제 8 회 광학 및 양자전자학 워크샵 논문집(1991. 7. 13)

광학적 자기형성 시스템
Optical Self-Organizing System

장 주 석　신 상 영　이 수 영

한국과학기술원　전기및 전자공학과

광굴절결정을 이용한 자기형성 시스템을 설명하고 특성 추출에 의한 패턴분류를 할 수 있음을 실험적으로 보였다.

1. 서 론

자기형성 시스템이란 외부의 인위적인 작용없이, 시스템 자신이 주어진 환경에 따라 그 내부적 구조나 형태를 일관성있게 스스로 구성하는 것을 말한다. 이와같은 물리적 시스템은 우리주변에서 쉽게 찾아 볼 수 있으며, 물리학이나 물리화학 그리고 천문학등에서 "패턴형성"의 영역으로 많이 연구되고 있다. 은하계나 별의 형성, 대류패턴 (예를 들면 Bènard 대류), 물질의 결정화 (일반적으로 위상천이), 화학적 반작용-분산에 의한 패턴형성 (예를 들면 Zhabotinski-Belusov 반작용), 그리고 incoherent 광에서 coherent 빔을 발생시키는 레이저, 고등동물의 두뇌를 구성하는 신경회로의 구조적 연결패턴형성 등이 그 좋은 예이다 [1,2].

이러한 자기형성 시스템을 기술하는 일반적인 수학적 모델은 아직 완전하지 않지만 다음과 같은 몇가지 중요한 공통된 특성을 갖는다[3]. 첫째, 양의 궤환에 의한 시스템 변동의 자기증폭 현상이 있다. 레이저공진기 내에서 spontaneous emission에 의한 광자중에서 거울면에 거의 수직으로 진행하는 것은 두 거울사이를 왕복하면서 증폭되어지는 것이라든지, 신경회로에서 Hebb의 규칙에 따라 신경연결부의 강도가 연결된 두 신경간의 활동이 동시에 활발할 때 증가되는데, 이때 증가된 연결강도에 의해 두 신경간의 활동이 동시에 활발할 확률이 더욱 증가된다. 즉 처음 연결강도의 변화가 커지는 쪽이면 더욱 커지게 되고 감소하는 쪽이면 더욱 감소하여 연결이 퇴화한다.

둘째, 시스템내의 변동들은 서로 협동한다. 즉 어떤 작은 규모의 유사한 변동들은 증폭되면서 서로 협동하여 동일 성질의 하나의 거대 변동조직을 형성시킨다. 이는 레이저 공진기내의 모드형성을 상상하면 쉽게 이해 될 것이다. 여러개의 유사방향 광자들이 증폭되면서 위상을 정렬하여 거시적 모드를 형성하게 되는데 상황에 따라 여러개의 모드들이 발생할 수 있다. 한편, 신경회로망에서 한개의 결합부로는 연결된 신경을 효과적으로 자극할 수 없다. 즉 여러개의 흥분성 (excitatory) 신경결합부들이 함께 활동적이어야 하고 이것들의 연결강도가 증가하면서 서로 협동하여 하나의 결합군을 형성하게 된다.

셋째, 제한된 이득원 혹은 에너지원에 의해 (거대) 변동군들 사이에 경쟁이 존재한다. 하나의 변동군이 증가하면 반드시 다른 변동군의 감소가 초래되는데 이것은 가장 강한 변동군이 큰 이득 또는 에너지를 취함으로써 약한 변동군들을 아사시킨다. 레이저 공명기에서 모드들이 형성되면서 어느 한개의 모드의 세기가 강해지면 (이득이 큰 모드가 있으면) 에너지원으로 부터 많은 에너지를 얻게되고, 다른 모드들중에 그들 모드를 유지하는 데 필요한 충분한 에너지를 공급 받지 못하는 것들이 있어서 (경쟁에 지는 것들이 있어서) 그들 빛의 세기가 감소하게 되는 것이다. 신경회로에서 신경들 사이의 연결강도의 증가는 그들 결합부 말단의 총면적이 넓어짐으로써 이루어지는데, 신경의 수상돌기 면적은 유한하기 때문에 결합부 간의 면적 다툼이 발생한다. 즉 몇가지 연결군들이 어느 한 신경에 신호를 전달한다고 하자. 어떤 연결군이 세기가 증가하면 그들 연결결합부 면적이 증가하게 되고 이는 반드시 다른 신경결합부 면적을 잠식하여 연결군간의 경쟁이 발생하게 되는 것이다.

근래에 관심이 높아진 신경회로망은 위와 같은 흥미로운 자기형성 성질을 갖지만, 이것이 정보처리 시스템이라는 데 주목해야 할 필요가 있을 것 같다. 왜냐하면 시스템에 가해지는 많은 정보에 의해 시스템이 자기형성을 함으로써 시스템 스스로가 입력정보들을 분류하고 학습을 할 수 있는 훌륭한 지적 정보처리기가 되기 때문이다. 신경회로망의 자

기형성에 관한 연구는 1973년 von der Malsburg에 의해 처음 개척되어, 개척자 자신은 물론이고 Grossberg, Kohonen 등 많은 연구자들에 의해 계속 이론적으로 연구되고 있다[4]. 그리고 최근에 자기형성 신경회로망모델을 구현하여 지적 소자를 만들려는 노력이 있는데 아직 초보적인 단계이다[5,6].

