

## 광신경 회로망의 국내연구 동향

장주석 · 이수영 · 신상영

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

(1991년 8월 15일 접수)

### I. 서 론

1980년대 중반 광신경회로망 연구가 본격적으로 시작되어 국내외적으로 활발한 연구 활동이 있었다. 세계적 연구 추세에 발맞추어 많은 연구결과가 있었는데 그간의 국내 연구를 되돌아 봄으로써 그 연구동향을 파악하고 앞으로의 연구 방향을 알아보기로 한다. 광신경회로망에 대한 연구 동기나 개발적인 내용은 참고문헌<sup>1)-5)</sup>를 참고하기 바란다.

### II. 광구현의 기본원리

신경은 수상돌기라고 하는 여러 개의 입력선으로부터 정보를 받아 합한 후 비선형작용을 가하여 축색돌기라고 하는 출력선을 통해 다른 많은 신경들에게 정보를 보낸다. 이 출력은 신경결합부를 통해 어떤 결합계수에 비례해서 다른 신경의 입력으로 들어간다. 신경회로망이라 함은 이와 같은 신경들이 많이 모여 서로간에 정보를 병렬로 주고 받는 회로망으로서, 그 연결세기에 정보를 저장한다. 또 입력에 따라 연결세기를 바꾸어 새로운 정보를 저장하거나 인식할 수 있는데 이것이 신경회로망의 학습이다. 좁은 의미로 신경회로망 연구라 함은 병렬정보처리 능력과 학습능력을 갖는 시스템에 대한 연구라 할 수 있다.

신경간의 연결을 보여주는 가장 기본적인 형태를 그림 1에 나타내었다. 이는  $N$ 개의 신경이 다른  $N$ 개의 신경으로 연결된 상황으로, 각 신경의 입력은 다른 신경의 출력값에 그 각각의 결합세기를 곱한 값의 총합이다. 그림 1에서  $V_i$ 를  $i$ 번째 활동상태라 하고  $W_{ij}$ 를  $j$ 번째 신경에서  $i$ 번째 신경으로 연결되는 결합세기라 하면 두번째 층에 있는  $i$ 번째 신경이 받는 입력은

$$U_i = \sum W_{ij} V_j \quad (1)$$

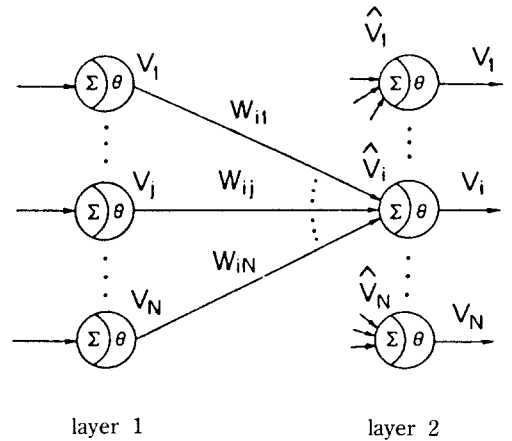


그림 1. 신경회로망의 기본적인 연결구조.

가 되고 그 출력활동상태는  $U_i$ 를 thresholding한 값

$$V_i = \theta(U_i) \quad (2)$$

이 된다. 신경회로의 광학적 구현이라 함은 이와 같은 기본적인 연산을 광학적으로 구현하는 것이다. 물론 신경회로 모델에 따라  $W_{ij}$ ,  $\theta$ , 회로의 topology가 다를 수 있다. 몇가지 예를 들어, Perceptron은 그림 1에서 첫번째 신경층과 두번째 신경층의 신경수가 다를 수 있는 형태이고, Hopfield 모델은 그림 1의 출력이 다시 입력층으로 feedback되는 형태이다. 오류 역전파 학습모델에서는 그림 1의 형태가 몇층 반복되는 multilayer 형태가 되며 각층의 신경수는 서로 다를 수 있고  $\theta$ 는 sigmoid 모양이다. 그러나 근본적으로 식 (1)과 같은 행렬-벡터의 곱을 수행하는 형태라는 것에는 변화가 없다.

신경간의 연결강도  $W_{ij}$ 를 어떻게 저장하느냐에 따라 광구현을 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, (1) 연결

강도를 2차원 평판, 예를 들면 공간 광변조기(spatial light modulator : SLM)에 저장하고, 렌즈나 홀로그램 어레이를 써서 연결 topology를 구성시키는 방법,<sup>[6,7,15]</sup> (2) 광굴절결정이나 건판에 홀로그램 원리를 이용하여 연결 강도에 해당하는 간섭 무늬를 기록함으로써 연결강도를 저장하는 방법이 있다.<sup>[8-10]</sup> 첫번째 방법은 입출력 평면 간의 개개의 광연결이 그들 특성의 위치에 국소화되어 있어 학습을 위해 외부에서 연결세기를 임의로 바꾸기가 쉽지만 아직 SLM의 개발이 충분하지 못해서 한번에 대규모 연결( $10^6$ 개 이상의 연결)을 하기가 어려운 실정이다. 두번째 방법은 대규모 연결이 가능하지만 개개의 입출력간의 연결이 넓게 분포되어 있기 때문에 외부에서 임의로 광연결세기를 바꾸기가 불편하다. 각 방법은 구현하려는 신경모델에 따라 편리한 것이 선택되어질 수 있을 것이다.

