

복굴절 특성을 갖는 액정 렌즈어레이를 이용한 깊이감이 향상된 집적영상 시스템

박찬규 · 황용석 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과
☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2008년 11월 28일 받음, 2008년 12월 19일 수정본 받음, 2008년 12월 19일 게재 확정)

본 논문에서는 집적영상의 문제점인 깊이감 제한 문제를 해결하기 위해서 편광된 광과 복굴절 매질인 액정 렌즈어레이를 이용한 집적영상 시스템을 제안하고 구현하였다. 제안된 렌즈어레이는 두 개의 유리 렌즈어레이 위에 서로 다른 ZLI-4119와 E-7 액정을 증착하여 구현하였다. 액정은 편광 방향에 따라서 굴절률이 서로 다르기 때문에 두 개의 중심깊이 평면을 얻을 수 있다. 이로 인하여 초점 영역의 변화를 얻을 수 있으며 이로 인해 복원 시 깊이감을 향상시킬 수 있다. LightTools[®] 프로그램을 이용하여 집적영상 시스템을 구현하였고, 굴절률 차에 의한 초점거리 변화를 확인하였다. 액정 디스플레이 공정을 이용하여 소자를 제작하였고, 광학 실험을 통하여 초점거리의 변화를 측정하였다. ZLI-4119 액정 렌즈어레이의 굴절률은 기본 렌즈어레이의 굴절률보다 작기 때문에 실상이 맺히게 되고, 초점거리는 약 680 mm였다. 반면에 E-7 액정 렌즈어레이의 경우에는 허상이 맺히게 되고, 이론적인 초점거리는 -29 mm였다.

주제어: 3차원 디스플레이, 집적영상, 액정, 가변 초점, 렌즈어레이, 이미지 복원

I. 서 론

최근 3차원(3D) 디스플레이는 차세대 부가가치의 영상산업을 창출할 수 있는 첨단 기술로서, 전자산업을 비롯한 하드웨어 기술의 획기적인 발전, 액정 디스플레이(LCD: liquid crystal display), 플라즈마 표시 패널(PDP: plasma display panel) 등 새로운 평판 디스플레이 등장, 디지털 영상처리 기술이 발전함에 따라서 3D 기술도 발전하게 되었다. 3D 디스플레이를 구현하는 방법 중 한 가지인 집적영상(integral imaging) 방법은 Lippmann에 의해서 제안되었고,^[1] 그림 1과 같이 렌즈어레이를 이용하여 픽업(pickup) 및 복원(reconstruction) 과정을 거쳐서 3D 영상을 얻을 수 있다. 픽업 과정에서는 물체의 형상을 각 렌즈에 맺힌 요소영상(elemental image)이 CCD(charge coupled device) 카메라로 기록되며, 복원 과정에서는 기록됐던 요소영상이 백라이트나 프로젝터에 의해 3D 영상이 복원된다. 집적영상의 장점은 안경 및 보조 기구를 착용하지 않아도 관찰자에게 시야각 내에서는 연속적인 시점뿐만 아니라 움직이는 영상, 수평수직 방향의 시차, 전 색상의 영상을 제공할 수 있다는 것이다.^[2-4] 하지만 시야각 및 깊이감이 제한되고, 깊이 역전(pseudoscopic) 문제점이 유발된다. 이러한 문제점들은 다양한 연구를 통해서 개선되고 있다. 특히, 물체의 깊이감을 향상시키는 방법으로는 투명한 디스플레이 소자를 다층으로 겹친 방법,^[5] 변조할 수 있는 편광과 단축 결정판상(uniaxial crystal plate)과 그에 따라서 움직이는 슬릿 slit 어레이 마스크를 이용한 방법,^[6] PLDC(polymer-dispersed liquid crystal)에 전계를 가해서 복원되는 이미지 평면의 위치를 변화시킨 방법 등이 있다.^[7]

본 논문에서는 물체의 깊이감을 증대시킬 수 있는 방안으로 유리 렌즈어레이에 복굴절 매질인 액정 층을 형성하고, 여기에 편광된 광을 입사시켜 물체의 깊이감을 증대시킬 수 있는 방법을 제안하고 구현하였다. 액정은 정상 광축(ordinary axis)과 이상 광축(extraordinary axis)에 해당되는 굴절률이 서로 다르기 때문에 편광된 광을 입사시킬 경우, 유리 렌즈어레이의 굴절률과 각 축에 해당하는 액정의 굴절률의 차에 의해서 유효굴절률이 변하게 된다. 이를 이용하여 두 개의 유리 렌즈어레이에 서로 다른 액정인 ZLI-4119 및 E-7 액정을 증착하고, 여기에 편광된 광을 입사시켜 액정과 기본 렌즈어레이의 굴절률 차를 이용하여 두 개의 중심깊이(central depth plane) 평면을 형성시킨다. 이로 인하여 초점거리가 변화되어 표현할 수 있는 초점심도(depth of field) 영역이 증대되어 결과적으로 복원하고자 하는 이미지의 깊이감이 향상된다.^[8]