본 논문에서는 레이저 공진기와 유사한 구조의 광학적 자기형성 시스템을 적절하게 설계함으로써, 이 시스템이 자기형성 신경회로와 유사하게 패턴 분류및 스스로 학습을 할 수 있도록 하였고 기초적인 실험을 수행하였다[7]. 그리고 이 시스템에 대한 문제점을 논의하고 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

2. 광굴절 결정과 단방향 고리형 공진기

$BaTiO_3$ 나 $LiNbO_3$ 와 같은 광굴절 결정은 입사된 빛의 세기 분포에 따라 결정내에서 굴절율 변화가 일어난다. 이러한 굴절율 변화를 이용하여 실시간 홀로그램의 기록, 광정보의 저장등에 응용하는 연구와 2광파 혼합에서 발생하는 에너지 천이를 이용하여 영상의 증폭, 진동의 분석, 영상의 윤곽선 돌출, incoherent 빔의 coherent 빔으로의 변환, 그리고 novelty filter등과 같은 정보처리에 응용하는 연구등이 이루어지고 있다[8]. 특히 2광파 혼합에서 에너지 천이 현상을 이득매체로 이용하여 레이저와 마찬가지로 광공진기를 만들 수 있는데[9,10] 이 논문에서는 그림 1(a)와 같이 4개의 거울과 렌즈, 한개의 광굴절 매질 $BaTiO_3$ 를 이용하여 구성한 것을 생각하자. (이들 구성 요소의 갯수는 중요하지 않다.) 에너지 천이는 두빔의 진행방향 (k 벡터 방향)에 의해 좌우된다. 즉, $k_1 - k_2 = \Delta k$ 가 결정의 c 축과 동일 방향의 성분을 가지면 k_2빔에서 k_1 빔으로 에너지 천이가 발생(k_1 빔이 증폭됨)하고 그 반대면 에너지 천이도 반대가 되므로 c축 선택에 유의해야 한다. 그림 1(a)에서 우선 점선 사각형의 내부만을 생각하자. 결정에 입사되는 신호빔과 펌프빔의 세기를 각각s와 p로 나타내기로 한다. 이들 두 빔에 의한 격자의 형성과 이에 따른 결합파 방정식을 풀면, 정상상태에서 다음과 같은 신호빔의 증폭율 (이득) g를 얻을 수 있다.

$$\text{gain} = g = \frac{S'}{S} = \frac{1 + \dfrac{P}{S}}{1 + \dfrac{P}{S}\exp(-\gamma l)} \exp(-\alpha l) \quad (1)$$

여기서 S'은 결정을 통과한 신호빔의 세기이고 γ는 결정의 결합계수 l은 결정의 두께, α는 결정의 빔 흡수계수 이다. 식 (1)은, γ가 충분히 커다고 할 때, 신호빔의 세기가 증가할수록 그의 이득은 감소함을 볼 수 있다. 이제 공진기 전체를 생각하자. 펌프빔이 입사되면 공진기내에 존재하는 잡음광($BaTiO_3$의 경우 fanning 빔이 큰 역할을 한다.)중에서 적절한 방향의 성분들은 신호빔의 역할을 하여 증폭되기 시작하고 신호빔의 세기가 점차 강해지면 이득이 포화되기 시작한다. 이때 공진기 내부의 수동손실 (거울, 렌즈등의 표면에서 발생하는 불완전한 반사나 투과, 흡수등)과 결정에서 얻어지는 이득이 같아지는 지점이 공진기의 동작점이 된다. 이 수동손실에 의한 빔의 감쇄율을 L이라 하면, 결정의 입사면에 위치한 곳에서의 발진빔의 세기 so는 gxL=1로 부터

$$S^o = \frac{P\,(L\exp(-\alpha l) - \exp(-\gamma l)}{1 - L\exp(-\alpha l)} \quad (2)$$

이 된다. 여기서 한가지 주의할 점은 식 (1)과 (2)는 정상상태에서의 공진기 상태를 기술한 것이기 때문에 실제의 동역학은 알 수 없다. 실제의 동역학은 풀기에 너무 복잡하므로 (사실 다중모드발진의 경우 정확한 해를 얻기는 불가능하다.) 동역학을 위해서 직관에 의한 정성적 기술방법을 도입할 것이다.

지금까지 기술한 이 공진기도 모드패턴의 형성면에서 보면 레이저 공진기와 동일하므로 자기형성 시스템이라 할 수

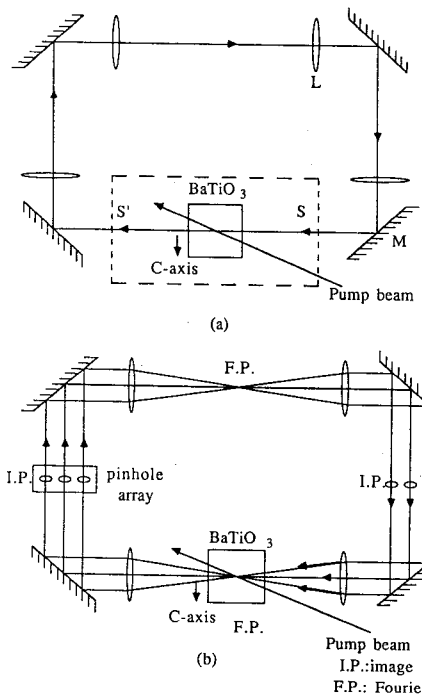

그림 1. (a) 광굴절 매질 $BaTiO_3$를 이득매체로 한 단방향 고리형공진기. (b) pinhole array를 첨가하여 공간모드를 분리시킨 경우.

