

# 집적 영상 기술 기반 3차원 디스플레이 기술

박재형 <충북대학교 전기전자컴퓨터공학부>

## 1 서론

3차원 디스플레이는 인간의 오랜 꿈이었다. 1838년 Wheatstone이 Stereoscope을 제안한 이래로 다양한 종류의 3차원 디스플레이 기술들이 개발되어 왔다. 전통적인 3차원 디스플레이 기술들은 3차원 영상의 재생 원리에 따라 (1) 관측자의 시차를 이용하는 다시점 양안 시차 디스플레이, (2) 공간상에 체적소를 형성함으로써 3차원 이미지를 결상하는 체적형 디스플레이 방식, (3) 3차원 물체의 파면을 그대로 재현하는 홀로그래피방식으로 나눌 수 있다[1-3]. 이 중 홀로그래피 방식과 체적형 디스플레이 방식은 원리적으로 매우 자연스러운 3차원 영상을 표시할 수 있으나, 실제 구현을 위하여는 빠른 속도의 기계적 광학계나 높은 밀도의 광변조기등이 필요하여 가까운 미래에 상업적으로 널리 보급되기는 어렵다. 다시점 양안 시차 방식의 경우 구현이 상대적으로 용이한 반면, 수평 시차만을 제공하고 눈의 피로를 야기하는 문제를 가지고 있다. 이에 따라 초다시점 디스플레이, 초점 조절형 디스플레이 등 다양한 방식으로 이들을 개선한 기술들이 최근 활발히 개발되고 있다. 집적 영상 기술은 이러한 3차원 디스플레이 기술의 일종으로서, 홀로그래피 방식이나 체적형 디스플레이 방식보

다 구현이 용이하면서도 기존의 다시점 양안 시차 방식에 비해 훨씬 자연스러운 3차원 영상을 제공하는 장점으로 인하여 최근 세계적으로 많은 관심을 받고 있는 기술이다. 본 고에서는 집적 영상 기술에 기반한 3차원 디스플레이의 원리와 특징, 최근의 기술 개발 동향을 알아본다.

## 2. 집적 영상 기술의 원리 및 특징

집적 영상 기술(Integral Imaging)은 본래 집적 사진 기술(Integral Photography)란 이름으로 1908년 Lippmann에 의하여 처음 제안되었다[4]. 처음 제안되었을 당시 기록 및 표시 매체로 사진 건판을 사용하여 동영상의 표현이 불가능하였으나, 최근 급격히 발전하고 있는 평판 디스플레이의 적용으로 실시간 3차원 동영상의 재생이 가능해지면서, 국내외적으로 큰 관심을 끌면서 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 집적 영상 기술은 3차원 정보를 2차원 매체에 저장하고 재생한다는 점에서 홀로그래피와 유사성을 가진다. 그러나 (1) 결맞은 광원이 필요하지 않고, 현재의 집적 영상 기술은 (2) 자연스러운 풀컬러 동영상의 저장/재생이 가능하다는 점에서 홀로그래피 방식에 비하여 장점을 지닌다.

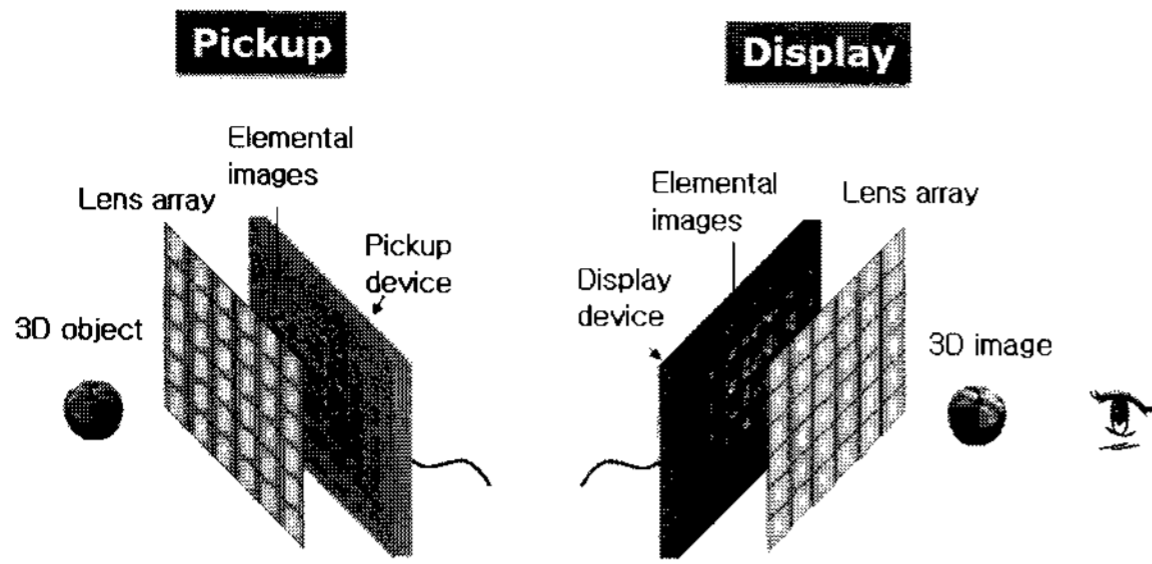


그림 1. 집적 영상 기술에 기반한 3차원 디스플레이의 개념도

그림 1은 집적 영상 시스템의 개념도이다[5-6]. 1908년 Lippmann의 시스템은 필름을 영상의 저장 및 표시 매체(그림 1의 Pickup device, Display device)로 사용하였다. 먼저 3차원 물체를 잠자리눈과 비슷한 모양을 지닌 렌즈 어레이를 통해 촬영함으로써, 렌즈 어레이의 각 렌즈가 형성한 물체의 상을 필름에 2차원 영상 배열로서 기록한다. 이 때 각 렌즈가 형성한 작은 영상들은 “요소 영상”으로 불리며 각각 물체를 다른 방향에서 바라본 상을 포함하고 있다. 3차원 영상으로 재생하기 위하여, 요소 영상이 기록된 필름을 현상한 후 촬영할 때와 동일한 렌즈 어레이를 적절히 위치시키고 필름 뒤에서 산란광을 비추어 준다. 필름에 기록되어 있던 요소 영상들은 렌즈 어레이를 통해 원래 3차원 물체가 있던 위치로 집적되어, 촬영했던 물체와 동일한 3차원 모양을 지니는 3차원 영상을 형성한다. 요소 영상들이 집적되어 본래 물체의 위치에 3차원 상을 형성하므로, 시야각내에서 수평 및 수직 방향으로 연속적인 시차를 가지는 자연스러운 3차원 영상의 관측이 가능하다. 또 컬러 필름을 사용할 경우 풀컬러 3차원 영상의 재생도 가능하다. 그러나 이러한 Lipmann의 초기 시스템은 기록 및 재생 매체로 사진을 사용하여 동영상의 기록 및 재생이 불가능한 한계가 있었다.

