

유기 발광 소자의 광추출 효율 향상을 위한 마이크로 렌즈 어레이의 시뮬레이션

황덕현¹, 김혜숙^{1,b}, 이원재², 이승훈³, 김태완^{1,a}

¹ 홍익대학교 정보디스플레이공학과

² 가천대학교 전자공학과

³ 광운전자공업고등학교

Simulation of Microlens Array for the Improvement of Outcoupled Efficiency of Organic Light-emitting Diodes

Deok Hyeon Hwang¹, Hye Sook Kim^{1,b}, Won Jae Lee², Seunghun Lee³, and Tae Wan Kim^{1,a}

¹ Department of Information Display Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

² Department of Electronic Engineering, Gachon University, Seongnam 406-701, Korea

³ Kwangwoon Electronics Technical High School, Seoul 139-875, Korea

(Received September 21, 2013; Revised September 24, 2013; Accepted September 24, 2013)

Abstract: Performance of organic light-emitting diodes incorporating microlens array was simulated using a Light Tools software. Use of microlens array can help the light to escape out of the device. We simulated a reference device that is consisted of reflection layer, emissive layer, and flat transparent substrate. And in this reference device, outcoupled efficiency of 22% was obtained. Several shapes of microlens were applied such as hemisphere, trapezoid, cone, and rectangular parallelepiped. The results showed the improvement of outcoupled efficiency of the device with microlens compared to that of the reference one. And from the analyses of the simulated data, the obtained appropriate shape of microlens is hemisphere, and the improvement of the device with hemispherical lens is 57% higher than that of the reference one.

Keywords: Organic light-emitting diodes, Microlens array, Outcoupled efficiency

1. 서론

유기 발광 소자의 발광 효율은 내부 발광 효율, 외부 발광 효율로 나눌 수 있다. 내부 발광 효율은 주입된 전자-정공 대비 재결합을 통해 생성된 광자의

비율이며, 도핑, 구조 등의 다양한 연구를 통해 개선되고 있다 [1-3]. 한편 외부 발광 효율은 소자 내부에서 생성된 광자가 소자 외부로 빠져나간 정도를 나타낸 비율이며, 전반사 효과 등은 외부 양자 효율 향상의 저해 요소로 인지된다.

마이크로 렌즈 어레이는 입사각에 변화를 주어, 전반사 효과로 갇힌 광자를 소자 밖으로 탈출시켜 외부 발광 효율 향상에 기여하는 것으로 알려져 있으며, 그 기본적인 원리는 그림 1과 같다.

a. Corresponding author; taekim@hongik.ac.kr

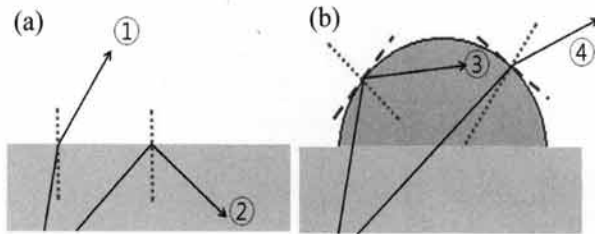


Fig. 1. Schematic representation of the paths of light rays in (a) flat substrate and (b) microlens on top of the flat substrate.

그림 1(a)는 일반적인 평면 유리 기판층을 통과하는 빛의 진행 방향 모식도를 광선 ①과 ②로 보인 그림이고, 그림 1(b)는 (a)에서의 광선 ①과 ②가 마이크로 렌즈에 의해 각각 광선 ③과 ④로 바뀐 경우를 나타낸 그림이다. 광선 ①과 ②의 구분 기준은 입계각이며, 입계각은 두 매질의 굴절률을 이용한 스넬의 법칙을 통해 간단히 얻을 수 있다 [4]. 이때 광선 ①에서 ③으로 바뀐 경우보다 광선 ②에서 ④로 바뀌는 경우가 보다 많다면 광추출 효율 향상을 기대할 수 있으며, 이와 관련된 연구가 다양하게 진행되어 왔다.

2001년에 S. Moller 연구팀은 Ir (ppy)₃ 기반의 형광 유기 발광 소자를 만들고, 그 기판 표면 위에 PDMS (poly dimethyl siloxane)으로 제작한 마이크로 렌즈를 배열하여 외부 발광 효율을 약 10% 향상하였음을 보고하였다 [5]. 그 이후 M. K. Wei 연구팀에서는 마이크로 렌즈의 모양과 배열을 벌집 모양과 비슷한 구조로 구성하여 발광 효율을 35% 이상 끌어올리는 연구 결과 등을 보고하였다 [6-8]. 국내에서는 2011년 J. Y. Kim 연구팀이 두 종류의 감광제를 이용하여 마이크로 렌즈의 모양을 새롭게 제작하는 등 [9], 각 분야에서 유기 발광 소자에 마이크로 렌즈를 적용하는 새로운 기법이나 기술을 보고하고 있다.

한편, 광학 설계는 소자의 발광 효율 특성을 일정한 조건 하에 모사하는 작업으로, 실험 방향성 제시나 결과 검토 분석 등에 사용된다. 따라서 렌즈 제작 연구와 더불어 광학 설계에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다 [8-11].

마이크로 렌즈 어레이에 의한 외부 광추출 효율은 렌즈의 크기, 모양, 굴절률과 충실도 (fill factor) 등의 변수로 결정된다. 광학 설계 프로그램으로는 light tools, setfos, SIMOLED 등이 있는데, 본 연구에서는

광선 광학 시뮬레이션 프로그램으로 잘 알려진 light tools를 이용하여 마이크로 렌즈의 모양, 크기, 충실도 등에 따른 광추출 효율의 경향성을 살펴보았다.

