



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2011 년 8월
석사학위 논문

레이저 가공패턴에 따른 플라스틱
광섬유 측면 발광휘도 특성에
관한 연구

조선대학교 대학원

물 리 학 과

마 혜 준

레이저 가공패턴에 따른 플라스틱
광섬유 측면 발광휘도 특성에
관한 연구

**A study on side luminance characteristic of plastic optical fiber
according to laser processing pattern**

2011 년 5 월 30 일

조선대학교 대학원

물 리 학 과

마 혜 준

레이저 가공패턴에 따른 플라스틱
광섬유 측면 발광휘도 특성에
관한 연구

지도교수 최 은 서

이 논문을 이학 석사학위신청 논문으로 제출함

2011 년 5 월

조선대학교 대학원

물 리 학 과

마 혜 준

마혜준의 이학 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 신 용 진

위 원 삼성광통신 연구원 문 대 승

위 원 조선대학교 교수 최 은 서

2011 년 5 월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	
제 2 장 이 론	
제 1 절 광 산란	
1. 광 산란의 종류와 특징	
2. 산란패턴 연구	
제 2 절 레이저 가공	
1. 레이저 빔의 특성	
2. 가공용 레이저의 특징	
제 3 장 실험	
제 1 절 모델링을 통한 전산모사	
1. 전산모사 수행 방법	
2. 산란패턴 모델링	
제 2 절 샘플 제작	
1. Plastic optical fiber의 구조와 특성	
2. 광원 및 광원모듈 제작	
제 3 절 산란패턴 가공	
1. 산란패턴 가공 시스템	
2. 레이저에 의한 산란패턴 가공	
제 4 절 휘도 측정 시스템	
제 4 장 결과 및 고찰	
제 1 절 산란패턴 조건에 따른 전산모사 결과 분석	

제 2 절 산란패턴 조건에 따른 레이저 가공 및 측정 결과 분석

제 5 장 결 론

참고문헌

List of Figures

그림 2-1. BSDF에 사용되는 산란모델 (a) 각 산란모델에 대한 BSDF
(b-1) Lambertian (b-2) Gaussian
(b-3) CosNth (b-4) BSDF (각 산란모델에 적용)

그림 2-2. 도광판에서 산란패턴의 역할 (a) 내부전반사로 인하여 빛이 전공간에 분포
되어있는 도광판의 모습 (b) 산란패턴으로 인하여 상면으로 빛을 방출하는
도광판의 모습

그림 2-3. TEM₀₀ 모드의 빔을 렌즈로 집속시키는 경우에 초점면에서 얻어지는 빔의
크기와 초점거리

그림 3-1. 시뮬레이션을 위한 POF 모델링

그림 3-2. 산란패턴 모형

그림 3-3. POF의 구조

그림 3-4. 광원부 모듈 제작 (a) LED 구동회로 (b) 제작된 구동 모듈

그림 3-5. 패턴 가공을 위한 CO₂ 레이저 시스템 도식도

그림 3-6. CO₂ 레이저를 이용한 패턴 가공

그림 3-7. 분광 방사 휘도계를 이용한 측정

그림 4-1. 산란패턴 모형에 따른 휘도 분포

그림 4-2. depth1의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
(a)D1-L1 (b)D1-L2 (c)D1-L3 (d)D1-L4 (e)D1-L5

그림 4-3. Depth1의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-4. depth2의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
(a)D2-L1 (b)D2-L2 (c)D2-L3 (d)D2-L4 (e)D2-L5

그림 4-5. Depth2의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-6. depth3의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
(a)D3-L1 (b)D3-L2 (c)D3-L3 (d)D3-L4 (e)D3-L5

그림 4-7. Depth3의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-8. depth4의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
(a)D4-L1 (b)D4-L2 (c)D4-L3 (d)D4-L4 (e)D4-L5

그림 4-9. Depth4의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-10. depth5의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
(a)D5-L1 (b)D5-L2 (c)D5-L3 (d)D5-L4 (e)D5-L5

그림 4-11. Depth5의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-12. 25가지 type중 휘도분포가 좋은 5가지 type 휘도분포 비교 그래프 ……

그림 4-13. D1-L1의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프 ……

그림 4-14. D1-L4의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프 ……

그림 4-15. D2-L4의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프 ……

그림 4-16. D3-L2의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프 ……

그림 4-17. D3-L5의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프 ……

그림 4-18. front face에 대한 각 Point의 광량 그래프

(a) D1-L1 (b) D1-L4 (c) D2-L4 (d) D3-L2 (e) D3-L5 ……

그림 4-19. back face에 대한 각 Point의 광량 그래프

(a) D1-L1 (b) D1-L4 (c) D2-L4 (d) D3-L2 (e) D3-L5 ……

List of Tables

- 표 2-1. 도광판 특수처리방식의 종류와 특징 : printing 방식(좌), V-cutting 방식(우)
- 표 2-2. 도광판 특수처리방식의 종류와 특징 : 사출방식(좌), 레이저 방식(우)
- 표 2-3. 가공용 레이저 시스템 사양
- 표 3-1. 산란패턴 파라미터
- 표 3-2. 플라스틱 광섬유 특성
- 표 3-3. 실험에 사용된 LED 특성
- 표 3-4. CO₂ 레이저 시스템 사양
- 표 3-5. 분광 방사 휘도계 시스템 사양
- 표 4-1. depth1에 대한 length와 distance의 값
- 표 4-2. depth1의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값
- 표 4-3. depth2에 대한 length와 distance의 값
- 표 4-4. depth2의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

표 4-5. depth3에 대한 length와 distance의 값

표 4-6. depth3의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

표 4-7. depth4에 대한 length와 distance의 값

표 4-8. depth4의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

표 4-9. depth5에 대한 length와 distance의 값

표 4-10. depth5의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

표 4-11. 가공된 광섬유의 측면에서 측정한 휘도 값

ABSTRACT

레이저 가공패턴에 따른 플라스틱 광섬유 측면 발광 휘도 특성에
관한 연구

**A study on side luminance characteristic of plastic optical fiber according to
laser processing pattern**

Hye Joon Ma

Advisor : Prof. Eun Seo Choi Ph.D.

Department of Physics

Graduate School of Chosun University

In this paper, we proposed a new light source for utilization in liquid crystal display. Light emitted from the side of laser-processed plastic optical fiber(POF) showed high illumination near the light source that resulted in lose of uniformity overall the POF. To overcome this problem, scatterer pattern on the POF was inscribed by using CO₂ laser, which intended to induce uniform illumination along the processed POF. Prior to experimental implementation, we designed scatterer pattern and carried out simulation with it for evaluation of illumination performance from the side-emitting POF. In experiment, LED having divergence angle of 30° was placed an end of the POF and modeled pattern was fabricated on the POF. Using this experimental setup, we measured the illumination

performance of the POF. With changing the design parameters, we want to make uniform illumination from the POF. From the simulation, proper fabrication conditions for scatterer patterning could be determined. Determined parameters was used for the implementation of side-processed POF with the CO₂ laser, and measured experimental results of the illumination proved the feasibility of the simulation in the scatterer's pattern design.

제1장 서론

최근 대표적인 영상매체는 LCD(Light Crystal Display)이다. 이는 얇은 평판형태로 구형이 가능하고 적은 소비 전력으로 모든 원색표현이 가능한 장점을 가지고 있기 때문이다. 이러한 장점으로 인해 소형 휴대폰에서부터 대형 TV까지 다양한 영상매체에서 이용하고 있으며 시장 규모도 크게 확대되고 있다. 하지만 LCD는 자체 발광을 할 수 없는 비발광소자로 영상매체의 역할을 하기 위해서는 별도의 외부광원을 필요로 하는데 그 광원을 구성하는 시스템을 백라이트 유닛(BLU, Back Light Unit)이라 한다. BLU는 광원(Light source), 도광판(LGP, Light Guide Plate), 확산판(Diffuser sheet), 프리즘 판(Prism sheet), 그리고 반사판(Reflector sheet)로 구성되어 있으며 광원의 빛을 균일한 휘도분포의 면광원으로 변환시키는 역할을 한다.

LCD의 광원으로는 CCLF(Cold Cathode Fluorescent Lamp), EEFL(External Electrodes Fluorescent Lamp), 그리고 LED(Light Emitting Diode)가 사용된다. 기존에는 LCD광원으로 대부분 CCFL과 EEFL를 많이 사용해 왔는데 이는 낮은 소비전력으로 매우 밝은 백색광을 제공할 수 있고, LCD의 성능의 높은 휘도와 균일도를 구현할 수 있으며, 긴 수명을 갖는 장점 때문이다. 하지만 작동 온도 범위가 좁고 환경에 유해하며 2 mm 이하의 세관화가 어려워 소형의 액정디스플레이의 광원으로는 부적합하여 최근에는 LED로 많이 전환되고 있다. LED의 장점은 낮은 소비전력에서도 긴 수명을 가지고 있으며 소형화와 경량화가 가능하다. 또 전류가 흐르기 시작하고부터 발광하기까지의 시간이 짧고 응답특성도 좋아 갖가지 모양으로 제작이 가능하고 색 재현율에 있어서 CCFL보다 30% 가량 높다[1,2]. 하지만 LCD의 성능에 있어서 휘도와 균일도가 CCLF에 비해 낮은 단점이 있다. 이러한 광원으로부터 방출된 빛은 LGP에 의해 LCD 전면에서 균일하게 퍼진다. LGP는 광원으로부터 전달되어온 빛을 상단부 전체 영역에 걸쳐 고르게 분포되도록 빛을 전달, 방출시켜주어 LCD의 휘도와 분포특성을 결정하는 중요한 부품이다. 이

러한 LGP의 성능을 향상 시키는 위한 연구의 한 일환으로 LGP 후면에 특별한 처리(산란패턴)를 하여 광원에서 방출된 빛이 LPG 상단부분으로 방출되게 유도 하는 연구가 계속되어져 왔다[3,4,5].

본 연구에서는 이러한 도광판에 적용된 산란패턴을 플라스틱 광섬유(POF, Plastic Optical Fiber)에 적용해 측면발광을 유도하여 POF를 광원으로 이용을 하고자 하였다. POF는 굴절률이 높은 Core와 굴절율이 낮은 Clad의 2층 구조로 되어 있다. Core은 고순도 PMMA(Poly Methyl Methacrylate)로 1.495굴절률을 갖고 있으며 Clad는 고순도 F-PMMA(Fluorinated PMMA)로 1.402의 굴절률을 갖고 있다. 이러한 굴절률 차에 의해 광섬유의 한 끝단으로부터 빛을 받아 Core와 Clad에서 전반사를 통하여 다른 한 끝단으로 빛이 전달되며 클래딩 표면에 간단한 조작을 통해서 입사광의 일부를 선택적으로 광섬유 외부로 인출할 수 있다[6]. 이러한 특징을 이용하여 POF는 단순한 경관조명 이외에 표시장치 또는 백라이팅 장치와 같은 조명장치에 활용하는 연구가 진행되고 있다. 기존 POF의 측면발광은 POF의 클래드층에 인위적으로 홈 또는 면 등의 특정 문양을 새겨서 광손실을 유도하는 것이다. 하지만 정밀한 가공공정의 제어가 없이는 POF 길이 방향에 따라 인출되는 광의 휘도가 불균일하다. 또한 클래드층의 임의 가공은 출력 광이 길이방향으로 점점 어두워지는 일정하지 않은 측면 발광이 발생하는 단점을 가진다[7]. 일반적으로 POF의 측면을 가공하여 빛이 발광할 경우 광원과 가까운 가공면에서 높은 휘도를 갖고 광원과 멀어질수록 낮은 휘도를 갖게 되는데 이러한 점을 보완하고자 POF에 CO₂ 레이저를 이용한 디자인된 산란패턴을 가공하여 인출되는 광이 균일한 휘도를 갖도록 하였다. POF에 가공할 효율이 좋은 산란패턴 설계를 위하여 광선추적 전산모사 프로그램을 활용하였다. 전산모사를 통하여 광섬유의 수평 방향으로 막대형 산란패턴을 가공하여 광검출기에서의 휘도 분포를 예측하였고, 직선 가공패턴 뿐만 아니라 수직 가공 패턴에 대한 휘도 분포의 변화를 관찰하여 측면 가공에서의 발광 효율을 향상시키고자 하였다. 또한 가공 파라미터들의 변화를 통하여 광섬유 측면에서의 휘도 균일도를 예측하고 비교 분석해 보았다. 이 결과를 바탕으로 CO₂ 레이저

를 이용하여 실제 POF에 적용시켜 휘도분포와 균일도를 측정하여 전산모사에서 얻은 파라미터들의 유효성을 검증하고자 하였다.

제2장 이 론

제1절 광 산란

1. 광 산란의 종류와 특징

광선이 물체의 경계에서 반사되는 과정에서 물체와의 충돌 시 물체의 표면 특성에 따라 정반사(specular reflection)와 난반사(diffuse reflection, lambertian) 그리고 정반사 특징을 가지면서 난반사하는 형태 등이 있고 이들의 특징은 한가지 특성이 아닌 복합적으로 나타나게 된다. 이러한 특징을 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)라고 하고 유사한 BTDF(Bidirectional Transmittance Distribution Function)는 광선이 물체를 투과할 때 사용한다. 이는 실제 물체의 면이 평평한 면일지라도 미시세계로 들여다 보면 많은 분자들로 이루어진 작은 거친면을 포함하고 있기 때문에 BRDF를 사용하여 빛의 반사를 설명할 수 있다. 산란모델들은 입사되는 하나의 광선을 물체와 상호작용 후에 산란되어 여러개의 광선으로 투과 혹은 반사되는 광선은 방향과 각도에 따라 에너지가 분배된다. 이렇게 산란된 에너지의 분포를 나타내는 shift invariant mode로 작용하는데 이러한 함수를 shift-invariant scatter angle θ_d 라고 하고 다음과 같이 정의한다.

$$\theta_d = \sin^{-1}(|\sin(\theta_i) - \sin(\theta_s)|) \quad (2-1)$$

여기서 θ_i 는 물체 표면의 법선벡터와 입사광선이 이루는 입사각이고 θ_s 는 산란각이다. shift invariance는 산란된 에너지 분포는 입사각에 대한 코사인방향에서 변화가 없고

회절격자의 선형적인 중첩원리로서 산란되는 표면을 취급할 수 있음을 뜻한다. 반사를 기술하는 BRDF는 각각의 산란모델에 따른 θ_d 의 함수로 표현할 수 있다.

BRDF에서 사용되는 산란모델로는 그림 2-1에서와 같이 크게 Lambertian, CosNth, Gaussian로 나누어진다. 그 중 Lambertian은 완전하게 난반사를 일으키는 형태로 BRDF로 나타내면 다음과 같다.

$$BSDF(\theta_s) = constant \quad (2-2)$$

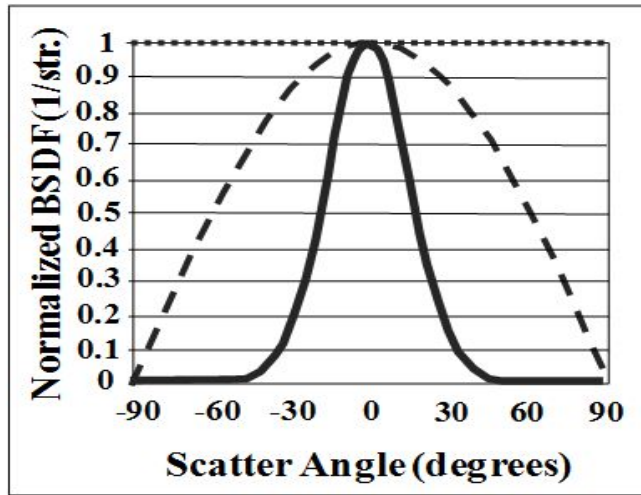
2-2식에도 나타나 있듯이 lambertian의 에너지 분포는 산란각에 의존하지 않으므로 어느 각에서도 같은 밝기를 느끼게 된다.

그러나 CosNth나 Gaussian의 경우에는 각각 다음과 같다.

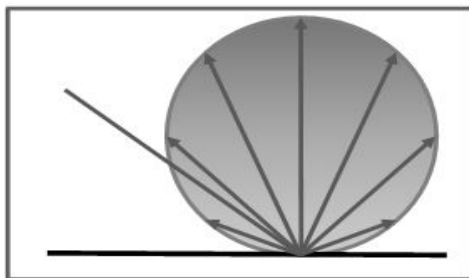
$$BSDF(\theta_d) = \cos^N(\theta_d) \quad (2-3)$$

$$BSDF(\theta_d) = \exp\left[-\frac{\theta_d^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-4)$$

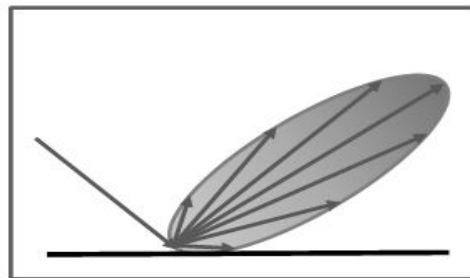
여기서 σ 는 가우시안 에너지분포의 표준편차(The standard deviation of the gaussian energy distribution)이다. 이 두가지 산란모델은 산란각에 따라 빛의 에너지 분포가 달라지며 각각 코사인과 가우시안 분포를 따르고 있음을 알 수 있다. 즉 관측자의 방향에 따라 밝기를 다르게 느끼는 것이다. 그러나 단순한 산란형태를 가지는 물질은 매우 드물고, 실제 산란형태는 이러한 산란모델의 조합으로 일어나고 이를 BSDF함수로 표현할 수 있다[8].



