

역동적 광순응 신경망을 이용한 색채 항등성의 구현*

한 광 희 · 정 찬 섭

연세대학교 심리학과

순응 이론은 광순응 과정을 통하여 조명에 대한 추상체의 감도가 떨어짐으로써 조명의 효과가 제거되고 색채 항등성이 발생된다고 가정한다. 그러나 순응과정이 지속되면 역제의 정도가 점차로 증가되어 추상체의 반응이 소멸될 수 있기 때문에 순응 이론에서는 눈운동에 의하여 수용기의 반응이 소멸되지 않도록 하는 것을 전제로 한다. 색채 항등성을 구현하기 위해서 순응 이론에서 제안된 색채 처리 원리에 근거한 순응과 눈운동의 기능이 반영된 신경망 모형이 개발되었다. 신경망은 신경 생리학적 연구들에서 발견된 색채 처리 과정에 관여하는 세포들의 기능을 반영하여 여섯 개의 층으로 구성되었다. 신경망의 여섯개 층은 망막에 있는 세종류의 서로 다른 파장 민감도를 가진 입력 광수용기, 회귀적인 역제 연결을 통해서 광수용기의 순응 효과를 반영하는 세포, 두번째 층의 출력을 선형 조합하여 파랑-노랑, 초록-빨강 및 검정-하양 차원으로 극성을 부여하는 기능을 하는 망막의 신경절이나 외측 시상핵에서 발견된 색채 대립 세포, 인접한 한 쌍의 대립 단위들로부터 주어지는 입력의 차이를 계산하여 역치를 적용하는 기능을 하는 시뇌의 17영역에서 발견된 이중 대립 세포, 시뇌의 17영역과 V4영역 사이에서 정보를 전달하는 세포, 그리고 시뇌의 V4영역에 있는 세포들을 각각 흥내내는 단위들로 구성되어 있었다. 눈운동과 순응에 의한 색채 항등성 실현가능성을 검증하기 위하여 순응 기능에 덧붙여 신경망의 첫번째 층과 두번째 층 사이에 영상 이동을 두어 눈운동 기능을 흥내내도록 한 동적 신경망 모형과 순응과 눈운동기능이 반영되지 않은 정적 신경망 모형으로 나누어 두 모형의 수행력을 비교하였다. 두 모형의 수행력을 비교한 결과에 의하면 동적 모형의 수행이 정적 모형의 수행보다 유의미하게 우수하였다. 정적 모형에 비하여 동적 모형의 수행이 우수하다는 것은 기존의 순응 이론들이 가정하고 있는 바와 같이 색채 대립 세포의 기능에는 포함되지 않는 순응과 눈운동이 조명의 효과를 제거하는데 중요한 기능을 한다는 것을 암시한다.

인간의 색채 경험은 신경 정보처리의 결과로 나타나는 주관적인 현상이므로 색채 시각 분야는 신경망을 이용하여 연구하기에 용이한 분야 중의 하나라고 할 수 있다. 지난 60년 동안에 신경과학과 정신물리학

에서 동물 색채 시각에 대한 원리들이 집중적으로 연구되었으며(Zrenner, Abramov, Akita, Cowey, Livingstone 및 Valberg, 1990), 그 연구 결과들이 신경망 모형을 개발하는 데 적용됨으로써 인간 색채 시각에 대한 이해뿐만 아니라 인공시각 체계를 개발하는데 여러 가지 유용한 통찰을 제공해줄 것으로 예상되었다. 그러나, 이러한 예상과는 달리 인간과 동물의 색

* 본 연구는 한국과학재단의 KOSEF 88010102 연구비와 1991년 한국통신 및 한국전자통신 연구소의 차세대 정보과학을 위한 신경과학의 기초연구에 대한 지원을 받아 수행되었음.

채 시각에 대한 최근의 신경생리학적 연구 진척에도 불구하고 인간의 색채 처리 원리를 만족스럽게 설명해 줄 수 있는 이론이나 인간과 유사한 정도로 색채를 지각하는 인공체계는 아직 개발되지 못한 단계에 있다.

인간의 색채 시각 원리를 이해하기가 어려운 이유는 한 사물의 표면에서 반사되는 빛의 파장과 강도만으로는 그 사물이 가진 고유한 색을 알 수 없기 때문이다. 인간처럼 색채인식을 할 수 있는 인공 시각 기관을 만드는 것이 매우 어려운 것도 같은 이유 때문이다. 색채를 인식하는 기계를 고안하는데 컬러 TV나 컬러 사진 등에서 색채를 표상하는 법칙을 그대로 적용하면 된다고 간단히 생각할 수도 있다. 그러나, 한 기계가 시각 장면에서 파장과 강도에 관한 정보를 측정, 기록 및 재생할 수 있다는 것은 그 기계가 색채를 인식할 수 있다는 것과는 매우 다르다(McCann, McKee 및 Taylor, 1976). 그 기계가 색채를 인식할 수 있으려면 한 사물의 표면에서 반사되는 빛에서 조명의 효과를 제거하고 대상의 표면이 가지고 있는 고유한 표면 반사율을 알아내야 한다. Jameson(1985)에 의하면 백열 등 조명하의 파란 색지에서 반사되는 빛의 파장강도분포와 일광 조명하의 노란색지에서 반사되는 빛의 파장강도분포가 동일한 경우에도 인간의 시각체계는 두 색을 구분할 수 있다. 조명에 따라 물체 표면에서 반사되는 빛의 파장강도분포가 동일하여도 하나는 파란색으로 다른 하나는 노란색으로 지각된다는 것은 대상의 표면으로부터 반사되는 빛의 파장과 강도만으로는 물체의 색을 알 수 없다는 것을 의미한다.

사물의 표면에서 반사되는 빛의 파장이나 강도를 아는 것만으로 그 표면의 색을 알 수 없다면 어떤 요인이 대상의 색채를 결정하는가? 대상 표면 위의 한 점에서 반사되는 빛의 파장강도분포(spectral power distribution)는 그 점에서의 파장 반사율(spectral reflectance)과 그 점에 떨어지는 광원의 파장강도분포의 곱으로 결정된다. 파장 반사율은 조명과는 독립적인 표면의 불변속성인 반면에 표면으로부터 눈으로 유입되는 빛의 파장강도분포는 조명 조건에 따라서 민감하게 변화된다. 자연상태에서 한 대상 표면으로부터 반사되는 빛의 파장강도분포가 변화되도록 만드는 조명 조건들은 하루 중 태양의 위치, 구름이 낀 정도, 인공 조명의 종류, 그림자의 유무, 광원으로부터의 거리

등등이다. 어떤 시각체계가 색채 정보를 처리함으로써 대상인식에 도움을 받기 위해서는 조명의 효과를 제거하거나 감소시킬 수 있어야 하고 대상의 파장 반사율에만 근거하여 대상의 색을 감지할 수 있어야 한다. 그렇지 않다면 그 체계에 의해서 감지되는 대상의 색은 조명이 바뀔에 따라 시시각각 변화되어 큰 혼란이 초래될 것이다. 색채 시각은 눈으로 유입되는 빛에서 조명의 효과를 제거하고 대상의 고유속성인 표면의 파장 반사율을 알아낼 수 있을 때에만 생태학적 가치가 있다. “색채 항등성(color constancy)”은 이와 같이 조명의 효과를 제거하고 대상의 고유한 표면 반사율을 추출해내는 능력을 말한다.

본 연구에서는 기존의 이론들이 색채 항등성을 어떻게 설명하는가를 분석하고 연결주의적 접근방법을 이용한 모의실험을 통하여 색채 항등성을 가능하게 하는 요인들을 밝히고 색채 항등성을 포함한 인간의 색채 지각 과정을 만족스럽게 설명해 줄 수 있는 색채 지각 신경망 모형을 개발하려 한다. 인간의 색채 정보 처리 원리에 근거한 신경망 모형을 개발하려면 경험에 의한 색채 항등성의 가소성, 색채 항등성의 실현한계, 색채 지각의 근간이 되는 신경 계산의 본질과 같은 색채 지각의 주요 문제 뿐 아니라 색채 정보 처리의 원리가 연결주의의 관점에서 어떻게 수용될 수 있는가의 문제를 미리 검토해 볼 필요가 있다.

색채 항등성에 관한 발생학적 가정(생득 대 경험)

색채 항등성은 한 세기 이전부터 지각 분야에서 널리 연구되어 온 지각 현상중의 하나이다. Helmholtz(1911)는 색채 항등성에 대하여 처음으로 체계적인 설명을 시도한 인물 중 하나로 알려져 있다. 그의 입장에 따르면 우리는 경험에 토대를 둔 무의식적인 추론을 통하여 사물의 고유한 표면 반사율을 알아낼 수 있다. 그는 “우리는 서로 다른 조명하에서 동일한 대상을 볼음으로써 조명의 차이에도 불구하고 대상의 색채를 정확하게 판단하는 것을 학습한다”고 믿었다(Woodworth, 1938, p.286).

Helmholtz와 동시대 인물이지만 지각의 거의 모든 문제에 걸쳐서 그와 대립적 입장을 취한 Hering(1920)은 색채 항등성을 일으키는 기제가 학습이 아니라 동공의 변화, 망막에서의 순응, 그리고 생리적인 대

비 기제와 같은 생리학적 말초 요인들이라고 주장했다. Hering은 또한 대상의 색채에 대한 우리의 경험은 “기억색”이라는 지위지니 않는 기억 흔적을 남기며, 이것이 일단 형성되면 불변하는 그 흔적을 이용하여 조명과는 독립적으로 대상의 색을 판단한다고 생각했다(Jameson과 Hurvich, 1989).

다른 유형의 지각 항등성에서와 마찬가지로 색채 항등성에서도 현존하는 연구 결과들이 두 개의 고전적 이론들 중 어느 하나만을 지지하지 않기 때문에 인간의 색채 항등성이 학습되는지 생득적인지에 대한 논쟁은 아직 해결되지 못하고 있다. 현대 색채 시각 이론에서는 고전적 관점을 있는 그대로 받아들이지는 않고 어느 정도 절충적인 입장을 취하고 있다. 그러나 물고기와 같은 하등 동물이 여러 가지 조명하에서 대상의 색을 일관성있게 구분할 수 있다는 신경 생리학적 연구발견(Ingle, 1985)에 의하면 색채 항등성 발현의 결정적인 단계는 색채처리과정의 하위수준일 가능성이 많다.

