

## 《主 題》

## 광 신호처리 기술

이 수 영  
(한국과학기술원 전기및 전자공학과)

## ■ 차 례 ■

- |                  |               |
|------------------|---------------|
| I. 광신호처리 기술의 배경  | IV. 광신경 회로망   |
| II. 광 신호처리 소자    | V. 디지털 광 신호처리 |
| III. 어날로그 광 신호처리 | VI. 결 언       |

## I. 광 신호처리 기술의 배경

현대 정보화 사회에서는 “정보를 지배”하는 자가 세계를 지배하게 된다. 정보의 “지배”를 위해서는 “범람”하는 정보 속에서 “필요”한 정보를 뽑아내고 정리하는 신호처리가 필요한데, 사회의 정보화가 가속되고 정보의 홍수가 범람하면 할수록 고속 신호처리가 보다 절실히 요구된다. 지난 20년간 반도체 집적회로 기술의 발전은 눈부신바 있어 신호처리의 대중화 및 고속화를 성공적으로 수행하여 왔으며, 이러한 추세는 보다 가속화 될 것으로 기대된다. 초당 백만번(Mega) 연산은 이미 대중화 되어 있고, 제한된 영역에서나마 초당 십억(Giga) 연산이 이루어지고 있으며, 금세기 내에 초당 조(Tera) 연산의 낭보에 접하게 될 전망이다. (물론 초당 조 연산의 대중화를 위해서는 최소한 또다른 십년을 기다려야 할 것이다). 그러나 우리 사회는 끊임없이 “더 많은 정보의 더 빠른 처리” 능력을 요구하고 있다. 고화질 TV에서 추구는  $1024 \times 1024$  영상의 각 화소당 초당 30번의 연산을 수행하기 위해서는 초당 3000만번의 연산이 필요하며, FFT 등 단순한 신호처리에 요구되는 연산 능력은 초당 십억(Giga)를 쉽게 넘어가고, 인공 시각장치 등 복잡한 신호처리는 초당 조(Tera) 이상의 연산이 요구될 것이다. 인간의 두뇌는 초당  $10^6$ 의 연산 능력을 갖는 것으로 알려져 있으며, 이것이 인류가 추구하는

최소한의 한계가 될 것이다.

전계와 전자의 운동을 이용한 반도체 전자소자의 처리속도가 어디까지 이를 것인지를 밝히기는 쉽지 않다. 대중화를 위한 경제성까지 고려한다면 더욱 어렵다. 그러나 전자적 신호처리의 한계가 전자간의 상호 간섭에 기인하고, 이러한 한계는 상호간섭이 없는 빛을 이용함으로써 극복될 수 있으므로, 대규모 병렬성을 위해 소자 및 연결 밀도가 높아지고 신호의 주파수가 높아 질수록 광 신호처리의 중요성이 더욱 높아진다. 특히 입출력이 2차원 영상일 경우, 1차원 신호로의 변환없이 직접 입출력할 수 있고 소요 연산 능력의 막대함으로 광학적 신호처리가 선호된다. 한 예로, 2차원 영상의 Fourier 변환이 랜즈하나로 간단히 해결된다. 그러나, 연산을 위해서는 두개의 빛이 상호 작용하여 새로운 출력을 내어야 하므로, 상호 간섭이 없는 빛의 성질은 연산 소자의 제작에 어려움을 주어, 용도에 따라 특수 하드웨어를 사용하게 된다. 따라서, 전자와 빛의 장점만을 이용하는 전자광학적 신호처리가 추구하고 있다. 즉, 빛의 고밀도 연결 기능과 전자 소자의 복잡한 연산기능에 의한 상호 보완적 신호처리가 바람직하고, 현재 추구되는 광 신호처리 기술은 대부분이 “전자 광학적 신호처리 기술”이다.

광 신호처리 기술은 초기에 어날로그 신호처리의 형태로 발전해 왔으며, 1980년대 부터는 신경회로망

의 발전에 따라 광 신경회로망이라는 새로운 형태와 전자신호처리와 같이 논리소자에 기초한 광 디지털 시스템으로 발전하고 있다.[1,2] 먼저 2장에서 광 신호처리 시스템에 사용하는 기본 소자들을 간단히 살펴 본 후, 3, 4, 5장에서 이들 각 분야를 살펴 보기로 한다.

