

광 신경회로 컴퓨터의 연구 동향

郭 鍾 薰, 李 一 恒

韓國電子通信研究所 基礎技術研究所

I. 서 론

기존의 디지털 컴퓨터는 정보의 저장과 계산방식에 있어 산술계산 등과 같은 직렬계산에는 매우 빠르고 우수한 성능을 가지고 있으나 인간의 두뇌로 쉽게 할 수 있는 상처리와 유형인식 등의 병렬계산 등에는 많은 시간이 소요되고(Von Neumann bottleneck) 데이터를 저장하기 위한 대용량의 기억장치가 필요한 단점이 있다. 인간의 두뇌는 데이터를 연상 기억(associative memory)과 병렬방식으로 처리를 하는 것으로 알려져 있으며 부분적인 정보로부터 인식과 기억을 하는 것이 가능하며 상당한 오류정정의 능력도 있다고 알려져 있다.^[1] 이러한 사람 두뇌의 병렬처리 방식과 연상기억을 모방하여 컴퓨터를 동작 시키려고 하는 소위 신경회로 컴퓨터(neural computer)의 구현을 위한 광범위한 연구가 전세계적으로 진행되고 있다. 1982년 Caltech의 Hopfield는 인간두뇌의 연상기억 처리방식을 본따서 신경회로 모델(neural network model)을 제안하고 신경망을 애널로그 회로로 대체하고 하드웨어화 하는 가능성을 보였다.^[2] 이미 상당한 수준에 이른 반도체 기술에 힘입어 VLSI 칩에 수백개의 신경세포(neuron)들을 상호 연결하여 연상기억 소자로 작동하는 신경회로망을 실현하려는 연구가 AT&T Bell Lab. MIT Lincoln 연구소, Caltech 등에서 진행되고 있다. 최근까지의 연구 현황으로 볼 때 약 10^3 개 정도의 신경소자를 갖는 신경회로망 구성이 1개의 VLSI 칩 내에서 가능할 것으로 보이나 인간의 뇌가 갖고 있는 neuron의 개수인 10^{11} 개에 비할 때 아직은 신경회로 컴퓨터의 실현에 대한 그 가능성만 제시하고 있는 셈이다.

한편 VLSI에 의한 neuron간의 연결이 2차원적인 구조를 갖는 반면 3차원적인 연결이 가능한 광학기술을 이용하면 그 잠재성은 매우 클 뿐만 아니라 광학이 가지는 massive interconnectivity, parallelism, analog nature는 신경회로 모델에서의 요구와 잘 부합할 뿐만 아니라 광파는 매질 안을 제외하고는 서로 상호작용하지 않으므로 이러한 특성들을 살려 신경회로 모델을 광학적으로 구현하고자 하는 연구가 광학분야에서 최근 많은 각광을 받고 있다.

본 논문에서는 2장에서 신경회로 모델을 광학적으로 구현하기 위해 필요한 비선형 광학소자에 관해 간단히 언급하고, 3장에서는 이들 광학소자들을 이용하여 신경회로 모델을 광학적으로 구현한 최근의 연구 동향에 대해 살펴보기로 한다.

II. 신경회로망과 비선형 광학소자

광학기술을 이용하여 신경회로 컴퓨터를 작동하려는 연구가 많은 주목을 받고 있다. 이는 초고속, 초병렬로 동작하는 지능형 컴퓨터(intelligent computer)의 실현을 목표로 하고 있으며 그 특징들을 살펴보면, 신경세포간의 결합상태를 조절하여 다양한 접속이 가능하며 초병렬 정보처리와 자기 조직화(self-organization) 즉, 학습 가능하다는 점과 VLSI와 광학소자에 의한 H/W 실현 가능성이 크다는 점들이다. 이들을 구현하는데 있어서 가장 근본적인 신경세포(neuron)의 성질들은 첫째로 정보처리를 담당하고 있는 뇌의 기본요소이며 다입력/1 출력의 역치(threshold)특성을 갖는 비선형 소자로서 neuron의 막 전위가 역치 이상일 때 출력 pulse를 발생하며, 각 neuron은 $10^3 \sim 10^4$ 개의 다른 neuron과 synapse 결합

으로 구성되어 있다. 이러한 신경세포들의 집단인 신경회로망을 광학적으로 구현하는 데는 thresholding device, interconnection device, optical memory device 등의 비선형 광학 소자들이 요구된다.