### III. 국내 광신경회로망 구현 사례

최초의 광신경회로망을 비롯하여 초기의 광신경회로망은 Stanford 광행렬-벡터 곱셈기(두 입출력 벡터간의 임의의 연결구조)를 이용하여 식 (1)을 구현한 것으로서 주로 1차원 벡터를 다루었다.<sup>[6,7]</sup> 사실 광행렬-벡터 곱셈기는 구조가 다소 복잡할 뿐만 아니라 텐서-행렬곱셈기(행렬-행렬간의 임의연결구조)로의 확장이 어렵다. 국내 최초의 광신경회로망은 한국과학기술원 전기 및 전자공학과에서 연구된 것으로 홀로그램 어레이를 이용하여 입출력 행렬간의 임의의 연결을 실현할 수 있음을 보이고 이를 이용하여 Hopfield 신경회로 모델을 실험적으로 구현하였다<sup>[11-13]</sup>. 그림 2(a)는  $N \times N$ 개의 픽셀(신경)을 갖는 왼쪽평면에서 역시  $N \times N$ 개의 신경을 갖는 오른쪽 평면으로의 광연결이 된 것을 나타낸다. 여기서는 그림의 복잡성을 고려하여 편의상  $2 \times 2$ 만 나타내었는데 일반적으로 확장하여  $N \times N$ 으로 생각하기 바란다. 이와 같은 연결을 실현하기 위해 홀로그램 건판과 물체빔(여기서는 연결강도 패턴을 말함)의 위치는 고정시킨다. 다음 그림 2(b)와 같이 하나의 입력 신경이 출력 신경 전체로 연결되는 강도 패턴을 SLM의 빛 투과도로 나타내고(물체빔이됨) 이를 그 입력 신경위치(aperture의 위치로 나타냄)에 해당하는 홀로그램 건판에 기준빔과 함께 노출한다. aperture를 다른 신경위치로 이동시키고 그에 대응하는 연결패턴을 기준빔과 기록한다. 이와 같은 기록을 전 입력 신경부에  $N \times N$ 번 반복함으로써 홀로그램 어레이를 얻고 그림 2(c)와 같이 읽음으로써 그림 2(a)의 연결을 이룩한다. 그리고 Hopfield 모델에서 필요한

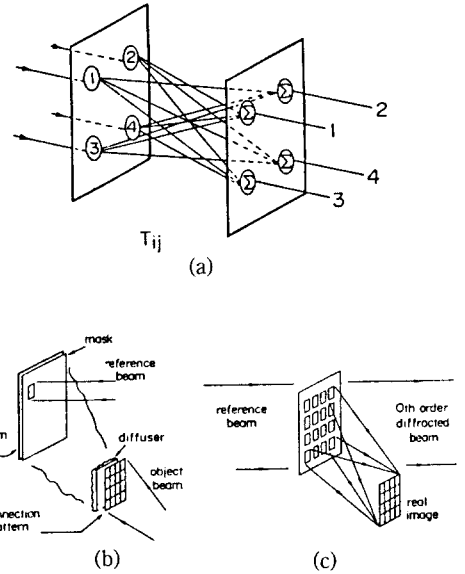


그림 2. 홀로그램을 이용한  $N^2$  광연결법: 고정식. (a) 원하는 임의의 광연결, (b) 홀로그램 각 픽셀의 기록, (c) 홀로그램의 재생.

thresholding과 feedback은 전기적으로 수행하였다. 그리고 이 방법과 Stanford 광행렬-벡터 곱셈기를 이용하여 고차연결회로를 구성할 수 있음을 보이고 실험하였다<sup>[14]</sup>.

위 연결방법은 한번 홀로그램 어레이가 제작되고 나면 연결강도를 바꿀 수 없다. 연결강도를 새로운 입력에 따라 줌으로써 신경회로망이 갖는 학습 기능을 실현하기 위해서 연결강도를 임의로 바꿀 수 있도록 하였다. 그림 3은 이를 위해 필요한 홀로그램 어레이의 기록과 재생을 나타낸 것이다. 즉 그림 3(a)에서와 같이 한 픽셀의 홀로그램을 균일한 물체빔의 영상을 만들어 기록하고, 기준빔의 공액 복소수 빔을 입사하면 그 픽셀에서 출력 신경부 전체로 균일한 세기의 광연결이 일어난다(기록된 홀로그램 픽셀은 그 일차 회절빔이 하나의 렌즈 역할을 하므로 광연결이란 그 픽셀의 영상이 출력부 전체에 맺히는 꼴이다). 이제 입력신경부의 모든  $N \times N$  픽셀에 대해 홀로그램 건판을 한 픽셀씩 이동하면서 동일한 방법으로 기록하고 위상공액파를 입사하면, 그림 3(b)에서처럼  $N \times N$ 개의 초점이 맺히며, 이는 렌즈어레이와 같은 형태가 된다. 그림 3(c)에서와 같이 보통의 렌즈 하나를 도입하여 영상이 맺히는 위치를 한곳으로 모으면 모든 입력픽셀의 영상이 출력부 평면에서 중첩되어 입력 픽셀의 각부분들이 대응하는 출력 평면의 각 부분으로 연결이 실현되는 것이다. 이 때, 그림 3(c)에서 모든