이와 같은 집적 사진 기술의 한계는 1990년대 이후 CCD와 같은 전기적 촬영 장비 및 평판 디스플레이

이의 발전으로 동영상의 기록 및 재생이 가능해지면서 극복되었다. 오늘날의 집적 영상 기술은 고해상도 카메라와 평판 디스플레이 패널을 이용하여 움직이는 3차원 물체를 실시간으로 촬영하고 디스플레이 시스템으로 전송하여 이를 다시 3차원 동영상으로 재생할 수 있다. 또 최근 급격히 발달한 마이크로 렌즈 어레이 정밀 제조 기술도 집적 영상 기술의 발전을 촉진하고 있다. 그림 2는 집적 영상 기술에 의하여 재생된 3차원 영상을 보여준다.

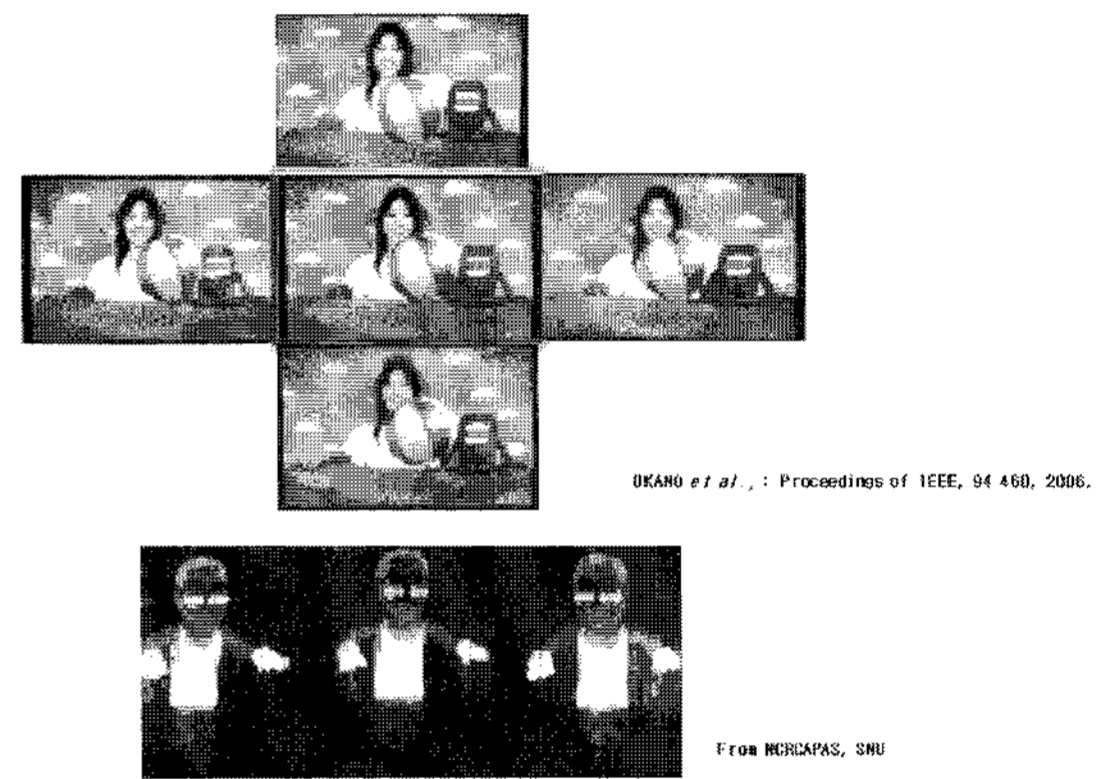


그림 2. 집적 영상 기술에 의하여 재생된 3차원 영상의 예

집적 영상 기술은 요소 영상들을 렌즈 어레이를 이용하여 집적하여 실제로 공간상에 3차원 상을 형성함으로써 3차원 영상을 표시한다. 따라서 관측자의 양안에 서로 다른 2차원 영상을 보여주어 3차원 영상인 것으로 느끼게 하는 기존의 다시점 양안시차 방식과 차별화 된다. 집적 영상 기술을 이용하여 3차원 영상을 표시할 경우, 관측자는 그 위치에 관계없이, 요소 영상들이 집적되는 시야각내에서는 매우 자연스러운 3차원 영상을 관찰할 수 있다. 집적 영상 기술의 장점을 요약하면 다음과 같다.

- 특수한 안경이 필요하지 않음
- 시야각내에서 연속적인 시차를 제공
- 수평 시차 뿐 아니라 수직 시차도 가지는 완전시

차 영상 재생

- 자연스러운 깊이 인지
- 실시간 풀컬러 3차원 동영상 표시 가능
- 시야각내에서 다수의 관측자가 동시에 3차원 영상을 관측
- 평판 디스플레이 패널에 쉽게 적용됨

많은 장점에도 불구하고, 집적 영상 기술은 몇 가지 개선되어야 할 점을 가지고 있으며 이는 다음과 같다.

- 깊이 역전 문제
- 시야각 및 깊이 영역 제한
- 2차원 영상 표시 어려움

최근의 집적 영상 기술에 대한 연구는 이러한 집적 영상 기술의 단점들을 극복하기 위한 기술 개발에 집중되어 있다. 다음 장에서는 이러한 집적 영상 기술에 대한 최근 연구 동향을 알아본다.

