

論文95-32A-5-7

자유공간분할 광교환을 위한 홀로그래프 광연결 방법

(Optical holographic interconnection method for free-space-division-multiplexed photonic switching)

張珠錫*, 朴晉祥*, 池昌桓*, 鄭信一*

(Ju-Seog Jang, Jin-Sang Park, Chang-Hwan Ji, and Shin Il Jeong)

요약

광대역 광교환 시스템의 실현을 위한 기초연구로서, 홀로그래프 연결방법에 기초한 자유공간 분할 광교환의 구도를 제시하고 간단한 실험을 수행하였다. 먼저 nonblocking 광연결을 위한 홀로그래프 연결요소 어레이를 제작하였다. 여기서는 하나의 연결단으로 3차원 공간에서 $N \times N$ 입력 포트와 $N \times N$ 출력 포트간의 완전 광연결을 실현한다. 다음, 광연결을 위한 이 홀로그래프 연결요소 어레이의 재생에서, 직각 프리즘을 도입하여 출력측에서의 0차 회절빔을 제거할 수 있음을 실험적으로 보였다. 0차 회절빔의 제거는 출력단에서의 광잡음을 감소시키고, 다음에 설명할 광연결 제어를 용이하게 한다. 마지막으로, 공간 광변조기(액정 텔레비전 디스플레이)를 이용하여 이들 광연결 하나하나를 ON-OFF 스위칭시키는 실험을 수행하였다. 이로써 홀로그래프 연결 방법을 이용한 자유공간분할 광교환의 가능성을 보였다. 그리고 이러한 구도를 현재의 기술로 실현할 수 있는 최대 규모를 추산해 보았다.

Abstract

As a basic study to implement a wide-band photonic switching system, we proposed a scheme of free-space-division-multiplexed photonic switching based on a holographic interconnection method and carried out simple experiments on it. First, we recorded holographic interconnection element array for nonblocking optical interconnections. Just a single stage of the array realizes full optical interconnections between $N \times N$ input ports and $N \times N$ output ports in 3-D space. Next, in reading of the array for optical interconnections, we showed that the zeroth-order diffracted beam could be eliminated in the output port by introducing a right angle prism. The elimination of the zeroth-order diffracted beam reduces optical noise in the output ports and provides conveniences of interconnection control in our scheme. Finally, from the experiments on ON-OFF switching of the optical interconnection paths one by one using a spatial light modulator (display of the liquid crystal television), we showed the feasibility of photonic switching based on the holographic interconnection method. We also estimated approximately the maximum interconnection scale that can be realized without difficulty with current optical devices.

I. 서론

*正會員, 釜山水産大學校 情報通信工學科

(Dept. of Telematics Eng., National Fisheries Univ. of Pusan)

接受日字: 1994年4月26日 수정완료일: 1995年4月27日

광섬유와 반도체 레이저의 발전으로 현재 광통신 시스템은 널리 이용되고 있으며 앞으로 정보전송의 양이 증가함에 따라 각 가정에까지 광통신망으로 바뀌어 갈

것이다. 특히 종합정보통신망의 발달과 함께 처리해야 할 정보량이 급격히 증가하게 되면, 단순히 신호를 전달하는 전송선로 부분에만 광을 사용하는 것이 아니라 정보의 교환(스위칭)과 처리 등에서도 광을 사용하는 것이 매우 유리하다. 사실 광섬유와 같이 정보전송 용량이 아무리 크다고 하여도, 교환부의 정보처리 용량이 이에 미치지 못한다면 다지점간의 정보통신의 성능을 극대화 시키기는 어려울 것이다^[1].

광고환 방식은 공간분할 방식, 시간분할 방식, 파장분할 방식 및 자유공간 분할 방식 등으로 분류된다^{[2][4]}. 특히 이 논문에서 연구한 방식은 자유공간분할 방식의 하나로서 광의 병렬성을 이용한다. 자유공간에서는 광의 상호작용이 없으므로 3차원 공간에 높은 밀집도로 광연결을 실현할 수 있으며 고속 스위칭 기술이나 펄스동기 등의 문제가 없다는 장점이 있다.

자유 공간에서의 광연결로 가장 잘 알려진 것은 소위 광크로스바 스위치 (혹은 스탠포드 광행렬-벡터 곱셈기)이다^[5]. 이는 1978년 스탠포드대학 연구팀에 의해 제안된 것으로, N개의 1차원 입력 포트 (혹은 N차원 벡터)와 N개의 1차원 출력 포트들 간에 완전 (즉, nonblocking) 광연결 (N^2 광연결) 및 스위칭을 실현하는 것이다. 이 연결은 개념적으로 단순하지만 실제로 구현하기 위해서는 여러개의 원통형 렌즈와 일반 렌즈가 복잡적으로 필요하여 실제 시스템은 다소 복잡하다. 또 입출력이 2차원 배열이면 그대로 적용할 수 없다.

광의 병렬성을 최대한 활용하기 위해서는 2차원 포트간의 광연결이 필요한데, 이를 간단히 실현하는 방법으로 홀로그램 어레이를 사용하는 것이 1988년경을 전후해서 몇 개의 대학에서 거의 동시에 제안된 바 있다^{[6][9]}. 이들 방법은 2차원 포트간의 N^2 광연결을 간단히 할 수 있으나 연결 배선을 외부에서 제어할 수 없는 고정연결 방법이다. 연결 배선을 외부에서 제어할 수 있는 완전 연결 구도로서 홀로그램 렌즈 어레이나 마이크로 렌즈 어레이를 사용하는 방법이 그 후에 계속해서 제안되고 연구되고 있다^{[10][13]}. 이러한 연구들은 한개의 연결단으로 완전 연결을 수행하는 구조이므로, 연결 배선의 제어를 위해 밀집도가 매우 높은 광소자들이 필요하다. 즉, 입력 포트가 $N \times N$ 개이고 출력 포트가 $N \times N$ 개이면 총연결수는 N^4 이며 이들을 각 연결을 제어하기 위해 N^4 개의 연결제어 소자가 필요한 것이다. 그 외에 액정 디스플레이를 이용하여 실시간 컴퓨터 발생 홀로그램을 직접 액정 텔레비전 디스플레이에 만들어 줌으로써 광연결 제어를 하는 연구도 수행된 바있다.^[14] 이는 홀로그램과 스위칭 소자를 액정 디스플레이 하나로 표현하는 경우이다.