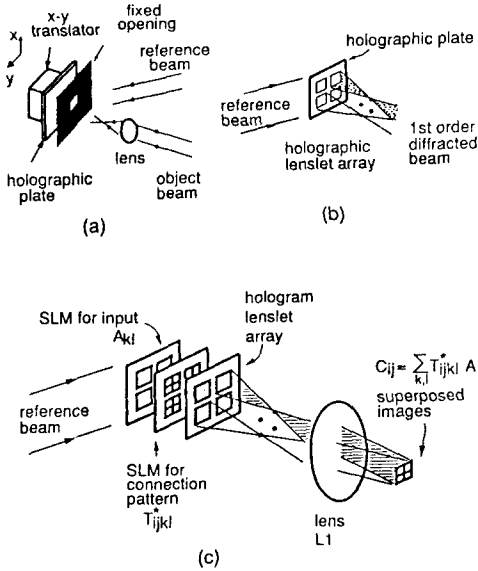


그림 3. 홀로그램을 이용한  $N^4$  광연결법: 변조식. (a) 홀로그램의 렌즈배열의 기록, (b) 홀로그램 픽셀들의 재생, (c) 홀로그램 렌즈 배열을 이용한 임의의 광연결구조.

픽셀마다  $N \times N$ 개의 subpixel을 두어(입력부 전체는 총  $N^2 \times N^2$  subpixel이 필요하다.) 이 subpixel의 빛 투과도를 조절함으로써  $N^4$ 개의 광연결세기를 조절한다. 이 방법을 사용하여 학습가능한 시스템이 될 수 있다는 것을 실험적으로 보였고, 이것으로 임의의 고차연결이 가능함을 보였다<sup>[15]</sup>. 이 광연결법은 최근에 개발된 High Definition 액정 display를 이용한다고 할 때 최대  $10^6$  연결수까지도 실현가능하리라 여겨진다.

위의 연결방법은 임의의 연결 및 그 연결세기의 변조를 가능하게하므로, 이 방법과 광굴절결정을 이용하여 동적 Hopfield 모델(학습할 수 있는 외적 모델)을 실현한 바 있고<sup>[16]</sup>, 신경회로망의 학습모델인 단층 인식자(Perceptron) 및 다층인식자(오류역전파학습모델)를 구현하는 실험을 성공적으로 수행하였다.<sup>[17-19]</sup> 이 때 실제 출력과 Target 영상간의 오차계산이나 thresholding은 personal computer로 수행하였으며 이 계산결과를 SLM에 나타내는 것은 Frame Grabber를 사용하였다. 물론 micro-channel SLM이나 액정 light value(LCLV)를 사용하면 이와 같은 연산까지도 순수광학적으로 수행할 수 있다. 최근에는 외부입력에 따라 인위적인 target 패턴을 주지 않아도 시스템 자체가 출력을 결정하는 자기형성 시스템을 연구하고 있다.<sup>[20]</sup>

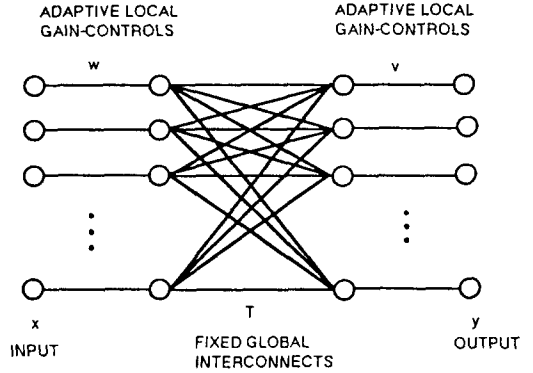


그림 4. TAG 모델의 회로 구조도.