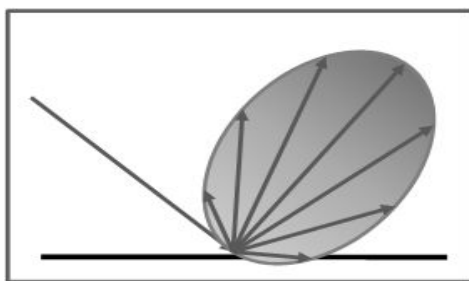
(a)



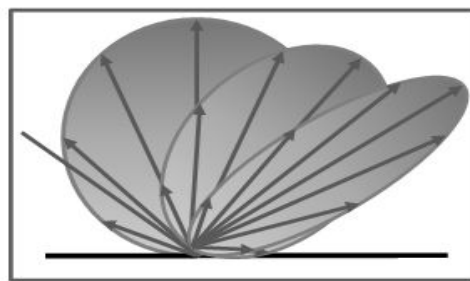
(b-1)



(b-2)



(b-3)



(b-4)

그림 2-1. BSDF에 사용되는 산란모델 (a) 각 산란모델에 대한 BSDF

(b-1) Lambertian

(b-2) Gaussian

(b-3) CosNth

(b-4) BSDF (각 산란모델에 적용)

2. 산란패턴 연구

산란패턴 연구는 도광판에서 많이 연구되어 왔다. 도광판 자체로는 광원에 대해서 그림 2-2.(a)와 같이 내부전반사만 일으키므로 도광판 전 공간에 빛이 전달되기는 하나 상면으로 방출되지 않는다. 이러한 도광판 밑면에 산란패턴을 형성시킴으로써 전 공간에 분포하는 빛과 산란패턴의 상호작용을 이용하여 도광판 상면으로 빛을 방출시킨다. 이를 그림 2-2(b)에 나타내었다. POF도 도광판과 같이 POF 자체로는 광원에 대해서 내부반사만 일으켜 POF의 끝단에서만 빛이 방출하게 된다. 측면발광을 일으키기 위해서는 POF의 측면에 산란패턴을 형성시킴으로써 빛과 산란패턴의 상호 작용에 의해 측면 발광이 일어난다. 도광판에서는 산란패턴의 설계와 가공방식이 무척 중요한 부분을 차지하는데 이는 도광판의 성능이 많이 달라지기 때문이다. 도광판 산란패턴 가공방식은 세 가지로 분류되는데 인쇄방식, 무인쇄방식(사출방식, V-cutting 방식, 레이저 주사방식), 그리고 산란 도광판방식이 있다[4,5]. 이 중 인쇄방식은 도광판 후면에 미산란(Mie scattering)을 유도하는 산란체가 혼합된 잉크를 도포하는 형식이다. 광원과 그 광원의 파장보다 작은 입자의 상호작용으로 파장이 짧은 광원의 산란이 잘 일어나는 레일리 산란과는 달리 광원과 상호작용하는 입자의 크기가 파장보다 큼으로 광원의 파장과는 상관없이 일어나는 산란을 미산란이라고 한다. 입사된 빛의 수직산란을 통해 출광시키는 방식으로 타 방식에 비해 시행착오에 대한 반복설계를 통한 균일도 조절이 용이하고 패턴성형이 쉬우며 도광판 사이즈에 제한이 없어 가장 일반적으로 사용하는 패턴이다. 인쇄방식은 LGP가 고른 휘도를 갖도록 광입사 되는 면으로부터 거리가 멀어질수록 더 촘촘히 도포하는 방법을 사용한다. 그러나 이 방식에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 패턴요소의 형태는 원형, 사각형, 육각형 등 2차원으로 제한되어 있어 광선의 제어에 한계가 있고, 입사된 광이 표시부로 전달되는 효율이 나빠 표시부의 휘도가 낮으며, 시간의 경과에 따라 퇴색되거나 박리되는 등의 변질우려가 있으므로 시간

경과에 따라 성능이 저하된다. 무인쇄방식 중 하나인 V-cutting 방식은 완전 자동화가 용이하여 v-자 모양의 홈의 간격 조절이 쉽고 휘도와 균일성이 좋고 인쇄 방식에서 지적인 시간에 따른 휘도특성의 변화가 없는 반영구적인 도광판 제작이 가능하다. 그러나 다양한 패턴가공이 어렵고 제작시간이 많이 걸리며 가공 후 생기는 미세입자를 제거하기 위한 후처리 공정이 필요하다[1,9]. 두 번째로 사출(Molding)방식은 가공방법은 고휘도를 재현할 수 있고 생산효율을 크게 향상시킬 수 있으나 사출에 쓰이는 몰드 자체의 가공에 많은 비용과 시간이 요구되며 제작된 몰드의 수정이 어려운 문제점을 가지고 있다. 또한 몰드를 통해 형성된 표면패턴에 따라 도광판의 광학적 특성이 가변될 수 있다[1,2]. 하지만 레이저 주사방식을 이용하는 경우 따로 몰드를 제작할 필요가 없이 고속 스캐닝이 가능하며, 패턴설계는 소프트웨어상으로 설계가 가능하여 수정이 용이함으로 균일성 제어가 쉬워졌다. 레이저가공의 특징상 비접촉가공으로 가공 후 입자의 잔류가 없어 따로 후처리 공정이 없어 전체적으로 시간과 비용을 절감할 수 있다 [1,2,10,11]. 인쇄방식과 V-cutting방식, 사출방식, 레이저방식 등의 가공기술에 대한 특징을 표 2-1과 표2-2에 간략하게 정리하였다. 산란 도광판 방식은 도광판 재료인 수지에 산란체들을 혼합하여 사출하는 방식으로 기존에 도광판 표면을 가공하는 방식과는 달리 내부산란체를 이용하여 휘도 균일성을 제어하고자 하였다. 하지만 이 방법은 산란체들의 공간분포를 제어하기 어려운 문제점으로 인해 관련 연구가 아직까지 미미하다 [5]. 이러한 산란체의 공간적 분포제어를 통한 내부 산란체의 장점을 이용하고자 3차원 레이저 가공 시스템을 이용하여 도광판 내부 산란체를 생성하는 방법이 제안되었다. 이 방식은 레이저의 초점 위치를 3차원적으로 제어함으로써 도광판 내부에 산란체들의 위치 및 개수의 조절이 가능하게 되었으며 그로인해 산란체들의 분포에 대한 섬세한 디자인 설계가 가능하게 되었다. 그러나 제작한 도광판은 평균 휘도값을 향상시켜야 할 문제점을 가지고 있다[12,13,14,15,16]. 3차원적 제어방법은 가공시간이 오래 걸려 평면가공에 비해 효율성이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 그래서 평면가공을 통하여 3차원 내부산란체와 비슷한 효과를 갖기 위하여 일정한 경사를 두고 가공을 하였을 때 높

은 휘도 균일도를 얻을 수 있다[17,18]. POF는 도광판에 비해 가공 면적이 좁기에 다른 가공 방법 보다는 레이저 평면가공으로 산란패턴을 제작하였다.

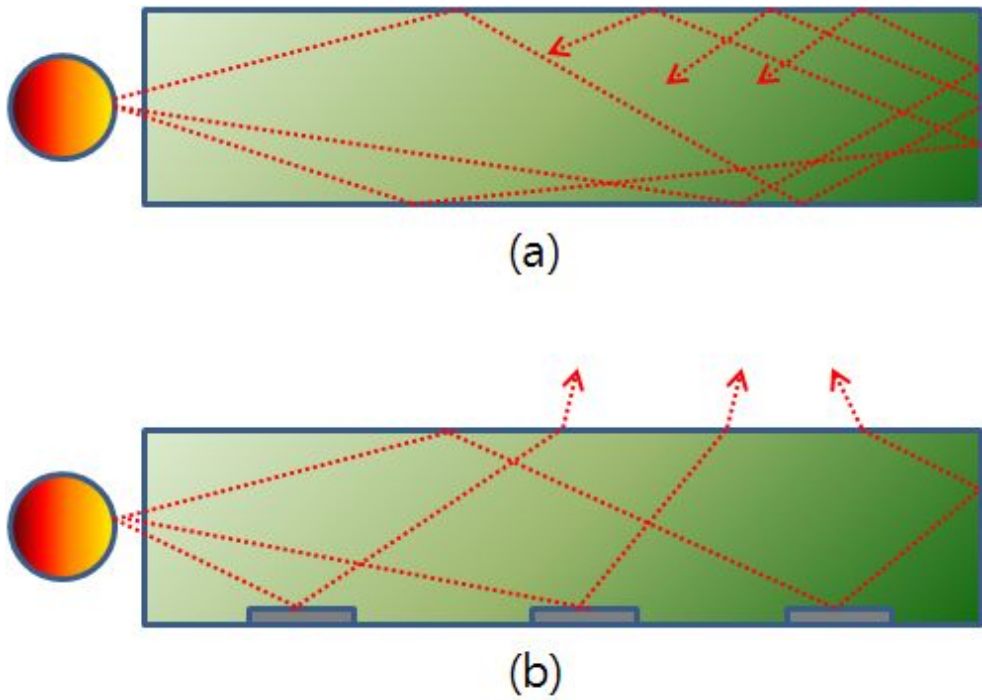


그림 2-2. 도광판에서 산란패턴의 역할

- (a) 내부전반사로 인하여 빛이 전공간에 분포되어있는 도광판의 모습
- (b) 산란패턴으로 인하여 상면으로 빛을 방출하는 도광판의 모습

표 2-1. 도광판 특수처리방식의 종류와 특징 : printing 방식(좌), V-cutting 방식(우)

구분	Printing 방식	V-cutting 방식
특징	short mask lifetime low yield light loss	low productivity chip dirties only line pattern
Etc.	Most popular	Special, small size

표 2-2. 도광판 특수처리방식의 종류와 특징 : 사출방식(좌), 레이저 방식(우)

구분	사출(Molding)방식	레이저 (laser marking) 방식
특징	high mold cost long delivery(molder) high machine cost energy cost	factory automation simplified processing short runtime
Etc.	Small & thin size	Samll size

제2절 레이저 가공

1. 레이저 빔의 특성

레이저(LASER)는 가간섭성(coherent)을 가지면서도 고도의 방향성이 있고 수 밀리미터에서 X-ray 파장에까지 이르는 넓은 영역의 전자기파를 발진하는 장치이다. 레이저는 수 많은 진동수에서 모드락(mode lock)을 함으로서 단일 파장을 발진할 수 있다. 레이저(LASER)는 “Light amplification by stimulated emission of radiation.”의 머리글자로 유도방출에 의한 광-증폭 장치라는 뜻이다. 레이저의 작동원리는 파장이 라디오(radio)에서 마이크로파에 이르는 파를 발진시키는 장치인 메이저의 원리를 이용한 것이다. 1960년 최초의 레이저가 개발된 이래로 레이저는 광통신(fiber optical communication)과 광학 데이터 저장 등의 광학 기술을 적용하는데 매우 중요한 역할을 하였다[8].

레이저 가공은 빔을 이용한 비접촉식 가공이다. 그리하여 펀칭법, 전기펜법, 에칭법, 잉크제트법 등의 다른 가공법에서 나타나는 마찰로 인하여 생기는 재료의 변형이나 가공시에 발생할 수 있는 소음 등이 없고 전도체 재료는 물론 비전도체 재료에도 적용 가능하며 전기적인 제어가 용이하다. 그러나 레이저빔의 파장과 가공시에 광학부품을 이용하여 가공하는데 레이저빔의 형태와 빔의 크기(spot size)와 초점깊이(depth of focus)와 재료의 물리적 특성에 따라 가공의 형태가 달라진다. 특히 레이저에 의한 가공에 많이 쓰이는 고출력의 지속파 또는 펄스형태의 Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저가 가장 많이 쓰이는데 이들 레이저는 빔을 집속시키지 않으면 재료가공에 충분한 에너지 밀도를 주지 못하고 작은 열영향 구역을 주기 위하여서도 렌즈 등 광학 부품을 이용하여 빔의 크기와 초점깊이를 조절하여야 한다[19].

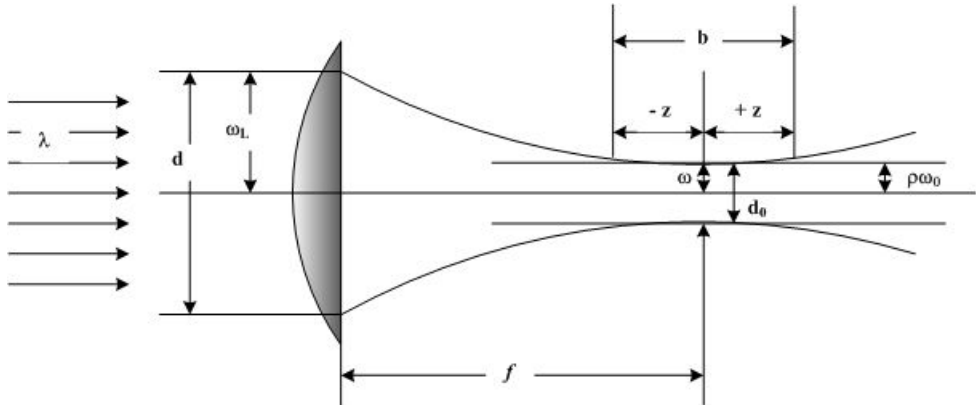


그림 2-3. TEM₀₀ 모드의 빔을 렌즈로 집속시키는 경우에 초점면에서 얻어지는 빔의 크기와 초점거리

레이저빔 형태는 레이저 공진기 양단을 반복하여 왕복하는 광자들의 전자기장에 의하여 결정된다. 이 전자기장의 모양은 광자의 파장, 공진기 양단의 반사거울의 배열상태, 곡률반경과 거리 및 방전관의 직경 등의 조건들에 따라 조사된 표면상에서 여러 가지 모양의 단면 에너지 분포형태를 가진 TEM_{mn} 모드를 가지고 있다. TEM 모드는 레이저빔의 에너지 분포와 발산정도를 결정하며, 렌즈에 의하여 집속되는 조건들을 결정한다. 모드의 차수가 작을수록 렌즈의 초점위치에서 얻어지는 빔의 크기(spot size)의 직경이 작아 큰 출력밀도를 줄 수 있고 주어진 빔의 직경에 대하여 초점깊이를 크게 할 수 있으며, 레이저빔을 광학적으로 조절하기가 쉽다. 그리하여 대부분의 재료가공에서는 TEM₀₀ 모드의 레이저빔을 사용한다[20].

이러한 TEM₀₀ 모드의 Gaussian 빔을 렌즈로 집속시키면 기하학적으로 한 점에 초점이 형성되지 않고, 그림 2-3과 같이 초점면에 집속된 빔의 직경 d_0 과 초점 깊이 b 를 주게 된다. 이는 렌즈의 중심을 통과한 부분과 렌즈의 원주둘레를 통과한 빔이 진행한 거리가 달라 같은 면에 집속되지 못하기 때문에 렌즈의 초점위치에 집속된 빔 직경과 초점깊이를 주게 되는 것이다. 집속렌즈로 들어오는 레이저빔 직경 d 는 알고 있으므로 초점거리 f 인 렌즈로 집속된 점 크기는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\omega(z) = \omega_0 \left\{ 1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (2-15)$$

여기서 $\omega_0 : z=0$ 인 빔허리에서 빔의 반경

$$z_R : \text{Rayleigh 구역} \left(z_R \equiv \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)$$

$$\omega_{FF} \cong \omega_0 \left(\frac{z}{z_R} \right) = \frac{\lambda z}{\pi \omega_0} \quad (2-16)$$

여기서 $\omega_{FF} : \text{원거리 전자장(far field)에서 빔의 반경}$

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{\omega_L} = f \cdot \theta_{FF} \quad (2-17)$$

여기서 $\omega_0 : \text{집속된 레이저빔의 spot size}$

$\omega_L : \text{입사되는 빔의 반경}$

$f : \text{렌즈 초점거리}$

$\theta_{FF} : \text{레이저 빔의 발산각도}$

식 2-15에서 ω 를 $\omega_0 \rho$ 로 대치시킴으로써 집속된 레이저빔의 초점깊이도 구할 수 있다[21].

$$z = \pm \pi \sqrt{\rho^2 - 1} \frac{\omega_0^2}{\lambda} = \pm \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\rho^2 - 1} \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \quad (2-18)$$

$$= \pm \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\rho^2 - 1} \left(\frac{f}{\omega_L}\right)^2$$

여기서 ρ : 빔의 크기 허용도
 ω_L : 입사되는 빔의 반경
 f : 렌즈의 초점거리

집속된 빔의 반경이 중심반경이 5% 큰 경우에 $\rho = 1.05$ 가 되며, 그사이의 거리를 b 라고 할 때 $b = 2z$ 가 되며, 흔히 이 거리를 초점깊이라고 한다. 이를 적용하면 초점깊이의 양측 위치는 대체로 다음과 같이 주어진다. 따라서 초점깊이 b 는 레이저의 파장과 집속된 빔 직경만 알면 곧 구할 수 있다[22].

$$b = 2z = \pm 2 \cdot \frac{0.32\pi}{\lambda} \omega_0^2 \quad (2-19)$$

$$= \pm 2 \cdot \frac{\omega_0^2}{\lambda}$$

$$= \pm 2 \cdot \frac{d_0^2}{4\lambda}$$

위의 식 2-15와 식 2-19에서 확인 할 수 있듯이 집속된 레이저빔의 크기를 작게 하여 레이저 에너지밀도를 크게 하기 위하여서는 초점거리가 짧은 렌즈를 사용하여야 하며, 이런 경우에는 초점깊이가 작아진다. 이러한 빔 크기와 초점거리는 재료 가공에 있어 많은 영향을 미치므로 적절한 파장의 레이저와 그에 알맞은 광학기기의 배열을 통해 목적에 맞게 세팅을 해야 된다[8].

