연 구 논 문

폴리머 마이크로 장치에 대한 레이저 투과 마이크로 접합

김 주 한*·신 기 훈*

*서울산업대학교 기계공학과

Analysis of Transmission Infrared Laser Bonding for Polymer Micro Devices

Joo-Han Kim* and Ki-Hoon Shin*

*Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

Abstract

A precise bonding technique, transmission laser bonding using energy transfer, for polymer micro devices is presented. The irradiated IR laser beam passes through the transparent part and absorbed on the opaque part. The absorbed energy is converted into heat and bonding takes place. In order to optimize the bonding quality, the temperature profile on the interface must be obtained. Using optical measurements of the both plates, the absorbed energy can be calculated. At the wavelength of 1100 nm, 87.5% of incident laser energy was used for bonding process from the calculation. A heat transfer model was applied for obtaining the transient temperature profile. It was found that with the power of 29.5 mW, the interface begins to melt and bond each other in 3 sec and it is in a good agreement with experiment results. The transmission IR laser bonding has a potential in the local precise bonding in MEMS or Lab-on-a-chip applications.

* Corresponding author : joohankim@snut.ac.kr

(Received July 4, 2005)

Key Words : Laser, Bonding, Micro, Transmission, Polymer

1. 서 론

폴리머 마이크로 장치는 화학분석 또는 DNA 감지 및 분리와 같은 생명공학과 관련된 응용분야에서 많이 이용되고 있다. DNA 분석에 특화된 마이크로 장치는 모세관 전기영동법(micro-capillary electrophoresis)을 위한 마이크로 채널을 포함하고 있다(Fig. 1)[1]. 이러한 구조는 크로마토그래피(chromatography)와 같이 미세 채널 내에서 충진된 물질과 분리하고자 하는 물질(DNA)을 동시에 넣어 확산이 일어나게 하고 그 확산차에 의해 물질 감지와 분리를 가능하게 한다.

생명공학에 쓰이는 마이크로 장치의 제작에 있어서는 실리콘이 그 주된 재료로 이용되어 발전되어 왔는데[2] 그 이유는 기존의 광-리소그래피(Photo-Lithography)를 이용하여 미세 패턴을 쉽게 만들 수 있고 대량생산에 용이하다는 점 때문이다. 근래에 들어 실리콘에 비해 더 값싸고 쉽게 미세 패턴을 만들 수 있는 대체 재료의 필요성이 경제적 관점에서 제기되어 왔다. 폴리머는 이러한 미세 패턴 가공에 쓰일 수 있는 대체 재료로 뛰어난 성질을 가지고 있어 실리콘을 기반으로 한 마이크로 시스템을 대체하는데 있어서 가장 적절한 재료로 여겨진다. 이에 근래에 많은 폴리머 마이크로 시스템에 대한 연구가 수행되어 왔는데[3] 폴리머는 실리콘보다 10배 이상 경제적이며 실리콘이 갖지 못하는 다양한 성질을 갖는 등의 장점을 가지고 있다. 대표적으로 폴리이미드(polyimide) 또는 아크릴(acryl) 같은 폴리머의 광학적 투명성은 마이크로 장치와 같은 미세 유체 장치에 있어서 그 시스템 내부에 대한 정보를 광학적으로 직접 얻을 수 있다는 점이 큰 장점으로 여겨진다.

폴리머 마이크로 장치를 만들기 위해서는 폴리머 플레이트에 미세 구조를 위한 가공 공정이 필요하고 패키징 과정을 통해 특별한 기능을 가진 시스템으로 이용될 수 있다. 이러한 공정 중 패키징 과정에 중요한 세부

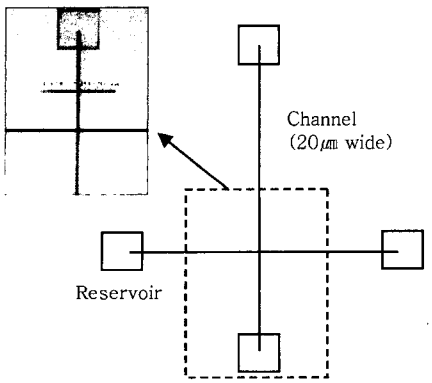
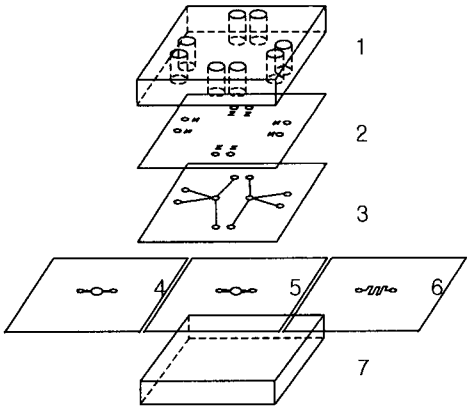