1. 신경세포의 공학적 모델

신경세포는 그림 1 과 같은 구조로 이루어져 있다. Nucleus를 중심으로 여러 갈래의 수상돌기(dendrites)를 가지며 외부에서의 입력을 nucleus에 전달하며, nucleus에서 처리된 정보는 축색돌기(axon)를 통해 다른 neuron에 전달된다. 그림 2에서 neuron에 관한 최초의 연구자인 McCulloch-Pitts의 개념을 도식적으로 보여주고 있다.^[1] Excitatory input과 inhibitory input을 neuron에서 integration하여 출력으로 발생한다는 개념으로서 그림 3과 같이 보다 공학적 모델로 표현할 수 있다. 이 모델에서 입력신호를 V_i , synapse 결합강도(weighting factor)를 T_{ij} 로 할 때 neuron은 입력과 가중치와의 총합 $\sum T_{ij} V_i$ 이 어떤 역치(thresholding value) 이상이면 1을 그 외에는 0을 출력한다. 이 때의 역치 함수를 sigmoid함수라 하며 그림 4와 같은 형의 함수를 갖는다.

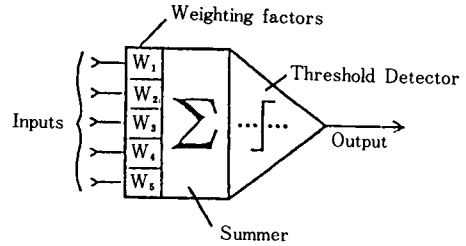


그림 3. 신경세포의 공학적 모델

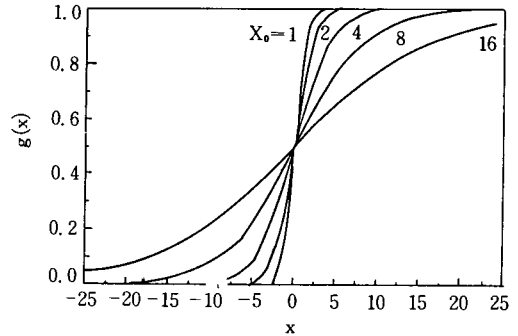


그림 4. 신경세포의 입출력 관계. 입력치 x는 많은 excitatory input과 inhibitory input의 총합으로 주어진다.

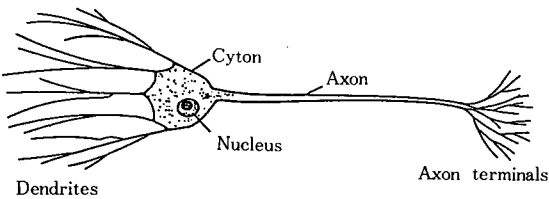


그림 1. 신경세포(neuron)의 구조

2. 비선형 광학소자

신경회로망을 광학적 H/W로 실현하는 데에는 수많은 neuron간의 배선소자(interconnection device)와 역치소자 및 광기억소자 그리고 이들 소자들을 결합한 광학시스템이 필요하다. 이들 요소 기술들은 현재 개발단계에 있는 것이 많지만 본절에서는 이들의 개념에 대해 살펴보기로 한다.

1) 공간 광변조기(spatial light modulator: SLM)

2차원의 광정보 혹은 전자정보를 입력해서 기억하고, 읽어내며 필요에 따라 소거할 수 있는 소자를 공간 광변조기(SLM)라 한다. SLM 소자는 입력 화상의 강도분포를 병렬적으로 검출하는 수광기능과 이것을 굴절율 분포, 편광상태의 분포 혹은 투과율 분포로 변환하는 변환기능이 필요하다. 광도전성 결정(photoconductive crystal)과 같이 두 가지의 기능을 모두 갖춘 것도 있지만, 일반적으로 수광기능과 변환기능을 가진 개별 재료의 개발이 필요하다. 수광

