

기술 특 집

집적영상과 체적형 3D 디스플레이 기술

이 병 호 (서울대학교 전기공학부)

I. 서 론

3차원(3D) 디스플레이 기술은 기존의 일반 디스플레이 장치가 제공하는 2차원 평면 영상과는 달리 실제로 3차원 공간 상에 물체가 있는 것과 같이 관찰되도록 3차원 입체 영상을 표시하는 기술을 말한다. 이는 시각 정보의 수준을 한 차원 높여주는 새로운 개념의 실감 영상 미디어로서 차세대 디스플레이를 주도하게 될 것으로 예상하고 있다. 이에 따라 현재 3D TV, 3D Monitor 등에 대한 연구가 여러 선진국에서 경쟁적으로 활발히 진행되고 있으며, 최근 들어 국내에서도 이러한 중요성을 인지하고 여러 산업계, 학계를 중심으로 연구를 활발히 하고 있다^[1-3].

3D 디스플레이 기술은 입체 표시 방식에 따라 양안 시차 디스플레이 방식, 체적형 디스플레이 방식, 홀로그래피 방식 등으로 나눌 수 있고 그 중 양안 시차 디스플레이 방식은 특수한 안경의 사용 여부에 따라 안경식과 무안경식으로 나눌 수 있다.

양안 시차 디스플레이 방식은 사람이 3차원을 인식하는 대표적인 요인인 양안 시차(binocular disparity)를 이용하는 방법으로서 왼쪽 눈과 오른쪽 눈에 각각 왼쪽과 오른쪽에서 바라본 2차원 영상을 보여주어 관찰자가 입체감을 느끼도록 하는 것이 기본적인 원리이다. 이 방식은 표현할 수 있는 깊이감이 다른 방식들에 비해 크다는 중요한 장점을 갖는다. 그러나, 안경을 착용하는 불편함을 감수해야 하거나, 몇 개의 시점의 정해진 위치에서만 3차원 영상을 관찰할 수 있다는 단점뿐 아니라, 관찰자에게 좌우 방향의 시차만 제공하는 등의 문제점이 있다. 또한 눈의 초점 조절 능력을 만족시킬 수 없으므로 하여 눈의 피로 현상이 발생하게 되어 바람직한 차세대 3차원 기술로서 발전하기에는 해결해야 할 문제점들이 많다.

이와 비교하여, 집적영상(integral imaging) 3D 디스플레이 기술과 체적형(volumetric) 3D 디스플레이 기술은 특수안경 착용의 불편함 없이 보다 자연스러운 3차원 영상을 관찰자에게 제공할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있어, 완전한 3D 디스플레이 기술로서 많은 발전 가능성을 가지고 있

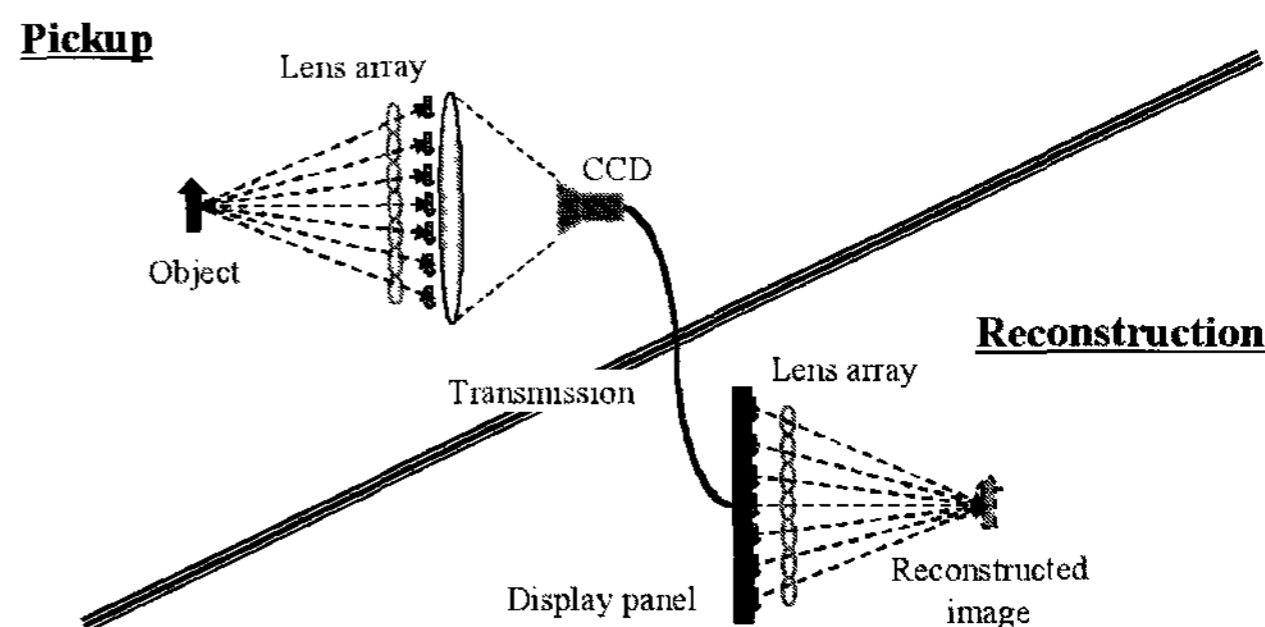
다. 본 고에서는 이러한 집적영상 3D 디스플레이 기술과, 체적형 3D 디스플레이 기술의 원리와 장단점을 간단히 설명하고, 최근 연구 동향을 소개하고자 한다.

II. 집적영상 3D 디스플레이 기술

최근 일정 시야각 내에서 시점의 이동이 자유롭고 수평과 수직 방향으로 완전 패럴랙스(parallax)를 갖는 집적영상 기술이 큰 주목을 받고 있다. 이 방식은 2차원 기초영상(elemental images) 집합으로부터 특정 깊이를 갖는 3차원 영상을 일정한 체적 내에서 표현하는 방식으로서 다른 다시점 양안시차 방식들과 차별화되며 분류에 따라서는 이를 체적형 디스플레이 방식으로 취급할 수도 있다.

집적영상은 [그림 1]에서와 같이 픽업(pick up)과 재생(디스플레이), 두 단계로 이루어진다. 이 방식은 잠자리 눈처럼 렌즈 어레이로 구성된 렌즈 판을 사용한다. 픽업 과정에서는 3차원 물체를 여러 방향에서 바라본 서로 다른 영상들을 렌즈 어레이를 통하여 기초영상 형태로 저장하고, 디스플레이 과정에서는 이들 기초영상들이 렌즈 어레이를 통하여 3차원 영상으로 집적되게 된다. 픽업한 기초영상들은 디스플레이에 이용되기 전 적절한 신호 변환 과정을 거쳐야 한다.

