안경테제조를 위한 친환경 아세테이트 수지의 레이저 접합특성에 관한 연구

윤성철*, 박승규*, 박중언**, 최해운†,✉

*계명대학교 대학원 기계공학과

**주식회사 반도옵티컬연구소

†계명대학교 공과대학 기계자동차공학부

Characterization of laser welding for biodegradable acetate polymer for glass rims

Sung Chul Yoon*, Sung Gyu Park*, Joong Un Park and Hae Woon Choi†,✉**

*Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung University, South Korea

**R&D Center of Bando Optical, Daegu, South Korea

†Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ. South Korea

Abstract

Laser beam was applied on the boundary of the polyurethane and biodegradable polyacetate polymers. The distributed laser passed through the polyurethane layer and heated the polyacetate layer, then the soften acetate was squeezed thorough the 1mm square slots of polyurethane for the mechanical joining. The surface roughness ranging between 0.28μm and 3.06μm had almost no effect on joining strength, but the optical properties of HD (High Definition) and UHD (Ultra High Definition) mode affected laser beam transmittance. The optimum laser power was found to be between 8watt and 10watt with 500mm/min of scanning speed. The joining boundary was characterized by optical and SEM analysis. Based on the experiment and characterization results, the laser energy was effective for the polymer joining and efficiency of joining.

Keywords: 3D printer(3D 프린터), polymer joining(이종폴리머 접합), laser welding(레이저용접), acetate(아세테이트)

1. 서 론

제조업에서는 Bottom Up 방식의 획기적인 기술의 일환으로 3차원 프린터가 최근 많이 활용이 되고 있고, 여러 가지 이점으로 그 시장도 급속히 성장하였다. 3D 프린터는 적층하는 방식과 사용하는 재료에 따라 다양한 기술로 구분될 수 있다. 적층방식은 압출, 잉크젯 방식의 분사, 광경화, 파우더 소결, 인발, 시트 접합 등으로 구분되며, 활용 가능 재료는 폴리머, 금속 뿐만 아니라 바이오 물질까지 매우 다양하다.[1,2]

이러한 3D 프린터의 가장 큰 장점은 시제품의 제작비용 및 시간 절감, 다품종 소량 생산(Mass customization) 과 함께 가정에서 개인맞춤형 제작도 가능하며, 3차원 복잡한 형상 제작도 용이하다. 또한 기존 prototype 이나 Mockup 제품에 비해서 획기적인 재료비 절감, 완제품 제작 시의 제조 공정 간소화와 함께 인건비·조립 비용 절감의 관점에서 많은 장점이 있다. 분야별로는 전자 및 기계부품 산업에서부터 대형구조물 제작 등 많은 산업분야에서도 주목을 하고 있다.[1,2]

3D 프린터로 생산되는 재료는 그 적층방식과 응용에 따라 다양하지만, 내구성이 있는 폴리머 계열은 대부분 우레탄 계열의 광경화성 수지다. 이러한 광경화성이나 열경화성 수지는 내열성, 내용제성, 기계적 성질, 전기절연성이 좋은 장점이 있으나, 제조원가가 높고, 경화 후 형상변경 및 재가공이 불가능 하며, 생산 주기가 길기 때문에 대량생산이 어렵다는 단점이 있다.

주로 FDM 방식의 재료로 사용되는 열가소성 수지는 경화공정이 필요 없으므로 생산주기가 단축되고 사출성형에 의한 대량생산이 비교적 용이하다. 또한 열성형에 의해서 반복적인 형상변경이 가

투고일 : 2014년 12월 15일 심사완료일 : 2014년 12월 23일
게재승인일 : 2014년 12월 24일
교신저자 : 최해운 ✉ hwchoi@kmu.ac.kr

능하며 디자인의 자유도가 높다.[2]

레이저기술은 제조공정의 핵심기술로서 산업전반에 광범위하게 적용이 되어서 정밀가공 및 로봇과 연동한 공정자동화에 크게 이바지 하였다. 레이저는 상용화 초기부터 현재까지 출력증대와 더불어 우수한 빔품질을 위한 기술개발이 꾸준히 이루어지면서 반도체에서 조선 분야까지 꾸준히 그 활용도가 증가 하고 있다.[3-6]

