

# 공간광변조기를 이용한 실시간 자유공간 광연결 구현

正會員 이 득 주\*, 강 봉 균\*, 김 남\*, 서 호 형\*\*

## Implementation of Real-time Free-space Optical Interconnection using Spatial Light Modulator

Deug-Ju Lee\*, Bong-Gyun Kang\*, Nam Kim\*, Ho-Hyung Suh\*\* *Regular Members*

### 요 약

단일 스테이지 스위칭 구조를 갖는 홀로그래픽 크로스바에 의한 동적인 자유공간 광연결을 실험하였다. 동적인 동작을 위해 전기적인 주소지정방식의 액정 공간광변조기와 회절격자가 매트릭스-매트릭스 크로스바에서의 고정적인 홀로그램을 대신하여 사용되었다. 회절격자는 규칙적인 셀들로 이루어졌으며 각 셀마다 서로 다른 위상 지연 정도를 갖는다. 이러한 화소형 위상격자 배열을 공간광변조기에 띄워 입력빔의 방향으로 편향시키거나 여러 빔으로 분리한 후 원하는 위치로 빔의 방향을 조종한다. 이러한 실험결과 컴퓨터와 공간광변조기, 위상형 회절격자를 이용하여 자유공간 광연결이 동적으로 수행됨을 보였다.

### ABSTRACT

Dynamic free-space optical interconnection system is experimented by a holographic crossbar with single-stage switching architecture. For dynamic operation, electrically addressed liquid-crystal spatial light modulator and diffraction gratings are used in place of passive holograms of matrix-matrix crossbar. Diffraction gratings are consisted of regular cells which have different phase delays. This pixelated phase grating array displayed on SLM(Spatial Light Modulator) deflects an input beam toward a wanted direction or splits an input beam into many beams and then steers them to desired positions. Through the experimental results, free-space optical interconnection is dynamically performed using a computer, SLM and phase diffraction gratings.

### I. 서 론

자유공간 광 스위치와 자유공간 광 연결은 컴퓨터와 통신 분야에서 많은 관심을 끌고 있다. 통신망의 전송 속도가 광섬유 전송에서의 발전 덕택으로 빠르게 증가했으므로, 망 노드에서 교차연결(cross-connect)과 스위칭 시스템은 100Gbps 이상의 매우 높은 처리량을

\*충북대학교 대학원 정보통신공학과  
\*\*한국전자통신연구원 기초기술연구부  
論文番號:97028-0122  
接受日字:1997年 1月 22日

필요로 했다. 비슷한 수요는 병렬 컴퓨터에서 프로세서만을 구성하는 다중채널 스위치의 연결에도 나타났다.<sup>11, 12, 13</sup> 일반적인 전기 스위치와 전기적인 연결은 평면적인 연결방법에 의한 한계에 달하고 있으며, 자유공간 광연결은 전자적인 연결보다 아주 많은 팬-인과 팬-아웃이 가능한 것으로 보고되었다.<sup>14, 15</sup> 3차원 자유공간 분할방식의 광연결은 도파로와 같은 고정적인 매체를 이용하지 않고 자유롭게 원하는 방향으로의 연결이 가능하며, 전기배선의 집적도 증대에 의한 전력 및 열 발생요소 증가, 전자파 잡음 증가에 따른 신호의 왜곡 등 전자회로에서의 난점을 극복할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 특히 3차원 연결로부터 얻어지는 높은 공간대역폭과 병렬처리의 가능성은 노드 수의 증가에 따른 시스템 성능의 한계를 초월할 수 있다.

1960년대 말과 1970년대 초 여러 가지의 CGH(Computer Generated Hologram)가 가상물체의 디스플레이, 공간필터, 광학 메모리, 박막(thin)의 광학 소자, 그리고 광 시험에서의 수차보상기와 같은 응용분야로부터 시작되었다. 최근에, CGH는 광컴퓨팅에서 복잡한 공간분별 자유공간 광연결을 제공하기에 적합하기 때문에 새롭게 인식되고 있다.<sup>16</sup> 자유공간 광연결 소자의 회절효율은 전력손실을 최소화시키기 위해 될 수 있는 대로 높아야 하며, 주기적인 이진위상 Lohmann형 홀로그램, 일반화된 Dammann격자, 또는 kinoform과 같이 위상형(phase-only) 회절격자가 사용된다. 또한 소자의 재구성 잡음은 신호대백색잡음비(SNR)를 낮아야 한다.<sup>17, 18</sup>

자유공간 광연결 방식의 하나인 일반적인 매트릭스-매트릭스 크로스바는 모든 입력이 모든 출력단으로 연결한 후 서터 배열로서 공간광변조기를 사용하여 원하지 않는 연결을 차단하는 방식의 단일 스테이지 스위칭 구조이다. 이러한 구조는 각각의 광 입력을 모든 출력단으로 수동적으로 연결하기 때문에 전체적인 연결 효율이 낮은 단점을 갖는다. 따라서 컴퓨터 발생 홀로그램을 사용한 홀로그래픽 크로스바가 제안되어 연구되고 있다. 홀로그래픽 크로스바는 SLM을 서터로 사용하는 대신에 컴퓨터 발생 홀로그램을 SLM에 디스플레이 시킨 뒤 푸리에 변환 렌즈로 기록된 홀로그램의 출력패턴을 얻어내는 방식이다.<sup>19, 10</sup>

