

기술 특 집

집적영상(Integral Imaging) 3D 디스플레이 기술

이 병 호 (서울대학교 전기공학부)

I. 서 론

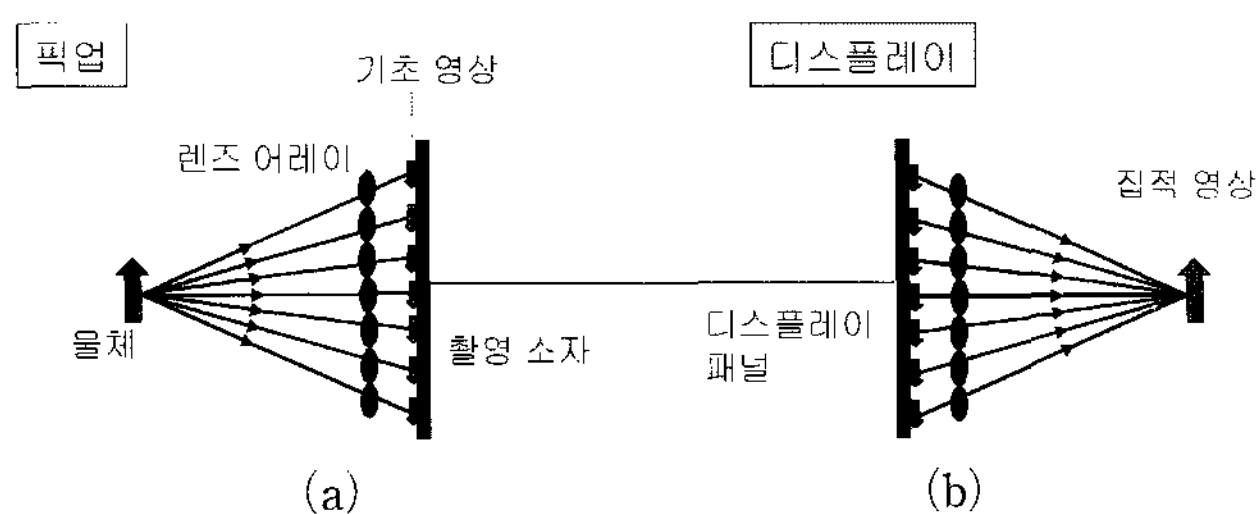
3차원(3D) 디스플레이 기술은 관측자에게 기존의 일반적인 디스플레이 장치가 제공하는 평면 이미지가 아니라 실제 감 있는 3차원 입체로서 영상을 느낄 수 있도록 표시하는 기술을 말한다. 이러한 3D 디스플레이 기술은 특수 안경의 사용 여부에 따라 안경식과 무안경식으로 나눌 수 있고, 또 입체 표시 방식에 따라 양안시차 디스플레이 방식, 체적형 디스플레이 방식, 홀로그래피 방식 등으로 나눌 수 있다^[1].

이 중에서 집적영상(integral imaging)을 기반으로 하는 3D 디스플레이 기술은 렌즈 어레이(lens array)를 이용하는 무안경 방식으로서 양안시차 디스플레이와 체적형 디스플레이 방식의 중간적인 특성을 갖고 있어 최근 국내외에서 많은 관심을 끌고 있다. 본 고에서는 집적영상 기술의 기본적인 원리와 장단점을 간단히 설명하고, 최근의 국내외 연구 동향을 소개하고자 한다.

집적영상의 기본적인 원리는 [그림 1]에서와 같이 픽업과 디스플레이, 두 단계로 이루어진다. 픽업(pick-up) 과정에서는 3차원 물체를 여러 방향에서 바라본 서로 다른 영상들을 렌즈 어레이를 통하여 기초 영상(elemental image) 형태로 저장하고, 디스플레이 과정에서는 이들 기초 영상들이 렌즈 어레이를 통하여 3차원 영상으로 합성되게 된다. 이렇게 렌즈 어레이를 사용하여 3차원 영상을 획득하는 것은 잠자리와 같은 파리류의 눈의 원리와 같으므로 이 기술을 fly's eyes' principle에 기초했다고 칭하기도 한다.

집적영상 기술의 주요한 특징은 (1) 입체 영상을 관측하는데 안경이나 기타 도구가 필요하지 않고, (2) 한 개 또는 몇 개의 시점이 아니라 일정한 시야각 내에서 연속적인 시점을 제공하며, (3) 수평 뿐 아니라 수직 방향 시차도 제공하고, (4) 총 천연색 실시간 디스플레이가 가능하며, (5) CRT, LCD, PDP 유기 EL 등 기존의 디스플레이 기술을 적용할 수 있다는 점 등이다. 특히 이 방식은 2차원 디스플레이와 렌즈 어레이만을 이용하는 간단한 구조이므로, 고해상도 CCD를 통한 기초 영상의 실시간 전송이 가능해지면 입체 TV 등에의 응용에 매우 적합한 방식이라 할 수 있다.

그러나 집적영상 방식은 이와 같은 장점들과 더불어 시야각, 깊이감, 해상도 면에서 아직 개선해야 할 많은 문제점들을 가지고 있다^[2].



[그림 1] 집적영상 방식 3차원 디스플레이의 원리
(a) 픽업 (b) 디스플레이

집적영상 기술은 1908년 Lippmann에 의하여 integral photography란 이름으로 제안되었다^[3]. 이 해는 Lippmann에게 특별한 해였는데, 그 전에 이룩한 간섭을 이용한 칼라 사진 기술로 노벨 물리학상을 받은 해였다. 그에 의해 처음 제안된 시스템은 이미지 저장 및 재생 매체로 필름을 사용하였는데, 이러한 방식에서는 동영상을 저장하거나 표시할 수 없다. 물론, 그 당시에는 지금과 같은 동영상 디스플레이 기술이 탄생하기 전이었다. 이러한 초기의 집적영상 기술은 물체를 바라보는 방향이 픽업부와 디스플레이부에서 서로 반대이므로 재생되는 입체 영상의 깊이가 역전되는 pseudoscopic 문제도 가지고 있었다. 1931년, Ives는 렌즈 어레이 2개를 연결하는 two-step integral photography를 제안하여 pseudoscopic 문제에 대한 해결책을 제시하였으나, 이 방식은 영상이 두 개의 렌즈 어레이를 지나면서 렌즈의 수차에 의한 왜곡이 심해져 생성되는 입체 영상의 해상도가 떨어지게 되는 단점을 가지고 있다^[4]. 이렇게 integral photography는 기초 영상의 저장 및 재생 매체로서 필름을 사용하여 동영상의 저장 및 재생이 불가능했기 때문에 몇몇 연구를 제외하고는 큰 관심을 끌지 못하다가, 1980년대 CCD와 같은 고해상도 촬영 소자와 LCD 등의 고해상도 디스플레이 장치가 급속히 발달하면서, 픽업과 디스플레이에 이러한 장치들을 이용하여 동영상 표현이 가능해진 집적영

상 기술로 진보되어 널리 연구되기 시작하였다.