본 논문은 레이저를 이용하여 생분해성 열가소성 수지인 폴리아세테이트와 광경화성 수지인 폴리우레탄을 레이저 투과용접방법으로 접합한 연구결과를 보고한다. 이러한 접합의 원리는 레이저를 조사하여 가열된 아세테이트의 유동성을 좋게 하고, 열전도 방식으로 폴리우레탄과 접합 할 수 있게 하였다.

공정의 주요변수로는 레이저 출력(power), 이송속도(feed rate) 그리고 가압력(holding pressure)으로 설정하였다. 초기실험을 통해서 접합의 최적조건을 찾았으며, 반복실험을 통해서 기계적인 결합강도를 시험하였고, 주사전자현미경(SEM)을 통해 단면의 접합특성을 연구정리 하였다.

2. 이론적 배경 및 실험

2.1 이론적 배경

본 실험에서 적용된 접합은 총 5단계로 진행된다. ① 격자위로 조사된 레이저는 표면에서 상부 폴리우레탄 층의 상부표면에서 빔의 반사 또는 투과, ② 격자내부로 조사된 레이저빔의 내부산란, ③ 투과된 레이저 빔의 하부 폴리아세테이트 상부 흡수, ④ 경계면 열발생 및 상부 폴리우레탄영역으로의 열전도, 마지막으로 ⑤ 연화된 하부의 폴리아세테이트가 상부 폴리우레탄 격자사이로 압출되어 접합되는 단계로 나누어 볼 수 있다(Fig. 1).

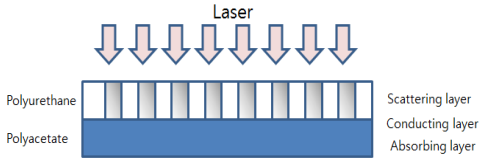


Fig. 1 Theory of laser joining.

우선 ① 단계에서는, 매질의 굴절률 차이에 의해 발생되는 경면 반사를 가정하면, 경면반사에 의한 손실은 식 (1)에 의해 계산될 수 있다.[9]

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

(n:polymer의 굴절지수, m:air의 굴절지수)

여기서 폴리머의 n값의 범위가 1.5-2.0임을 감안하고, m은 1이므로 약 4-11%의 반사율을 가질 것으로 예측된다.

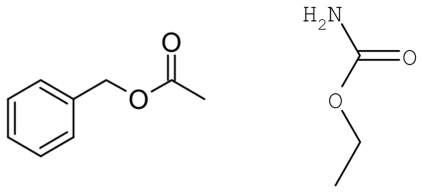
② 단계에서는 물질내의 미소입자들에 의한 다중산란이 발생하며, 이는 복사전달방정식(Equation of Radiative Transfer)로 해석될 수 있으며 본 연구 후속되는 이론연구에서 상세히 다루어질 예정이다.[10]

2.2 실험재료 준비

본 연구에서 사용된 재료 광경화성수지는 3D 프린터 제작사(3D Systems)에서 제공하는 우레탄 계열의 액상 수지이며 UV(Ultra Violet)광에 노출시 경화되는 특징이 있다. 또한, 열가소성 수지로는 불투명한 생분해성 셀룰로오스 아세테이트 수지를 사용하였다.

광경화성 수지인 폴리우레탄 수지는 화학약품에 잘 견디고, 전기절연성 및 기계적강도가 좋아서 구조재, 기포단열재, 기포쿠션, 탄성 섬유 등에 많이 사용된다. 또한, 신축성이 좋아 고무의 대체물질로도 사용하며 거품 구조를 가지기 때문에 탄성이 있고 견고하며 가벼운 특성이 있다.

실험에 사용된 생분해성 아세테이트 수지와 광경화성 폴리우레탄의 분자구조가 Fig. 2에 예시 되었다.