2. 실험 방법

유기 발광 소자는 기본적으로 두 전극과 발광층, 그리고 기판으로 구성되어 있으며, 본 시뮬레이션에서는 기본 소자의 구성을 “반사층/발광층(유기물층)/평면 유리 기판층”으로 설정하였다.

시뮬레이션을 위한 소자는 그림 2에 나타난 것과 같이 면적은 $3,000 \mu\text{m} \times 5,000 \mu\text{m}$, 각 층의 두께는 각각 $0.1 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$, 그리고 $30 \mu\text{m}$ 으로 지정하였다. 굴절률은 유리층에 1.50, 발광층에 1.75의 값을 주었고, 전극층은 100% 반사로 설정하여 전극으로 흡수되는 빛은 없는 것으로 가정하였다. 발광층과 유리층은 옆면의 경우 100% 흡수로 지정하여 마이크로 렌즈가 배열되어 있는 윗표면으로만 광선이 나오도록 설계하였다.

여기서 유리층 두께는 유리층 옆면 흡수 100% 설정에 의해 발광층에서 발생한 빛이 유리층 옆면에 흡수되는 비율을 낮추기 위하여 그 면적을 가급적 작게 하되, 렌즈 반지름 ($\sim 50 \mu\text{m}$)의 크기를 고려하여 $30 \mu\text{m}$ 으로 설정하였다. 발광층은 파장이 550 nm인 광원 100만 개가 679.5 lm의 광속으로 모든 발광면에서 나오도록 하였고, 이 때 광선의 최대 반사 횟수는 백 번으로 지정하여 그 이상 횟수의 반사에 의해 경로가 바뀐 빛에 대해서는 소자 내부에서 소실된 것으로 간주하였다. 리시버는 소자 바깥으로 나온 모든 빛을 탐지할 수 있도록 모든 방향에서 빛 감지가 가능한 적분구 리시버로 하였다.

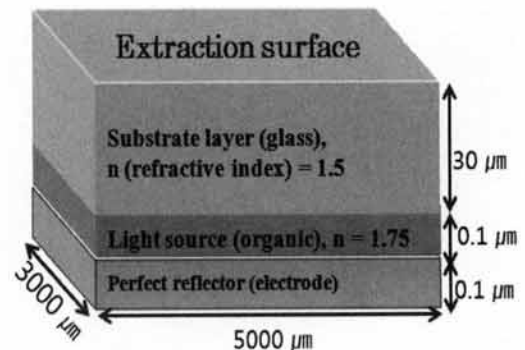


Fig. 2. Structure of the reference device for simulation.

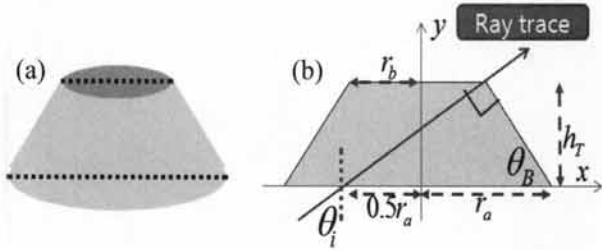


Fig. 3. (a) Microlens shape of trapezoid and (b) cross-sectional view of trapezoid and its geometrical parameters.

마이크로 렌즈는 반구, 사다리꼴, 원뿔, 그리고 직육면체의 모두 네 가지 타입의 모양을 사용하였다. 여기서 주 비교 대상은 반구, 사다리꼴, 원뿔 세 가지의 경우이며, 이들 렌즈의 아랫반지름은 모양에 관계없이 50 μm으로 고정하였다. 그리고 렌즈의 굴절률은 유리의 굴절률과 같은 1.50으로 지정하였다. 이는 마이크로 렌즈를 실제 제작할 때, 유리 기판과 굴절률이 비슷한 물질을 이용하기 때문이다.

모양에 따른 세부적 설정은 다음과 같다. 먼저 단면이 사다리꼴 모양인 렌즈에 대해 살펴보겠다. 사다리꼴의 정의는 마주보는 한 쌍의 변이 서로 평행인 사각형으로, 본 시뮬레이션에서 사다리꼴 렌즈의 모양은 그림 3(a)에 나타난 것처럼 렌즈의 단면이 그림 3(b)와 같은 등변 사다리꼴인 경우이다.

등변 사다리꼴은 밑변과 밑각, 높이 등 최소한 세 가지 요소가 있어야 성립될 수 있다. 광선은 렌즈를 통과하는 광선의 진행 방향에 따라 사다리꼴 렌즈 탈출 여부에 영향을 받는데, 위에서 언급한 세 가지 요소는 직접적인 관련이 있다. 만일 어떤 광선이 사다리꼴 렌즈를 통과할 때 그 진행 방향이 사다리꼴 렌즈 윗면에 대해서는 임계각을 넘어서는 방향으로 입사하여 탈출이 어렵지만 윗면과 경사를 이루는 옆면에 대해서는 임계각 이내의 방향으로 입사하여 트랩 효과로부터 자유로울 수 있다면, 사다리꼴 렌즈 모양에 따라 탈출 광선 수가 달라질 수 있다. 이는 사다리꼴의 세 가지 요소를 어떻게 설정하느냐에 따라 윗면과 옆면에 도달하는 광선의 비율이 달라짐을 의미하며, 동시에 광추출 효율의 향상과도 관련 있음을 뜻한다.