## II. 광 신호처리 소자

광 신호처리에서는 2차원 신호를 빛의 위치 정보로 표현하므로, 광 신호처리에서는 전자신호처리와 관련하여 다른 소자를 사용하게 된다. <그림1>에서와 같이, 입력면과 출력면 사이에서 신호처리를 수행하는 광 편향 소자와 투과/반사율 조정 소자 이외에도 입출력을 담당하는 광원과 광전자 변환 소자가 있다. 광 신호처리 시스템은 이들의 조합으로 구성된다.

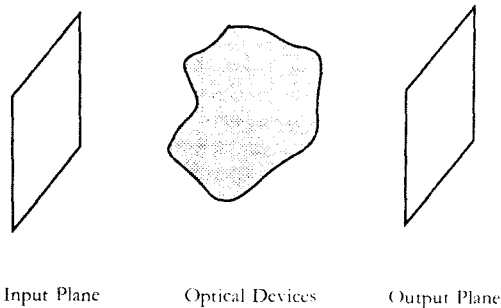
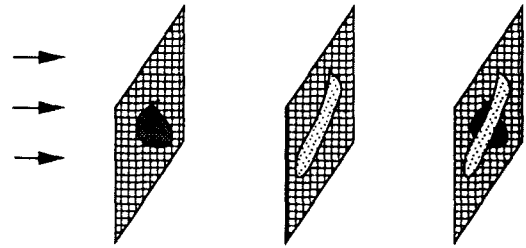


그림 1. 광 신호처리 시스템의 구조

빛의 투과나 반사를 조정하는 소자를 공간 광 변조기 (Spatial light Modulator: SLM)라 하며, <그림2>에서 보인 바와 같이, 레이저 등 평행빔으로부터 2차원 영상을 얻거나, 영상의 각 화소마다 곱셈을 수행할 때 사용된다. 액정 TV의 액정 패널이 매우 단순한 예이다. TV의 액정 패널은 각 화소의 투과율이나 반사율을 전기 신호로 조정하나, 2차원 패턴의 빛으로 조정하는 LCLV(Liquid Crystal Light Valve)도 있다. 복잡한 공간 광 변조기는 각 화소마다 투과/반사율의 저장, 입력 2차원 패턴에 대한 간단한 논리(logic)연산이 포함되기도 한다.

대표적인 2차원 편향 소자로는 렌즈와 홀로그램이 있는데, 렌즈가 특수한 기능만을 수행함에 비해 홀로그램은 여러 용도의 편향기능을 갖도록 만들어 질 수 있을 뿐만 아니라 투과/반사율의 조정도 가능하다.



Laser Input SLM    Multiplying SLM    Detector Plane

그림 2. 공간 광 변조기의 사용 예

많이 사용되는 구형(spherical) 렌즈는 2차원 영상의 확대 및 축소, 2차원 Fourier 변환의 기능이 있다. <그림3>에서와 같이 입력면에서 초점 거리만큼 떨어진 곳에 렌즈를 놓고 다시 초점 거리만큼 떨어진 곳에 출력면을 두면, 입력 영상의 2차원 Fourier 변환이 출력면에 나타나게 된다. Discrete Fourier 변환이 아닌 Fourier 적분이 되므로, 입력 화소와 출력 화소의 연결의 수나 계산량 면에서 거의 무한하다. 렌즈의 평면 중 한쪽 측은 렌즈의 역할을 하세하고, 다른 측은 균일하게 유지시킨 원주형(cylindrical) 렌즈도 있는데, <그림4>와 같이 공간광 변조기와 함께 이를 2개 사용하면 벡터와 매트릭스의 곱셈이 된다. 홀로그램은 coherent한 빛을 사용하여 빛의 위상 정보를 투과/반사율의 변화로 기록하는 소자로, 빔의 편향 및 투과/반사 기능으로 일반적인 영상을 재현할 수 있을 뿐만 아니라, 컴퓨터를 이용하여 존재하지 않는 영상까지도 구현할 수 있다. <그림5>에 홀로그램의 기록과 재생 방법을 도시하였는데, 두개의 coherent 빔 A와 B가 합해지면 기록 매질에 위상변화가 기록되며, 한개의 빔 A를 다시 쬐어 기록 시와 같은 위상조건이 재현되면 다른 빔 B가 재생된다. 감광 필름에 기록하는 평면 홀로그램과 광굴절 매질에 기록하는 체적 홀로그램이 있다. 체적 홀로그램은 기록 매질이 입체가 되므로 보다 많은 정보를 기록할 수 있을 것으로 기대되나, 일반화를 위해서는 광 굴절 매질의 특성과 기록, 재생 및 복제에 대한 보다 많은 연구가 선행되어야 한다. 홀로그램의 정보를 변화시킬 수 있게 하기 위해 필름 대신에 공간 광 변조기가 사용되기도 하나, 화소의 수에서 매우 제약받고 있다. 한개의 빔을 2개로 분리시키는 빔 분리기 (beam splitter)도 주요한 소자의 하나이다.