### 3. 최근 집적 영상 기술 연구 동향

#### 3.1 깊이 역전 문제와 그 극복

깊이 역전 문제란 재생되는 3차원 물체의 요철이 반대로 보이는 현상이다. 이는 그림 3과 같이 집적 영상 기술의 구조에서 3차원 물체를 촬영하는 방향과 재생된 3차원 물체를 관측하는 방향이 서로 반대가 되어 일어난다. 이로 인해 관측자는 관측자로부터 멀리 있는(렌즈 어레이에 가까운) 영상이 관측자로부터 가까운(렌즈 어레이로부터 먼) 영상을 가리는 비정상적인 현상을 경험한다.

깊이 역전 문제의 해결을 위하여 몇 가지 방법들이 제안되어 왔다[7-12]. Ives는 2단계 집적 사진 기술(Two-step integral photography)을 제안하였다. 3차원 물체를 촬영하여 얻은 요소 영상들을 다시한번 렌즈 어레이를 이용하여 촬영함으로써 깊이 역전이 해소된 3차원 영상 재생을 가능하게 하는 방법이다.

영국의 DeMonfort 대학에 의하여 제안된 Two-tier system이나, 서울대학교에 의하여 제안된 광학적 깊이 변환 기술(Optical Depth Converter, 그림 4) 등도 비슷한 2단계 광학 시스템으로 깊이 역전 문제를 해결한다. 일본 NHK에서는 Gradient Index 렌즈 어레이를 이용한 기술을 제안하였다. 이 기술은 기존의 볼록 렌즈 어레이 대신 Gradient Index 렌즈 어레이를 이용하여 각각의 요소 영상을 대칭적으로 회전시켜 주는 방법으로 깊이 역전 문제를 해결하였다. 또 최근에는 영상 처리 기법을 적용하여, 촬영된 요소 영상간의 변위(disparity)를 검출하고 적절히 조절하여 올바른 깊이를 가진 영상으로 재생되도록 하는 기술도 제안된 바 있다.

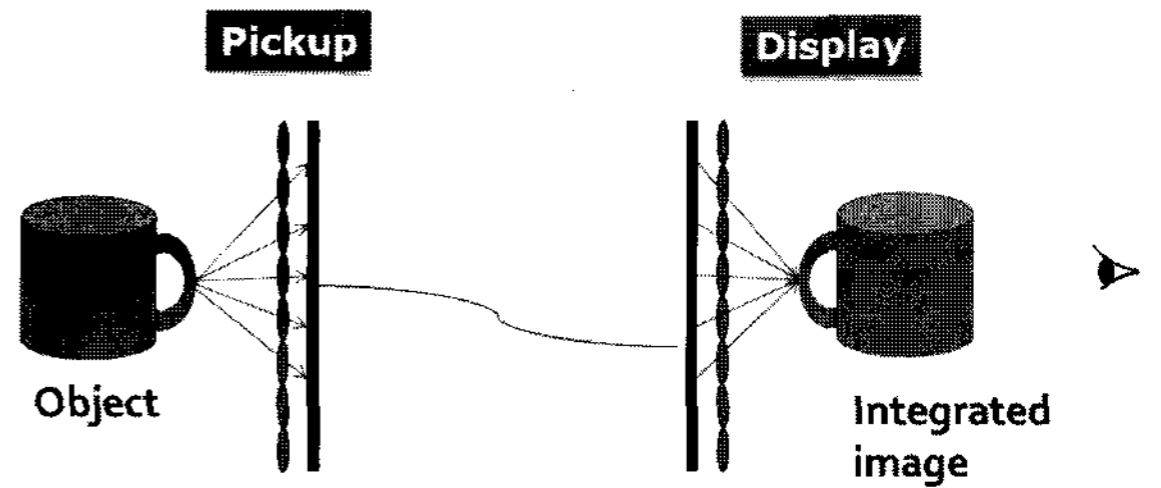


그림 3. 깊이 역전 문제

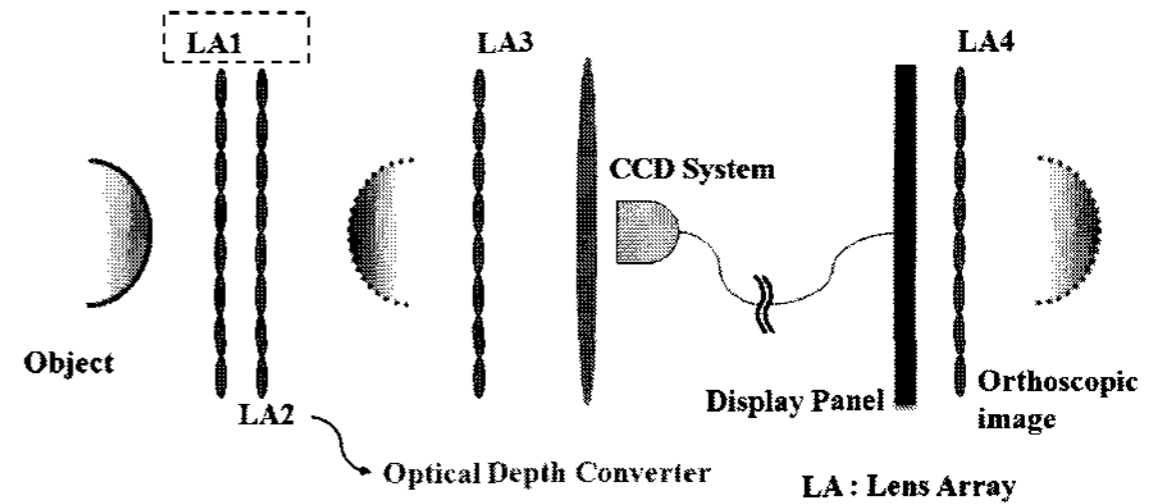


그림 4. Optical Depth Converter

#### 3.2 시야각 개선

집적 영상 기술에서 재생되는 3차원 영상의 시야각은 사용된 렌즈 어레이의 f/수에 의하여 제한된다 [13]. 예를 들어 초점 거리 3(mm), 직경 1(mm)인