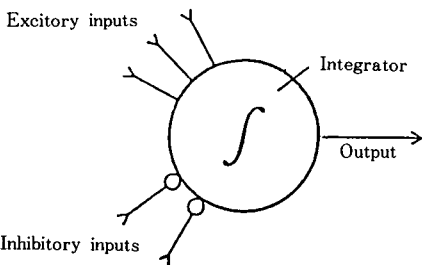


그림 2. McCulloch-Pitts의 신경세포 모형

재료로서는 CdS, ZnSe, a-Si 등의 광도전 재료, BSO, BGO 등의 광굴절 결정, III-V족 혹은 II-VI 족의 화합물 반도체 등이 있다. 통상의 광검출기와 마찬가지로 높은 검출감도, 고해상도, 고속 응답성이 요구되는 것 외에 병렬소자로서 높은 공간적 일양성이 요구된다. 변환기능을 가진 재료로서는 액정(liquid crystal)과 전기광학 결정을 들 수 있는데 액정을 사용한 SLM에는 응답시간이 늦고 contrast가 낮다는 결점이 있으나 액정 소자는 비교적 큰 면적의 것이 만들어지기 때문에 흔히 이용되고 있다. 이 결점을 극복하기 위해 응답속도가 빠른(수 μ s) 강유전성 액정을 사용한 SLM이 개발되고 있다. 전기광학 결정으로서 LiNbO₃와 BSO 등의 광굴절 결정이 흔히 사용되고 있지만 유기물 비선형 광학결정도 유망하다. 그의 PLZT 결정, thermoplastic 등이 있으나 감도와 응답속도의 면에서 BSO 소자가 다른 소자보다 우수하며 해상도의 면에서는 thermoplastic이 유리하다.

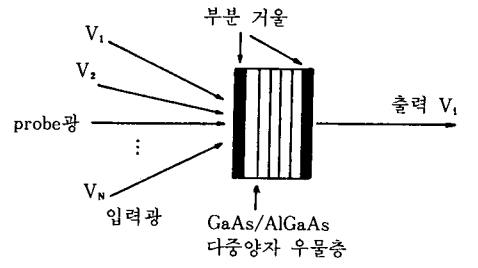
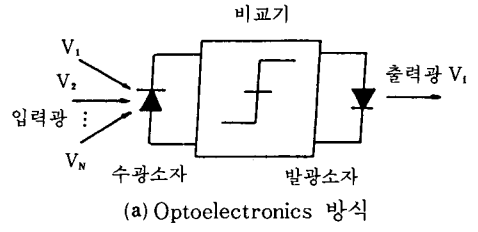


그림 5. 광 역치소자(optical threshold device)

2) 광역치 소자(optical thresholding device)

그림 5(a)는 가장 간단한 광역치 소자의 개념을 나타내고 있다. 수광소자와 전기적으로 동작하는 비교기 및 발광소자로 구성되어 있는데 N개의 입력 V_1, V_2, \dots, V_N 의 합이 어떤 임계치 이상이면 비교기 출력이 H-level이 되어 발광소자가 on 된다. 그림 5(b)에 현재 개발 단계에 있는 전광(all-optic)방식의 광역치 소자의 예를 소개한다. 소자는 100 Å 정도의 얇은 두께를 갖는 GaAs와 AlGaAs층을 교대로 쌓아서 성장시킨 MQW(multi quantum well)층의 강한 비선형 광학효과를 이용하고 있다. 여기서 얘기하는 비선형 광학효과란 입력 광강도에 의해 굴절율이 변화하는 현상으로 이 MQW층을 2장의 partial mirror로 sandwich구조의 비선형 광공진기를 만든다. 입력 광강도가 MQW 층의 굴절율을 변화시키면 광 공진기의 특성이 변화하기 때문에 probe wave의 출력상태를 switch할 수 있다. 직경 3 μ m, 두께 3 μ m의 비선형 광공진기를 제작해서 입력광 power가 10mW이하 응답속도가 ns 이하에서 동작하는 광역치 소자도 보고되고 있는데 이 경우 소자간격을 10 μ m로 2차원 array화 하면 1cm²의 wafer상에 10⁶개의 광역치 소자가 가능한 것이 된다. 이와 비슷한 optical bistable device에 관한 연구도 많이 보고되고 있는데 그 중 주류를 이루는 것은 Fabry-Perot etalon, SEED (self electrooptic effect device),^[4] QWEST(quantum well envelope state transition) device^[5] 등이 있는데

이들에 관한 연구는 optical computer 구현을 위한 노력의 일환으로(optical switching, optical logic gate, optical memory) 얻어진 산물들로서 optical neuro computer에서 요구되는 optical threshold device로서의 기능도 함께 겸하고 있어서 앞으로 이들 device의 응용도 기대할 만하다. 그의 광굴절 결정의 위상공액 특성을 이용한 optical thresholding device 연구도 가능할 것으로 생각된다.

3) 광배선 소자(optical interconnection device)

Optical computer 및 optical neuro computer에서 연산소자 및 메모리간의 배선을 광으로 하는 optical interconnection은 전기적인 배선에는 없는 다음과 같은 우수한 특징을 가지고 있다.