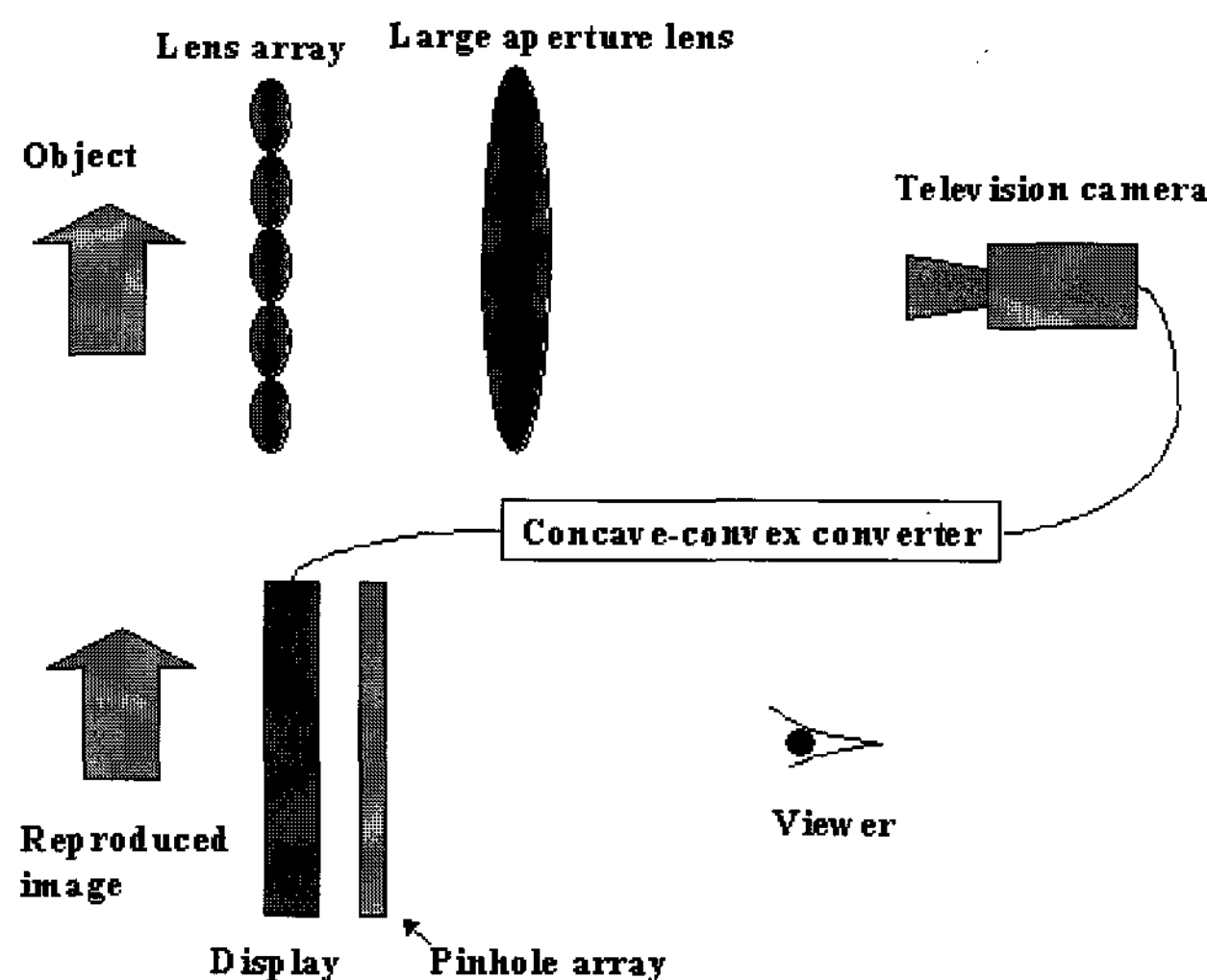
현재 집적영상을 중점적으로 연구하고 있는 연구 그룹은 NHK(일본), De Montfort 대학(영국), 서울대, University of Connecticut-부경대-강원대 등이며, 각 연구 그룹의 최근 연구 동향을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

II. 최근의 연구 동향

1. NHK(일본)

1997년 일본 NHK 연구소의 Okano 그룹은 기존의 필름 대신 CCD와 LCD 패널을 사용한 실시간 집적영상 시스템을 제안하였고 이를 실험적으로 검증하였다. Okano 등의 연구는 기존의 정지 영상에 대한 integral photography를 넘어 동영상의 디스플레이가 가능한 집적영상을 처음으로 제안하고 따라서 이의 입체 TV에의 응용 가능성을 입증했다는 점에서 큰 의미가 있다. [그림 2]는 Okano 그룹이 제시한 실시간 integral imaging 시스템의 개념도이다^[5].