있다. 그런데 이 공진기의 모드패턴은 중첩된 다중모드이어서 각 모드들 간의 경쟁력을 제어하거나 안정된 모드패턴들을 얻기가 어렵다. 따라서 그림 1(b)와 같이, 4개의 렌즈간의 거리를 모두 2f (f는 렌즈의 촛점거리)로하고, pinhole array를 두 렌즈사이의 중심에, 광굴절 결정을 pinhole array의 Fourier 변환 지점에 두면, pinhole의 수에 해당하는 이산된 공간모드를 얻을 수 있다. 각각의 공간모드는 역시 중첩된 다중모드이지만 이를 하나의 모드군으로 생각할 수 있다. 이들 모드군들은 하나의 이득원 (즉 펌프빔 P)에 의해 발진되지만 공간에서 각각 독립적인 광경로를 가지므로 각각의 모드군을 외부에서 조작할 수 있고, 이들 모드군들이 서로 어떻게 경쟁하는가를 쉽게 관측할 수 있고 이용할 수 있다. 그림 1(b) 역시 자기형성 시스템이라 할 수 있다. 왜냐하면, 공진기에 의한 잡음빔의 증폭, 각 모드군 내에서의 협동작용, 한개의 제한된 이득원 (p의 세기는 유한하므로)에 의한 모드군간의 경쟁등 서론에서 설명한 특성들을 모두 갖고 있기 때문이다.

이제 이 시스템의 정성적 동역학을 조사하기로 한다. 각 이산 모드군들의 발진 세기가 P에 비해 매우 작으면 이 시스템의 동역학은 다음과 같은 결합 미분 방정식으로 쓸수 있다[11].

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = (g_i - h)\, S_i - W_{ii} S_i^2 - \sum_{j \neq i} S_i\, W_{ij}\, S_j \qquad (3)$$

여기서 모두 n개의 핀홀을 가정하였고 S_i는 i번째 모드군의 빔세기이다. W_{ii}는 i번째 모드군의 자기포화항이고 W_{ij}는 모드군 i와 모드군 j간의 상호 결합항이다. 또, g_i는 이득값이고 h는 공진기내의 손실값이다. 이식은 S가 P에 비해 비록 작지만 비교될만한 값이 되어도 실험적 관찰에 의해 식(3)이 정성적으로 잘 맞는다는 것이 관찰된다. 또 식(3)에서 공간의 빔세기 분포는 무시하였다(공간 전체의 평균으로 생각할수 있다).

식 (3)의 행동은 비교적 쉽게 추측할 수 있다. S_i만 존재한다면 정상상태($\partial S_i/\partial t=0$)에서 $S_i = (g-h)/W_{ii}$ 가 되고, n = 2일 경우에는 4가지 가능한 해가 존재한다. 즉, (S_1^o, S_2^o) = (0, 0) 혹은 (0, a_2) 혹은 (a_1, 0) 혹은 (a_1, a_2)이다. 여기서

$$a_1 = [(g_1-h)W_{22} - (g_2-h)W_{12}]/(W_{11}W_{22} - W_{21}W_{12})$$
$$a_2 = [(g_2-h)W_{11} - (g_1-h)W_{21}]/(W_{11}W_{22} - W_{21}W_{12}) \qquad (4)$$

섭동분석에 의해 위 네가지 해의 (g_i-h), W_{ij}값의 크기에 따른 안정도 검사를 할수 있다. 구체적인 것은 참고문헌 [12]를 참조할 수 있다. 또 $(g_2-h)/W_{22} > (g_1-h)/W_{12}$ 이고 $(g_1-h)/W_{11} > (g_2-h)/W_{21}$ 이면 이 시스템은 플립플롭의 행동을 보이며, $(S_1^o, S_2^o) = (g_1-h/W_{11}, 0)$ 과 $(0, g_2-h/W_{22})$ 모두가 동시에 안정된 해가 된다. 그리고 $W_{12}W_{21}/W_{11}W_{22}$ 이 1보다 크면 자기 포화항에 비해 강한 상호 결합작용(상호억제)에 의해 플립플랍의 가능성이 있으나 이득이 큰쪽으로 바이어스의 가능성이 있으므로 반드시 플립플랍이 된다고는 할수 없다. 즉 $(S_1^o, S_2^o) = (g_1-h/W_{11}, 0)$ 혹은 $(0, g_2-h/W_{22})$ 중 하나만 안정해가 될수 있다. 일반적으로 $g_i = g_j = g$, $W_{ij} = W_{ji} = W$, $W_{ii} = W_{jj} = \theta$ (i, j = 1, 2, ... n)을 가정할 경우 $W > \theta$ 이면 이 시스템은 winner-take-all (WTA) net이 됨을 보일수 있다. 즉 n개의 안정해 $(S_1^o, S_2^o, \cdots S_n^o) = (g-h/W, 0, 0, \ldots)$, $(0, g-h/W, 0, 0, \ldots)$, ... $(0, 0, \ldots, g-h/W)$가 존재한다. 또 $\theta = W$ 이면 무한히 많은 해가 존재한다. 단, $\sum_i S_i^o = (g-h)/\theta$을 만족해야 한다. $\theta < W$ 이면 g-h가 양일 경우