집적영상의 주요한 장점은 (1) 입체 영상을 관측하는데

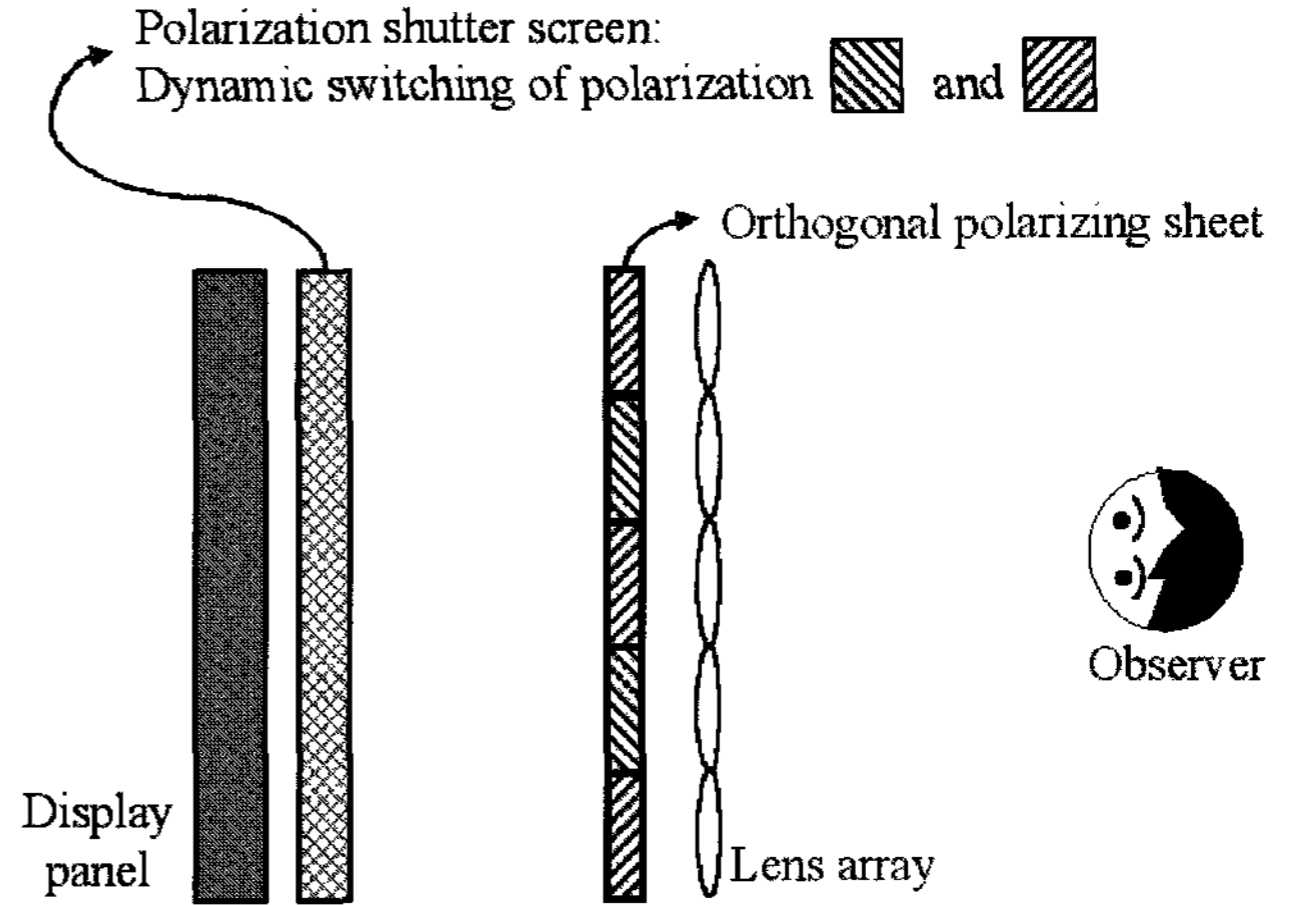


[그림 1] 집적영상의 개념도

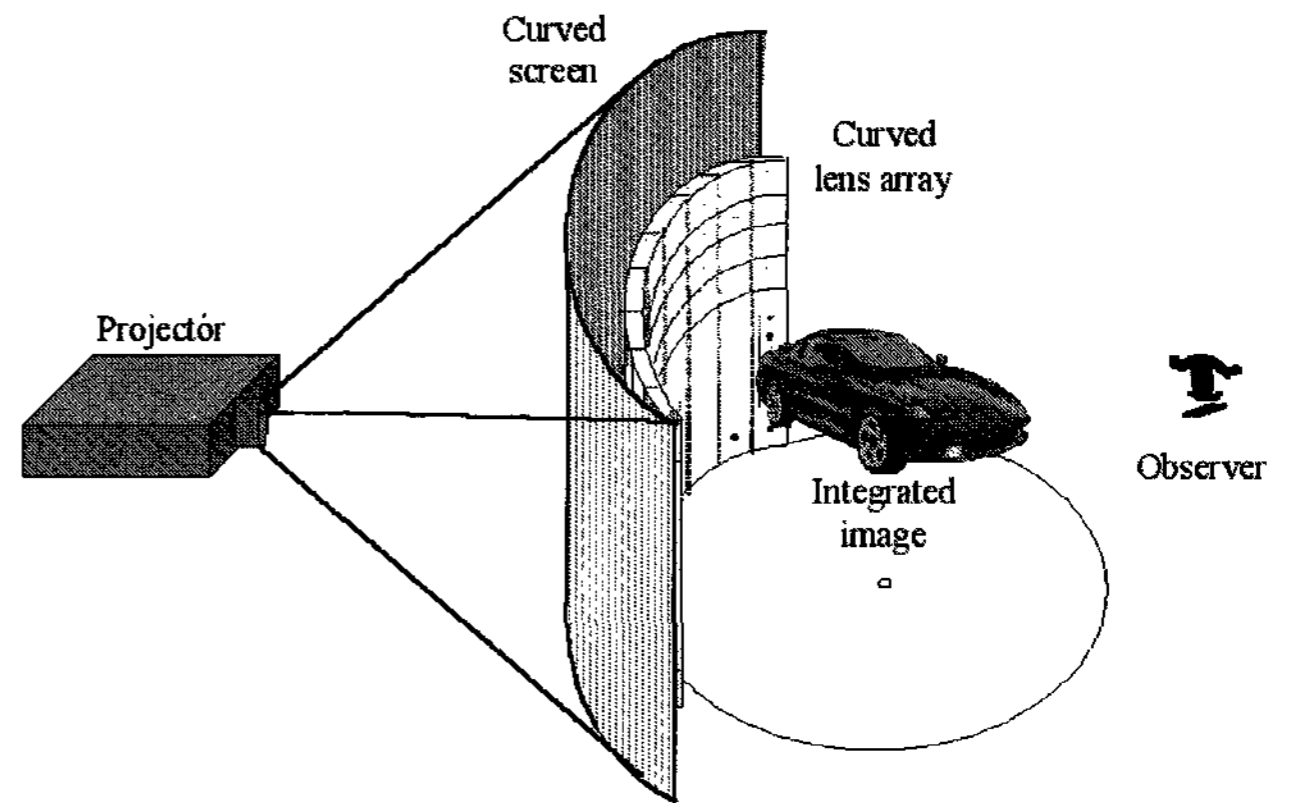
특수안경이나 기타 도구가 필요하지 않고, (2) 일정한 시야각 내에서 연속적인 시점을 제공하며, (3) 수평 뿐 아니라 수직 방향 시차를 제공하고, (4) 총 천연색 실시간 동영상 디스플레이가 가능하며, (5) 기존의 2차원 디스플레이 시스템을 사용하여 구현할 수 있다는 점 등이다.

이 개념은 원래 1908년에 Lippmann에 의해 처음 제안되었으나, 그 당시에는 저장 및 재생 소자로 사진 건판이나 필름을 사용하였다. 따라서 실시간 동영상의 구현이 불가능하였는데, 최근 컴퓨터 그래픽을 통한 기초영상 생성이나 CCD(charge-coupled device) 및 LCD(liquid crystal display) 등의 전자 소자를 이용한 저장 및 재생이 가능해지면서 활발히 연구되고 있다^[2-11]. 특히 이 방식은 2차원 디스플레이와 렌즈 어레이만을 이용하는 간단한 구조이므로, 고해상도 카메라를 통해 찍업한 기초 영상의 실시간 전송이 가능해지면 입체 TV 등에의 응용에 적합한 방식이라 예상된다. 하지만 3차원 영상을 관찰할 수 있는 시야각과, 표현 가능한 3차원 영상의 깊이감이 제한되는 문제점이 있어 최근 이를 해결하기 위한 보다 많은 연구가 이루어지고 있다. 집적영상 시스템의 주요 이슈 또는 개선해야 할 문제점들은 (1) 시야각, (2) 깊이감, (3) 해상도(resolution), (4) 2차원/3차원 변환 등이다.

집적영상 3D 디스플레이 시스템은 렌즈 어레이를 구성하는 기초 렌즈들이 디스플레이 패널 상에 각 렌즈 고유의 제한된 영역을 나누어 가지고 있다. 이 때 기초 영상이 그에 해당되는 기초 렌즈를 통해 디스플레이 되면 우리가 원하는 입체영상을 보게 된다. 그러나 관찰자가 일정한 각 이상을 벗어나 렌즈 어레이를 바라본다면 각 기초 렌즈를 통해 보이는 영상이 그에 해당하는 기초 영상으로부터 오지 못하고 그에 인접한 다른 기초 영상으로부터 오게 되어 원하지 않는 영상을 보게 된다. 이처럼 원하는 영상을 볼 수 있는 일정한 각도의 영역이 있는데 이것을 시야각이라 하고 시스템의 구조상 시야각은 제한될 수밖에 없게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, [그림 2]와 같이 편광 스위칭을 이용한 방법이 제안되었다^[5,6]. 이 방법은 시분할 직교 편광을 사용하여, 편광 상태에 따라 이웃한 렌즈 열들을 교대로 열고 닫아, 각 렌즈가 사용할 수 있는 기초영상의 영역을 늘리는 방법이다. 이 방법 외에도 [그림 3]과 같이 굽은 렌즈 어레이를 사용하는 방식이 효과적이다^[7,8]. 즉 기존의 집적영상 기술에서 사용하는 평평한 렌즈 어레이와 달리, 이에 곡률을 주어 구부러지게 하고 그에 따른 기초영상을 굽은 스크린에 프로젝션하는 방법이다. 렌즈 어레이와 스크린을 반대 방향으로 구부리고 허상 3차원 영상을 재생하면 더욱 넓은 시야각을 구현할 수 있다. 이것은 본래 허상 3차원 영상이 실상보다 약간 넓은 시야각을 가지고 있음에 기인한다. 실험적으로 약 100°의 시야각을 구현할 수 있었다. 이 방법은 프로젝터를 여러 개 쓰는 기법으로 더 확장시킬 수도 있고, 플렉서블(flexible) 디스플레이가 만들어진다면, 굽은 스크린이 플렉서블 디스플레이로 대체될 수 있을 것이다. 시야각을 향상시키는 또 다른 방법으로서 기초영상을 표시하는 스크린에 1차원적인 굴곡을 준 엠보스드 스크린(embossed screen)을 사용하여 시야각을 넓히는 방식도 제안되었다^[9].



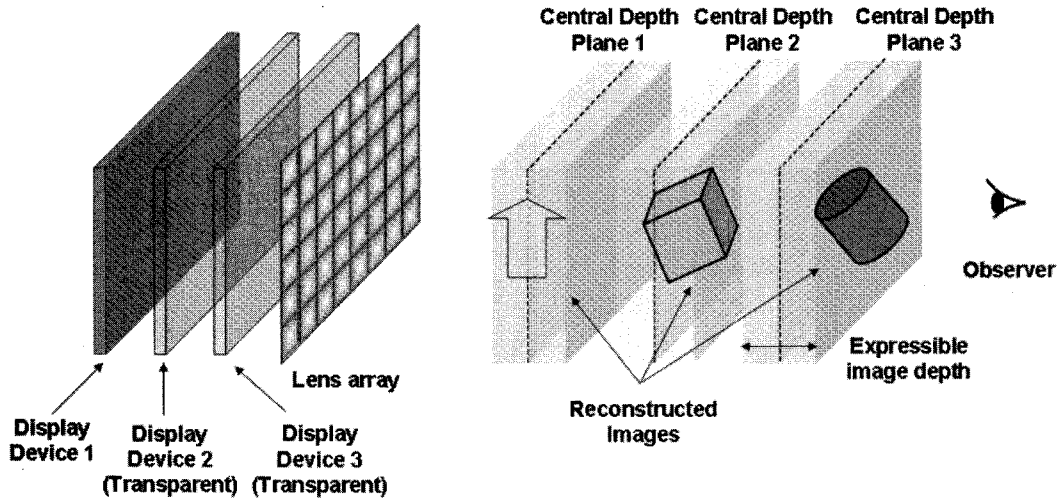
[그림 2] 편광 스위칭과 잔상효과를 이용한 시야각 개선 방법



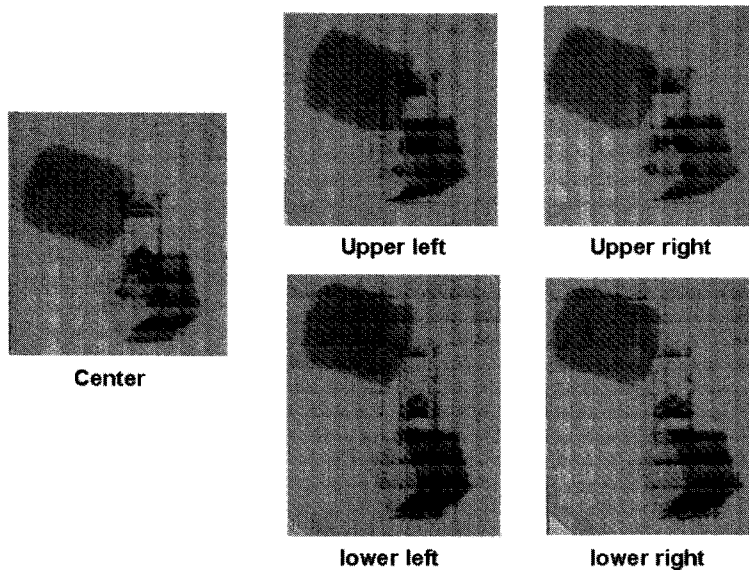
[그림 3] 굽은 렌즈 어레이와 굽은 스크린을 사용한 집적영상 시스템

집적영상에서 깊이감이 제한되는 문제점을 해결하기 위한 방법으로 여러가지가 제안되었는데^[10-12], 여기서는 최근 제안된 다층 LCD를 사용하는 방법을 살펴보자^[13,14]. 디스플레이 패널과 렌즈 사이의 거리가 정해지면 이미지 면(초점이 잘 맺히는 위치)이 결정된다. 집적영상 기술은 이러한 이미지 면을 중심으로 깊이감을 갖는 영상을 구현하게 된다. 따라서, 디스플레이 패널과 렌즈 사이의 거리를 변화시키거나^[10] 그 값이 여러 개를 취할 수 있도록 시스템을 구현하면^[11,12] 표현할 수 있는 깊이를 늘릴 수 있다. [그림 4]는 세 개의 LCD를 사용한 시스템을 보여준다^[14]. 각각의 LCD에 실린 기초영상은 각각 다른 이미지 면을 중심으로 3차원 영상을 표현하게 된다. 앞과 중간의 LCD는 백라이트(backlight)가 제거되어 투과형 공간광변조기로 사용된 것이며, 맨 뒤의 LCD가 백라이트의 역할도 겸하게 된다. [그림 5]는 실험 결과를 보여주며, 구현된 3차원 영상들의 총 깊이 차이는 19cm이다.