집적영상 시스템에서 문제점 중의 하나는 기초 영상 사이의 간섭 현상이다. 3차원 물체를 렌즈 어레이를 통하여 촬영할 때 CCD상에서 각 기초 렌즈가 형성하는 기초 이미지들이 겹치는 현상이 발생하고 이들 겹친 기초 이미지는 디스플레이 단계에서 효과적으로 분리될 수 없어 결국 재생되는 입체 영상의 왜곡을 불러 일으킨다. 따라서 이러한 기초 영상들 간의 간섭을 제거해 주는 것이 필요하다. Okano 그룹은 이 문제에 대한 한 가지 해결책으로 1998년 복합 렌즈 어레이를 사용하는 방식과 graded index (GRIN) 렌즈 어레이를 사용하여 픽업하는 방식을 제안하였다. 이들이 제안한 복합 렌즈 어레이는 두 쌍의 렌즈 어레이와 그 사이를 잇는 광학적 장벽으로 이루어져 있다. 3차원 물체의 픽업 시 첫 번째 렌즈 어레이는 물체의 기초 영상을 형성하고 그 뒤에 위치한 두 번째 렌즈 어레이는 이들 기초 영상 각각을 180 회전시킨다. 이러한 기초 영상의 중심 대칭 이동은 재생되는 입체 영상의 pseudoscopic 현상을 제거하는 효과를



[그림 2] 실시간 집적영상 시스템

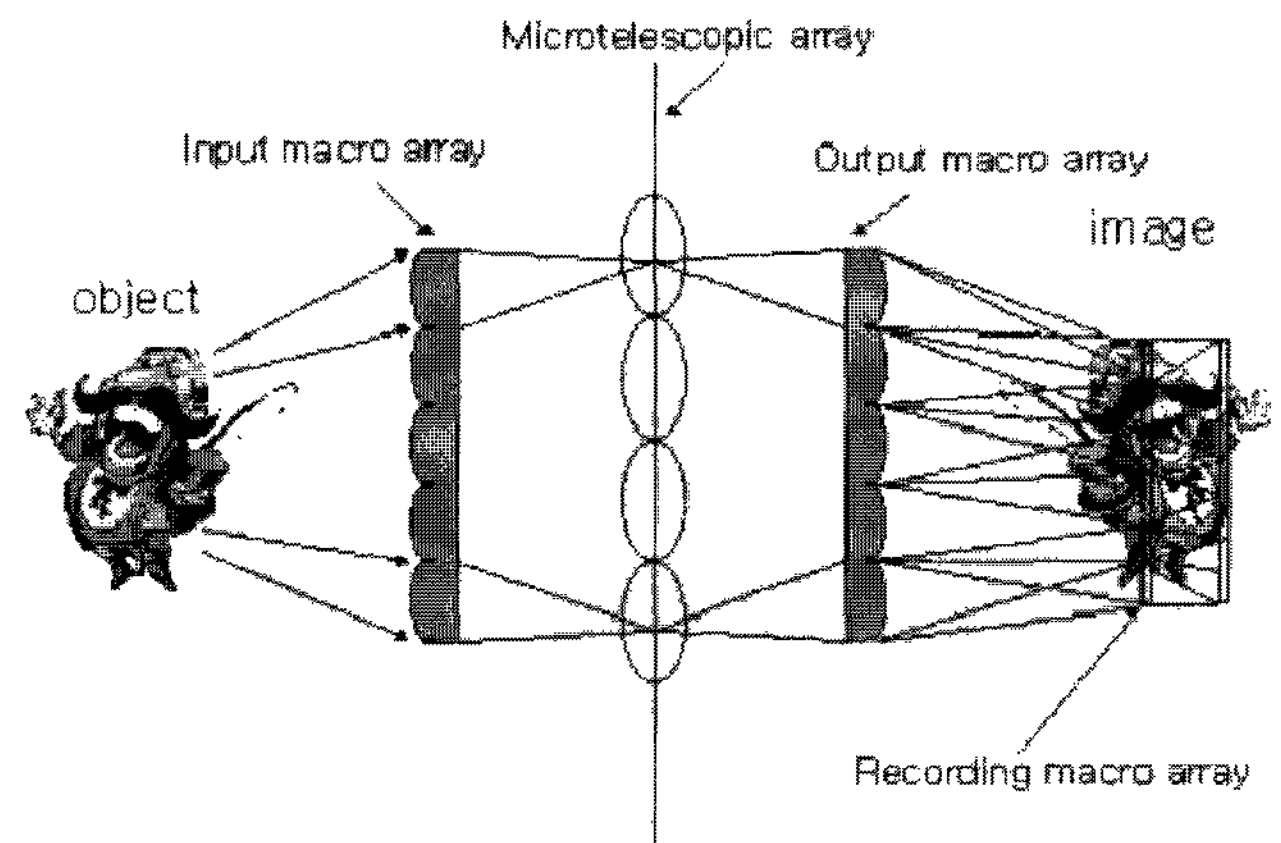
갖는다. 첫 번째 렌즈 어레이와 두 번째 렌즈 어레이를 연결하는 광학적 장벽은 각각의 기초 영상들이 서로 간섭하여 겹쳐지는 것을 방지한다. 이렇게 두 쌍의 렌즈 어레이와 광학적 장벽으로 이루어진 복합 렌즈 어레이는 하나의 GRIN 렌즈 어레이로 교체될 수 있다. GRIN 렌즈는 렌즈의 굴절률이 광축에서 가장 크고 광축에서 멀어질수록 점점 작아지는 특징을 갖는다. GRIN 렌즈의 길이를 적절히 조절함으로써 GRIN 렌즈 앞단에서 형성된 기초 영상들이 GRIN 렌즈 뒷단에서는 180 회전된 상태로 나오도록 할 수 있다. 또한 GRIN 렌즈 자체가 각 기초 영상 사이의 간섭을 효과적으로 제거한다. Okano 그룹은 이러한 GRIN 렌즈 어레이를 픽업부와 디스플레이부에서 사용하여 입체 영상을 재생할 수 있음을 실험을 통하여 증명하였다^[6].

2. De Montfort University (영국)

De Montfort 대학은 1980년대부터 집적영상 기술을 연구해 오고 있다. 1994년 이 그룹은 [그림 3]과 같은 '2단 광학적 결합(two-tier optical combination)'이라 이름 붙여진 광학계를 사용하여 재생되는 입체 영상의 pseudoscopic 현상을 제거하는 방식을 제안하였다. 이것은 NHK 그룹의 복합 렌즈 어레이 방식과 유사한 원리로서 두개의 동일한 렌즈 어레이로 afocal 시스템을 형성하여 각 기초영상의 원점 대칭 변환을 광학적으로 하는 방식이다. De Montfort 대학 그룹은 또한 보통의 렌즈 어레이 대신 작은 망원 렌즈로 이루어진 부분 렌즈 어레이(segment lens array)를 사용하여 높은 해상도의 집적영상을 얻었다. 이외에도 컴퓨터를 이용한 기초 영상 형성, 기초 영상의 압축, 기초 영상으로부터의 깊이 추출 등에도 연구를 계속하고 있다^[7].