(a) acetate (b)polyurethane

Fig. 2 Chemical structure of mat'l.

본 연구에 사용된 셀룰로오스 아세테이트는 천연섬유로써 좋은 촉감과 다른 합성수지재료로 대체할 수 없는 안경테 제조에 있어 좋은 특성을 가진 유일한 천연섬유로 만든 소재이다. 비중은 약 1.22이며 변형온도는 약 85°C이다.

2.3 실험장비

본 연구에서 사용된 재료인 광경화성 수지는 3D 프린터로 제작 하였다. 3D 프린트 방식은 다중 노즐에서 mold와 support를 출력하며 이때 프린트 방식은 MJP(Multi-Jet Printing)방식이다. MJP 방식은 FDM 방식에 비해서 정교하며 기능테스트, 빠른 생산, 빠른 공구 등을 위해 이상적이다. 정밀도는 약 0.025-0.05mm 이며 최대 298mm × 185mm × 203mm 영역을 인쇄할 수 있다.

소재의 물성은 제조사 고유성분이며, 기본적으로 Urethane acrylate oligomers (20-40%), Ethoxylated bisphenol A diacrylate (15-35%), 그리고 Tripropyleneglycol diacrylate (1.5-3%)로 구성되고, 비등점은 200°C 이다.[7,8]

레이저 투과용접에 사용된 다이오드 레이저는 파장 808nm, 최대출력 60W이며 빔전달용 Fiber는 core size 400μm이 CW mode로 설정되어 있다. 접합시 일정한 가압을 주기 위하여 금형 스프링을 사용한 마운팅 지그를 사용하였다.

또한, 접합표면의 거칠기에 따른 접합력을 측정하기 위하여 HD(HIgh Definition) 모드와 UHD(Ultra High Definition) 모드로 샘플제작 후 접합강도를 실험하였다.

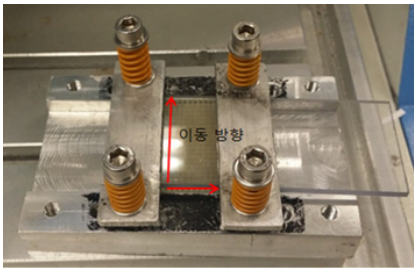
2.4 광투과 실험장치

투과층인 폴리우레탄의 광학특성을 실험하기 위하여 3D 프린터로 직경 27mm, 두께 0.5-5mm로 샘플을 제작하여서 적색, 녹색 그리고 청색영역의 파장을 가지는 레이저를 조사하여 투과율을 측정하였다.

투과층을 통과한 레이저는 적분구에 모아지고 입력대비 출력세기를 시간에 따라 적분하였다. 실험에 사용한 레이저의 파장과 샘플의 크기가 Table 1에 정리 되었다.

(a) 3D printer

(b) Diode laser

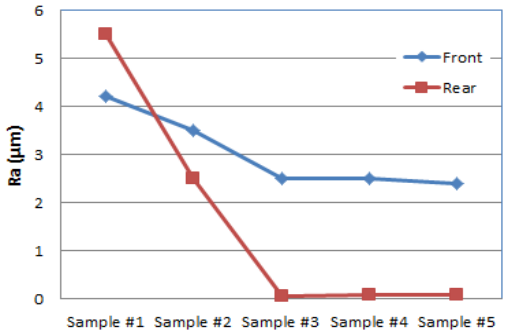


(b) Holding Jig

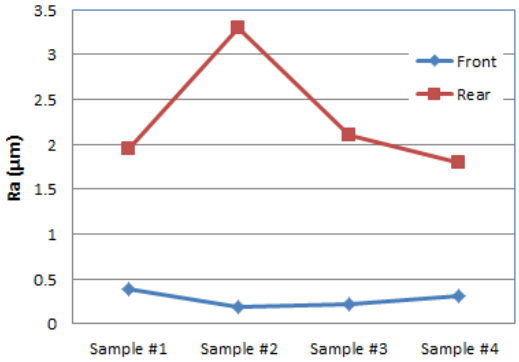
Fig. 3 Experiment setup.