한편, 다단 연결 구조를 사용하면 훨씬 적은 수의 연

결로 nonblocking 연결을 실현할 수 있다^{[15],[16]}. 물론 다단 연결이 되면 단을 거침에 따라 광의 세기가 점차 감소되거나 변질되므로 광증폭기 등의 능동 광소자들이 필요하게 된다. 다단 광연결에서는, 아주 간단한 기본 연결 모듈들을 여러개 결합시켜 원하는 연결 구도를 얻는다^{[15][17]}. 가장 간단한 기본 모듈은 두개의 입력 포트와 두개의 출력 포트 사이를 연결하는 구조로 bypass 상태와 exchange 상태를 가질 수 있다. 기본 모듈은 편광 특성을 이용하는 편광빔 분할기라든지 프리즘과 거울 등으로 구현된다. 따라서, nonblocking 다단 연결 구조는 연결하고자 하는 입출력 포트 수가 매우 커지면 전체 시스템이 매우 복잡해지고, 연결제어가 복잡해지는 단점이 있다.

본 논문에서는, 광대역 광고환 시스템의 실현을 위한 기초 연구로서, 홀로그램 연결 방법을 이용한 자유공간 분할 병렬 광연결 구도를 갖는 광고환 방식을 제시하고 이에 대한 기초 실험 결과를 보고한다.

II. 홀로그램 연결방법을 이용한 자유공간 분할 스위칭

1. 시스템 구조

그림 1과 같이 입력 2차원 $N \times N$ 포트 어레이에서 출력 2차원 $N \times N$ 포트 어레이로 정보를 전송한다고 생각하자. 각각의 입력 포트는 임의의 다른 출력 포트로 정보를 전송할 수 있다.

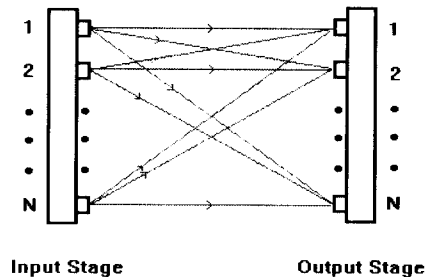


그림 1. $N \times N$ 개의 포트를 갖는 입력단과 $N \times N$ 포트를 갖는 출력단 사이의 완전 광연결 (측면도)

Fig. 1. Full optical interconnections between the input $N \times N$ ports and the output $N \times N$ ports (a side view).

특히 광통신 시스템에서 직접 광고환을 수행한다면 각각의 포트는 각각의 광섬유 끝단이거나 광증폭기를 통한 경우 대응되는 개개의 증폭기 출력이 될 수 있다.

출력 포트들은 광섬유들의 다음 시작단이거나, 광검출기, 혹은 비선형 전기광학소자 어레이가 될 수 있다. 물론 이들 전기광학소자들을 거친후 다시 광섬유에 launch 될 수 있다.

전체 시스템에 대한 일반적이고 개략적인 구성도는 그림 2에 나타내었다. 입력 $N \times N$ 포트에서 각 포트마다 자신의 목적지 주소를 갖는 데이터 패킷들이 들어오면 광분할기(beam splitter:BS)를 통해, 제어를 위한 제어빔과 데이터 전송을 통한 신호빔으로 분할된다. 제어빔은 각 데이터 패킷의 주소부분을 검출하여 각각의 목적지 노드로 광연결이 일어날 수 있도록 공간 광변조기를 제어한다. 광분할기를 통과한 $N \times N$ 포트의 신호빔들은, 필요에 따라 광증폭기들에 의해 증폭되고, 대응되는 홀로그래프 연결요소 어레이(holographic interconnection element array: HIEA)에 각각 조사된다. 홀로그래프 연결요소 어레이는 각 포트들의 신호빔을 모든 출력노드 방향으로 분할되어 갈 수 있도록 신호빔을 회절시킨다.

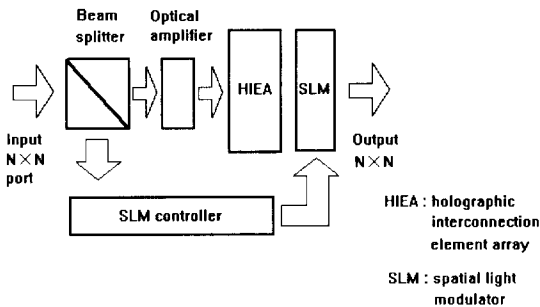


그림 2. 홀로그래프 연결소자 어레이와 공간 광변조기를 이용한 자유공간 분할 광교환 구조의 일반적 구성도

Fig. 2. A general scheme for free-space-division-multiplexed photonic switching using a holographic interconnection element array and a spatial light modulator.

주소에 따라 제어된 공간 광변조기에 의해, 신호빔은 원하는 목적지 포트로만 전달된다. 이 동작에서 중요한 점은, 제어빔이 공간 광변조기 제어기에서 처리되어 공간 광변조기의 화소들을 ON 시키거나 OFF 시키는데 걸리는 시간이, 신호빔이 홀로그래프 연결요소 어레이에 도달하는데 걸리는 시간보다 짧아야 한다는 점이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 공간 광변조기 제어기에서의 주소 인식 등에 look-up table 방법을 쓰거나 신호빔에 적당한 지연을 줌으로써 해결할 수 있을 것이다. 특히, 비선형 특성을 갖는 bistable thin

film array 공간 광변조기를 사용하여, 빛으로 직접 이 광변조기를 병렬로 제어할 수 있게 되면^[18] 위의 광교환 구도의 순수 광학적 병렬 광교환 시스템을 실현할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 그림 2 중에서 홀로그래프 연결요소 어레이의 제작방법과 연결제어를 구성하는 기법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 홀로그래프 광연결 소자의 제작

홀로그래프 광연결 요소는 홀로그래피 원리를 이용하여 빛을 회절시키는 매우 작은 크기의 홀로그래프로서, 입사된 빔을 원하는 방향으로 원하는 fan-out 수로 보낼 수 있다. 물론 홀로그래프 자체가 빛을 증폭시키지는 못하므로 fan-out 수가 증가하면 개개의 출력은 그만큼 감소하게 된다. 그림 3(a)는 fan-out수가 1인 홀로그래프 요소 1개와 이를 제작하기 위한 홀로그래프 기록 방법을 나타내고 있다.