3. 서울대학교

서울대학교의 본 필자의 연구실에서는 1999년부터 집적영상 기술을 활발히 연구해 오고 있다. 서울대학교에서는 기존에 실제 물체를 픽업하여 얻었던 기초 영상들을 효율적인 알고리즘을 통하여 컴퓨터로 형성함으로써 픽업과정을 생략

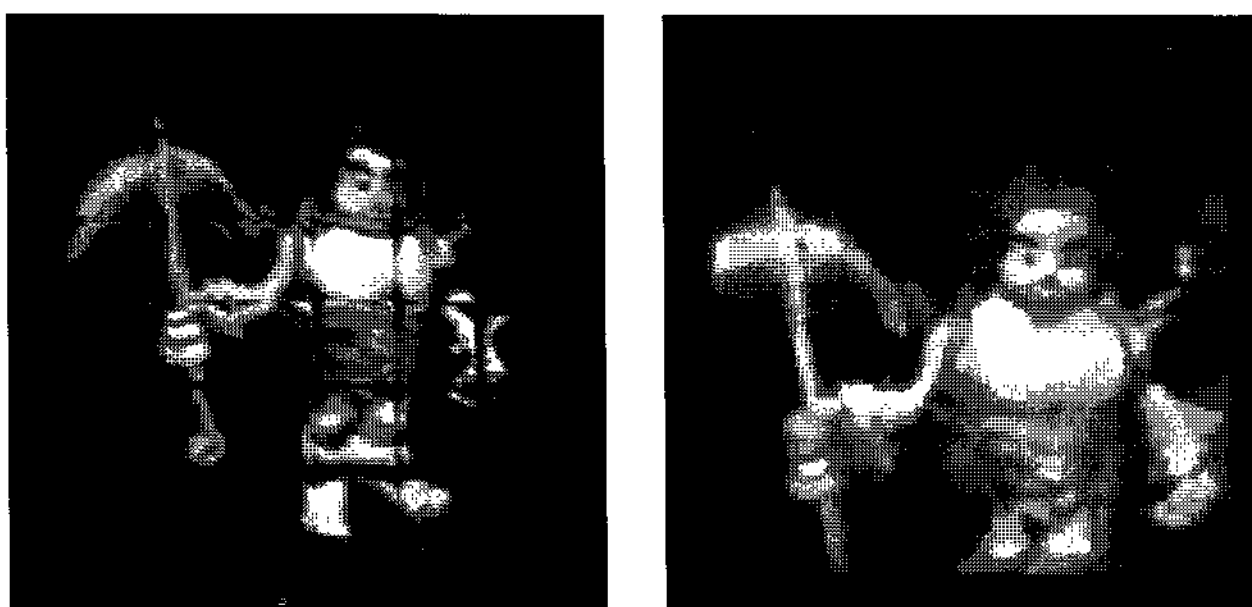


[그림 3] 2단 광학적 결합(two-tier optical combination)

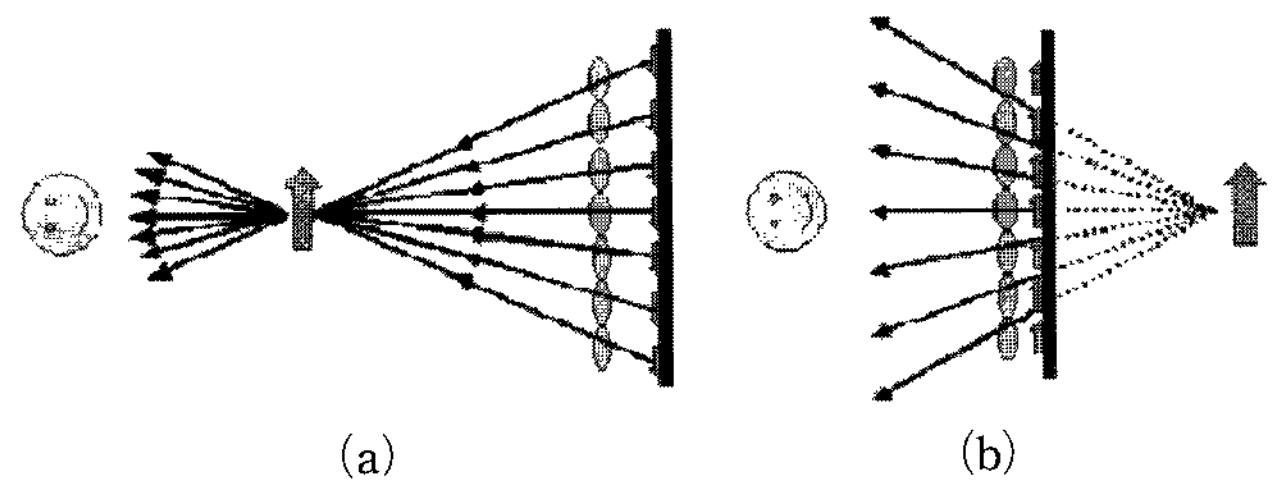
할 수 있는 computer-generated integral imaging(CGII)을 개발하고 이를 발표하였다^[8]. CGII을 통하여 기존의 3차원 콘텐츠를 그대로 기초 영상으로 변환하여 재생하거나, 혹은 여러 평면 이미지를 찍은 다음 서로 다른 깊이에서 재생하여 준 입체 영상을 형성할 수도 있다. 또한 컴퓨터로 재생할 입체 영상의 깊이를 임의로 조절할 수 있기 때문에 재생되는 입체 영상의 pseudoscopic 현상도 원천적으로 방지할 수 있다.