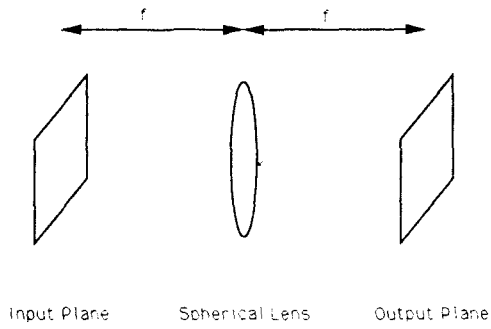


그림 3. 구형 렌즈를 이용한 2차원 Fourier 변환

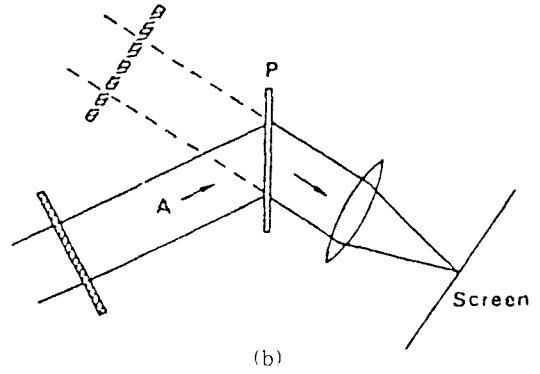


그림 5. 홀로그래프의 기록과 재생 (a)기록: (b)재생

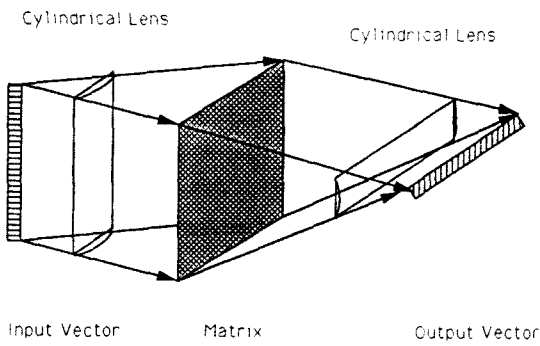


그림 4. 원주형 렌즈를 이용한 벡터-마트릭스 곱셈

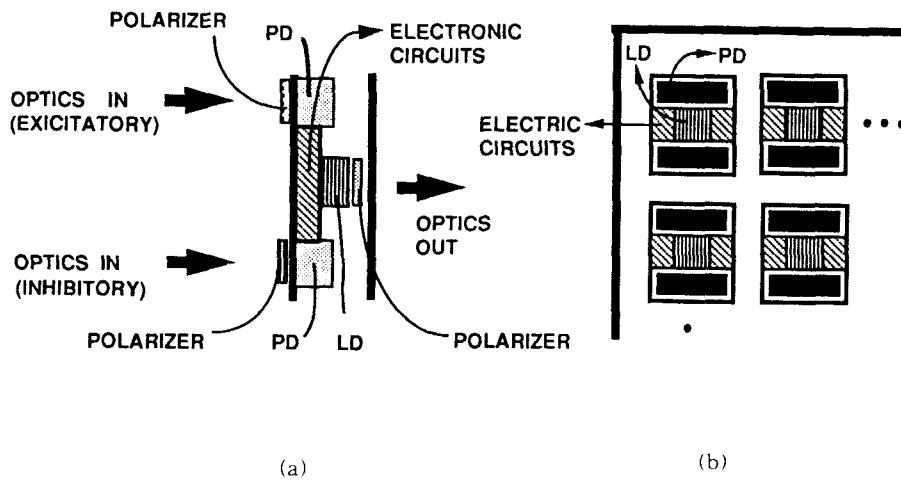
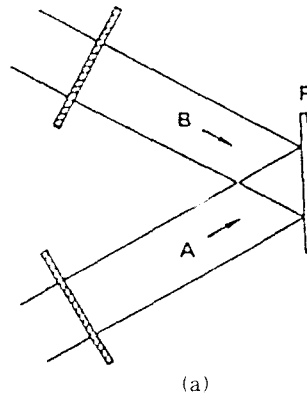