II. 제안된 액정 렌즈어레이의 동작원리 및 설계

일반적으로 집적영상에 사용되는 렌즈어레이는 초점거리가 정해져 있기 때문에 표현하고자 하는 물체의 두께나 영상

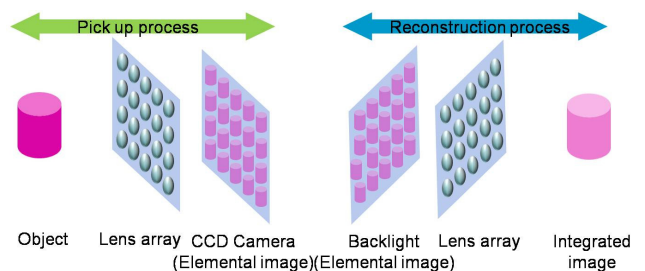


그림 1. 집적영상의 픽업 및 복원 원리.

[†]E-mail: slee@kw.ac.kr

의 깊이가 커지게 되면 중심깊이 평면에서 벗어나게 되어 영상이 왜곡된다. 하지만 복원 시 초점거리를 조절한다면 표현할 수 있는 영상의 깊이감을 증대시킬 수 있게 된다. 본 논문에서는 렌즈어레이와 전극 유리(ITO: indium tin oxide) 사이에 액정을 주입하고 입사되는 광의 편광에 따라 초점거리를 조절하고 이를 동기화시켜 중심깊이 평면을 확장할 수 있는 방법을 제안하였다. 기본적으로 렌즈어레이는 일정한 초점거리를 갖고 있으며, 각 구성 렌즈에 대한 렌즈 방정식은 식 1과 같이 주어진다.

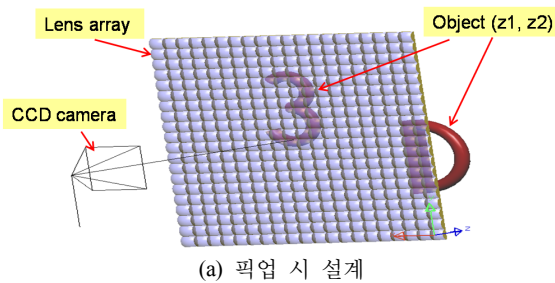
$$\frac{1}{g} + \frac{1}{L} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

여기서 g 는 디스플레이와 렌즈어레이의 간격, L 은 렌즈어레이와 집적영상의 중심깊이 평면까지의 거리, f 는 렌즈어레이의 초점거리이다. 렌즈어레이의 각 렌즈의 높이는 폭에 따라 곡률반경이 결정되고 초점거리가 정해지는데, 여기에 액정 층이 형성되어 있기 때문에 렌즈의 초점은 다음 식 2로 표현된다. 여기서 n_p 는 렌즈의 굴절률, n_l 은 액정의 굴절률이다.

$$f = \frac{1}{(n_l - n_p)C} \quad (2)$$

그리고 유효굴절률은 식 3에 의해 주어진다. 여기서 n_o 는 복굴절 매질의 정상광축의 굴절률, n_e 는 이상광축의 굴절률이고, θ 는 액정의 선경사각(tilt angle)이다.

$$n_l = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} \quad (3)$$



(a) 픽업 시 설계



(b) 요소 영상

그림 2. LightTools를 이용한 집적영상 설계.

그리고 C 는 렌즈의 곡률반경으로써 다음 식 4와 같이 주어진다.

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2h}{(h^2 + r^2)} \quad (4)$$

여기서 h 는 렌즈의 높이, r 은 렌즈의 반지름이다. 이를 토대로 LightTools® 프로그램을 이용하여 픽업과정과 복원과정을 설계하고 계산하였다. 이 프로그램은 광선추적 기반의 기하광학 설계 프로그램으로 렌즈 및 광학적인 특성을 표현할 수 있다. 또한, 카메라 기능이 있어서 픽업 시 요소영상을 쉽게 획득할 수 있는 장점을 지닌다.