- 첫째, 신호선간의 상호간섭이 거의 없다.
 - 둘째, 용량성 부하에 의한 신호전달 속도의 저하가 없다.
 - 셋째, 소자가 평면일 필요가 없다.
 - 넷째, 전자적 또는 광학적 소자에 광신호를 직접 입력할 수 있다.
 - 다섯째, 신호의 다중화(파장의 다중화; WDM등)가 용이하다.
 - 여섯째, 병렬결선 및 programmable한 배선이 용이하다는 점들이다.
- 지금까지 제안된 광배선의 방법들은 fiber-optic

fan-in/fan-out, holographic in-plane connection in integrated optics, optical parallel matrix-vector multipliers, lenslet-array multiple imaging, volume holographic associative networks, fixed hologram arrays 등이 있다. 이 중에서 마지막 2개의 방법이 가장 많은 병렬 연결 가능한 것으로 알려져 있다.⁶⁾

Hologram을 이용한 interconnection은 그림 6에 나타난 것처럼 입력면(혹은 chip)의 임의의 한점(neuron에 해당)에서 나온 광은 출력면의 임의의 점으로 배선이 가능하다. Hologram의 공간분해능(spatial resolution)은 약 2,000 line/mm이므로 2cm²의 hologram 소자에는 원리적으로 10⁹개 이상의 독립적인 diffraction grating을 가진 것에 해당하며 이것은 10⁹개 이상의 neuron과 10⁹개 이상의 neuron을 자유롭게 접속 가능함을 의미한다. 대개의 hologram은 diffraction grating을 real-time으로 만들지 못할 뿐만 아니라 한번 기록된 data를 다른 data로 바꾸는 것이 어려운 데 비해 BaTiO₃, BSO, LiNbO₃ 결정 등의 광굴절 물질(photorefractive material)은 광에 의해 유도되는 전하의 이동이 굴절율을 변화시키므로 이 현

상을 이용하면 입출력 소자(neuron)간의 배선방법 및 그 결합강도를 임의로 program 가능한 real-time hologram 소자로 이용할 수 있다. 광굴절 물질은 많은 neuron간의 접속을 필요로 하는 광 신경회로 컴퓨터 연구에 있어서 장애에 필수 불가결한 소자가 될 것이다.

Ⅲ. 신경회로망의 광학적 구현

종래의 Von Neumann형 컴퓨터는 극히 신뢰성이 높은 만능형 정보처리 기계이나 시계열 방식의 연산 algorithm과 신호통과 대역 및 전자소자 배선 등의 실장상의 제약에 있어서 그 성능을 비약적으로 향상시켜서 화상처리와 연상처리 등의 random problem을 병렬고속 처리하는 것이 곤란한 것으로 알려져 있다. 여기에 대해서 신경회로 컴퓨터(neuro computer)는 많은 수의 neuron이라 부르는 소자간의 결합상태에 의해 초병렬 정보처리를 행하는 것이 가능하다. 다수의 소자간의 다양한 접속법이 가능하다는 것은 본질적으로 random problem을 해결하는데 적당하며 학습에 의해 스스로 program해 나가는 자기조직화(self-organization)가 가능하다는 얘기가 된다. 신경회로 컴퓨터는 전용 LSI와 광학소자를 사용해서 H/W로 실현 가능한데 특히 광학기술이 가지는 몇가지 장점들은 첫째, 광파는 공간 병렬성을 가지고 있어서 본질적으로 신경회로 컴퓨터와의 정합성이 좋으며 둘째, hologram과 공간 광변조 소자 등을 이용하면 막대한 수의 소자(neuron)간의 배선이 가능하며, 또한 광파는 상호 crosstalk을 받지 않고 전파하며 전송용량도 크다는 특징을 가지고 있다.

광 신경회로망의 구현은 크게 개별소자를 사용한 광벡터 행렬 곱셈기에 의한 방식과 홀로그래프에 의한 방식 및 이들을 compact하게 집적화하는 방식등으로 구분된다. 어느 방식의 광 신경회로망에서도 시스템을 구성하는 데에는 광 신경소자(일종의 역치소자), 광시냅스 결합소자(동적인 광배선소자)등의 비선형 광학소자가 필요하다.

본 장에서는 이들 광 신경회로망 구현방식에 대해 간략히 살펴보기로 한다.