집적영상 기술에서 재생되는 입체 영상의 시야각은 사용하는 렌즈 어레이의 f-number에 반비례한다. 즉 렌즈 어레이를 이루는 각 기초 렌즈의 크기가 커질수록, 렌즈의 초점 거리가 작아질수록 재생되는 입체 영상의 시야각은 증가한다. 따라서 작은 f-number를 가지는 기초 렌즈로 이루어진 렌즈 어레이를 쓰는 것이 시야각의 관점에서 유리한데, 일반 구면 볼록 렌즈로는 그 f-number를 충분히 줄일 수 없다. 이것은 f-number가 줄어들수록 렌즈의 수차가 증가하기 때문인데 이러한 렌즈의 수차는 렌즈 어레이를 통하여 재생한 입체 영상의 렌즈 경계 부분에서의 왜곡으로 나타난다. 비구면 렌즈로 이루어진 렌즈 어레이를 사용하면 이 문제를 완화할 수도 있으나 일반적으로 비구면 렌즈는 그 비용이 비싸 실용적인 해결책이 되지 못한다. 서울대학교에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 일반 구면 렌즈 대신 프레넬(Fresnel) 렌즈로 이루어진 렌즈 어레이를 사용하는 방식을 제안하였다^[9]. 잘 설계된 프레넬 렌즈 어레이는 일반 구면 렌즈 어레이보다 작은 f-number를 가질 뿐만 아니라 그 수차도 훨씬 작다. 따라서 큰 시야각을 가진 integral imaging 시스템을 구성하는 데 효과적으로 사용될 수 있다. [그림 4]는 일반 구면 렌즈와 프레넬 렌즈로 이루어진 렌즈 어레이로 영상을 재생한 예를 보여주고 있다. 일반 구면 렌즈를 사용했을 때 보이는 렌즈 경계부분에서의 왜곡이 프레넬 렌즈 어레이를 사용했을 때는 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

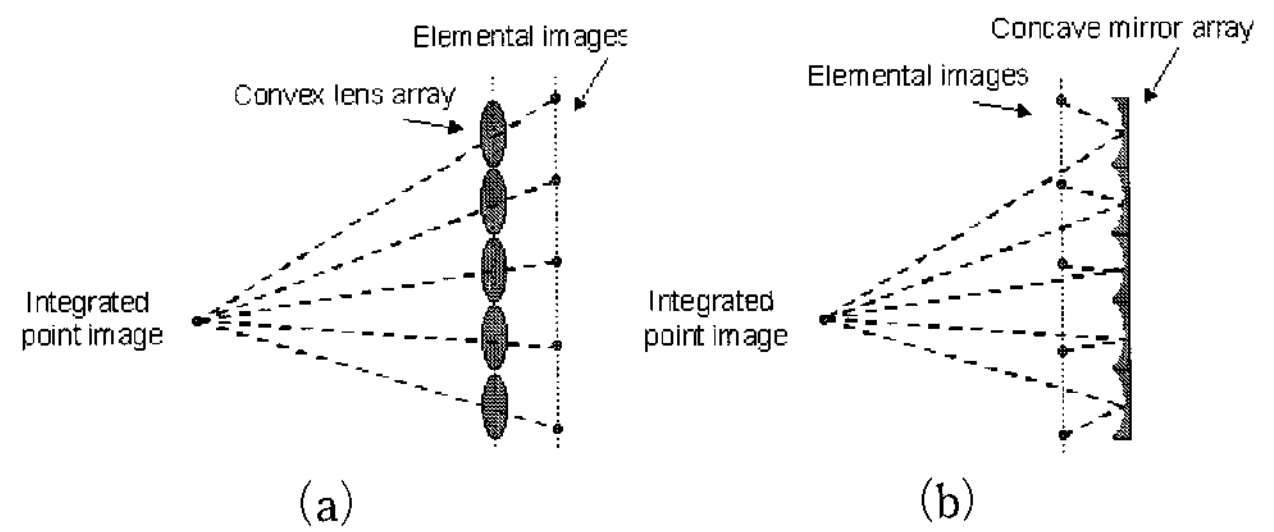
집적영상 시스템에서 영상이 재생되는 위치는 렌즈 어레이와 디스플레이 패널 사이의 간격에 따라 결정된다. 구체적으로 렌즈 어레이와 디스플레이 사이의 간격을 g , 렌즈 어레이의 초점 거리를 f 로 표시하면 집적영상의 중심 면과 렌즈 어레이 사이의 거리 L 은 $L = (g-f)/gf$ 와 같이 표시된다. 즉 영상은 렌즈 어레이로부터 L 만큼 떨어진 위치를 중