Fig. 1 A polymer micro device: cross-shape channel and reservoirs as a micro-capillary device for DNA analysis

공정이 마이크로 접합 공정이다. 실리콘을 재료로 하는 마이크로 시스템과는 다른 재료를 이용하고 있기에 그 접합 공정도 이에 맞게 개발될 필요가 있다. 폴리머 접합은 크게 두 가지로 그 종류를 분류할 수 있는데 첫 번째로는 접합물질을 이용하는 방법이고 두 번째의 방법은 접합면에 에너지를 가하여 소성 열변형을 일으켜 이에 따른 접촉면의 분자간의 결합에 의해 접합을 발생시키는 방법이다. 첫 번째 방법의 대표적인 예로는 에폭시(epoxy) 또는 자외선 접합제(UV curing adhesive)를 이용하는 방법이다. 이 방법의 장점으로는 쉽게 접합제를 표면에 도포할 수 있으며 그 접합력이 매우 강하다는 점이다. 하지만 높은 광학적 투과성을 요구하는 일부 마이크로 시스템에서는 굴절율이 그 접합층에서 달라질 수가 있고 또한 그 접합물질이 미세 가공구조에 스며들어 그 시스템 자체를 불량으로 만들 수 있는 단점이 있다. 덧붙여 접합제에서 발생할 수 있는 기포 등은 시스템의 불균질성을 만들어 낼 수 있기에 그 공정의 조작에 있어서 세밀한 주의가 필요하다. 두 번째 공정 방법의 예로는 접합면에 열이나 초음파 등의 에너지를 가하여 접합을 하는 공정이 있다. 이는 접촉면에서의 분자간의 결합을 유도해냄으로써 접합이 되었을 때 그 결합면이 직접적으로 접합되는 장점을 가지고 있어서 실제 높은 에너지를 이용한 매크로 스케일(macro-scale)의 접합에 있어서 광범위하게 쓰이고 있다. 마이크로 시스템이나 미세 유체 장치의 접합에 경우 접합면의 미세패턴이 그 에너지로 인해 쉽게 변형될 수 있어 그 접합 에너지를 세밀하게 제어해 주어야 하는 공정상의 특징을 갖고 있다. 또한 한 가지 기능만을 담당하는 마이크로 장치나 이러한 장치들이 복합적으로 연결된 랩온어칩 (Lab-on-a-chip)같은 경우(Fig. 2) 전체적인 접합뿐만 아니라 미세 부분의 선택적 접합도 필요하다[4,5]. 실제적으로 전체 접합에 경우 미세 형상의 위치에 따라 접합이 성공적으로 되지 않는 부분도 생기며



1. a plastic housing layer with four inlet ports and four outlet ports,
2. a polymer cover layer with micro-valves,
3. a micro-channel layer,
4. a micro-reaction chamber layer,
5. a diffuser micro-pump layer,
6. a micro-mixing channel layer,
7. a glass or plastic substrate.

Fig. 2 Schematic design of a Lap-on-a-chip

이러한 것을 복구하기 위해서는 새로운 미세 국소 접합 공정이 고려돼야 한다.