2. 가공용 레이저의 특징

CO₂ 레이저는 원자기체 또는 이온기체들의 전자적인 에너지 준위들 사이의 전이에 의하지 않고, 레이저의 능동매질인 CO₂ 분자들의 진동 및 회전준위들 사이의 전이에 의한 분자기체 레이저이다. CO₂ 분자는 가장 낮은 전자에너지 준위상태에서 대칭(symmetric stretching), 비대칭(asymmetric stretching)과 굽힘(bending)운동의 세가지 다른 형태의 진동운동을 한다. 이들 세 가지 기본적인 진동모드에서 발진의 에너지는 양자화되어 있고, 그 분리되어 있는 값들은 정수값 들이다. 어떤 순간에 CO₂ 분자는 이들 세 가지 기본모드의 일차적인 조합으로 진동한다. CO₂ 레이저에서는 레이저의 전반적인 출력과 효율을 증가시키기 위하여 능동매질인 CO₂ 이외에 비슷한 용적의 N₂와 수배의 He가스를 첨가시킨다. N₂ 가스는 전자와 충돌하여 높은 에너지 준위로 여기되고 여기된 N₂ 가스가 CO₂ 분자와 충돌하여 N₂ 가 지닌 에너지를 CO₂ 로 전달시킴으로 CO₂ 분자를 여기상태의 준위로 전이시킨다. 이 여기된 N₂의 에너지 준위는 긴 수명을 가지고 있으며, N₂와 CO₂ 의 여기된 에너지 준위들 사이의 에너지는 거의 비슷하므로 이러한 충돌과정은 에너지 전달에 매우 효율적이다. He원자는 레이저 하부준위에 있는 CO₂분자와 충돌하여 기저준위로 빠른 전이가 일어나도록 함으로써 큰 분포밀도가 유지되도록 하기 때문에 레이저의 효율을 증가시킨다. 이러한 CO₂레이저는 900~1,100 nm의 적외선 복사를 방출하며 수백 kW의 연속빔이 레이저 군사용 무기 연구에 사용되고 40 kJ의 나노초 길이 펄스를 이용해 핵융합연구에 사용되기도 하는 등 여러 분야에 걸쳐 사용된다[23,24].

Nd 레이저는 능동매질로 비전도 고체, 결정질, 혹은 레이저를 방출하는 원자나 분자로 도핑된 유리등이 사용된다. 결정이나 유리 호스트 물질에 약 1%비율로 포함된 원자들은 외부 소스에서 나오는 빛에 의해 광학적으로 여기되며 이때 밀도반전을 일으킨다. Nd 레이저 자체가 한 종류의 레이저를 지칭하는 것은 아니다. Nd는 다양한 호스트

물질과 합성결정이나 다른 성분의 유리등에 합쳐진다. 특정한 부속기구를 사용하여 원적외선에서 가시광선 혹은 자외선 영역의 출력 파장을 얻을 수 있으며 100 W 이하의 연속빔 혹은 수 MW의 짧은 펄스를 만들어 내므로 응용범위가 상당히 넓다. Nd 레이저의 능동매질은 3중으로 이온화된 네오디뮴이고 결정이나 유리구조속에 결합된다. Nd는 본질적으로 불순물인데 이트륨(yttrium) 혹은 다른 희토류 원소와 같은 비슷한 이온크기의 물질로 대체한다.[23] 현재 가장 일반적인 호스트는 YAG(Yttrium Aluminum Garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) 이다. YAG는 단단하지만 깨지기 쉬운 물질로 Nd:YAG 레이저를 사용하는 가장 중요한 이점은 열적 특성으로 이것이 양질의 연속빔을 만든다는 것이다. 여러가지 다른 결정 호스트들이 Nd와 함께 시험되어왔지만 YAG만큼 많이 사용 되지는 않는다. 결정을 키우기가 어렵기 때문에 YAG 막대의 길이는 10 cm 정도로 제한되고 보통 반경은 수 mm 정도이다. 유리를 사용하면 수십 cm 정도까지 길이가 늘어날 수 있고 더 높은 출력에너지를 얻을 수 있다. 펌핑을 위한 광원으로는 텅스텐 혹은 아크 등을 사용한다. 램프는 넓은 스펙트럼의 빛을 내놓지만 Nd 이온은 이중 0.7에서 0.8 μ m사이의 빛만을 흡수한다. 이러한 영역에서 흡수된 광자는 Nd 이온을 여기 시키고 Nd 이온은 준안정 상태로 붕괴하여 밀도반전을 일으킨다. Nd:YAG 레이저는 연속모드 혹은 펄스 모드로 동작한다. 연속적으로 1kW 이상의 출력을 내지만 펄스모드에서 직렬로 몇 개의 레이저를 작동시켜 엄청난 파워출력을 낼 수도 있다. 예를 들어 수 나노초 (nm)동안 수 GW의 파워를 만들어 낼 수 있다[8,22,23].

위와 같은 다양한 레이저를 이용한 레이저 가공은 높은 에너지 밀도로 미소의 점에 집광시킨 레이저광을 가공에 적용한 것을 여러 가지 다양한 가공특성을 가지고 있으며 이러한 장점을 이용하여 레이저광의 특성과 가공되는 피가공물의 물성에 따라 절단, 구멍뚫기, 용접, 열처리, 표면가공 등에 응용되고 있다. 이러한 레이저 가공이 갖는 공통적인 특징 중 일반적인 가공기술과 다른 특징 중의 하나는 열로 변환되는 에너지의 강도가 다른 가공법에 비하여 월등이 높다는데 있으며 반도체 소재, 세라믹 재료, 합성수지 등과 같은 다양한 소재의 가공이 가능하다는 것이다. 레이저 가공은 기본적으로

레이저광의 흡수에 의한 열적인 과정으로 재료의 광흡수가 매우 중요한 요소가 된다 [25,26]. 레이저광의 흡수를 결정하는 중요인자는 빔의 파장, 입사각, 편광, 빔의 출력분포, 발산각 등이 있다. 따라서 레이저가공의 특성은 가공하고자 하는 재료에 대한 레이저광의 특성과 레이저광을 흡수하여 얻게되는 열원의 특성과 직접적인 관계를 갖는다 [23]. 레이저광은 광학부품을 이용하여 초점위치에 매우 높은 에너지를 주도록 집속시킬 수 있다. 따라서 가공하고자 하는 부문에만 적당량의 에너지를 집속시킬 수 있어 많은 부문을 동시에 균일하게 가공하여야 하는 통상적인 방법보다는 가공이 빠르고 재료의 내부에서 열로 인하여 발생할 수 있는 응력변화, 뒤틀림, 균열 등을 방지할 수 있어 재료의 손상을 최소화 할 수 있다. 또한 레이저광의 집속으로 인하여 수 μm 이하의 정밀한 가공이 가능하다[27].

표 2-3. 가공용 레이저 시스템 사양

Laser	Wave length	Operation mode	Pulse energy		Pulse Duration(sec)	Typical Use
			Typical	High		
Nd:YAG	1.06	Continuous	10W	1,000W	CW	Surface heat treatment Welding, Cutting
		Normal	1	100	-	Spot welding marking, hole drilling, trimming
		Q-switched	0.1	1	$1.5 * 10^{-5}$	Annealing of semi conductors
CO ₂	10.6	Continuous	300W	6,000W	CW	Surface heat treatment Welding, Cutting
		TEA	2	400	$2 * 10^{-4}$	Hole drilling, Marking

제3장 실험

제1절 모델링을 통한 전산모사

1. 전산모사 수행 방법

본 연구에서는 측면발광 성능을 예측하기 위해 상용된 상용프로그램은 ZEMAX를 사용하였다. 수행방법은 실험에서 사용된 POF와 같도록 모델링한다. 실험에 사용된 POF는 미쯔비사에서 제작된 ESKA CK-120 모델의 광섬유를 선택하였다. ESKA CK-120은 고순도 아크릴 레진(PMMA : Polymethyl methacrylate)으로 된 Core와 특수 불소 폴리머(F-PMMA : Fluorine Polymethyl methacrylate)로 만들어진 얇은 Clad층으로 구성되어 있다. 직경 3mm, 길이 100mm으로 모델링 하였고 POF 측면 중앙에 길이방향으로 직선바 형태의 산란패턴을 적용하였다. ZEMAX프로그램 경우 자체 모델링 기능이 있지만 어려운 모델링에 대해서는 3D 모델링 프로그램을 이용하여 설계한 후 ZEMAX 프로그램에 적용하여 전산모사를 수행 하였다[8].

2. 산란패턴 모델링

산란패턴은 3차원 모델링 프로그램을 사용하여 POF의 측면에 패턴을 설계하였다. 먼저 그림 3-1과 같이 여러 가지 형태의 패턴을 설계하여 전산모사를 시행하여 결과를 기초로하여 그림 3-2과 같이 POF의 끝단(광원)에서 35mm 부분에서 0.5mm의 깊이로 길이 5mm로 첫 번째 패턴을 설계하고 첫 번째 패턴으로부터 10mm 부분에서 0.75mm의 깊이로 길이5mm로 두 번째 패턴을 설계, 두 번째 패턴으로부터 10mm 부분에서 1mm

의 깊이로 길이 5mm로 세 번째 패턴을 설계 하였다. 이렇게 설계된 파일은 *.STL 파일로 변환시켰다. 또한 표 3-1과 같이 각기 다른 파라미터들을 적용하여 모델링을 하였다.

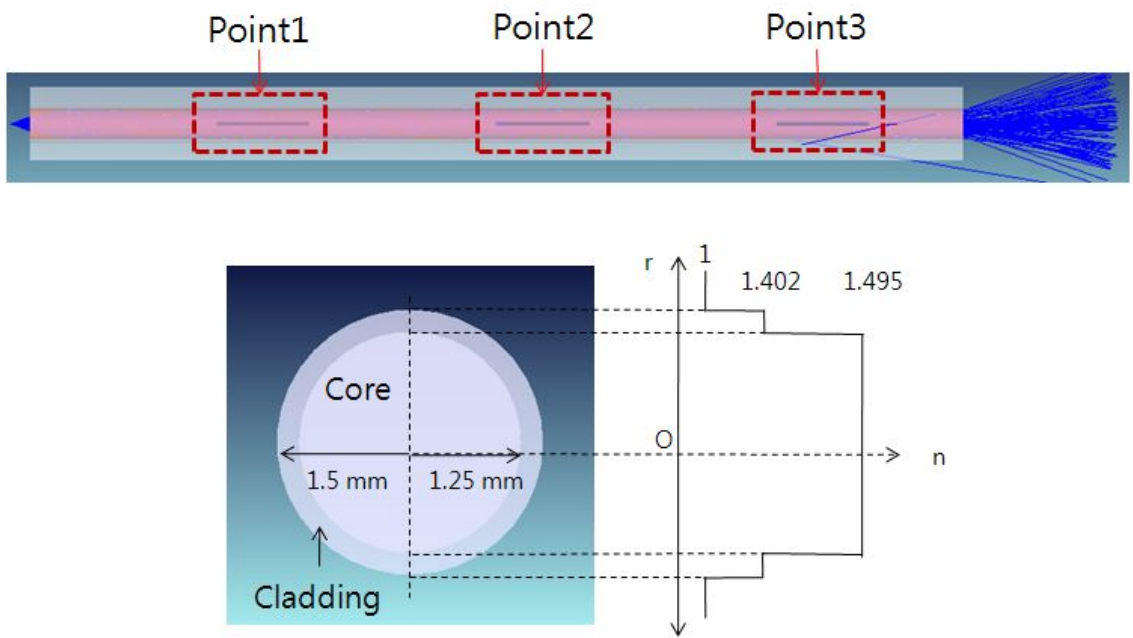


그림 3-1. 시뮬레이션을 위한 POE 모델링

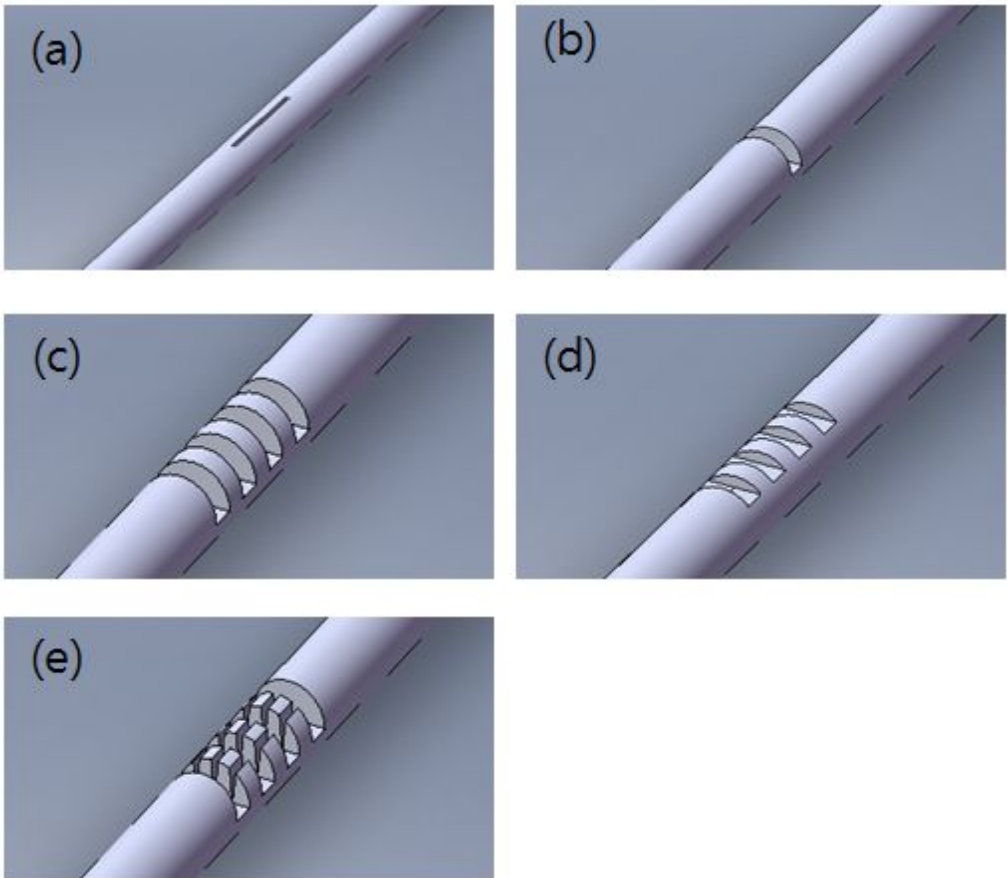


그림 3-2. 산란패턴 모형

표 3-1. 산란패턴 파라미터

(단위:mm)

	length1 (distance)	length2 (distance)	length3 (distance)	length4 (distance)	length5 (distance)
	5-5-5 (10-10)	4-5-5 (11-10)	4-4-5 (11-11)	3-4-5 (12-11)	3-5-7 (10-10)
depth1	0.5 - 0.75 - 1.0				
depth2	0.5 - 0.75 - 1.25				
depth3	0.75 - 1.0 - 1.25				
depth4	0.75 - 1.25 - 1.5				
depth5	1.0 - 1.25 - 1.5				

제2절 샘플 제작

1. Plastic optical fiber의 구조와 특성

POF는 유리광섬유보다 광학적 특성과 가공성이 우수하므로 새로운 빛의 세계를 창조한다. 과거에는 유리 광섬유가 많이 쓰였던 교통표지판, 박물관 조명에도 최근에 POF로 바뀌어 가고 있다. 또한 조명분야에 적용된 다양한 기술적, 시각적 사례에 의거 다용도의 조명 재료로 인식되어 지고 있다. 이러한 POF의 구조는 고순도 아크릴 레진 (PMMA : Polymethyl methacrylate)으로 된 Core와 특수 불소 폴리머(F-PMMA : Fluorine Polymethyl methacrylate)로 만들어진 얇은 Clad층으로 구성되어 있다. Clad의 굴절율 (refractive index)이 Core보다 낮으므로 광섬유의 한쪽 끝단으로부터 들어온 빛은 Core와 Clad에 의해 내부 전반사를 일으키게 된다. POF의 특성으로 표 3-2와 같이 Core의 굴절율은 1.495, Clad의 굴절율은 1.402이다. 수광각도(Numerical Aperture)는 0.5 즉 30° (lightacceptance : 2θ) 이다. POF의 장점중의 하나는 광섬유 단면적 대비 Core의 비율이 매우 크다는 것이다. 이는 POF의 빛 전달 효율이 매우 높다는 것을 보여준다[7].

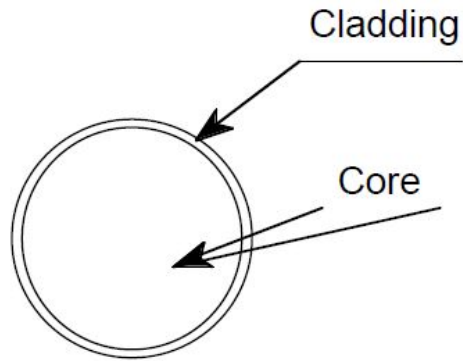


그림 3-3. POF의 구조

표 3-2. 플라스틱 광섬유 특성

Item		Specification			
		Unit	Min	Typ	Max
Optical Fiber	Core Material	—	Polymetyl - Methacrylate Resin		
	Cladding Material	—	Fluorinated Plymer		
	Core Refractive Index	—	1.49		
	Numerical Aperture	—	0.5		
	Redfractive Index Profile	—	Step Index		
	Core Diameter	μm	2,770	2,950	3,130
	Cladding Diameter	μm	2,820	3,000	3,180
Approximate Weight		g/m	9		

2. 광원 및 광원모듈 제작

사용된 광원은 모바일 기기 등에 사용되고 있는 반도체광원이 LED(Light Emitting Diode)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 LED는 빛을 전면으로 출력하기 때문에 별도의 광원반사판은 설치하지 않았다. LED는 표 3-3의 특성을 가지고 있으며 모의실험에서도 실제 제품과 동일한 규격과 특성을 갖는 광원으로 설계하여 사용하였다.

그림 3-6은 LED 구동을 위한 회로도와 도광판 광원부 구동 모듈을 나타내고 있다. LED를 POF 끝단에 위치시키고 LED에 원통을 붙여 POF를 고정 시키고 끝단에서 빛이 퍼지는 것을 막았다. 광원모듈을 제작하여 동일한 광원에 POF만을 교체하여 고정시킬 수 있도록 하였다.