인간의 색채 항등성이 경험의 결과인가 아니면 생득적으로 결정된 것인가의 문제는 신경망에서 특정한 연결강도를 고정시킬 것인가 아니면 변화되도록 할 것인가를 결정하기 때문에 인간의 정보처리 원리를 모의 수행(simulation)하는 색채 지각 신경망을 고안하려고 할 때 중요한 역할을 한다. 시각 신경계가 계통발생적인가 개체발생적인가에 대한 이론의 가정에 따라서 연구자는 신경망의 모든 연결을 고정시키거나(Heisey와 Skrzyneck, 1987; Chung과 Han, 1990), 색채 처리의 초기 단계는 신경망의 연결을 고정시키고 색채에 대한 반응 선택이나 명명과 같은 출력 단계의 연결은 학습이 가능하도록 하거나(Sokolov와 Izmailov, 1983), 또는 모든 단계의 연결이 변화되도록 할 수 있다(Usui, Nakauchi와 Nakano, 1990; 정찬섭·한광희, 1990).

색채 항등성의 실현한계

인간의 색채 항등성 기제는 표준 조명으로부터 조명이 변화되는 정도가 적을 때는 비교적 그 기능이 완전하지만 조명이 변화되는 정도가 어떤 범위를 넘거나 또는 불규칙적인 조명 조건하에서는 그 기능이 불완전할 수 있다. 예를 들어 파장 반사율이 서로 다른 두 대

상이 정오의 일광 조명 조건에서는 구별될 수 있지만 실내 형광등 조명조건에서는 구별되지 못할 수도 있다. 이와 같이 파장별 표면 반사율이 서로 다른 데도 불구하고 특정한 조명 조건하에서는 구별되지 않는 대상 색의 집합을 그 조명 조건하에서 이성색(異性色, metamers)이라고 한다(Worthey, 1985; Wyszecki와 Stiles, 1982). 이성색이 존재하는 이유는 인간의 시각 기관이 파장 민감도가 서로다른 세종류의 추상체의 반응에 근거하여 색 정보를 처리하기 때문에 서로 독립적인 세개의 파장을 적절히 조합하면 인간의 색채 시각체계가 구별할 수 없는 서로 다른 파장강도분포를 만들어 낼 수 있기 때문이다. 이성색이 존재한다는 것은 인간의 색채 항등성이 불완전하다는 것을 나타낸다.

색채 항등성이 실현되지 못하는 또 다른 조건을 Helson-Judd효과(Helson, 1938; Judd, 1940)에서 찾아볼 수 있다. 모든 파장의 강도가 고르게 분포되어 있는 표준 조명하에서 무채색을 배경으로 하여 여러 수준의 흑백도를 가진 회색띠들을 보게 되면 모든 회색띠들이 무채색으로 보인다. 그러나, 만약에 그러한 회색띠로된 자극을 유채색 조명하에서 보게 되면 배경과 같은 흑백도를 가진 회색띠는 회색으로, 배경보다 밝은 띠는 조명과 같은 색으로, 그리고 배경보다 어두운 띠는 조명의 보색으로 보이게 된다.

Walraven, Benzschawel 및 Rogowitz(1989)는 인간의 색채 항등성이 얼마나 완전한가를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 피험자의 왼쪽 눈에 초록색 조명하에서 하나의 검사 자극을 제시하고 오른쪽 눈에 백색 조명하에서 35개의 비교 자극을 제시하여 색맞추기(color matching) 실험을 실시한 결과 초록색 조명하에서도 상당한 수준의 색채 항등성이 있다는 것을 발견하였다. 그들의 결과를 국제조명기구(Commission International d'Eclairage)의 CIE색 좌표(CIE color coordinates)로 나타낸 것이 그림 1에 제시되어 있다. 그림 1에서 흰원은 백색 조명하에서 자극 색지의 색채를 나타내고, 흰 사각형은 초록색 조명 아래서 자극 색지의 색채를 나타낸다. 그리고 검은 원은 백색 조명으로 비추어진 자극 색지와 동일한 색으로 짝지어진 초록색 조명에서 지각된 색채를 나타낸다. 그림에서 실선 화살표는 초록색 조명에 의해서 변화되는 물리적

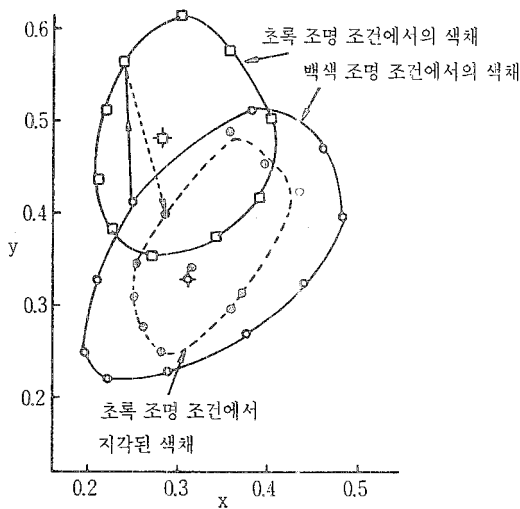


그림 1. 색채 항등성 효과를 보여 주는 자료. 그림에서 x, y축은 CIE색좌표를 나타낸다. 흰원: 백색 광원 조명상태에서 검사색지의 색채. 흰사각형: 초록색 광원 조명상태에서 검사색지의 색채. 검은원: 초록 광원조건에서 오른쪽 눈으로 본 색지와 백색 광원 조건에서 같다고 판단된 왼쪽 눈으로 본 색지. 예를 하나 들면 실선 화살표는 조명에 의해서 변화되는 물리적 색채변화 정도를 나타낸다. 점선 화살표는 색채 항등성 기제에 의하여 지각적으로 변화된 색채의 정도를 나타낸다(Walraven 등, 1989).

색채 변화의 정도를 나타내며, 점선 화살표는 색채 항등성 기제에 의하여 지각적으로 변화된 색채의 정도를 나타낸다. 실선 화살표가 시작된 점에서 점선 화살표가 끝난 점간의 차이는 색채 항등성에 의해서 원래의 색채가 복원되지 못하는 정도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 초록색 조명하에서도 대체로 색채 항등성이 유지되지만 두 화살표간의 차이는 인간의 색채 항등성이 완전하지 못하다는 것을 보여준다.

신경계산의 본질

인간의 시각 체계에서 이루어지는 신경계산의 본질을 이해하기 위해서는 색채 처리기제의 생리적 반응과 신경의 기능적인 구조를 아는 것이 중요하다. 전술한 바와 같이 색채 시각은 전통적으로 Young(1802)과 Helmholtz(1852)의 삼원색설과 Hering(1920)의 대립색설이라는 두 가지 이론으로 설명되어 왔다. 삼원색설에 의하면 모든 색채 경험은 세 가지 서로 다른 유형

(파랑, 초록, 빨강 정보를 각각 처리하는 신경섬유)의 감각기들로부터 나오는 신경 출력의 조합으로 결정된다. 반면에 대립색설에서는 일반적으로 사람들이 빨강, 초록, 파랑, 그리고 노랑이라는 네 가지 색을 고유색으로 보고하는 경향이 있다는 것과 붉은 색을 뺀 초록, 파란 색을 뺀 노랑이 존재하지 않는다는 현상적 경험에 근거하여 상호 대립적인 빨강-초록과 파랑-노랑 수용기가 존재해야 한다고 가정한다(자세한 논의는 Kaufman(1976) 참조). 서로 상반되는 것처럼 보이는 이 두 가지 이론은 망막에서 세 가지 유형의 추상체들(Wald와 Brown, 1964; Marks, Dobelle와 Mac-Nichol, 1964)이 발견되고 외측슬상핵(LGN: lateral geniculate nucleus)과 망막의 신경절(ganglion) 세포에서 세 가지 유형의 색채 대립 세포들(Wiesel과 Hubel, 1966; DeValois와 DeValois, 1975)이 발견됨으로 인하여 모두 생리학적인 지지기반을 갖게되었다.

삼원색설과 대립색설이 생리학적인 지지기반을 토대로 색채 처리 과정에 개입되는 감각세포 및 그 이후 수준에서 두 체계를 조합한 모형을 제시할 수 있다. Hurvich와 Jameson(1974)은 그림 2에 제시된 것처럼 두 가지 색채 이론을 조합한 신경회로를 제안하였다. 이 모형에 따르면 세 가지 유형의 감각기들로부터 나오는 신경 출력은 세 값이 한 조가 되어 각 색채 대립단위의 흥분정도를 결정하도록 연결되어 있다.

색채를 부호화할 때 각 유형에 따른 감각 세포의 역할을 알아내고 감각기와 색채대립 단위들을 잇는 신경회로 내에서 이루어지는 신경계산의 본질을 이해하기 위하여 여러 가지 실험적 연구들과 이론적 연구들이 수행되었다(D'Zmura와 Lennie, 1986; Valberg, Seim, Lee 및 Tryti, 1987; Jameson과 Hurvich, 1989; Chung과 Han, 1990). 색채 항등성과 관련하여 이 연구들로부터 확인된 가장 중요한 두 가지 요인은 순응의 효과와, 색채 대비와 색채 동화에 대한 수용장 크기의 효과이다.

Buchsbaum(1980)과 Maloney와 Wandell(1986) 등에 따르면 색채 항등성은 약간의 유채색을 뺀 조명하에서도 표준 조명 조건에서 보는 것처럼 대상의 색을 인식할 수 있는 것을 말한다. 여기서 표준 조명 조건이라는 것은 정오의 하늘빛의 혼합이다. 이것은 약 5,500K의 절대온도를 가진 블랙 바디(black body)에

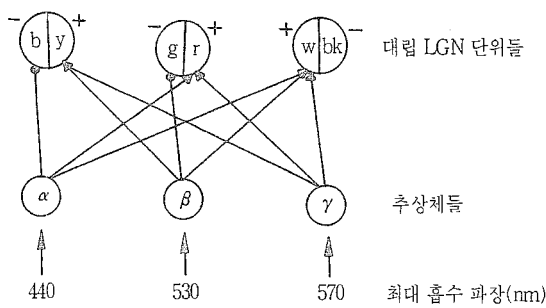


그림 2 Hurvich의 Jameson(1974)과 신경 배선 모형. 파장별 민감도가 서로 다른 세 종류의 추상체들에 시야의 특정 부위에 대한 색 정보가 입력된 후, 색채 대립적인 기능을 가진 LGN 단위로 전달되는 것을 보여 준다(검은 삼각형은 흥분성 연결을, 검은 원은 억제성 연결을 나타낸다).