먼저, 렌즈는 3 mm × 4 mm 직사각형 형태로 설계하였다. 기존에는 정사각형의 렌즈는 원형렌즈를 이용하여 설계되었지만, 고온 공정을 통해 제작되기 때문에 현재 이용 가능한 직사각형 유리 렌즈어레이를 선택하였다. 그림 2(a)와 같이 z 방향으로 렌즈어레이 전면부에는 카메라를 설정하고, 후면부에는 위치가 서로 다른 물체 2개(9 mm, 30 mm)가 있도록 설계하였다. 그리고 실사(photorealistic) 기능을 이용하여 그림 2(b)와 같이 609×609 픽셀 크기의 요소 영상을 얻었다. 복원 과정 또한 동일한 특성을 갖는 렌즈어레이를 이용한다. 복원 시에는 그림 3에 있는 알고리즘을 이용하여 진행하였다.^[9] 복원 과정에서는 픽업 시 사용했던 렌즈어레이를 이용하고, 여기에 광원, 콜리메이터(collimator) 렌즈, 디스플레이 패널, 수신기 등을 설치하여 수신기에 맺히는 평면의 휘도 분포를 확인하였다. 광원에서 일정하게 방사되는 광을 콜리메이터 렌즈를 통해서 평행한 광으로 바꿔주고, 디스플레이 패널에 요소영상의 패턴을 입력하여 렌즈어레이에 입사되는 광의 경로를 설정한다. 그 다음 수신기를 1 mm씩 거리를 두어 초점이 맺히는 평면의 휘도 분포를 확인하였다. 수신기는 약 50개를 설치하여 0~50 mm 내의 영역의 평면 휘도 분포를 확인하였다. 픽업 시 거리 이외에는 하나 또는 두 개의 복원 영상이 불투명해짐을 확인하였다. 하지만 그림 4(a)와 같이 픽업 시 거리만큼 9 mm와 30 mm에서 가장 선명한 영상을 얻을 수 있었고, 기본적인 집적영상의 특성을 확인하였다. 또한 제안된 구조인 액정 렌즈어레이를 특성을 하기 위

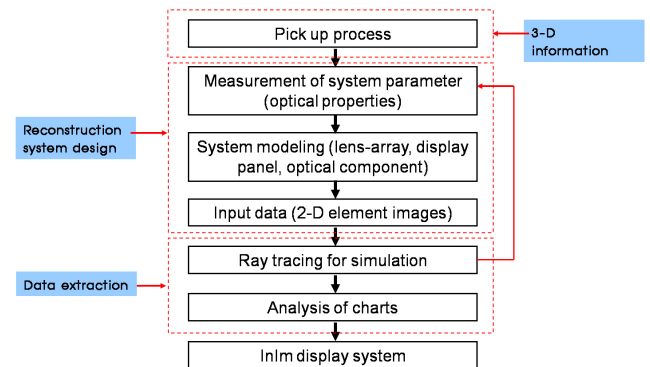


그림 3. 복원 순서도.

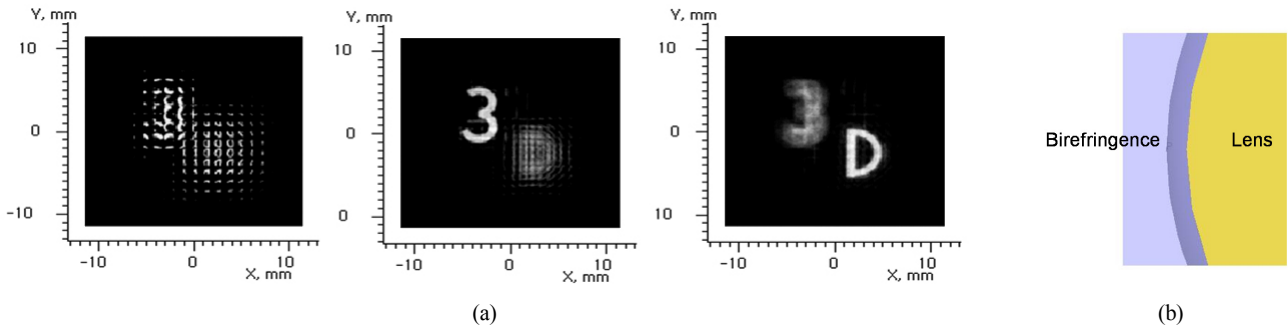


그림 4. (a) 복원된 평면의 휘도 분포 변화($z=0$ mm, $z=9$ mm, $z=30$ mm) (b) 제안된 구조의 설계.

표 1. LightTools를 이용하여 계산된 초점거리 분포.