[그림 4] 일반 구면 렌즈 어레이(a)와 프레넬 렌즈 어레이(b)로 재생한 영상



[그림 5] (a) 실 집적 영상과 (b) 허 집적 영상



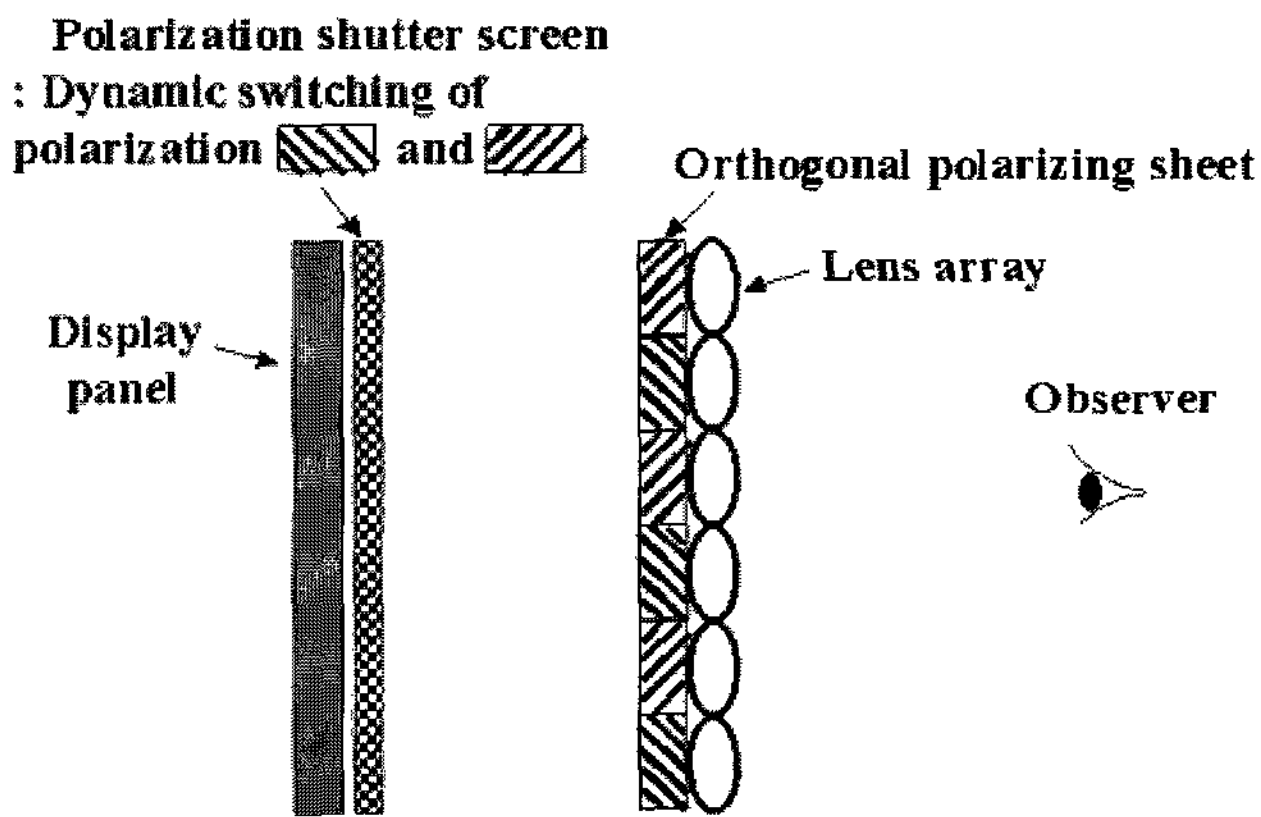
[그림 6] 집적 영상 방식 (a) 투과형 (b) 반사형

심으로 일정한 두께를 가지고 형성된다. 이때 L 이 양수이면 렌즈 어레이로부터 관측자 쪽에, L 이 음수이면 관측자 반대편에 집적 영상이 형성되고 이들을 각각 실 집적 영상, 허 집적 영상으로 부른다. [그림 5]는 실 집적 영상과 허 집적 영상의 개념을 보여준다. 디스플레이 패널과 렌즈 사이의 간격을 (또는 광경로를) 실시간으로 변화시키면 실 집적 영상과 허 집적 영상을 동시에 디스플레이 할 수 있다^[10].

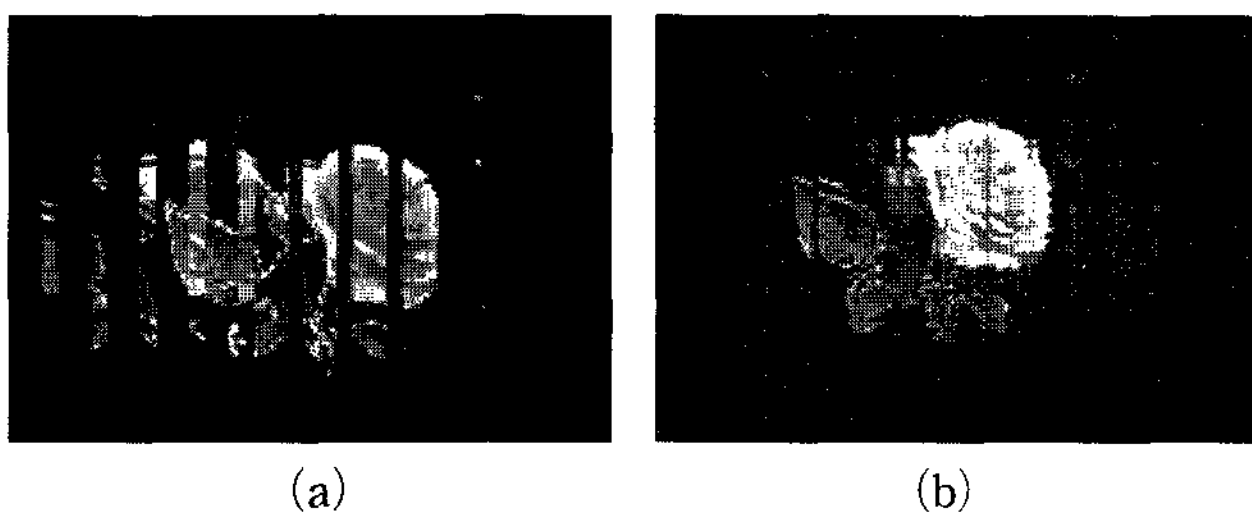
또한, 서울대학교에서는 반사형 집적영상 시스템을 제안하였다. 반사형 집적영상 시스템에서는 기존의 시스템의 구성에서의 볼록 렌즈 어레이가 오목 거울 어레이로 대체된다. 디스플레이 패널에서 나온 빛은 오목 거울 어레이에서 반사되고 집적되어 입체 영상을 형성한다. [그림 6]에는 반사형 집적영상 시스템이 기존의 투과형 시스템과 비교되어 도시되었다^[11]. 반사형 집적영상 시스템은 대화면의 프로젝션형 집적영상 시스템으로 이용될 수 있다.

시야각은 집적영상 기반 입체 영상 디스플레이에서 가장 중요한 파라미터 중의 하나이다. 집적영상 기술에서 시야각의 제한은 각 기초 렌즈에 할당되는 디스플레이 패널에서의 영역이 제한되기 때문에 발생한다. 각 기초 렌즈에 해당하는 디스플레이 패널에서의 영역을 넓히면 기초 영상이 해당 기초 렌즈가 아니라 인접한 다른 기초 렌즈를 통하여 재생되는 반복 영상 현상이 나타나기 때문에, 이를 피하기 위해서는 각 기초 렌즈에 해당하는 디스플레이 패널에서의 영역이 기초 렌즈와 같은 폭으로 제한된다. 이러한 시야각의 제한을 완화하기 위하여 1977년 Montebello는 디스플레이 패널로 사용되는 필름을 구부려 해당하는 디스플레이 패널의 영역을 효과적으로 늘리는 방식을 제안한 바도 있다.