레이저 투과 접합은 광 투과성이 높은 폴리머와 불투명한 폴리머를 레이저를 이용해 접합하는 공정이다. 공정의 기본 원리는 Fig. 3에 나타나있다. 접합이 되는 두 개의 시험편은 광학적으로 투명한 폴리머와 불투명한 폴리머로 구성되어 있다. 광학적으로 투명한 파트 쪽으로 레이저가 조사되면 부분적으로 투명한 파트를 거쳐 일부는 반사 흡수되지만 조사된 대부분의 에너지가 불투명한 파트에 흡수된다. 이때 국부적으로 그 접촉면에 열이 발생하게 되고 이를 통하여 두 파트가 접합된다. 레이저 투과 접합은 원래 미세 부품이 아닌 수 mm의 크기를 가진 플라스틱의 접합을 목적으로 개발되었다[6,7]. 그 공정방법에 있어서는 CO_2 레이저, Nd:

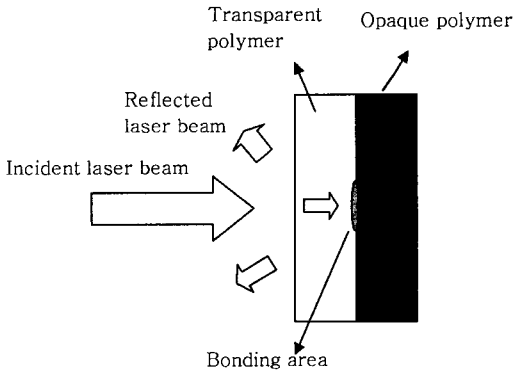


Fig. 3 Schematic diagram of transmission laser bonding

Yag 레이저, 다이오드 레이저 등과 같이 다양한 레이저를 이용하여 접합면에서 수 mm 에서 수십 mm의 레이저 빔의 크기를 가지고 접합속도를 최적화하는 방향으로 연구되어 왔다[8-14]. 또한 이와 더불어 레이저 출력에 있어서도 수십 W에서부터 수 kW까지 비교적 높은 출력원을 이용한다[10,15,16]. 레이저 투과 접합은 그 에너지 소스를 집속된 레이저빔으로 하기 때문에 이를 마이크로 공정에 응용한다면 접합을 위한 에너지를 세밀하게 조종할 수 있고 이를 통해 미세 국소 접합을 가능하게 한다.

일반적인 접합과는 달리 마이크로 사이즈에서의 접합은 그 접합면에서 레이저 빔의 크기가 마이크로 정도의 크기이고 세밀한 접합을 필요로 하기 때문에 정확한 접합 에너지의 예측 및 측정이 필요하다. 지금까지 연구에서는 두 개의 다른 광학적 특정을 지닌 폴리머에 있어서 정확한 접합에너지를 투과율과 반사율에 기반하여 예측하지 않고 대략의 투과율 값만을 (약 80%) 이론적 계산과 그 공정 조건을 위해 사용해 왔다[10,12,14,17]. 이는 일반적인 폴리머 접합일 때는 그것이 중요한 공정 변수가 아닐 수 있으나 실제 폴리머 마이크로 장치에 쓰일 수 있는 미세 접합일 경우 접합부의 크기를 세밀하게 조절하기 위해 접합면에서의 레이저빔에 의한 에너지를 정확히 예측할 필요가 있다.

본 연구에서는 기존의 레이저 투과 접합의 원리를 응용하여 미세한 국소 접합에 이용될 수 있도록 레이저 투과 마이크로 접합에 관한 연구를 수행한다. 미세 접합에 필요한 레이저빔의 에너지를 예측하기 위해 광학적 모델로부터 그 접합면에 흡수되는 레이저빔의 양을 정확히 계산하고 최적의 공정 조건을 산출하며 실험을 통해 예측된 공정조건을 검증한다.

2. 접합면 부분의 모델링

본 공정으로 접합된 두 폴리머의 접합 품질은 접합된 부분의 강도, 접합부분의 광학적 성질, 접합면에서의 기포 등의 존재유무 등과 같은 것으로 측정될 수 있고 이는 두 폴리머의 접촉면에 레이저가 조사되었을 때 접합부분의 시간에 따른 온도 변화와 밀접한 관계가 있다. 예를 들어 너무 낮은 레이저 에너지를 이용해 접합을 시도하였을 경우 실제로 접합이 발생되지 않거나 너무 높은 레이저 에너지를 이용하는 경우 접합은 되어지나 두 면에서의 미세 형상들의 변형 또는 기포가 발생되어 질 수 있다. 그러므로 레이저가 조사된 면에서의 시간에 따른 온도변화가 필요하며 이는 열전도 모델과 경계조건을 통해 해석되어질 수 있다. 두 접합면이 어떤 공기층 없이 완전한 접촉을 하고 있다고 가정한다면 온도 변화는 다음과 같은 전도방정식으로 나타낼 수 있다[18].