그림 6. 2차원 광전자 변환 및 광원 복합 소자

광원으로는 레이저와 발광 다이오드(LED)가 사용되는데, incoherent한 빛을 내는 발광 다이오드는 홀로그램 등 일부 편향소자의 사용이 제한되게 된다. 현재 HeNe이나 Ar 이온 레이저 등이 많이 사용되고 있으나 반도체 레이저 제작기술의 발달에 따라 2차원 표면방출 레이저 다이오드 어레이(array)가 사용될 수 있을 것이다. 광전자 변환기는 빛을 전기 신호로 바꾸는 소자로, 광 다이오드(photo-diode)나 전하결합소자(Charge Coupled Device : CCC)가 주로 사용된다. 역시 2차원 어레이로 주로 사용되며, 각각 소자의 변환된 전기 신호를 전자적으로 신호처리 한 후 2차원 표면 방출 발광 다이오드나 레이저 다이오드를 구동시키는 <그림6>과 같은 소자가 제안되고 있다.[3]

### Ⅲ. 어날로그 광 신호처리

어날로그 광 신호처리는 구형 렌즈의 2차원 Fourier 변환 기능을 이용하는 것이 대부분이다. 즉, <그림7>과 같이 입력 영상을 렌즈로 Fourier 변환하고 공간 광 변조기를 통해 화소당 곱셈이 수행되게 하면, 공간 주파수 영역에서의 필터 기능을 수행할 수 있다. 이를 다시 렌즈로 역변환하면 실공간에서의 영상을 얻을 수 있다. 공간 주파수 영역에서의 matched filter와 실공간에서의 상관함수 등의 구현에 사용된다.

### Ⅳ. 광 신경회로망

1980년대 이후 활발히 연구되기 시작한 신경회로

망은, 비교적 단순한 처리 소자의 대규모 상호 연결에 의한 대단위 병렬성을 특징으로 하고 있으므로 광학적 구현에 적합하다.[4] 또한, 신경회로망과 광 신호처리 기술은 어날로그 계산을 주로 한다는 공통점도 갖고 있다.

현재 사용되고 있는 대부분의 신경회로망 모델은 벡터행렬 내적(inner-product)과 벡터-벡터 외적(outer-product)를 각각 연상(recall)과 학습(learning)의 기본 계산으로 하고 있다.[5] 층(layer) 구조를 갖는 신경회로망에서  $i$ 번째 출력  $y_i$ 는 입력 벡터  $x_j$  ( $j=1, 2, \dots$ )와 연결세기(synapse)  $W_{ij}$ 의 곱

$$y_i = S(\sum_j W_{ij} x_j)$$

로 표시되는 데, 이는 벡터  $x$ 와 행렬  $W$  사이의 내적을 구한 후 각 요소에 비선형 함수  $S(\cdot)$ 를 가한 것이 된다. 적합한 연결세기를 구하는 신경회로망의 학습 법칙으로는 입력과 출력의 곱을 이용하는 Hebb의 법칙과 입력과 출력 오차의 곱을 이용하는 오차 법칙(delta rule)이 대표적이다. 경쟁 학습 모델(competitive neural network), 자율학습 특징도(self-organizing feature map) 등의 자율학습(unsupervised learning) 신경회로망 모델과 Hopfield 모델, 양방향 연상기억(bidirectional associative memory) 모델등의 단순한 지도학습(supervised learning) 신경회로망 모델 등에서는  $W_{ij}$ 를  $y_i$ 와  $x_j$ 의 곱에 비례해서 고치거나 정의하고, 다층구조 인식자(Multilayer) 등에서는 출력값  $y_i$  대신에 출력에서의 오차가 사용된다. 이들은 출력 벡터 또