1. 광 벡터 행렬 곱셈기(Optical Vector Matrix Multiplier)방식

이 방식은 optical outer product 및 inner product 등 1970년대 후반부터 본격적으로 연구된 optical digital computing의 연구결과를 응용하는 방식으로

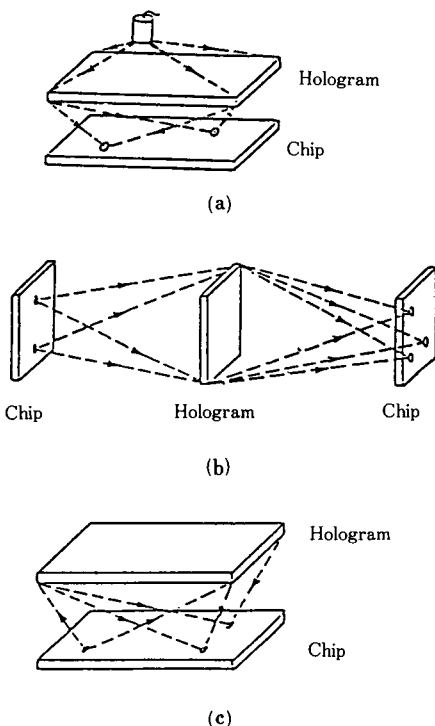


그림 6. 홀로그래프를 이용한 광 배선

전자기술과 광학기술이 결합된 혼합형이 대부분이다.

1985년 Psaltis등은 Hopfield 모델을 처음으로 광학적으로 구현하였는데, optical inner product 방식을 사용하였으며, bipolar bit 값을 광학적으로 해결하기 위해 1bit를 두개의 sub-bit로 나누어 bipolar 값을 표현한 것이 특징이다.^[7]

Thresholding과 feedback 과정은 전자회로를 구성하여 수행하였다. 그 후 Athale등은 상관영역(correlation domain)에서 thresholding을 수행하는 광신경회로망을 제안하였으며,^[8] 1987년 Farhat는 자율학습 모델중의 하나인 자기조직 신경회로망을 구현하는 광학계 제안하였으며,^[9] Boltzmann Machine의 구현에도 적용하였는데, 신경세포간의 연결강도를 나타내는 matrix element들을 입력층-중간층-출력층으로 나누어 배치하는 연산방식이 중심이론을 이룬다. Bidirectional associative memory나 back propagation rule 등도 공간 광 변조기의 특성 (addition, subtraction, multiplication)을 이용하여 구현하고 있다.^[10,11] 이 가운데서 대표적으로 1985년 Psaltis등이 제안한 Hopfield의 연상기억 모델에 근거한 광학계에 대해 살펴본다.

그림 7은 광 벡터 행렬 곱셈기를 기본구조로 사용한 신경세포 32개, 기억상태 벡터 3개를 구현한 광학계이다. 각 신경세포의 흥분상태는 일렬로 배열한 LED의 점멸상태에 대응한다. Synapse 결합 행렬 T_{ij} 는 음과 양의 성분을 갖는 쌍극성 행렬로서 T_{ij} 의 양의 성분만을 모은 $T_{ij}^{(+)}$ 와 음의 성분만을 모은 $T_{ij}^{(-)}$ 로 분리해서 2분기화된 LED 광을 각각에 대응하는 광학 mask에 조사한다. $T_{ij}^{(+)}$ 와 $T_{ij}^{(-)}$ 에서의 투과 출력광은 각각 32개 소자의 photodiode array PD⁽⁺⁾와 PD⁽⁻⁾로 광전 변환후 그림 7(b)에 표시한 것처럼 전기적으로 그들의 차를 연산하고 역치 처리해서 LED array로 feedback 시킨다. 저장정보를 고정시킨 광학 mask 대신 전기적 또는 광학적으로 T_{ij} 행렬 성분 값을 변화시킬 수 있는 공간 광변조 소자를 사용하면 보다 범용성이 있는 고성능 광연상 기억이 가능할 것이다. 예로서 10KHz로 동작하는 256×256 소자의 공간 광 변조소자가 개발되면 1초에 256bit 길이의 벡터 정보를 2.6×10⁶개나 검색 가능한 시스템이 구현될 수 있다.