$$S_i^o = \frac{g-h}{\theta + (n-1)W}, \quad (i = 1, 2, \ldots n) \qquad (5)$$

이 유일한 안정해가 된다.

우리는 여기서 어떤 해를 필요로 하는가? 그림 1(b)와 같이 자기형성 시스템에서 m개의 외부 입력 P_i를 차례로 샘플링하여 넣는다고 생각해 보자. 즉 매번 $\Delta t \ll \tau$ (결정시상수)인 동안 각각 영상펌프를 시스템 펌핑을 한다고 하자. 시스템은 $m\Delta t \ll \tau$ 이면 시스템은 P_i의 변화를 못느낀다. 이 시스템은 서로 다른 입력에 대해 스스로 서로 다른 모든 군형성을 하여야 할 것이다. 그런데 $W < \theta$ 이면 1개의 안정해 뿐임으로 모든 P_i에 대해 단 한개의 안정값을 주므로 시스템은 패턴분류를 할수 없다. $W = \theta$ 이면 무한히 많은 해가 존재한다. 즉, 무한히 많은 P_i에 대해 자기형성을 할수 있지만 외부 잡음이 문제가 된다. 즉, $\sum_i S_i = (g-h)/\theta$ 를 만족하는 모든 모드군 값이 안정해이므로 외부잡음에 의해 시스템이 표류할 것이다. $W > \theta$ 이면 n개의 해가 안정해가 되므로 $m \leq n$ 이면 서로 다른 m패턴에 대해 서로 다른 모드군 해를 형성할 가능성이 있다. 결국 우리는 $W > \theta$ 인 시스템을 얻어야 할 필요가 있는 것이다.

그러면 그림 1(b)의 시스템은 θ/W의 비가 어떤 값이 될 것인가 ? 결정내에서 각 모드군간의 각이 P와 S_i의 각에 비해 매우 작아서 각 모드군 간에는 효과적인 격자를 만들 수 없다고 가정하고, P와 각 S_i들간에 n개의 의미있는 격자가 있다고만 하면 n+1 개의 결합 파동방정식은 간단하게 풀리게 되며 정상상태에서

$$S_i' = S_i \frac{1 + \dfrac{P}{\sum_j S_j}}{1 + \dfrac{P}{\sum_j S_j}\exp(-\gamma l)} \exp(-\alpha l) \qquad (6)$$

가 된다. 바꾸어 말하면 그림 1(b)에서 $\sum_i S_i$는 그림 1(a)에서 S에 해당한다. 즉, 한개의 유한 이득원 P에 의해 $\sum_j S_j$가 일정할 수 밖에 없고 S_i' = constant × S_i, (i = 1, 2, ..., n) 이므로 이는 $\sum_j S_j$ = constant 를 만족하는한 S_i는 임의의 값을 가질수 있음을 말한다. 즉, 위에서 θ = W 인 경우이다. 실험을 수행하면 잡음광에 의해 각 모드들의 세기는 항상 변화하면서 각 모드군의 빔세기는 $\sum_i S_i$가 일정범위의 세기내에 있으면서 천천히 표류하고 있음을 관측할 수 있다. 즉, 실험에 의해서도 W가 θ보다 클수 없음을 보이게 된다. $W > \theta$ 를 만들어 WTA 동역학을 얻기 위해서는 모드군간들의 상호 억제를 강화시켜 주어야 한다. 이것의 한 방법은 각 모드군의 에너지를 일부 뽑아와서 다른 모드의 발생을 억제하도록 한다. 그림 2(a)는 신경회로망에서 WTA망을 얻기위해 사용되는 상호 억제 방법이다. 이와 같은 상호 억제를 위해 2광파 혼합의 에너지 천이 현상을 이용한다. 신호빔 에너지가 펌프빔으로 천이되면 펌프빔이 신호빔을 억제한다고 할수 있고 그 반대이면 펌프빔이 신호빔을 여기한다고 할수 있다. 펌프빔이 다른 모드군 빔이라면 다른 모드군이 한 모드군을 억제시키거나 여기시킬수 있는 것이다. 그림 2(b)는 모드군을 분리시켜 새로운 펌프빔을 만든 후 이것이 푸리에 평면에 있는 $BaTiO_3$ 에서 신호 모드군을 억제하지만 자기자신도 억제시키므로 이를 보상하기 위해 영상평면에 있는 또하나의 $BaTiO_3$에서 각 모드가 각기 자기 모드만을 여기시키도록 하였다. 이로써 전체 시스템은 그림 2(c)가 되고 n개의 안정해를 갖는 WTA 시스템이 되었다. WTA 시스템은 하나의 자기 형성 시스템이다. 펌프빔이 일정할때 이 시스템은 정상상태에서 항상 n개중 1개의 모드군이 발진하고 나머지는 발진하지 못한다. 어떤 모드군이 발진할 것인가는 초기 광잡음의 세기에 의해 좌우된다. 그림 2(c)에서 m개의 동일한 세기의 펌프패턴을 $m\Delta t$ 를 주기로하여 차례로($m\Delta t \ll \tau$ 이면 반드시 차례를 지킬 필요는 없다) 반복 입사 시킨다고 하자. 이때 공진기는 발진을 시작하면서 모드 패턴을 형성하기 시작한다. 펌프패턴의 모양이 충분히 달라서 즉 i번째 펌프패턴의 전장세기 E_{pi} 간의 내적 $\iint E_{pi} E_{pj}^* dxdy$, $(i \neq j)$ 이 거의 0에 가깝다면 즉, 펌프빔들 간의 장의 수직성이 존재하면 P_i와 S_j에 의한 격자 $G_{ij} \propto E_{sj} E_{pi}^*$ 는 P_k $(k \neq i)$에 대해 회절되지 않는다. 즉 $\iint G_{ij} E_{pk} dxdy \propto \iint E_{sj} E_{pi}^* E_{pk} dxdy \neq 0$ 이므로 P_k는 S_j 에 대한 기여도가 없다. 따라서 P_i가 on될때 S_j모드군이 발진하면 P_k가 on될때 반드시 S_j가 발진할 필요는 없다. P_i가 on될때 S_j가 발진하는 경우를 $P_i \Rightarrow S_j$ 사상(mapping)으로 나타내면 $m < n$ 일때 집합 $\{P_1, P_2, \ldots P_m\} \Rightarrow \{S_1, S_2, \ldots S_n\}$으로의 사상은 단사 함수가 됨을 설명한다. (m=n이면 전단사 함수가된다.) P_i가 하나 이상의 모드군에 동시에 사상된다고 가정하면 이는 WTA 동역학에 위배된다.