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) \tag{1}$$

여기서, T는 온도, t는 시간, ρ는 밀도, C_p는 비열, k는 열전도계수를 나타낸다. 레이저빔이 조사되는 면에서의 초기조건과 경계조건은 다음과 같이 나타난다.

$$-k_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} = -k_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} + q'', \quad at\ x = 0 \tag{2a}$$

$$T_1 = T_2, \quad at\ x = 0 \tag{2b}$$

$$T_1 = T_0, \quad at\ x = d \tag{2c}$$

$$T_2 = T_0, \quad at\ x = d \tag{2d}$$

여기서 q''는 레이저빔이 그 면에 흡수될 때 발생하는 단위면적당 에너지 파워이고, T_1 과 T_2는 두 개의 폴리머의 온도를 나타내며, T_0는 주위 온도 그리고 d는 각 폴리머 층의 두께를 나타낸다. 본 방정식을 풀기 위해서는 에너지빔이 조사되었을 때 어느 정도의 에너지가 투과되어 접합면에 도달하는 가를 알아야 한다. 즉 흡수된 면에서의 단위면적당 파워는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q'' = I \times T \tag{3}$$

여기서 I는 접합면에 흡수되기 전의 레이저 에너지, T는 본 시스템의 투과도를 나타낸다. 여기서 T는 직접 투과되어 접합면에 흡수되는 부분과 투명한 폴리머 내부에서 반사되어 다시 흡수되는 부분의 합으로 구해진다. 실제적으로 흡수되는 레이저의 양을 접합면에서 직접 측정하기는 불가능하므로 어느 정도의 레이저빔이 투과 및 내부적 반사되어 접촉면에 다시 흡수되는 가를 이론적으로 유추하여야 한다. 내부적으로 반사되는 부분은 투명한 플레이트 안에서 계속적으로 반사되어 모든 에너지가 불투명한 면에 흡수되거나 투명한 면을 통해 공기중으로 완전히 반사될 때까지 계속되어진다. 그러므로 q''를 계산하기 위한 에너지의 투과도는 다음과 같이 계산되어진다[19].

$$T = \frac{(1-R_1)(1-R_2)\tau}{1-R_1 R_2 \tau^2} \tag{4}$$

여기서, R_1 ,R_2,와 τ는 각각 첫 번째 면 (공기와 투명한 플레이트 사이)과 두 번째 면(투명한 플레이트와 불투명한 플레이트 사이)에서의 반사도, 그리고 투명한 부분의 투과상수를 나타낸다. 반사되는 특성은 반드시 반사가 발생하는 면에서 결정되어야 하고 이는 프레넬의 식(Fresnel's equation)으로 계산될 수 있다[19].

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2 + k_2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2} \tag{5}$$

여기서 n_1, n_2, k_2는 각각 입사면과 투사면에서의 복소수 굴절율의 실수 부분이고, k_2는 투사면에서의 허수 부분이다. 광학적으로 투명한 플레이트의 k_1의 값은 매우 작으므로 본 식에서는 생략되어질 수 있다. 실제 레이저 공정에 있어서 레이저빔의 조사는 접합할 플레이트에 수직 방향에서 이루어진다. 그러므로 각각의 면에서 반사율은 입사각이 90°인 경우가 일반적으로 필요하다. 하지만 이 값을 구하기 위해 수직 방향에 센서를 위치시킬 경우 그 센서 자체가 레이저빔의 조사를 방해함으로 직접적인 반사율의 측정이 어렵다. 이를 해결하기 위해 입사각을 변형시켜가며 얻은 수치를 통해 수직 방향의 반사율을 유추하는 방법을 이용할 수 있다. Fig. 4는 수직 방향의 반사율을 구하기 위해 두 개의 폴리머 플레이트에 관한 반사도를 그 입사각에 대해 구한 실험결과이다.