표 3-3. 실험에 사용된 LED 특성

	Symbol	Conditions	Min.	Max.	Unit
Forward Voltage	VF	IF=120mA	3.14	3.54	V
Reverse Current	VR	IR=5mA	0.7	1.2	V
Luminous Intensity	IV	IF=120mA	6.40	9.50	cd
Peek Wavelength	Wp	IF=120mA	439.1	456.9	nm
Wide beam angle	$\Delta\theta \sim 120^\circ[\text{typ}]$				

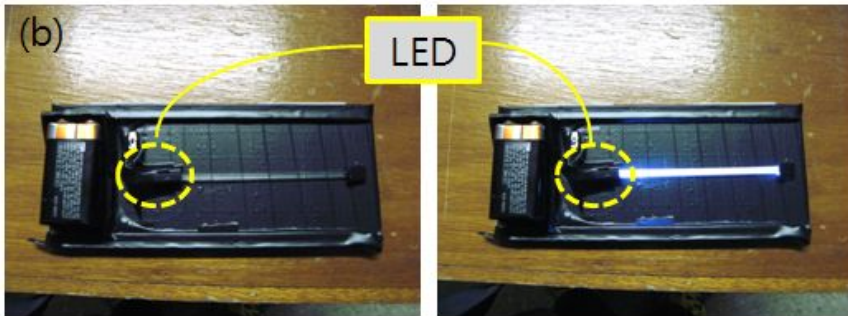
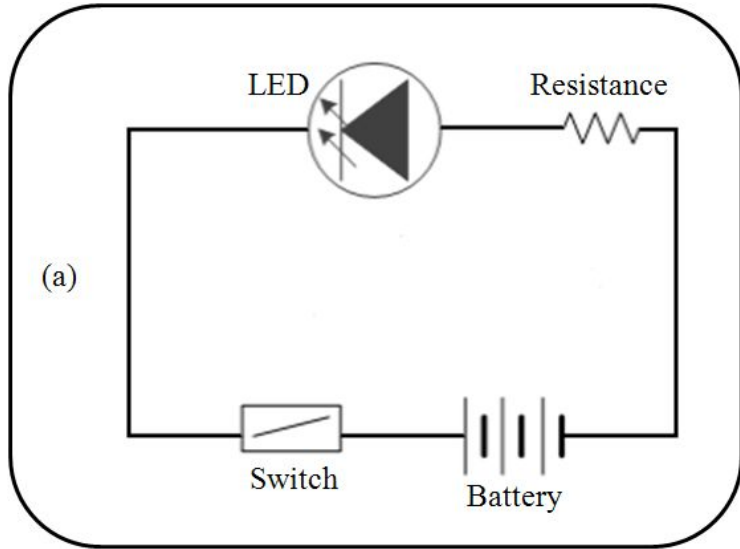


그림 3-4. 광원부 모듈 제작 (a) LED 구동회로 (b) 제작된 구동 모듈

제3절 산란패턴 가공

1. 산란패턴 가공 시스템

본 연구에서 사용된 CO₂ 레이저 발생장치는 표3-4와 같이 미국 SYNRAD사의 HC-20이고, 평균 출력은 14 W, 최대 출력 17 W로 TEM₀₀ mode의 빔 스캔 방식 CW(연속출력)레이저빔을 사용하고, PWM(Pulse Width Modulation)의 방식으로 동작한다. 공진기에서 발생하는 레이저 빔의 직경은 3mm 이지만 이를 ZnSe가 코팅된 X-Y 초점 위치 제어 반사 거울(galvanometer scan mirror)의 규격에 맞추기 위해 볼록렌즈와 모옥렌즈를 혼합한 2.7배의 빔 확대기를 사용하였다. 이는 레이저 빔을 집광시켰을 때 빔의 에너지 밀도를 높여주고, 초점 렌즈와 가공물 사이의 적당한 간격을 유지시켜주기 위함이다. 일반적으로 레이저의 빔 발산각은 3~6mR 정도를 유지하는데 본 실험에 사용된 장비는 4mR의 빔 발산각을 가진다[7,15]. 가공헤드의 집속 광학계는 초점거리가 6inch인 반상형광학계가 사용되고, 가공에 적합한 출력밀도의 빔을 제어할 수 있다. 마킹 시 렌즈의 수차를 최소화 시켜주기 위해 초점렌즈는 152.4mm의 ZnSe코팅의 평면-볼록(Plano-convex) f- θ 렌즈를 사용하였다. 레이저 특성상 공진기에서 빔을 발생시킬 때 많은 열을 동반하기 때문에 본 실험에 사용된 CO₂ 레이저는 공진기 양쪽에 펜을 부착시킨 공기 냉각 방식을 채택하였다[8,16,17]. 또한 레이저에서 생성된 빔을 소프트웨어에서 설정한 가공 경로를 따라 2차원 평면에 수사시키기 위한 레이저 가공 시스템을 활용하였다. 가장 우선적으로 고려한 사항은 빠른 시간내에 정확한 형상을 가공할 수 있도록 시스템을 구성하는 것인데 소프트웨어 부분에서 설정한 경로를 따라 POF를 최소한의 오차로 신속하게 가공하기 위해서 높은 정밀도와 민첩한 특성을 가진 갈바노미터 제어가 필요하다. 그림 3-7와 같이 고속 가공을 위해 컴퓨터 제어 방식의 빔 스캐닝 장치를 이용하여 패턴 마킹을 수행하였다.

표 3-4. CO₂ 레이저 시스템 사양

Model	Synard HC-20
Wavelength	10.6 μm
Operation Mode	PWM(Pulse Width Modulation)
Out Power	Max. 17 W Ave. 14 W
Beam Diameter	3 mm
Beam Divergence	4mRad
Beam Expander	× 2.7
Focus Lens	152.4mm, f-θ lens
spot Size	120 μm
Power Supply	AC 220 V three-phase 60 hz, 15 A
Cooling Method	Air

2. 레이저에 의한 산란패턴 가공

그림 3-7은 도광판의 표면 패턴 가공에 사용된 레이저의 개략도이다. 파장이 $10.6\ \mu\text{m}$, 평균 출력 14 W, spot size $120\ \mu\text{m}$ 인 빔 스캔 방식의 CO_2 레이저를 사용하여 표면 가공을 수행하였다[28].

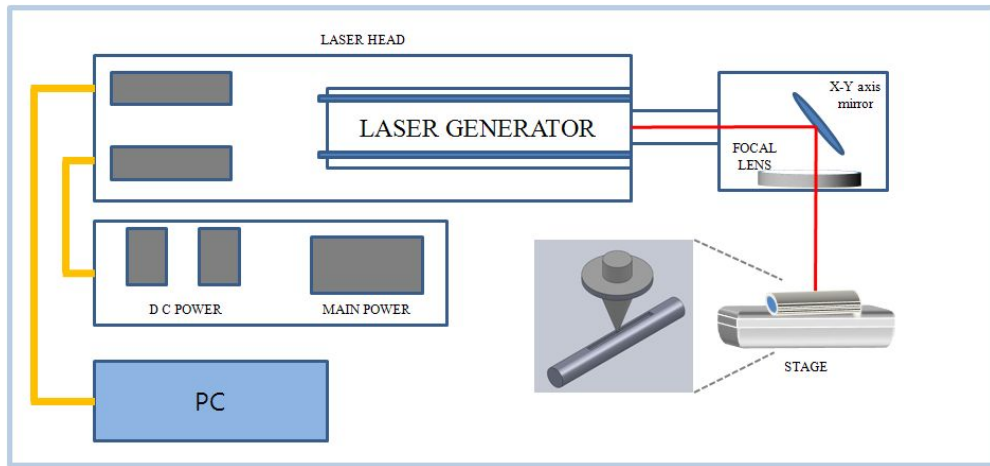


그림 3-5. 패턴 가공을 위한 CO_2 레이저 시스템 도식도

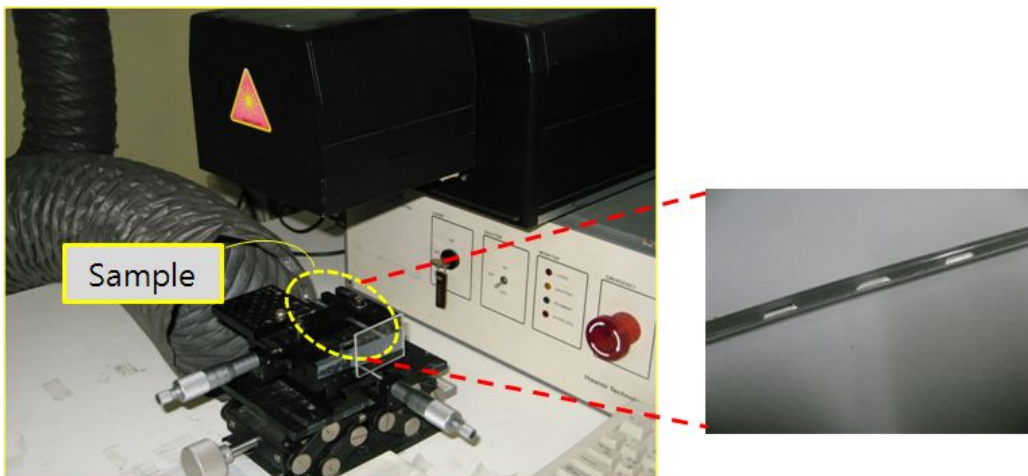


그림 3-6. CO_2 레이저를 이용한 패턴가공

제4절 휘도 측정 시스템

CO₂ 레이저를 이용하여 가공된 샘플의 휘도의 측정을 위해 표 3-5의 사항을 갖는 분광 방사 휘도계(KONICA MINOLTA사의 CS-2000)를 사용하였다. 그림 3-10과 같은 분광 방사 휘도계는 초저휘도 0.003 cd/m² 로부터의 고정밀의 분광 방사 휘도, 색도 측정이 가능하며 다양한 대상에 대한 최적의 측정각(1°, 0.2°, 0.1°) 선택이 가능하다. 1도 측정각으로는 최소 측정 지름 5mm까지 측정 가능하며 0.2도에서는 1mm, 0.1도에서는 0.5mm까지 측정할 수 있다. 최단 측정 거리가 3500mm로 휴대성이 매우 우수하며, 디스플레이 장치 및 각종 광원과 조명 장치의 휘도와 색도 측정에 적용할 수 있는 Spot 방식의 휘도계이다.

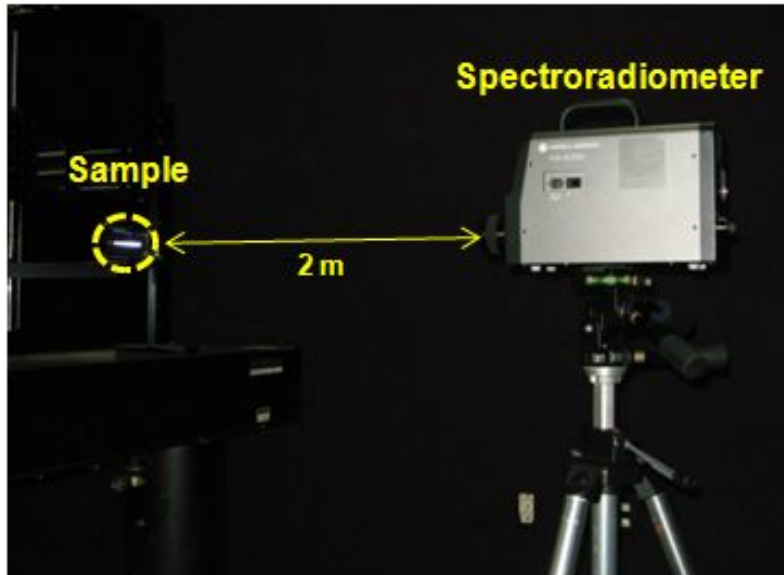


그림 3-7. 분광 방사 휘도계를 이용한 측정

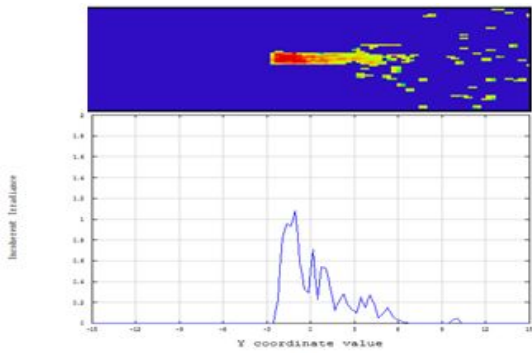
표 3-5. 분광 방사 휘도계 시스템 사양

Model	CS-2000		
Wavelength range	380 ~ 780 nm		
Wavelength resolution	0.9 nm/pixel		
Display wavelength bandwidth	1.0 nm		
Wavelength precision	±0.3 nm		
Spectral bandwidth	5 nm or less(half bandwidth)		
Measuring angle (selectable)	1°	0.2°	0.1°
Minimum Measuring diameter	5 mm	0.1 mm	0.5 mm
Measurement luminance range	0.003 ~ 5,000 cd/m ²	0.075 ~ 125,000 cd/m ²	0.3 ~ 500,000 cd/m ²
Minimum Measuring distance	350 mm		
Minimum luminance display	0.00002 cd/m ²		
Accuracy:Luminance	±2%		
Polarization error	1° : 2% or less; 0.1° and 0.2° : 3% or less		
Integration time	Fast: 0.005 ~ 16 sec; Normal: 0.005 ~ 120 sec		
Measurement time	2 sec,min.(Manual mode) ~ 243 sec,max.(Normal mode)		
Interface	USB 1.1		
Size	Main unit:158(W)*200(H)*300(D)mm; Lens:∅70*95 mm		
Weight	6.2 kg		

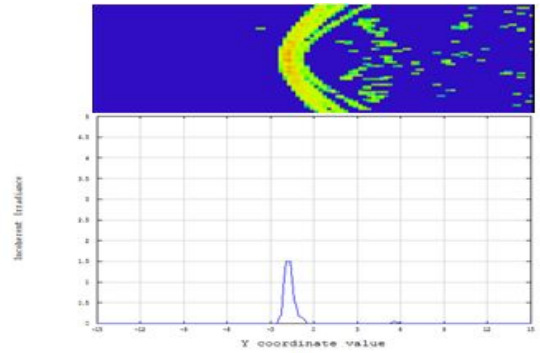
제4장 결과 및 고찰

POF의 측면에서 균일한 휘도를 갖는 빛을 얻기 위해서 POF의 측면에 산란패턴을 형성시켜 산란체 역할을 하도록 하였다. 우선 측면에 그림 3-1과 같이 여러 가지 형태의 산란패턴을 모델링하여 측면 발광된 빛의 휘도 균일도를 전산모사 하여 그림 4-1과 같이 비교 분석 하였다. 분석한 결과를 바탕으로 하여 측면에 직선 바 형태의 산란패턴을 일정한 간격으로 하여 표 3-1과 같이 산란패턴의 파라미터들의 변화에 따른 휘도 균일도를 전산모사하여 비교 분석 하였다. 이 결과를 바탕으로 실제 레이저를 이용한 산란패턴을 가공하여 가공변수에 따른 측면발광 성능의 변화를 전산모사의 결과와 비교하였다.

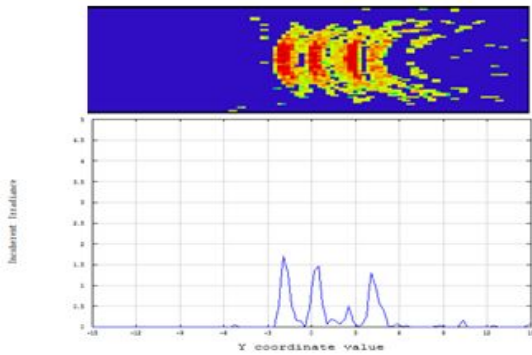
이를 통해 패턴의 간격, 길이 및 깊이 등에 의해 POF의 측면으로 방출되는 빛의 균일도를 높이는데 가장 중요한 요소로 작용함을 알 수 있었다[29]. 휘도는 산란패턴에 영향을 받을 뿐만 아니라 입사 광원의 광 세기에도 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 휘도세기 보다는 평균휘도 및 균일도에 집중하여 분석하고자 하였다. POF 입사부에 위치한 LED에서 입사된 빛이 POF 내부로 전달되고, 측면에 생성된 산란패턴에 산란된 광의 상당부분이 측면으로 방출되는데 이때 측면으로 방출되는 빛의 휘도와 휘도분포 균일도에 중요한 영향을 미치는 인자를 패턴간격이 비율과 가공깊이로 선정하고 그 수준을 결정 하였다.



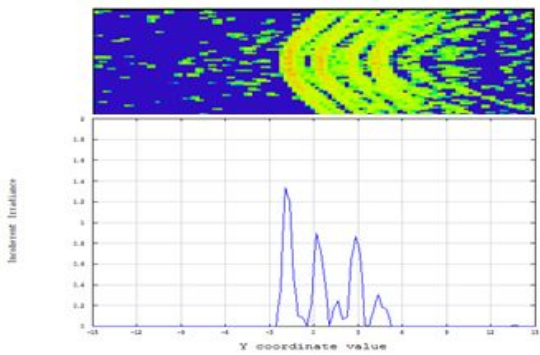
(a)



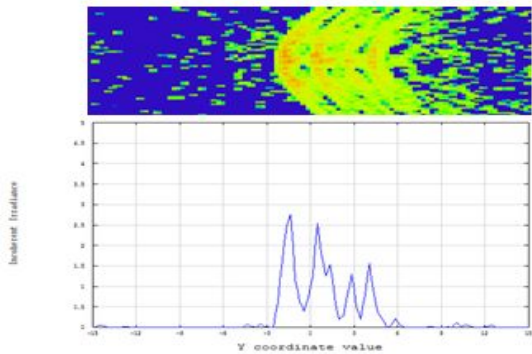
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 4-1. 산란패턴 모형에 따른 휘도 분포

제1절 산란패턴 조건에 따른 전산모사 결과 분석

직선바 형태의 산란패턴을 POF의 측면에 표 3-1과 같은 조건으로 모델링을 하여 전산모사를 시행하였다. 그림 4-2는 표 4-1과 같이 depth1에서 length와 distance의 변화에 따른 전산모사 결과이다. 전산모사 결과 depth1에서는 표 4-2와 그림 4-3에서와 같이 D1-L1(351cd/cm², 442cd/cm², 364cd/cm²)에서 가장 균일한 휘도 분포를 보이고 D1-L4(341cd/cm², 428cd/cm², 332cd/cm²)에서 상대적으로 균일한 휘도 분포를 볼 수 있다.