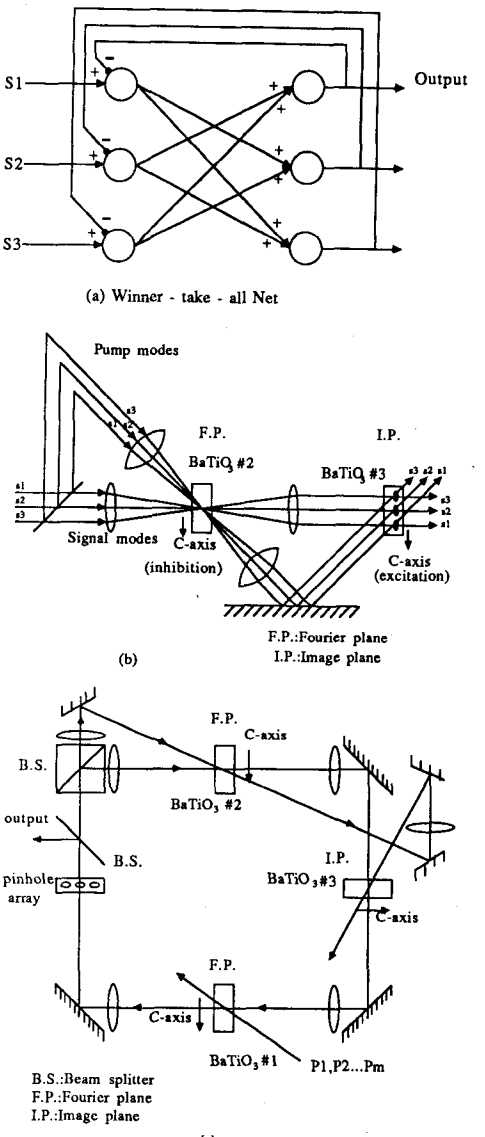

그림 2. (a) 신경회로망에서 winner-take-all회로의 구조. (b) 그림 1(b)의 공진기에서 공간모드간에 억제성 결합계수를 첨가하기 위한 광학구도. (c) 영상분류를 할 수 있는 자기형성 시스템의 전체 구조도. 그림 2(b) 의 구성이 포함되어 있다.

즉 P_i는 반드시 하나의 모드군에만 사상되어야 한다. 또 P_i와 P_j가 하나의 모드군 S_k에 사상된다고가정하면 (둘 이상의 펌프패턴이 하나의 모드군에 사상될 경우도 마찬가지로 논의할 수 있다.) S_k가 만나는 격자는 G_{ik}와 G_{jk} 두개가 된다. 그런데 P_i가 on 되었을 때, S_k는 G_{ik}에 의해 에너지를 얻지만 G_{jk}에 의해 회절된다. 즉 G_{jk}는 손실항으로 바뀌는 것이다. 손실량은 $\iint G_{jk} E_{sj} dxdy = \iint E_{pj}^* E_{sk} E_{sk} dxdy$