또 Hopfield 모델의 각 bit에 중요도를 도입하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 보이고 이의 광학적구현법을 제시하였고<sup>[21]</sup>이 bit의 중요도를 최적화 기법에 의해 구할 수 있음을 보이고 최적의 bit 중요도를 갖는 correlation이 큰 벡터들도 잘 기억시킬 수 있음을 보임으로써 Hopfield 모델에 비해 우수하다는 것을 입증하였다.<sup>[22]</sup> 이 아이디어는 보다 일반적인 TAG(trained by adaptive gain) 모델로 확장되었다.<sup>[23-25]</sup> 그림 4는 이 모델의 회로 구조를 나타내었다. 입력 신경수를  $N$ , 출력 신경수를  $M$ 이라 할 때  $N \times M$ 개의 global interconnection  $T_{ij}$ 를 random하게 결정해 고정시킨다. 입력과 출력에 있는  $N+M$ 개의 단순 연결  $W_i, V_j$ (신경의 이득신이라고 말할 수 있다.)을 오류 역전파 모델과 마찬가지로 학습할 수 있는데 성능은 Perceptron보다 다소 못하지만 변화시켜야 할 연결강도 수가 대폭 줄어드는 잇점이 있다. 또  $T_{ij}$ 를 임의로 결정하지 않고, 기억해야 할 기본 패턴들에 대해 Perceptron 학습규칙에 따라 결정해 둔후, 이 기본 패턴들의 여러 가지 변형을  $W_i$ 와  $V_j$ 에 학습시키면 이 회로가 변형된 입력에 대한 융통성이 생겨서 필기체 문자인식 등에 사용할 수 있게 된다. 이 회로를 광학적으로 구현하면  $M+N$  픽셀을 갖는 SLM이 있으면 된다( $T_{ij}$ 는 고정이므로 필름이나 마스크를 사용하면 됨). 따라서 대규모(약  $10^6$  신경수)를 구현할 수 있으리라 여겨진다.

그 밖에 연상기억이나 인식에서 벗어나, 역행렬계산 혹은 선형연립방정식을 계산할 수 있는 회로를 신경회로망 개념(에너지 함수를 정의하고 이의 최소값을 찾는 최적화 문제)을 도입하여 설계하였으며 광학적으로 구현하였다.<sup>[27,27]</sup> 그리고 새로운 신경회로 개념에 입각한 A/D 변환기를 설계하고 광행렬-벡터 곱셈기를 써서 실

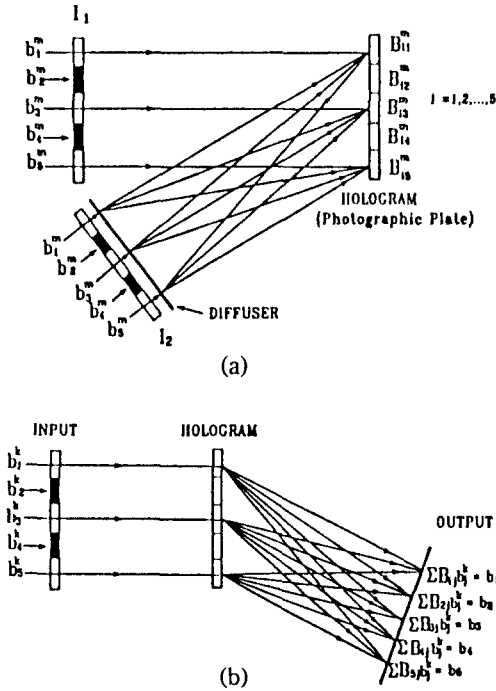


그림 5. 산란광 홀로그래피의 기록(a)과 재생(b)

험적으로 입증하였으며, 디지털광행렬-벡터곱셈을 수행할 때 발생하는 혼합 2진수를 순수 2진수로 변환하는 변환기를 설계하고 기초실험을 수행하였다.<sup>[28,29]</sup> 이들 연구는 적절한 연결세기  $W_{ij}$ 와 각 신경의 비선형 성질에 의해 어떻게 연상기억 또는 인식 이외의 “계산”업무를 수행할 수 있는가를 보여준 것이다.

한국과학기술원 물리학과 의 이상수 교수 연구실에서는, Caulfield가 제안한 산란광 홀로그래피를 이용한 연상기억시스템을 연구하고 있다. 산란광 홀로그래피는 그림 5(a)에서처럼 두 개의 2진 영상(하나는 기준빔에 해당하고 다른 하나는 물체빔에 해당한다.)을 홀로그램 건판에 기록되 물체빔은 diffuser로 산란시켜 입사시킨다. 산란광은 넓은 범위로 퍼지므로, 2진화된 기준빔 영상의 값이 1인 픽셀은 이 산란광과 홀로그램이 만들어질 때 물체빔 전체의 정보를 갖게 된다. 기준빔값이 0인 경우 그 픽셀의 격자는 형성되지 않는다. 따라서 두 2진영상의 외적이 홀로그램 건판에 기록되는 것이다. 여러 개의 영상쌍을 반복해서 기록하면 그림 5(b)에서처럼 기준빔 영상의 공역 복소수 빔으로 그와 쌍이되는 저장된 영상을 재생할 수 있다. 이 때 다른 영상쌍으로 인한 잡음광을 thresholding하여 제거해야 하는데 thre-