2. 홀로그램 (Hologram) 방식

홀로그램을 이용한 광학적 정보처리는 연상기억 (associative memory)과 병렬성에 있어 신경세포와

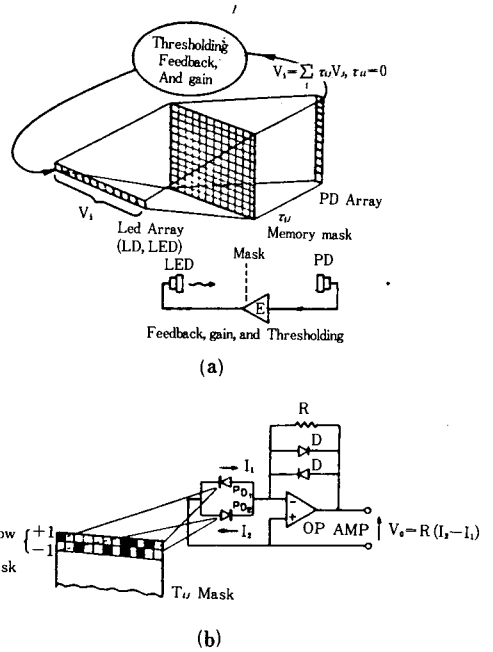


그림 7. 광벡터 행렬 곱셈기를 사용한 Hopfield 신경회로 모델의 광학적 구현 예

많은 유사점을 가지고 있다. Holographic associative memory는 1963년 Van Heerden에 의해^[12] 처음 연구되었으며 holography의 원리를 처음 연구한 Gabor에 의해 1969년 부분적인 입력으로 기억되어 있는 완전한 상의 재생에 관한 이론이 보고되었으며,^[13] 1970년 Sakaguchi 등에 의해^[14] thin hologram에서 연상기억에 관한 실험이 수행되었다. Hologram을 이용한 광연상 기억의 개념이 1960년대에 제안되었다가 최근 다시 주목을 받고 있는 배경에는 첫째, hologram의 연상처리의 기능과 원리가 신경회로망과 유사하다는 점과 둘째, 영상처리에 적합하다는 점, 셋째, 최근 연구개발이 활발한 비선형 광학소자의 이용에 의한 고성능화가 기대되는 점, 그리고 넷째로 hologram이 가지는 고밀도 분산 기억능력 등의 장점들이 있다는 점이다.

지금까지 연구된 홀로그램 연상기억 광학계는 광굴절 결정의 위상공액 특성 (phase conjugation)을 이용한 것, 핀홀 어레이 (pinhole array)를 이용한 것, 광섬유와 거울, 핀홀 어레이와 위상공액 거울 (phase conjugate mirror), ZnS등을 이용한 비선형 에탈론 (etalon), 레이저 공진기 (laser resonator)의 개념을 이용한 광굴절 링 공진기 (ring resonator)와 novelty

filter 등을 이용한 광학계 등이 제안되고 있다.^[15] 이 가운데서 몇 개의 대표적인 광학계를 살펴보기로 한다. 그림 8은 홀로그램 광 연상기억을 구현한 광학계를 나타내고 있다. 복수의 기억 패턴을 Fourier 변환하여 홀로그램에 기록하고 이것을 2대 만들어서 P_2 와 P_4 면에 배치한다. 임의의 입력 패턴을 입력시키면 그 Fourier 변환이 P_2 면에 생기고, 이것이 홀로그램에 기록되어 있는 복수개의 패턴과 상관(correlation)연산이 되며 P_3 면에 있는 핀홀(pinhole)에서 상관 피크(correlation peak)만이 통과한다. 이것을 광원으로 해서 P_4 면의 홀로그램이 P_1 면에 재생된다. 여기에 역치처리 소자가 있어서 가장 강도가 높은 패턴이 선택된다. 이 과정을 계속 반복하게 되면 복수의 기억패턴 가운데서 올바른 연상 패턴만이 출력된다. Paek 등은^[16] 그림 8의 광학계를 변형하여 단어 분리 인식(word-break recognition)에 광 신경회로망을 응용하고 있다. 다른 구성 예로서 부피 홀로그램을 이용한 ring resonator 연상기억계를 그림 9에 보였다. Anderson 등은^[17] 광굴절 결정을 사용하여 이 광학계를 구성하고 공진기 메모리와 신경회로 모델과의 유사성을 증명하였다. 전형적인 레이저는 2개의 구면 거울로 구성되며 공진기내의 광파는 Hermite-Gaussian 고유 모드의 선형 중첩으로 표현되며 각 고유 모드들은 완전 직교 set을 이룬다. 따라서 어떤 정보는 레이저 공진기내의 고유 모드 형태로 저장이 되는데 이와 유사하게 공진기의 거울을 부피 홀로그램으로 대체하면 정보들이 공진기의 고유 모드로 저장되어 부분적인 정보를 입력하여 저장

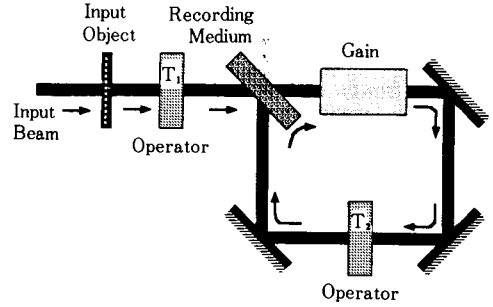


그림 9. 홀로그램과 광굴절 결정을 사용한 ring resonator memory

된 완전한 정보를 재생하는 광 연상 기억계가 가능하게 된다.