광연결에 사용되는 프로그래머블 CGH를 구현하

는 방법 중의 하나는 컴퓨터 형성 방법에 의해 설계된 홀로그램을 SLM에 기록하는 것이다. 특히, 액정공간광변조기(LC-SLM)는 낮은 전압에서 동작하고 낮은 전력소비, 매트릭스 주소지정 능력 등 때문에 매우 적합하다. 최근 상업적으로 유용한 트위스티드 네마틱(twisted nematic: TN) 액정 디스플레이 소자가 사용된 프로그래머블 CGH가 보고되었다. TN 모드에서 진폭과 위상 변조 모두가 동시에 발생하므로, TN-LC 소자는 위상만 있는 변조기로 사용할 수 없다. 위상만 있는 변조를 얻기 위해서는, 인가 전압이 진폭변조의 문턱전압 이하에서 한정되는 일정한 진폭변조의 범위를 유지해야 한다. 위상변조의 깊이가  $2\pi$ 이내인 한계 때문에, 일반적인 위상만을 갖는 CGH는 진폭의 일정한 크기를 갖는 0에서  $\pi$ 까지의 안정한 상태의 이진 양자화를 요구하며 높은 양자화 잡음을 갖는다. 반면, 진폭형 CGH를 기록할 때는, 인가전압에 의해 투과 선형성을 사용해서 양자화 잡음을 줄일 수 있음에도 불구하고 낮은 광 투과효율의 문제가 남는다.<sup>11, 12, 13</sup>

본 논문에서는 능동적인 자유공간 광연결에 대한 실험을 하기 위해 필요한 위상형 회절격자에 대한 실험 및 제작과 홀로그래픽 크로스바에 대한 내용, 광연결 실험에 대한 방법과 결과를 제시한다. 회절격자는 규칙적인 크기의 셀들로 구성된 화소형 구조를 통해 제작방법을 통해 위상 격자의 특성을 제시하고 이를 이용한 홀로그래픽 크로스바 구조의 광연결 장치를 구성하여 능동적인 자유공간 광연결 장치의 동작을 실험한다.

## II. 자유공간 광연결의 구조 및 응용

현재의 초고속 신호처리를 위한 전자시스템은 점차로 늘어나는 처리 요구속도의 향상으로 인해 클럭스피드와 전자회로의 복잡도가 크게 가속화되고 있으며, 어느 부분에서는 전자회로가 갖는 물리적 한계에 직면하고 있다. 특히 전자신호 연결에 있어서 야기되는 문제점들은 클럭 및 신호지연(clock and signal skew), 전지배선의 축전용량 증가로 인한 전력소모, 전력소모와 집적도 증가로 인한 열 발생, 전자파 잡음에 의한 신호왜곡(signal distortion), 신호 전파속도 지연에 의한 신호지연(signal latency) 등이 대

표적으로 지적되고 있다.

이러한 문제들로부터 야기되는 전자 신호처리계의 한계를 극복하기 위해 새로운 신호연결 또는 배선기술 및 실장기술(packaging technology)의 도입이 크게 요구되고 있으며, 광연결(optical interconnects) 및 이를 이용한 광전 집적회로(opto-electronic integrated circuits)로의 실장기술 등이 초고속 신호처리를 위한 핵심기술로 활발히 연구되고 있다.

광연결 방식을 이용한 초고속 신호처리계의 장점으로는 낮은 전력소모, 열발생 감소로 인한 높은 연결신호 집적도, 보다 쉬운 임피던스 정합에 의한 적은 신호왜곡도, 신호지연 최소화 등이 있다. 또한 3차원 연결의 잇점으로 부터 얻어지는 높은 공간대역폭, 물리적 접속부분의 감소로 인한 높은 시스템 신뢰도, 신호배선의 부품 소모량 감소로 인한 시스템 구성비용의 절감 등이 장점이며 이러한 광연결 방식의 물리적 특성은 보다 높은 초고속 및 고집적도의 신호처리계를 가능하게 해 주는 핵심 요소기술이 되고 있다. 반면에, 광연결 방식의 근본적인 어려움 또는 한계점들은 실장기술 및 정렬 안정도, 광전소자의 신뢰도 및 상대적 비용, 광배선망의 복잡화에 따라 증가하는 광에너지 손실 등이 있다. 이러한 광연결 방식의 문제점들은 이미 상당 부분 해결되고 있으며 핵심기반 기술로 널리 사용될 전망이다.

따라서, 초고속 신호처리를 위한 전자신호연결 방식과 광신호연결 방식 간에는 서로 간에 상호보완 또는 각각이 우수한 특성을 갖는 영역이 있다고 할 수 있다. 즉, 처리하고자 하는 신호의 시간대역폭(temporal bandwidth)과 신호연결의 집적도(signal connection density), 그리고 배선길이에 따라 각각이 우수한 특성을 보이는 영역으로 구분할 수 있기 때문에 구현하고자 하는 초고속 신호처리계의 요구특성에 따라 신호연결 방식을 구분해서 적용할 수 있게 된다.

자유공간 광연결 구조로는 다단계 연결망(multistage interconnection network)을 예로 들 수 있는데, 이것은 1차원 또는 2차원 배열의 스위칭 노드(node)들로 구성된 하나의 단계를 이웃하는 여러개의 단계들과 순차적으로 연결하여, 입력신호를 원하는 위치의 출력채널로 보내 주는 망구조를 말한다. 다단계 연결망은 병렬처리를 위한 구조로 많이 연구되어 있으며, 기존의 전자회로에서도 스위칭 망구조로서 많은 연

구가 이루어져 왔다. 2차원 다단계 연결망의 경우를 예로 들어보면, 단계들 간의 연결(link)구조에 따라 완전섞이기(perfect shuffle)에서 Banyan 형태까지 많은 기본구조를 갖는데, 공간적인 신호분배 성질에 따라, 공간 분할 스위칭(space division switching)망이라고도 한다. 입출력 채널들의 배열이 1차원인 경우는 2차원 다단계 연결망이 되며, 이들을 공간적으로 확대하여 여러층으로 중첩시킨 형태를 3차원 다단계 연결망 혹은 자유공간 분할 스위칭(free-space division switching)망이라 분류하고 있다.