정사각형 볼록 렌즈로 이루어진 렌즈 어레이를 사용할 경우 재생되는 영상의 시야각은 수평 수직 방향으로 모두 19도 정도이다. 시야각의 개선을 위하여 다양한 기술들이 연구 개발되고 있다[14-15]. 이 중 주목할 만한 연구는 편광을 이용한 렌즈 스위칭 기술이다. 렌즈 스위칭 기술은 두 개의 직교 편광을 시분할함으로써 유효 요소 영상 영역을 수평 방향으로 2배 연장하여, 결과적으로 수평 시야각을 2배로 확장한다. 그림 5 (a)는 렌즈 스위칭 기술의 개념도이다. 렌즈 어레이의 각 렌즈 열마다 서로 직교하는 방향의 편광 필터를 교대로 붙인다. 렌즈 어레이의 각 렌즈 열의 편광 방향은 서로 직교하므로, 요소 영상의 편광을 직교하는 편광 방향 중 어느 하나로 선택함으로써, 렌즈 어레이의 짝수열과 홀수열을 선택적으로 개폐할 수 있다. 주어진 요소 영상의 편광 방향에 대해서 렌즈 어레이의 짝수열과 홀수열 중 어느 하나만 열리게 되므로, 유효 요소 영상 면적은 수평 방향으로 2배 증대된다. 따라서 요소 영상의 편광을 빠르게(60[Hz]) 바꾸어 주고, 짝수/홀수 렌즈 열에 맞는 요소 영상을 그에 동기 시켜 번갈아 표시해 줌으로써, 수평 시야각이 2배로 향상된 3차원 영상을 표시할 수가 있다. 이때 요소 영상의 편광 방향은 TNLC (Twisted nematic liquid crystal)등을 이용하여 빠른 속도로 변조 가능하다. 이와 같은 렌즈 스위칭 기법은 2조의 디스플레이 시스템에 적용되어 수평 수직 방향 모두의 시야각을 증대시키는 데 응용될 수도 있다.

그림 5 (b)와 같이 구부러진 렌즈 어레이를 이용한 수평 시야각 증대 기법도 제안되었다. 이 기법에선 구부러진 렌즈 어레이와 프로젝션 영상 시스템을 채용하여 수평방향 시야각을 60도 이상으로 확장시켰다. 또한 엠보싱된 스크린을 채용하거나, 렌즈 어레이와 디스플레이 패널 사이에 움직이는 격벽을 사용하여 시야각을 넓히는 기술도 제안되었다.