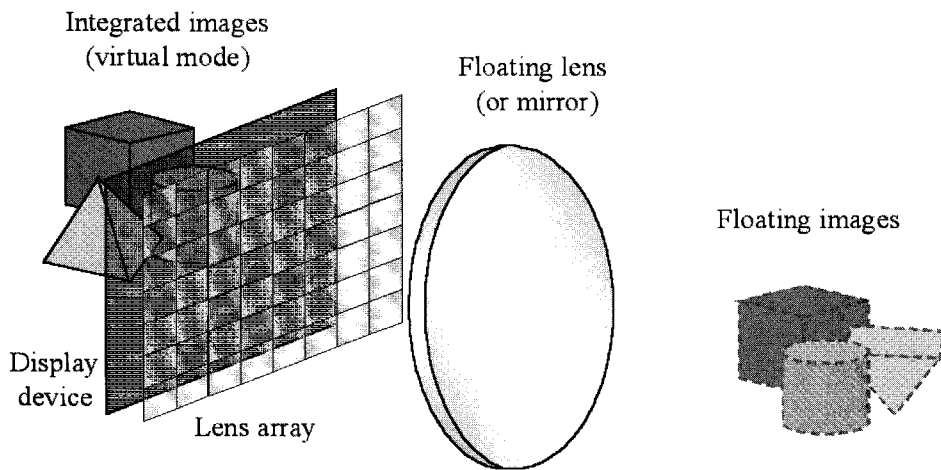
[그림 6]은 최근에 제안된 집적영상과 부유형(floating) 디스플레이 방식을 결합한 구조이다^[15]. 집적영상 시스템으로 구현된 3D 영상을 부유형 시스템을 통해 앞으로 당긴 구조이다. 통상의 부유형 디스플레이 방식은 실제 물체를 이용



[그림 4] 다층 LCD를 사용한 깊이감 향상 집적영상 시스템



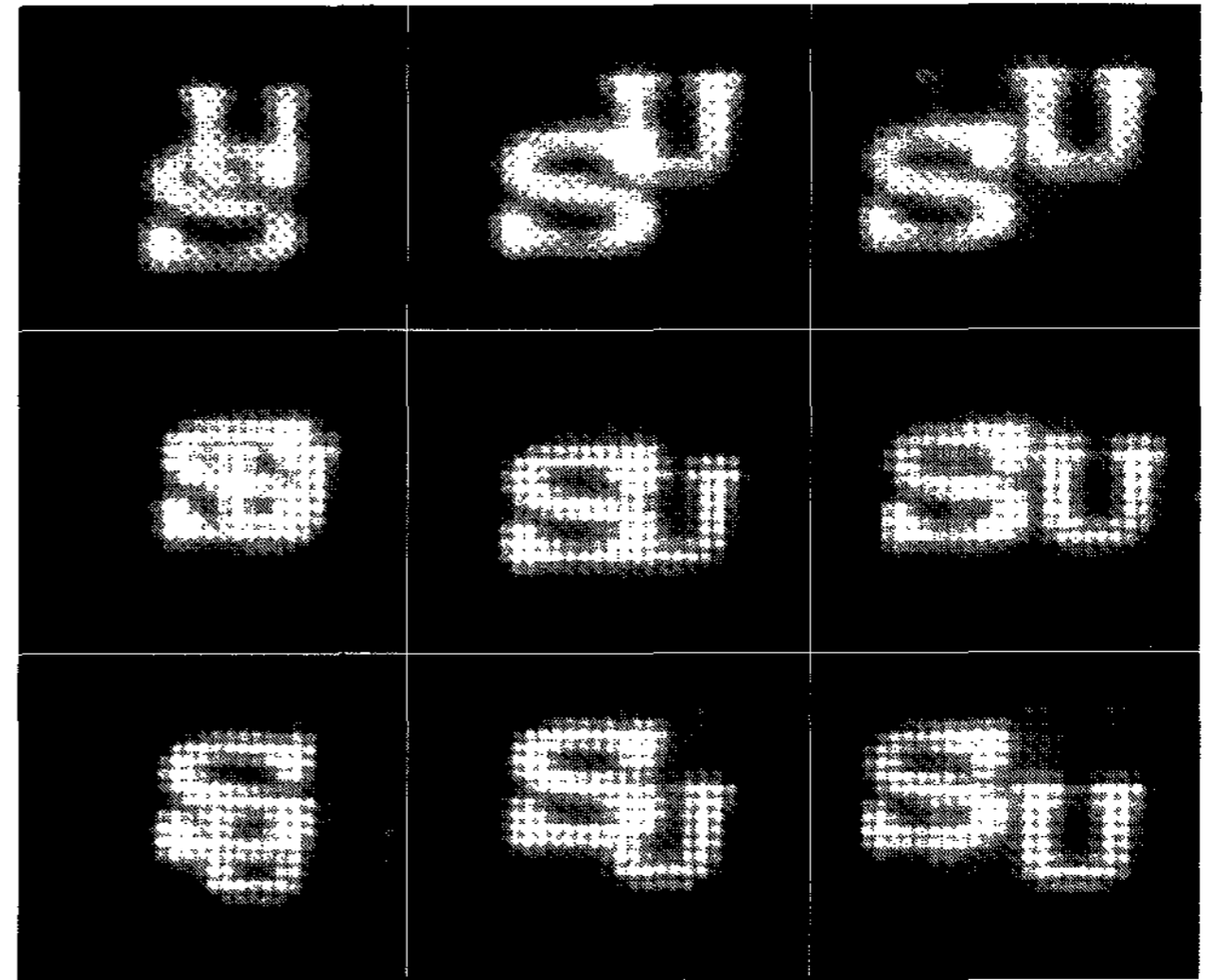
[그림 5] 구현된 3차원 입체 영상을 다른 각도에서 관측한 영상



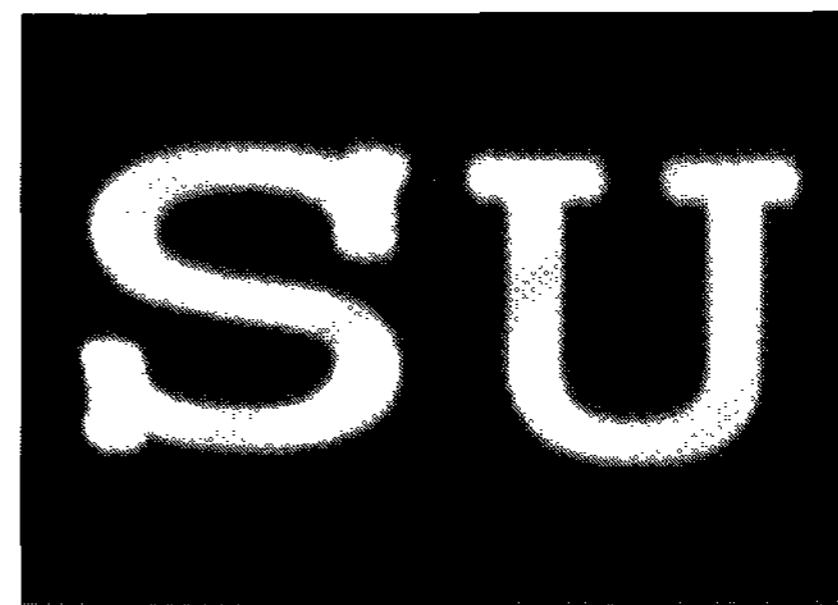
[그림 6] 집적영상과 부유형 시스템을 결합한 입체 동영상 시스템

하거나 평면 동영상을 이용하는데 반해, 이 방식에 의하면 입체 동영상을 부유형 형태로 구현할 수 있다.

종국적으로 3차원 TV를 목표로 하는 시스템은 2차원(2D) 영상 표현과 3차원 영상 표현 사이의 변환이 가능하도록 만들어져야 한다. 이는 현재의 2차원 TV와의 호환성이 있어야 시장에 진입할 수 있기 때문이다. 2D/3D 변환을 할 수 있는 집적영상 시스템으로 최근 두 가지의 기술이 제안되었다^[16,17]. 그 중 하나는 [그림 7]과 같이 PDLC(polymer-dispersed liquid crystal)을 이용하는 것이다^[16]. PDLC에 바이어스 전압이 가해지면 PDLC가 빛을 투과하여 3차원 디스플레이로 동작하게 되고, PDLC에 바이어스가 가해지지 않으면 빛이 산란되어 렌즈가 그 기능을 못하게 된다. 이때에는 2차원 영상을 디스플레이 소자의 온전한 해상도(full