ZLI-4119	3	D
Ordinary refractive index	75~80	170~178
Extraordinary refractive index	∞	

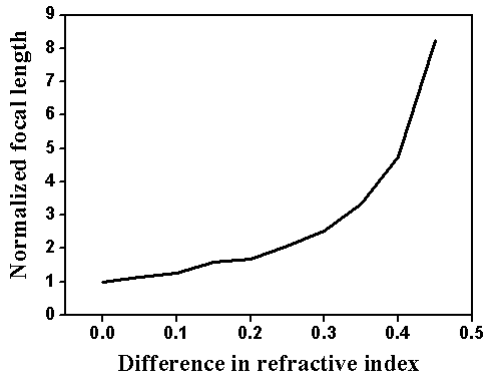


그림 5. 렌즈와 액정의 굴절률 차에 따른 초점거리 변화.

해서 그림 4(b)과 같이 설계하였다. 렌즈어레이 위에 제안된 액정이라고 가정된 매질을 올리고, 각 축의 해당하는 굴절률을 입력하였다. 프로그램 상에선 동시에 두 굴절률을 입력할 수 없기 때문에 여러 번의 계산을 통해서 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있었다. ZLI-4119 액정 렌즈어레이의 '3'와 'D' 다른 위치에서 복원이 되고, 정상 광축에 대한 굴절률은 렌즈어레이의 굴절률보다 작기 때문에 '3'는 약 75~80 mm 위치에서 복원이 되고, 반면에 'D'는 약 170~178 mm 사이에서 복원이 된다. 하지만 이상 광축에 대한 굴절률은 렌즈어레이의 굴절률보다 크기 때문에 프로그램 상에선 계산이 불가능 하였다. 기본적인 특성을 확인 후 본 연구에서 제안한 구조를 계산하였다. 그림 5와 같이 렌즈어레이의 굴절률과 형성된 복굴절 매질 층의 굴절률 차가 클수록 초점거리는 짧아지게 되고, 차이가 작을수록 길어지게 된다. 이렇게 굴절률 차 즉 유효굴절률이 변함으로써, 광 경로 길이가 변하는 것을 확인하였다. 이를 토대로 그림 6과 같이 E-7 액정과 ZLI-4119로 제작된 렌즈어레이를 각각 이용하였고, 각 액정의 특성은 표 2에 표시하였다. 유리 렌즈어레이의 굴절률은 액정의 한 축의 굴절률과 거의 유사하게 되어 이것은 유리처럼 작

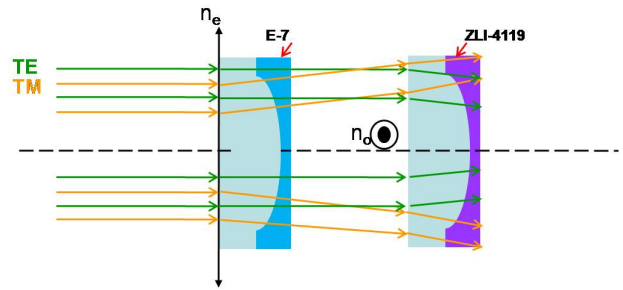


그림 6. 제안된 액정 렌즈어레이의 광경로 변화.

표 2. E-7와 ZLI-4119 액정의 두 축의 해당하는 굴절률.

Refractive index	E-7	ZLI-4119
Ordinary refractive index	1.5214	1.4712
Extraordinary refractive index	1.7462	1.5315

용하게 된다. 즉, 한 축으로 편광된 TE(transverse electric) 입사할 경우, E-7 액정 렌즈어레이는 정상 광축의 굴절률과 거의 유사하기 때문에 균일한 유리매질로 작용하지만, ZLI-4119 액정 렌즈어레이는 굴절률이 작아졌기 때문에 초점이 앞에 맺히는 결과가 나타난다. 이와 반대로, TM(transverse magnetic)으로 편광된 광이 입사할 경우는 E-7 액정 렌즈어레이는 굴절률 차가 존재하여 초점거리가 달라지고, ZLI-4119 액정 렌즈어레이는 유리매질처럼 작용하게 된다. 따라서 편광 방향에 따라 두 개의 중심깊이 평면을 얻게 되고, 이를 겹치도록 하면 두 개의 깊이감을 갖는 복원 영상을 생성시킬 수 있다. 단, 이를 위해서는 제안된 시스템이 두 개의 독립된 깊이감을 연이어 표현할 수 있는 초점거리를 제공할 수 있도록 기본렌즈와 액정의 굴절률이 적절하게 조절되어야 한다. 그러나 현재 이에 적합한 액정을 얻는 것이 어려워 실제적으로 본 논문에서 구현하지는 못하였다.