따라서 앞에서 언급한 세 가지 요소에 대한 광추출 효율 시뮬레이션을 진행하려면 이러한 요소들을 독립

변수와 종속 변수로서 이해하고, 이들을 일정한 가정 하에서 함수의 형태로 정리할 필요가 있다. 그림 3(b)는 입사각이 밑각 크기와 같고, 0.5r_a 지점으로 입사한 빛이 윗면과 옆면의 경계를 옆면에 대한 수직 방향으로 통과한다는 두 가지 가정을 바탕으로 설계한 그림이다. 이 그림을 통해 아랫반지름 (r_a), 윗반지름 (r_b), 입사각 (θ_i), 밑각 (θ_B), 그리고 높이 (h_T)에 대한 관계를 다음의 식으로 얻을 수 있었다.

$$r_b = \frac{r_a \tan \theta_B - 0.5r_a \tan(90^\circ - \theta_B)}{\tan \theta_B + \tan(90^\circ - \theta_B)} \tag{1}$$

$$h_T = (r_a - r_b) \tan \theta_B \tag{2}$$

여기서 아랫반지름 r_a는 앞에서 언급한 바와 같이 50 μm으로 고정하였고, 밑각 θ_B는 독립 변수, 윗반지름 r_b와 높이 h_T는 종속 변수로 놓았다. 밑각 θ_B는 유리층과 공기에 대한 임계각 (42°)을 기준으로 2°씩 증가 혹은 감소의 변화를 주었고, 이에 따라 식 (1)과 식 (2)를 통해 각각 윗반지름 r_b와 사다리꼴의 높이 h_T를 구하여 표 1에 나타냈다. 본 시뮬레이션에서 밑각의 기준을 유리층과 공기에 대한 임계각으로 정한 것은, 임계각 진행 방향의 빛은 옆면에 대해서는 수직으로 입사하게 되는 특징을 고려한 것이다. 이와 같은 함수 관계를 이용한 변수의 수식화는 복잡해 보이는 대상을 일정한 기준에 입각하여 분석하기가 용이하다는 장점이 있다. 원뿔 모양의 마이크로 렌즈는 윗반지름이 0에 가까운 경우의 사다리꼴과 같은 경우이므로, 윗반지름은 종속 변수로서 고려할 필요가 없다. 두 렌즈의 모양을 비교하면, 사다리꼴과 원뿔의 밑각 크기는 둘 다 38°에서 2°씩 증가하여 46°까지 변화하고, 아랫반지름이 같으므로 사다리꼴 렌즈에서 밑각을 그대로 유지한 채 윗반지름을 0에 가깝게 설정하면 원뿔 렌즈와 그 모양이 같다. 원뿔의 높이 h_c는 탄젠트 함수를 이용하여 각도에 따라 구하고 사다리꼴에서 얻은 값과 함께 표 1에 나타내었다.

한편, 반구는 가장 보편적으로 생각할 수 있는 마이크로 렌즈의 모양이다. 사다리꼴과 원뿔 모양의 렌즈와는 달리 반구 모양 렌즈는 반지름 변화를 30 μm에서 70 μm까지 주었으며, 이는 사다리꼴과 원뿔의 충실도가 같더라도 반지름이 다르면 렌즈간 떨어진 거리도 달라짐을 의미한다. 반구 모양 시뮬레이션은 렌즈 크기 변화와 광추출 효율 간의 관계에 대한 관계를 얻을 수 있다. 또한 높이 50 μm인 직육면체 모

Table 1. Radii and heights depending on the angle θ_B for trapezoidal and conical shapes.

θ_B [°]	Trapezoid		Cone
	r_b [μm]	h_T [μm]	h_C [μm]
38	3.17	36.2	38.8
40	5.73	36.9	41.7
42	8.32	37.2	44.7
44	10.9	37.5	48.0
46	13.6	37.5	51.4

양의 렌즈로 추가적인 시뮬레이션을 진행하였으며, 직육면체의 밑면은 한 변의 길이가 100 μm 인 정사각형으로 하였다.

본 연구에서는 마이크로 렌즈 어레이의 충실도에 따른 발광 효율의 변화를 살펴보고자 하는 목적도 있으므로 렌즈의 크기, 굴절률 및 모양 설정과 함께, 렌즈의 충실도에 대한 조절이 가능하여야 한다.

충실도란 빛이 탈출하는 표면적에 대한 배열된 마이크로 렌즈 아랫면적 전체와의 비율이다. 만일 기관의 면적이 100 μm^2 , 렌즈 아랫면적의 전체 합이 5 μm^2 이면 충실도는 0.05가 된다. 충실도의 최저값은 0으로서, 표면 위에 마이크로 렌즈의 배열이 아무것도 없는 경우이다. 마이크로 렌즈 아랫면적의 모양이 원일 경우 충실도가 0.78 이상이 되면 렌즈와 렌즈가 서로 겹쳐져 온전한 렌즈 모양을 잃게 된다. 이를 고려하여 본 연구에서는 그림 4(a)에서 설명한 것과 같이 충실도는 렌즈가 기관 위에 드물게 배열된 경우인 0.05부터 렌즈가 빽빽하게 배열되어 있는 0.75까지 0.05씩 증가시켜가며 네 가지 모양의 렌즈에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 그런데 light tools 프로그램에서 배열 기능은 배열체의 중심간 거리 설정을 통해 배열 밀집도를 결정할 수 있으므로, 서로 이웃한 두 렌즈의 중심간 거리에 대한 계산이 요구된다. 이 길이를 x 라 하면, 그림 4(b)에서 나타낸 개념을 통해 x 를 다음과 같이 간단히 얻을 수 있다.