표 4-1. depth1에 대한 length와 distance의 값 (단위:mm)

Type	Depth	Length (distance)
D1-L1	0.5-0.75-1.0	5-5-5 (10-10)
D1-L2	0.5-0.75-1.0	4-5-5 (11-10)
D1-L3	0.5-0.75-1.0	4-4-5 (11-11)
D1-L4	0.5-0.75-1.0	3-4-5 (12-11)
D1-L5	0.5-0.75-1.0	3-5-7 (10-10)

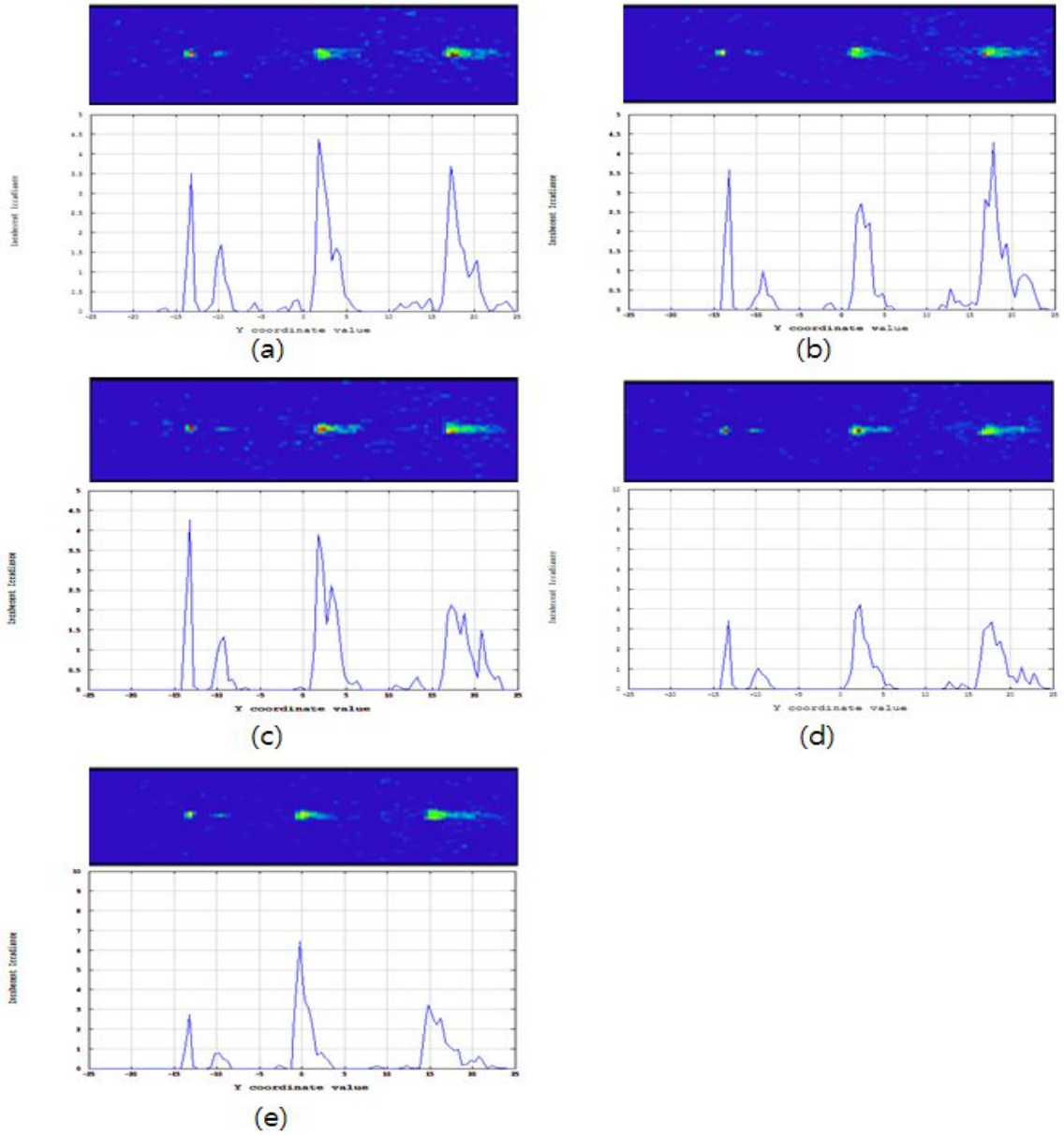


그림 4-2. depth1의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
 (a)D1-L1 (b)D1-L2 (c)D1-L3 (d)D1-L4 (e)D1-L5

표 4-2. depth1의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

Type	1Point (cd/cm ²)	2Point (cd/cm ²)	3Point (cd/cm ²)
D1-L1	351	442	364
D1-L2	366	271	434
D1-L3	436	384	225
D1-L4	341	428	332
D1-L5	283	647	313

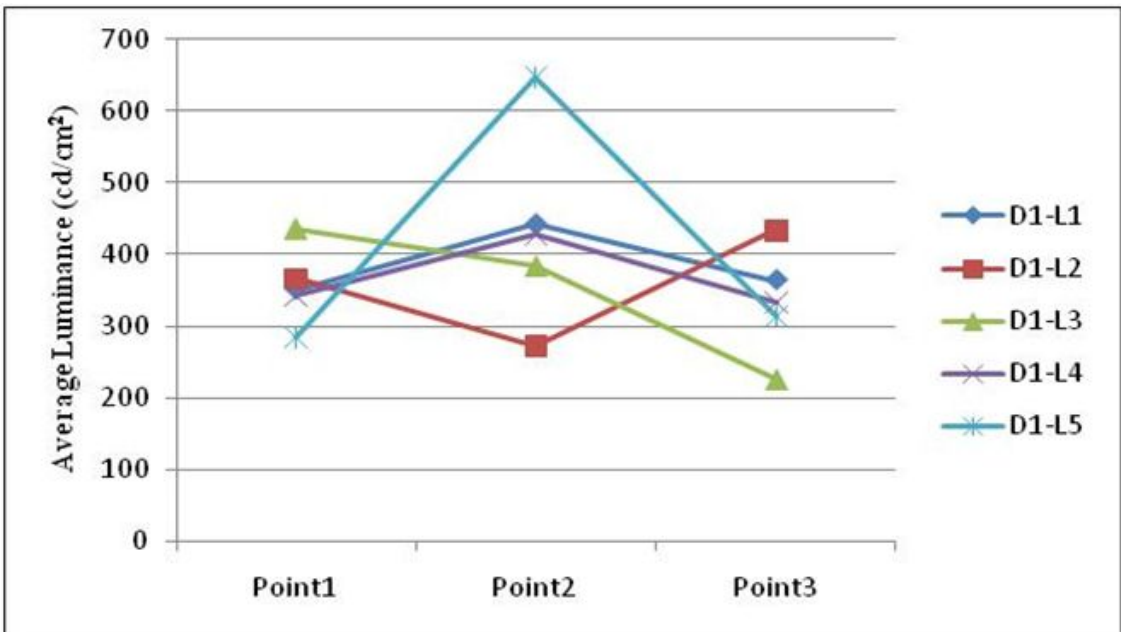


그림 4-3. Depth1의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-4는 표 4-3와 같이 depth2에서 length와 distance의 변화에 따른 전산모사 결과이다. depth2에서는 표 4-4, 그림 4-5에서와 같이 광원에서 멀어질수록 높은 휘도값을 갖는 것을 알 수 있으며 D2-L4(392cd/cm², 397cd/cm², 388cd/cm²)에서 가장 균일한 휘도 분포를 볼 수 있다.

표 4-3. depth2에 대한 length와 distance의 값 (단위:mm)

Type	Depth	Length (distance)
D2-L1	0.5-0.75-1.25	5-5-5 (10-10)
D2-L2	0.5-0.75-1.25	4-5-5 (11-10)
D2-L3	0.5-0.75-1.25	4-4-5 (11-11)
D2-L4	0.5-0.75-1.25	3-4-5 (12-11)
D2-L5	0.5-0.75-1.25	3-5-7 (10-10)

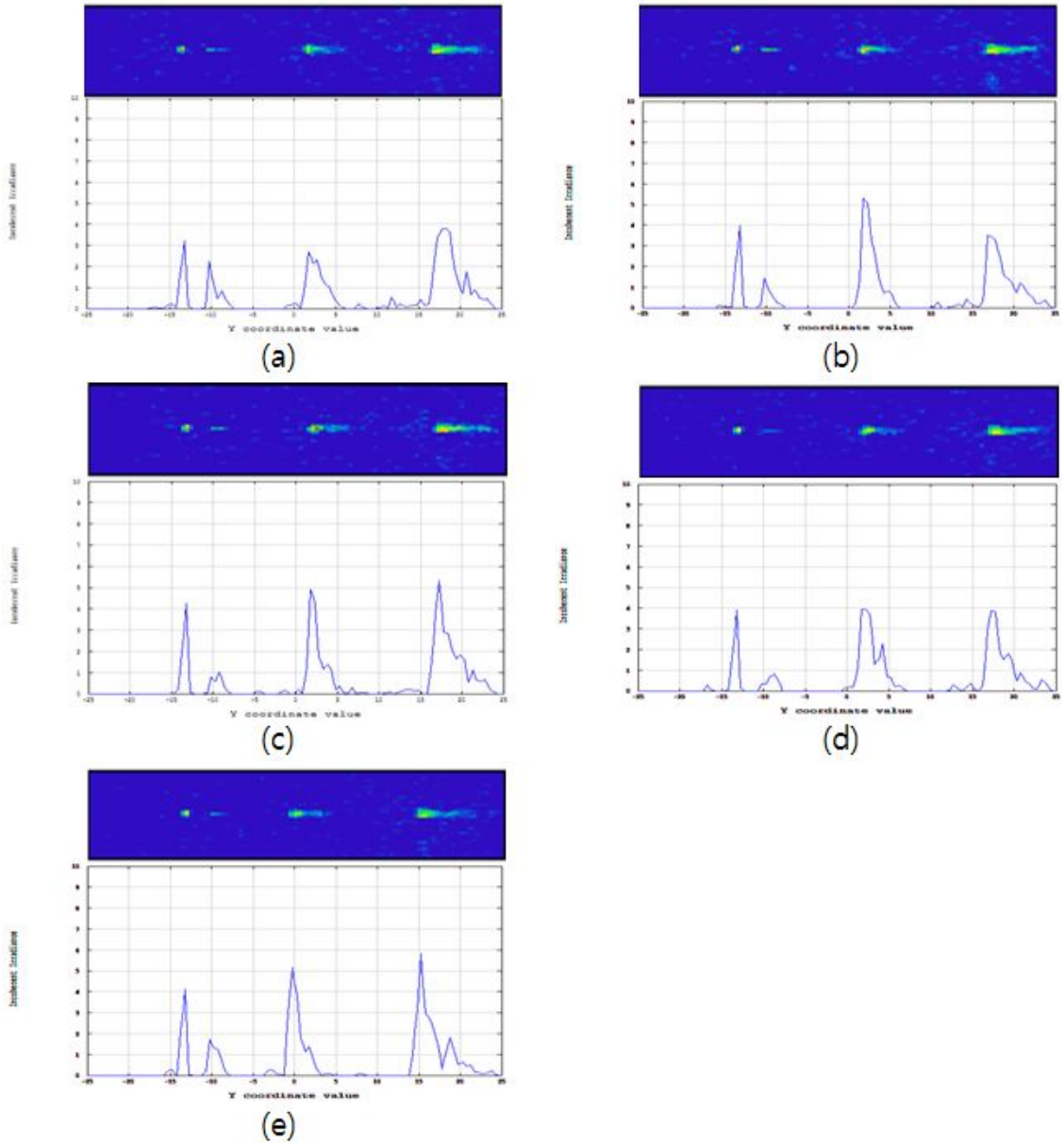


그림 4-4. depth2의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
 (a)D2-L1 (b)D2-L2 (c)D2-L3 (d)D2-L4 (e)D2-L5

표 4-4. depth2의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

Type	1Point (cd/cm ²)	2Point (cd/cm ²)	3Point (cd/cm ²)
D2-L1	314	283	390
D2-L2	401	524	350
D2-L3	410	495	538
D2-L4	392	397	388
D2-L5	411	514	693

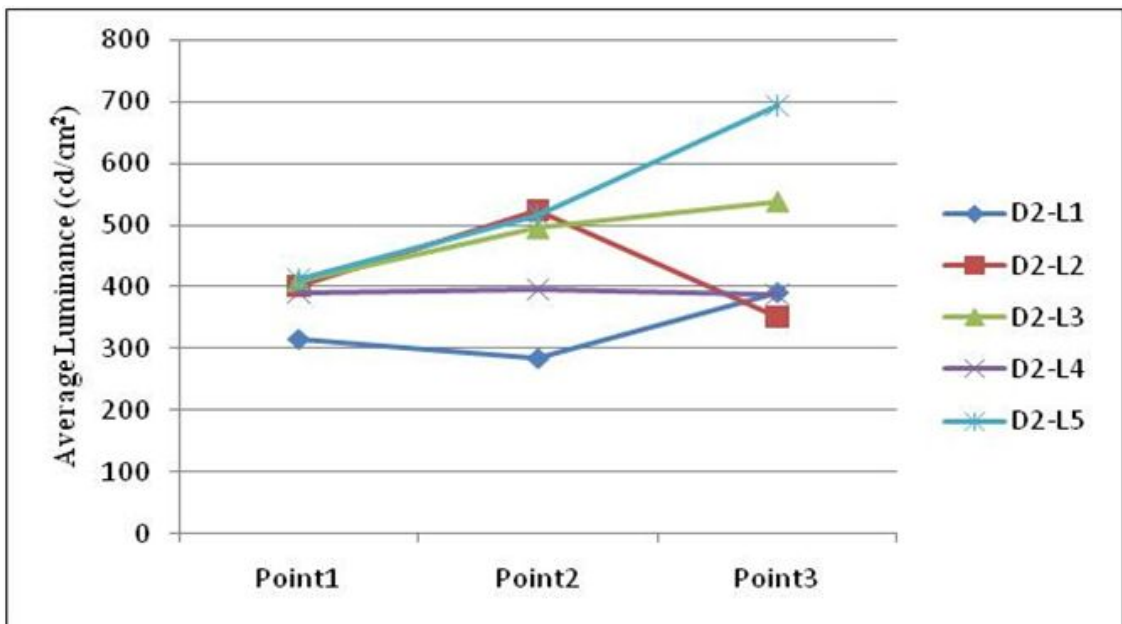


그림 4-5. Depth2의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-6은 표 4-5과 같이 depth3에서 length와 distance의 변화에 따른 전산모사 결과이다. depth3에서는 표 4-6, 그림 4-7에서와 같이 D3-L2(562cd/cm², 494cd/cm², 567cd/cm²)과 D3-L5(881cd/cm², 726cd/cm², 708cd/cm²)에서 상대적으로 균일한 휘도 분포를 볼 수 있으며, Point1에서 높은 휘도값을 갖고 광원과 멀어질수록 휘도값이 감소하고 있다.