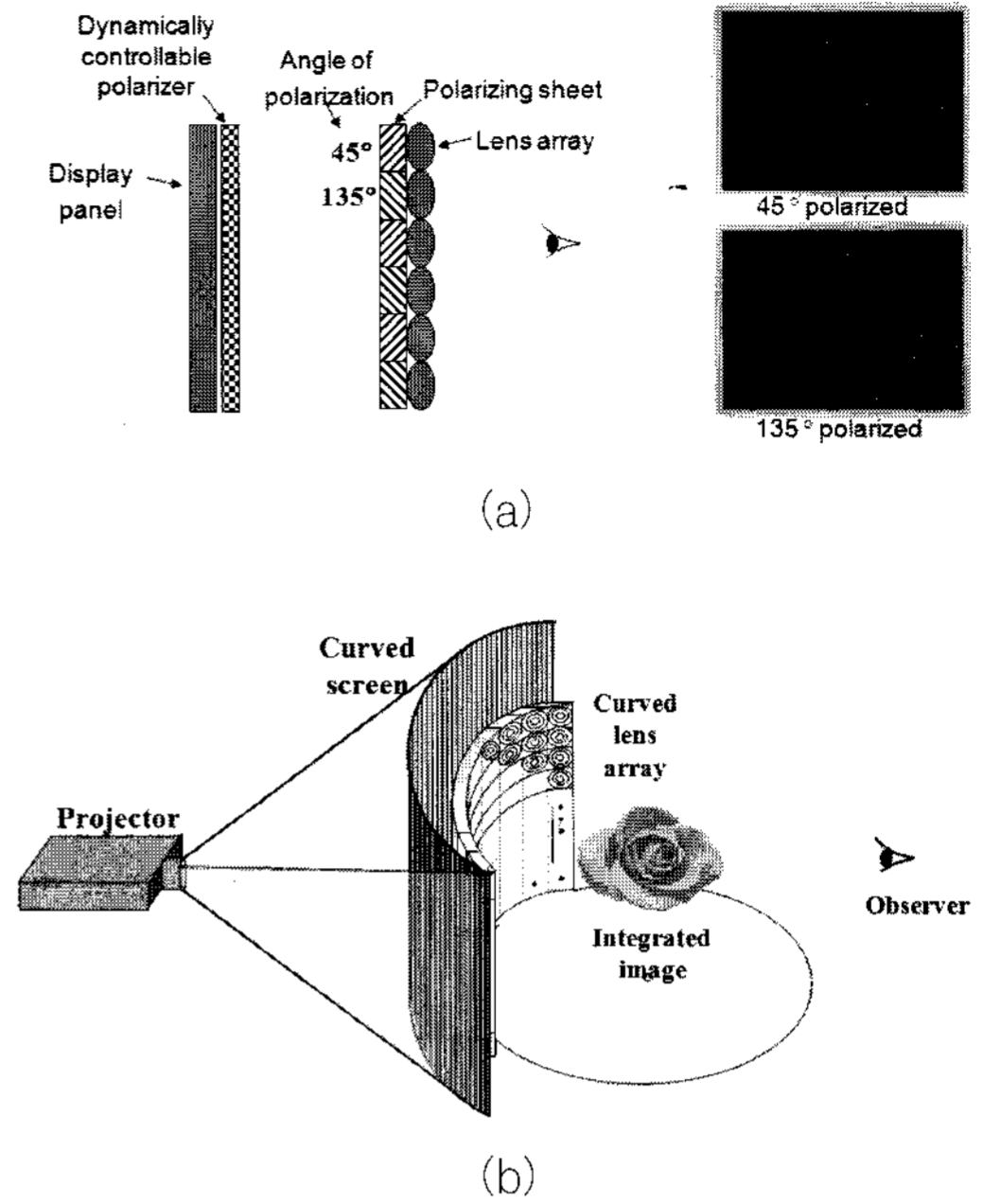


그림 5. 시야각 확대 기술

- (a) 렌즈 스위칭에 의한 수평 시야각 확대 기술
- (b) 구부러진 렌즈 어레이를 이용한 수평 시야각 확대 기술

### 3.3 깊이 영역 개선

집적 영상 기술에서 표현할 수 있는 깊이 영역은 사용하는 렌즈 어레이의 DOF(Depth of Focus)에 의하여 결정된다. 집적 영상 기술에서 3차원 영상은 디스플레이 패널에 표시된 요소 영상들을 렌즈 어레이 중 그에 해당하는 렌즈를 통하여 공간상에 중첩하여 결상함으로써 형성된다. 따라서 표시하고자 하는 3차원 영상의 위치가 렌즈 어레이의 초점면에서 멀어지면, 결상되는 각각의 요소 영상들의 해상도가 저하되어 결국 3차원 영상으로 올바르게 표시할 수 없다. 이러한 이유로 집적 영상 기술에서 표시되는 3차원 영상은 렌즈 어레이의 초점면을 중심으로 일정 두께 영역 안에만 위치할 수 있는 제한을 가진다[16-18].

표현 가능한 깊이 영역을 확장하기 위한 방법으로

가장 먼저 적용될 수 있는 방법은 렌즈 어레이를 디스플레이 패널로부터 정확히 초점 거리에 위치시키는 것이다. 이 경우 요소 영상에서 나온 광선은 렌즈 어레이를 통하여 평행광으로 집속되므로, 일정한 초점면 없이 넓은 깊이 영역에서 3차원 영상으로 집적될 수 있다. 일본 NHK의 집적 영상 시스템이 이러한 방법을 채용하고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 깊이 영역을 확장하는 대신 재생되는 3차원 영상의 해상도를 희생시키므로, 높은 해상도를 얻고자 할 경우 부적절하다.

이와는 달리 렌즈 어레이와 디스플레이 패널 사이의 간격을 변조하여 표현 가능한 깊이 영역을 늘리는 방법이 다양하게 제안되고 있다. 복굴절 물질의 굴절률 편광 의존성을 이용하여 깊이 영역을 확장하는 기술, 편광 광분할기(Beam splitter)를 사용하여 편광에 따라 다른 광경로차를 주는 기술등이 제안된 바 있으며, 최근에는 그림 6과 같이 여러 장의 가변 확산판(Polymer Dispersed liquid crystal을 이용하여 구현 가능)과 프로젝터를 이용한 기술도 발표되었다.

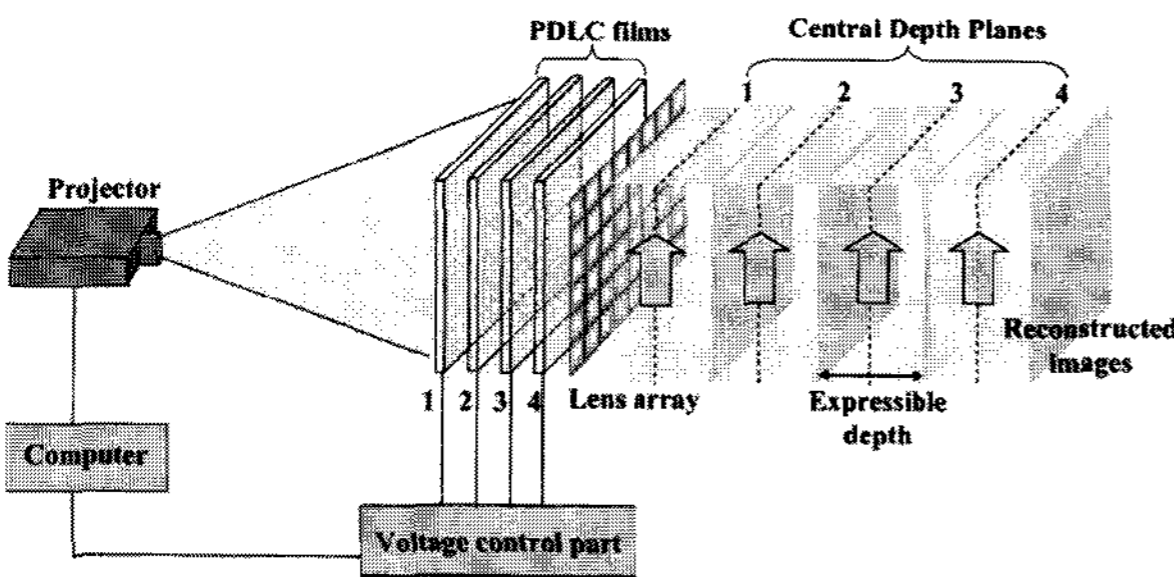


그림 6. 다수의 PDLC 필름을 이용한 깊이감 향상 기술

### 3.4 3차원/2차원 변환 가능 디스플레이

3차원 디스플레이의 TV 및 모니터 시장 진출을 위하여 필요한 필수 기술로서 최근 거론되는 것이 3차원/2차원 변환 가능 기능이다. 3차원 영상만을 표시할 수 있는 것보다, 2차원 영상은 기존의 평판 디스플레이와 비슷한 성능으로 표시하면서 부가적으로 3차원 영상을 표현할 수 있는 것이 훨씬 매력적이기 때문이다. 집적 영상 기술의 경우 본래 3차원 영상만을 표시할 수 있는 기술이었으나, 최근 3차원/2차원 변환 가능 기능의 중요성이 강조되면서, 집적 영상 기술에 3차원/2차원 변환 기능을 접목하는 기술들의 개발은 최근의 가장 중요한 이슈 중의 하나이다[19-22].