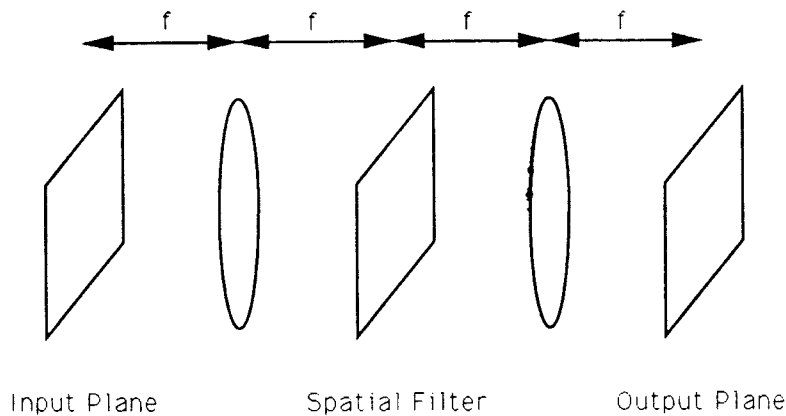
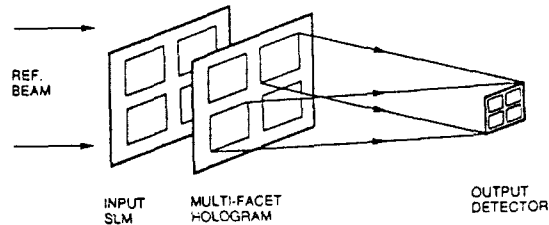
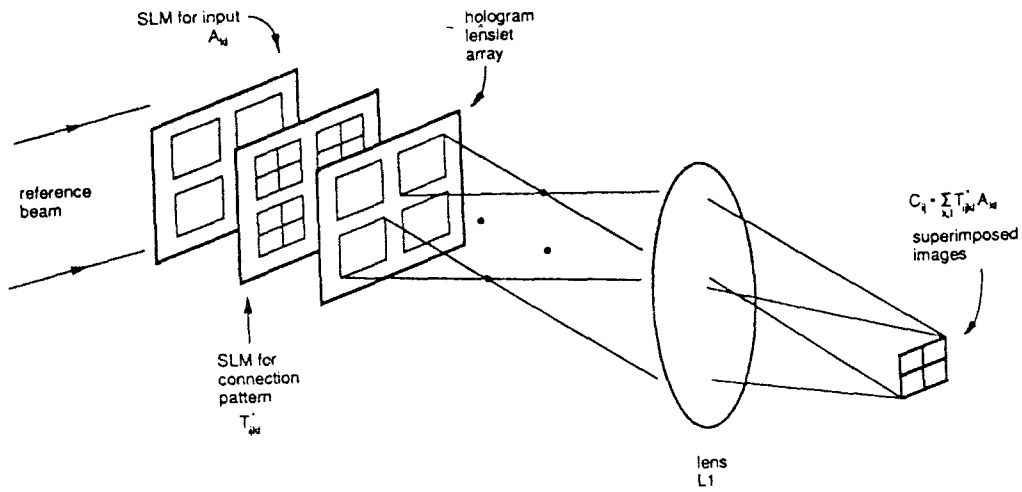


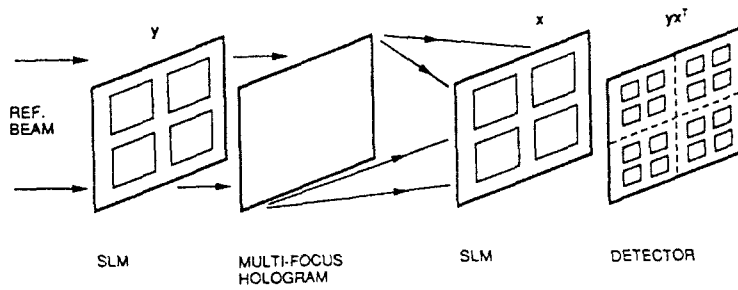
그림 7. 공간 주파수 필터를 위한 광 신호처리 시스템



(a) Inner-product recall scheme for fixed interconnections.