3. 광 신경회로 칩 연구 (Optical Neuro Chip)

그림10은 MBE(molecular beam epitaxy) 결정 성장에 의해 제작된 GaAs/AlGaAs 광 신경회로 칩으로서 일본 Mitsubishi Electric Co.에서 개발된 것이다.^[18] 이 광 신경회로 칩은 32개의 LED와 32×32(static) synaptic interconnection mask와 32개의 PD(photo-diode)로 구성되어 있으며 8mm²의 GaAs 기판위에 집적되어 있다. 이 칩은 32개의 신경세포를 가지며 3개의 저장된 벡터를 갖는 Hopfield 연상기억을 구현하고 있다. 이 방법을 확장하면 수천개의 신경세포를 갖는 칩의 제작이 가능한 것으로 알려지고 있으며, static interconnection mask와 기존의 PD를 sensitivity-variable PD로 대체하여 dynamic한 광 신경회로 칩을 개발중에 있다. 이외에도 미국 Bellcore에서는 AT&T Bell Lab과 공동으로 SELDA(surface emitting laser diode array)에 의한 compact한 홀로

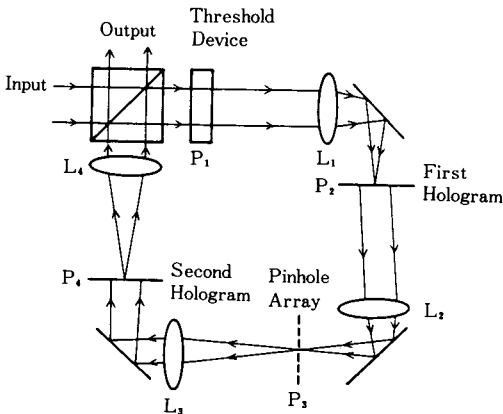


그림 8. 홀로그램과 핀홀 어레이를 사용한 광 연상기억 구현 예

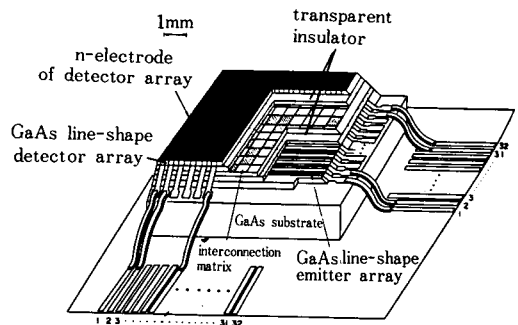
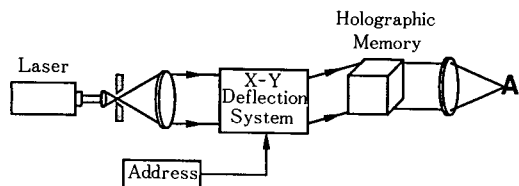
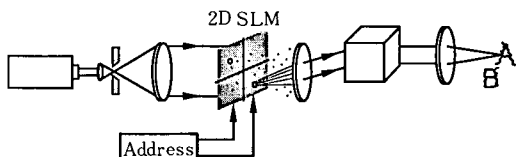


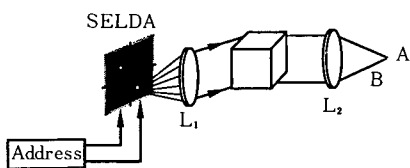
그림10. GaAs/AlGaAs 광 신경회로 칩 구현 예



(a) 기존의 빔 편향기



(b) SLM



SELDA: Surface Emitting Laser Diode Array

(c) SELDA를 사용한 광학계

그림 11. SELDA에 의한 부피 홀로그래프 메모리

그램 연상기억체를 구현하였다^[9](그림 11). 1cm²의 칩 상에 백만개 이상의 레이저 (파장 960nm, 선폭 0.1nm) 가 발진되며 부피 홀로그래프 (LiNbO₃:Fe 결정)에 저장된 정보를 연상기억하고 있다.