3차원/2차원 변환을 가능하게 하기 위하여 그림 7과 같이 가변 확산판과 점광원 어레이를 사용하는 집적 영상 시스템이 제안되었다. 일반적인 집적 영상 시스템과는 달리 렌즈 어레이가 디스플레이 패널의 뒤쪽에 위치하고 있다. 이 기술에서 렌즈 어레이는 요소 영상을 집적 하는 역할이 아니라 평행광을 점광원 어레이로 바꾸어 주는 기능을 한다. 렌즈 어레이 뒤쪽의 가변 확산판은 뒤에서 오는 평행광을 산란시키거나 그대로 투과시켜 점광원 어레이의 생성을 제어한다. 3차원 모드일 경우, 가변 확산판이 평행광을 그대로

투과시켜 점광원 어레이의 생성을 제어한다. 3차원 모드일 경우, 가변 확산판이 평행광을 그대로

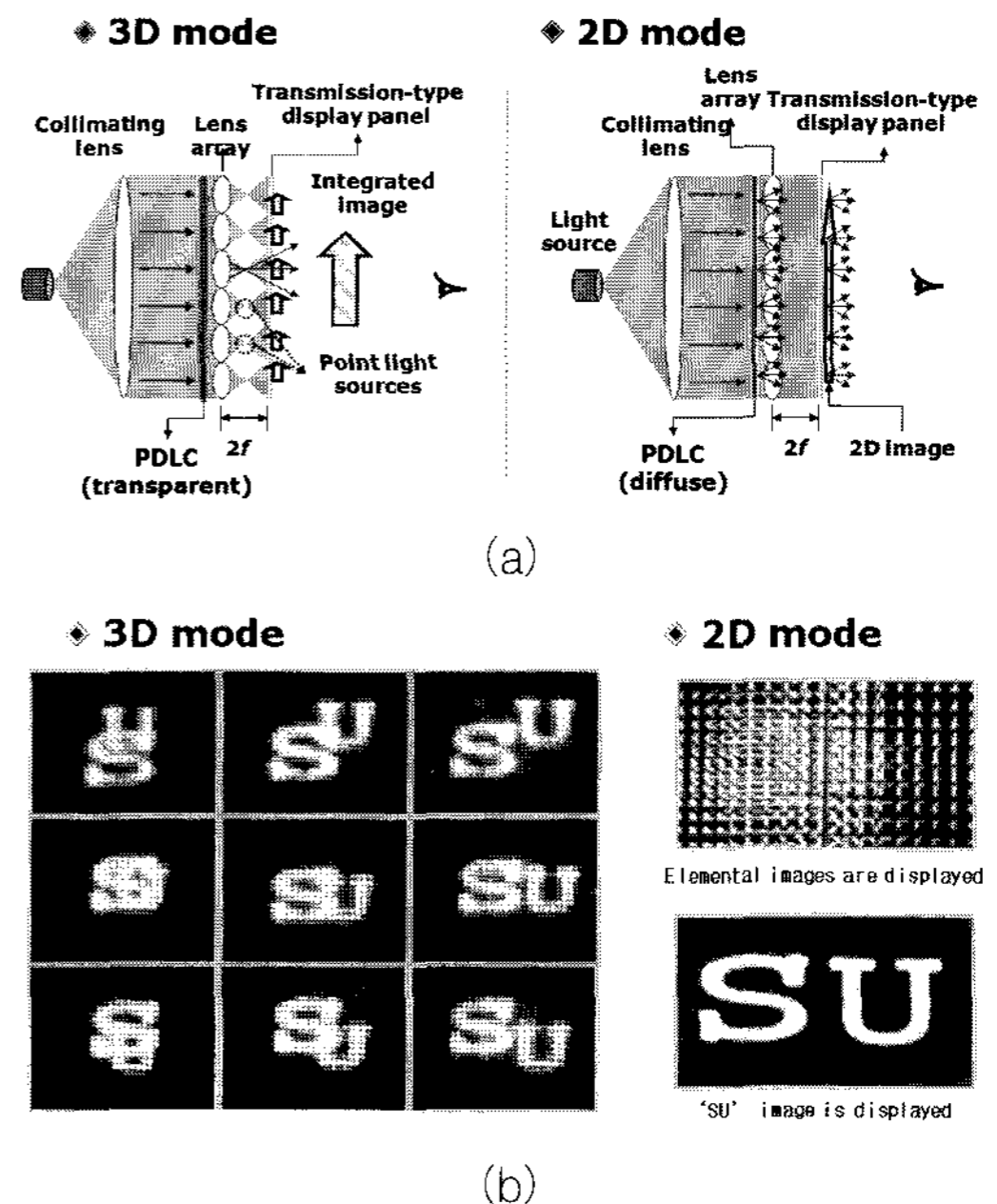


그림 7. 3차원 2차원 변환 가능 집적 영상 기술

(a) 개요도 (b) 재생된 3차원/2차원 영상

통과시켜 렌즈어레이가 점광원 어레이를 형성한다. 점광원 어레이에서 나온 광선은 그 진행 방향에 따라 디스플레이 패널(공간광변조기)에 의하여 그 색 및 세기가 변조되어 진행하여 3차원 영상을 표시한다. 2차원 모드일 경우, 가변 확산판이 평행광을 산란시켜 점광원 생성을 막고, 산란된 빛이 그대로 디스플레이 패널을 비추어 일반적인 LCD와 같은 원리로 2차원 영상을 표시하게 된다. 이와 같은 기술을 더욱 개선하여, 최근에는 EL(Electro Luminescent) 시트를 이용한 시스템, LED 어레이 혹은 가변 편광 어레이를 이용한 시스템등이 개발되고 있다. 또 점광원 어레이 대신 디스플레이 패널 두 장과 렌즈 어레이를 함께 이용하여 3차원/2차원 변환 가능 기능을 구현한 시스템도 발표된 바 있다.