공간 분할 스위칭망은 서로가 동일한 기능을 수행하는 구조적 동질성(topological equivalence)을 갖는다. 즉, 어느 한 공간 분할 스위칭망 구조에서 각 단계에 있는 노드들의 위치를 재배열하면, 다른 형태의 공간 분할 스위칭망으로 변환될 수 있다. 따라서 초고속 공간 분할 스위칭 광연결망을 구현코자하는 경우 요구되는 시스템 구조 또는 효율에 따라 적당한 공간 분할 스위칭 구조를 선택하면 된다. 이러한 다단계 연결망 구조에서 보면, 각 스위칭 노드들은 2개의 입력단과 2개의 출력단만을 갖는다. 따라서, 기존의 광스위칭 소자 등으로 구현될 수 있으며, 광연결망 하드웨어의 복잡성을 크게 줄일 수 있다.

그림 1은 자유공간 교체 연결(free-space permutation interconnect)의 원리를 보여준다. 자유공간 광시스템 S는 소스 배열 A를 목적 배열 A'로 연결하고 그렇게 하므로써 원하는 연결 패턴에 따라 단일 데이터 채널의 순서를 변화시킨다. 광시스템 입력소자 C와 출력

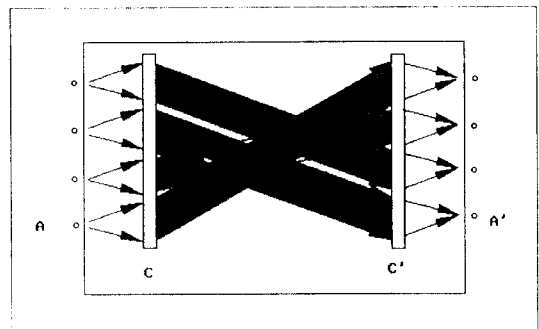


그림 1. 자유공간 교체연결의 원리  
Fig. 1 The principle of free-space permutation interconnection

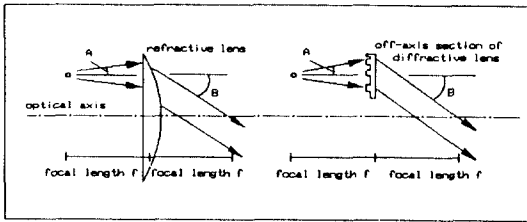


그림 2. 비축환경을 수행하기 위한 굴절렌즈와 회절격자  
Fig. 2 The refractive lens and diffractive lens for off-axis

소자 C'로 구성된다. 배열 소자 C와 C'는 입력과 출력의 배열의 크기에 맞게 만들어진다. 소자 C는 단일 소스로부터 나오는 발산광을 평행광으로 만들어 각각을 대응하는 목적지를 향해 편향시킨다. 그리고 C'는 빔의 방향을 출력 방향으로 바꾸어 각 소자에 연결하도록 초점을 맞추는 역할을 수행한다.

입력소자 C와 출력소자 C'의 역할을 수행하기 위해 단일 렌즈형태나 미소 격자배열 형태일 수 있다. 그림 2에서와 같이 비축(off-axis)환경에 이용되는 미소 렌즈(lenslet)는 평행광을 만드는 동시에 편향한다. 하지만 커다란 개구면 수치(numerical aperture)가 비축 형태로 제공되어야만 한다. 축상(on-axis)형태에서 렌즈의 개구면 수치를 광원의 수렴각의 반인 A로 연결시킨다. 하지만 비축형태로 렌즈를 이용하고자 한다면 원하는 편향각 B로 NA를 증가시켜야만 한다. 즉  $NA \approx A + B$ 이다. 개념적인 간단함에도 불구하고 높은 NA의 요구로 단일 렌즈의 사용은 어렵게 된다. 따라서 그림 3과 같은 형태의 미소 격자의 배열을 이

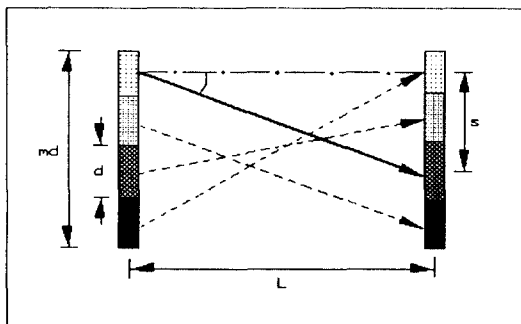


그림 3.  $m \times m$  채널을 연결하는 자유공간 교체연결  
Fig. 3 Free-space permutation interconnecting  $m \times m$  channels

용할 수 있을 것이다.

그림 4는 낮은 전력손실로 많은 유용한 연결패턴을 제공할 수 있는 매우 간단한 광학 소자들의 배치도를 보여주고 있다. 이러한 배치는 필요한 빔방향을 조종하는 역할을 행하는 두 개의 이미지 렌즈 사이에 있는 동공(pupil)평면에 삽입된 격자(diffractive hologram)로 구성된 이미지 시스템을 기본원리로 한다. 주기적인 격자 구조의 변화로 인해 원래의 빔으로부터 나온 다른 광전력의 양을 출력 이미지 평면의 다른 점으로 회절시킨다. 그림 4의 격자는 각각의 입력 빔을 출력 이미지 평면의 세 점으로 가게 한다. 만일 그림 4에서 빔의 일부가 차단된다면 그림 5와 같은 Banyan망의 연결에 사용될 수 있다. 그리고 이러한 소자는 곧바로 2차원에서 3차원으로의 확장이 가능하다.

