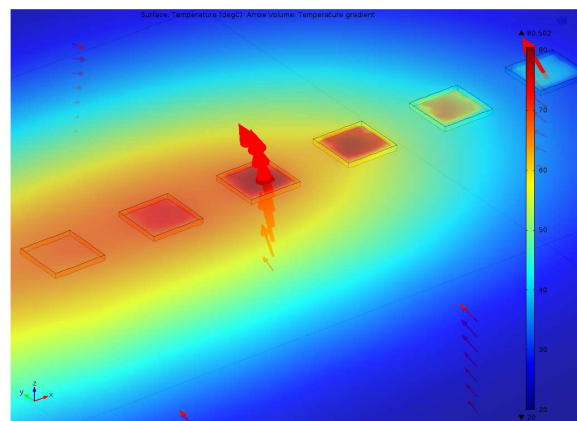
일반적으로 열가소성 수지의 경우 유리전이온도 근처에서 연화된 후 가압에 의해서 접합이 이



(a) Temperature variation



(b) Temperature distribution on the boundary



(c) The direction of heat flow at max. temperature

Fig. 6 Simulation result analysis at P=7Watt, 500mm/min



루어지는 점을 감안하면, 1차 가열에서 유리천이 온도에 근접하게 되고 이후 접합이 이루어질 것으로 예상된다. 이후의 2차 가열에 의해서 경계면의 유화는 더욱더 진행될 것으로 기대가 되며, 이후 근접영역의 수지에 열이 전도되어서 접합이 더욱더 많이 이루어질 것으로 분석이 된다.

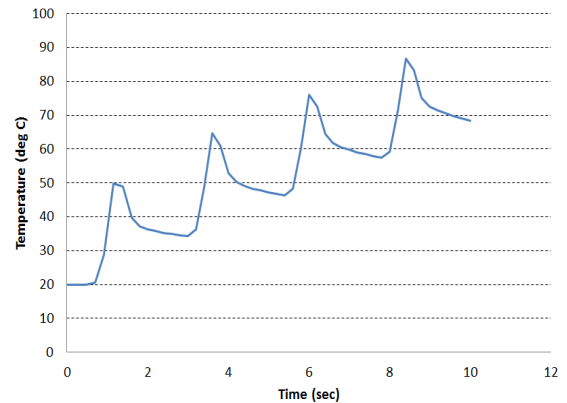
다만, 한꺼번에 지나치게 많은 양의 에너지가 소입이 되어서 자칫 유리천이온도를 지나서 발화될 가능성도 일부 우려가 된다(Fig. 6(a)). 전반적인 온도분포를 시뮬레이션 결과를 통해서 알아보면, 높은 접합속도로 인해서 이웃 영역과의 온도 변화가 크고, 용접후 영역(Welding Trail)이 다소 짧은 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 열유속을 살펴보면 내부에서의 열이 접합계면을 통해서 상부의 공기층으로 흐르는 것을 알 수가 있었으며, 결과적으로 유체의 유동방향(Flow)도 동일방향으로 이루어졌을 것으로 분석된다.

또한, 최소 입열량 조건인 출력  $P=5\text{Watt}$  와  $v=1,000\text{mm/min}$ 의 조건에서에서 시뮬레이션하고, 경계면에서의 온도분포를 알아보았다. 약 10초간의 시뮬레이션을 통해서 총 4번의 열원이 분산되어서 소입이 되었고, 1차 열원 통과시 접합시 경계면 최고온도가 약  $49.7^{\circ}\text{C}$  였고, 2차 열원  $64.6^{\circ}\text{C}$ , 3차 열원  $76.1^{\circ}\text{C}$ , 그리고 마지막 4차 열원으로는 경계면 온도가 최대  $86.7^{\circ}\text{C}$  까지 상승하였다.

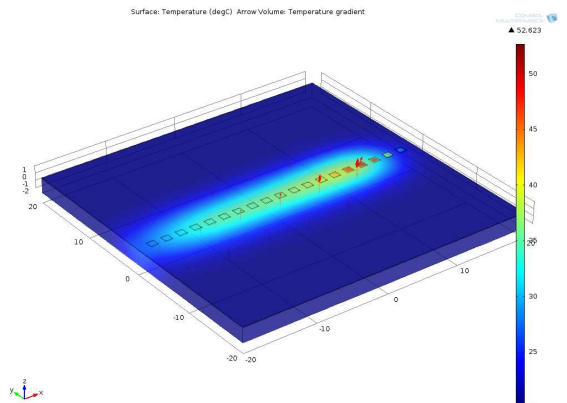
본 실험에서도 균일한 접합이 이루어졌으나,  $7\text{Watt}$   $500\text{mm/min}$  보다는 에너지분포가 완만하게 진행이 되었으며, 1차, 2차, 3차까지는 주로 예열을 통해서 전반적인 연화가 이루어졌고, 4차 가열에 의해서 유리천이온도 이상에 소재가 달하게 되었으며 이때 안정된 접합이 이루어졌을 것으로 기대가 된다(Fig. 7(a)).