#### 4. 3차원 정보처리 기술로의 응용

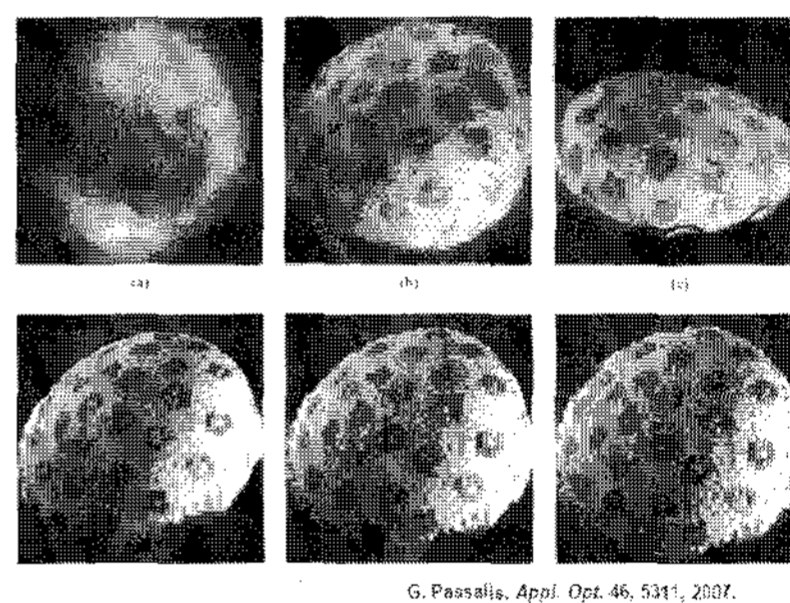
집적 영상 기술은 본래 3차원 디스플레이 기술로서 발전하여 왔으나, 최근에는 그 응용 분야가 확대되어 3차원 정보 처리 전반에 활발히 적용되고 있다. 이것은 집적 영상 기술이 기본적으로 물체의 3차원 정보를 물체를 다양한 각도에서 바라본 요소 영상들의 집합으로 촬영, 기록하므로, 요소 영상에 포함되어 있는 3차원 정보를 분석하여 유용하게 사용할 수 있다는 사실에서 기인한다.

구체적으로 요소 영상간의 2차원 광상관연상을 통하여 공간상의 3차원 물체를 광학적으로 검출하고 그 위치를 찾아내는 3차원 광상관기가 제안된 바 있다. 그 이후 다양한 분야로 집적 영상 기술이 응용되고 있으나, 특히 요소 영상들을 이용한 깊이 평면의 계산적 재생(Computational Integral Imaging)과 시점 영상의 생성이 최근 큰 관심을 받고 있다[23-27].

깊이 평면의 계산적 재생은 물체의 3차원 영상을 광학적으로 표시하는 것이 아니라, 물체 공간의 각 깊이 평면별 단면 영상을 요소 영상에 대한 계산을 통하여

얻어내는 것이다. 주로 주어진 깊이 평면에 대하여 요소 영상들을 적절히 중첩함으로써, 해당 평면에서의 단면 영상을 획득한다. 이렇게 깊이 평면별로 재현된 영상은 3차원 물체의 광학적 인식등에도 응용되고 있다.

시점 영상의 생성은 요소 영상들을 이용하여 임의 위치에서 물체를 바라본 시점 영상을 합성해내는 기술이다. 그림 8은 합성된 시점 영상들의 예이다. 현재 상용화 되고 있는 다시점 양안 시차 방식 3차원 디스플레이에 필요한 다수의 시점 영상을 다수의 카메라가 아니라 하나의 카메라라 렌즈 어레이만으로 합성할 수 있는 장점을 지녀 최근 많이 연구되고 있다.



G. Passalis, Appl. Opt. 46, 5311, 2007.

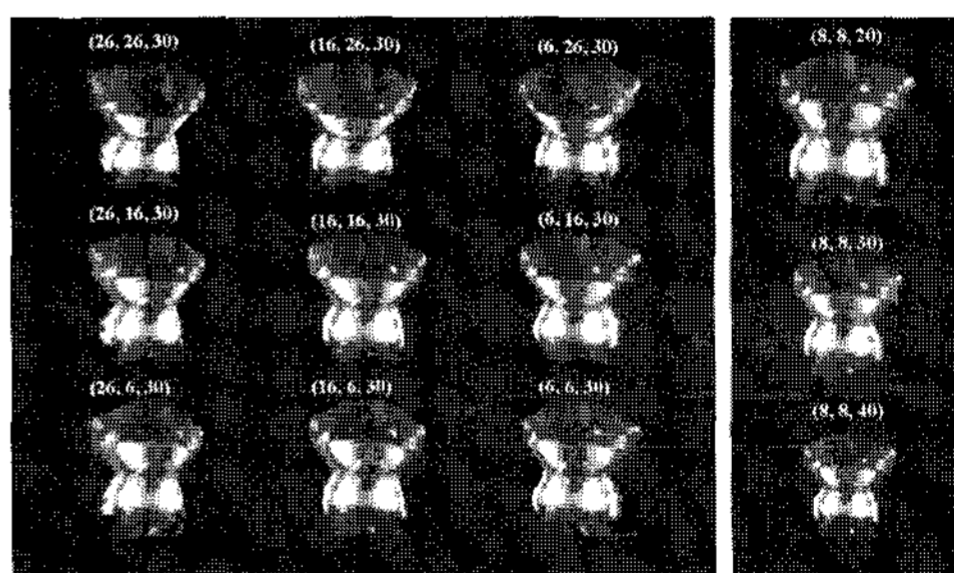


그림 8. 집적 영상 기술에 의하여 재생된 시점 영상

#### 5. 맺음말

3차원 디스플레이는 현재의 2차원 평판디스플레이의 뒤를 이을 차세대 디스플레이로서 주목받고 있다. 그러나 많은 기술들이 구현은 간단하지만 부자연스러운 3차원 영상의 재생으로 눈의 피로를 야기하거나, 자연스러운 3차원 영상의 재생이 가능하지만 현재의

기술로는 구현이 어려운 문제를 가지고 있어, 3차원 디스플레이의 본격적인 대중화/상업화를 저해하는 요인으로 작용하고 있다. 집적 영상 기술은 현재 상용화가 되고 있는 다시점 양안시차 기술보다 훨씬 자연스러운 3차원 영상을 제공하면서도, 홀로그래픽 3차원 디스플레이 기술보다 용이하게 구현할 수 있어, 가까운 미래의 3차원 디스플레이 기술로서 주도적 역할을 할 수 있는 큰 잠재력이 있다. 또 최근 집적 영상 기술의 발전으로 인하여 3차원 2차원 변환이 가능해지고 해상도, 시야각, 깊이감등의 여러 시각적 특성들이 빠르게 향상되고 있어, 이러한 예상은 현실화되고 있다. 그림 9는 집적 영상 기술에 기반한 3차원 디스플레이를 채용하여 일본 히타치사에서 제작한 게임기의 프로토타입이다. 집적 영상 기술이 지닌 여러 장점은 집적 영상 기술을 3차원 디스플레이를 넘어 3차원 정보 처리의 기반 기술로서 자리 매김하고 있다. 현재 서울대, 충북대, 경희대, 동경대, NHK, 도시바, 히타치, 커네티컷대등 국내외적으로 연구가 활발히 진행되고 되고 있으므로, 집적 영상 기술이 현재의 2차원 평판 디스플레이를 대체할 3차원 디스플레이의 실현을 앞당길 것으로 기대한다.