III. 액정 렌즈어레이의 제작 및 측정 결과

복굴절의 특성에 따라 편광된 광의 입사 광축에 따라 두 개의 초점이 맺히는 액정 렌즈어레이를 제작하기 위해서 그림 7과 같이 LCD 공정과 유사하게 제작하였다.^[10] 먼저, 렌

즈어레이와 전극유리를 세정한 후, 배향막(alignment layer)을 스프인코터(spin coater)를 이용하여 3000 rpm으로 45초 동안 배향시키고, 핫 플레이트(hotplate)에서 프리 베이킹 30분, 포스트 베이킹 90분 하여 열 경화시킨다. 그리고 렌즈어레이와 전극유리를 서로 anti-parallel 방향으로 러빙(rubbing)하여 균

일한 배열을 얻었다. 다음에 스페이서(spacer)를 분사하여 렌즈어레이와 전극유리 간의 간격을 일정하게 유지시키고 밀봉하였다. 마지막으로 액정을 삼투압 방식에 의하여 주입한 뒤 양쪽 끝을 다시 에폭시로 밀봉하였다. 기본 렌즈어레이는 Isuzu Glass 제품으로 고온에서 공정을 해야 하기 때문에 유리 렌즈어레이를 이용하였다. 렌즈어레이의 특성(곡률 반경, 크기, 단차, 굴절률)이 표 3에 나타나 있으며, 실제 제작된 액정 렌즈어레이는 그림 8에 도시되어 있다. 전반적으로 액정은 배향이 되었지만, 렌즈의 단차로 의해서 렌즈의 가장자리 부분은 약한 배향이 되었고, 그렇기 때문에 균일한 특성을 보이진 못한다. 하지만 백라이트를 이용하여 렌즈어레이에 조사하면 액정의 특성인 어두운 부분과 밝은 부분이 나타났기 때문에 다음 단계로 진행하였다.

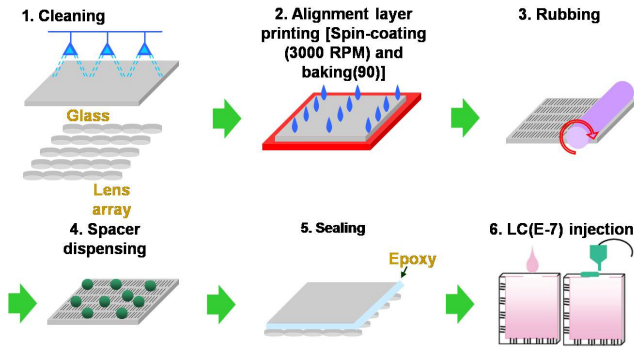


그림 7. 소자 제작 공정.

제작된 소자의 초점거리를 확인하기 위하여 그림 9(a)과 같은 실험 장치를 구성하였다. 먼저 수직 편광된 633 nm He-Ne 레이저로부터 출사되는 광을 공간 필터(spatial filter)

표 3. 렌즈어레이의 특성.

Parameter	Value
Refractive index	1.523
Size of lens array	46 mm (V) × 46 mm (H)
Size of lens	3 mm × 4 mm
Height difference of lens array	0.5 mm
The radius of curvature	0.72
Focal length	3.0857 mm

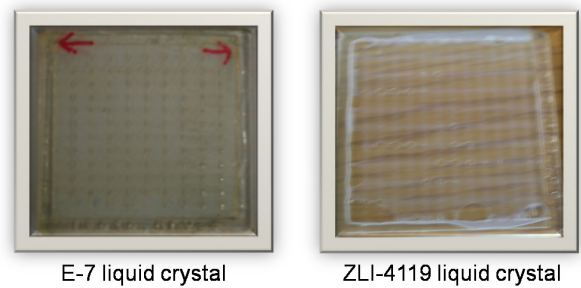


그림 8. E-7 및 ZLI-4119 액정으로 제작된 액정 렌즈어레이.