(b) Inner-product recall scheme for adaptive interconnections.



(c) Outer-product learning scheme.

그림 8. 2차원 패턴과 4차원 연결세기에 의한 내적과 외적 구현

- (a) 고정 연결세기를 이용한 내적 ;
- (b) 가변 연결세기를 이용한 내적 ; (c) 2패턴의 외적

는 오차 벡터와 입력 벡터의 외적에 비례해서 연결세기 행렬을 수정해 나가는 것이 된다.

이러한 벡터와 행렬의 계산은 광 신호처리에서 쉽게 구현될 수 있다. 특히 2차원 입력과 이에 대응하는 4차원 연결은 3차원을 이용하는 광 신호처리 기술의 장점이 된다. <그림8>은 내적과 외적을 위한 기본 구성을 보인 것인데, (a)에서는 각각 한개의 입력에 대한 2차원 연결을 갖는 홀로그램을 2차원으로 배열한다면 홀로그램 (multi-facet hologram 또는 page-oriented hologram)으로 4차원 연결을 증가적으로 구성함을 보인 것이고[6], (b)에서는 홀로그램의 편향 기능과 투과율 조정 기능을 각각 렌즈와 공간 광 변조기(SLM)에 나누어 사용한 것이다.[7] 이 경우에도 한개의 입력마다 한개의 렌즈가 필요하며 이를 2차원 어레이로 사용하게 된다. <그림8(c)>는 다초점 홀로그램 렌즈 (multifocus hologram)을 이용하여 한 패턴을 여러개로 복제한 다음, 투과율에 다른 패턴을 수복한 공간 광 변조기를 지나게 함으로써 2차원 패턴끼리의 외적을 구현하는 것을 보인 것이다.[8] 광 굴절 매질을 이용하면, <그림9>와 같이 내적과 외적을 동시에 구현할 수 있으나[9], 실용화를 위해서는 광 굴절 매질에 대한 연구, 특히 수록된 연결 정보를 복제하는 기술 등에 대한 보다 많은 연구가 요구된다.

출력면에서는 광 다이오드나 CCD 어레이가 광 신호를 전기 신호로 바꾸게 되고, 화소 별로 다시 비선형 변환을 거치게 된다. 전자 소자를 배제한 완전 광학적 구현에서는 비선형 광소자가 사용되기도 하나, 비선형 특성이 제한될 뿐만 아니라 대전력이 요구되는 문제점이 있다.

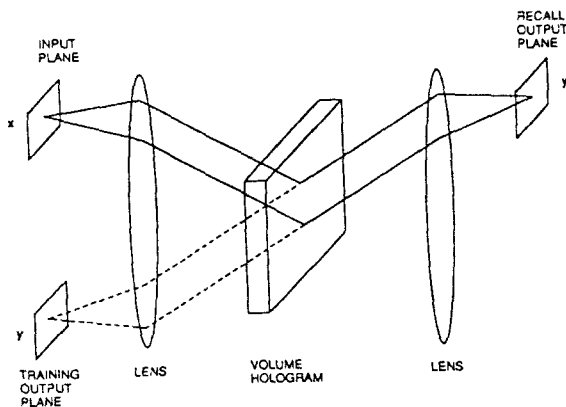


그림 9. 광 굴절 매질을 이용한 3차원 연결

### V. 디지털 광 신호처리

광을 이용하여 프로그램 가능한 디지털(digital) 컴퓨터를 구성하는 연구도 있는데, 광의 병렬성과 고속 처리가 모두 시도되고 있다.