해당되며 모든 파장에 걸쳐 비교적 광량(luminance)이 균일한 조명을 말한다. 순응 효과에 대한 연구 결과들에 의하면 감각기의 파장별 민감도는 조명의 색채 구성이 표준 상태에서 이탈되면 이탈의 정도가 크게 벗어나지 않는 한 이탈을 상쇄시키는 방향으로 변화된다(Jameson과 Hurvich, 1989).

Von Kris(1905)가 색채 항등성의 원인으로 색채 순응의 중요성을 강조한 이래 순응과정에 기반을 둔 다양한 색채 항등성 계산 모형이(Worthey, 1985; Worthey와 Brill, 1986; Arend와 Reeves, 1986; D'Zmura와 Lennie, 1986; Dannemiller, 1989) 개발되었다. Von Kris는 조명에 의해 결정되는 시각 자극의 상대적인 광강도에 비해서 추상체의 파장별 민감도가 감소함으로써 색채 항등성이 실현된다는 비율(계수) 법칙을 제안하였다.

색특정 신경절 세포와 LGN 세포는 망막 상에 색채 대립적 수용장을 갖고 있다고 알려져 있다. 이 세포들은 수용장의 중심과 주변에 떨어지는 빛의 분포 상태에 따라 색채 처리와 관련된 상이한 기능을 한다. Jameson과 Hurvich(1989)에 의하면 영상 구성요소가 추상체의 반경보다 작으면 공간적 색 혼합이 발생되고, 수용장에 비하여 상대적으로 작으면 어느 정도의 공간적 혼합이나 동화가 발생되며, 영상 구성요소가 수용장보다 크면 공간적 동화는 공간적 대비로 바뀌게 된다. 즉 영상의 공간적 배열에 따라 망막에서 색채가 부호화되는 양상이 달라진다는 것이다. Jameson과

Hurvich가 지적인 세 가지 경우 중에서 색채 항등성과 밀접한 연관이 있다고 추정되는 것은 마지막 경우인 연립 색채 대비기제이다. 그러나 연립 색채 대비가 어떤 과정을 통해서 색채 항등성을 일으키는지에 대한 견해는 연구자에 따라 다르다. Horn(1974)과 Marr(1982)등은 영상의 부분들로부터 반사되는 빛의 강도 변화를 평균화시켜서 결과적으로 완만하게 변화하는 조명의 효과를 분리해서 제거하는 것이 대비의 기능적 역할이라고 가정한다. 반면에 Dannemiller(1989)처럼 순응 과정을 이용하여 색채 항등성을 설명하려는 사람들은 감각기에서 발생하는 von Kris 유형의 순응만으로는 색채 항등성을 완전하게 설명할 수 없으므로 색채 대립세포에서 발생하는 순응과 외측억제를 가정하는데 이것이 바로 색채대비 기능이라는 것이다.

전통적으로 순응 과정을 통해서 색채 항등성 문제를 해결하려는 입장에서는 주로 시각 말초기체들의 기능적 역할을 이용하여 설명을 시도한다. 그러나 최근에는 색채 시각에서 대뇌 피질의 세포들도 중요한 역할을 담당한다는 입장이 대두되고 있다. Michael(1978), Livingstone와 Hubel(1984), 그리고 Hubel과 Livingstone(1987) 등은 복인도산 원숭이의 시뇌 17영역에서 수용장의 중심뿐만 아니라 주변에 대해서도 파장에 따라 선별적으로 반응하는 대립적 동심원 수용영역을 갖는 일군의 세포들이 존재함을 밝혀냈다. 이러한 세포들은 그것의 신경기능적 구조의 특성에 따라 “이중-대립 세포(double-opponent cell)”라고 명명되었다. Daw(1968)는 금붕어의 망막 신경절 세포들 중에서 이와 유사한 이중 대립적 기능을 가진 세포들을 발견하였다. 이중 대립 세포가 색채 처리에서 중요한 역할을 맡고 있다는 것이 분명한 것으로 보이나 구체적으로 어떤 기능을 어떻게 수행하는지는 정확하지 않다. 이중 대립 세포의 기능에 대해서 Marr(1982)는 색채 대비를 강조하는 역할을 한다고 가정하고 있으며, D'Zmura와 Lennie(1986), 그리고 Chung과 Han(1990) 등은 조명의 효과를 제거하는 과정과 관련된다고 가정한다.

색채 처리 단계중 어떤 수준에서 어떤 종류의 색채 속성이 처리되는지는 아직 명확히 알려져 있지 않다. 그러나 앞에서 언급되었듯이 Hubel과 Livingstone(1987) 그리고 White(1989) 등은 색채 정보가

다른 유형의 정보와는 독립적으로 처리된다는 생리학적인 증거들을 제시하였고, Livingstone과 Hubel(1987) 그리고 Livingstone(1988) 등은 여러가지 정신물리학적 연구 결과들에 대한 개관을 토대로 색채 정보 처리의 독립성을 강조하였다. 이렇게 독립적으로 처리되는 것으로 보이는 색채 정보는 시각 피질의 V4에 있는 세포들에서 부호화된다는 증거가 있다. Zeki(1980)는 복인도산 원숭이의 시뇌 V4영역에서 색채에 반응하는 세포들이 망막의 위상적 특징과는 관계없이 일관성 있게 대상의 색을 부호화한다는 것을 발견하였다. 따라서 색채 정보는 다른 유형의 시각 정보와는 독립적으로 처리될 가능성이 크다.

색채 시각에 대한 생리학적 자료들에 근거하면 색채 항등성은 망막의 추상체와 시뇌의 V4영역을 잇는 통로 중 어딘가에서 몇 수준의 신경 정보처리 단계를 거쳐 일어난다는 것을 추론할 수 있다. 첫째, 눈으로 유입되는 빛의 파장과 강도 정보는 망막 추상체의 유형에 따라 서로 구별되는 세 가지 값으로 부호화된다. 둘째, 추상체는 순응 과정을 통해서 조명의 효과를 부분적으로 제거한다. 셋째, 추상체의 신경 출력인 세 종류의 값은 색채 대립 신경절 세포와 LGN세포에 의해 대립적으로 처리되고 그 결과에 따라 빨강-초록(R-G), 파랑-노랑(B-Y), 검정-하양(BI-W) 차원으로 구성된 색채 공간에서 색채의 위치가 결정된다. 그러나 이 단계에서는 색채 대비와 어느 정도의 항등성이 이루어질 뿐이고 완전한 형태의 항등성이 실현되지는 않는다. 넷째, 이중대립 세포에 의해 대상 고유의 파장 반사율과 비슷한 수준의 항등성이 이루어진다.

시각체계에서 발생하는 색채 지각과 관련된 현상들을 설명하는 신경망 모형을 제안하기 위해서는 신경 계산의 원리들이 그 모형에 반영되어야 할 것이다. 특히 인간의 색채시각 원리를 응용하여 색채 인식 신경망 모형을 구현하려면 위에 언급한 네가지 신경처리과정이 신경망의 설계에 반영되어야 한다.

계산적 접근방법

인간의 색채지각에 관여하는 신경 처리의 모든 단계들이 상세히 알려져 있다면 인공기관을 사용하여 인

간의 시각을 흉내내기가 그렇게 어렵지 않을 것이다. 그러나 Lennie(1984)가 지적했듯이, 지난 60년간 신경생리학이 빠르고 괄목할 만하게 진보했음에도 불구하고 인간의 색채 지각 기관을 흉내내는 인공 시각 기관을 개발하기에는 아직도 응용 가능한 수준의 연구 발견이 부족하며 심지어는 연구되지 않은 부분조차 있다. 현존하는 신경 생리학적 연구결과에 의하면 계산 이론에서 참조할만한 생리학적 지식들은 순응 과정에 의한 감각기의 민감도 변화나 신경절, LGN, 대뇌피질 세포의 수용장 구조와 관련된 색채 대립적 기능이나 공간적 상호작용 특성들과 같이 다소 추상적인 수준에 제한되어 있다.

색채 지각에는 지금까지 보고된 추상적인 수준의 지식들을 적용해서 설명할 수 있는 것보다 더 복잡한 처리가 일어나는 것이 확실하다(Chung, 1991). 추상적인 수준의 지식들을 이용한다면 성공적인 계산 모형을 개발하기 위해서 추론해야 하는 것이 무엇인지를 명확히 알 수 있어야 하며, 그러기 위해서는 문제의 본질을 명확하게 규정할 수 있어야 한다. 문제를 명확하게 규정하는 효과적인 방법은 문제를 수리적으로 정의하는 것이다.

망막으로 유입되는 빛으로부터 대상의 파장별 반사율을 복원하는 문제는 역(inverse)을 구하는 문제로 개념화될 수 있다. 광수용기의 신경 출력은 조명과 표면반사율 그리고 수용기의 유형에 따른 파장별 민감도 함수에 의하여 결정된다. 여기서 수용기의 파장별 민감도 함수는 수용기의 유형에 따라 고정되어 있으므로 수용기의 반응 변수를 일으키는 요인은 조명과 표면 반사율이다. 그러므로 광수용기의 반응을 통하여 표면 반사율을 알아 내려면 조명에 의한 효과와 표면 반사율에 의한 효과를 분리해야 한다. 이것을 방정식의 형태로 나타내면 공식 (1)과 같다:

$$q_k = \int_{400}^{700} L(\lambda) Q_k(\lambda) d\lambda$$

$$= \int_{400}^{700} I(\lambda) S(\lambda) Q_k(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (1)$$

공식 (1)에서 q_k , $L(\lambda)$, $Q_k(\lambda)$, λ , $I(\lambda)$, 그리고 $S(\lambda)$ 는 각각 k 번째 유형에 속하는 수용기의 광자 흡수량,

반사되는 빛의 양, k 번째 유형 수용기의 파장별 민감도 함수, 파장, 조명의 파장별 강도 분포 그리고 대상의 표면 반사 함수를 나타낸다. 따라서 망막의 모든 위치에 걸쳐서 우리는 세 종류의 광수용기들로부터 얻어진 감각 출력에 대응하는 세 개의 방정식을 얻을 수 있다. 공식 (1)에서 표면 반사율 항 $S(\lambda)$ 에 대하여 방정식을 풀면 주어진 문제가 해결된다. 그러나 이 방정식에서는 $S(\lambda)$ 를 하나의 값으로 규정할 수 없다. 표면 반사율을 구하기 위한 공식 (1)과 같은 하나의 방정식에 $I(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 라는 두개의 미지수가 있기 때문에 $S(\lambda)$ 값을 구할 수 없다. Hurlbert (1986)가 지적했듯이 일상적인 상황에서 시각체계는 조명(irradiance)이나 표면 반사율(surface reflectance)을 알 수 없기 때문에 방정식보다 많은 미지수를 갖게 된다. 이러한 문제를 해결하는 한 가지 방법은 시각 체계에서 수행되는 과정을 그대로 적용하는 것이지만 앞에서 언급했던 바와 같이 현재의 생리학적 지식으로는 인간 시각체계에서 이루어지는 계산과정을 충분히 이해하기 어려운 실정이다.