표 4-5. depth3에 대한 length와 distance의 값 (단위:mm)

Type	Depth	Length (distance)
D3-L1	0.75-1.0-1.25	5-5-5 (10-10)
D3-L2	0.75-1.0-1.25	4-5-5 (11-10)
D3-L3	0.75-1.0-1.25	4-4-5 (11-11)
D3-L4	0.75-1.0-1.25	3-4-5 (12-11)
D3-L5	0.75-1.0-1.25	3-5-7 (10-10)

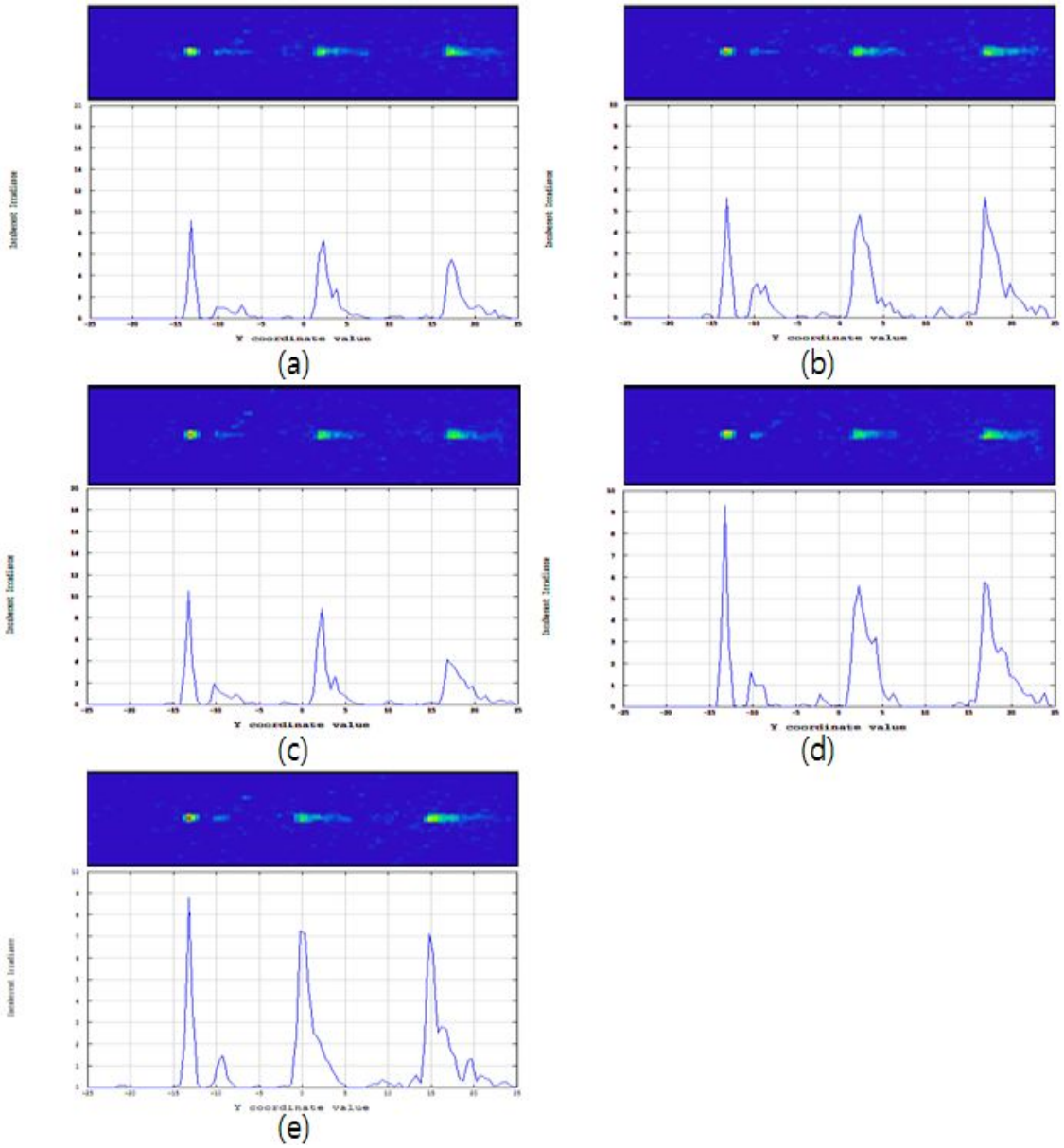


그림 4-6. depth3의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
 (a)D3-L1 (b)D3-L2 (c)D3-L3 (d)D3-L4 (e)D3-L5

표 4-6. depth3의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

Type	1Point (cd/cm ²)	2Point (cd/cm ²)	3Point (cd/cm ²)
D3-L1	911	718	536
D3-L2	562	494	567
D3-L3	1052	907	423
D3-L4	942	563	582
D3-L5	881	726	708

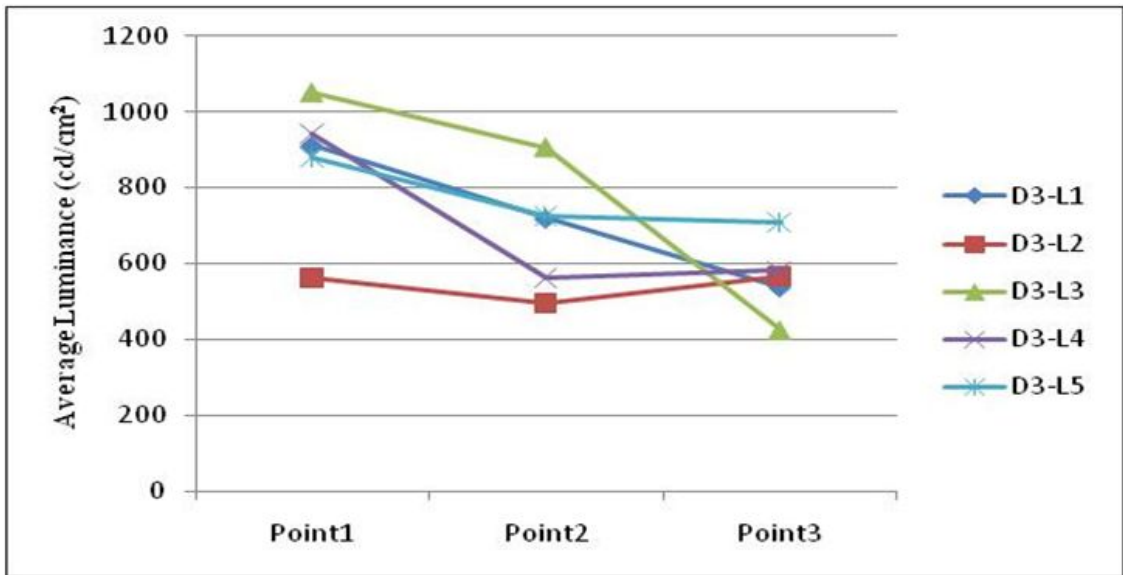


그림 4-7. Depth3의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-8은 표 4-7와 같이 depth4에서 length와 distance의 변화에 따른 전산모사 결과이다. 표 4-8과 그림 4-9에서 보는 바와 같이 광원과 가까운 Point1에서 높은 휘도값을 나타내고 있고, Point2와 Point3에서 비교적 균일한 휘도 분포를 보이고 있다.

표 4-7. depth4에 대한 length와 distance의 값 (단위:mm)

Type	Depth	Length (distance)
D4-L1	0.75-1.25-1.5	5-5-5 (10-10)
D4-L2	0.75-1.25-1.5	4-5-5 (11-10)
D4-L3	0.75-1.25-1.5	4-4-5 (11-11)
D4-L4	0.75-1.25-1.5	3-4-5 (12-11)
D4-L5	0.75-1.25-1.5	3-5-7 (10-10)

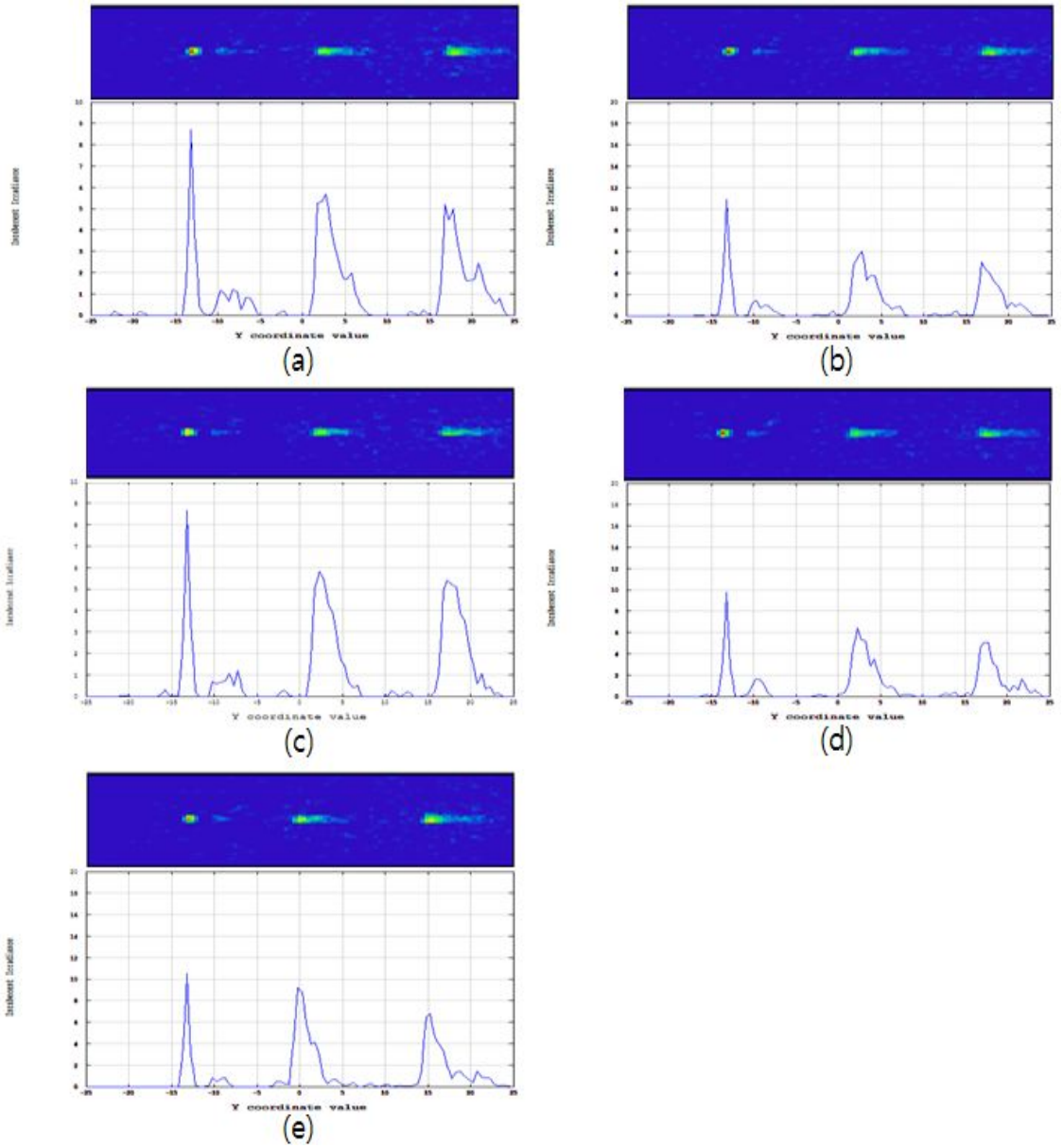


그림 4-8. depth4의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
 (a)D4-L1 (b)D4-L2 (c)D4-L3 (d)D4-L4 (e)D4-L5

표 4-8. depth4의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

Type	1Point (cd/cm ²)	2Point (cd/cm ²)	3Point (cd/cm ²)
D4-L1	872	567	518
D4-L2	1104	602	513
D4-L3	876	593	546
D4-L4	989	635	509
D4-L5	1076	931	674

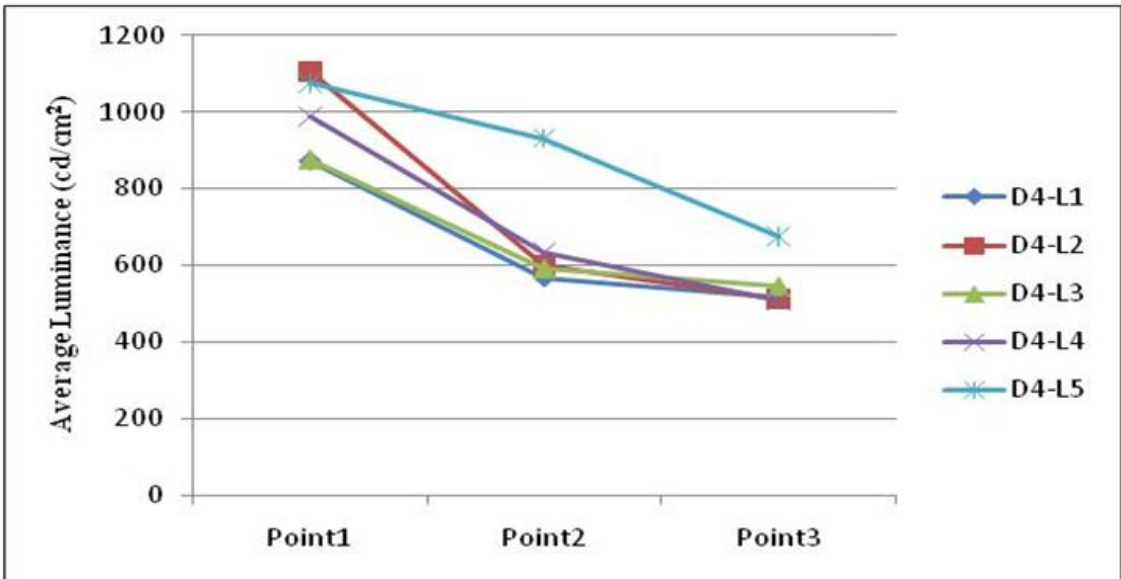


그림 4-9. Depth4의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

그림 4-10은 표 4-9와 같이 depth5에서 length와 distance의 변화에 따른 전산모사 결과이다. 표 4-10과 그림 4-11에서 보는 바와 같이 광원과 멀어 질수록 휘도값이 감소하며 불균일한 휘도 분포를 나타냄을 알 수 있다. 특히 Point1과 Point2의 휘도차가 2배 가까이 차이가 남을 알 수 있다.

표 4-9. depth5에 대한 length와 distance의 값 (단위:mm)

Type	Depth	Length (distance)
D5-L1	1.0-1.25-1.5	5-5-5 (10-10)
D5-L2	1.0-1.25-1.5	4-5-5 (11-10)
D5-L3	1.0-1.25-1.5	4-4-5 (11-11)
D5-L4	1.0-1.25-1.5	3-4-5 (12-11)
D5-L5	1.0-1.25-1.5	3-5-7 (10-10)

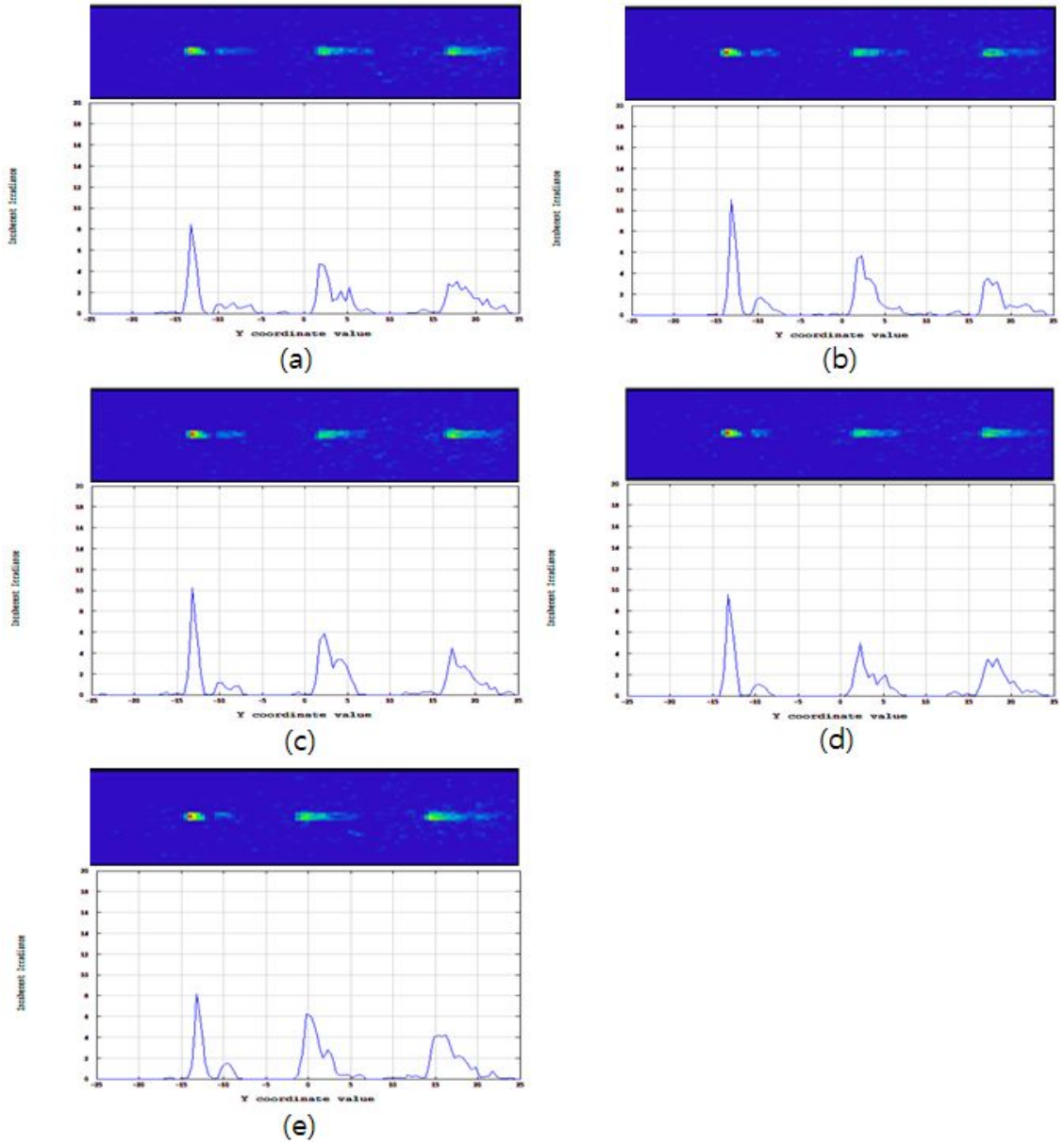


그림 4-10. depth5의 조건에 length의 변화에 따른 휘도 분포
 (a)D5-L1 (b)D5-L2 (c)D5-L3 (d)D5-L4 (e)D5-L5

표 4-10. depth5의 조건에 따른 length변화에 대한 휘도 값

Type	1Point (cd/cm ²)	2Point (cd/cm ²)	3Point (cd/cm ²)
D5-L1	816	473	317
D5-L2	1126	574	386
D5-L3	1035	591	436
D5-L4	968	498	375
D5-L5	811	614	413