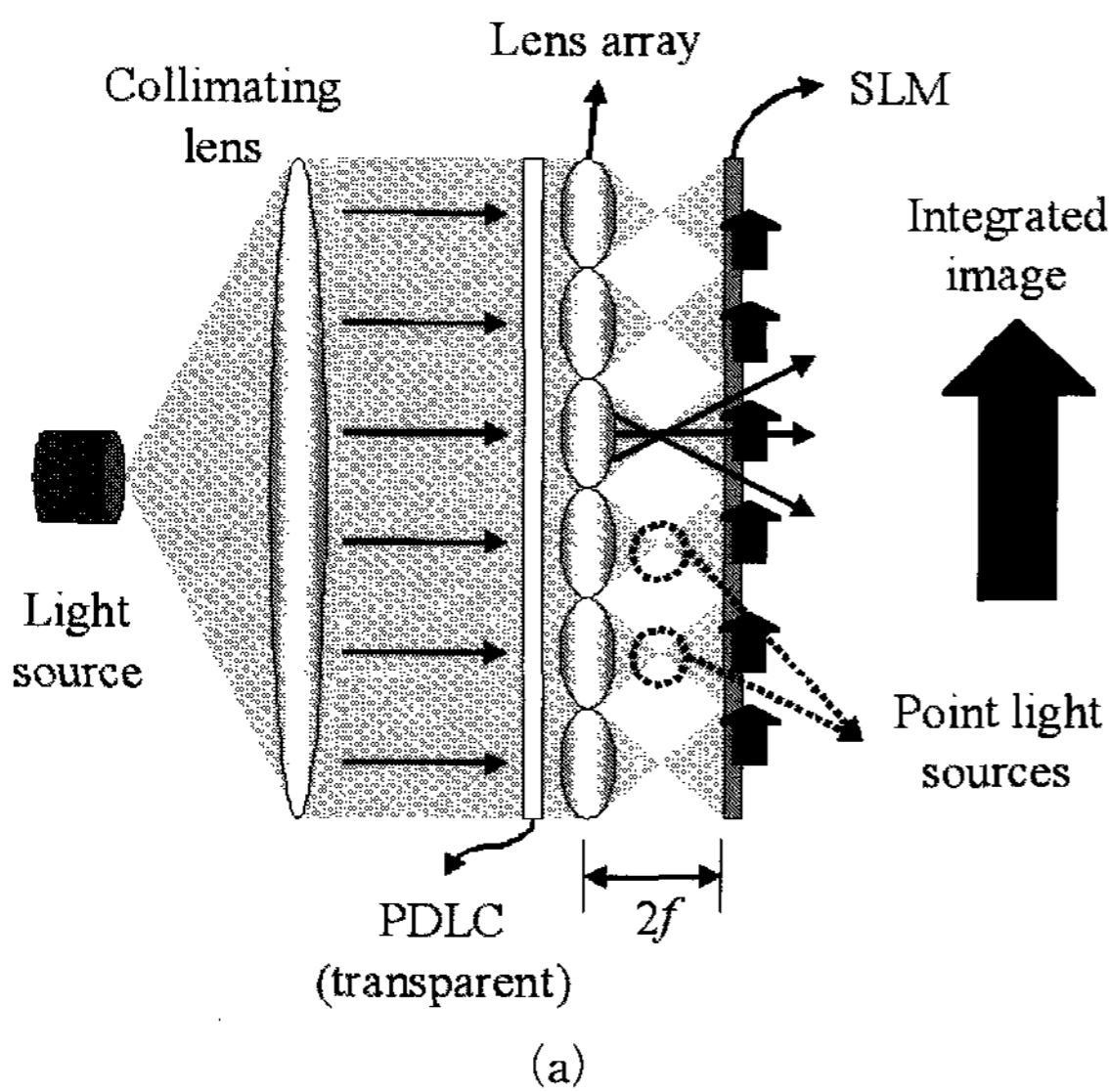
(a)



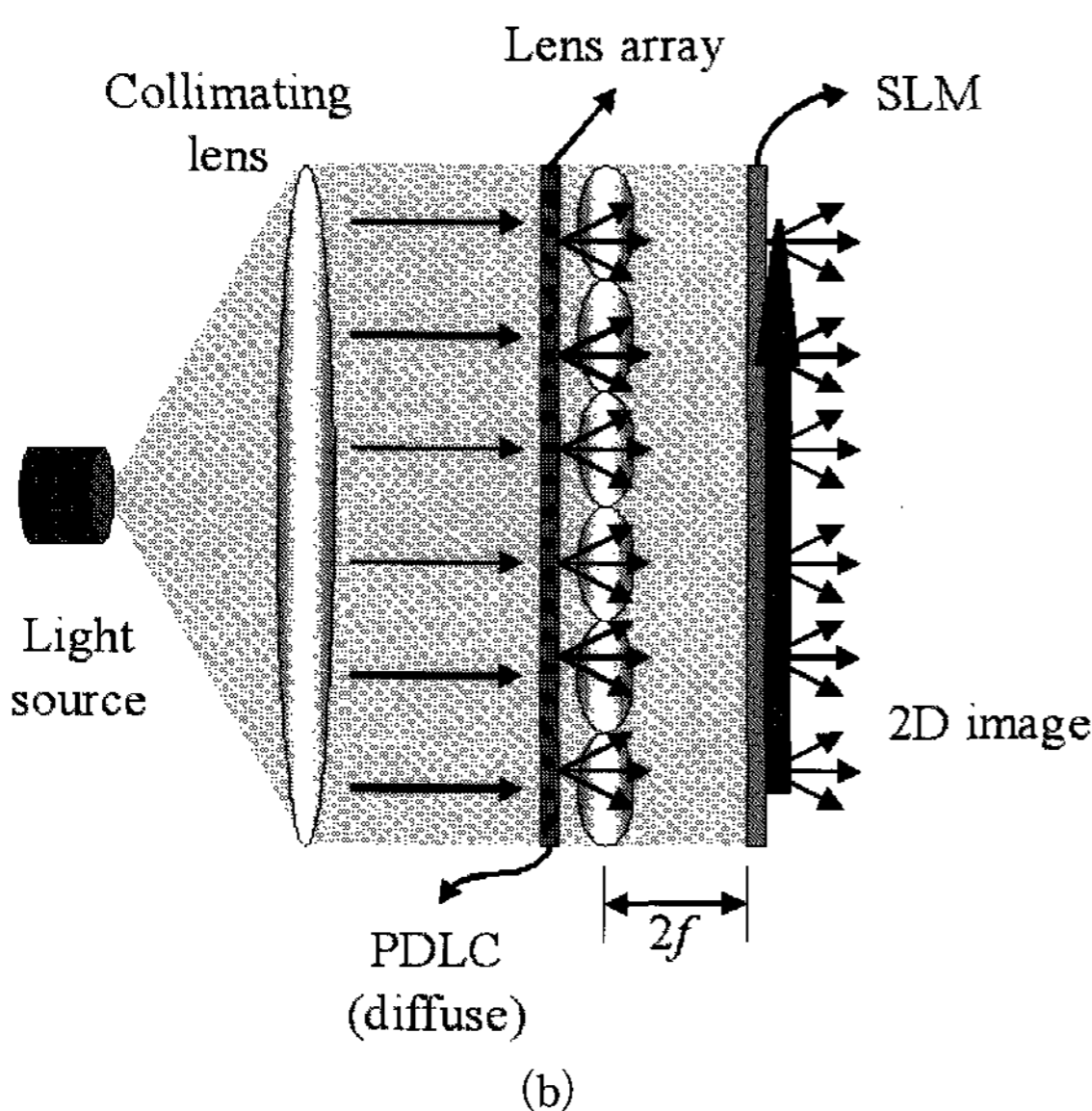
(b)

[그림 8] 실험 결과.

- (a) 구현된 3차원 영상을 여러 각도에서 찍은 사진,
- (b) 2차원 모드로 구현된 2차원 영상의 사진



(a)

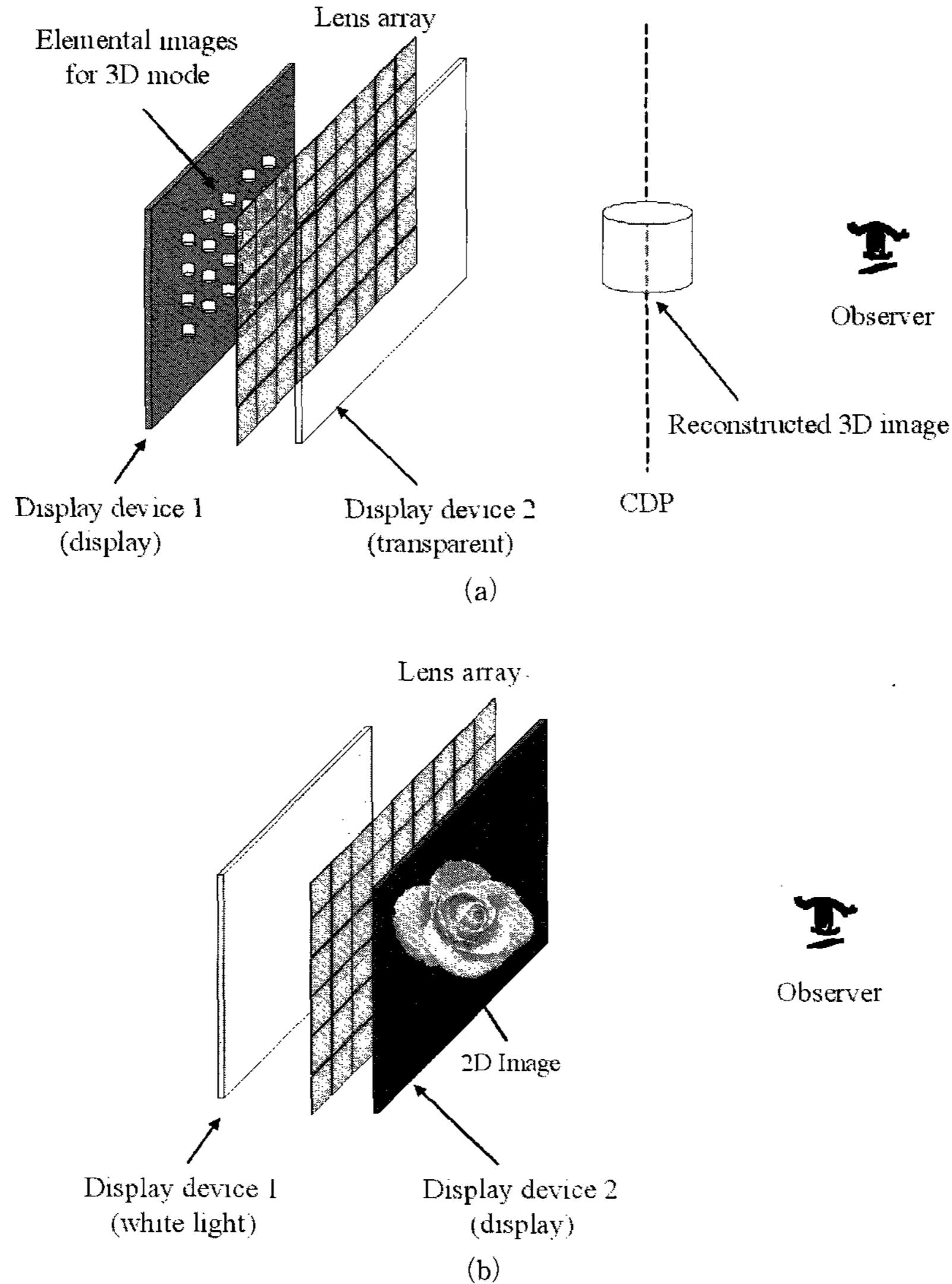


(b)