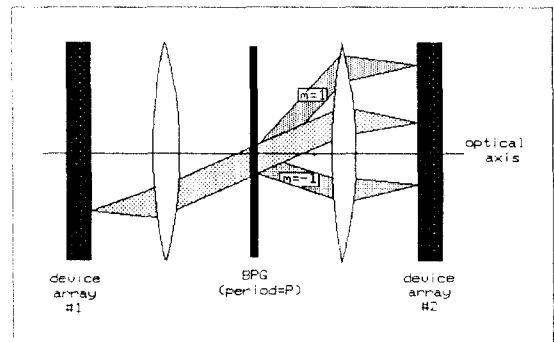


그림 4. 이진 위상격자에 바탕을 둔 광연결  
Fig. 4 Optical interconnection based on binary phase grating

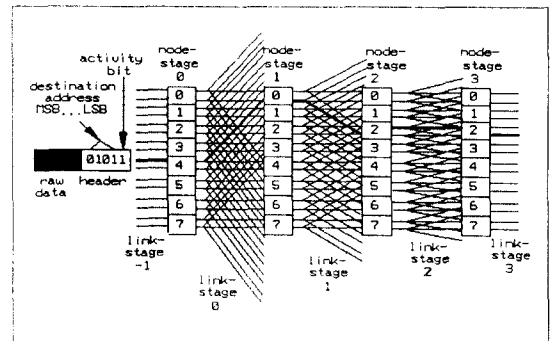


그림 5.  $1 \times 3$  이진 위상격자에 의한 Banyan 연결  
Fig. 5 Banyan interconnection by  $1 \times 3$  binary phase grating

### Ⅲ. 능동적인 자유공간 광연결

#### 3.1 홀로그래픽 크로스바

자유공간 광연결은 3차원 공간을 연결경로로 이용할 수 있기 때문에 아주 많은 입출력이 가능하다. 일반적인 매트릭스-매트릭스 크로스바는 단일 스테이지 구조로 매우 효과적인 광연결을 수행할 수 있다. 이 구조는 그림 6에서 보여진 것과 같이 모든 입력이 모든 출력으로 연결되어 원하지 않는 연결을 서터 배열로서 보편적으로 공간광변조기를 이용하여 차단한다. 따라서 각각의 입력이 모든 출력으로 연결되는 비능률적인 구조를 하고 있으므로 수동적인 홀로그래프와 서터배열은 입력 빔의 경로를 바꾸어주는 프로그래머블 홀로그래프로 대체될 수 있다. 그림 7에서와 같이 입력 빔의 경로를 바꾸어주는 홀로그래프를 제작하여 놓고 교체하면 모든 입력이 출력으로 연결되는 단점을 보완할 수 있어 매우 높은 광 효율을 얻

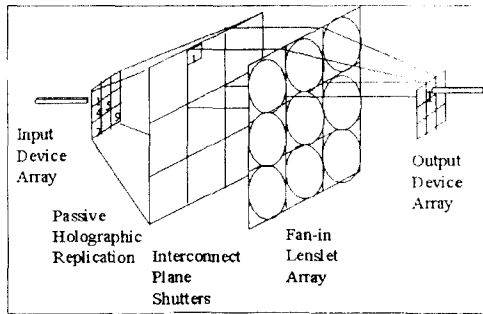


그림 6. 일반적인 매트릭스-매트릭스 크로스바  
Fig. 6 The general matrix-matrix crossbar

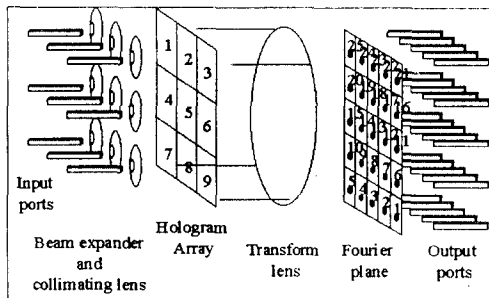


그림 7. 홀로그래픽 크로스바  
Fig. 7 Holographic crossbar

을 수 있다. 그러나 그림 7과 같은 홀로그래픽 크로스바는 수동적인 조작을 해야 하므로 홀로그래프를 SLM에 기록하여 푸리에 변환하는 구조가 연구되었다.

#### 3.2 능동적인 자유공간 광연결 장치

위상보드에서 전기적으로 주소지정되어 동작하는 SLM은 서터평면에서 사용될 수 있는 고속의 스위칭 소자로 적합하므로, 능동적인 홀로그래픽 크로스바가 MPG(Multi-Phase Grating)와 SLM을 사용하여 제작될 수 있다. 격자는 앞에서 설명한 바와 같이 하나의 입력 빔을 원하는 방향으로 편향시키거나 같은 세기의 여러 빔으로 분리한 후 방향을 지정할 수 있기 때문에 특히 MPG를 이용한 시스템의 구현은 가장 효율적인 광연결을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 8에서, SLM 내의 각 자유경(routing) 영역은 고속으로 접근 가능한 메모리에 저장되어 있는 기본 격자들 중의 하나로 채워진다. 그리고 각각의 격자는 그림 9와 같은 배열로 배치되어 독립적인 위상형 회절격자로서 작용하여 서로간의 출력결과에 영향을 주지 않게 된다.

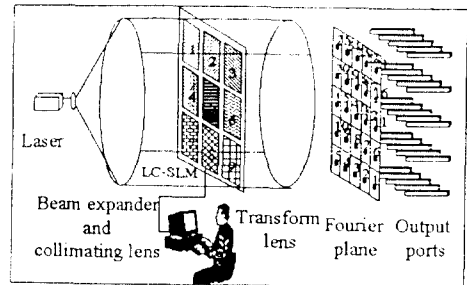


그림 8. 능동적인 자유공간 광연결을 위한 실험 방법  
Fig. 8 Experimental setup for dynamic free-space optical interconnection

#### 3.3 광학적 실험방법

그림 7에서와 같이 입력 포트는 3×3이고 출력 포트는 5×5인 크로스바에서 입력단을 단순화시켜 그림 8과 같은 장치를 설치한다. 빔을 확장하고 평행광으로 만들어주는 작은 렌즈는 자체적인 제작이 어려워 3×3의 격자 배열의 위치에 평행광을 조사하고 SLM에 격자 정보의 기록 유무로 광연결을 실험한다.