$$x = \sqrt{\frac{\pi(r_a)^2}{FF}} \quad (x \geq 2r_a) \quad (3)$$

여기서 FF 는 충실도 값, r_a 는 그림 4(b)에서 표기한

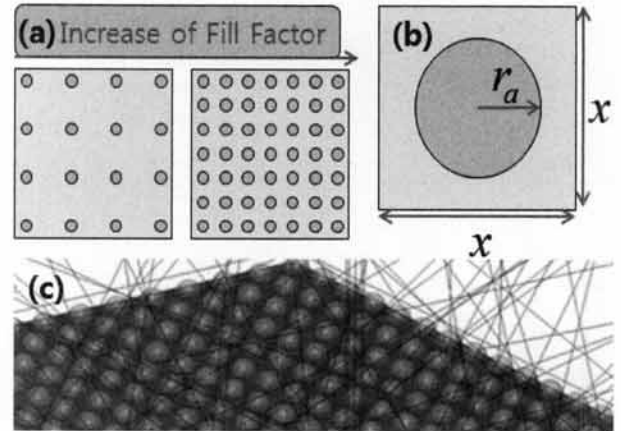


Fig. 4. (a) Fill factor is proportional to the number of microlens over the substrate, (b) diagram for calculating the fill factor, and (c) simulated view of microlens using light tools.

렌즈 밑면의 반지름이다. 가령, r_a 가 50 μm 이고, FF 가 0.30이라면, 서로 이웃한 렌즈의 중심간 거리 x 는 약 162 μm 이 된다. 이와 같이 식 (3)에서 얻은 x 값을 이용하면, 그림 4(c)와 같이 평면 위에 마이크로 렌즈를 원하는 간격으로 배열할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

평평한 면의 굴절률이 n 인 매질에서 공기로 빛이 진행할 때, 광추출 효율 (η)은 램버시안을 가정하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{1}{2n^2} \quad (4)$$

식 (4)는 광추출 효율을 간단히 계산할 수 있는 장점이 있으며 내부 발광 효율이 100%인 경우를 가정한다. 예를 들어 굴절률이 1.50인 평평한 유리 기관의 경우 식 (4)를 따를 때, 광추출 효율은 약 22%이다.

그림 5는 그림 2에서 설명한 기본 소자의 시뮬레이션 결과와 램버시안 함수를 비교한 극좌표 그래프로, 데이터 분석 및 그래프 작성 소프트웨어인 origin 8.0을 통해 두 값을 비교하였다. 기본 소자의 각도에 따른 원형 광도 곡선 (검은색)은 코사인 곡선 형태의 램버시안 함수 (붉은색)를 따르고 있음을 확인할 수

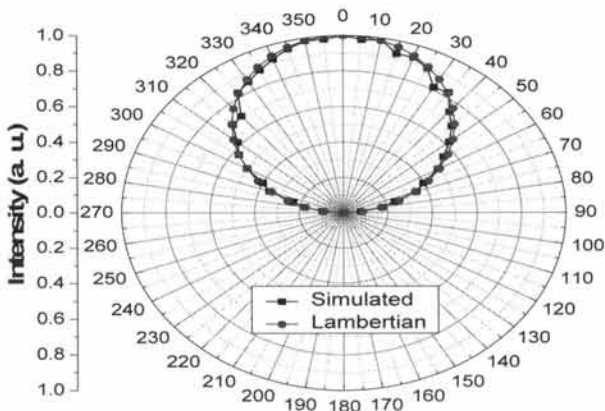


Fig. 5. Simulated results of angular-dependent escaped light distribution out of the reference device represented in polar coordinate. About 22% of the generated lights is received at the receiver of the integrating sphere.

있다. 최대 광도는 정면 방향인 0°에서 49.9 cd이고, 총 679.5 lm 가운데 적분구 리시버가 측정된 광속 값은 150.2 lm으로 약 22%가 광추출된 것을 확인할 수 있었다. 이는 식 (4)를 통해 얻을 수 있는 광추출 효율 이론값과 비슷한 값이다. 또한 그래프 곡선은 위쪽 방향으로 그려져 있는데, 이는 발광층 아래를 반사 100%의 반사층으로 지정한 것과, 발광층 및 유리층의 옆면을 흡수 100%의 흡수층으로 설정한 특성으로 인하여 소자 뒤편의 리시버에 광이 잡히지 않았기 때문이다. 마이크로 렌즈 어레이를 기본 소자에 적용하면 렌즈의 종류에 관계없이 기본 소자의 광추출 효율보다 높은 효율이 나왔다. 효율 상승폭이 가장 큰 렌즈는 반구 모양의 렌즈이며, 사다리꼴과 원뿔의 경우에도 상당한 효율 개선이 있었다. 비교적 상승 폭이 떨어지지만, 직육면체 모양 렌즈 어레이도 광추출 효율 상승이 있었다.