sholding level이 입력에 의존하는 값이어야 하고 영상을 단순히 명암으로 2진화하지 않고 서로 수직한 편광으로 2진화 하여야 영상기억성능이 향상됨을 보였다.<sup>[30,31]</sup> 그 이유는 편광 코팅을 하면 홀로그램 건판에 형성되는 회절격자가 Hopfield 모델에서와 유사한 연결행렬이 되기 때문이다. 바꾸어 말하면 홀로그램을 기록할 때, 동일방향의 편광빔은 격자무늬를 형성하고 서로다른 방향의 편광빔들만 간섭하지 않으나, 단순명암의 경우 명과 명은 격자를 형성하고 명과 암, 암과 암은 모두 격자를 형성하지 못하기 때문이다. 이 방법으로 2차 비선형 연상기억도 제시하고 실험하였고<sup>[32]</sup> 최근에 여러 각으로 회전된 영상을 반복하여 기록함으로써 회전불변 연상인식의 연구도 있었다.<sup>[33]</sup> 또 correlation이 심한 영상을 잘 저장하기 위해 Perceptron 학습 모델로 연결행렬을 구하고, 이를 산란광 홀로그램 건판에 수록하기 위한 실험을 수행하였다. 산란광 홀로그램은 두 벡터의 외적으로 나타낼 수 있는 연결행렬은 실현하기 쉬운데 임의의 연결을 실현하기가 어려우므로, Perceptron 학습모델에서 얻은 최종연결행렬을 어떤 벡터들의 외적 합으로 decompose 하여 이 벡터쌍(학습패턴이라 정의함)을 반복 노출에 의해 산란광 홀로그램에 저장한다. 즉, 실제로는 학습패턴 쌍들을 저장하고, 기억을 재생할 때 본래 저장하려는 벡터를 사용함으로써 마치 본래 저장하고자 하는 벡터들이 실제로 저장되어 있는 것처럼 보이게 한 것이다<sup>[34]</sup>. 이는 실시간 학습을 곤란하게 하고 학습패턴으로의 decompose를 여러 가지로 할 수 있는 등 문제점이 많으나 흥미로운 실험이며 많은 실험데이터가 필요할 것 같다.

광운대 전자공학과 김은수 교수 연구실에서는 다양한 광신경회로망 연구를 하고 있다. Multifocus Hololens를 사용하여 2차원영상의 연상기억을 실험하였는데, 저장하고자 하는 영상들을 공간적으로 분리하여 저장해두고 입력 영상을 Multifocus Hololens를 써서 많은 수의 replica를 만든 후, 이들과 저장된 영상과의 내적을 수행한다. 그리고 가장 큰 내적값을 얻은 후(thresholding) 각 위치에 해당하는 영상을 LED로 display하여 이를 카메라로 잡아 입력영상(역시 LCTV를 사용)으로 कै환시킨다.<sup>[35]</sup> 이는 내적모델에 해당하는 것으로 Liu 등이 제안한 바 있다. 그리고 백웅기와 Psaltis가 제안한 푸리에변환 홀로그램 연상기억을 LCTV를 사용하여 수행한 바 있고,<sup>[36]</sup> 이를 확장하여 몇개의 영상을 링크시켜 기억시킴으로써(즉 입력영상 A는 출력 B를, 입력 B는 출력 C를, 입력 C는 출력 A를 얻음으로써) 전체 메모리가 차례로 재생되어 나오도록 하였다.<sup>[37]</sup> 또 Perceptron를 LCTV와 컴

퓨터를 이용하여 실험하였고<sup>[38]</sup> 두개의 LCTV에 서로 시간차가 있는 video 신호를 입력시켜 차이가 있는 편광성분만 analyzer 통과시키는 Novelty Filter를 제안한 바 있다.<sup>[39]</sup>

부산대 전자공학과 김재창, 윤태훈 교수 연구실에서는,  $\{1, 0\}$  신경상태에 기초한  $N$  비트를 갖는 Hopfield 모델에서 저장된 벡터들이 갖는 bit 값 중에 1의 갯수와 0의 갯수의 불평등으로 생기는 기억성은 저하를 방지하는 방법으로, 각 저장벡터에 그 저장벡터와 상보되는 벡터를 덧붙여 두배의 bit 수( $2N$  bit)를 갖는 새로운 저장벡터의 집합을 구성해 보면 이것이 거의  $\{1, -1\}$  신경상태에 기초한  $N$  bit를 갖는 Hopfield 모델이 됨을 보였다.<sup>[40]</sup>

연세대 전자공학과 박한규 교수 연구실에서는 광굴절매질에 홀로그래프를 기록하여 연상기억 시스템을 얻는 연구가 있었고,<sup>[41]</sup> Hopfield 모델을 변형하여 내적에 기초한 양방향 연상기억을 LCTV와 multifocus hololens를 이용하여 구현한 바 있다.<sup>[42]</sup>

경북대 전자공학과 진성일 교수 연구실에서는 항공기 식별등 광영상정보처리에 여러 가지 연상기억모델을 적용하고 이들의 성능을 연구한 바 있다.<sup>[43]</sup>