신경생리학적 정보들이 부족한 상태에서 색채 지각 문제를 해결하는 다른 한 가지 방법은 연구자의 이론적 가정에 근거하여 표면 반사율을 구하는 문제에 제약을 가하는 것이다. 이러한 방법으로 문제를 해결하려는 계산적 접근 방법이 두 가지 있다. 한 가지는 세 개의 독립적인 색채 처리 체계를 가정하고, 영상의 상대적 흑백도(lightness)를 이용하여 색채 지각을 설명하려는 Land(1974; 1977; 1983; 1986)의 레티넥스(retinex) 접근 방법이다. 다른 한 가지는 문제를 간단히 하기 위하여 조명의 파장별 강도 분포와 표면 반사 함수를 제한된 수의 기저 함수들(basis functions)로 나타내고 조명의 효과를 제거하는 방법으로서 순응 효과를 이용하는 순응/기저 함수 접근방법이다.

1) 레티넥스 접근 방법

레티넥스 이론에 의하면 파장과 관련된 세 개의 독립적인 흑백도 체계(단·중·장파에 각각 하나씩)를 이용하여 지각되는 색을 신뢰롭게 예측할 수 있다. ‘레티넥스’는 흑백도에 근거하여 색채를 표상하는 체계가 망막(retina)과 대뇌피질(cortex) 사이에 존재한다는 가정을 토대로 Land(1974) 자신이

만든 용어이다. 레티넥스 이론이 시각 연구자들의 주목을 받은 이유는 일정한 파장 반사율을 가진 한 표면이 주변 배경의 파장별 강도 분포가 달라짐에 따라 다른 색으로 보인다는 것을 발견하였기 때문이다. Land(1964, 1974, 1977)는 색채 몬드리안 콜라쥬(color Mondrian collage)를 이용한 일련의 연구에서 색채를 결정하는 요인이 해당 영역에서 반사되는 파장 강도 분포만은 아니라는 것을 보여주었다. 그 결과로 Newton(1704) 전통을 따르는 고전적 색채 시각 이론들이 잘못 파악한 측면들이 드러나게 되었으며, 시각 연구자들은 색채 항등성의 원인을 재고하게 되었다.

Helson(1938)과 Judd(1940)에 의하면 레티넥스 이전의 이론에서는 순응을 이용하여 색채 항등성을 설명하려는 경향이 강했다. 순응 이론에 의하면 자극이 일정시간 이상 제시된 결과로 색채 항등성이 발생한다는 것을 함축한다. 반면에 Land(1977)는 자극 명멸처럼 짧은 시간에도 색채가 정확하게 지각되기 때문에 순응이 지각된 색채를 결정하는 가장 중요한 요인이라는 생각은 부적절하다고 주장했다. 그는 순응보다는 영상의 각 점에서 계산된 흑백도 값(retinex의 성분)들에 의하여 색채가 결정된다고 보고, 망막의 넓은 영역에 걸쳐서 발생하는 광도의 평균화 과정(luminance averaging process)이 색채 항등성을 일으키는 주요 기제라고 가정하였다.

레티넥스 알고리즘은 세 개의 파장 대역별 레티넥스 체계 각각에 대하여 세 개의 연속적인 계산처리를 가정한다. 첫째는 망막의 넓은 영역에 걸쳐서 광도를 평균화하는 처리이다. 둘째는 한 점의 절대적 광도와 평균 광도의 비율(그는 이 비율을 한 파장 대역에 대한 색채 결정 인자(designator)라고 불렀다)을 계산하여 영상의 각 점에서 상대적 흑백도를 계산하는 처리 과정이고, 셋째는 영상의 한 영역에 대하여 세 개의 독립적인 레티넥스 체계로부터 계산된 흑백도 값 한벌(영상의 한 점에 대한 3차원 벡터)을 이용하여 각 영상의 점을 3차원 색채 공간의 한 점으로 좌표화(mapping)하는 과정이다. 후에 Land(1986)는 불균등한 조명의 효과를 제거하기 위하여 처음의 두 계산 과정에 역치 함수(thresholding function)를 도입하였다. 수정된 알고리즘에 따르면

한 단위 영역의 흑백도 값(lightness value) 즉, 색채 결정인자는 해당 영역과 다른 영역 간의 광량 비율을 계산한 뒤 모든 비율의 평균을 취함으로써 계산된다. 그림 3은 수정된 Land(1986)의 레티넥스 알고리즘에 이용되는 두 영역 흑백도비 계산 과정과 평균화 과정에 이용되는 절차와 공식들이다. 그림에 제시되어 있듯이 두 영역간의 광량비를 계산하는 과정에서 해당 영역 i 와 멀리 떨어진 다른 영역 j 간에 광량비는 인접한 두 단위 영역 쌍 k 와 $k+1$ 간의 비율에 대수를 취한 뒤 합산함으로써 계산된다. 이때 완만하게 변화하는 조명의 효과를 제거하고 표면 반사율의 급격한 변화를 탐지하기 위해서 역치(threshold)를 설정하여 흑백도비율이 주어진 역치보다 작으면 단위 영역 k 와 $k+1$ 간의 비율은 0이 되도록 하였다.

Land와 McCann(1971), McCann, McKee 및 Taylor(1976) 등에 의하면 레티넥스 알고리즘은 지각된 색채를 신뢰롭게 예측할 수 있는 방법중 하나가 될 수 있다. 그러나 시각 모형을 평가하는 기준 중의 하나는 특히 연결주의의 관점에서 볼 때 그 모형이 생리학적으로 얼마나 현실성이 있는가이다. 이러한 맥락에서 레티넥스 알고리즘에 대하여 두 가지 중요한 질문이 제기될 수 있다. 첫째 레티넥스 알고리즘에서 색채 대립 단위(color opponent unit)들처럼 널리 알려진 생리학적 기제가 무슨 역할을 하는지가 분명하지 않으

며, 둘째 망막의 전체 영역에 걸쳐서 평균 광량의 비율을 계산하는 것이 과연 생리학적으로 타당한 근거가 있는지가 확실하지 않다.

색채 대립 단위의 역할과 관련해서 Land(1986)는 세 개의 레티넥스 체계가 수행하는 계산이 세 유형의 색채 대립 단위가 수행하는 기능과 유사하다고 제안했다. 그는 세 유형의 추상체 체계(즉, 레티넥스 체계)로부터 색채 대립 단위의 활성화 값을 계산하기 위한 연결 방정식이 만들어질 수 있다고 주장하였다. 레티넥스 알고리즘과 관련된 두번째 질문은 수행되는 계산의 본질과 관련된 문제이다. 앞에 제시된 알고리즘에서처럼 광량 비율에 역치를 적용하여 전체 시각장에 걸친 평균 광량과 비교하는 것은 조명의 효과를 제거하고 색채 경계를 탐지하는 효과적인 방법이지만 그와 같은 처리 과정이 시각 기관에 실제로 존재하는지는 의문이다. Land, Hubel, Livingstone, Perry 및 Burns(1983) 등은 어떤 상호작용인지 명확히 규정할 수는 없지만 두 눈에 들어온 시각 정보가 넓은 시각 영역에 걸쳐서 뇌의 뇌량을 통해서 교환될 수 있다는 가능성을 제시하였다. 그러나 지금까지 밝혀진 생리학 지식에 의하면 전체 망막상의 평균 자극 강도를 계산하는 기제가 존재할 가능성은 희박하며 그와 유사한 목적을 달성할 수 있는 어떤 다른 기제도 밝혀진 것이 없다.

Horn(1974)은 영상 강도에 근거하여 대상의 흑백도를 계산할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 표면 반사율을 계산하는데 이용되는 그의 가정은 Land의 가정과 매우 유사하지만 흑백도를 계산하는 데는 다른 전략을 이용한다. 광량을 평균화하는 Land(1974)의 방법 대신에 무채색 중심 흥분 수용장(on-center receptive field)과 동일한 작용을 하는 라플라시안 연산자(laplacian operator)를 이용하였다. 색채 시각에서 그러한 연산자의 기능은 시너에서 발견된 이중 대립 세포의 기능과 일치한다. 예를 들어, (빨강-초록)-(빨강-초록)((R-G)-(R-G))세포는 빨강색에 대하여 중심-흥분 세포(on-center cell) 혹은 망막 영상의 (빨강-초록)-여과 판(R-G filtered version)처럼 작용한다. 두 개의 입력 빨강-초록값에 대한 차이 연산자의 출력은 중심-흥분 수용장의 중심과 주변 간의 광량비와 동일하다. 그러므로 Horn의 알고리즘에 따르면

i 영역과 j 영역의 관계 :

$$R^A(i, j) = \sum_k \delta \log \frac{I_k + 1}{I_k}$$

$$\delta \log \frac{I_k + 1}{I_k} = \begin{cases} \log \frac{I_k + 1}{I_k} & \text{if } \left| \log \frac{I_k + 1}{I_k} \right| > \text{threshold} \\ 0 & \text{if } \left| \log \frac{I_k + 1}{I_k} \right| < \text{threshold} \end{cases}$$

영역 i 에 대한 관계들의 평균 :

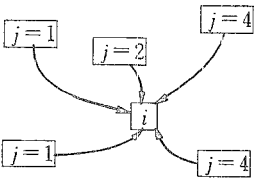
$$\bar{R}^A(i) = \frac{\sum_{j=1}^N R^A(i, j)}{N}$$


그림 3. Land의 밝기 알고리즘(Land, 1986에서 발췌)

흑백도비 또는 광량비는 국소적으로 결정된다. 그러나 Horn은 그와같이 국소적으로 결정된 흑백도로부터 전체 영상의 표준화된 광량비를 계산하는 방법을 명확하게 제시하지 않았다. 라플라시안 연산자의 기능은 밝기 항등성의 기제로 잘 알려진 외측억제(lateral inhibition) 기제의 기능과 동등하다(Kaufman, 1976). 라플라시안 연산자의 기능이 외측억제 기능과 동등하다는 것은 역치 이용 방법과 더불어 차이 연산이 강력한 항등성 기제로 작용할 수 있다는 것을 암시한다.