그림 6은 아랫반지름을 50 μm으로 고정하고 밑각 θ_B 를 38°에서 46°에 이르는 사다리꼴 모양 렌즈에 대한 광추출 효율을 충실도에 따라 나타낸 그래프이다. 충실도 0.30일 때 약 34.7%의 최대 광추출 효율을 보이며, 이는 기본 소자 시뮬레이션을 통해 얻었던 22% 효율에 비해 약 57% 상승한 값이다. 반면, 충실도가 증가해 0.75에 이를 때까지 광추출 효율은 감소하는 모습을 보인다. 밑각에 따라서도 크게 두 부분으로 그래프를 구분해 볼 수 있다. 충실도 0.50 미만에서는 밑각의 크기가 증가할수록 광추출 효율이 증가하지만, 충실도가 0.50 이상에서는 밑각 크기에 따른 광추출

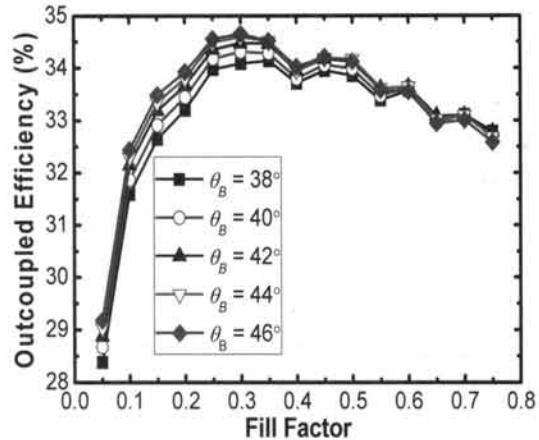


Fig. 6. Outcoupled efficiency of the light depending on the fill factor for several base angles of trapezoidal shape of microlens.

Table 2. Outcoupled efficiency of the light and relations among the geometrical parameters depending on the base angle of trapezoidal shape of microlens for the fill factor of 0.30.

θ_B [°]	h_T [μm]	r_b [μm]	Side Area Top Area [μm ² /μm ²]	Surface area [μm ²]	Out-coupled efficiency (FF 0.30) [%]
38°	36.2	3.17	315.3	9,986	34.1
40°	36.9	5.73	98.4	10,251	34.3
42°	37.2	8.32	47.4	10,526	34.5
44°	37.5	10.9	27.8	10,807	34.6
46°	37.5	13.6	18.3	11,091	34.7

출 효율 변화가 적고, 일정한 값에 수렴한다.

사다리꼴 렌즈 밑각의 미세한 조절은 사다리꼴 렌즈의 윗면과 옆면의 비율 조절에 대한 광추출 효율 변화를 알아보기 위함이다. 사다리꼴 렌즈에서 옆면은 윗면과 기울기 차이가 큰 광선이 렌즈 바깥으로 나가고자 할 때, 입사각이 임계각을 넘는 윗면을 피하여 옆면에 도달하게 되면 렌즈 바깥으로 탈출 가능하다. 그런데 반지름이 고정되어 있는 한, 옆 면적의 증가는 곧 윗면적의 감소와 직결되고, 이는 윗면으로 입사했을 때 바깥으로 나올 수 있었던 빛이 옆면에서 나올 수 없게 되는 경우도 증가함을 의미한다. 그러므로 옆면 대비 윗면 면적 증가가 반드시 광추출 효율 개선으로 볼 수는 없다.

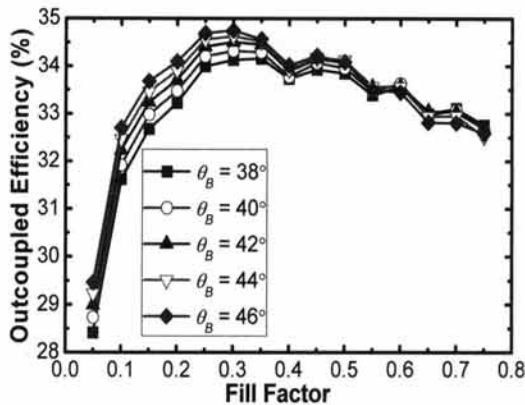


Fig. 7. Outcoupled efficiency of the light depending on the fill factor for several base angles of conical shape of microlens.

여기에 대해 조금 더 자세히 보기 위하여 사다리꼴의 윗면과 옆면 넓이를 구하고, 옆면 대비 윗면 비율과 윗면과 옆면 합인 렌즈의 겉넓이를 구하여 밀각 및 광추출 효율 변화와 함께 표 2에 나타내었다. 광추출 효율은 밀각 크기에 따라 34.1%에서 34.7%에 이르기까지 약 0.6%, 0.6%, 0.3%, 0.3%씩 증가하였다. 그런데 광추출 효율이 0% 증가율에 가까운 반면, 옆면 대비 윗면 비율은 각도가 2°씩 증가할 때 마다 69%, 52%, 41%, 34%씩 감소하고, 겉넓이는 9,958 μm^2 에서 11,091 μm^2 에 이르기까지 각각 2.7%, 2.7%, 2.7%, 2.6%의 증가율을 나타냈다. 이러한 결과는 옆면 대비 윗면의 비율은 광추출 효율과는 관련성이 적고, 오히려 겉넓이가 광추출 효율에 보다 밀접한 관계가 있을 수 있음을 보여주는 결과이다.

그림 7은 원뿔 모양의 렌즈에 대한 시뮬레이션 결과이며, 그림 6에서와 같이 밀각이 38°에서 46°까지 2°씩 변화할 때 충실도에 따른 광추출 효율을 나타내었다. 원뿔 모양은 사다리꼴 모양에서 옆면 대비 윗면의 비율이 0에 가까운 경우의 모양으로 사다리꼴 렌즈 모양의 일종으로 이해할 수 있다. 사다리꼴과 원뿔 시뮬레이션에서 이용한 밀각의 크기가 같아서 그림 7은 그림 6의 그래프 개형과 흡사하다.