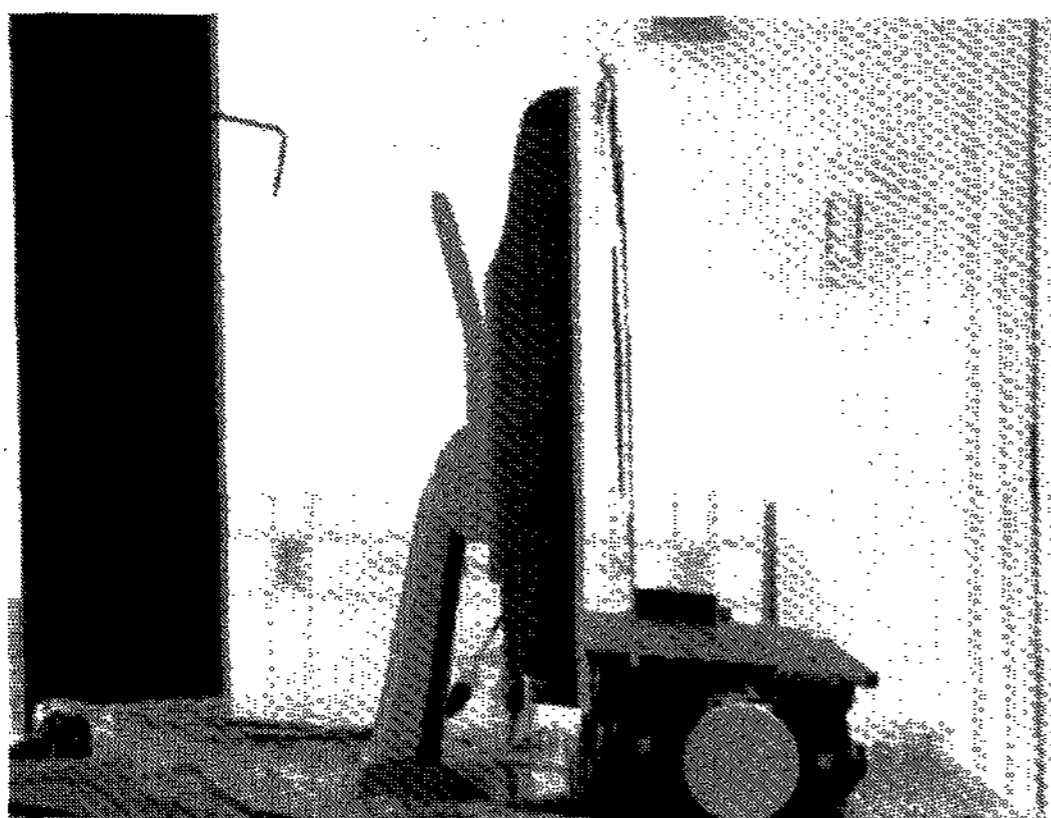
[그림 7] PDLC를 이용한 2D/3D 변환 가능 집적영상 시스템
(a) 3D 모드, (b) 2D 모드

resolution)로 표현할 수 있다. [그림 8]은 실험 결과를 보여준다. 다른 하나의 방법은 두 개의 LCD 디스플레이 패널을 쓰는 것인데, 그 중 하나는 백라이트 유닛 없이 투과형으로 사용되어 렌즈 어레이의 앞에 부착된다^[17]. 뒤의 패널은 3차원 기초 영상을 제공하는데 이용되고 앞의 패널은 2차원 영상을 제공하는데 이용된다. [그림 9]가 그 개념도를 보여주며, [그림 10]은 구현된 시스템의 사진이다. 앞의 디스플레이 패널은 렌즈 어레이에 부착되어 얇은 두께로 구현되었다.

집적영상 시스템에서 해상도는 중요한 이슈인데, NHK에서는 super-hi vision용 모니터를 사용하여 상당히 좋은 화질의 3차원 영상을 보여주고 있다. NHK에서는 당초의 Lippmann의 제안처럼, 디스플레이 패널과 렌즈 어레이 사이의 거리를 렌즈의 초점거리에 맞추어 사용한다. 이렇게 하면 구현된 3D 영상의 분해능이 떨어지게 되지만, super-hi vision으로 이 문제를 극복하려는 것이다.



[그림 9] 두 개의 디스플레이 패널을 이용한 2D/3D 변환 가능 집적영상 시스템. (a) 3D 모드, (b) 2D 모드



[그림 10] 구현된 2D/3D 변환 가능 집적영상 시스템의 사진

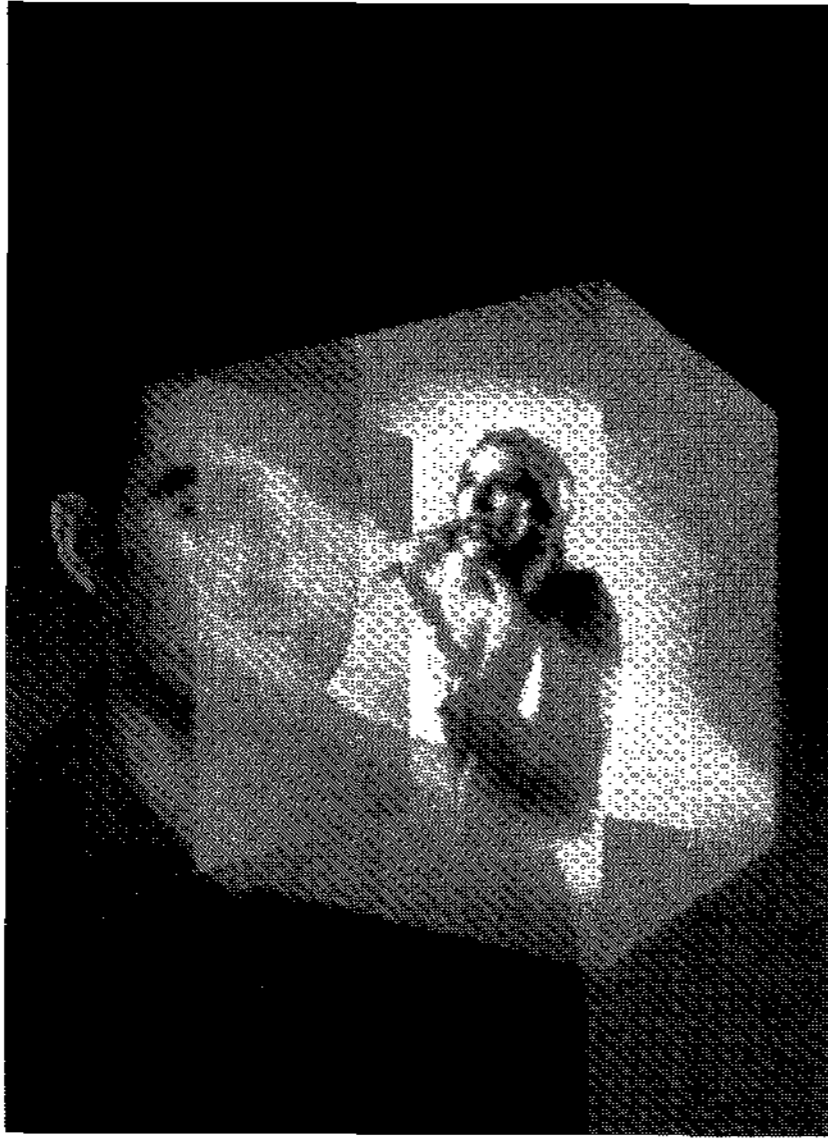
III. 체적형(volumetric) 3D 디스플레이 기술

입체감을 주는 요소로 양안 시차만을 이용하는 디스플레이

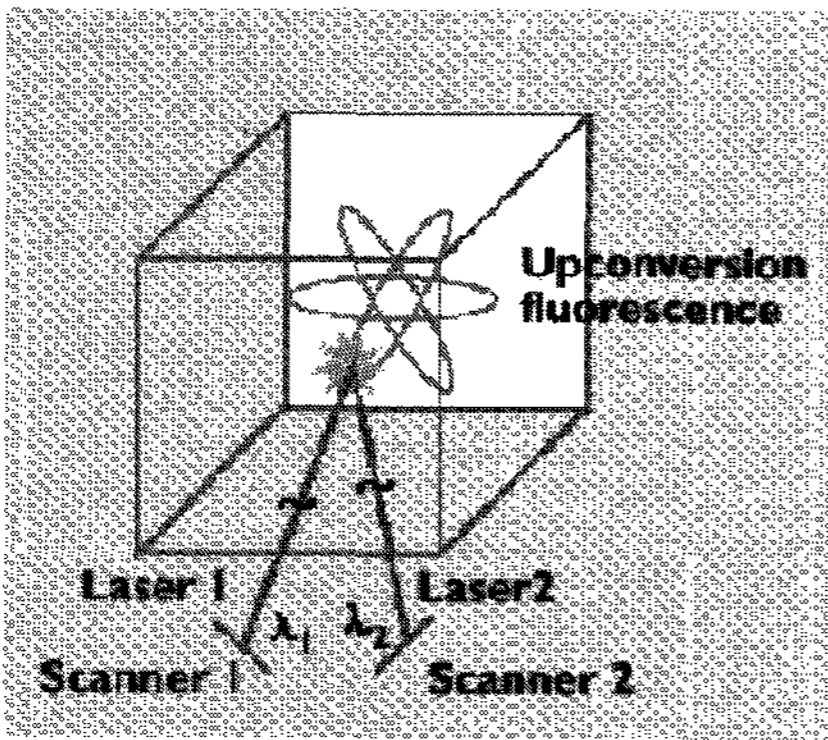
이 방식과는 달리, 이 방식은 실제로 3차원 공간에 입체상을 형성하므로 여러 시각 요소들에 의해 보다 자연스러운 입체감을 느낄 수 있도록 한 기술이다. [그림 11]은 노래를 부르는 여인의 3차원 영상을 디스플레이 해 주는 투명한 육면체를 보여주고 있는데 이는 체적형 입체 디스플레이로서 구현하고자 하는 3D 디스플레이 시스템의 전형적 형태를 보여준다^[18].