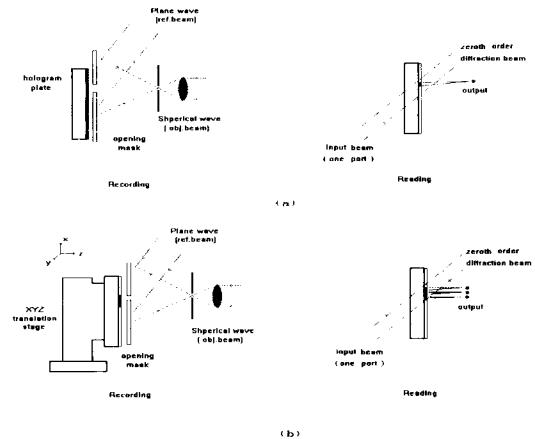


그림 3. 홀로그래프 연결 요소의 기록과 재생

(a) 한개 홀로그래프 요소에서 1개의 fan-out를 얻는 경우

(b) 한개 홀로그래프 요소에서 3×3 fan-out를 얻는 경우

Fig. 3. Recording and reading of a holographic interconnection element.

(a) The case to obtain one fan-out from one holographic element.

(b) The case to obtain 3×3 fan-out from one holographic element.

한개의 홀로그래프 요소에서 $N \times N$ 개의 fan-out를 얻는 한가지 방법은, fan-out이 1개인 미소 크기의 홀로그래프 부요소(hologram subelement)를 $N \times N$ 개 만드는 것이다. 예를 들어, 그림 3(b)에서는 홀로그래프 기록장치에서 기준빔(평행빔)과 물체빔(구면파) 그리

고 opening mask 등을 고정시키고, 홀로그램 건판을 XYZ translation stage를 이용하여 x축으로 이동시키면서 3번 기록시켰을 때, 3개의 미소크기의 홀로그램 부요소에 의해 3개의 fan-out이 만들어지고 있음을 보여주고 있다. 결국 1개의 포트에서 출력 $N \times N$ 포트들로 모든 연결을 이룩하기 위해서는 1개의 포트에 대응되는 홀로그램 요소에서 $N \times N$ 개의 부요소(subelement)들이 있어야 한다. 이들 부요소 하나 하나는 자기 특정 방향으로의 연결을 담당한다. 이제 입력 포트가 $N \times N$ 개이면 각 포트마다 $N \times N$ 개의 홀로그램 부요소들이 있으므로 모두 $N^2 \times N^2$ 개의 부요소를 기록하여야 한다. 그러나 출력 $N \times N$ 개의 위치는 고정되어 있으므로 $N \times N$ 개 opening mask로 $N \times N$ 번 홀로그램 부요소를 기록하면 될 것이다. 그림 4는 3×3 개의 opening을 갖는 mask로 출력 포트와 입력포트에 대해 홀로그램 기록과 읽기의 1차원 단면 모습을 보여주고 있다.

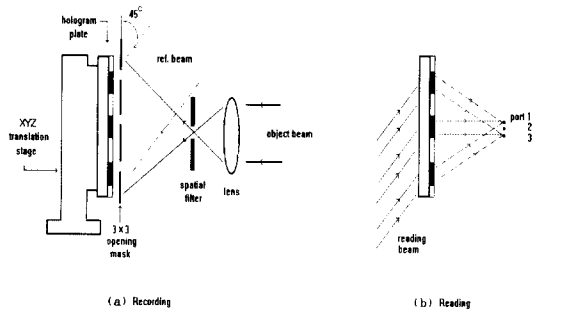


그림 4. $N \times N$ 입력포트에서 $N \times N$ 출력포트로의 완전연결을 얻기 위한 홀로그램 연결요소 어레이의 기록과 재생

(a) 기록 (b) 읽기

Fig. 4. Recording and reading of holographic interconnection element array for full interconnections from the input $N \times N$ ports to the output $N \times N$ ports.

(a) Recording (b) Reading

위의 그림에서 홀로그램 건판은 XYZ translation stage에 고정되어 있으며 기준 빔은 평면파이고 물체 빔은 구면파이다. 이 때 특정 opening mask로 부요소들만 노출될 수 있도록 한다. 이 opening mask와 홀로그램 건판은 기록될 때에는 밀착되어 있어야 한다. 홀로그램 건판을 제외한 opening mask와 spatial filter, 렌즈 등은 모두 고정되어 있다. 홀로그램 건판

과 기준빔과의 각도는 45도이다.

모든 홀로그램 연결 요소에 있어서 특정 위치의 $N \times N$ 부요소들은 한꺼번에 기록된다. 이들에 물체빔과 기준빔을 노출시키고 나면 translation stage 로 다음 부요소 위치 만큼 홀로그램 건판을 이동시키고 다시 물체빔과 기준빔을 노출시킨다. 동일한 작업을 $N \times N$ 번 반복하면 전체 $N^2 \times N^2$ 부요소 어레이에 대한 레이저광 노출이 끝난다. 이 홀로그램 건판을 현상하고 고정액에 처리한 후 건조시키면 홀로그램 연결 요소 어레이가 완성된다. 그림 4(b) 에서 기준빔의 공액 복소수 빔을 입사시킬 때 3×3 의 점광원에 대한 실상을 얻게 됨을 나타내었다.

그림 3과 그림 4에서, 1차 회절된 빔외에도 회절되지 않은 0차 회절빔(통과빔)이 존재한다. 이 0차 회절빔은 광연결 제어를 위한 공간 광변조기를 위치시킬 때 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 그림 5에서 처럼 직각 프리즘을 이용하여 0차 회절빔을 프리즘 내부 반사를 이용하여 제거하였다^[19]. 프리즘에 의해 90도로 꺾여 다른 쪽으로 빠져 나가는 0차 회절빔은 공간 광변조기를 제어하는 제어빔으로 사용되거나 다른 목적에 이용될 수 있을 것이다.