격자 정보가 기록되지 않는 부분에도 빛이 통과하지만 조사되는 광량을 줄이면 라우팅 영역으로 분산된 부분과 회절되어 집광된 부분의 세기 차에 의해 격자 정보가 기록되지 않은 여역으로 인한 영향을 무시할 수 있게 된다. 출력 결과는 CCD 카메라를 푸리에 평면 위치에 놓고 SLM에 기록되는 격자 정보를 컴퓨터에서 변화시키며 촬영한다. 실험은 입력 빔의 경로를 변경시켜 1 대 1 연결과 1 대 N 연결에 대한 내용을 수행한다.

실험에 사용되는 SLM은 Epson TFT-LCD로 화소 수  $640 \times 480$ , 화소 크기  $42\mu\text{m} \times 42\mu\text{m}$ , 투과면적  $21\mu\text{m} \times 21\mu\text{m}$ , 투과효율 25%인 특성을 가지고 있다. SLM은 입력되는 신호의 크기에 따라 위상지연 특성을 가지므로 1과 255의 입력 값에 대해 위상지연 특성을 파악하는 것이 중요하다.

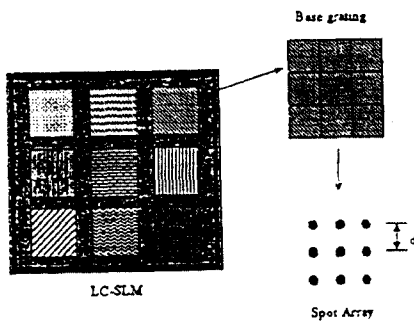


그림 9. SLM에 기록되는 회절격자의 배치도  
Fig. 9 The arrangement of diffraction gratings displayed on SLM

#### IV. 자유공간 광연결의 실험 및 제작

##### 4.1 SLM을 이용한 실험

액정 공간광변조기(LC-SLM)는 입력되는 신호의 크기에 따라 위상지연 특성을 가질 수 있다. 0과 255의 입력값에 대해  $\pi$ 에 가까운 위상지연 특성을 띠는 격자 정보를 SLM에 디스플레이 시킨 후 평행광으로 만들어진 레이저 광원에 의해 조사되며, 회절되어 분리된 빔들이 푸리에 변환 렌즈를 거쳐 푸리에 평면에 맺힌다. 그림 10은 공간광변조기를 이용한 실험장치로서 SLM은 컴퓨터와 연결되어 있어 컴퓨터에서 설계된 격자가 SLM 제어를 통해 화소 하나당 1바이

트 정보로 전송되어 SLM에 위상변화로 나타나게 된다. 이 때 컴퓨터에서 설계된 격자는 컴퓨터 그래픽 카드가 지원하는 해상도로 표현되지만 SLM 제어기로 전달될 때 NTSC나 PAL 방식의 신호로 변환되어 SLM이 제공하는 해상도로 전환된다. 대부분 SLM이 제공하는 해상도는 컴퓨터가 제공하는 해상도보다 낮기때문에 SLM에 의해 표현된 격자패턴은 컴퓨터에서 전송된 정보와 정확히 일치하지는 않는다.

SLM을 이용한 광학 시스템은 SLM의 좌우에 볼록 렌즈가 두 개 필요하다. 앞단의 렌즈는 평행광을 만들기 위한 것이고 뒷단의 렌즈는 Fourier 변환을 수행하며 초점거리만큼 떨어진 위치에 스크린을 놓고 회절빔들을 카메라로 찍기 위해 필수적이다. 그림 10과 같은 장치에서, 편광자(polarizer)가 추가될 수 있으며 중앙(DC) 스폿을 차단하기 위한 방법이 도입될 수 있다. SLM은 그 자체의 구조 특성상 정해진 회절패턴을 발생시키기 때문에 SLM의 위상변화와는 무관하게 회절패턴의 중앙에 강한 회절빔이 남게 된다. DC 스폿은 전체 패턴의 균일도를 떨어뜨릴 뿐만아니라 다른 회절차들의 효율을 감소시키는 효과를 낳는다. 따라서 DC 스폿은 제거되는 것이 바람직하며 편광자는 DC 스폿의 세기를 상대적으로 크게 감소시키는 효과를 낳는다. 편광자는 DC 스폿의 영향을 상대적으로 크게 줄여주는 반면 전체적인 효율을 감소시키기도 한다.

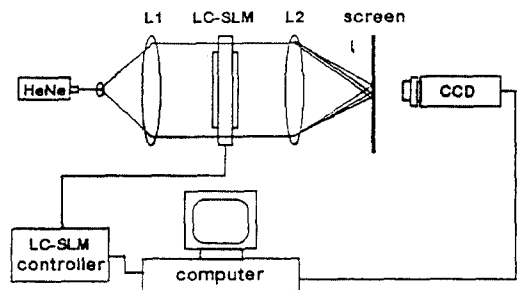


그림 10. SLM을 이용한 빔 패턴 발생장치  
Fig. 10 Beam pattern generation system using SLM

##### 4.2 실험 결과 및 고찰

능동적인 자유공간의 광routing 시스템을 구현하기 위한 연결장치는 LC-SLM, IBM-PC, 그리고 푸리에

변환 렌즈로 실험된다. 입력가능 포트는 3×3이고 출력가능 포트는 5×5이다. 각 기본 격자는 0에서 2π사이의 이산적인 위상 지면을 갖는 32×32 셀들로 구분된 화소형 구조로 디자인된다. 그림 11는 격자의 출력 예로서, 격자에 의해 출력평면 임의의 위치에 입력빔을 편향시킨 것들이다. 이렇게 각각의 격자에 의해 편향된 결과들이 중첩되어 입력단과 출력단을 연결하거나 스위칭할 수 있다.