IV. 결 론

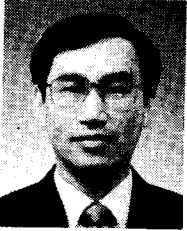
인간의 두뇌가 정보를 기억하고 처리하는 방식을 본따서 이를 광학적으로 구현한다는 것은 차세대에 각광을 받을 optical neuro computer의 구성에 있어 그 기반을 다지는 연구일 뿐만 아니라 기존의 디지털 컴퓨터가 쉽게 처리할 수 없는 상처리 (image processing), 유형인식 (pattern recognition), 광계산 (optical computing) 등의 병렬계산 뿐만 아니라 인공지능 분야 등에 응용이 기대되는 연구분야이다. 앞에서 기술한 것처럼 광학기술은 전자기술과 비교할 때 neuro computer를 실현하는 수단으로서 흥미있는 몇가지 특징을 가지고 있다. 첫째로 광학기술은 본질적으로 병렬처리에 적합하며, 둘째로 직접 영상처리를 행할 수 있다는 것과 복잡한 neuron간의 배선을 비교적

용이하게 실현할 수 있는 능력을 가지고 있다는 점들이다. 그러나 지금부터 해결해야 할 연구개발 과제도 많아서 neuro computer의 정보처리 능력 (고속화, SN비의 개선, 입력영상의 이동과 회전에 대한 대책 등)은 물론 광 신경회로망의 architecture 개발 (광학기술에 적합한 학습 algorithm 개발)과 광역치소자, 광배선 소자, 공간 광 변조기 등의 소자의 비약적인 특성개선이 필요하다고 하겠다.

參 考 文 獻

- [1] T. Kohonen, "Self-Organization and Associative Memory," Springer-Verlag, New York, 1984.
- [2] J.J. Hopfield, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., vol. 79, p. 2554, 1982.
- [3] W.S. McCulloch and W.A. Pitts, Bull. Math. Biophys., vol. 5, p. 115, 1943.
- [4] D.A.B. Miller et al, IEEE J. Quantum Electron, vol. QE-21, p. 1462, 1985.
- [5] L.C. West and S.J. Eglash, Appl. Phys. Lett., vol. 46, p.1156, 1985.
- [6] H.J. Caulfield, J. Kinser, and S.K. Rogers, Proc. IEEE, vol. 77, p. 1573, 1989.
- [7] N.H. Farhat, D. Psaltis, A. Prata, and E. Paek Appl. Opt., vol. 24, p. 1469, 1985.
- [8] R.A. Athale, H.H. Szu, and C.B. Friedlander, Opt. Lett., vol. 11, p. 482, 1986.
- [9] N.H. Farhat, Appl. Opt., vol. 26, p. 5093, 1987.
- [10] B. Kosko, Appl. Opt., vol. 26, p. 4947, 1987.
- [11] M. Ishikawa et al, Appl. Opt., vol.28, p. 291, 1989.
- [12] P.J. Van Heerden, Appl. Opt., vol. 2, p. 398, 1963.
- [13] D. Gabor, IBM J. Res. Dev., vol.13, p. 156, 1969.
- [14] M. Sakaguchi and N. Nishida, IEEE Trans. on Computer, vol. C-19, p. 1174, 1979.
- [15] Y. Owechko, IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, p. 619, 1989 and references therein.
- [16] E.G. Paek and A. Von Lehmen, Opt. Lett., vol. 14, p. 205, 1989.
- [17] D.Z. Anderson and M.C. Erie, Opt. Eng., vol. 26, p. 434, 1987.
- [18] J. Ohta et al, Opt. Lett., vol. 14, p. 844, 1989.
- [19] E.G. Paek et al, Opt. Lett., vol. 15, 1990.

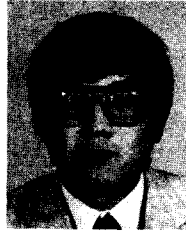
筆者紹介



李 一 恒

1947年 12月 19日生
1970年 서울대학교 전기공학과
졸업(학사)
1974年 미국 예일(Yale) 대학교
대학원(물리학 석사)
1977年 미국 예일(Yale) 대학교
(이학박사)

1978年 미국 예일(Yale)대학교 (연구 및 강의)
1978年~1980年 미국 프린스턴(Princeton) 대학교
(연구 및 강의)
1980年~1984年 미국 Monsanto 반도체 중앙연구소
1984年~1988年 미국 AT&T Bell 연구소
1988年~현재 한국전자통신연구소 연구위원, 기초
연구부장
주관심분야: 응용물리, 반도체, 레이저, 광통신 및
광전자 분야



郭 鍾 薰

1961年 3月 10日生
1983年 경북대학교 자연과학대학
물리학과 졸업(학사)
1985年 한국과학기술원 물리학과
(석사)
1988年 한국과학기술원 물리학과
(이학박사)

1988年~현재 한국전자통신연구소 기초연구부 선임
연구원
주관심분야: 광물질 재료의 비선형 광학, 광 영상처리
광 배선, 부피 홀로그램, 광 컴퓨팅 등