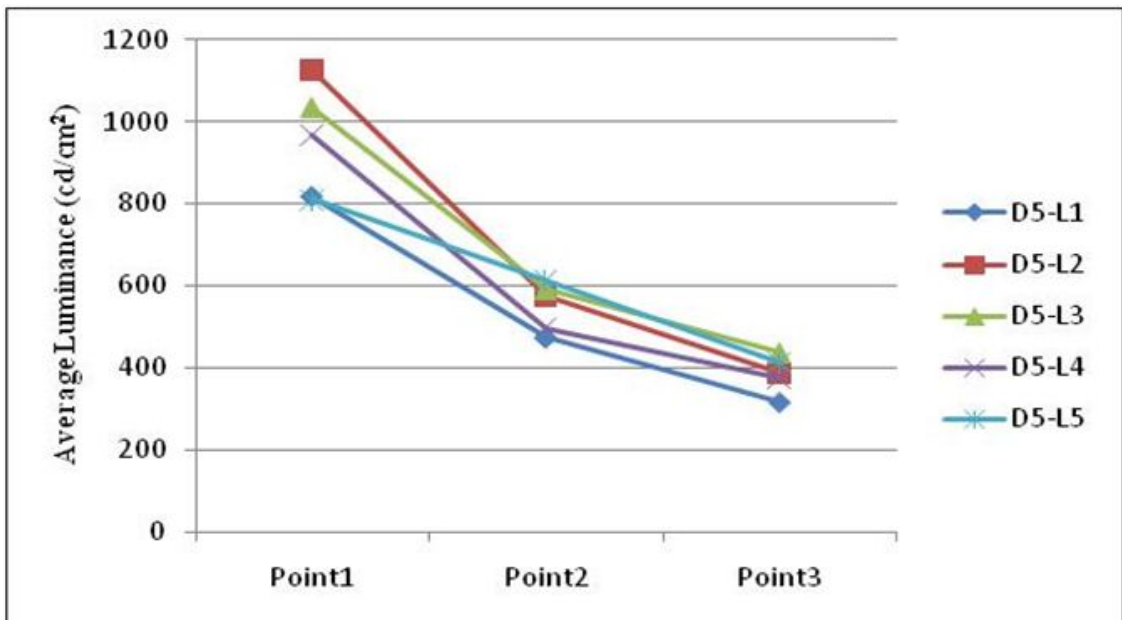


그림 4-11. Depth5의 조건에 따른 각 Point의 광량 그래프

전산모사 결과 25가지 type중 휘도 분포가 균일한 조건은 그림 4-12와 같이 D1-L1(351cd/cm², 442cd/cm², 364cd/cm²), D1-L4(341cd/cm², 428cd/cm², 332cd/cm²), D2-L4(392cd/cm², 397cd/cm², 388cd/cm²), D3-L2(562cd/cm², 494cd/cm², 567cd/cm²), D3-L5(881cd/cm², 726cd/cm², 708cd/cm²)에서 균일한 휘도값을 갖고, 그중에서도 D2-L4는 휘도값이 낮지만 균일도가 가장 좋은 것을 알 수 있고, D3-L5는 휘도값은 높지만 균일도가 상대적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 D1-L1, D1-L4 그리고 D3-L2의 결과가 서로 상반되는 것으로 보아 depth 변화와 length의 변화에 따라 휘도 분포가 변화한다는 것을 알 수 있다. 그리고 depth5의 경우 표 4-10에서 보는 바와 같이 Point1에서 평균 휘도값이 951.2 cd/cm²에서 Point2와 Point3에서 550cd/cm², 385.4cd/cm²으로 휘도값이 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 Point1에서 많은 빛이 측면으로 방출되는 현상으로 첫 패턴의 depth값 너무 크면 Point1에서 많은 양의 빛이 방출 되기에 광원과 가까울수록 낮은 depth값을 필요로 한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 균일한 휘도 분포를 얻기 위해서는 Core에 대한 손상은 줄이고 촘촘하게 패턴을 설계하는게 유리하다는 것을 알 수 있다.

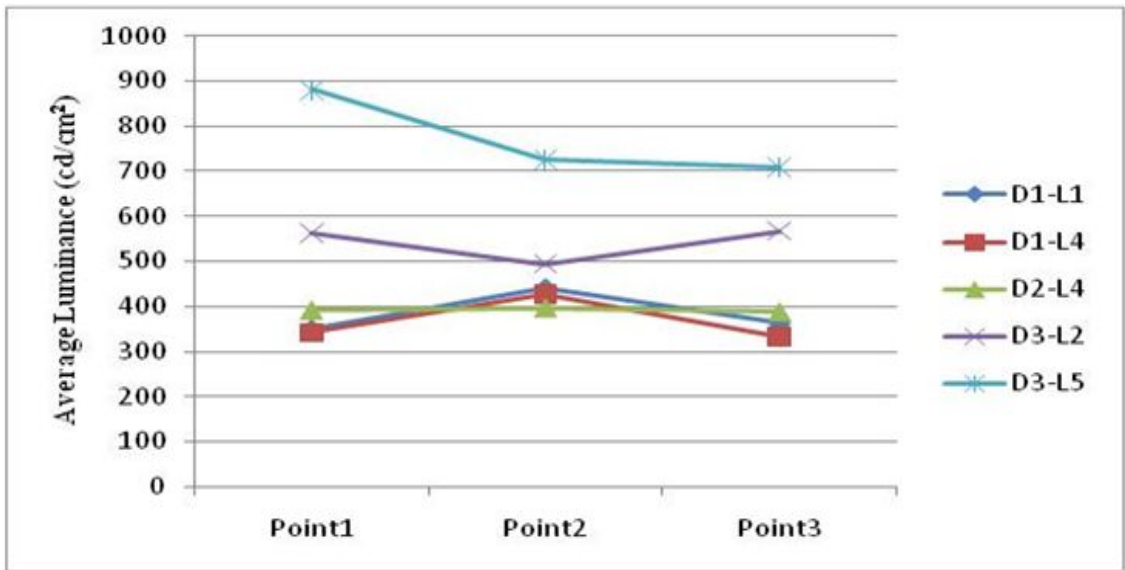


그림 4-12. 25가지 type중 휘도분포가 좋은 5가지 type 휘도분포 비교 그래프

제2절 산란패턴 조건에 따른 레이저 가공 및 측정 결과 분석

전산모사의 결과에 의해서 D1-L1, D1-L4, D2-L4, D3-L2, D3-L5의 조건에서 균일한 휘도로 측면 발광하는 것을 예상 할 수 있었다. 이에 CO₂ 레이저를 이용하여 5가지 형태의 산란패턴을 가공하여 분광 방사 휘도계로 측정해 보았다. 표 4-12는 측정된 휘도값을 나타낸 것이다. 실제 측정결과 값은 전산모사 결과 값에 비해 휘도 값이 낮게 나왔다. 또한 가공면에서 측정한 값은 5가지 형태의 산란패턴 모두 광원과 멀어 질수록 휘도값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 측정 결과 중에서 그림 4-18에서 보는 바와 같이 D1-L4(123.7cd/cm², 151.8cd/cm², 120.3cd/cm²)에서 감소폭이 가장 낮고 일정하였고 전산모사결과와 비교하여도 가장 비슷하다. 또 그림 4-19에서 보이는 것과 같이 가공면 뒤에서의 휘도값이 5가지 형태의 패턴 모두 Point2에서 높은 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 Point1와 Point3의 주변 휘도 영향으로 인해 Point2에서 휘도 값이 높은 것으로 예상된다. 또한 가공면 뒤에서는 가공면에서의 휘도값 보다 높은 값을 갖고 D1-L4(731.9cd/cm², 1212.5cd/cm², 736.9cd/cm²)에서 보다 균일한 휘도 분포를 볼 수 있었다.

표 4-11. 가공된 광섬유의 측면에서 측정한 휘도 값

Type	Measure face	1Point (cd/cm ²)	2Point (cd/cm ²)	3Point (cd/cm ²)
D1-L1	front face	282.8	232	207.4
	back face	1818.3	2735.4	2093.5
D1-L4	front face	123.7	151.8	120.3
	back face	731.9	1212.5	736.9
D2-L4	front face	152.8	123.8	99.8
	back face	628.4	1290.6	769.1
D3-L2	front face	361.2	277.8	242.7
	back face	1488.9	1994.6	1370.1
D3-L5	front face	337.1	223.4	165.4
	back face	1265.2	1725.1	1036.5