투명한 플레이트의 k의 값을 결정하기 위해 투과율 실험을 통해 투과율의 값 (투명한 폴리머의 파장에 따른 레이저빔의 투과 정도)을 구하고 다음의 식에 대입하여 k를 계산한다. 레이저의 파장(λ)보다 큰 값을 가지는 두께(d)의 광학적으로 평평한 플레이트에 있어서 ($d \rangle\rangle \lambda$) 투명한 폴리머의 파장에 따른 흡수도는 입사된 에너지와 투과된 에너지의 비로써 결정되어진다. 투과

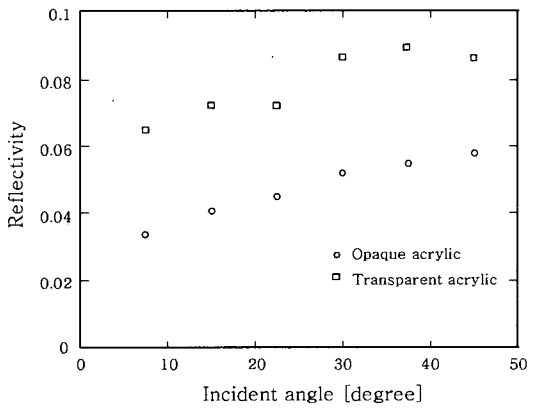


Fig. 4 Reflectivity Vs. incident angle

상수(τ, transmission coefficient)는 다음과 같이 계산되어진다[19].

$$\tau = e^{\left(\frac{-\kappa d}{\cos\theta}\right)} = e^{\left(\frac{-4\pi K d}{\lambda\cos\theta}\right)} \tag{6}$$

여기서, κ는 흡수 상수, λ는 레이저 파장, k는 복소수 굴절율의 허수 부분, 그리고 $d/\cos\theta$는 빛이 플레이트를 투과해서 나아가는 거리를 나타낸다. 식 (5) 와 (6)을 통하여 투명한 폴리머 플레이트와 불투명한 폴리머 플레이트의 복소수 굴절율을 구할 수 있으며 계산되어진 값은 각각 1.45 - i 1.51 × 10^{-6} 과 1.45 - i 1.88 × 10^{-1}으로 얻어졌다. 이를 통해 두 개의 플레이트가 접촉하여 있을 때의 반사도를 식 (5)를 통해 구할 수 있으며, 구해진 값은 실제 시스템에서 에너지가 흡수될 때 필요한 부분 즉 투과도를 결정하는데 쓰일 수 있다. 이를 통해 두께 약 3 mm의 투명한 폴리머 플레이트와 이와 접촉하고 있는 불투명한 폴리머 플레이트 면에 전달되는 에너지의 비는 87.5%라는 것이 계산된 수치를 통해 얻어 졌다. 이 결과는 식 (1)의 해를 구하는데 쓰일 수 있으며 구해진 시간에 따른 온도의 변화가 Fig. 5와 같이 얻어진다. 여기서 x는 레이저빔이 조사된 면으로부터 두께방향으로의 거리이다. 그림에 나타난 온도의 변화 중 105℃ 이상의 해는 온도의 상승에서 오는 상태의 변화(고체에서 액체)에 따르는 광학 물성치에 변화를 고려하지 않았으므로 실제적으로 그 의미를 가지고 있지 않다.

3. 실험을 통한 검증

본 공정의 실험 장치는 Fig. 6과 같이 레이저, 원형 마스크, 그리고 렌즈 등의 조합으로 구성되어 있다. 레

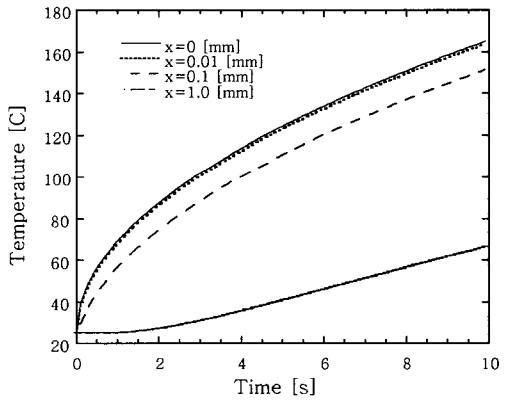


Fig. 5 Temperature profile on the opaque side at a laser power intensity of 0.42 W/mm^2 (x: the depth of the plate from the irradiated surface)