≠ 0 이 된다. 공진기에서는 가장 낮은 손실 경로로 발진이 일어나므로 두개 이상의 펌프패턴이 하나의 모드군에 사상되기가 어려워진다. 따라서 단사함수의 사상이 얻어지는 것이다. 그림 2(c)의 동역학은, P_j가 Δt동안 on될 동안

$$\frac{\partial S_i^j}{\partial t} = (g_j - \sum_{k\neq j} L_{ik} - h)S_i^j - \theta(S_i^j)^2 - \sum_{l\neq i} S_i^j W S_l^j \qquad (7)$$

superscript로 붙는 j는 펌프 j가 on되었을 때를 의미한다. g_j는 펌프 P_j에 기인한 이득원, L_{ik}는 $P_k(k\neq j)$ 와 S_i^k에 의해 현재까지 생겨져있는 격자로 인한 손실항이다. 즉 $L_{ik} = f(S_i^k \cdot P_k)$, $f(0)=0$이고 단조증가함수로 모델링할 수 있다.

만약 $\{P_i\}$내에 서로 수직이 아닌 패턴이 있으면 어떻게 될 것인가? 이는 이득항에 영향을 미치므로 문제가 다소 복잡해 진다. 예를 들어 P_i와 P_j 가 상당히 비슷한 한 패턴이라면 다른 패턴에 비해 P_i를 두배 노출시킨 결과이고, 이들 패턴에 의해 이득항 g가 증가하므로 시스템이 이들 패턴에 의해서만 발진하는 수가 생길 수 있다. 만약 이 두 패턴의 노출 시간을 적절히 줄여줌으로써 $g_{i,j}$를 다른 이득항과 동일하게 해주면 이 두 패턴이 하나의 모드군에 사상될 수 있다. 즉 시스템이 두 패턴을 동일한 것으로 간주하는 것이다. 이때 식(7)이 정성적 모델이어서 유사성의 판정기준을 정확히 예측하기는 어렵고 실험적으로 조사해 본 결과 약간의 유사성만 있어도 하나로 간주하는 경향이 있음을 보았다. 또 m > n 일 경우 단사함수 사상을 얻을 수 없다. 이때는 WTA 역학이 이루어 질 수 없으므로 그 결과를 예측하기 힘들다.

지금까지 설명한 자기형성 시스템의 간단한 실험적 증명을 위해 그림 2(c)를 구성하고 그 결과를 관측하였다. 실험에서 $BaTiO_3$ #1은 약 6x6x6 mm^3, #2와 #3은 모두 3x6x6 mm^3의 크기이다. 렌즈의 촛점거리는 모두 10 cm이고 pinhole array의 구멍수는 세개, 그 직경은 약 120μm 구멍간격은 약 400μm인 것을 사용하였다. 입력패턴의 수는 두개이고 그 모양은 서로 중복이 없는 모자이크나 그리드형태를 사용하였다. 각 패턴에 입사되는 빔세기는 300mW, 첫번째 결정의 시상수는 약 3초 이었고 Δt는 100msec로 하였다. 시스템을 구성하였을 때 WTA 행동을 보여주는 것을 확인하고 난 뒤 영상분류 실험을 수행하였다. 그림 3은 한가지의 자기형성을 하는 실험 결과이다. 그림 3(a)(b)는 각각 P_1, P_2 가 on과 off를 반복하는곳을 나타낸 곳이고 그림 3(c)(d)(e)는 3개의 모드군의 출력 세기를 나타낸다. 실재의 on 시간은 100msec 이지만 그림에서 보기에 편리하도록 신호의 샘플링을 20번씩 번갈아가며 했기 때문에 그림에서 turn on 시간이 마치 각각 약 2초씩인 것처럼 보인다. 그림 3에서는 패턴 (a)가 모드군 (c)와 동기되어 나타나므로 (c)와 사상이 일어나고 있고 패턴 (b)는 (d)와 동기되어 나타나므로 모드군 (d)와 사상이 일어나고 있음을 보여준다. 모드군 (e)는 초기에 경쟁에서 져서 점차 출력이 영으로 되어가는것을 보여준다. 실험을 여러번 실행할 때 패턴 (a)가 모드군 (d)와 (e)에도 사상됨을 확인할 수 있었다. 또 패턴 (a)와 (b)를 약간의 공통 성분을 부여하면 두 패턴 모두 세모드군중에 하나의 모드군에 사상이 일어남을 보여주었다.

4. 논 의

그림 2(c)와 같은 자기 형성 시스템은 얼마나 많은 패턴을 분류 저장할수 있겠는가? 만약, n이 큰수일때 최다 n개까지 분류가 가능할 것인가? 실험에서 WTA역할을 얻는것은 n이 10 이상이어도 비교적 쉬운 작업이다. 그런데 실험에서 얻어지는 최대 분류 가능한 패턴수 m은 언제나 4 이하로 제한됨을 관측하였다. 이것은 $BaTiO_3$ #1에서 제공할수 있는 이득이 제한되어 m이 커지면 시스템이 발진하지 못하기 때문이다. 즉 한개의 패턴이 격자를 만들면 다음 (m-1)Δt 동안 다른 패턴들이 그 격자를 지우는 역할을 하기 때문이다. 격자의 기록시상수와 지워짐시상수가 같다고 가정하면 이때 Δt 동안의 격자의 미소한 형성과 (m-1)Δt 동안의 격자의 미소한 지워짐을 무한합으로 나타내면 ($m\Delta t \ll \tau$ 가정), 격자의 변조율이 한개의 패턴으로 격자를 만들 때에 비해 1/m 으로 감소한다. 이는 결합파동 방정식을 풀 때 파의 결합계수 를 1/m 으로 감소시켜서 식 (1)과 같은 정상상태의 이득을 다음과 같이 줄인다.