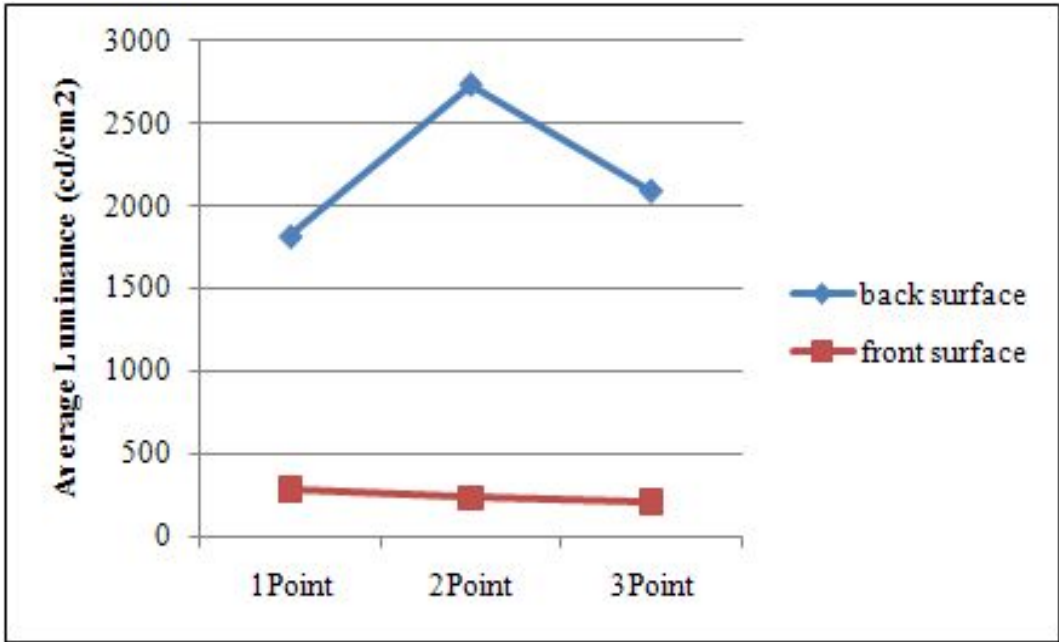


그림 4-13. D1-L1의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프

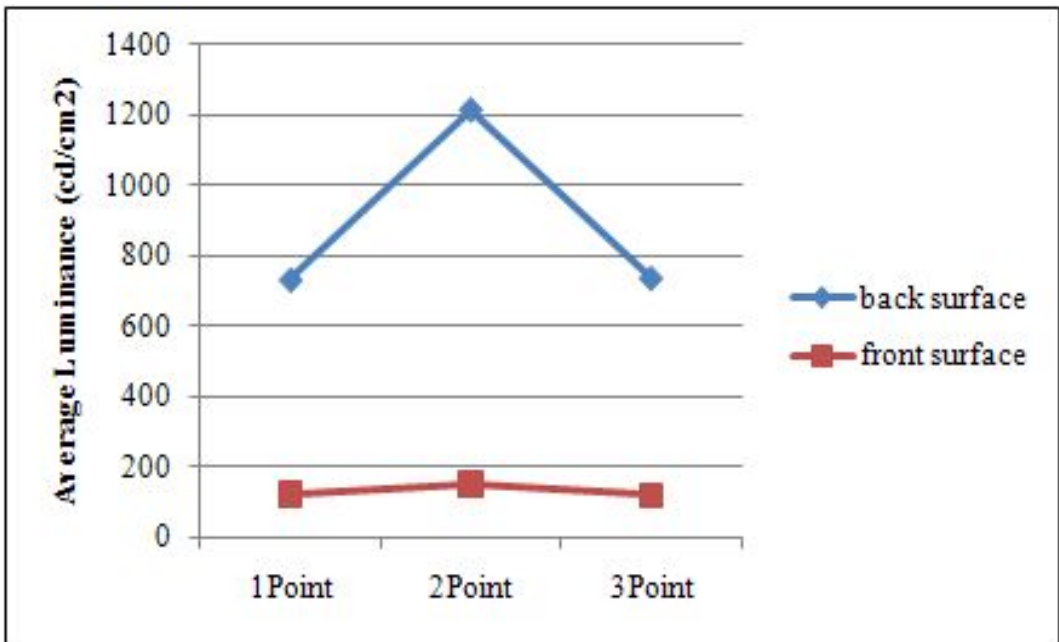


그림 4-14. D1-L4의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프

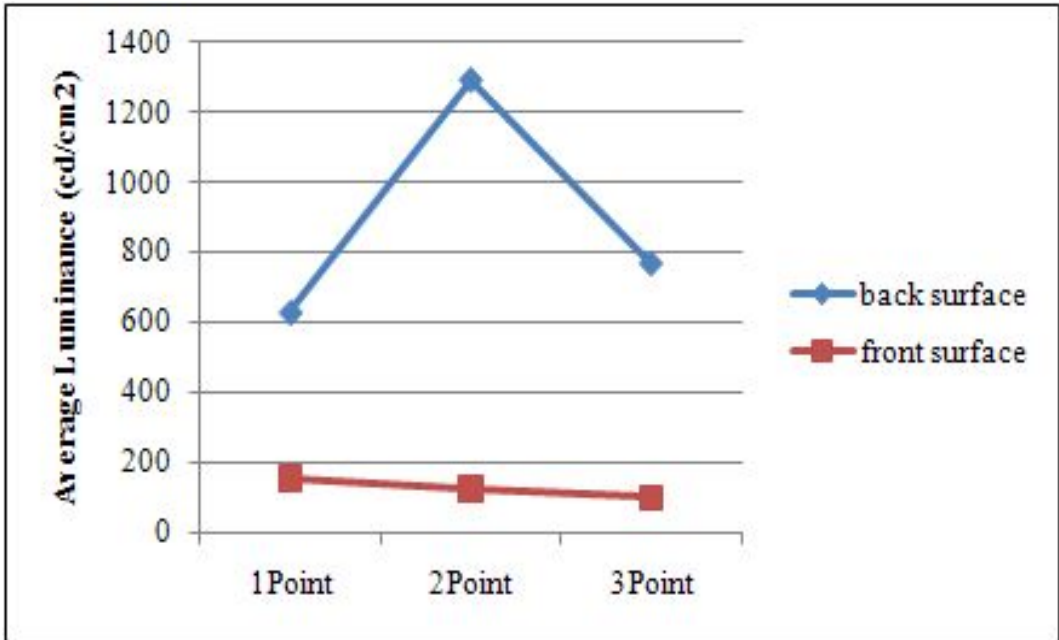


그림 4-15. D2-L4의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프

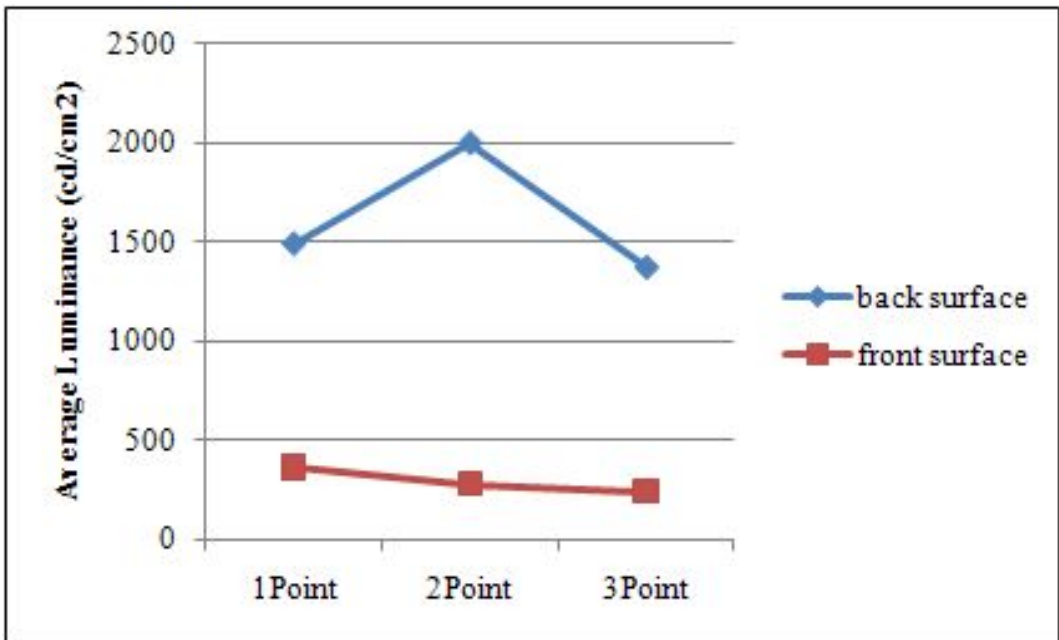


그림 4-16. D3-L2의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프

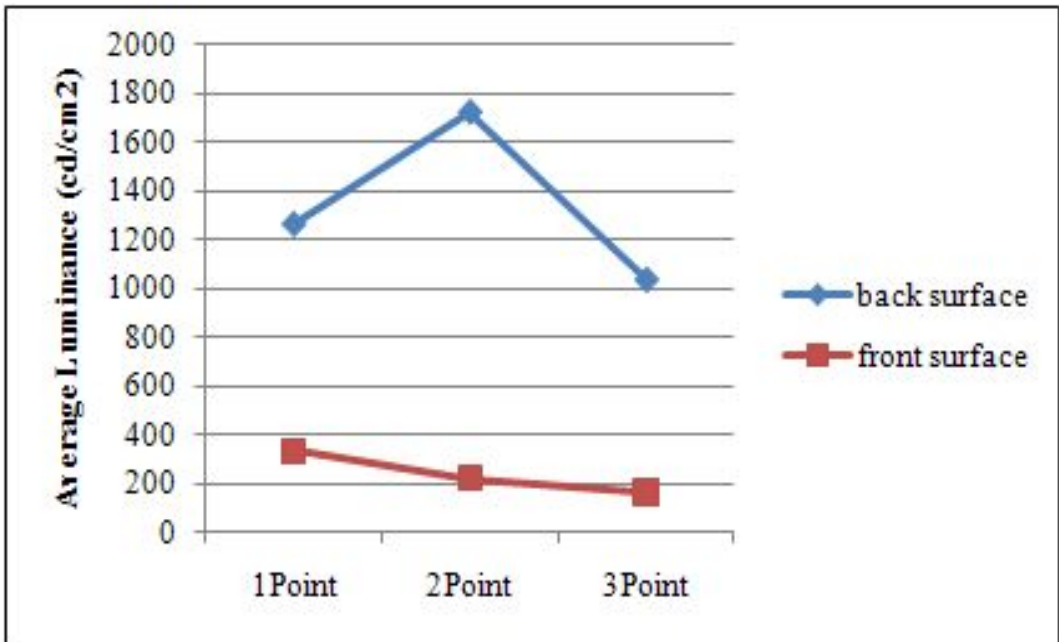


그림 4-17. D3-L5의 front face와 back face에 대한 각 Point의 광량 그래프

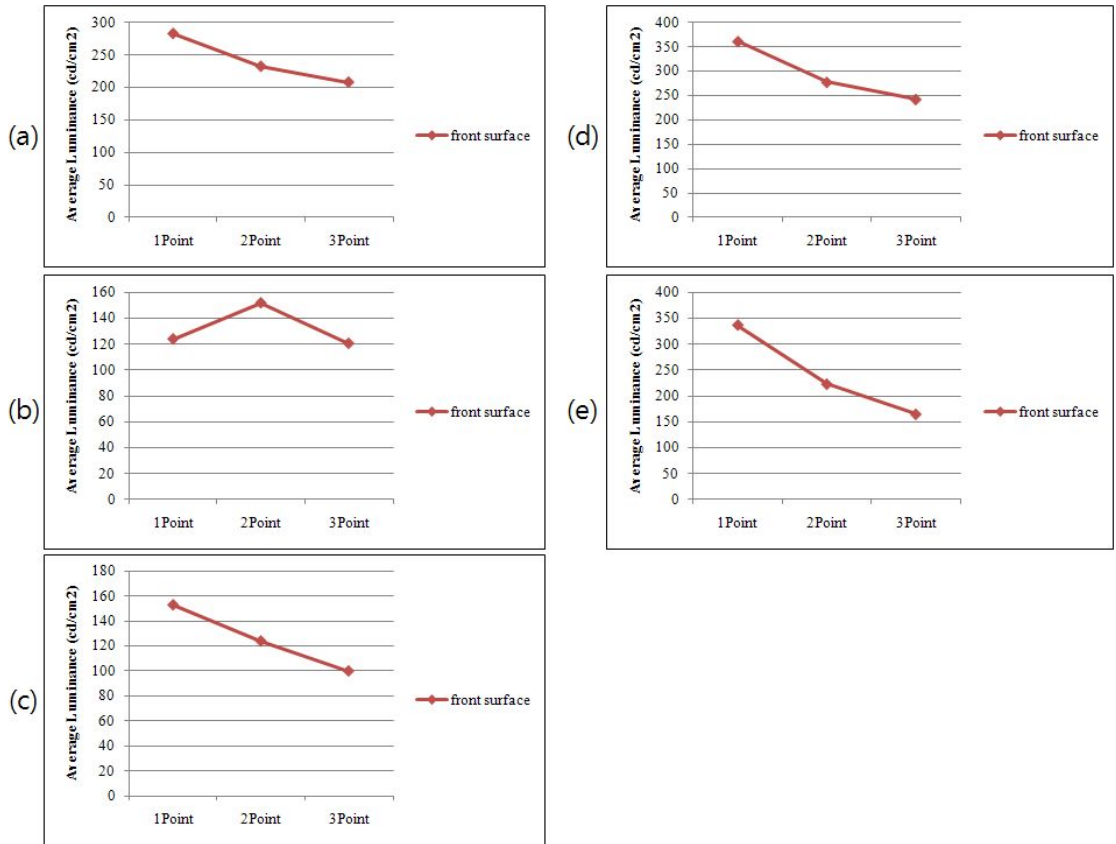


그림 4-18. front face에 대한 각 Point의 광량 그래프

(a) D1-L1 (b) D1-L4 (c) D2-L4 (d) D3-L2 (e) D3-L5

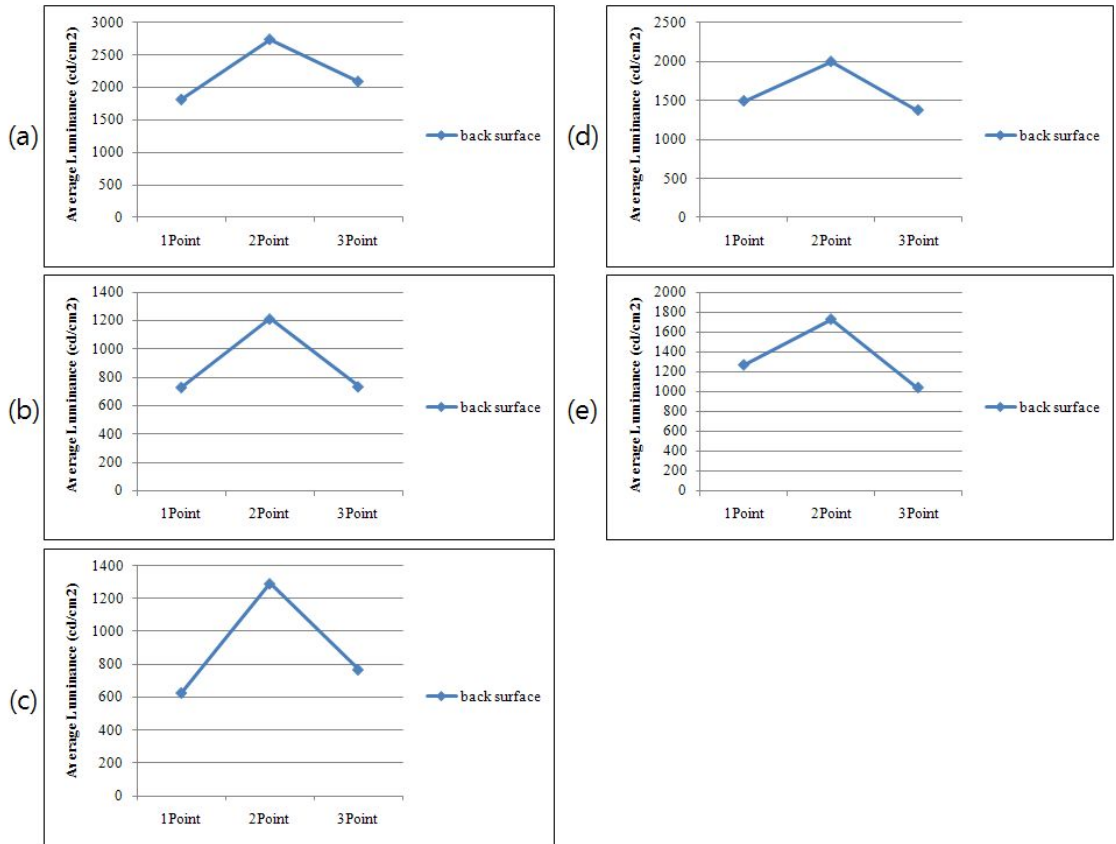


그림 4-19. back face에 대한 각 Point의 광량 그래프

(a) D1-L1 (b) D1-L4 (c) D2-L4 (d) D3-L2 (e) D3-L5

제 5장 결론

균일한 휘도 분포를 갖는 광섬유 광원으로 사용하기 위하여 POF의 측면에 빛의 진행 방향에 패턴을 가공하여 측면 발광을 유도 하였다. 하지만 POF는 레이저 가공에 의해 측면 발광했을 경우 방출되는 광이 광원과 가까운 쪽에서 많이 분포됨으로 인해 휘도 분포가 균일하지 않는 문제점이 야기된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 POF의 측면에 빛의 진행방향과 수평하게 막대바 형태의 패턴을 가공하고 패턴의 파라미터값의 변화에 따른 휘도분포와의 관계에 대해 제시하고자 레이저로 가공된 산란패턴을 설계하여 POF에 제작한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CO₂ 레이저를 이용하여 POF의 측면발광을 유도하기 위해 산란패턴을 설계하였다. 또한 균일한 휘도분포를 갖는 측면발광을 위해 여러 가지 형태의 산란패턴을 제안하였다.

2) 빛의 진행방향과 수평하게 막대바 형태의 산란패턴을 depth와 length, distance값의 변화에 따른 측면 발광된 광의 휘도 분포를 전산모사를 통해 비교 분석 하였고, 균일한 휘도분포를 갖는 패턴의 파라미터값을 찾았다. 이 결과를 바탕으로 CO₂ 레이저를 이용하여 실제 POF에 적용시켜 휘도분포를 측정하였다.

3) 실제 레이저로 가공하여 측정한 결과 산란면에서는 휘도분포가 가운데 패턴에서 높은 값을 갖고, 가공면에서는 광원과 멀어 질수록 휘도값이 낮아지기는 하지만 비교적 균일한 휘도값을 갖는 것을 확인 하였다. 또 파라미터의 조건에 따라 휘도분포를 제어 가능하다는 것을 확인 할 수 있었다.

4) 측정 결과 산란면에서 휘도분포가 가운데 패턴에서 높은 값이 나오는 것은 첫 번째 패턴과 마지막 패턴의 영향으로 가운데 패턴으로 많은 양의 빛이 발광되는 것으로 생각된다. 이에 양 끝에 보조패턴을 가공한다면 보다 균일한 휘도분포를 갖을 것이라 예상된다.

5) 본 연구에서는 일정한 간격으로 세 지점에 산란패턴을 가공하여 균일한 휘도분포를 갖는 측면발광을 유도 하였다. 앞으로 연구에서는 빛의 진행 방향과 수직인 형태의 패턴과 복합된 패턴 설계 및 패턴간격을 촘촘히 하여 측면발광의 성능을 향상 시켜 실제 도광판에 적용함으로써 효율적인 광섬유 광원으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Jong-Youb Sah. and Jong-Ryul Park "analysis on Optical characteristics of LCD Backlight LGP", J. Korean Soc. Mech. Eng. (A) 28, 2004, 365-369.
- [2] Sunghye Lee, "The Effects of Injection Molding Parameters on Optical Properties of Light Guide Plates" in Proceeding of the 2005 Korean Society of Mechanical engineers, Daegu, Korea, May 25-27, 2005, pp.1711-1715.
- [3] A. Horibe, M. Baba, Y. Koike, E. Nihei, "High-Efficiency and High Quality LCD Backlight Using Highly Scattering Optical Transmission Polymer", ICE Trans. Electron, 1999, Vol E81-C, pp. 1697-1702.
- [4] Kim, Cha-Yon, "Technical Trends of Back Light Unit (BLU)" Korean Information Display Society, 2001, Vol. 2 No. 1, pp. 45~51.
- [5] "BLU용 도광판" 한국과학기술 정보연구원
- [6] P. J. Jaquet, "in the Proceedings of the 1991 Plastic Optical Fiber Meeting of the SPIE edited by M" Kitazawa Boston, MA, 1991, pp. 165.
- [7] E. S. Choi, Y. S. Kim, S. H. Park and Y. J. Shin, "LED display by side luminescence of a plastic optical fiber" Sea Mulli, 2007, Vol.54, No.5, pp. 409~412.

- [8] Y. H. Choi, "The study of optical characteristics of light guide panel depending on laser-induced scatterer pattern", 조선대학교 대학원 석사학위논문, 2008.
- [9] Kyu-Man Choi, "Design Fabrication of the Light Guide Panel Backlight" 대한전자공학회 광원지부 추계 학술대회, 1997
- [10] H.S. Lee, "A Study of the Injection Molding for the Light Guide Plate of a Small Sized LCD (1): Finite Element Analysis and Mold Design," Trans. Mater. Process. 11, 2002, pp. 332~340.
- [11] H.S. Lee, "A Study of the Injection Molding for the Light Guide Plate of a Small Sized LCD (2): Influences of Processing Conditions on the Brightness," Trans. Mater. Process. 11, 2002, pp. 341~348.
- [12] T. H. Kim, "Fabrication and analysis of the Light Guide Panel by 3D Laser Engraving", 아주대학교 대학원 박사학위 논문, 2007.
- [13] Y. H. Choi Y. S. Kim, S. H. Park, E. S. Choi, and Y. J. Shin, "3차원 산란체 도광판 표면의 그리드 패턴에 의한 밝기 성능 분석", 2007년 봄 학술논문발표회 회보집, Korea, April 20, 2007, pp. 135.
- [14] S. H. Park, "A study on the Luminance and Uniformity Improvement of Light Guide Panel according to the Scattering Pattern by Laser processing", 박사학위논문, 조선대학교, 박사학위 논문, 2010.

- [15] 최영희, 김영섭, 박소희, 곽우섭, 최은서, 신용진, “내부가공패턴과 표면가공에 의한 도광판의 밝기 성능 분석”, 한국물리학회 추계 학술대회, 2007, pp. 87-87.
- [16] 최영희, 최은서, 신용진, “내부가공패턴과 표면가공패턴에 의한 도광판 밝기 성능 분석”, 한국광학회 2008년도 동계학술대회 논문집, 2008, pp. 391-392.
- [17] 최영희, 최은서, 신용진, “레이저 가공된 내부 및 표면패턴을 가지는 도광판 성능 분석”, 한국레이저가공학회지, 2008, pp. 391-392.
- [18] 최영희, 최은서, 신용진, “내부 산란체 기반 도광판 휘도 향상을 위한 패턴설계 및 설계 평가를 위한 효율적인 모델링 기법”, 새물리, 2008, Vol.56 No. pp. 26-432.
- [19] 송순달, 『레이저의 기초원리와 응용』, 청문각, 2001.
- [20] G. D. Kim et al., "Laser-marking process for liquid-crystal display light guide panel", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of engineering manufacture, 2005, Vol. 219, No. 7, pp. 565-569.
- [21] 박기수, “Galvanometer를 이용한 광학적 자동축점조정 시스템”, 한국물리학회지, 1996, Vol. 6, No. 1, pp. 1-6.
- [22] J. Lawrence, L. Li, "Modification of the wettability characteristics characteristics of polymethyl methacrylate(PMMA) by means of CO₂, Nd:YAG, excimer and high power diode laser radiation", Material Science and Engineering A303, 2001, pp. 142-149.

- [23] 김도훈, 『레이저 가공학』, 경문사, 1996.
- [24] 양성민, “CO2 laser beam을 이용한 backlight용 도광판 개발”, 인하대학교 대학원 석사학위논문, 2001.
- [25] 황경현 외, “레이저를 이용한 재료가공”, The Journal of Optical Society of Korea(Korean Edition), 1990, Vol. 1, No. 1, pp. 98-105.
- [26] 김도훈, “레이저에 의한 재료가공에서 레이저빔의 특성과 조절” 대학금속학지, 1986, 제 24권, 제 1호, pp. 59-65.
- [27] J. Wilson et al., "Laser principles and applications", Prentice Hall International Ltd., UK, 1987, pp. 106-118.
- [28] 김태훈, 최영희, 박소희, 최은서, 김영섭, 신용진, “플라스틱 광섬유를 이용한 측면 발광형 디스플레이 구현”, 한국광학회 동계 학술대회, 2007, pp. 261-261.
- [29] 마혜준, 이승석, 최은서, 신용진, “레이저 가공패턴에 따른 플라스틱 광섬유 측면 발광 휘도 성능 예측을 위한 전산모사”, 한국물리학회 춘계 학술대회, 2011, pp. 191-191.

Publication

Journal Papers

1. 최영희, 마혜준, 최은서, 신용진, “광학적 반사률이 적용된 단순평면패턴 도광판 모델의 시뮬레이션”, 새물리, 2009, Vol. 59, No. 2, pp. 165-168.
2. 마혜준, 최은서, 신용진, “도플러 편이를 이용한 주파수 간섭계 기반 진동센서”, 새물리, pp. 817-822.
3. 마혜준, 이승석, 박소희, 최은서, 신용진, “레이저 가공 산란패턴의 유형에 따른 도광판의 휘도 및 균일도 향상에 관한 전산모사”, 한국광학회지, 2010, pp. 225-229.

Conference Papers

1. 마혜준, 최은서, “Tailoring roll-off profile of depth range with single slit-based diffraction pattern”, 2009년 한국물리학회 춘계 학술대회, 2009, pp. 201-201.
2. 최영희, 마혜준, 최은서, 신용진, “Light guide panel based on single LED and scattering”, 한국물리학회 춘계 학술대회, 2009, pp. 201-201.
3. 박진수, 엄주범, 마혜준, 최은서, “주파수 영역 간섭계를 이용한 진동 검출”, 한국광학회 하계 학술발표대회, 2009, pp. 14-14.

4. 마혜준, 최은서, 신용진, "Fiber-optic common-path FD-OCT implementation for optical sensing and biomedical imaging", 한국물리학회 추계 학술대회, 2009, pp. 255-255.
5. 마혜준, 이승석, 최은서, 신용진, "회절광학소자를 이용한 광학영상용 주사소자 설계", 한국물리학회 춘계 학술대회, 2010, pp. 38-38.
6. 마혜준, 이승석, 박소희, 최은서, 신용진, "Endoscopic optical coherence tomography", 한국물리학회 춘계 학술대회, 2010, pp. 39-39.
7. 마혜준, 이승석, 최은서, 신용진, "소형 광프로브의 광결합 효율 최적화를 위한 광학 시뮬레이션", 제 17회 광전자 및 광통신 학술회의, 2010, pp. 112-113.
8. 마혜준, 이승석, 최은서, 신용진, "단일 광섬유 광영상장치의 구현", 한국광학회 하계 학술대회, 2010, pp. 433-434.
9. 마혜준, 이승석, 최은서, 신용진, "single-fiber optical imaging device using solid etalon", 2011 Photonics west conference proceeding, 2011, pp. 107-107
10. 마혜준, 이승석, 최은서, 신용진, "레이저 가공패턴에 따른 플라스틱 광섬유 측면 발광 휘도 성능 예측을 위한 전산모사", 한국물리학회 춘계 학술대회, 2011, pp. 191-191.
11. 이승석, 마혜준, 최은서, 신용진, "도광판안의 산란패턴판 기울기 변화에 따른 휘도 균일도 향상에 대한 전산모사", 한국물리학회 춘계 학술대회, 2011, pp. 72-72.