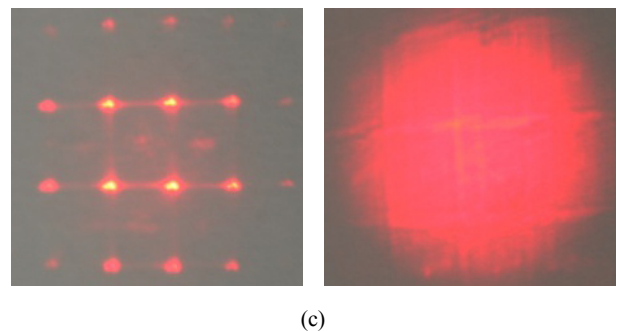
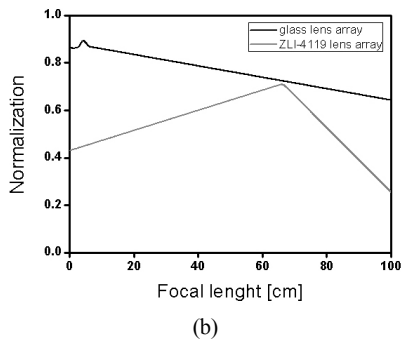
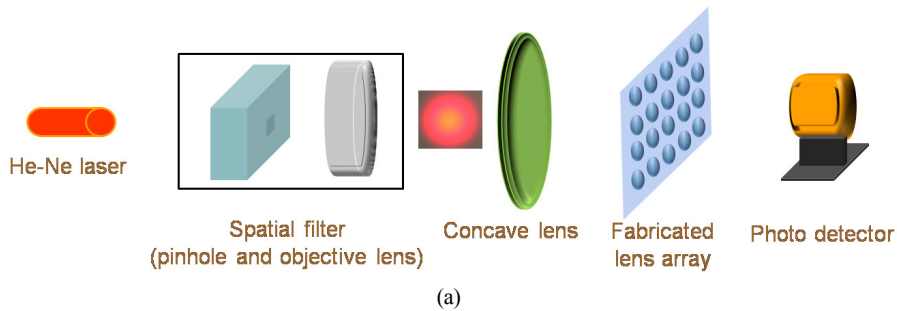


그림 9. 제작된 액정 렌즈어레이 특성 (a) 초점거리 확인을 위한 실험 장치 (b) 기본 렌즈어레이와 액정 렌즈어레이의 광세기에 따른 초점거리 분포 (c) 동일한 거리에서의 편광 방향에 따른 초점의 유무.

를 사용하여 광의 잡음을 제거하고 광 분포를 균일하게 하고, 볼록 렌즈를 이용하여 구면파를 형성시킨다. 구면파의 진행 면 뒤에 액정 렌즈어레이를 배열시켜 놓고 광 세기가 가장 밝은 점을 측정한다. 이를 위하여 광검출기 중앙에 작은 구멍을 가진 마스크를 씌운다. 이 마스크는 광검출기에 회절을 피하기 위해 최대한 밀착 시킨다. 이 상태에서 렌즈의 광축을 따라 앞뒤로 움직이면서 레이저의 광 세기가 최대인 지점을 찾아 액정 렌즈어레이로부터의 거리를 측정하면, 이는 초점거리가 되고, 그림 9(b)와 같이 나타난다. ZLI-4119 액정 렌즈어레이는 그림 9(c)와 같이 같은 거리에서 편광에 방향에 따라 초점이 맺히거나 맺히지 않게 된다. 이는 액정과 유리 렌즈어레이의 굴절률 차에 의해서 발생하게 된다. 한편, E-7 액정 렌즈어레이는 액정의 굴절률이 기본 렌즈어레이의 굴절률보다 크기 때문에 초점이 맺히지 않는다. 그리고 액정의 한 정상 광축을 통과하는 광이 느끼는 굴절률이 렌즈보다 작기 때문에 실상이 맺히게 되고, 약 680 mm에서 초점이 맺히게 된다. 하지만 정상 광축에 대해서는 E-7 액정 렌즈어레이는 기본렌즈와 거의 동일한 굴절률을 갖는다. 한편, 이상 광축에 대해서는 이 액정 렌즈어레이의 굴절률이 기본 렌즈보다 커져서 결과적으로 허상이 맺히게 된다. 즉, 위 식 2와 3을 이용하여 이론적으로 계산한 결과에 의하면 약 -29 mm 지점에서 이 허상이 얻어진다.

복원된 3D 영상은 그림 9과 같은 구조를 이용하여 복원된다. 먼저 요소영상은 보다 높은 해상도의 이미지를 얻기 위해서 LightTools[®] 프로그램이 아닌 Matlab 프로그램을 사용하였다. 그림 10과 같이 요소 영상을 프로젝터를 통해서 투사시키고 광 릴레이를 통해서 렌즈어레이에 영상의 초점을 맞춘 후에 카메라 등 기록 장치를 이용하여 영상을 저장한