2) 순응/기저함수 접근방법

Von Kris(1905) 이래로 색채 항등성의 문제는 순응과 눈운동으로 설명될 수 있다는 입장이 있다. 이러한 관점에서는 문제의 수리적 구조를 단순화시킨 후 역 해결책(inverse solution)을 찾아 표면 반사율을 복원한다는 입장이다. 이 방법의 특징은 조명의 파장별 강도분포 함수와 표면의 파장별 반사율을 제한된 수의 주성분요소(principal component)들 또는 기저 함수(basis function)들의 선형 조합으로 단순화시킨 뒤 순응의 효과를 이용하는 것이다. Brill(1978), Buchsbaum(1980), Maloney와 Wandell(1986), D'Zmura와 Lennie(1986), 그리고 Danemiller(1989) 등의 연구는 이러한 방법을 이용한 대표적인 연구들이다. 특히 D'Zmura와 Lennie(1986)의 연구는 이러한 전통의 모형이 색채 항등성의 문제를 어떻게 다루고 있는지를 자세히 소개하고 있으므로 이들의 연구를 이용하여 순응/기저 함수 접근 방법을 이해하는 것이 용이하다.

그들의 모형에서 기본적 계산 틀은 공식 (1)에 나타나 있는 것처럼 k 번째 유형의 광 수용기에 흡수되는 광자의 양 q_k 는 시각 표면에서 반사되는 빛의 양 $L(\lambda)$ 와 전체 가시 스펙트럼에 걸친 광수용기의 파장별 민감도 함수 $Q_k(\lambda)$ 의 곱을 유한적분함으로써 결정된다. 여기서 빛 $L(\lambda)$ 는 표면의 한 점에서 파장별 반사함수 $S(\lambda)$ 와 조명의 강도 $I(\lambda)$ 의 곱이다. D'Zmura와 Lennie는 공식 (1)에서 두 개의 항 $I(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 는 다음과 같이 소수의 기저 함수들을 이용하여 근사치에 접근할 수 있다고 가정했다:

$$S(\lambda) \simeq \sum_{i=1}^3 n_i S_i(\lambda) \dots\dots\dots (2)$$

$$I(\lambda) \simeq \sum_{i=1}^3 m_i I_i(\lambda) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 n_i 와 m_i 는 두 선형 조합의 i 번째 계수를, S_i 와 I_i 는 기저함수의 i 번째 구성요소를 각각 나타낸다. 그들은 $n=m=3$ 일 때 세 개의 기저함수가 원래의 함수 $I(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 가 확산하는 공간과 거의 동일한 공간을 확산(span)한다고 가정했다. 또한 그들의 모형은 표면의 공간적 특성에서 기인하는 빛의 변산을 다루기 위해서 표면 반사와 관련된 변산을 정반사와 난반사로 구분하였다. 이러한 채택을 따르면 망막 영상의 한 점 $x=(x_1, x_2)$ 에서 표면 반사율 $S(x, \lambda)$ 는 다음과 같다:

$$S(x, \lambda) \simeq f_s(x) S_0(\lambda) + f_d(x) \left[\sum_{i=1}^3 n_i S_i(\lambda) \right] \\ = \text{정반사("specular")} + \text{난반사("diffuse")} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 함수 $f_s(x)$ 는 정반사 구성요소의 강도 변산을 나타내고, $f_d(x)$ 는 난반사 구성요소의 강도 변산을 나타낸다. $S_0(\lambda)$ 는 직접 구성요소의 기저함수를, 그리고 $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$, 그리고 $S_3(\lambda)$ 는 분산 구성요소에서 세 개의 기저함수를 각각 나타낸다. 그들의 이론에서는 $S_0(\lambda)$ 와 $S_1(\lambda)$ 함수는 모든 가시 파장에 대하여 동일한 강도 값을 갖는 것으로 가정한 반면에 $S_2(\lambda)$ 와 $S_3(\lambda)$ 함수는 "빨강-초록"과 "노랑-파랑" 대립 세포의 기능에 해당되는 두 가지 함수라고 가정하였다. $S_0(\lambda)$ 와 $S_1(\lambda)$ 기저함수는 동일하기 때문에 공식 (4)는 그들이 "흑백도"라고 부르는 하나의 항 $f_L(\lambda)$ 으로 묶일 수 있고 이 새로운 항을 추가하면 방정식은 다음과 같이된다:

$$S(x, \lambda) \simeq f_L(x) S_1(\lambda) + f_d(x) n_2 S_2(\lambda) + f_d(x) n_3 S_3(\lambda) \\ = \text{흑백도("lightness")} + \text{빨강-초록} \\ (\text{"red-green"}) + \text{노랑-파랑("yellow-blue")} \dots\dots\dots (5)$$

그림 4에는 표준 조명 하에서 세 개의 기저 함수 S_1 , S_2 , 그리고 S_3 가 확산하는 공간이 빨강·초록·파랑(R·G·B)을 세개의 축으로 한 색채 공간에서 어떠한 형태로 구성되는지 제시되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 정반사 구성요소 S_1 에 대응하는 축은 가상적인

입방체의 대각선 방향으로 3차원적 색채 공간을 통과한다. 반면에 두개의 기저함수 S_2 와 S_3 에 의하여 확산되는 공간은 S_1 축에 직교적이면서 S_1 축이 중앙을 지나게 되는 원형 평면이다. 그러므로 S_2 구성요소의 축은 원형 평면의 중앙과 빨강·초록(R·G) 평면의 대각선을 잇는 어떤 점을 통과한다. S_3 구성요소의 축도 유사한 방법으로 결정될 수 있다. 즉 그것은 S_2 에 직교적이므로 단순히 S_2 축에 직교적인 직선 상에서 어떤 점을 취하면 된다.

이제 공식 (2)에서 공식 (5)까지를 조합하면 공식 (1)은 공식 (6)과 같이 풀어 쓸 수 있다.

$$q_k(x) \simeq f_L(x) \left\langle \sum_{i=1}^3 m_i I_i S_1, Q_k \right\rangle + f_d(x)n_2 \left\langle \sum_{i=1}^3 m_i I_i S_2, Q_k \right\rangle + f_d(x)n_3 \left\langle \sum_{i=1}^3 m_i I_i S_3, Q_k \right\rangle$$

for $1 \leq k \leq 3$ (6)

여기서 '<'와 '>' 부호는 그 내부에 있는 항들의 적분을 나타낸다. 세 개의 광수용기에 대해서 각각 하나씩 모두 세 개의 그와 같은 방정식을 얻을 수 있으므로 세 개의 방정식을 행렬의 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$q(x) \simeq G(m) p(x) \text{ (7)}$$

여기서 $q(x)$ 는 광자 흡수 열벡터를, $G(m)$ 은 행렬 $\{ \langle I(m)S_i, Q_j \rangle \}$ 를, $I(m)$ 은 행벡터 $\{m_i I_i\}$ 를, 그리고 p

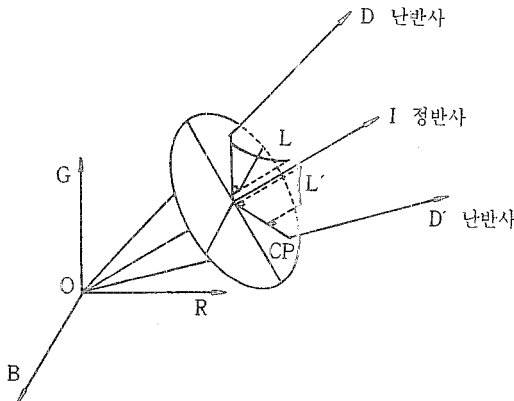


그림 4. 세 개의 기저함수들에 의해서 확산(span)되는 공간(D' Zmura와 Lennie, 1986에서 발췌).

$\{ \langle I(m)S_i, Q_j \rangle \}$ 를, $I(m)$ 은 행벡터 $\{m_i I_i\}$ 를, 그리고 $p(x)$ 는 열벡터 $(f_L(x), f_d(x)n_2, f_d(x)n_3)^T$ 를 각각 나타낸다. 문제를 해결하기 위해서는 공식 (7)을 표면 반사율 벡터 $p(x)$ 에 대하여 풀어야 한다. 그러나 공식 (7)에서도 반사율 벡터 $p(x)$ 에서 3개 그리고 조명 벡터 $I(m)$ 에서 3개 도합 6개의 미지수가 있는 반면 단지 3개의 방정식이 주어짐으로 문제가 풀리기 위해서는 미지수를 규정할 수 있는 추가적인 제약이 필요하다.

Zmura와 Lennie는 인간의 시각 체계가 눈운동과 감각기의 순응을 이용하여 평균 광자 흡수 정도를 계산함으로써 공식 (7)과 같이 제약이 부족한 방정식의 해(解)를 구할 수 있다고 가정하였다.

이들의 모형에 의하면 망막에 있는 광수용기는 영상의 한 부분에 대하여 순응을 하는 것이 아니라 눈운동에 의하여 비교적 영상의 넓은 영역에 걸쳐 입력되는 빛에 순응되기 때문에 결과적으로 순응정도에 대한 평균효과를 기대할 수 있다. 그러한 효과를 통해서 그 추상체는 망막의 한 부위에 떨어진 광자의 절대량에 의해서 반응하는 것이 아니고 넓은 시각장에 걸친 평균 입력 광자량에 대한 그점의 상대적인 밝기에 따라 반응하게 된다. 따라서 조명이 어느 한쪽 스펙트럼으로 치우친다면 한 유형의 모든 추상체들이 같은 정도로 순응하게 된다. 눈운동과 광수용기의 순응과정을 통해서 평균화된 수용기의 신호가 얻어지면 조명의 변화에 영향을 받지 않는 더욱 안정적인 색채 표상체계를 얻을 수 있다. 그러나 D'Zmura와 Lennie는 안정적인 색채 표상 체계를 얻을 수 있다는 것이 S_1 구성요소에만 적용되며 S_2 와 S_3 에는 성립되지 않는다는 것을 지적했다. 비록 그들은 그러한 과정이 생리적 과정에 대응되려면 공식 (7)에서 구체적으로 어떤 변화가 수학적으로 일어나야 하는가를 보여주고 있지는 않지만, 만약에 눈운동과 순응에 대한 그들의 설명을 받아들인다면 역행렬 $G(m)^{-1}$ 을 알아내는 어떤 방법이 존재해야 한다(Chung, 1991). 역행렬 $G(m)^{-1}$ 을 알아낼 수 있다면 다음과 같이 공식 (8)을 이용하여 $p(x)$ 를 구할 수 있다:

$$p(x) = G(m)^{-1} q(x) \text{ (8)}$$

D'Zmura와 Lennie는 처리의 첫 단계인 추상체 수준의 순응에서 S_2 와 S_3 구성요소에 해당되는 척도화된

신호에는 축들 간의 불일치에서 연유되는 어느 정도의 오류가 남는다는 것을 지적했다. 그들은 그러한 오류가 색채 대립 신경절 세포나 LGN 세포의 순응에 의하여 잘 통제될 수 있다고 생각했다. “빨강-초록” 그리고 “파랑-노랑”의 색채 대립기제는 $f_d n_2$ 항과 $f_d n_3$ 항에 반영되며, 이 두번째 단계의 순응을 이용하여 색채를 변별할 수 있는 안정적 체계가 유도될 수 있다. 이러한 두 단계의 순응이 일어나기 위해서는 세 개, 한 조의 색채 척도 항들이 공식 (8)에 포함될 필요가 있다. 대각 행렬 $D(m) = \{1/a < I(m) S_i Q_i >\}$ 을 이용해서 공식 (9)와 같이 척도화된 새로운 형태의 방정식을 얻을 수 있다:

$$p(x) = [D(m)G(m)]^{-1} D(m)q(x) \quad \dots\dots (9)$$

사람들은 일반적으로 사물을 지각할 때 색채와 강도를 서로 독립적인 속성으로 지각하는 경향이 있으며, 정신 물리학적 자료에 근거하여 구성된 색채 표상 체계인 색 입체(color solid)에서도 색상과 빛의 강도(명도)는 서로 독립적인 차원으로 구성되어 있다. 하나의 색채 시각 모형이 타당성을 지니기 위해서는 색채를 강도와는 독립적으로 기술할 수 있어야 한다. 그러나, 순응의 두번째 단계에서 나오는 출력은 3차원 공간에서 척도화된 벡터이므로 색채가 S_2 와 S_3 에 의해서 확산되는 원형 좌표 체계의 2차 평면으로 규정될 수 있으려면 어떤 조작이 필요하다. 이것은 3차원 출력 벡터를 그림 4에 있는 것과 같은 2차원의 원형 평면 좌표 체계에 투사해야 한다는 것을 의미한다. D'Zmura와 Lennie는 한 쌍의 빨강-초록(R-G)과 초록-빨강(G-R) 대립 세포의 출력을 논리곱(AND-gate)으로 연결시킴으로써 3차원 출력 벡터를 평면 좌표에 투사하는 것이 가능하다고 보았다. 그들은 이것이 색채 지각에서 대뇌피질에 있는 이중대립 세포의 기능이라고 가정하였다.

레티넥스 이론이나 순응/기저함수 접근법과 같은 계산 이론에서는 색채 지각 과정을 설명하기 위해 선택되어야 하는 문제들 및 그러한 문제들의 해결과 관련된 요인들을 명확하게 정의하고 있다. 신경망에서는 기본적으로 정보가 병렬 처리된다는 것을 가정하고 있기 때문에 이들 계산 이론들과는 문제를 해결하는 방식이 다르지만, 신경망 모형을 개발하는데 계산이론에

서 밝혀진 색채 지각의 원리를 반영하는 것이 큰 도움이 될 수 있다.

연결주의와 색채지각

병렬적 정보처리를 가정하는 연결주의는 신경망이라고 불리우는 유용한 개념적 구조를 제공해 준다. 신경망의 가치는 신경망을 학습시키는 것이 쉽다는 것과 학습에 의해서 자연적으로 얻어지는 다양한 기능적 속성에 근거하여 여러 가지 복잡하고 잘 규정되어 있지 못한 문제에 대하여 최적의 해를 구하는 능력에 있다. 이와 같은 신경망의 적응적 특성은 특정한 문제를 풀기 위해서 우리가 세부적인 알고리즘을 기술해야 하는 부담을 줄여준다. 그러나 신경망을 고안하는 단계부터 병렬처리의 관점에서 문제의 본질을 분석하고, 문제를 해결하기 위해서 정보처리의 어떤 단계들을 어떤 순서로 배열해야 하는가는 물론 여러 상이한 단계들간에 어떤 상호작용이 기대되는가를 결정해야 한다. 색채 시각의 문제도 예외는 아니므로 색 처리 신경망 모형을 개발하려면 사전에 고찰하여야 되는 문제들이 있다. 즉, 색채 정보는 다른 유형의 지각 정보와는 독립적으로 처리되는가, 신경망의 연결 패턴은 고정시킬 것인가 변화되도록 할 것인가, 색채 지각에서 비선형적인 문제를 어떻게 해결할 것인가, 색채 정보를 처리하기 위해서는 몇 개의 처리 단계가 적절한가, 그리고 색채 정보를 표준화 시켜주는 방법은 무엇인가 등의 다섯가지 문제들이 미리 검토되어야 한다.

1) 색채 처리의 독립성

대부분의 색채 시각 모형들은 색채가 다른 유형의 지각 정보와는 독립적으로 처리된다는 것을 기본적으로 가정하고 있다(Land, 1986; D'Zmura와 Lennie, 1986). 색채 정보가 독립적으로 처리된다는 가정은 Hubel과 Livingstone(1987), Livingstone(1988) 등의 생리학적 연구 발견들에 의하여 반복적으로 지지되었다. 그러나 같은 광도(equ luminance)의 서로 다른 색채들로 이루어진 자극 상황에서는 명암 정보에 의하여 경계선을 탐지하는 것이 불가능하므로 색채 처리를 통하여 경계선과 윤곽이 탐지되어야 한다. 따라서 색채 대비나 색 경계의 탐지는 색채 처리 과정에서 설명되어야 하며, 타당한 색채 시각 모형이라면 색채 대비나 색 경계 탐지 과정을 설명할 수 있어야 한다.

Horn(1974)의 차이 알고리즘이나 Land(1964)의 레티넥스 알고리즘에서처럼 차이 연산이나 비율 연산 그리고 역치의 개념을 채택하고 있는 흑백도 알고리즘들은 색채 대비의 문제를 직접적으로 다룰 수 있으므로 색채 경계를 처리하는 기본적인 기제를 갖추고 있다. 그러나 순응 알고리즘은 색채 대비에 영향을 받지 않으므로 색채 경계를 처리하기 위해서는 어떤 추가적인 기제를 가정하여야 한다. 신경망을 이용한 접근 방법에서는 색채 대립 단위들을 구성하고 그 단위들간에 정보를 주고 받을 수 있는 기제를 두면 이러한 문제는 쉽게 해결된다. 즉 대립 단위들간에 연결로를 가정하여 외측억제의 기능을 수행하도록 하든지 또는 Heisey와 Skrzyneck(1987), Chung과 Han(1990), 그리고 Chung(1991) 등이 제안한 모형들처럼 이중 대립 세포의 기능을 수행하는 단위들을 가정하는 모형이면 색채 경계를 탐지하는 문제를 해결할 수 있다.

2) 연결 패턴의 가소성 : 적응망 대 고정망

색채 지각은 연결주의적 접근 방법을 적용할 수 있는 이상적인 주제로 보이지만 지금까지는 소수의 신경망 모형만이 개발되었다(Heisey와 Skrzyneck, 1987; 정찬섭·한광희, 1990). 이렇게 신경망의 개발에 소홀하게 된 주된 이유는 색채는 어떤 말초적인 고정 기제에 의하여 결정된다는 가정과 색채 지각의 문제는 엄격한 알고리즘을 통해서 풀릴 수 있고 또 그래야 한다는 견해가 시각 연구자들 사이에 지배적이기 때문이다(Chung, 1991).

색채는 고정된 기제에 의하여 처리된다는 가정에 연결강도가 변하지 않는 고정형 신경망을 개발할 수도 있다. 그렇지만 이러한 경우에는 언제라도 그것을 더 명백한 알고리즘으로 다시 쓸 수 있기 때문에 신경망을 이용한 접근방법은 별로 큰 도움이 될 것 같지 않다. 따라서 신경망 모형의 학습 능력을 이용할 필요가 없다면 신경망 모형을 이용해서 얻을 수 있는 장점이 적어진다. 예를 들면 정찬섭과 한광희(1990)는 인간의 색채 시각 기제에서 색채 대립 과정에 대한 그들의 가정을 확인하기 위해서 적응형 신경망(adaptive neural network)을 이용하였다. 이들의 색채 신경망은 한쪽으로만 정보가 진행되는 2개의 층을 가진 LGN 수준의 단위들로 구성되어 있

었다. 즉, 첫째 층은 단(B), 중(G), 장(R)파를 처리하는 광수용기에 비유될 수 있는 3개의 입력 단위들로 구성되어 있었으며, 둘째 층에는 LGN에 있는 빨강-초록(R-G), 초록-빨강(G-R), 노랑-파랑(Y-B), 파랑-노랑(B-Y), 그리고 하양-검정(W-B1) 세포에 비유될 수 있는 5개의 출력 단위들로 구성되어 있었다. 그들은 정신물리학적 실험 결과를 이용하여 신경망을 훈련시킨 결과 학습후에 신경망이 그림 2에 제시된 Hurvich와 Jameson(1974)의 모형과 매우 유사한 연결 패턴을 보인다는 것을 확인하였다.

3) 비선형성 문제

공식 (1)에서 볼 수 있듯이 색채지각의 문제는 비선형적이다. 비선형성의 문제는 공식 (1)에서 두 개의 계산 과정과 관련된다. 하나는 표면 반사광을 결정하는 단계에서 표면 반사율과 조명의 파장별 강도 분포 간의 곱 관계이고, 다른 하나는 감각기의 출력을 결정하는 단계에서 표면 반사광과 감각기의 파장별 민감도 함수의 곱 관계이다. 만약에 표면 반사율과 조명의 효과가 선형적으로 분리될 수 있다면 색채 항등성 문제를 해결하는 것이 용이해진다. 인간의 시각 체계는 이러한 비선형성의 문제를 수용기에서 대뇌로 이어지는 여러 단계의 신경 처리에 의해서 해결하는 것으로 보인다.