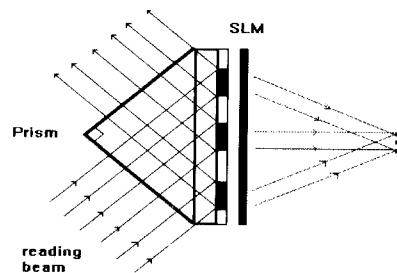


그림 5. 직각 프리즘을 도입한 0차 회절빔(통과빔)의 제거
Fig. 5. Elimination of the zeroth-order diffracted beam by using a right angle prism.

실제 실험에서는 2×2 입력 포트 (송신측)와 2×2 출력 포트 (수신측)와의 완전 광연결을 위한 홀로그램 연결 요소 어레이를 그림 4에서 처럼 제작하였다. 따라서 전체 홀로그램 부요소 어레이는 4×4 이고 한 개의 홀로그램 부요소의 크기는 기록의 편의상 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 로 하였다. 사실 이 크기는 훨씬 줄여질 수 있다. 사용한 홀로그램 건판은 Agfa Gevaert(Holotest) 8E75HD 이고 광원은 He-Ne 레이저이다. 홀로그램 부요소들의 회절 효율은 측정결과 13.4%였다. 자외선에 응고되는 glass bond를 이용하여 제작

된 홀로그래프와 직각 프리즘을 결합시켰다. 프리즘 결합 후 회절 효율은 결합전과 동일 하였다. 제작된 홀로그래프 요소 어레이를 그림 6에 나타내었다(직각 프리즘이 결합되어 있음.).

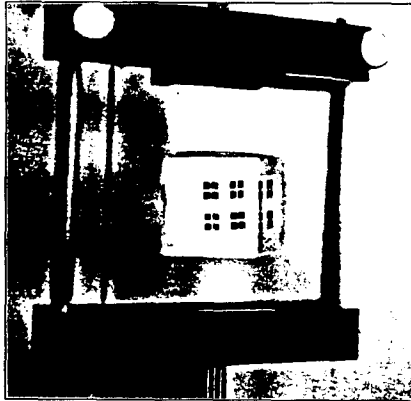


그림 6. 제작된 홀로그래프 연결요소 어레이
Fig. 6. Fabricated holographic interconnection element array.

3. 공간 광변조기를 통한 광연결 제어

한개의 포트에 한개의 홀로그래프 요소가 있고 이 요소 하나에는 다시 $N \times N$ 개의 부요소가 독립적으로 들어 있어서 이들 각각이 focusing되는 자신의 회절빔을 출력한다. 따라서 간단히 이들 개별적 회절빔을 공간 광변조기로 ON/OFF(통과/차단)시킴으로써 광연결을 제어할 수 있다. 빠른 제어 속도를 얻기 위해서는 공간 광변조기 각각의 화소의 스위칭 속도가 빨라야 하고 병렬 제어가 가능한 것이 이상적인 것이다.

현재 상용화된 공간 광변조기는 전기적 신호로 직렬 주사 방법으로 ON-OFF 하고 있다. Magneto-optic SLM (MOSLM)은 각 화소의 스위칭 시간이 약 1 μ sec이고 컴퓨터로 구동되는 최대 128×128 화소 어레이가 시판되고 있다. 이 MOSLM은 가격이 비싸다는 단점이 있다(수천-수만불). 값싼 공간 광변조기로서 많이 사용되는 것이 액정 텔레비전의 모니터 디스플레이이다^{[20][22]}. 화소는 보통 220×240 개 정도이고, 스위칭 속도는 수십 msec 이며, ON-OFF 제어는 퍼스널 컴퓨터를 통해 Frame Grabber를 이용하여 수행된다. MOSLM 보다 광학적 특성이 떨어지지만 값싸고 쉽게 구할 수 있어서 액정 텔레비전 디스플레이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다^{[23][26]}. 기타 Microchannel 공간 광변조기나 LCLV(Liquid Crystal Light Valve)등도 상용화 되어 있으나 값이 매우 비싸다.

이 연구에서는 흑백 액정 텔레비전 (EPSON ET-20)을 이용하여 광연결 제어를 수행하였다. 액정 텔레비전은 광교환의 기본 동작원리를 실험하는 데는 충분하지만 성능 향상을 위하여 다른 진보된 공간 광변조기로 대체되어야 할 것이다. 그림 7은 공간 광변조기를 이용한 광연결 제어의 기본구도이다. 공간 광변조기는 액정 텔레비전의 개조된 디스플레이이고 퍼스널 컴퓨터에 내장된 Frame Grabber로 특정 화소를 ON-OFF시킨다. 여기서 ON-OFF 되는 공간 광변조기 화소와 회절빔의 위치는 일치되어야 한다.

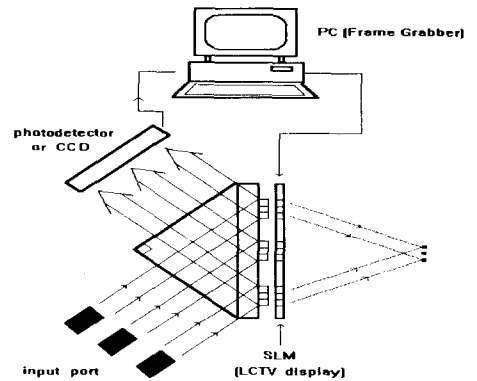


그림 7. 공간 광변조기를 이용한 광연결 제어
Fig. 7. The control of optical interconnection using a spatial light modulator.

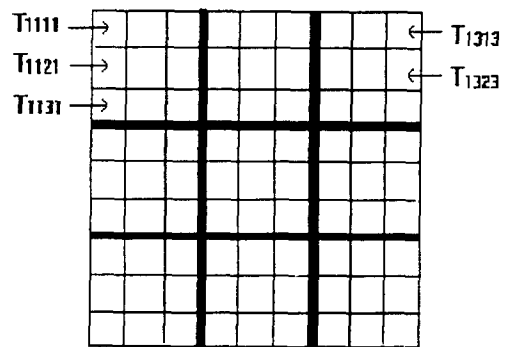


그림 8. 공간 광변조기 화소들의 위치 정의
Fig. 8. Definition of positions of spatial light modulator elements.