전자통신연구소의 광통신 연구실에서는 SDF필터 개념을 이용한 연상기억을 제안한 바 있으며<sup>[44]</sup> 여러 개의 2진영상들을 1과 0으로 분류하는 위상필터(연결세기에 대응함)를 단층학습자를 이용하여 학습시켜 얻는 연구를 하였다.<sup>[45]</sup> 최근에는 비정질  $As_2S_3$  박막이 갖는 가역적인 광유도 비등방성을 이용하여 신경회로망의 연결 행렬을 실현하는 연구를 수행하였다.<sup>[46]</sup> 광행렬-벡터곱셈기의 구조에서  $As_2S_3$  박막을 연결행렬로 사용하고 입력벡터에 따른 출력결과에 따라 학습을 할 수 있도록 하였다. 그리고 동연구조 기초기술 연구부에서는 잔류광전도체 어레이를 이용한 전기광학적 신경회로망을 연구하고 있다.<sup>[47]</sup> 즉 npnp... 형태의 비정질 실리콘은 외부에서 빛을 인가하면 전도도가 증가하는데 이 성질을 이용하여 신경회로망의 연결행렬을 학습시킬 수 있다. 사실 전도도의 증가는 시간적으로 decay(지수함수 조합으로)하기 때문에 실제 학습에 이용될 때 학습 알고리즘의 수정이 요구되므로 이러한 알고리즘의 수정 및 기초실험을 수행하였다.

#### IV. 문제점과 전망

1985년 Psaltis 등에 의해 최초의 광신경회로망 연구가 시작된 이래 국제적으로 많은 연구가 있었다. 국내에서도

1987년부터 본격적으로 이 연구가 시작되어 이제 약 4년이 지났는데, 짧은 기간동안 비교적 많은 논문이 발표되어 활발한 연구 분위기를 느낄 수 있고, 이에 부응하여 많은 연구성과가 있었다. 그러나 아직까지 국내와 국내의 광신경회로망 연구결과는 초보적인 상태를 벗어나지 못하고 있음을 알 수 있다. 많은 연구원들이 그들의 논문 서두에 광학의 병렬성, 3차원 연결의 용이함, 그리고 이에 의한 대규모 집적성을 강조하고 반도체 기술에 비해 낫다고 주장하지만 그 논문의 내용에는 아직 반도체 기술에 의한 구현 집속도보다 높지 않으며, 어느 기술도 PC board를 이용한 simulator에 비해 우수한 점이 아직 나타나지 않는다. 2장에서 설명한 구현방법 (1)을 기준(개개의 신경수와 연결수가 정의되고 반도체 기술과의 비교가 쉬움)으로 볼 때, 국내에서 가장 많은 신경수가 구현된 것이 108개이었고<sup>[13]</sup> 나머지 광신경망은 대부분 30개미만의 신경수로서 저장된 영상의 수도 5개를 넘지 못하는 장난감 수준이다. 사실 외국의 경우도 마찬가지로 가장 많은 신경수가 구현된 것이 64개이고 대개 30개 내외이다. 따라서 새로운 구현방법을 연구하는 것도 중요하지만 그 보다 그 구현방법으로 얼마나 밀도 높은 신경수를 실현하며 얼마나 손쉽게 연결강도를 제어할 수 있는가에 대한 예측에 인색하지 말아야 할 것이다. 이와 같은 관점에서 볼 때 대규모 광구현을 위한 이론적 실험적 연구도 필요할 것이다.<sup>[24]</sup> 단지 "A 방법으로 B 모델을 광학적으로 실험해 보았다". 라는 연구보다 "A 방법은 B의 밀집도로 신경회로망을 구현할 수 있어서 C 방법보다 낫고 현재 기술로 실현할 수 있는 신경의 수는 대략 D로 추산할 수 있는데 실험실에서는 최대 E의 신경수까지 실현해 보았다. 그리고 성능 면에선 이러이러하다". 라는 연구가 수행되어야 한다고 본다. 신경회로의 이론적 모델 연구에 특별한 돌파구가 보이지 않는 한 scale-up이 가장 절실하다고 느껴지기 때문이다. 또 광신경망 연구의 구체적 응용이 쉽게 보이지 않는 것도 소규모 구현된 실험실 수준을 벗어나지 못하기 때문이 아닌가 생각된다.

사실 광학적 구현 방법을 몇 가지 단점도 갖고 있는데, 광학 소자의 정확한 정렬정도가 시스템 성능에 큰 영향을 미치며, 광종족기의 개발이 충분하지 못하여 몇개의 시스템을 cascading 하기가 어렵고, 기존의 컴퓨터 기술과 부합성이 적어 기술의 생존경쟁력이 약한 점 등이 있다. 지금은 반도체 기술에 의한 신경회로망구현과 경쟁상태에 있다. 현재 반도체 기술로 구현되고 있는 신경회로망의 신경수도 많은 것이 약 100여개 정도여서 광학 기술에 비해 나올 바는 없지만, 이 경쟁에서 살아 남기 위해서

광의 장점을 극대화 시키는데 많은 노력을 기울여야 할 것이다. 광신경회로망 연구가 사장되지 않고는 훌륭한 연구결과가 있느냐 없느냐에 달린 문제라고 생각되므로 이 분야를 연구하는 사람들의 분발이 절실한 시기라고 느껴진다.

참 고 문 헌

[1] DARPA Neural Network Study (AFCEA International Press. 1987).

[2] N. Farhat, "Optoelectronic neural networks and learning machines", IEEE Circuit and Devices Magazine Vol. 5, p. 32, 1989.