서울대학교에서는 시야각의 향상을 위하여 기초 렌즈 스위칭 방식을 제안하였다^[12]. 이러한 렌즈 스위칭 방식의 실제 구현을 위해서는 동적으로 기초 렌즈를 개폐할 수 있는 마스크가 필요하다. 이러한 목적으로 액정 셔터가 가장 적합하다고 할 수 있으나 대화면에 적용하기 어려운 면이 있다.



[그림 7] 편광 스위칭 방식 개념도



[그림 8] (a) 기존의 집적영상으로 재생된 영상을 11도에서 관측 (b) 편광 스위칭 방식으로 재생된 영상을 11도에서 관측

서울대학교에서는 기계적 움직임 없이 실용적인 격열 방식 마스크를 만드는 것으로 편광 스위칭 방식을 제안하였다. [그림 7]은 편광 스위칭 방식의 개념을 보여준다.

편광 스위칭 방식은 [그림 7]과 같이 서로 직교하는 방향의 편광 시트를 한 열씩 이어붙인 편광 마스크를 렌즈 어레이 뒤에 위치시키고 디스플레이 패널 앞에 이 두 방향의 편광을 빠른 속도로 반복하는 편광 셔터를 장치하여 격열 방식 렌즈 스위칭을 실현하는 방식이다. 편광 필름을 통과하므로 광효율이 약 50% 정도로 떨어지는 단점이 있으나 기계적인 움직임 없이 실용적인 렌즈 스위칭을 실현할 수 있다는 장점이 있다. [그림 8]은 편광 스위칭 방식을 적용한 실험 결과로, 편광 스위칭 방식을 적용함으로써 집적영상의 시야각이 기존의 방식에 비해 향상되었음을 확인할 수 있다^[13].

이외에도 서울대학교에서는 위에서 살펴본 기술들과 더불어 최근 기초 렌즈들 사이에 동적 장벽을 설치하여 다중 시야 범위를 가지는 집적영상 시스템을 제안하였고, 또 렌즈 어레이와 디스플레이 패널 사이에 복굴절 물질을 삽입하여 깊이감을 향상시키는 집적영상 시스템을 발표하기도 하였다.^[14, 15]

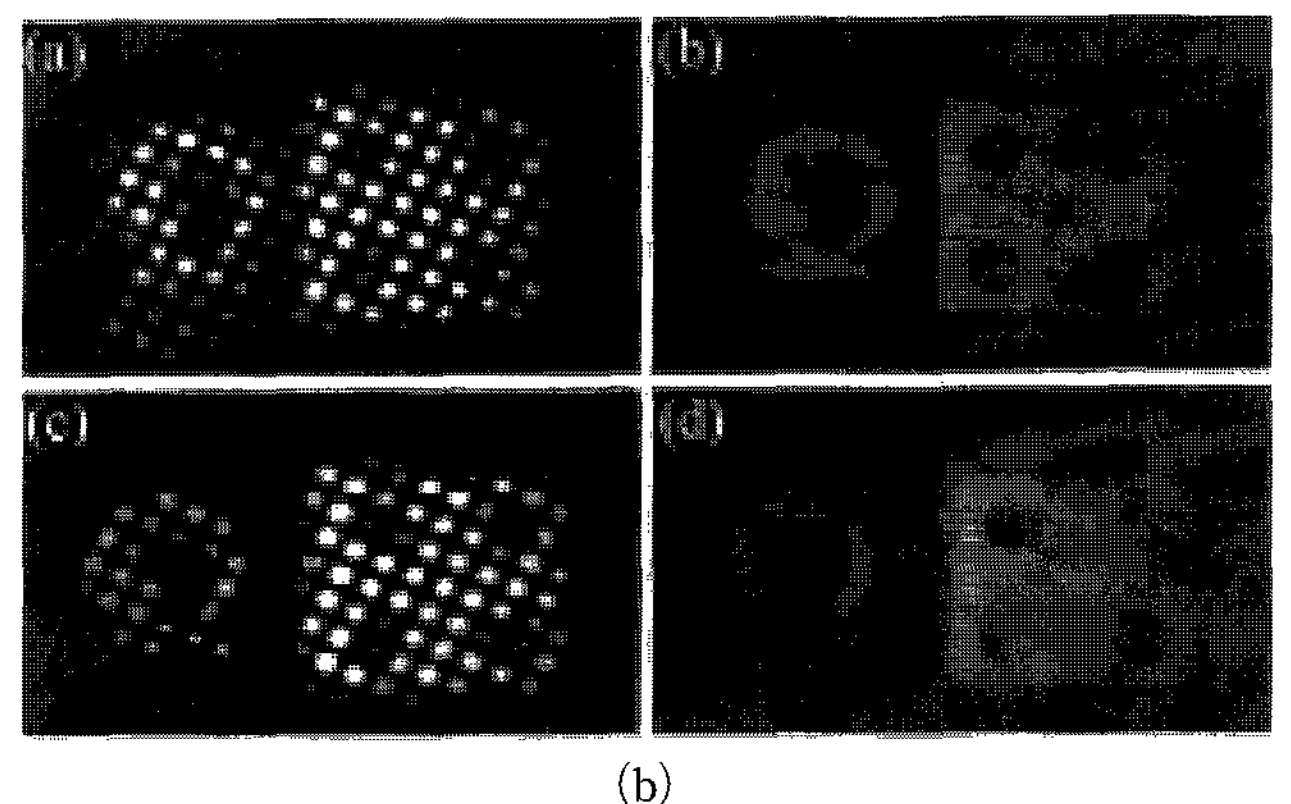
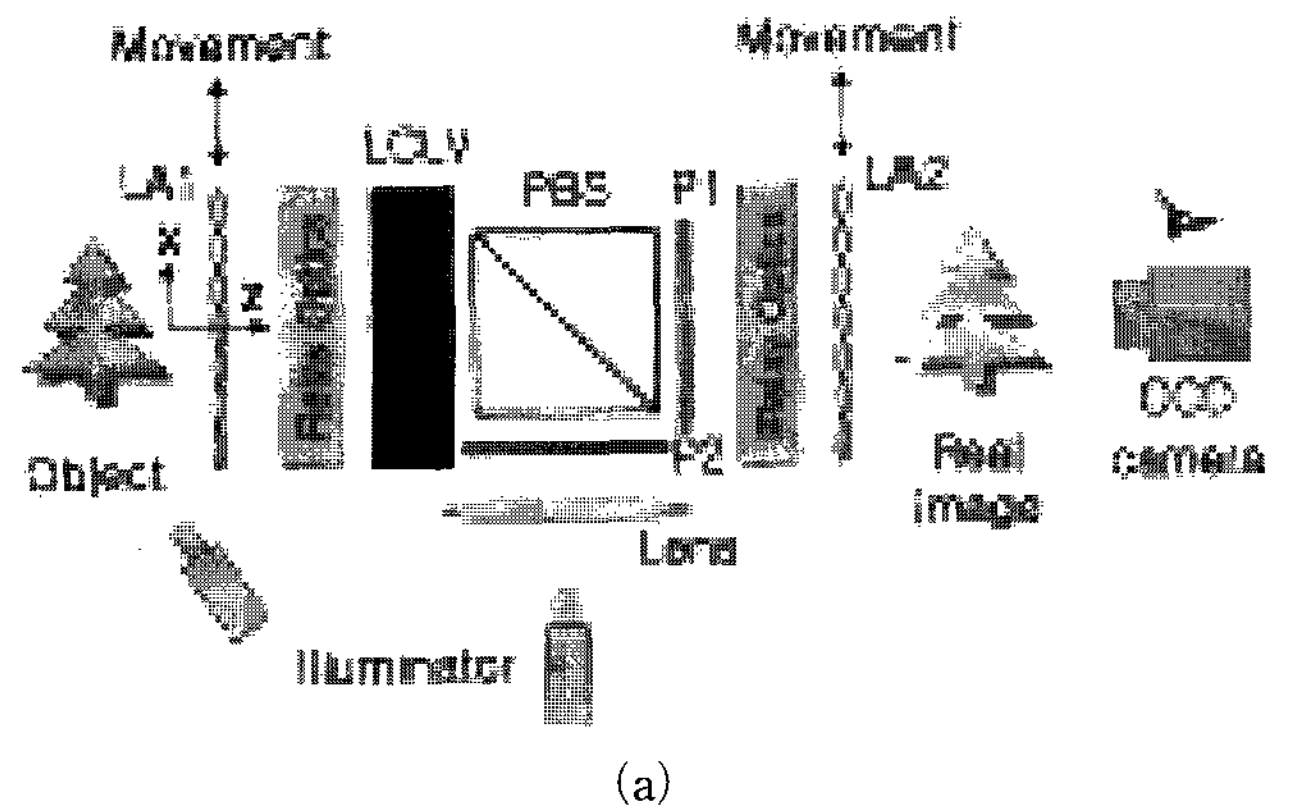
4. University of Connecticut(미국) - 부경대학교 - 강원대학교