Table 1 Optical property test specimen

Type	Blue	Green	Red
Wavelength	457nm	532nm	635nm
Thickness	0.5mm-5mm		
Diameter	27Φ		



(a) before treatment



(b) after treatment

Fig. 4 HD surface profile without post processing.

3. 실험 결과

3.1 표면 거칠기에 따른 접합력

3D 프린터에서 출력되는 폴리우레탄은 지지부분인 왁스 성분과 함께 출력이 되는데, 왁스 성분을 제거하기 전과 후로 나누고 3D 프린터의 출력 모

드에 따라 HD모드와 UHD모드로 결과를 얻었다. 결과적으로, 후처리 전의 평균표면거칠기(Ra)는 전면(front)에서 1.76μm, 후면(back)에서 3.06μm을 얻었다. 후처리 후의 평균 표면거칠기(Ra)는 전면 0.28μm, 후면 2.28μm로 낮아졌다(Fig. 4).

동일한 분석으로 UHD의 경우 후처리 전의 평균 표면거칠기(Ra)가 전면에서 0.82 μm, 후면에서 1.60μm을 얻었다. 후처리 후의 평균 표면거칠기(Ra)는 전면 0.67μm, 후면에서 0.77μm로 역시 더 낮아졌다. HD와 UHD의 평균 표면 거칠기를 비교해본 결과, UHD가 HD보다 더 매끄럽게 나타났다.

UHD 모드와 HD 모드로 제작된 샘플을 레이저 접합한 결과 접합성은 거의 차이가 없어, 표면거칠기에 의한 접합강도 영향은 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 실험에 사용한 샘플은 HD 모드에서 제작 하였고, 표면거칠기 대신 1mm 크기의 정방 슬롯을 만들어서 접합강도를 증대시키도록 설계하였다.

3.2 투과율 실험

표면 거칠기와 마찬가지로 프린터 방식에 따라 두께를 변화 시키며 투과율을 측정해보았다. 실험의 초기 조건인 RGB 레이저를 조사하여 적분구를 사용하여 두께별로 투과율을 측정하였다.

실험결과 UHD 모드에서의 투과성이 훨씬 좋게 나타났다. 이는 Mold 표면의 거칠기로 인해 산란도의 차이가 발생하였을 것으로 유추된다.

결론적으로 표면거칠기가 두 폴리머의 결합력에는 큰 영향을 미치지는 않지만, 투과층인 폴리우레탄의 광학특성에는 많은 영향을 미치므로, 원하는 접합강도를 얻기 위해서는 투과율을 감안한 입사 레이저의 강도를 조절해야 할 필요가 있다.

Table 2 Transmittance of HD mode

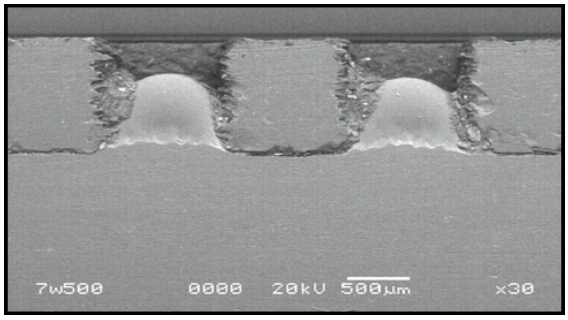
Thk. (mm)	HD		
	Blue (457nm)	Green (532nm)	Red (635nm)
0.5	6%	11%	7%
0.75	6%	12%	8%
1	6%	12%	8%
2	7%	17%	9%
3	5%	12%	7%
4	5%	12%	7%
5	4%	12%	8%