체적형 방식은 일반적으로 관찰 가능한 시역이 넓어서 여러 명의 관찰자가 다양한 방향에서 입체 영상을 볼 수 있다는 장점이 있다. 임의의 시점에서 관찰이 가능하도록 깊이감이 표현되므로 관찰 위치의 제약이 없고 자연스런 입체영상의 표현이 가능하다. 즉 시야각의 제한이 없다. 360도 어떤 각도에서도 관찰이 가능한 것은 물론 실제 공간상에 입체를 표시하므로 양안시차 방식에 비해 눈의 피로감이 없는 것이 특징이다.

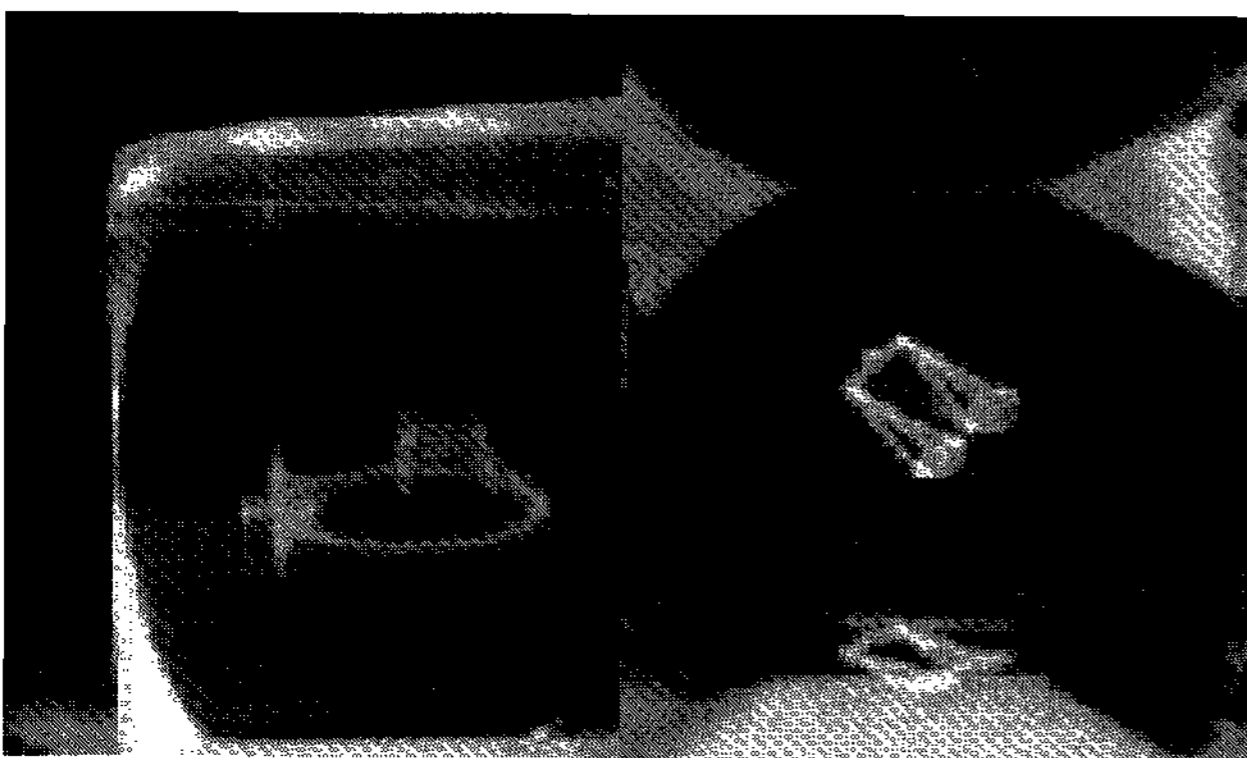
그 동안 체적형 입체 영상 디스플레이를 구현하기 위하여 다양한 방법들이 제안된바 있다. [그림 12]는 두 적외선 레이저의 교차점에서 가시광의 빛을 방출하는 비선형광학 매



[그림 11] 체적형 3D 디스플레이 상상도^[18]



(a)

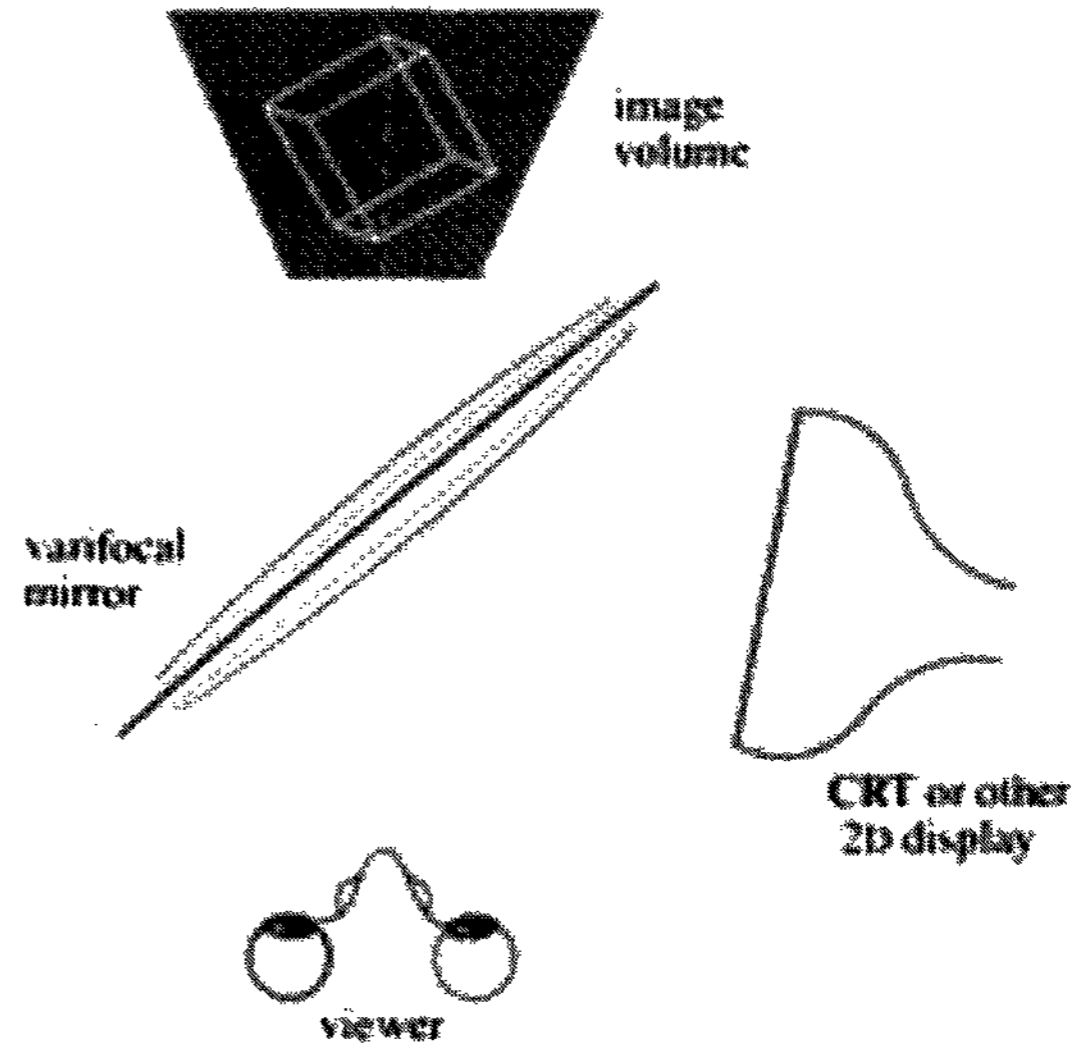


(b)

[그림 12] 비선형광학 매질을 사용한 체적형 3D 디스플레이 시스템 (a) 원리, (b) 구현된 3D 영상

질(고순도 희토류 이온이 첨가)을 사용하여 그 내부에 두 레이저 빔을 주사(scanning)하면서 잔상효과에 의해 3차원 영상을 디스플레이 하는 시스템을 보여준다^[19].

이 밖의 체적형 깊이 표현 방식에는 높은 속도로 표시 면



[그림 13] 가변 초점 거울 방식

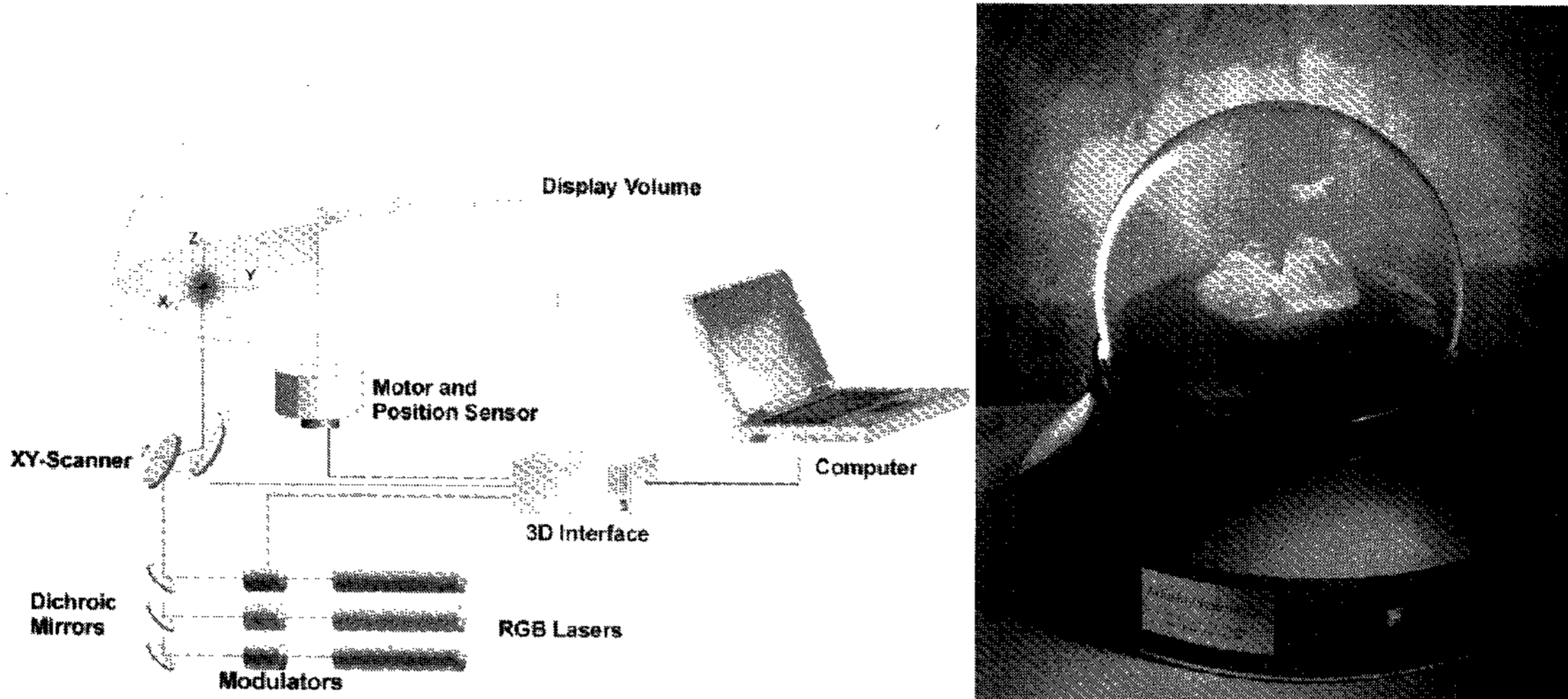
을 진동 또는 회전시키는 방법이나 표시면 적층식 등이 있다.