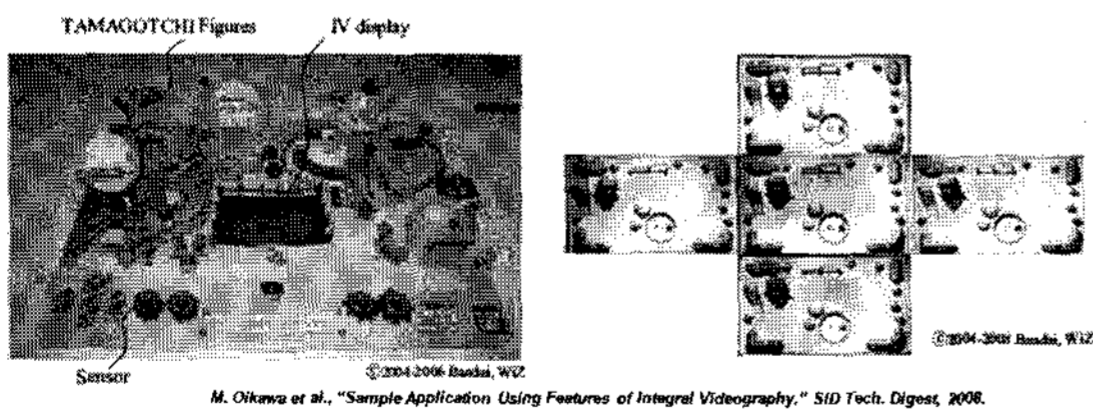


그림 9. 집적 영상 기술 기반 3차원 디스플레이가 채용된 일본 히타치사의 게임기

### 참고문헌

[1] M. Halle, ACM SIGGRAPH vol. 31, pp. 58, (1997).  
 [2] K. Perlin, S. Paxia, and J. S. Kollin, Proc. of the 27th Ann. Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM Press/Addison-Wesley, 2000), 319.  
 [3] T. Okoshi, Appl. Opt. 10, 2284 (1971).

[4] G. Lippmann, Comptes Rendus Acad. Sci. 146, 446 (1908).  
 [5] C. B. Burckhardt, J. Opt. Soc. Am. 58, 71 (1967).  
 [6] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai and I. Yuyama: Appl. Opt. 36, 1598 (1997).  
 [7] H. E. Ives, J. Opt. Soc. Am. 21, 171, (1931).  
 [8] N. Davies, M. McCormick, and L. Yang, Appl. Opt. 27, 4520 (1988).  
 [9] J. Arai, F. Okano, H. Hoshino, and I. Yuyama, Appl. Opt. 37, 2034 (1998).  
 [10] J.-S. Jang and B. Javidi, Opt. Eng. 42, 1869 (2003).  
 [11] J.-S. Jang and B. Javidi, Opt. Eng. 41, 2568 (2002).  
 [12] S.-W. Min, J. Hong, and B. Lee, Appl. Opt. 43, 4539, (2004).  
 [13] J.-H. Park, S.-W. Min, S. Jung, and B. Lee, Appl. Opt., 40, 5217, (2001).  
 [14] B. Lee, S. Jung, and J.-H. Park, Opt. Lett. 27, 818 (2002).  
 [15] Y. Kim, J.-H. Park, H. Choi, S. Jung, S.-W. Min, and B. Lee, Opt. Express 12, 421 (2004).  
 [16] J.-H. Park, S. Jung, H. Choi, and B. Lee, Opt. Express, 11, 1862, (2003).  
 [17] Y. Kim, H. Choi, J. Kim, S.-W. Cho, Y. Kim, G. Park, and B. Lee, Appl. Opt., 46, 3766, (2007).  
 [18] Y. Kim, J.-H. Park, H. Choi, J. Kim, S.-W. Cho, and B. Lee, Appl. Opt., 45, 4334, (2006).  
 [19] J.-H. Park, H.-R. Kim, Y. Kim, J. Kim, J. Hong, S.-D. Lee, and B. Lee, Opt. Lett., 29, 2734, (2004).  
 [20] Y. Kim, J. Kim, J.-M. Kang, J.-H. Jung, H. Choi, and B. Lee, Opt. Express, 15, 18253, (2007).  
 [21] S.-W. Cho, J.-H. Park, Y. Kim, H. Choi, J. Kim, and B. Lee, Opt. Lett., 31, 2852, (2006).  
 [22] H. Choi, Y. Kim, J. Kim, S.-W. Cho, and B. Lee, Journal of the Society for Information Display, 15, 315, (2007).  
 [23] J.-H. Park, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (OSA Optics and Photonics Spring Congress), St. Petersburg, Florida, USA, paper DTuA3, Mar. (2008).  
 [24] D.-H. Shin, N.-W. Kim, H. Yoo, J.-J. Lee, B. Lee, and E.-S. Kim, ETRI Journal, 29, 649, (2007).  
 [25] A. Stern and B. Javidi, Appl. Opt. 42, 7036 (2003).  
 [27] G. Passalis, N. Sgouros, S. Athineos, and T. Theoharis, Appl. Opt. 46, 5311 (2007).

### ◆ 저자 소개 ◆



#### 박재형

1977년 2월 3일생. 2000년 2월 서울대학교 전기공학부 졸업. 2002년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2005년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 2005년 9월~2007년 8월 삼성전자 LCD총괄 책임연구원. 2007년 9월~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전임강사.