어떤 한 출력 포트에서 충돌없이 연결이 이루어지려면, 그 출력 포트로 연결되는 광경로중에서 하나만

ON 되어야 한다. 물론 하나의 입력 포트가 모든 출력 포트에 정보를 분산시켜 보낼 수 있다. 그림 8에 공간 광변조기의 화소 상태를 텐서 T_{ijkl} 로 나타내었다. T_{ijkl} 화소 상태는 입력 $N \times N$ 포트의 (i, j) 번째 포트에서 출력 $N \times N$ 포트의 (k, l) 번째로의 회선연결이 있으면 ON 상태 (1 상태)이고, (k, l) 을 제외한 나머지 $T_{ijpq}(p \neq k, q \neq l)$ 은 모두 OFF (0 상태) 이어야 한다. 충돌을 방지하기 위해 $Trskl(r \neq i, s \neq j)$ 는 모두 0 이어야 한다. 실험에서 Frame Grabber로는 DT-2853를 사용하였고, 액정 텔레비전 디스플레이의 ON-OFF의 투과 및 차단비는 약 10 : 1 이었다.

4. 광스위칭 기초실험

그림 2의 기초동작을 수행하기 위해서 그림 9와 같이 시스템을 구성하였다. 직각 프리즘과 홀로그램 건판은 앞 제 2.2 절에서 제작된 것이다. 2×2 입력 포트에 들어가는 입력광은 편의상 평면파로 하였고, 출력은 초점면에 종이 screen을 두어 관측하였다. 그림 10은 여러가지 광연결에 대한 출력사진이다. (screen 뒷면에서 사진촬영을 하였으므로 출력사진의 광패턴은 좌우 반전되어 나타나 있다.)

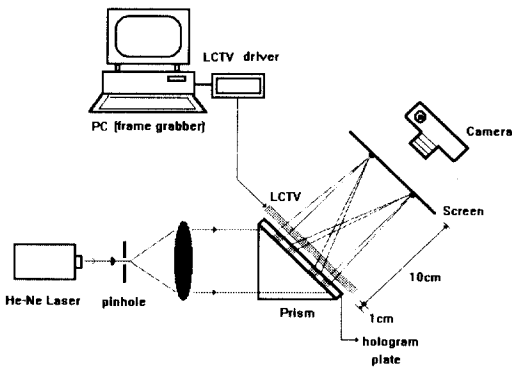


그림 9. 광교환에 대한 기초 실험 장치
Fig. 9. Basic experimental setup for photonic switching.

그림 10에서 보인 바와 같이 임의의 광연결이 잘 제어되고 있음을 알 수 있다. 출력 사진에서 OFF 된 포트가 완전히 어둡지 않은 것은 액정텔레비전 모니터 화소가 OFF 되었을 때에도 약간이나마 투과되기 때문이다. 이상적으로는 하나의 연결 회절빔은 공간 광변조기의 1개 화소로 제어하는 것이 바람직하지만, 이 실험에서는 홀로그램 부화소의 크기가 $2 \times 2\text{mm}$ 이어서 1개 회절빔을 약 10×10 개의 공간 광변조기 화소로 제어하였다. 따라서 화소와 화소 사이에서 투과되는

빛이 있어 OFF-state의 background level이 높아지고, 화소들에 의한 회절때문에 1개의 출력 포트 주변에 잡음광이 생긴다. 1개 화소로 1개의 광연결을 제어할 경우 이를 더욱 개선시킬 수 있을 것이다. 각각의 출력 포트에서의 빔세기는 다소 차이가 있는데, 주된 이유는 공간 광변조기의 ON-OFF 스위칭 부분과 홀로그램 연결 부요소 부분이 모두 정확히 일치하지 않았기 때문이었다. 각 출력 beam spot 크기는 약 $30 \mu\text{m}$ 정도 이었다.

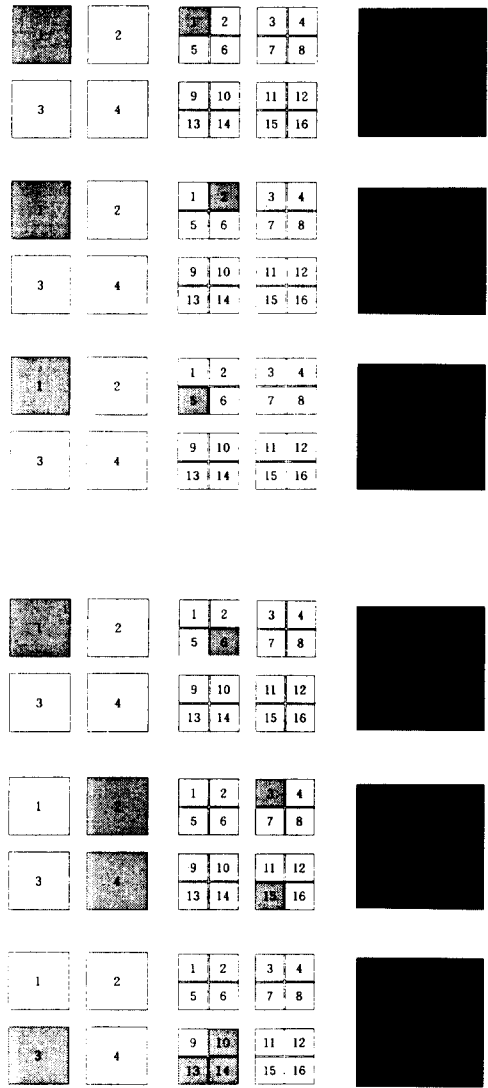


그림 10. 광교환에 대한 기초 실험 결과
Fig. 10. Experimental results on photonic switching.

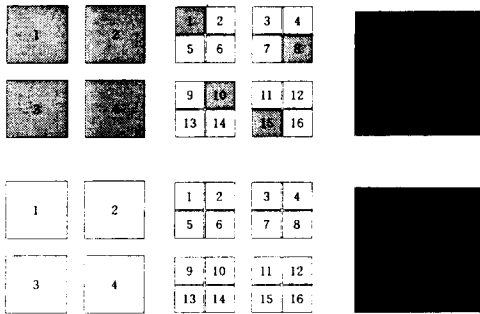


그림 10. 광교환에 대한 기초 실험 결과

Fig. 10. Experimental results on photonic switching (Continued).