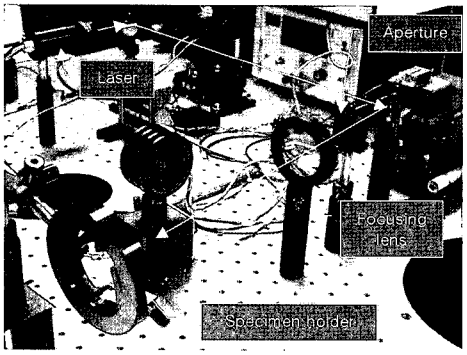


Fig. 6 Experimental setup

이저 발진기 자체에서 나오는 빔은 그 모드가 가우시안(Gaussian mode)로 되어 있고 그 직경이 약 20mm 정도이다. 정밀한 접합을 위해 접합면에서 마이크로 사이즈의 빔 크기가 필요하고 그 기본 직경을 줄이기 위해 직경 2mm의 원형 마스크가 사용되었다. 이러한 마스크를 사용하는 경우 마스크를 통과한 빔의 에너지 밀도는 원심 방향으로 비교적 작은 정도의 변화만 가지게 되므로 그 모드를 가우시안 모드(Gaussian mode)로부터 플랩탑 모드(Flat-top mode)로 근사화가 가능하다. 레이저 소스로는 9W의 화이버 적외선 레이저(SDL FL10, λ=1100nm)가 사용되었으며 200mm의 촛점거리를 가진 렌즈(Edmund, DCX lens)가 레이저빔의 에너지 밀도를 높이기 위해 사용되었다. 접합에 쓰인 폴리머는 아크릴(Goodfellow, ME303031)을 사용하였다. 아크릴에 대한 물성치는 Table 1에서 정리되어 있고 자세한 공정 조건은 Table 2에 나타나있다.

Fig. 7은 3, 9, 30, 60 초간의 레이저 조사에 의해

Table 1 Properties of acryl

Density	949 kg/m^3
Reflective index	~ 1.4
Viscosity	6.6 × 10^2 m^2/s
Specific heat	2.02 kJ/kg · ℃
Thermal conductivity	0.1488 W/m^2 · ℃
Softening temperature	105 ℃

Table 2 Parameters for laser bonding

Power	29.5 mW
Power intensity	0.42 W/mm^2
Raw beam diameter	20 mm
Aperture diameter	up to 2 mm
Spatial mode for the raw beam	Gaussian
Focused laser beam diameter	0.6 mm
Exposure time	1 - 60 s
Focal length of the lens	200 mm
Target position from the lens	240 mm

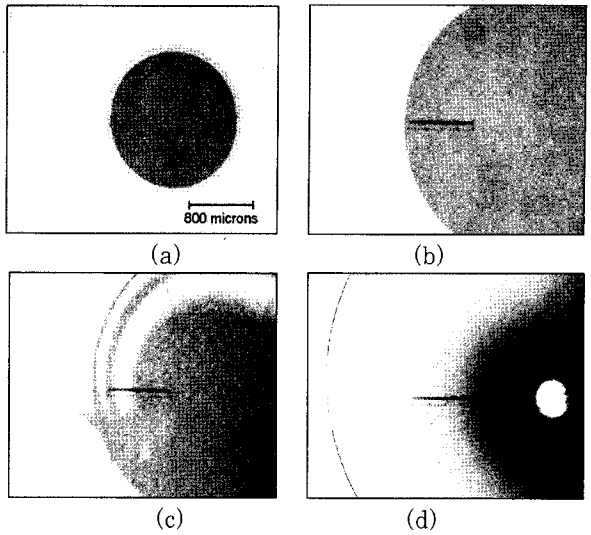


Fig. 7 Photographs of the bonded samples with transmission laser bonding. Laser irradiation time: (a) 3 sec, (b) 9 sec, (c) 30 sec, and (d) 60 sec