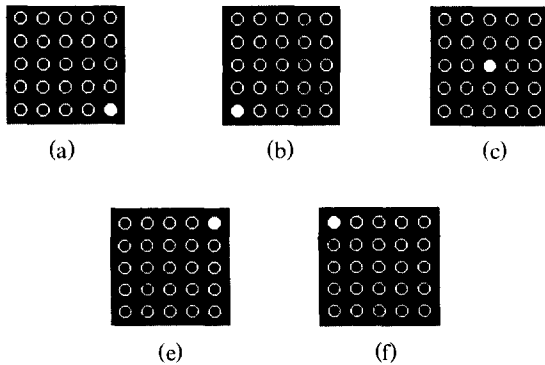


그림 11. 빔 경로 변경을 위한 각 격자의 출력 결과  
(a)출력포트 1 (b)출력포트 5 (c)출력포트 13  
(d)출력포트 21 (e)출력포트 25

Fig. 11 Each output pattern of gratings for deflection  
(a)Output port 1 (b)Output port 5 (c)Output port 13  
(d)Output port 21 (e)Output port 25



그림 12. SLM에 디스플레이된 격자 배열과 출력평면에서의 연결 결과 (a)스위칭을 위한 격자배열  
(b)실험결과(출력포트 1, 3, 13, 21, 25)

Fig. 12 Grating array displayed on SLM and an image of output plane for interconnection  
(a)BPG array for switching  
(b)Experimental result(output ports 1, 3, 13, 21, 25)

그림 12는 광연결의 실험결과를 보여주고 있다. 그림 12(a)는 9개의 입력 포트에 대한 라우팅 영역 중 1, 3, 5, 7, 9번에만 입력빔이 있다고 가정하였을 경우의 예이다. 5개의 격자를 SLM에 디스플레이 시키고 그림 8과 같이 실험하여 얻어진 결과가 그림 12(b)이다. 그림 12(a)에서 원하는 출력방향이 변경되거나 입력단에 변화가 있을 경우는 컴퓨터에 저장되어 있는 기본 격자의 번호를 입력하여 스위칭이 이루어짐을 확인하였다. 그림 12(b)는 CCD를 출력평면에 위치시켜 기록한 것으로, 푸리에 평면에 맺혀진 스폿들이 너무 작기 때문에 CCD의 렌즈부분을 제거하고 오목렌즈로 확대한 후 촬영하였다. 입력단과 출력 포트의 관계는 1→1, 3→5, 5→13, 7→21, 9→25이다. 이것은 격자의 편향특성만을 이용하여 광스위칭을 실험한 것이다.



그림 13. 빔 분리와 라우팅을 위한 실험결과  
(a)입력빔을 두 개로 분리하는 격자배열  
(b)출력포트 1, 2, 6, 9, 11, 15, 17, 18

Fig. 13 Experimental result for beam split and routing  
(a)Grating array splitting away two input beam  
(b)Output ports 1, 2, 6, 9, 11, 15, 17 and 18

그림 13은 임의의 빔 분리와 방향조종이 동시에 이루어진 것으로, 그림 13(a)에 보여진 격자들은 각각 하나의 빔을 두 개로 분리한다. 분리된 빔은 연결을 원하는 방향으로 스위칭되며 격자 상호간의 영향은 없으며, SLM의 화소 크기가 작지 않기 때문에 렌즈의 수차가 발생하여 출력면의 빔들 간 거리를 약간 불규칙하게 만들고 있다. 입력단과 출력 포트의 연결 상태는 1→(1, 2), 3→(6, 15), 7→(9, 17), 9→(11, 18)이다. 각 격자는 입력빔을 모든 출력 포트에 연결하는 수만큼 분리 가능하지만 주변의 잡음의 영향을 고려할 때 4~5개의 빔으로 분리하고 연결하는 것이 좋을 것으로 판단되며 이러한 실험도 행하여졌다.

그림 14는 하나의 입력빔이 경로 방향만 바뀌어 원하는 경로로 연결된 결과를 보여주고 있으며 연속적으로 입력빔의 수를 늘려가며 실험한 것이다. 그림 14(a), (b)는 SLM에 디스플레이된 격자 배열 3, 4, 6, 7에 의해 출력 포트 4, 12, 14, 22에 광연결이 이루어진 결과를 보여주고 있으며, 그림 14(c), (d)는 입력단 9에 입력이 추가되고 출력포트 24로 연결되었다. 그림 14(e), (f)는 하나의 입력이 더 추가되어 입력단 1로 들어온 빔이 출력 포트 2로 연결되고, 마지막으로 그림 14(g), (h)에서는 아홉 개의 입력단 모두에 입력이 행해져 출력 포트 1, 3, 5, 11, 13, 15, 21, 23, 25로 광연결이 이루어짐으로써 입사빔이 방향만 변경되어 임의의 출력단으로 연결되는 결과를 보여주고 있다.

그림 15는 하나의 입력빔이 세 개의 빔으로 분리되어 각각 원하는 출력포트로 연결된 결과를 보여주고 있으며 또한 연속적으로 입력빔의 수를 늘려가며 실험한 것이다.