Ⅲ. 고 찰

실험에서는 간단한 2×2 입력 포트에서 2×2 출력 포트로의 광스위칭 실험이지만 스위칭 규모는 크게 증가시킬 수 있을 것이다. 개개의 연결을 위한 부홀로그램 화소의 크기는 대략 다음과 같이 계산해 볼 수 있다. 먼저 하나의 부화소가 회절빔을 focusing 시키므로 작은 렌즈로 간주하자. 이 때 초점거리 f 이고 한 변의 길이 a 인 정사각형 aperture를 갖는 렌즈가 있다고 하면 초점면에서의 빔 크기 s 는 대략 $s = f \lambda / a$ 이 된다. 여기서 λ 는 사용하고 있는 빔의 파장이다.

하나의 출력 포트에 도달하는 spot size를 $100 \mu\text{m}$ 가 되도록 한다고 하자. 이 크기는 광검출기나 혹은 CCD 센서의 화소크기, 광섬유직경 혹은 반도체 레이저를 이용한 광증폭기의 크기와 거의 같은 order 이다. 그리고 사용하는 빛의 파장 λ 가 $1 \mu\text{m}$ (He-Ne의 경우 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$), 초점거리 f 를 1cm ($10^4 \mu\text{m}$) 라 한다면 부화소의 한변길이 a 는 $100 \mu\text{m}$ 가 된다. 예를 들어 100개 (10×10 개)의 입력포트와 100개의 출력포트로 blocking 없는 완전연결을 하는 데에는 100×100 개의 부화소가 필요하므로 총 홀로그램 한 변의 크기는 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} = 1\text{cm}$ 가 된다. 이 정도 크기에서는 모든 부화소의 초점거리가 균일하게 1cm 라는 가정이 크게 벗어나지 않으므로 출력빔 크기 모두 $100 \mu\text{m}$ 로 균일할 것이다. 실험에서 제작된 홀로그램 부화소의 크기를 직경 약 $100 \mu\text{m}$ 로 줄였을 때에도 광연결의 문제는 없음을 확인하였다. 단

부요소가 작을 때에는 입력 빔의 세기를 증가시켜야 충분히 센 출력을 얻을 수 있다.

한가지 언급할만한 것은 0차 회절빔을 직각 프리즘으로 제거함으로써 초점거리를 얼마든지 줄일 수 있다는 점이다. 만약 0차 빔도 1차 회절빔과 함께 나온다면 (서로다른 각도로), 최소한 이들 두 빔이 분리되는 충분한 길이의 초점거리를 사용하지 않으면 안된다. 이는 당연히 부화소 크기를 증가시킬 요인이 될 수 있다. 그리고 0차 회절빔이 없으므로 공간 광변조기도 홀로그램 연결요소 어레이에 가깝게 위치시킬 수 있다. 결국 100개 입력 포트와 100개 출력 포트사이의 blocking없는 완전연결 스위칭은 대략 1cm^2 공간부피에서 이루어질 수 있어서 매우 compact 한 시스템이 될 수 있다. 대략 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 공간에는 이러한 광교환 시스템을 대략 1000개 정도 위치시킬 수 있으므로 최대 10^5 개의 입력 포트와 10^5 개의 출력 포트의 nonblocking 연결을 실현할 수 있을 것이다. 또한 이 시스템에는 렌즈가 필요없으므로 한개의 단 (single stage)을 사용한다면 큰 홀로그램 크기 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 이면 약 1000개의 입력 포트와 1000개의 출력 포트의 완전연결을 어렵지 않게 실현할 수 있을 것이다.

현재 문제가 되는 것은 사실 공간 광변조기의 화소수이다. 상용화된 MOSLM의 최대 화소수는 128×128 이므로 공간 광변조기 1개 화소를 홀로그램 부화소 하나에 대응시킨다면 100개의 입력 포트와 100개의 출력 포트까지는 현재 기술로 구현 가능하다. 그런데 액정 텔레비전의 모니터 디스플레이에는 대략 400×400 이므로 20×20 입력 포트와 20×20 출력 포트와의 nonblocking 광스위칭이 가능하지만 액정 텔레비전 모니터 디스플레이의 특성에 한계가 있어서 스위칭 성능은 다소 떨어질 수 있을 것이다.

본 논문에서 수행한 것은 자유공간에서의 교환 방법으로 광의 병렬성만을 이용한 것이다. 그러나 광연결 제어를 위한 공간 광변조기의 ON-OFF 속도가 충분히 빠르면 각 포트 마다 광의 고속성을 이용한 시간분할 교환기법을 추가로 도입할 수 있다. 즉 우리의 구도는 하나의 단일 시스템에 공간 및 시간분할 교환방식이 모두 적용될 수 있다. 이는 입출력 포트 사이에 완전한 연결이 있고 이들 연결을 동시에 모두 제어할 수 있기 때문이다. 물론 이러한 가장 일반적 nonblocking 교환에서의 스위치 수는 입력 포트수와 출력 포트수의 곱만큼 필요하다는 단점이 따른다. 하지만 본 연결 구도에서는 광 스위치의 구성 요소가 단순히 미세 홀로그램 어레이와 공간 광변조기의 화소로 이루어지므로 기술적 어려움이나 동작의 복잡성이 없다. 즉 광

스위치의 수를 제한하여야 할 절박성이 덜하다는 점이다. 이 시스템에서 오히려 광스위치를 줄이는 방법으로 다단 시스템을 구성하면 여러가지 광 증폭 문제 반사 및 잡음광의 증대 등으로 시스템이 더 복잡해지고 연결 제어도 어려워질 수 있다. 어쨌든 다단으로 하면 부분(local) 연결로도 nonblocking을 얻을 수 있으므로 공간 광변조기의 화소수를 현저히 줄일 수 있기 때문에 여러가지 형태나 구도의 다단의 부분연결 시스템에 대한 연구도 필요함에는 틀림없다.

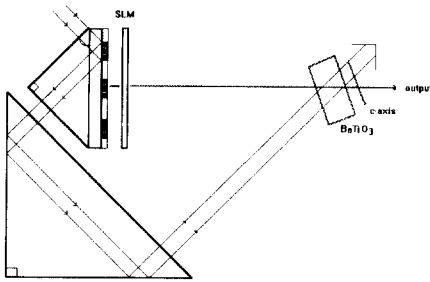


그림 11. Power 손실을 줄이기 위한 수정된 구도
Fig. 11. Modified scheme to reduce the power loss of the system.