$$g = \frac{S'}{S} = \frac{1 + \dfrac{P}{S}}{1 + \dfrac{P}{S}\exp(-\gamma l/m)} \exp(-\alpha l) \qquad (8)$$

여기서 $S = \Sigma_i S_i$, $S' = \Sigma_i S_i'$이다. 즉, 소신호 이득은 ($S \ll P$ 일때) $\exp(-\gamma l/m)$ 이 되어 이득이 (1)식의 g에 비해 $g^{(1/m)}$으로 감소함을 알수있다. m이 증가하면 이득이 격감함을 볼수있다. 시스템이 자기형성을 할 수 있기 위해서는 최소한 공진기가 발진을 해야 하므로 식(2)의 발진 조건에서, 최대로 자기형성을 할수있는 패턴수는

$$m < \frac{\gamma l}{\alpha l + \ln(1/L)} \qquad (9)$$

이 된다. 이는 얻을수있는 이득을 손실로 나눈것이다. 물론 빔 fanning 현상은 고려하지 않았으므로 식(8)은 정확하다고 말할 수 없다. 큰 이득을 갖는 결정들은 소신호이득 $\exp(\gamma l)$이 2000 정도 되므로 γl은 7.6이라하고 이득이 큰 결정은 도핑이 많이된 것이어서 αl = 0.69, 공진기에서 빔

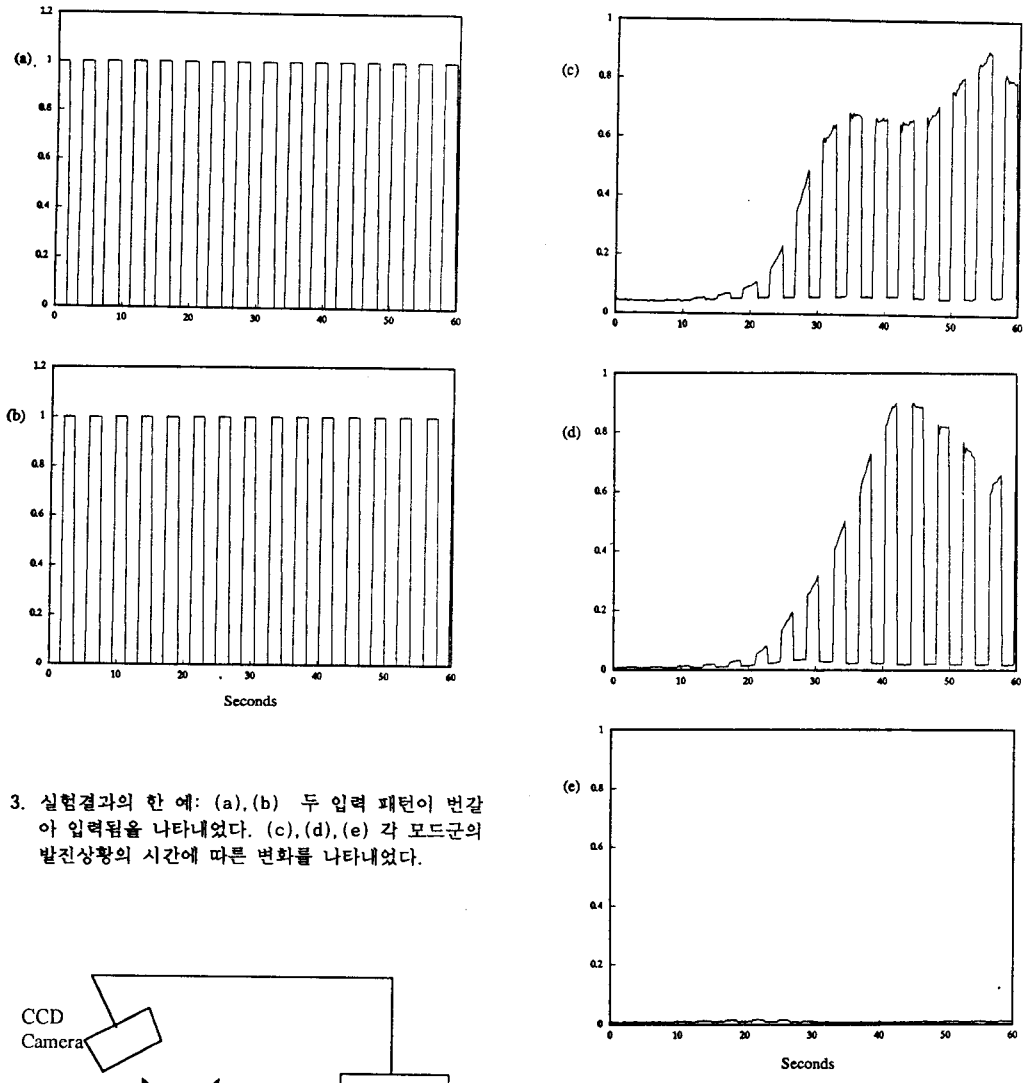

그림 3. 실험결과의 한 예: (a),(b) 두 입력 패턴이 번갈아 입력됨을 나타내었다. (c),(d),(e) 각 모드군의 발진상황의 시간에 따른 변화를 나타내었다.