최근 집적영상에 대한 관심이 커지면서 University of Connecticut에서 한국 및 일본의 연구자들과 공동으로 이

에 대한 연구를 시작하고 있다. 이 그룹은 2002년부터 연구 결과를 활발히 발표하고 있다. 일반적으로 집적영상 시스템에서 렌즈 어레이의 각 기초 렌즈 간의 경계선이 보여 영상의 해상도가 떨어뜨리는 단점이 있는데, 이 그룹에서는 렌즈 어레이를 수평으로 움직여 이러한 문제점을 해결하는 방식을 제안하였다^[16]. 기술의 개념은 [그림 9](a)에 나타나 있다. 물체의 픽업과 디스플레이 시에 렌즈 어레이를 동기시켜 움직임으로써 렌즈 간 경계선을 무디게 하여 해상도를 향상하게 된다. [그림 9](b)에 이 기술로 얻은 집적 영상의 예가 나타나 있다. 좌측의 영상들은 기존의 집적 영상, 우측의 영상들은 이 기술에 의한 집적 영상들을 보여준다.

한편, 2002년 강원대의 신승호 교수는 University of Connecticut과 함께 체적형 홀로그래피를 응용한 집적영상 시스템을 제안하였다. 이들은 집적영상에서의 시야각 제한이 디스플레이 시에 기초 영상에서 나오는 빛이 전 방향으로 퍼지기 때문임을 파악하고, 빛의 발산각이 픽업시의 각을 그대로 따르도록 기초 영상을 체적형 홀로그램 방식으로 광굴절 물질에 저장하는 방식을 제안하였다. [그림 10]은 그 개념도이다. 이러한 방식으로 약 2배의 시야각 향상 효과를 실험적으로 검증하였다^[17].

또한, 강원대에서는 최근 오목 렌즈 어레이를 픽업 과정에 이용하여 pseudoscopic 현상을 해결할 수 있는 집적영상 시스템을 제안하여 그 실험 결과를 발표한 바 있다.



[그림 9] (a) 렌즈를 수평으로 움직이는 기술의 개념도 (b) 이에 의한 실험 결과

- lens switching," *Stereoscopic Displays and Applications XIII*, Proc. SPIE 4660, San Jose, CA, USA, paper 4660-18, Jan. 2002.
- [13] 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.
- [14] H. Choi, S.-W. Min, S. Jung, J.-H. Park, and B. Lee, "Multiple-viewing-zone integral imaging using a dynamic barrier array for three-dimensional displays," *Optics Express*, vol. 11, no. 8, pp. 927-932, 2003.
- [15] J.-H. Park, S. Jung, H. Choi, and B. Lee, "Integral imaging with multiple image planes using a uniaxial crystal plate," *Optics Express*, vol. 11, no. 16, pp. 1862-1875, 2003.
- [16] J.-S. Jang and B. Javidi, "Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics," *Opt. Lett.*, vol. 27, pp. 324-326, 2002.
- [17] S.-H. Shin and B. Javidi, "Speckle reduced three-dimensional volume holographic display using integral imaging," *Appl. Opt.*, vol. 41, pp. 2644-2649, 2002.