표시면 진동 방식의 대표적인 예로는, [그림 13]과 같이 진동하는 거울에 영상을 반사시켜서 입체영상을 보여주는 가변 초점 거울 방식이 있다^[20]. 이 시스템에서는 거울을 진동시키고, 그것에 동기된 화상을 디스플레이 화면에 띄움으로써 거울에서 반사된 상이 입체 상으로 관찰되게 한다. 거울로는 유연성이 있는 폴리에스테르 필름 등이 사용되며, 바깥쪽의 면에는 알루미늄과 같은 금속이 도금되어 있다. 거울의 진동은 눈의 잔상 특성을 이용하는 관계상 약 30~60 Hz가 이용되고 있다. 이 방식에 따른 3차원 영상에서는 거울의 진동 진폭의 100배 이상의 깊이감이 얻어지지만, 거울의 곡면 변화에 의해 상이나 배율이 변화하는 따위의 문제가 있다. 1981년에 제니스코사가 이런 문제점을 해결하여 컴퓨터 그래픽용의 '스페이스 그래프 시스템'을 발표한 바 있다.

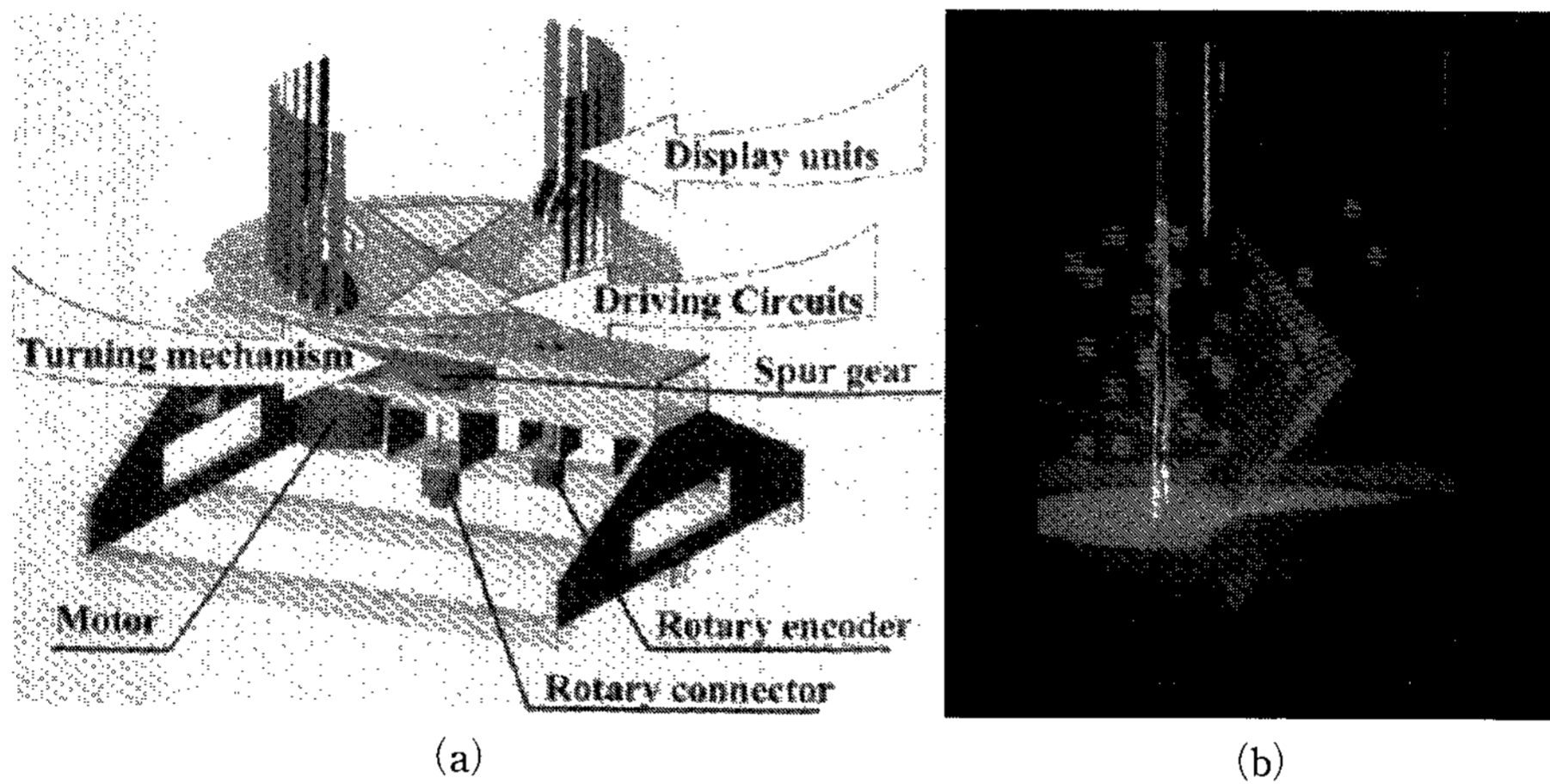
이밖에도 [그림 14]와 같은 회전 스크린식으로 불리는 방법이 있다^[21,22]. 이 방법은 레이저광을 주사하여 움직이는 스크린 상의 원하는 위치에서 빛이 산란 되게 하는 것이다. 표시하고자 하는 비디오 신호로 휘도 변조된 레이저 광을 하부로부터 조사하는데, 이는 회전하는 평면형 또는 나선형의 스크린에 동기 되어 있다. 모터의 회전축에 스크린이 되는 반투명의 날개를 경사 시켜 장착하고, 이것을 고속으로 회전시킨다. Actuality System 사에서 이를 제작 발전시키고 있다.

[그림 15]는 LED 어레이를 막대 모양들로 만들어 회전시키면서 원하는 위치에서 발광하게 하는 체적형 디스플레이 방식이다^[11]. 이러한 체적형 디스플레이의 공통적인 문제점은, 앞에 있는 영상에 의해 뒤의 영상이 가려져야 하는 현상, 즉 가려짐 현상(occlusion)이 생기지 않는다는 것과, 대부분 사람 눈의 잔상 효과를 이용하기 때문에 빠른 기계적 움직임이 필요하다는 점이다. 두 층의 패널을 사용한 집적영상 시스템에서는 이 가려짐 현상이 해결되었다^[13].

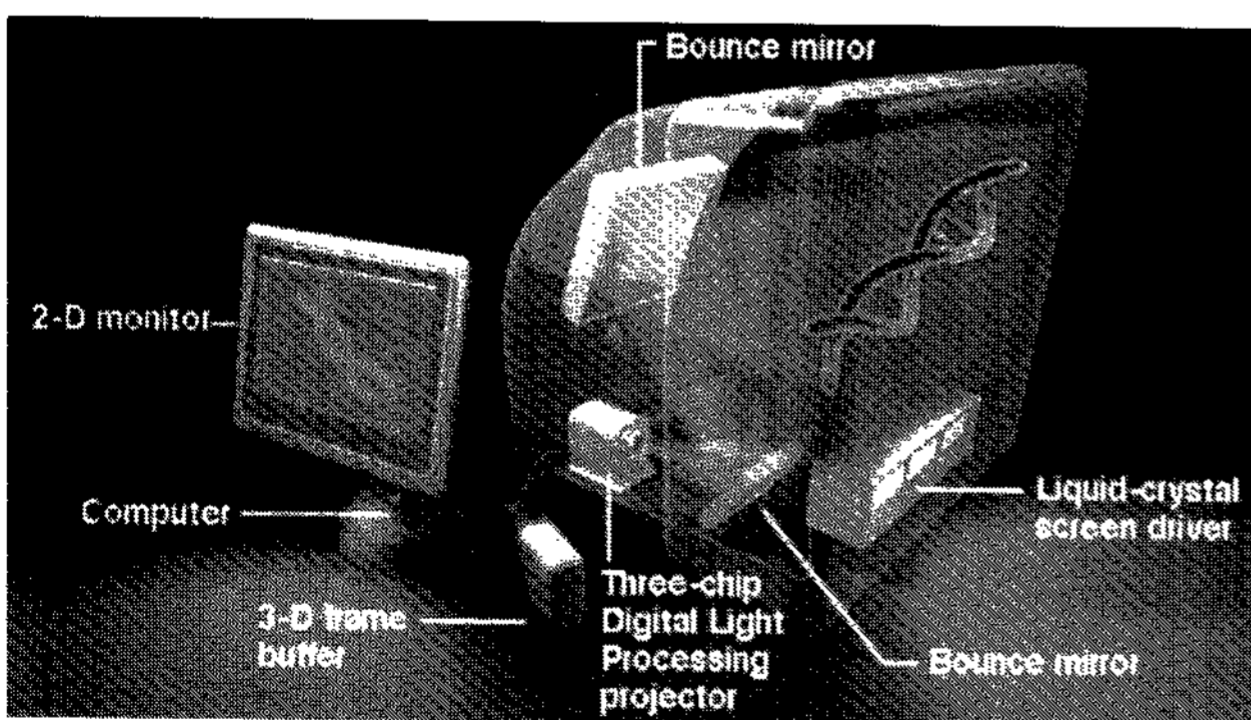
또 한가지의 중요한 체적형 디스플레이 방식으로 표시면



[그림 14] 회전 스크린 방식



[그림 15] LED 회전을 이용한 체적형 3D 디스플레이 (a) 구성도 (b) 구현된 입체 영상



[그림 16] LightSpace사의 DepthCube 체적형 3D 디스플레이

을 적층한 3차원 화상표시 방식이 있다. [그림 16]의 LightSpace사의 DepthCube가 이러한 시스템이다. 액정 패널을 일정 간격으로 여러 장 포개서 배치하고 영상을 거울을 이용하여 액정 적층 패널에 투영한 다음, 빛을 산란시키는 액정 표시면을 전자적으로 선택하는 방식이다. 이 방식은 기계

적인 가동부가 없다는 장점을 갖지만, 화상의 밝기가 셀의 통과 장수에 비례해서 어둡게 되는 결점이 있다. 20개의 액정 층으로 15.3 백만개(1024×748×20층)의 물리적 체적소(voxel)을 구현하였는데, 이웃한 층간에 산란 정도를 조절하여 이웃한 층 사이에 영상이 있는 것처럼 표현하는 기술을 이용해 실제로는 465 백만개(1024×748×608)의 체적소를 구현할 수 있다고 주장한다^[18].