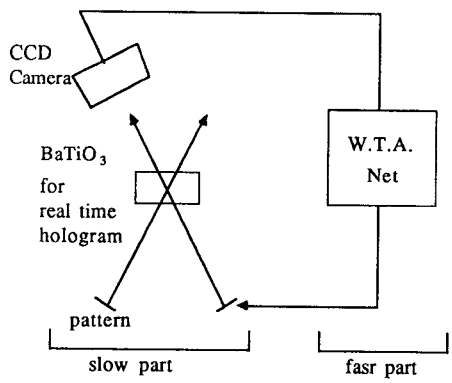

그림 4. 다른 구조의 자기형성 시스템. 이는 그림 2(c)의 시스템이 갖는 문제점을 다소 완화시켜줄 수 있다고 생각된다.

감쇄율 L을 0.9라 하면 m < 10 이 된다. 결국 이 시스템의 실제적 응용이 제한됨을 알 수 있다. 이 문제는 또 하나의 이득원을 두어 손실을 보상한다든지 몇개의 시스템을 cascading 해야 하지만 복잡성과 광잡음을 증가시키므로 좋은 방법이라고 생각되지 않는다. 실험실에서는 그림 4와 같은 자기형성시스템을 현재 연구중에 있는데 그림 2(c)에서 $BaTiO_3$ #1 이 광연결과 이득매체로 사용되는 것과는 달리 그림 4의 $BaTiO_3$는 광연결에만 사용되고 별도의 WTA회로가 입력패턴에 따라 기록되어질 모드군의 영상을 제공한다. 홀로그램의 기록이 WTA동역학에 비해 매우 느린 속도로이루어지면 홀로그램 기록매질 $BaTiO_3$는 항상 입력영상과 그에 의해 선택되어진 정상상태의 모드군을 보는 꼴이므로 자기학습이 이루어진다. $BaTiO_3$는 광연결에만 사용되므로 이득한계의 문제는 사라진다.

5. 결 론

본 논문에서는 광굴절 매질과 단방향 고리형 공진기를 이용한 광학적 자기형성 시스템을 설명하였고 이것이 어떻게 패턴분류를 수행하는가를 알아보고 실험을 하였다. 비록 초보적이지만 스스로 학습을 하는 최초의 순수 광학적 시스템이라는 데 의의가 있고 또한 물리적 동역학도 흥미롭다. 앞으로 실제적 응용이 가능한 진보된 시스템이 나오리라 기대된다.

참 고 문 헌

[1] H. Haken, Synergetics: An introduction (3rd ed.) (New York: Springer-Verlag, 1983).

[2] T. Kohonen, Self-organization and Associative Memory (New York: Springer-Verlag, 1984).

[3] C. von der Malsburg, "Network self-organization," in An Introduction to Neural and Electronic Networks, S. Zorneter, J. Davis, and C. Lau Eds (New York: Academic Press, 1990).

[4] See, for example, J. Anderson and E. Rosenfeld Eds, Neurocomputing (Cambridge, MA: MIT Press, 1988).

[5] Y. Arima, K. Mashiko, K. Okada, T. Yamada, A. Maeda, H. Kondoh, and S. Kayano, "A self-learning neural network chip with 125 neurons and 10K self-organization synapses," IEEE J. Solid-State Circuits Vol. 26, p. 607 (1991).

[6] T. Lu, F. Yu, and D. Gregory, "Self-organizing optical neural network for unsupervised learning," Opt. Eng. Vol.29, p. 1107 (1990).

[7] C. Benkert, V. Hebler, J.-S. Jang, S. Rehman, M. Saffman, and D. Z. Anderson, "Feature extraction by a self-organizing optical system, Conf. on Laser and Electro-Optics, May 1991, Baltimore, Md, U.S.A.

[8] P. Günter and J. Huignard eds, Photorefractive materials and their applications, Vol. 1: Fundamental phenomena (Berlin: Springer-Verlag, 1988).

[9] J. White, B. Cronin-Golomb, B. Fisher, and Y. Yariv, "Coherent oscillation by self-induced gratings in the photorefractive crystal $BaTiO_3$," Appl. Phys. Lett. Vol. 40, p.450 (1982).

[10] P. Yeh, "Theory of unidirectional photorefractive ring resonators," J. Opt. Soc. Am. B, Vol.2, p. 1924 (1985).

[11] D. Z. Anderson, "Competitive abd cooperative dynamics in nonlinear optical circuits," in An Introduction to Neural and Electronic Networks, S. Zorneter, J. Davis, and C. Lau Eds (New York: Academic Press, 1990).

[12] M. Sargent, III, M. O. Scully, and W. E. Lamb, Jr. Laser Physics (MA:Addison-Wesley, 1977), p.115.