조명과 반사율의 곱 관계는 대수를 취함으로써 선형적으로 분리될 수 있다. 대수로 표현하면 특정 파장 λ 에서 표면으로부터 반사되는 빛의 강도 $L(\lambda)$ 는 조명의 강도 $I(\lambda)$ 와 표면 반사율 $S(\lambda)$ 의 단순한 합이 된다. 그러나 하나의 광수용기는 넓은 대역의 광파장에 걸쳐서 반응을 하기 때문에 수용기에 입력되는 빛의 강도(표면에서 반사되는 빛의 강도)는 모든 가시파장에 걸쳐 $S(\lambda)I(\lambda)$ 를 유한적분한 것이 된다. 이와 같은 적분항에 대수를 취하면 $I(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 를 분리하는 것이 어려워진다. 순응 이론가들은 이러한 문제를 풀기 위해서 D'Zmura와 Lennie(1986)의 모형에서처럼 함수 $I(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 를 소수의 기저 함수들로 분할하여 해결을 모색한다(Hulbert, 1986). 반면에 흑백도 알고리즘에서는 $I(\lambda)$ 와 $S(\lambda)$ 를 분리하는 별도의 체계가 필요하지 않기 때문에 이와 같은 비선형성 문제를 특별히 고려하지 않는다.

신경망 접근방법에서는 신경망에 은닉층(hidden layer)을 추가하고 역전파 알고리즘(back propagation algorithm)을 이용하여 학습시킴으로써 비선형성 문제를 해결할 수 있다. 실제로 몇몇의 연결주의자들(Usui 등, 1990; Nakauchi 등, 1990)은 이러한 방법으로 색채처리 신경망을 구성하였다. 그러나 고정형 신경망을 이용하게 되면 비선형성의 문제를 해결하기 위해서 특수한 함수들을 사용하여야 할 것이다.

비록 신경망에 은닉층을 설치하는 것이 비선형적인 문제의 해결을 보장한다고 하더라도 인간의 색채 지각 과정을 흉내내는 신경망에 맹목적으로 은닉층을 추가하는 것은 색채지각과정을 이해하는데 별로 도움이 되지 않을 것이다. 더 경제적이고 현실적인 신경망을 고안하기 위해서는 영장류의 시각 체계처럼 생물학적으로 진화된 시각 신경계가 그러한 문제를 어떻게 해결하는지를 면밀히 검토하여 신경망에 반영할 필요가 있다.

4) 처리 단계

인간의 다른 정보처리 과정과 마찬가지로 색채 처리는 감각기의 반응에서 시작해서 감각입력을 변형시키는 여러 단계를 거쳐 색채가 인식된다는 단계적인 특성이 있다. 따라서 색채 지각에 대한 대부분의 모형에서 색채 처리는 적어도 부호화, 변형, 해부호화라는 세 처리 단계가 필요한 것으로 가정된다. Land(1986)의 레티넥스 알고리즘에서는 인접 공간에 광량비를 계산하고, 흑백도를 계산하고, 3차원의 색채 공간에 색채를 표상하는 세 단계를 가정한다. D'Zmura와 Lennie(1986)도 눈운동과 감각기의 순응, 색채 대립 세포의 순응, 그리고 시뇌의 이중대립 세포에 의하여 색채가 안정된 색 체계로 표상된다는 세 단계를 가정한다. 연결주의적 접근 방법에서는 신경망을 적용하여 해결하려는 문제가 무엇이나에 따라서 두 층(정찬섭과 한광희, 1990), 세 층(Nakauchi 등, 1990; Heisey와 Skrzypek, 1987), 또는 다섯 층(Usui 등, 1990)으로 신경망을 구성하기도 한다.

인간의 색채 정보 처리 과정을 모방하여 색채 항등성 능력을 갖춘 신경망을 개발하기 위해서는 입력 층과 색채 대립층, 이중 색채 대립층, 색채 표상층이

적절할 것이다. 또한 이중 대립 세포층이 시뇌 17영역에 있고(Hubel과 Livingstone, 1987) 색채 표상층이 시뇌의 V4영역에 있다(Zeki, 1980)는 점을 수용한다면, 이중 대립층의 출력을 색채 표상층으로 전달해줄 수 있는 매개 단위들로 구성된 층이 필요할 것이다.

5) 표준화/척도화의 문제

사물의 색은 표면의 한 점에서 반사된 빛의 파장별 강도 분포에 의해서만 좌우되는 것이 아니라 서로 다른 표면 부위들의 상대적인 파장 강도 정보에 의하여 결정된다(Land, 1977). 따라서 어떤 색채 시각 모형에서도 각 유형의 광수용기에 따른 상대적 파장 강도값을 계산하는 것이 필수적인 단계라고 할 수 있다. 그러한 목적을 달성하기 위해서 대부분의 계산 모형들은 한 단위 영역의 광량을 영상의 전체 또는 넓은 범위에 걸쳐서 얻어진 평균 광량으로 나누어 주는 책략을 택한다. 신경망 접근 방법에서는 연결 강도가 변화되는 적응형 신경망인지 아니면 연결 강도가 변화되지 않는 고정형 신경망인지에 따라 표준화나 척도화를 하는 방법이 달라진다. 적응형 신경망의 경우에는 일군의 학습 자료를 가지고 신경망을 훈련시킴으로써 척도화나 표준화의 효과가 자연적으로 나타나기를 기대한다. 그러나 고정형 신경망의 경우는 비선형성 문제를 다룰 때 논의되었던 것처럼 별도의 척도화 알고리즘을 설치해야 한다.

초기 색채처리 신경망

정찬섭과 한광희(1990) 및 Chung과 Han(1990)은 기존의 색채지각 이론들을 통합할 수 있는 색채 지각 모형을 구성하기 위하여 정보처리의 하위수준에서는 이미 신경생리 분야에서 잘 알려진 색 정보처리 신경통로의 구조를 반영하고, 상위수준에서는 정신물리학 실험에서 밝혀진 색채지각의 현상학적 원리를 반영하는 신경망 모형을 개발하였다. 이들은 그림 2에 제시된 Hurvich와 Jameson(1974)의 모형이 Helmholtz(1911)와 Hering(1920) 등 Newtonian 전통의 색채지각 이론을 집약하고 있을 뿐 아니라, 세 종류 광수용기와 색채 대립 세포의 기능 등 색처리와 관련되어 지금까지 밝혀진 신경통로의 기본구조를 반영하는 대표적인 모형 중 하나라고 보고 그 모형의 타당성을 검증하였다.

이들은 Jameson과 Hurvich의 모형과 유사한 신경망을 구성하고, 정신 물리학적 자료를 이용하여 신경망을 학습시켰다. 학습 결과로 나타난 신경망의 연결강도가 그림 5에 제시되어 있다. 그림에 나타나 있듯이 단파장(B) 수용기로부터 빨강-초록(+R-G) 대립 단위로 이어진 연결계수를 제외하면 그림 2에 제시된 Hurvich와 Jameson(1974)의 모형과 동일하였다.

정찬섭과 한광희(1990)의 연구에서 LGN 수준의 초기 신경망 모형은 정신물리학적 자료를 통하여 지지되었으므로 색채 지각에 대한 더욱 완전한 모형을 설계하는데 적절한 기본 모형으로 이용될 수 있다. 그러나 학습 후에 결정된 신경망 연결계수의 구체적 값에는 대역통과 필터의 투과 대역과 광수용기의 파장 흡수 곡선간의 차이 등으로 인하여 어느 정도 잡음(noise)들이 추가되었을 가능성이 있다. 이러한 문제를 해결하는 한 가지 방법은 연결강도를 더 규칙적인 형태로 대체하는 것이다. 다음에 있는 행렬 A는 색채 대립 단위들의 특성을 보여주는 벡터들로 구성된 가능한 대안들 중 하나이다.

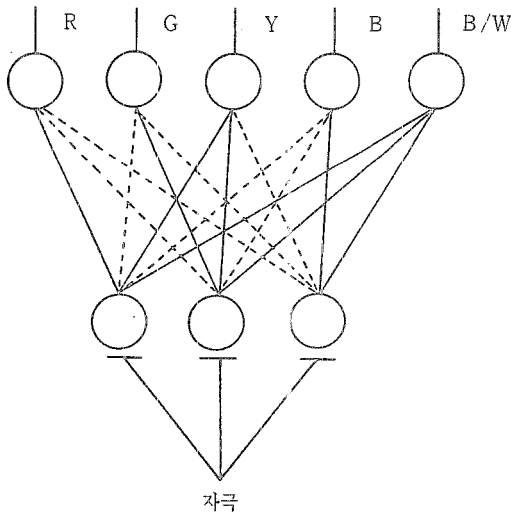


그림 5. 초기 신경망의 구조. 입력층은 장(R), 중(G), 단(B) 파장을 최대 흡수하는 3개의 단위들로 구성되며, 출력층은 빨강(+R-G), 초록(+G-R), 노랑(Y-B), 파랑(B-Y), 그리고 명암(Wb/B1)을 맡고있는 5개의 단위들로 구성되어 있다. 학습 결과로 나타난 연결 강도에서 실선은 흥분성 연결을 나타내고 점선은 억제성 연결을 나타낸다 (정찬섭과 한광희, 1990에서 발췌).

$$A = \begin{bmatrix} 3/\sqrt{14} & -1/\sqrt{14} & -2/\sqrt{14} \\ -3/\sqrt{14} & 1/\sqrt{14} & 2/\sqrt{14} \\ -1/\sqrt{42} & 5/\sqrt{42} & -4/\sqrt{42} \\ 1/\sqrt{42} & -5/\sqrt{42} & 4/\sqrt{42} \\ 2/\sqrt{12} & 2/\sqrt{12} & 2/\sqrt{12} \end{bmatrix}$$

대립체계 행렬 A는 인간의 색채 시각에서 여러 가지 기본적인 특성을 예측하게 해주는 몇 가지 특징이 있다. 먼저, A의 행이 확산 하는 벡터 공간을 보면, 공간의 기저(basis)는 3개의 벡터로 구성된다. 파랑-노랑과 초록-빨강 차원을 나타내는 두 개의 직교 벡터와, 이들 두 개의 벡터와는 직교적인 검정-하양 차원을 나타내는 한 개의 벡터이다.

신경망의 입력 벡터를 $V = (V_b, V_g, V_r)^T$ 라 하고, 출력 벡터를 $W = (W_b, W_y, W_g, W_n, W_{g/w})^T$ 라고 하면, 주어진 입력 벡터 V에 대하여 출력 벡터 W는 $W = AV$ 로 표시된다. 이것은 출력 단위 W_i 의 활성화값은 A의 i번째 행과 V에 의해서 결정된다는 것을 의미한다. 따라서, 하나의 입력 패턴에 대한 두 개의 출력값간의 관계는 $\cos\theta$ 에 의해 표현될 수 있다. 여기에서 θ 는 두개의 출력값을 결정짓는 2개의 행벡터 간의 각도이다. 만약 A의 행을 A_b, A_y, A_g, A_r , 그리고 $A_{b/w}$ 로 나타낸다면, A_b 와 A_y , 그리고 A_g 와 A_r 쌍의 벡터 간에 상관계수 $\cos\theta$ 는 -1이 된다. 반면에, A_b, A_y, A_g , 그리고 A_r 의 서로 다른 쌍 간의 상관계수는 0이 된다. 또한 $A_{b/w}$ 벡터는 나머지 4개의 벡터들 중 어느 것과도 직교를 이룬다.