그림 15(a), (b)는 빔 분리와 라우팅이 입력단 1, 2

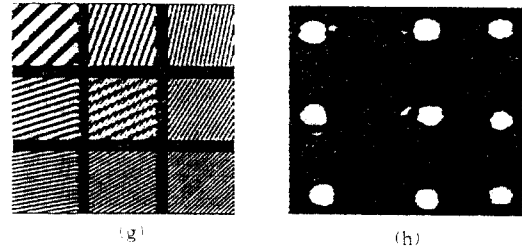
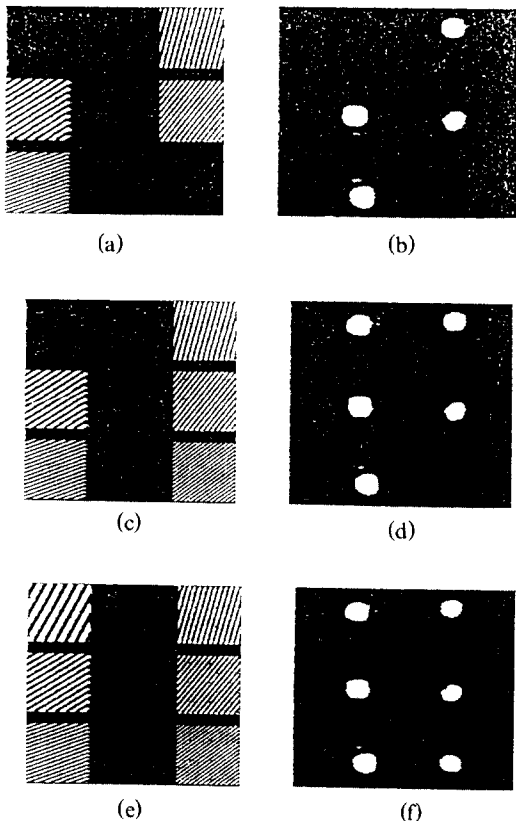


그림 14. SLM에 디스플레이된 격자 배열과 출력평면에서의 연결결과

- (a) 4개의 격자배열입력
- (b) 포트 4, 12, 14, 22 출력결과
- (c) 5개의 격자배열입력
- (d) 포트 4, 12, 14, 22, 24 출력결과
- (e) 6개의 격자배열입력
- (f) 포트 2, 4, 12, 14, 22, 24 출력결과
- (g) 9개의 격자배열입력
- (h) 포트 1, 3, 5, 11, 13, 15, 21, 23, 25 출력결과

Fig. 14 Grating arrays displayed on SLM and an image of output plane for interconnection

- (a) Grating array with four inputs
- (b) Output ports 4, 12, 14, 22
- (c) Grating array with five inputs
- (d) Output ports 4, 12, 14, 22, 24
- (e) Grating array with six inputs
- (f) Output ports 2, 4, 12, 14, 22, 24
- (g) Grating array with nine inputs
- (h) Output ports 1, 3, 5, 11, 13, 15, 21, 23, 25

격자패턴에 의해 이루어져 출력 포트 4, 5, 8, 12, 19, 23으로 다중연결됨을 볼 수 있다. 그림 15(c), (d)는 그림 15(a)에서 입력이 하나 더 늘어 입력단 7에 입사된 빔이 분리된 후 출력 포트 3, 16, 20로 연결되고 있으며, 그림 15(e), (f)에서는 입력단 9로 입사된 빔이 출력포트 1, 15, 24로 추가 연결되는 것을 보여준다.

이상과 같이 얻어진 결과들은 SLM과 회절격자를 이용한 홀로그래픽 크로스바를 응용한 능동적인 광연결 및 스위칭을 보여주는 것들로서, 그림 12와 그림 13에서 얻어진 결과는 이진위상격자(binary phase grating: BPG)를 사용하였으나 다중위상격자를 사용하면 좀 더 높은 효율과 공간활용이 가능하다. MPG를 이용한 실험도 이루어졌으나 현재 보유하고 있는 LC-SLM의 화소 크기가 너무 크고 효율이 떨어지는 관계로 실험 결과를 제시하지 못하였다. 따라서 무엇보다도 성능이 우수한 SLM이 우선적으로 요구되며



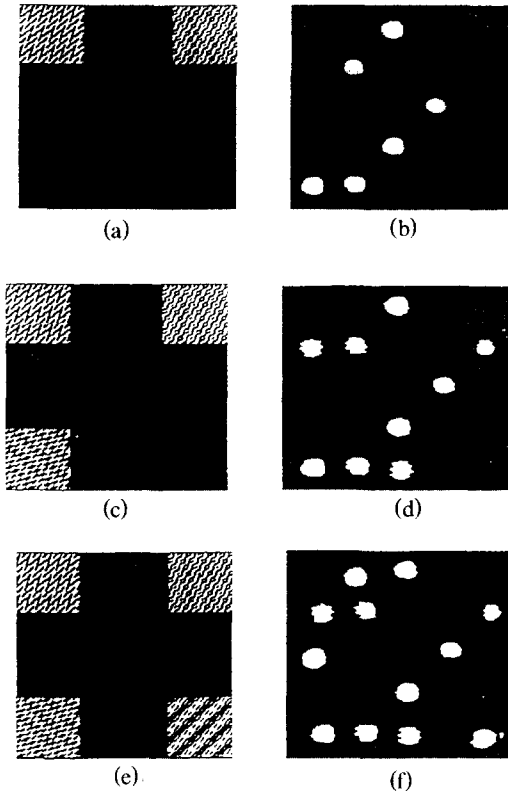


그림 15. 빔 분리와 라우팅을 위한 실험결과  
 (a) 입력빔을 세 개로 분리하는 격자배열  
 (b) 출력포트 4, 5, 8, 12, 19, 23  
 (c) 입력빔을 세 개로 분리하는 격자배열  
 (d) 출력포트 3, 4, 5, 8, 12, 16, 19, 20, 23  
 (e) 입력빔을 세 개로 분리하는 격자배열  
 (f) 출력포트 1, 3, 4, 5, 8, 12, 15, 16, 19, 20, 23, 24

Fig. 15 Experimental result for beam slit and routing  
 (a) Grating array splitting away three input beams  
 (b) Output ports 4, 5, 8, 12, 19, 23  
 (c) Grating array splitting away three input beams  
 (d) Output ports 3, 4, 5, 8, 12, 16, 19, 20, 23  
 (e) Grating array splitting away three input beams  
 (f) Output ports 1, 3, 4, 5, 8, 12, 15, 16, 19, 20, 23, 24