그림 7을 그림 6과 동일한 밀각에서 비교하면, 광추출 효율은 충실도가 0.50 미만에서는 원뿔, 그리고 0.50 이상에서는 사다리꼴 모양 렌즈가 약간 높음을 확인할 수 있다. 그런데 두 렌즈의 높이가 비슷한 경우를 두고 비교 (밀각 46°의 사다리꼴 높이: 37.5 μm , 밀각 38°의 원뿔 높이: 38.8 μm)하면, 충실도 0.30의

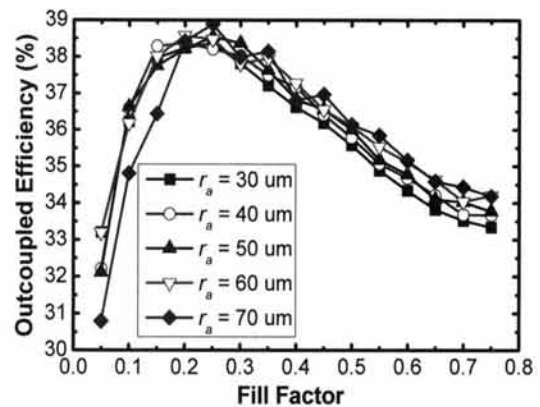


Fig. 8. Outcoupled efficiency of the light depending on the fill factor for several radii of hemispherical shape of microlens.

광추출 효율은 각각 약 35%와 34%로 나타났다. 이는 높이가 같을 때, 사다리꼴의 효율이 원뿔보다 약간 더 높게 나왔음을 말한다. 그러나 1% 이하의 미미한 차이를 보이고 있으므로, 실제 실험에서 이러한 요소는 크게 고려할 만한 대상이 아님으로 볼 수 있다.

그림 8은 반구 렌즈 반지름이 30 μm 에서 70 μm 까지 10 μm 씩 변화할 때의 광추출 효율을 충실도에 입각해 살펴본 그래프이다. 반지름의 크기가 어느 경우든 충실도가 대략 0.25일 때 약 39%의 최대 효율을 얻을 수 있는데, 이는 기본 소자에 비해 약 76%, 사다리꼴이나 원뿔 모양 렌즈에 비해서 약 12% 향상되었다.

표 2와 관련해서 생각해 볼 때, 반구 렌즈의 표면적은 사다리꼴 렌즈의 윗면과 옆면 넓이의 합에 비해 약 1.5배 정도 큰 크기인 15,700 μm^2 정도이다. 광추출 효율 향상이 약 1.2배인 것을 생각해 볼 때, 마이크로 렌즈의 겉넓이와 광추출 효율은 어느 정도 관계가 있음을 다시 한 번 보여주는 결과다.

반지름 크기 변화에 따른 광추출 효율은 앞서 언급했던 바와 같이 충실도 0.25 기준으로 반지름이 70 μm 인 경우의 반구 렌즈가 약 39%의 효율로 가장 높았으나, 이는 동일한 0.25의 충실도에서 가장 낮은 효율을 기록한 40 μm 일 때의 효율인 38%에 비해 2% 상승에도 미치지 못한다. 그러므로 렌즈의 밀면적 크기보다는 렌즈의 충실도가 광추출 효율에 더 영향력 있음을 알 수 있다. 그림 6, 7, 8을 살펴보면 세 가지 모양의 렌즈 모두 충실도가 0.30보다 커지면 광추출 효율이 감소하기 시작한다. 충실도 증가는 동일한 표면적에 대하여 광추출 효율 향상을 도모하는 마이크

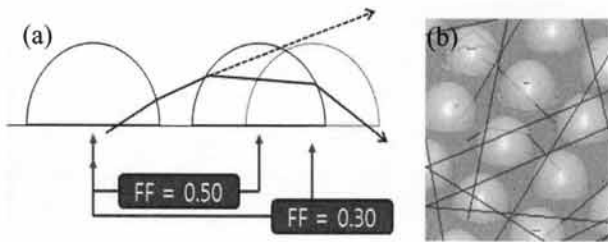


Fig. 9. (a) Schematic representation showing the light paths for the two fill factors of 0.30 and 0.50 and (b) simulated result showing the trap of lights between the adjacent lens when the fill factor is 0.50.

로 렌즈 개수의 증가를 의미한다. 그런데 충실도 증가는 렌즈와 렌즈간 거리의 감소로 인해, 렌즈로부터 탈출한 빛이 이웃한 렌즈로 다시 들어가 소자 내부에 갇힌 것처럼 광추출 효율 향상에 기여할 수 없게 되는 현상을 보인다.

그림 9(a)는 충실도가 0.30인 경우와 0.50인 경우일 때, 임의의 방향으로 진행하는 빛의 진행 경로를 각각 점선과 실선으로 나타낸 그림이다. 이 임의의 빛은 마이크로 렌즈의 도움으로 임계각 문제를 개선하여 외부로 빠져 나올 수 있는 경로 중 하나를 나타낸 것이다. 충실도 0.30은 렌즈와 렌즈 간 간격이 충분히 떨어져 있어 점선으로 나타낸 것과 같이 이웃한 마이크로 렌즈가 빛의 진행 경로를 방해하지 않지만, 충실도 0.50의 경우 실선으로 나타낸 것과 같이 이웃한 렌즈가 탈출한 빛의 진행 경로를 방해한다.