광의 병렬성을 이용하여 2차원 자료에 동시에 계산을 수행하는 SIMD(Single Instruction Multiple Data)의 cellular 구조가 연구된다.[10] 그러나 신경회로망이 대규모 상호 연결에 기초함에 반해, 디지털 시스템은 국부적(local) 연결만을 이용하게 되며 NAND, OR, NOR 등의 논리 소자에 기초하게 된다. 매우 빠른 광 필름을 이용하는 논리소자도 보고되고 있으나[11], 반복주기가 일반적으로 낮다. 그러나, 클럭(clock) 시간이 펄스의 시간보다 늦을 경우 여러개의 독립된 신호처리를 한 하드웨어에서 동시에 수행할 수 있는 가능성이 있다.[12]

### VI. 결 언

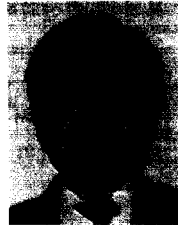
광 신호처리 기술은 전자 신호처리 기술의 한계를 뛰어 넘어 고속 병렬처리를 가능하게 하며, 인간의 시각과 같이 2차원 입출력을 자연스럽게 처리할 수 있다. 어날로그 신호처리, 디지털 신호처리 및 신경회로망 구조로 대변할 수 있으며, 특히 광의 대규모 병렬성과 높은 연결밀도가 요구되는 반면에, 매우 단순화된 처리소자를 사용하여 광소자 제작에 어려움이 비교적 적은 신경회로망이 광 신호처리에 적합하다. 광 전자 소자 제작기술의 발전이 따른다면, 매우 복잡한 신호처리를 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. W.T. Cathey, S. Ishihara, S.-Y. Lee, and J. Chrostowski, "Optical information processing systems," Japanese IEICE Trans. Fundamentals, vol. E75-A, pp. 28-37, 1992. (IEICE Trans. Electron., vol. E75-C, pp.26-35, 1992에도 실림)
2. J. L. Horner, Ed., Optical Signal Processing, Academic Press, 1987.
3. S.W. Yuk, H.J. Lee, S.Y. Lee, and S.Y. Shin, "Optical implementation of error back-propagation learning

for 2-dimensional patterns," International Joint Conf. Neural Networks, Nov. 2-6, 1992, Beijing, China.

4. H.J. Caulfield, J. Kinser, and S.K. Rogers, "Optical neural networks," Proc. IEEE, vol. 77, pp. 1573-1583, 1989.
5. R.P. Lippman, "An introduction to computing with neural networks," IEEE ASAP Mag., vol. 4, pp.4-22, 1987.
6. J.S. Jang, S.W. Jung, S.Y. Lee, and S.Y. Shin, "Optical implementation of the Hopfield model for two-dimensional associative memory," Opt. Lett., vol. 13, pp.248-250, 1988.
7. J.S. Jang, S.Y. Shin, and S.Y. Lee, "Programmable quadratic associative memory using holographic lenslet array," Opt. Lett., vol. 14, pp.838-840, 1989.
8. S.Y. Lee, H.J. Lee, and S.Y. Lee, "Optical modular architectures for multi-layer BAM with 2-dimensional patterns," Tech. Digest Topical Meeting Optical Computing, OSA, March 4-6, 1991, Salt Lake City, USA.
9. D. Psaltis, D. Brady, and K. Wagner, "Adaptive optical networks using photorefractive crystals," Appl. Opt., vol.27, pp.1752-1759, 1988.
10. A. Huang, "Architectural considerations involved in the design of an optical digital computer," Proc. IEEE, vol. 72, pp.780-786, 1984.
11. M.N. Islam, "Ultrafast optical logic gates based on soliton trapping in fiber," Opt. Lett., vol. 14, pp. 1257-1259, 1989.
12. H.F. Jordan, "Pipelined digital optical computing," Proc. 3rd Annual Parallel Symp., March 10-1989, Fullerton, USA.



이 수 영

- 1952년 10월 15일생
  - 1975년 : 서울대학교 전자공학과(학사)
  - 1977년 : 한국과학원 전기및 전자공학과(석사)
  - 1984년 : Polytechnic Institute of New York(박사)
  - 1977년~1980년 : 대한엔지니어링 과장대리
  - 1982년~1985년 : General Physics Corporation,  
Staff / Senior Scientist
  - 1986년~현재 : 한국과학기술원 조교수 / 부교수
- ※ 관심분야 : 신경회로망의 구현(광 및 VLSI)  
신경회로망의 응용(음성 인식, 적응제어)  
신경회로망의 이론