또 한가지 지적해야 할 문제는 이 시스템에서의 power 손실 문제이다. nonblocking 구조에서 $N^2 \times N^2$ subpixel에서 최대 $N \times N$ 개 화소만 ON 되므로 대부분의 빛은 공간 광변조기에 의해 차단되어 있다. 이렇게 차단되는 빛은 그 자체가 손실이다. 이 문제는 광증폭기를 홀로그램 어레이 소자 뒤에 배치하면 완화시킬 수 있다. 즉 실제 동작하는 부분에는 약한 빛을 사용하고 공간 광변조기에 의해 ON 된 최종 연결 빔에만 광증폭을 하는 것이다. 광증폭기로는 그림 11 처럼 $BaTiO_3$ 와 같은 광굴절 결정을 2광파 혼합 모드^[27]로 사용할 수 있을 것이다. 물론 이 경우 시스템은 다소 복잡해진다.

또 실험에서는 진폭 홀로그램을 사용하였지만 이를 상용표백 처리하여 위상 홀로그램으로 제작하면 홀로그램의 회절 효율을 향상시킬 수 있을 것이다^{[28][29]}. 또한 회절효율을 향상시키기 위한 홀로그램 제작기술로서 binary phase CGH 기법을 사용하면 더 나은 회절효율을 얻을 수 있을 것이다^{[30][31]}.

한편 완전 광연결 시스템은 광고환 뿐만 아니라 여러가지 광정보처리에도 직접 응용될 수 있다. 예를 들어 광신경망이나 광 wavelet transform 및 패턴 인식 등에 사용될 수 있을 것이다^{[6][13],[25],[26],[32]}.

비록 원시적이긴 하지만 실제적인 2진 광 데이터를

전송하고 데이터 패킷의 주소 부분을 검출하여 공간 광변조기를 동작시켜, 보내고자 하는 출력 포트에서 신호를 검출하는 실험을 수행할 예정이다. 이로써 효율적인 공간 광변조기 제어 기법을 강구할 수 있고 예측하지 못한 문제도 부각될 수 있을 것이기 때문이다.

IV. 결 론

홀로그램 연결요소 어레이를 이용한 자유공간 광고환이 원리적으로 가능함을 실험적으로 입증하였다. 현재 기술로 어렵지 않게 구현할 수 있는 광고환 규모는 100개 입력 포트와 100개 출력 포트와의 완전 광연결 및 스위칭을 약 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 의 홀로그램 건판 크기로 할 수 있는 정도이다. (이와는 약간 다른 홀로그램 연결법이지만, 광연상기억을 위한 약 100×100 연결을 $1.5\text{cm} \times 2\text{cm}$ 홀로그램 건판상에 성공적으로 실현한 바 있었다^[33].) 시스템용량을 제약하는 요소는 홀로그램 어레이 보다 ON-OFF 투과비가 크고 스위칭 속도가 빠르며 화소수가 많은 공간 광변조기이다.

본 연구에서 제안하는 자유 공간 분할 광고환 방식은 빛의 병렬성을 최대로 이용하는 것이다. 따라서 시간 분할 방식에서와 같은 고속 스위칭 소자가 필요없고 신호 동기 문제가 없다. 그리고 파장 분할에서처럼 파장 가변 소자와 같은 고기능 소자가 필요없다.

이 시스템에서 추구하는 것은 많은 기능을 갖는 복잡한 소자 1개가 여러 기능을 할 수 있도록 하는 것이 아니고 단순한 스위칭 소자를 많이 이용하여 복잡한 기능을 하도록 적절히 배열해 주는 것이다. 즉, 단순히 빛의 진행 방향만을 바꾸는 홀로그램 어레이들과 단순 스위칭 기능을 갖는 많은 화소수의 공간 광변조기가 가장 중요한 소자이며 이러한 소자의 발전이 이 시스템의 실용화에 직결되어 있다.

앞으로의 연구는 데이터 패킷들의 교환을 수행하는 모의실험 및 교환규모의 증대, 시간 분할 기능의 첨가 등이 수행될 것이다. 공간 광변조기나 반도체 레이저 어레이 등 몇가지 광소자의 개발이 이루어진다면 실용 가능성에 초점을 맞춘 연구도 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구지원 및 정보통신부와 한국전기통신공사의 후원에 의해 수행되었으며 지원해준 관계기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. W. Smith, "On the role of photonic switching in the future communications systems," *IEEE circuits and Devices Mag.*, pp. 9-14, May 1987.
- [2] H. S. Hinton, "Photonic Switching fabrics," *IEEE Communications Mag.*, pp. 71-89, April 1990.
- [3] H. S. Hinton, "Photonic in Switching," *IEEE LTS.*, pp. 26-35, August 1992.
- [4] 원용협, "광고환 방식의 종류 및 특성," *전자공학 회지* 제 21권 2호 pp. 169-181, 1994
- [5] J. W. Goodman, A. R. Dias, and L. M. Moody, "Fully parallel, high speed incoherent optical method for performing discrete Fourier transforms," *Opt. Lett.* Vol. 2, pp. 1-3, 1978
- [6] 장주석, 정수원, 이수영, 신상영, "음연결이 없는 Hopfield 모델에 기초한 2차원 연상기억의 광학적 구현," 제2회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, II-11-19, 1987
- [7] Ju-Seog Jang, Su-Won Jung, Soo-Young Lee, and Sang-Yung Shin, "Optical implementation of the Hopfield model for two-dimensional associative memory," *Opt. Lett.* Vol. 13, pp. 248-250, 1988.
- [8] H. J. Caulfield, "Parallel N^d weighted optical interconnections" *Appl. Opt.* Vol. 26, pp. 4039-4040, 1987.
- [9] H. J. White, N. B. Aldridge, and I. Lindsay, "Digital and analog holographic associative memories," *Opt. Eng.* Vol. 27, pp. 30- , 1988.
- [10] Ju-Seog Jang, Sang-Yung Shin, and Soo-Young Lee, "Programmable quadratic associative memory using holographic lenslet arrays," *Opt. Lett.* Vol. 14, pp. 838-840, 1989.
- [11] T. Lu, S. Wu, X. Xu, and F. T. S. Yu, "Two-dimensional programmable optical neural network," *Appl. Opt.* Vol. 28, pp. 4908-4913, 1989.
- [12] F. B. McCormic, F. A. P. Tooley, T. J. Cloonan, J. M. Sasian, H. S. Hinton, "Microbeam interconnections using microlens arrays for free space photonic systems," *OSA Topical Meeting on Photonic Switching*, March 6-8, 1991, Salt Lake City, Utah, Proceeding pp. 48-51, 1991.
- [13] Ju-Seog Jang, Sang-Gil Shin, Seong-Won Yuk, Sang-Yung Shin, and Soo-Young Lee, "Dynamic optical interconnections using holographic lenslet arrays for adaptive neural networks," *Opt. Eng.* Vol. 32, pp. 80-87, 1993.
- [14] M. Yamaguchi and H. Yamazaki, "Holographic free-space optical switch using a liquid-crystal display," *XIV International Switching Symposium '92*, Oct. 25-30, 1992, paper no. B10.2, Yokohama, Japan.
- [15] A. W. Lohmann, W. Stork, and G. Stucke, "Optical perfect shuffle," *Appl. Opt.* Vol. 25, pp. 1530- , 1986.
- [16] S. H. Lin, T. F. Krile, and J. F. Walkup, "Two-dimensional optical Clos interconnection network," *Appl. Opt.* Vol. 27, pp. 1734-1741, 1988.
- [17] C. W. Stirk and R. A. Athale, "Sorting with optical compare-and-exchange modules," *Appl. Opt.* Vol. 27, pp. 1721-1726, 1988.
- [18] H. M. Gibbs, *Optical Bistability: Controlling Light with Light* (Academic Press, Orlando, FL, 1985).
- [19] D. Prongue and H. P. Herzig, "Holographic lenslet arrays with short focal length," in 1990 *International Topical Meeting on Optical Computing, Proceedings of SPIE* Vol. 1359, pp. 167-168, 1990.
- [20] H. K. Liu et al., "Optical-data-processing properties of a liquid-crystal television spatial light modulator," *Opt. Lett.*, Vol. Vol. 10(12), pp. 635-637, 1985.
- [21] K. Lu, and B. E. A. Saleh, "Theory and design of the liquid-crystal TV as an optical spatial phase modulator," *Opt. Eng.*, 29(3), pp.240-246, 1990.
- [22] H. K. Liu, and T. Chao, "Liquid crystal television spatial light modulators,"