Table 3 Transmittance of UHD mode

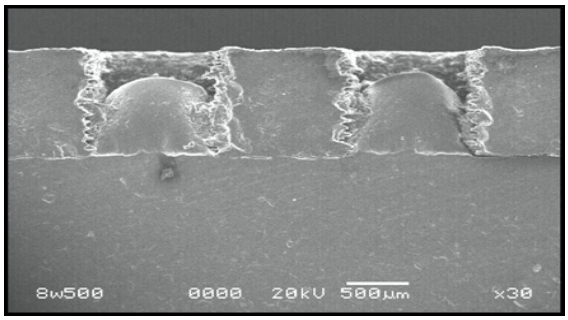
Thk. (mm)	UHD		
	Blue (457nm)	Green (532nm)	Red (635nm)
0.5	11%	26%	13%
0.75	11%	26%	13%
1	10%	24%	13%
2	10%	27%	14%
3	9%	29%	14%
4	8%	27%	14%
5	7%	24%	18%

3.3 접합실험 단면촬영

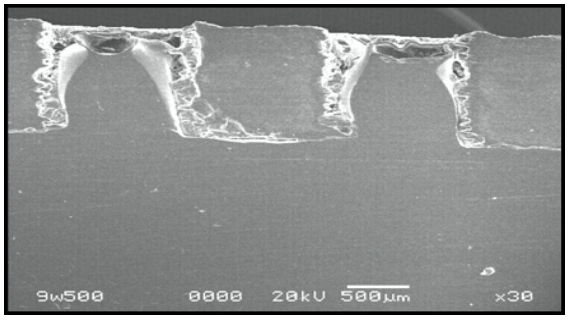
HD 모드에서 제작된 샘플에 광학적특성을 고려하여 최종 접합부에 도착하는 레이저의 출력이 7W에서



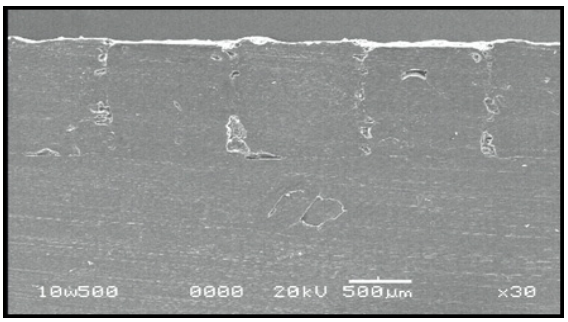
(a) P = 7Watt, 500mm/min



(b) P = 8Watt, 500mm/min

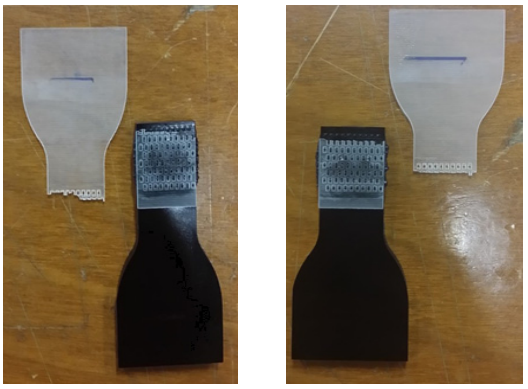


(c) P = 9Watt, 500mm/min



(d) P = 10Watt, 500mm/min

Fig. 5 SEM of joining.



(a) P = 9Watt, 500mm/min (b) P = 10Watt, 500mm/min

Fig. 6 Sample shear strength test.

10Watt 범위가 되고, 이송속도는 500mm/min으로 하여 접합실험을 하였다. Fig. 5에서 정리된 바와 같이 접합출력이 증가함에 따른 접합부의 형상이 다르게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 출력이 높을수록 아세테이트가 더 높은 높이로 접합이 되었고, 10W에서 완전히 충진 된 것을 알 수 있었다.

일반적으로 열가소성 수지의 접합의 경우는 열로 인해서 폴리머체인이 재형성되어 새로운 형상을 이루게 되고, 화학적 접합의 경우 crosslinking이 이루어져서 접합이 이루진다. 하지만, 본 연구의 접합원리는 출력에 따른 접합의 형태를 보았을 때, 표면에서의 연화된 아세테이트 수지가 상부 폴리우레탄의 가압에 의해서 압출(squeeze) 되면서 격자사이로 밀려나오는 원리로 접합됨을 알 수가 있다.