다. 먼저, 요소 영상은 8×8로 렌즈어레이의 각 렌즈에 하나씩 입사될 수 있도록 만들었다. 유리 렌즈어레이는 높은 해상도로 복원되었다. 하지만 액정으로 제작된 렌즈어레이(그림 11(b) 및 11(c))는 유효굴절률로 인해서 초점거리가 더 길어졌기 때문에 영상을 정확하게 입사시키는 어려움이 있었다. 유리 렌즈어레이 정도의 해상도는 보장되지 않았지만 다른 위치에서 영상이 복원되는 것을 확인하였다. ZLI-4119 액정 렌즈어레이는 복원된 영상이 각 요소영상이 역상이 되어 맺히는 것을 통해 실상임을 알 수 있었고, 반면에 E-7 액정으로 제작된 렌즈어레이는 정상으로 맺히는 것을 관찰하여 허상임을 알 수 있었다. 그리고 스크린에 맺혀진 이미지를 확인해 보면 실상은 허상보다 관찰자에게 가까운 곳에 존재함을 확인하였다. 복원된 물체의 크기는 사용된 물체의 크기와 비슷하며, 복원된 깊이를 살펴보면 그림 11(a)의 경우 유리 렌즈어레이 면에서 관찰자 방향으로 40 cm, 그림 11(b)의 경우 ZLI-4119 렌즈어레이 면에서 관찰자 방향으로 90 cm, 그림 11(c)의 경우 E-7 액정 렌즈어레이 면에서 광의 진행 반대 방향으로 30 cm이다. 복원된 영상의 깊이감은 그림 11(a)와 11(b)의 경우에는 스크린에 의해 영상이 형성되는 거리를 측정할 값이고, 그림 11(c)의 경우에는 계산된 값이다. 영상을 얻기 위해서 각 렌즈어레이의 위치는 동일하게 하였다. 하지만 그림 11(c)의 영상이 조금 더 큰 이유는 촬영 카메라의 위치가 렌즈어레이와 비슷하지만 제작된 액정 렌즈어레이들의 초점거리의 차이에 따른 배율이 다르기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 이론적으로 계산된 복원 깊이감 값과 차이가 있어 보이는데 그것은 실제 자동차 요소영상의 픽업 거리는 약 280 mm이므로 계산하면 오차는 있어도 렌즈공식을 만족함을 알 수 있다.

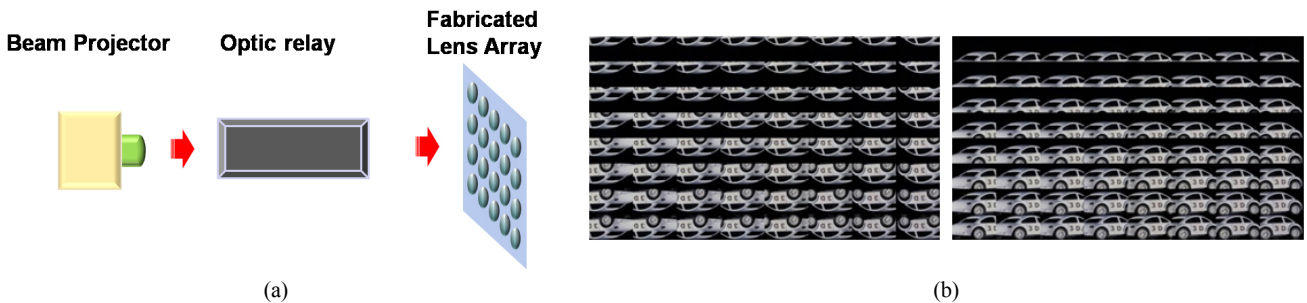


그림 10. 복원 과정 (a) 집적영상을 얻기 위한 복원실험 장치 (b) 복원용 요소영상.

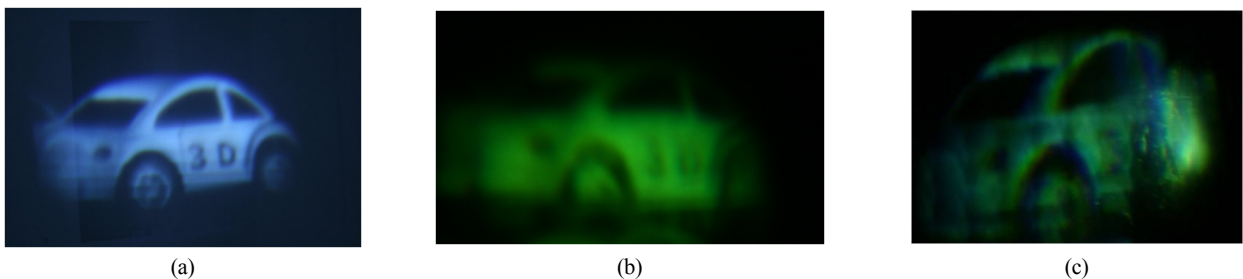


그림 11. 복원된 3D 이미지 (a) 기본 렌즈어레이 (b) ZLI-4119 액정 렌즈어레이 (c) E-7 액정 렌즈어레이.