다중위상이 제대로 표현된다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### V. 결 론

홀로그래픽 크로스바를 응용한 능동적인 자유공간

광연결 시스템을 SLM의 실시간적 특성을 이용하는 위상형 회절격자와 컴퓨터로 구현하였다. 실험에서의 환경은 3×3 입력단에서 5×5 출력 포트로 자유로이 원하는 포트에 광 스위칭과 빔 분리를 통한 라우팅이 이루어짐을 볼 수 있도록 구성되었으며, 실험의 방법과 결과에서 볼 수 있듯이 입력포트에서의 격자 패턴에 따라 출력포트로의 빔 연결이 자유롭게 이루어짐을 볼 수 있었다. 본 논문에서 제시된 광연결 방법은 비교적 고속의 처리를 요하지 않는 자유공간 광연결에 적용 가능하고, 소자와 주변장치에 성능에 따라 실시간 광연결 시스템에 효과적으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. R. L. Morrison, S. L. Walker and T. J. Cloonan, "Beam array generation and holographic interconnections in a free-space optical network," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 14, pp. 2512-2518, 1993.
2. M. S. Kim and C. C. Guest, "Block-quantized binary-phase holograms for optical interconnection," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 5, pp. 678-683, 1993.
3. D. O'Brien, "Scalable switch architecture has many advantages," *SPIE's Optical Processing & Computing*, vol. 6, no. 1, June 1995.
4. H. P. Herzig, D. Prongue and R. Dändliker, "Design and fabrication of highly efficient fan-out elements," *Jpn.J.Appl.Phys.*, vol. 29, pp. 1307-1309, 1990.
5. U. Killat, G. Rabe and W. Rave, "Binary phase gratings for star couplers with high splitting ratio," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 4, no. 2, pp. 159-167, 1982.
6. H. Dammann and K. Görtler, "High efficiency in-line multiple imaging by means of phase holograms," *Opt. Comm.*, vol. 3, pp. 312-315, 1971.
7. E. G. S. Paige and R. H. Carrough, "Generation of binary, phase-only holograms by on-line feedback of output plane intensity," *Diffraction Optics, 1994 Technical Digest Series*, vol. 11, pp. 247-250, 1994.

8. J. Amako and T. Sonehara, "Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 32, pp. 4622-4628, 1991.

9. S. F. Habiby, A. Marrakchi, J. R. Wullert II, J. S. Patel and J. T. Meyer, "Programmable coherent source arrays generated by spatial light modulators," *App. Opt.*, vol. 31, no. 20, pp. 3991-3998, 1992.

10. D. J. Lee, B. H. Yoon, N. Kim and S. H. Jeon, "Implementation of arbitrary beam pattern generator using spatial light modulator," *The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences*, vol. 20, no. 6, pp. 1595-1603, 1995.

11. J. C. Kirsch, D. A. Gregoru, M. W. Thie and B. K. Jones, "Modulation characteristics of the Epson liquid crystal television," *Optical Engineering*, vol. 31, n. 5, pp. 963-969, 1992.

12. K. Hirabayashi, T. Yamamoto and M. Yamaguchi, "Free-space optical interconnection with liquid-crystal micropism arrays," *Applied Optics*, vol. 34, no. 14, May 1995.

13. D. J. Lee, B. H. Yoon, N. Kim and S. H. Jeon, "Real time optical pattern generator implemented by spatial light modulator," *CLEO/Pacific Rim '95*, pp. 158-159, 1995.

14. N. Streibl, "Beam shaping with optical array generators," *J. Modern Optics*, vol. 36, no. 12, pp. 1559-1573, 1989.

15. D. J. Lee, N. Kim, S. H. Song and H. H. Suh, "Gray-level image generation by multiphase diffraction grating", *IEEE LEOS'95 8th Annual Meeting*, pp. 73-74, Oct. 1995.

16. M. R. Feldman C. C. Guest, "Iterative encoding of high-efficiency holograms for generation of spot arrays," *Optics Letters*, vol. 14, no. 10, pp. 479-481, 1989.

17. D. J. Lee, N. Kim, J. U. Um, S. H Kim and S. S. Choi, "Dynamic optical interconnection using spatial light modulator in multiphase mode," *OC & PS '96*, pp. 120-121, April 1996.

18. D. J. Lee and N. Kim, "Opical routing system consisted of spatial light modulator and kinoform phase grating," *Photontics West '96, SPIE vol. 2689*, pp. 300-304, Feb. 1996.

이 득 주(Deug-Ju Lee) 정회원

1969년 6월 6일생

1993년 2월: 충북대학교 정보통신공학과(공학사)

1996년 8월: 충북대학교 대학원 정보통신공학과 정보통신공학전공(공학석사)

1996년 7월~현재: LG정보통신 중앙연구소 전송연구단 광통신 연구원

※주관심분야: Diffraction grating, Free space optical interconnection, Optical interconnection, 3D display



강 봉 균(Bong-Gyun Kang) 정회원

1969년 7월 13일생

1993년 2월: 충북대학교 정보통신공학과(공학사)

1992년 11월~1995년 7월: LG전자 통신기기SBU 연구원

1996년 2월~현재: 충북대학교 대학원 정보통신공학과 석사과정

1997년 2월~현재: 한국전자통신연구원 기초기술연구부 위촉연구원

※주관심분야: Optical information processing, Computer generated holography, Free space optical interconnection, Applications of holography



김 남(Nam Kim) 정회원

1959년 3월 30일생

1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1983년 2월: 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1988년 8월: 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1992년 8월~1993년 8월: 미 Stanford대학 방문교수  
1989년 2월~현재: 충북대학교 정보통신공학과 재직(부교수)

※주관심분야: Applications of holography, Diffractive optics, Optical interconnection, Optical pattern recognition



서 호 형(Ho-Hyung Suh)정회원

1962년 10월 13일생

1985년 8월: 전남대학교 물리학과  
졸업(이학사)

1988년 2월: 한국과학기술원 물리  
학과 졸업(이학석사)

1991년 8월: 한국과학기술원 물리  
학과 졸업(이학박사)

1992년 2월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

※주관심분야: Optical information processing, Optical computing, Computer generated holography, Optical pattern recognition