[3] D. Psaltis, D. Brady, X. -G. Gu, and S. Lin, "Holography in artificial neural networks", Nature **343**, p. 25 (1990).

[4] 신상영, 이수영, 장주석, "신경회로망의 광학적 구현", 전기학회지 제 38권 제 2호 p. 53, 1989.

[5] 신상영, "신경회로망의 광학적구현", 한국과학기술원 산학협동공개강좌 교재(신경회로망 컴퓨터: 이론, 응용 및 구현)내, 1990.

[6] D. Psaltis and N. Farhat, "Optical information processing based on an associative memory model of neural nets with thresholding and feedback", Opt. Lett. **10**, p. 98, 1985.

[7] N. Farhat, "Optoelectronic analogs of self-programming neural networks; architectures and methodologies for implementing fast stochastic learning by simulated annealing", Appl. Opt. **26**, p. 5093 (1987).

[8] D. Z. Anderson, "Coherent optical eigenstate memory", Opt. Lett. **11**, p. 56, 1986.

[9] G. J. Dunning, E. Marom, Y. Owechko, and B. H. Soffer, "All optical associative memory with shift invariance and multiple-image recall", Opt. Lett. **12**, p. 346, 1987.

[10] H. Lee, X. -G. Gu, and D. Psalits, "Volume holographics interconnections with maximal capacity and minimal crosstalk", J. Appl. Phys. **67**, p. 1194, 1990.

[11] 장주석, 정수원, 이수영, 신상영, "음연결이 없는 Hopfield 모델에 기초한 2차원 연상기억의 광학적 구현", 제 2회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, p. II-11-19, 1987.

[12] Ju-Seong Jang, Su-Won Jung, Soo-Young Lee, and Sang-Yung Shin, "Optical implementation of the Hopfield model for two-dimensional associative memoty", Opt. Lett. **13**, p. 248, 1988.

[13] 손만진, 장주석, 신상영, "Hopfield 모델에 입각한 12×9 패턴의 광연상기억", 마이크로파 및 전파전파\* 광파 및 양자전자공학연구회 합동학술 발표회 논문집, 제 12권, p. 50, 1989.

[14] Ju-Seog Jang, Sang-Yung Shin, and Soo-Young Lee, "Programmable quadratic associative memory using holographic lenslet arrays", Opt. Lett. **14**, p. 838, 1989.

[15] Ju-Seog Jang, Sang-Gil Shin, Sang-Yung Shin, and Soo-Young Lee, "Dynamic Hopfield-like network using a holographic lenslet array and a photorefractive crystal", Coference Record of Int' I Topical Metting on Optical Computing, p. 325, April 8-12, Kobe, Japan.

[16] 신상길, 신상영, 이수영, "홀로그램 렌즈배열을 이용한 단층인식자의 광학적 구현", 제 5회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, p. 126, 1990.

[17] 이상훈, 손만진, 신상길, 신상영, "다영상 분류를 위한 단층 적응 신경회로망의 광학적 구현", 제 6회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, p. 23, 1991. 2; 이상훈, 신상길, 신상영, 지윤규, "다영상 분류를 위한 단층 적응 신경회로망의 광학적 구현", 제 2회 신경회로망 연구회 학술대회 논문집, p. 103, 1991. 6.

[18] 송섭, 장주석, 신상영, "오류 역전파 학습모델에 입각한 다층인식자의 전기공학적 구현", 제 2회 신경회로망 연구회 학술대회 논문집. p. 93, 1991. 6.

[19] 장주석, 신상영, 이수영, "광학적 자기형성 시스템", 제 8회 광학 및 양자전자학 워크 논문집, p. 47, 1991. 7.

[20] Soo-Young Lee, Ju-Seog Jang, Sang-Yung Shin, and Chang-Sup Shim, "Optical implementation of associative memory with controlled bit-significance", Appl. Opt. **27**, p. 1921, 1988.

[21] Soo-Young Lee, Ju-Seog Jang, Jin-Soo Park Sang-Yung Shin, and Chang-Sup Shim, "Modification of the Hopfield model and its opticalimplementation for correlated images", SPIE Proc. 963, Optical Computing '88, p. 504, 1988.

[22] 고보연, 이혁재, 이수영, "고정연결과 가변가중치를 이용한 신경회로망 연구", 전자공학회 논문지 제 28 회 B편 2호, p. 61, 1991.

[23] Hyuek-Jae Lee, Soo-Young Lee, Sang-Yung Shin, and Bo-Yun Koh, "TAG : A neural network model for large-scale optical implementation", Neural Computation **3**, p. 135, 1991.