IV. 결 론

본 논문에서는 액정 층을 유리 렌즈어레이 위에 형성하여 편광 방향에 따라서 변화되는 초점 영역의 변화를 통해서 깊이감을 증가시킬 수 있는 집적영상 시스템을 구현하였다. 제안된 액정 렌즈어레이는 편광 방향에 따라서 이미지 복원 평면의 위치가 변화하였다. 하지만 렌즈의 단차로 인한 불균일한 액정 배향으로 인하여 복굴절 매질을 통과할 때 해상도 저하와 이미지 왜곡이 발생하였다. 향후 렌즈 단차가 적은 렌즈어레이를 이용한다면 보다 균일한 배향을 얻음으로써 이러한 문제를 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2008-C1090-0801-0018).

참고문헌

- [1] G. Lippmann, "La photographie integrale," *Compt. -Rend. Acad. Sci.*, vol. 146, pp. 446-451, 1908.
- [2] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, "Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 7, pp. 1598-1603, 1997.
- [3] N. Davies, M. McCormick, and L. Yang, "Three-dimensional

- imaging systems: a new development," *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 21, pp. 4520-4528, 1988.
- [4] B. Lee, S. Jung, and J.-H. Park, "Viewing-angle-enhanced integral imaging by lens switching," *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 10, pp. 818-820, 2002.
- [5] Y. Kim, J. Park, H. Choi, J. Kim, S. Cho, and B. Lee, "Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices," *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 18, pp. 4334-4343, 2006.
- [6] J. Park, S. Jung, H. Choi, and B. Lee, "Integral imaging with multiple image planes using a uniaxial crystal plate," *Opt. Exp.*, vol. 11, no. 16, pp. 1862-1875, 2003.
- [7] Y. Kim, H. Choi, J. Kim, S.-W. Cho, Y. Kim, G. Park, and B. Lee, "Depth-enhanced integral imaging display system with electrically variable image planes using polymer-dispersed liquid crystal layers," *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 18, pp. 3766-3773, 2007.
- [8] C. K. Park, Y. S. Hwang, and S. S. Lee, "Integral imaging system with enhanced depth of field using birefringence lens array," *Proc. IMID*, vol. 8, pp. 1135-1137, 2008.
- [9] J. Lee, S. Kim, and E. Kim, "Reconstruction of a three-dimensional object and system analysis using ray tracing in practical integral imaging system," *Proc. SPIE*, vol. 6695, pp. 19-27, 2007.
- [10] Y. S. Hwang, T. H. Yoon, J. C. Kim, "Design and fabrication of variable focusing lens arrays using liquid crystal for integral photography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 5, pp. 6434-6440, 2003.

Integral Imaging System Enabling Enhanced Depth of Field Incorporating a Birefringent Liquid Crystal Lens Array

Chan-Kyu Park, Yong-Seok Hwang, and Sang-Shin Lee[†]

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Republic of Korea

[†]E-mail: slee@kw.ac.kr

(Received November 28, 2008; Revised manuscript December 19, 2008; Accepted December 19, 2008)

An integral imaging system enabling enhanced depth of field by incorporating a pair of liquid-crystal (LC) lens arrays was proposed and demonstrated. The lens arrays exhibit two different refractive indexes depending on the light polarization. The proposed LC lens array I and II were implemented by depositing a ZLI-4119 LC and an E-7 LC, respectively, on top of a lens-array substrate in glass. When the two LC lens arrays were aligned appropriately, a birefringence was obtained for a specific light polarization in such a way that the incoming light sees different refractive indexes for them. As a result, the focal length associated with the imaging system utilizing the LC lens arrays was adaptively varied, thereby enhancing the depth of field for the image reconstruction. We have theoretically analyzed the proposed integral imaging system with the LightTools[®] to confirm that the focal length could be adjusted with the help of the birefringent lens array. Finally the proposed imaging system successfully reconstructed the objects. The birefringent lens array employing the ZLI-4119 LC produced a real image with the focal length of 680 mm, while the other using the E-7 LC yielded a virtual image with the focal length of -29 mm.

OCIS codes: (080.0080) Geometrical optics; (080.3630) Lenses; (110.6880) Three-dimensional image acquisition; (130.0130) Integrated optics; (220.0220) Optical design and fabrication