접합된 시험편이다. 기본적으로 3 초에서 높은 품질의 접합이 얻어졌음을 광학현미경의 통해 확인할 수 있다. 10초 이상의 접합에서는 레이저 에너지가 과다하여 접합면에 변형이 생겨 있음을 또한 확인할 수 있다. 조사된 레이저빔의 직경이 접합부에서 약 600㎛인 것으로 미루어 볼 때 가장 이상적인 접합은 약 3초 이전에 발생하는 것으로 여겨진다. 실제로 Fig. 5의 결과는 깊이 방향의 1차원 정보만을 예측하고 있기 때문에 예상된 접합부의 크기와 실제 접합된 2차원 접합부는 그 크기가 다르게 얻어질 수 있다. Fig 7에서 보여지듯 실제 3초간의 레이저빔 조사에 따른 접합부의 크기는 예상보다 약 20%정도 크게 측정되었으며 이는 깊이 방향과 동시에 접합면 방향으로도 열전달에 의해 접합이 동시에 진행됨을 알 수 있다. 아크릴의 소성변형 온도가 105℃ 임을 감안할 때 Fig. 5에서 계산된 접합 표면(x=0)의 온도는 약 100℃ 정도로 그 접합이 일어날 때의 온도가 소성 변형의 온도와 근접해 있다. 결론적으로 적절한 접합부를 얻기 위해서는 소성변형이 일어나는 온도로 레이저 에너지를 정확히 조절해야 하고 접합부의 크기는 레이저빔의 초점크기, 노출시간, 에너지 밀도 등에 의해 결정이 되어짐을 유추할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 폴리머 마이크로 장치의 제작 공정에 쓰일 수 있는 레이저 투과 마이크로 접합 공정을 소개하였고 본 공정은 다른 접합 물질 없이 국소적인 미세 접합을 해낼 수 있는 특성이 있다. 공정에 필요한 조건

들은 접합면에서의 과도한 변형 또는 손상을 막기 위하여 정밀하게 조절되어야 한다. 접합면뿐만 아니라 접합이 이루어지는 면의 깊이는 3차원으로 확장된 이론과 이에 따른 수치적 해석이 필요하나 이에 따른 기본 데이터는 본 해석에 쓰인 것을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 투명한 폴리머와 불투명한 폴리머의 레이저 접합을 그 연구의 대상으로 하였으나 두 개의 투명한 폴리머 플레이트에 얇은 레이저 흡수층을 삽입한다면 미세 형상들이 있는 투명한 폴리머 플레이트를 본 공정을 통해 접합할 수 있다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 레이저 투과 접합에서 파생된 레이저 투과 마이크로 접합은 미세 구조를 가진 폴리머를 선택적으로 또한 정밀히 접합하는데 쓰일 수 있다.

2) 레이저 관련 각종 공정변수를 조절함으로써 접합의 품질을 결정할 수 있고 고품질의 미세 접합부를 얻을 수 있다.

3) 최적화된 공정 조건을 얻기 위해서는 접합부위에 대해 정확한 에너지와 온도의 조절이 필요하며 이는 광학 및 열전달 이론을 통해 구해질 수 있다.

참 고 문 헌

1. G. Lee et al.: Sensors and Actuators B, **75** (2001), 142-148
2. M. Talary et al.: The International Society for Optical Engineering (SPIE), **3680**, 1999, 572 - 580
3. H. Becker and L. E. Locascio: Talanta, **56** (2002), 267 - 287
4. J. M. Ruano-Lopez et al.: Sensors and actuators B, 2005, in press
5. T. Fujii: Microelectronic engineering, **61-62** (2002), 907-914
6. H. Potente et al.: Journal of reinforced plastics and composites, **18** (1999), 914 - 920
7. R. Grimm: Advanced materials and processes, **3** (1995), 27-30
8. R. Grimm: Medical devices and diagnostic Industry, May (2001), 123-139
9. H. Haferkamp et al.: Lasers and Electro-optics Europe 2003 (CLEO/Europe 2003), June 2003, 566
10. J. M. P. Coelho et al.: Optical engineering, **42** (2003), 2265-3373
11. V. A. Kagan: Journal of reinforced plastics and composites, **23** (2004), 95-107
12. T. Hoult: Materials world, April (1999), 208-210
13. T. Ebert: Kunststoffe plast europe, **89** (1999), 58-60
14. S. D. Rostami et al.: British plastics and rubber, **5** (2005), 4-6
15. B. G. Bryden: The industrial robot, **31** (2004), 30-33
16. F. Becker and H. Pontente: Polymer engineering and science, **42** (2002), 365-374
17. K. Sato and Y. Kurosaki: Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'01), 2001, 1-6
18. F. P. Incropera and D. P. DeWitt: Fundamentals of heat and mass transfer (4th Edition), John Wiley & Sons, 1996
19. F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti: Introduction to optics (2nd Edition), Prentice-Hall Inc., 1987