용접시 표면온도 분포를 시뮬레이션 결과를 통해서 알아보면, 상대적으로 높은 용접으로 인해 용접후 영역(Welding Trail)이 다소 짧은 것으로 나타났다(Fig. 7(b)). 열유속도 마찬가지로 내부에서의 열이 접합계면을 통해서 상부의 공기층으로 흐르는 것이  $7\text{Watt}$   $500\text{mm/min}$  보다 다소 완만한 것을 알 수가 있었으며, 결과적으로 유체의 유동방향(Flow)도 더 느린 속도로 이루어졌을 것으로 분석된다.

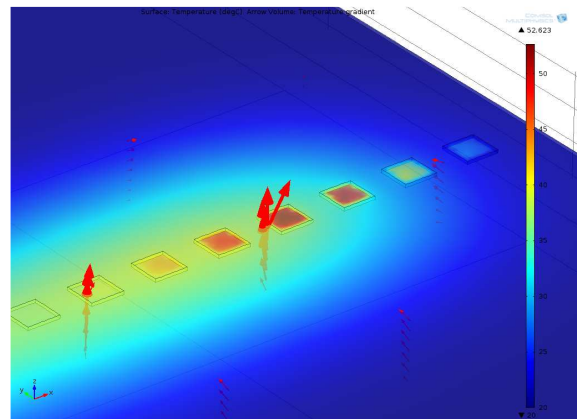
본 시뮬레이션에서 확인된 바로는 1차, 2차, 3차에 걸친 열원소입에도 불구하고 소재는 연화온



(a) Temperature variation



(b) Temperature distribution on the boundary



(c) The direction of heat flow at max. temperature

Fig. 7 Simulation result analysis at  $P=5\text{Watt}$ ,  $1,000\text{mm/min}$

도에 도달하지 못해서 가압을 통한 접합은 이루어지지 않았을 것으로 예상되며, 결과적으로는 마지막 열 소입단계인 4차에서만 접합이 이루어졌을 것으로 분석이 된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 격자가 있는 광경화성수지와 폴리아

세테이트 수지의 레이저 접합해석에 대한 실험적 결과와 컴퓨터시뮬레이션 결과를 비교분석 하였다. 열경화성수지의 일종인 광경화성 수지와 열가소성수지의 일종인 폴리아세테이트를 접합하기 위하여 레이저를 사용하였다. 상부 광경화성 수지에 조사된 레이저는 두 폴리머의 경계면인 폴리아세테이트 상면에서 흡수되고, 이후 유리전이온도에 도달후 상면의 격자사이로 침투되어 기계적인 접합이 이루어지는 원리이다.

출력 5Watt ~ 7Watt의 범위와 용접속도 500 ~ 1,000mm/min 범위에서 실험 및 시뮬레이션한 결과, 유동의 흐름을 예측할 수 있는 온도와 열유동방향을 예측할 수 있었으며, 접합의 원리를 이해할 수 있었다.

접합실험에서 최대 입열조건인 고출력 저속에서의 2 scan 접합이 최소 입열조건이 저출력 고속조건의 4 scan 보다는 훨씬더 효과적인 것으로 나타났고, 이는 에너지분산도 일정수준(Threshold) 이상의 최소에너지 즉, 유리전이온도 이상이 되어야만 효과적인 것을 알 수가 있었다.

컴퓨터시뮬레이션을 통해서 온도분포를 예측할 수 있었으며, 열유동의 방향과 크기를 통해서 유체 유동의 방향을 간접적으로 예측해 볼 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 중소기업청 산학공동기술개발지원사업(2014-0187)의 지원으로 수행 되었습니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Schricker, K., Stambke, M., Bergmann, J. P., Brautingam, K. and Henckell, P., 2014, "Macroscopic Surface Structures for Polymer-Metal Hybrid Joints Manufactured by Laser Based Thermal Joining," *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 782~790.
- (2) Ageorges, C., Ye, L. and Hou, M., 2001, "Advances in Fusion Bonding Techniques for Joining Thermoplastic Matrix Composites: a Review," *Composites Part A*, Vol. 32, pp. 839~857.
- (3) Chun, D. M., Davaasure, G., Ngo, C., Kim, C. S., Lee, H. Y. and Ahn, S. H., 2014, "Fabrication of Transparent Superhydrophobic Surface on Thermoplastic Polymer Using Laser Beam Machining and Compression Molding for Mass Production," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 63, pp. 525~528.
- (4) Riveiro, A., Soto, R., Comesana, R., Boutinguiza, M., Quintero, F., Lusquinos, F. and Pou, J., 2014 "Laser Surface Modification of Ultra-high-molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE) for Biomedical Applications," *Surface Science*, Vol. 302, pp. 236~242.
- (5) Song, C. H. and Choi, H., 2014, "Laser Energy Optimization for Dissimilar Polymer Joining," *KWJS*, Vol. 32, No. 4, pp. 63~69.
- (6) Yoon, S. C., Ma, J. K., Bang, D. W. and Choi, H. W., 2014, "A Study on Joining of 3D Thermoset and Biodegradable Polymers," *KWJS*, Vol. 32, No. 4, pp. 37~42.

(1) Schricker, K., Stambke, M., Bergmann, J. P.,