전자주사현미경으로 촬영하였을 때, 일부 기공이 관찰 되었지만 화학적 접합이 아닌 기계적 접합을 목적으로는 완전한 접합이 이루어 졌다. 완성된 시편은 인장시험기에서 전단강도 테스트를 실시하였다.

평균 전단강도는 약 0.83N/mm^{2}으로 측정 되었으며 이는 모재의 인장강도 1.3N/mm^{2}의 약 64%로서 충분한 전단강도가 확보 되었으며, Fig. 6에서 예시된 바와 같이 모두 모재부분에서 파손되는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

레이저를 이용하여 친환경수지로 제작되는 안경테를 접합하기 위한 기초기술로 광경화성 수지인 폴리우레탄과 열가소성 수지인 아세테이트 수지 접합을 연구하였다. 표면 거칠기 Ra 0.28-3.06μm 범위의 경우 표면접합의 강도에 미치는 영향은 극히 미미한 것으로 나타났고, 기계적접합을 위해 준비한 격자형상 접합에서 충분한 접합강도를 얻을 수 있었다.

3차원 형상제작을 위해서 광경화성 수지를 이용한 재료에 3D 프린터 기술을 사용하여서 1mm 정방격자를 만들었고, 하부의 아세테이트 소재에 레이저를 조사한 결과, 가압에 의해서 기계적접합이 이루어짐을 확인 할 수 있었다.

레이저 투과실험을 통해서 광경화성 수지의 투과율을 측정하고, 손실을 감안한 레이저를 조사한 결과 10W에서 최적의 접합이 이루어짐이 실험적으로 확인이 되었다.

실험에 사용된 808nm의 파장을 가지는 레이저를 사용하여 상부 조직(폴리우레탄)은 레이저에 의해서 손상 되지 않고, 하부 재질(아세테이트)이 접합을 이루기 위한 유동을 충분히 확보하는 접합조건이 확보 되었으며, 이를 통해 극성이 다른 두 폴리머가 접합이 되었다.

실험의 결과 3D 프린터로 제작된 격자를 80%-100% 이상 채우는 접합이 이루어짐을 SEM을 통해 확인하였다. 상부의 조직은 레이저에 의해 손상되지 않고 하부의 폴리머 조직은 접합을 위한 유동이 충분히 이루어 졌으며, 이를 통해 극성이 다른 두 폴리머가 접합이 가능함을 확인 하였다.

본 연구를 통해서 열(광)경화성 수지와 열가소성 수지의 레이저를 이용한 기계적 접합가능성을 확인하였다.

5. 후 기

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

Reference

1) H. Jung, J, Kim, Fabrication of Piezo-Driven Micropositioning Stage using 3D printer, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 277-283, 2014.
2) Kwak, K. H. and Park, S. W., “Global 3D Printer Industry Technology Trends Analysis,” J. of the KSME, Vol. 53, No. 10, pp. 58-64, 2013.
3) 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)
4) H. Shin, H. Choi, S. Kim, Hybrid process for lubricant groove on linear guides, Int. J. Adv. Manf. Technol., 46 (2010), 1001-1008.
5) 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)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)
6) C. Song, H. Choi, Laser energy optimization for dissimilar polymer joining, Journal of Korean Society of Laser Processing, 32-2 (2014), 63-69 (in Korean)
7) H. Choi, S. Yoon, J. Ma, D. Bang, Fabrication of micro-reactor by 3D printing machine, Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 23-3 (2014), 218-222.
8) S. Yoon, J. Ma, D. Bang, H. Choi, Astudt on Joining of 3D thermoset and biodefradable Polymers, Joutnal of Korean Welding and Joining Society, p. 20 (2014)
9) Hecht, E. : Hecht Optics, Addison Wesley, forth edition, pp. 129-135.
10) Cox, A., DeWeerd, A., Linden, J.: An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections. Am. J. Phys. 70(6), 620–625 (2002)