이제까지 설명한 대부분의 체적형 3D 디스플레이는 재생되는 3차원 공간상의 모든 단면 영상의 표시를 눈의 잔상 시간 내에 완료하지 않으면 상의 깜박거림이 지각된다는 단점과, 앞서 설명한 바와 같이, 앞쪽의 재생 상에 숨겨져 있을 뒤쪽 또는 내부의 상이 비쳐서 보인다는 결점을 갖는다.

공간상에 실제로 3차원 영상을 체적소 단위로 표시하는 체적형 입체 영상 디스플레이는 다시점 양안 시차 방식에 비하여 보다 실감 있는 3차원 영상을 제공하는 만큼, 그 필요 정보량은 다시점 양안 시차 방식에 비하여 훨씬 크다. 직육면체 형태의 체적 안에 일정한 크기의 체적소들을 표시하는 경우를 생각해 보자. 입체 영상이 표시되는 체적이 $n_x \times$

$n_y \times n_z$ 개의 체적소로 이루어진 경우 한 정지 영상당 $n_x \times n_y \times n_z$ 개의 픽셀 정보가 요구되어 $n_x \times n_y \times$ (시점개수)개의 픽셀 정보가 요구되는 다시점 양안 시차 방식에 비하여 그 요구 정보량이 훨씬 많음을 알 수 있다. 다시점 양안 시차 방식과의 보다 실질적인 비교를 위하여 체적형 입체 영상 방식의 유효 시차간 각변위를 계산해 보자. 어느 한 시점에서 입체 영상이 표시되는 체적의 앞면을 보게 된다고 가정하자. 시점을 옆으로 옮길수록 점점 체적의 옆면을 바라보게 된다. 이때 시야의 한쪽 끝에 앞면 체적소 1열의 크기에 해당하는 만큼의 옆면 면적이 나타날 때까지의 각도가 체적형 디스플레이의 시점간 유효 각변위로 정의될 수 있다. 간단한 기하학에 의하여 이 각도는 $1/n_z$ 로 나타난다. 여기에서 각 체적소는 정육면체라고 가정하였다. 즉 체적형 디스플레이의 시점간 유효 각변위는 깊이 방향으로의 체적소 개수에 반비례한다. 이와 같은 체적형 디스플레이의 시점간 유효 각변위는 다시점 양안 시차 방식에서 재생 영상의 질의 저하 없이 같은 정도의 깊이를 표시할 때 필요한 시점간 각변위와 일치한다. 예를 들어 $640 \times 480 \times 480$ 개의 체적소로 이루어진 입체 영상을 다시점 양안 시차 방식으로 표시하는 경우 시점 간 각변위는 $1/480$ radian 이 되어야 하며 약 60° (1 radian)의 시야각 내에서 표현하기 위하여 수평방향으로 480개의 시점들을 제공해야 한다. 현재 다시점 양안 시차 방식은 세계적으로 시점간 각변위는 $< 1^\circ$, 시점의 개수는 60개 정도의 목표로 개발되고 있는 것을 고려할 때 체적형 입체 영상 디스플레이에 비교될 정도로 높은 실재감을 갖는 입체 영상을 다시점 양안 시차 방식으로 제공하기는 당분간 힘들 것으로 예상된다.

현재 개발되고 있는 대부분의 체적형 디스플레이는 여러 시점을 동시에 표현하는 다시점 양안 시차 방식과는 다르게, 각 체적소 혹은 각 영상 평면들을 빠르게 주사하며 표시하여 잔상효과에 의하여 입체 영상을 제공하고자 하는 것이다. 따라서 실시간으로 온전한 해상도의 동영상을 표시하기 위해 요구되는 체적소의 수와 표시 속도가 너무 크다는 단점을 지니고 있으며, 대량의 정보 처리 기술의 개발과 우수한 소자 개발이 관건이 되고 있다.

IV. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 집적영상 3D 디스플레이 기술은 기존의 2차원 디스플레이 장치와 광학 소자(렌즈 어레이)를 이용한다는 측면에서는 양안시차 디스플레이 방식과 유사하고, 특정 관찰 시점 대신 시야 영역을 제공하면서, 그 안에서는 깊이감 뿐 아니라 실제 3차원 정보를 제공한다는 점에서 체적형 디스플레이의 특징을 가지고 있다. 체적형 디스플레이로는 여러 가지 형태가 고안되었는데, 대량 정보처리 기술이 개발되고 소자의 속도가 개선되면 크게 개선될 수 있을 것이다. 집적영상 기술은 시야각, 깊이감, 해상도 등의 제한이 계속적 연구를 통해 효과적으로 극복된다면 완전한 3차원 디스플레이 기술로서 3D TV와 같은 3차원 디스

플레이 시장 형성에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 차세대 정보디스플레이 기술개발사업단을 통한 산업자원부의 21C 프론티어 연구개발사업의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- [1] 이병호, "회절광학소자, 3차원 디스플레이, 광메모리의 원리와 현황", Exhibition OSK 2005 Special Session, pp.79-150, 2005년 2월.
- [2] 이병호, "체적형 및 오토스테레오스코픽 3D 디스플레이 기술", 3차원 디스플레이 기술 단기강좌, 광운대학교, pp.42-73, 2004년 12월.
- [3] 이병호, "집적영상(integral imaging) 3D 디스플레이 기술", 인포메이션 디스플레이, 제 5 권 2호, pp.27-32, 2004년 4월.
- [4] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, "Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography", Applied Optics, Vol.36, No.7, 1997, pp.1598-1603.
- [5] S. Jung, J.-H. Park, H. Choi, and B. Lee, "Wide-viewing integral three-dimensional imaging by use of orthogonal polarization switching", Applied Optics, Vol.42, No.14, pp.2513-2520, 2003.
- [6] S. Jung, J.-H. Park, H. Choi, and B. Lee, "Viewing-angle-enhanced integral three-dimensional imaging along all directions without mechanical movement", Optics Express, Vol.11, No.12, pp.1346-1356, 2003.
- [7] Y. Kim, J.-H. Park, S.-W. Min, S. Jung, H. Choi, and B. Lee, "Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array", Applied Optics, Vol.44, pp.546-552, 2005.
- [8] Y. Kim, J.-H. Park, H. Choi, S. Jung, S.-W. Min, and B. Lee, "Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array", Optics Express, Vol.12, pp.421-429, 2004.
- [9] S.-W. Min, J. Kim, and B. Lee, "Wide-viewing projection-type integral imaging system with an embossed screen", Optics Letters, Vol.29, pp.2420-2422, 2004.
- [10] B. Lee, S. Jung, S.-W. Min, and J.-H. Park, "Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image

- planes”, *Optics Letters*, Vol.26, No.19, pp.1481-1482, 2001.
- [11] J. Hong, J.-H. Park, S. Jung, and B. Lee, “A depth-enhanced integral imaging by use of optical path control”, *Optics Letters*, Vol.29, pp.1790-1792, 2004.
- [12] S. Jung, J. Hong, J.-H. Park, Y. Kim, and B. Lee, “Depth-enhanced integral-imaging 3D display using different optical path lengths by polarization devices or mirror barrier array”, *Journal of the Society for Information Display*, Vol.12, pp.461-467, 2004.
- [13] H. Choi, Y. Kim, J.-H. Park, J. Kim, S.-W. Cho, and B. Lee, “Layered-panel integral imaging without the translucent problem”, *Optics Express*, Vol.13, No.15, pp.5769-5776, 2005.
- [14] Y. Kim, J. Park, H. Choi, J. Kim, S. Cho, and B. Lee, “Depth-enhanced integral imaging with multiple central depth planes using multilayered display device”, *Three-dimensional TV, Video, and Display IV*, Optics East, Boston, MA, USA, paper 6016-03, Oct. 2005.
- [15] S.-W. Min, M. Hahn, J. Kim, and B. Lee, “Three-dimensional electro-floating display system using an integral imaging method”, *Optics Express*, Vol.13, No.12, pp.4358-4369, 2005.
- [16] J.-H. Park, J. Kim, Y. Kim, and B. Lee, “Resolution-enhanced three-dimension/two-dimension convertible display based on integral imaging”, *Optics Express*, Vol.13, No.6, pp.1875-1884, 2005.
- [17] H. Choi, J.-H. Park, J. Kim, S.-W. Cho, and B. Lee, “Wide-viewing-angle 3D/2D convertible display system using two display devices and a lens array”, *Optics Express*, Vol.13, No.21, pp.8424-8432, 2005.
- [18] A. Sullivan, “3-Deep”, *IEEE Spectrum*, pp.22-27, Apr. 2005.
- [19] E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston, and R. Macfarlane, “A three-color, solid-state, three-dimensional display”, *Science*, Vol.273, pp.1185-1189, 1996.
- [20] M. C. King and D. H. Berry, “Varifocal mirror technique for video transmission of three-dimensional images”, *Applied Optics*, Vol.9, No.9, pp.2035-2039, 1980.
- [21] H. Yamada, K. Akiyama, K. Muraoka, and Y. Yamaguchi, “The comparison of three kinds of screens for a volume scanning type 3D display”, *TAO First Int. Symp. (Telecom. Advancement Org. of Japan)*, 2-31-19, Shiba, Minato-ku, Tokyo, 1993.
- [22] C. Chinnock, “Volumetric imaging provides a walk-around view”, *Laser Focus World*, Vol.30, p.20, 1994.

저자 소개



이 병 호

1987 : 서울대학교 전자공학과 학사, 1989 : 서울대학교 대학원 전자공학과 석사, 1993 : University of California at Berkeley 박사, 1994. 9.~현재 : 서울대학교 전기공학부 교수, 1999~2004 : 국가지정연구실 지정, 2000 : IEEE Senior Member, 2002 : 제 5회 젊은 과학자상 수상, 2002 : SPIE(국제광공학회) Fellow 선정, 2005 : OSA(미국광학회) Fellow 선정, 2006 : OSA Board of Directors 선정, 관심분야 : 3차원 디스플레이, 광자결정(Photonic crystal), 광섬유격자, 광섬유센서, 홀로그래픽 메모리, 근접장, 양자광학.