- Appl. Opt.*, Vol. 28(22), pp. 4772-4780, 1989.
- [23] M. Young, "Low-cost video display for optical processing," *Appl. Opt.*, Vol. 25(7), pp. 1024-1026, 1986.
- [24] F. Mok, J. Diep, H. K. Liu, and D. Psaltis, "Real-time computer-generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator," *Opt. Lett.*, Vol. 11(11), pp. 748-750, 1986.
- [25] F. Yu, T. Lu, and X. Yang, "Optical neural network with pocket-sized liquid-crystal televisions," *Opt. Lett.*, Vol. 15(15), pp. 863-865, 1990.
- [26] F. Yu, S. Jutamulia, T. Lin, and D. Gregory, "Adaptive real-time pattern recognition using a liquid-crystal TV-based joint transform correlator," *Appl. Opt.*, Vol. 26, pp. 1370-1372, 1987.
- [27] P. Yeh, "Two-wave mixing in nonlinear media," *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. 25, pp. 484-519, 1989.
- [28] W. R. G RAVER, J. W. Gladden, and J. W. Eastes, "Phase holograms formed by silver halide(sensitized) gelatin processing," *Appl. Opt.*, Vol. 19, pp. 1529-1536, 1980.
- [29] P. Hariharan, "Bleached photographic phase hologram," *Opt. Comm.* Vol. 56, pp. 318-320, 1986.
- [30] J. E. Morris, M. R. Feldman, "Reconfigurable optical interconnects by a combined computer-generated hologram and spatial light modulator method," *Appl. Opt.*, Vol. 33, pp. 3683-3694, 1994.
- [31] M. R. Feldman and C. C. Guest, "Iterative encoding of high-efficiency holograms for generation for spot arrays," *Opt. Lett.*, Vol. 14, pp. 479-481, 1989.
- [32] "Special Issue on Optical Wavelet Transform," *Opt. Eng.* Vol. 31, pp. 1823-1898, 1992.
- [33] 손만진, 장주석, 신상영, "Hopfield 모델에 입각한 12×9 패턴의 광연상기억" 마이크로파 및 전파전자*광파 및 양자전자 공학 연구회 합동 학술 발표회, 1989. 5. 27. 한국과학기술원, 논문집 제 12 권 pp. 50-52

----- 저 자 소 개 -----



張 珠 錫(正會員)

1961년 6월 12일생. 1984년 2월 부산대학교 전기기계공학과 졸업(공학사). 1986년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1989년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1989년 11월 - 1991년 4월 미국 University of Colorado 물리학과 및 Joint Institute for Laboratory Astrophysics 연구원. 1991년 8월 - 1993년 2월 한국전자통신연구소 기초기술부 선임연구원. 1994년 7월 - 현재 미국 California Institute of Technology 객원연구원. 1993년 3월 - 현재 부산수산대학교 정보통신공학과 조교수. 주 관심분야는 신경망정보처리 및 광정보처리임.



池 昌 桓(準會員)

1969년 5월 26일생. 1994년 2월 부산수산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 3월 - 현재 부산수산대학교 대학원 전자공학과 재학중. 관심분야는 광컴퓨팅, 광정보처리, 광교환기임.



朴 晉 祥(準會員)

1970년 7월 15일생. 1994년 2월 부산수산대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 3월 - 현재 부산수산대학교 대학원 전자공학과 재학중. 관심분야는 광컴퓨팅, 광정보처리, 광교환기임.



鄭 信 一(正會員)

1950년 11월 29일생. 1974년 2월 경북대학교 물리학과 졸업(이학사). 1976년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1988년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1977년 3월 - 1977년 12월 한국과학기술연구소 연구원 1977년 12월 - 1981년 2월 한국전자통신연구소 전임연구원. 1979년 6월 - 1980년 6월 미국 GTE Laboratories 객원연구원. 1988년 9월 - 1989년 9월 미국 Carnegie - Mellon Univ. 객원교수. 1981년 3월 - 현재 부산수산대학교 정보통신공학과 교수. 주 관심분야는 광정보처리, 광교환기, 광패턴인식 연구 등임.