그림 9(b)는 9(a)에서 설명한 렌즈 간격 문제를 시뮬레이션 화면으로 확인한 그림이며, 검은 선은 빛의 진행 방향을 나타낸 것이다. 가운데 검은 선이 소자 내부로 다시 들어가는 것을 확인할 수 있고, 만일 렌즈간 간격이 보다 넓었다면 빛의 진행이 방해받지 않았음을 유추해 볼 수 있다. 렌즈의 진로 방해 현상은 충실도가 높을수록 잘 일어나며, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 미루어 볼 때 이러한 현상이 광추출 효율 감소에 직접적 영향을 주기 시작하는 시점은 0.30 부근으로 볼 수 있다. 반구는 충실도 증가에 따른 광추출 효율 감소폭이 사다리꼴이나 원뿔에 비해 더욱 크며, 이는 렌즈의 아래 부분이 사다리꼴이나 원뿔에 비해 상대적으로 두껍기 때문에 렌즈가 밀집될수록 서로 다른 렌즈에게 영향을 주는 비율도 큰 것으로 이해할 수 있다. 모양과 충실도에 따른 광추출 효율

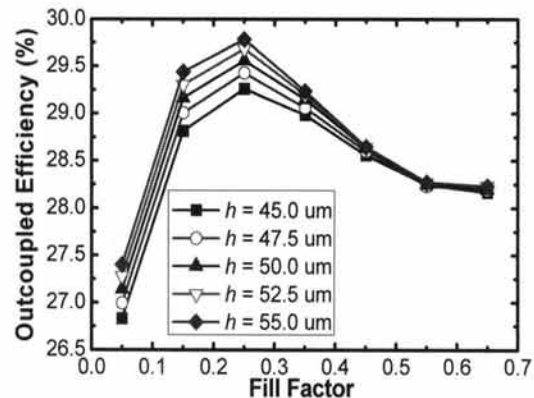


Fig. 10. Outcoupled efficiency of the light depending on the fill factor for several heights of rectangular parallelepiped shape of microlens.

을 고려해 볼 때, 충실도가 낮은 부분에서는 모양 간 광추출 효율 차이가 4% 이상인 것과는 달리 충실도가 높은 0.65 부근에서는 사다리꼴, 원뿔, 반구 모두 대략 33%의 광추출 효율을 나타내 서로 큰 차이가 없다. 이러한 결과는 충실도가 높을 때 밑각이 광추출 효율에 영향을 크게 미치지 못한 것과 같은 맥락이다.

그림 10은 한 변의 길이가 100 μm인 정사각형을 밑면으로 하는 직육면체 모양의 렌즈에 대한 충실도 변화에 따른 광추출 효율을 나타낸 그래프이다. 직육면체의 높이는 45.0 μm에서 55.0 μm까지 2.5 μm씩 증가시켜 5가지의 경우에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 충실도는 0.05부터 0.65까지, 간격을 0.10으로 하여 다른 렌즈들과 달리 간격을 크게 잡았다. 이는 첫째로 직육면체는 추가적 실험의 성격이 짙고, 둘째로 시뮬레이션 시간이 다른 렌즈에 비해 10배 가까이 길어지는 문제를 고려한 것이다.

직육면체 모양 렌즈는 렌즈 높이에 상관없이 충실도가 0.25일 때 가장 높은 광추출 효율을 나타냈으며, 특히 높이가 클수록 광추출 효율은 높았다. 그러나 이는 본 연구에서 시뮬레이션을 진행한 렌즈 가운데 가장 저조한 결과이다. 가령 충실도 0.25, 높이 55.0 μm인 직육면체 렌즈의 효율은 30%로 기본 소자의 효율 22%에 비해 35% 향상되었으나, 이는 반구 76%와 사다리꼴 57% 향상 등에 비해 절반 가량 낮은 수치이다. 이러한 결과는 렌즈 옆면과 윗면이 수직을 이루어서 임계각으로 입사한 빛이 렌즈 내에서 거둬들 반사만 하다가 렌즈를 탈출하지 못하기 때문에 일어난다. 하지만, 직육면체 렌즈의 그래프 곡선 개형은

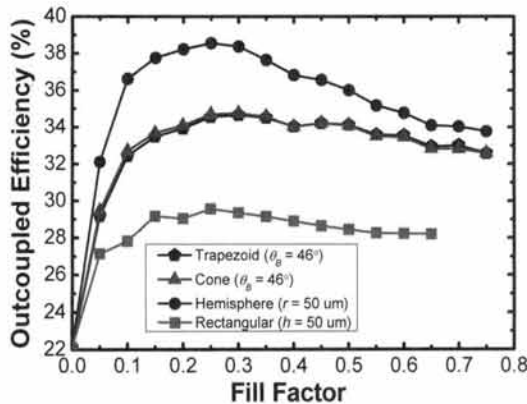


Fig. 11. Overall simulated results of efficient outcoupled efficiency of the light as a function of fill factor for several shapes of microlens.

다른 렌즈의 시뮬레이션 결과와 비슷한 형태를 따르고 있다. 이는 렌즈 모양의 특성에 관계없이 충실도는 일정한 경향을 나타내고 있음을 말한다.

그림 11은 충실도에 따른 여러 렌즈의 광추출 효율 비교 곡선으로서, 각 렌즈의 결과들 가운데 가장 높은 효율의 결과를 한데 모은 그래프이다. 오각형 점의 검은색 곡선은 밑각이 46° 인 사다리꼴, 삼각형 점의 붉은색 곡선은 밑각이 46° 인 원뿔, 둥근 점의 푸른색 곡선은 반지름이 $50 \mu\text{m}$ 인 반구, 사각형 점의 분홍색 곡선은 높이가 $50 \mu\text{m}$ 인 직육면체 모양의 렌즈다.