[24] 이혁재, 이수영, "대규모 광학적 구현을 위한 TAG 신경회로망 모델", 제 6회 파동 및 레이저 학술발

- 표회 논문집, p. 35, 1991. 2.
- [25] Ju-Seog Jang, Soo-Young Lee, and Sang-Yung Shin, "An optimization network for matrix inversion", in Neural Information Processing Systems, D. Z. Anderson ed, (AIP, New York, 1988), p. 397.
- [26] 박진수, 장주석, 이수영, 신상영, "신경회로망 모델에 기초한 역행렬 계산의 전기광학적 구현", 제 3회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집 제 3회 제 1호, p. 135, 1988.
- [27] Ju-Seog, Jang, Sang-Yung Shin, and Soo-Young Lee, "Optical neuralnet analog-to-digital converter", Opt. Lett. **14**, p. 159, 1989.
- [28] 장주석, 고상호, 이수영, 신상영, "광신경망 A/D 변환기 : 구현 및 응용", 전기학회 논문지 제 38권 제 10호, p. 795, 1989.
- [29] Seok Ho Song and Sang Soo Lee, "Properties of helographis associative memory prepared by polarization encoding process", Appl. Opt. **27**, p. 3149, 1988.
- [30] Seok Ho Song and Sang Soo Lee, "Experimental and numerical analysis of diffused light holographic associative memory", Appl. Opt. **27**, p. 3590, 1989.
- [31] Seok Ho Song, Sin-Chong Park, and Sang Soo Lee, "Optical implementation of a quadratic associative memory by using the polarization-encoding process", Opt. Lett. **15**, p. 1389, 1990.
- [32] Ho Hyung Suh and Sang Soo Lee, "Rotation invariant pattern recognition based on holographic associative memory", SPIE Proc. **1319**, p. 424, 1990; 서호영, 이상수, "홀로그램 연상기억체를 이용한 회전된 입력영상의 인식", 제 58회 물리학회보, 제 7권 1호, p. 128, 1989.
- [33] 서호영, 이상수, "적응학습 이론에 기초한 홀로그램 연상기억체를 이용한 한글 자모의 광학적 인식", 제 60회 물리학회보, 제 8권 1호, p. 150 . 1990 : Ho Hyung Suh and Sang Soo Lee, "Holographic associativ memory based on the adaptive learning consisted in the outer-product learning", scheduled for publication in 1991 issue of Appl. Opt.
- [34] 박인호, 서춘원, 이승현, 이우상, 김은수, 양은웅, "Multifocus Hololens를 이용한 실시간 2차원 Hopfield 신경회로망 모델의 광학적 실현", 전자공학회 논문지 제 26권 10호, p. 115, 1989.
- [35] 황의인, 이승현, 이우상, 김은수, "LCTV 공간 광변조기를 이용한 비선형 홀로그래픽 연상메모리의 광학적 실현", 전자공학회 논문지 제 26권 11호, p. 243, 1989.
- [36] Eun-Soo Kim, Seung-Hyun Lee, Woo-Sang Lee, "Optical implementation of a holographic heteroassociative memory system", Japanese J. Appl. Phys. **29**, p. L1304, 1990: Eun-Soo Kim, Seung-Hyun Lee, and Han-Kyu Park, "Implementation of optical holographic heteroassociative loop", Conference Record of Int' I Topical Meeting on Optical Computing, p. 150, April 8-12, Kobe, Japan.
- [37] 한종욱, 용상순, 김동훈, 김성배, 박일중, 김은수, "상용 LCTV의 편광 특성을 이용한 Perceptron 학습모델의 광학적 구현", 전자공학회 논문지 제 27권 8호, p. 148, 1990.
- [38] 이승현, 방승철, 김은수, "신경회로망에 근거한 Optical Novelty 필터의 구현", 제 2회 신경회로망연구회 학술대회 논문집, p. 97, 1991.
- [39] Sang-Hoon Oh, Tae-Hoon Yoon and Jae Chang Kim, "Associative memory model based on neural networks : modification of Hopfield model", Opt. Lett. **13**, p. 74, 1988.
- [40] Chang Suk Oh and Han Kyu Park, "Real-time Fourier transform holographic associative memory with photorefractive material", ICO Topical Meeting on Optical Computig, Toulon, France, Book of Summaries, p. 233.
- [41] 경승무, 길상근, 임종태, 박한규, "LCTV를 이용한 실시간 광연상메모리의 구현", 제 5회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집 p. 102, 1990. 2.
- [42] Sung-Il Chien, "Optical associative memories for image processing and object identification", Korea-USA Joint Workshop on Optical Neural Network, April 16-17, 1990. Seoul. Korea.
- [43] 정재우, 김홍만, 심창섭, 광종훈, "SDF 필터를 이용한 연상기억처리모델", 대한전자공학회 추계 종합학술대회 논문집 제 11권 1호, p. 451, 1988.
- [44] Hong Man Kim, Jae Woo Jeong, Chang Sub Shim, "Optical encoding of phase-only composite filters for discrimination of multiple patterns", Conference Record of Int' 1 Topical Meeting on Optical Computing, p. 132, April 8-12, Kobe, Japan.
- [45] 김홍만, 정재우, "신경회로망의 광학적 구현", 제 8회 광학 및 양자전자학 워크 논문집, p. 55, 1991. 7.
- [46] 김종문, 송석호, 유병수, "잔류 광전도체 어레이를 이용한 광전신경망의 학습성능 분석", 제 6회 파동 및 레이저 학술발표회 논문집, p. 29, 1991. 2.