충실도가 0인 경우는 기본 소자로, 이 그림을 통해 이상적인 상황에서 마이크로 렌즈를 기본 소자 위에 배열할 경우 모양이나 충실도에 상관없이 광추출 효율이 향상됨을 알 수 있다. 또 마이크로 렌즈의 광추출 효율은 렌즈 종류에 관계없이 충실도가 대략 0.30 일 때 가장 높는데, 이는 렌즈 하나하나가 소자 내부의 빛을 밖으로 끌어낼 수 있지만, 렌즈 배열 충실도가 클수록 효율이 상승하는 것은 아님을 의미한다.

앞서 그림 6과 7에서 사다리꼴과 원뿔의 두 렌즈 간 효율 비교에 대해 잠깐 언급한 내용을 그림 11에서 보다 확실하게 확인할 수 있다. 검은색 곡선과 붉은색 곡선은 서로 흡사한 그래프 개형을 그리는 반면, 나머지 파란색 곡선과 분홍색 곡선의 개형과 뚜렷한 효율 차이가 있음을 확인할 수 있다. 여기에서 네 가지 타입 중 반구 모양의 렌즈가 가장 효율이 높으므로 이상적인 마이크로 렌즈의 모양은 반구 모양으로 볼 수 있다.

4. 결론

본 실험에서는 기본 소자를 구성하고 마이크로 렌즈 배열이 광추출 효율 변화에 어떤 영향을 미치는지 light tools 광학 설계를 통해 알아보았다. 마이크로 렌즈는 렌즈의 모양, 렌즈의 크기, 충실도 변화에 관계없이 광추출 효율 개선에 효과가 있었다.

렌즈의 모양은 반구 모양이 가장 우수한 광추출 효율을 보였다. 크기는 반지름 $30 \mu\text{m}$ 에서 $70 \mu\text{m}$ 에 걸쳐 비교하였는데, 광추출 효율 개선에 있어 반지름 크기는 2% 이하의 영향을 미쳤다. 충실도는 렌즈의 종류에 관계없이 0.30 부근에서 우수한 광추출 효율을 보였고, 그보다 낮거나 높은 충실도에서는 광추출 효율 감소를 보였다. 충실도는 다른 요인들에 비해 크게 광추출 효율 변화에 기여하였는데, 충실도 0.30일 때 반구 렌즈는 사다리꼴과 원뿔 렌즈에 비해 약 12%, 직육면체 렌즈에 비해 약 31% 높은 것으로 나타났다.

마이크로 렌즈 어레이 적용에 대한 광추출 효율의 결정 요인은 결넛이, 밑각 등 어느 하나만 가지고 결정할 수 있는 것은 아니지만, 어느 정도 비례 관계에 있음은 확인할 수 있었다. 수 백회의 시뮬레이션 가운데 가장 우수한 결과는 충실도 0.25, 반지름 $70 \mu\text{m}$ 인 반구 렌즈의 경우로, 39%를 기록했다. 이는 76%의 발광 효율 상승이 가능함을 의미하며, 또한 이상적인 마이크로 렌즈의 형태는 기본 소자 대비 효율 상승이 가장 높게 나타난 반구의 형태로 결론 내릴 수 있다.

마이크로 렌즈는 조명 분야에서 이미 적용되어 쓰이고 있을 뿐만 아니라, 프리미엄 급 유기 발광 소자 텔레비전 등 차세대 디스플레이 산업에 충분히 적용해 볼 수 있는 분야이다. 본 연구 결과는 이러한 마이크로 렌즈 연구의 기초 자료로서 충분한 가치가 있다. 시뮬레이션과 실제 결과는 다를 수 있지만 그 경향성을 좇아 실험에 임한다면 시행착오를 충분히 줄일 수 있는 동시에 시간과 경비를 절약하여 경쟁력 있는 마이크로 렌즈 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구에서 사용한 Light Tools v.7.2.0은 (주)휴비츠의 도움으로 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] M. H. Andreasson, J. Martensson, and T. G. Andersson, *Curr. Appl. Phys.*, **8**, 163 (2008).
- [2] C. C. Yap, M. Yahaya, and M. M. Salleh, *Curr. Appl. Phys.*, **8**, 637 (2008).
- [3] Z. Jun, H. Guo, and J. Wang, *Curr. Appl. Phys.*, **11**, 162 (2011).
- [4] M. H. Wu, K. E. Paul, and G. M. Whitesides, *Appl. Opt.*, **41**, 2575 (2002).
- [5] S. Moller and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **91**, 3324 (2001).
- [6] M. K. Wei and I. L. Su, *Opt. Express*, **12**, 5777 (2004).
- [7] M. K. Wei, I. L. Su, Y. J. Chen, M. Chang, H. Y. Lin, and T. C. Wu, *J. Micromech. Microeng.*, **16**, 368 (2006).
- [8] M. K. Wei, J. H. Lee, H. Y. Lin, Y. H. Ho, K. Y. Chen, C. C. Lin, C. F. Wu, H. Y. Lin, J. H. Tsai, and T. C. Wu, *Pure Appl. Opt.*, **10**, 1 (2008).
- [9] J. Y. Kim and K. C. Choi, *J. Disp. Tech.*, **7**, 377 (2011).
- [10] H. C. Ki, D. K. Kim, S. H. Kim, S. K. Kim, A. R. Park, and H. B. Gu, *J. KIEEME*, **24**, 817 (2011).
- [11] H. Greiner, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, 4125 (2007).