LGN 수준의 초기 신경망 모형에 내포된 이와 같은 수리적 구조는, 지금까지 인간의 색채 지각에 대한 경험적 연구 결과들과 일치되는 여러 가지 특성들을 포함하고 있다. 인간이 어떤 색채들을 유사한 것으로 지각하는가를 알아보기 위하여 피험자에게 여러 가지의 색지를 제시하고 색채의 유사성에 근거하여 색지를 분류하라고 지시하면, 색지의 분포 상태는 유사한 색들(예; 보라, 빨강)은 서로 가까이 배치되고 보색(예; 빨강, 초록)은 서로 반대편에 위치하는 원을 구성하게 된다. 실제로 색환은 그러한 인간의 색채 분류 경향에 의해서 개발된 색채 표상 체계이다. 색환에서, 원주는 색상(hues)을 나타내며, 중앙에서 떨어진 정도는 채도(saturation)를 나타낸다. 즉, 색환의 중앙에 근접할

수록 채도는 낮아지며, 중앙에서는 무채색이 된다. 이와 같은 2차원적 원형 평면에 직교적인 하나의 차원을 추가하여 3차원적 색채 표상 체계인 색 입체를 만들 수 있다. 이러한 체계의 세번째 차원은 색상과 독립적인 자극의 흑백도(lightness/intensity)를 나타낸다. 앞에서 언급된 상관계수는 색 입체의 이와 같은 특성을 밝혀준다. 즉, 보색쌍의 두 벡터 간의 상관은 -1, 보색이 아닌 고유 색채쌍의 상관은 0, $A_{b/w}$ 와 다른 벡터 간의 상관은 0이 된다.

LGN 수준의 초기 신경망 모형은 앞에서 언급된 것처럼 인간의 색채 경험에서 나타나는 여러 가지 유용한 이론적 속성들을 갖추고 있으나, 고립된 국소 부위의 파장별 광강도를 기준으로 하여 개발된 색채지각 모형이다. 따라서, 아직은 색채 경계를 탐지하거나, 색채 대비 및 색채 항등성(color constancy) 등의 능력을 갖추지 못하고 있다. 연구의 다음 단계에서는 색채 경계를 탐지하고 색채 항등성 능력을 갖춘 더욱 완전한 색채 처리 모형을 개발하기 위하여 LGN 수준의 초기 모형에는 눈운동 기능과, 이중 대립 세포의 기능과 같은 더 중추적인 신경 통로의 구조적, 기능적 특성이 추가로 반영되어야 한다.

색채 항등성 구현을 위한 신경망 모형

조명의 효과를 제거하고 색채를 일관성있게 지각하려면 초기 LGN 모형에 추가되어야 하는 요인들을 재정리할 필요가 있다. 색채 지각과 관련된 그러한 요인들은 색채 경계를 탐지하는 이중 대립 세포의 기능, 조명의 효과를 절감하는 추상체의 순응 기능, 그리고 자극 광강도의 평균화와 관련된 눈운동 기능 등이다. 색채 항등성과 관련된 요인들의 구체적 기능이 Chung과 Han(1990) 그리고 Chung(1991)에 의하여 제시되었다. 예를 들어 Chung과 Han(1990)의 알고리즘에 따르면 세 유형 추상체의 출력 강도를 표상하는 벡터 q 는 반사율 효과 r 과 조명의 효과 e 의 합에 의하여 결정될 수 있다고 가정한다: $q=r+e$. 세 개의 구별되는 대립 단위들은 입력 자극으로써 세 종류 추상체의 출력 벡터 q 를 받아서 대립 체계 A 를 경유하여 활성화 벡터 w 를 산출한다: $w=Aq=A(r+e)$. 이중 대립 층에 있는 단위들은 인접한 한 쌍의 대립 세포들의 출력값을 가지고 차이를 계산하여, 역(threshold)을

적용하고, 최종적으로 출력 벡터 z 를 산출한다: $z=w-w'=A((r-r')+(e-e'))$. 여기서 $e-e'$ 의 값은 미세하므로 z 에 적절한 역치 함수를 적용하면 제거될 수 있다고 보았다. 따라서 만약 입력광의 두 구성 요소(표면 반사율 r 과 조명 e)에 대해서 감각기 층에서 선형 변환이 일어나고, 조명이 상대적으로 동질적이라면 Horn(1974)이 제시한 것과 유사한 규칙을 따라서 색채와 색채 경계를 모두 탐지할 수 있다. Chung과 Han(1990)이 제안했던 모형을 Chung(1991)이 발전시킨 모형이 그림 6에 제시되어 있다.

그림 6에 있는 모형에서 입력층은 개별 광수용기로 구성되어 있다. 두번째 층의 단파(S), 중파(M), 그리고 장파(L) 단위들은 세 번째 층에 있는 단위들의 수용장 내에서 일군의 광수용기로부터 신경 출력을 합산하는 가설적 구조물이다. 첫째 층과 둘째 층 사이에 위치한 검은 삼각형은 눈운동의 효과를 모사하기 위한 영상 이동 스위치이다. 두번째 층에 있는 각각의 단위들은 자기자신의 활성화를 억제하기 위해서 회귀적인 연결을 가지고 있는데, 이 기제는 감각기의 순응 효과를 모사하기 위해서 설치되었다. 세번째 층에 있는 대립 단위들은 대립 체계 행렬의 연결 강도에 따라 두번째 층의 세 유형의 출력을 선형 조합하여 입력으로 취한다. 대립 체계는 3×3 의 직교 행렬로써 두 개의 행백

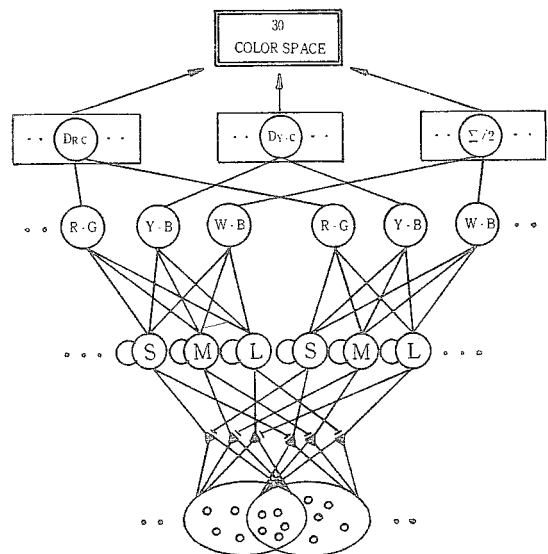


그림 6. 영상이동기와 순응 기제를 갖춘 신경망 모형(Chung, 1991).

터들은 색채 대립과 관련된 연결 강도(즉, R-G와 Y-B에 대한 연결 강도)로 구성되어 있고 남은 하나는 흑백도(W/B)에 대한 연결 강도이다. 네번째 층에 있는 차이 단위들은 같은 유형의 인접한 한 쌍의 대립 단위들의 출력 차이를 계산하고, 계산 결과에 역을 적용하고, 최종의 결과를 입력으로 취한다. 이 단위의 기능은 전체 영상의 빨강-초록(R-G)이나 노랑-파랑(Y-B)판에 대하여 라플라시안 가우시안 연산자(Laplacian Gaussian operator: $\nabla^2 G$)와 유사한 기능을 수행하며 대뇌 피질에 있는 이중 대립 세포의 기능에 비유될 수 있다. 따라서 그 단위들의 수용장이 동질적인 반사광을 가진 영역에 위치하거나 혹은 입력 강도가 주어진 역치보다 작다면 활성화 값이 0이 된다.

이 신경망은 색채의 경계에서 색채 부호를 만들게 되며 따라서 색채와 색채 경계를 두 가지 다 탐지할 수 있다. 즉, 두번째 층에 있는 단위들의 회귀적 억제를 적절하게 결정하여 영상 이동기와 함께 작용되도록 한다면 이 모형은 색채 시각에서 순응에 의한 표준화 효과를 어느 정도까지 흉내낼 수 있다. 즉, 첫째 층과 둘째 층 사이에 위치하는 영상 이동 스위치를 어떤 변화 간격 계획을 따라서 적절히 조절한다면, 이중 대립 단위에서 빛의 강도를 평균화하고 동시에 색채 대비를 강조하는 효과가 일어나기를 기대할 수 있다. 예를 들어 두번째 층에 있는 S 단위의 수용장이 파란색을 띤 표면에 노출된 경우에, 시간이 흐름에 따라서 S 단위의 회귀적 억제의 강도는 주어진 역치에 도달할 때까지 꾸준히 증가할 것이다. 그러나 S 단위와 똑같은 수용장을 공유하고 있는 L 단위에 대한 회귀적 억제의 강도는 더 천천히 증가될 것이다. 다시 영상 이동기에 의하여 수용장을 주위에 붉은 빛을 띤 표면으로 이동시키면 S 단위의 활성화 수준은 입력 강도가 줄어들기 때문에 극적으로 떨어지는 반면에 L 단위의 활성화 수준은 지난 시기까지 남아있는 억제가 아직 유효하기 때문에 그렇게 많이 증가되지는 않을 것이다. 따라서 회귀적 억제율을 적절하게 설정한다면 색채대비 효과를 잃지 않고 어느 정도까지의 광량 평균화 효과를 기대할 수 있다.

신경망의 설계 및 모의 실험

본 연구에서는 조명의 효과를 제거하고 대상의 고

유 속성인 파장별 반사율을 알아내는 색채 항등성 능력을 갖춘 신경망 개발을 시도하였다. 색채 정보가 시각 기관에서 처리되는 과정 중에 광수용기의 순응, 대립세포의 기능, 이중대립세포의 기능 등에 의해서 조명의 효과가 부분적으로 제거될 수 있다는 것을 전제로 하였다. 색채 처리와 관련된 여러 가지 세포의 기능에 추가하여 눈운동 기능이 조명의 영향을 효과적으로 제거할 것이라고 가정하였다.

신경망 모형에 순응의 효과를 반영하려면 광수용기의 기능을 하는 단위들이 활성화 정도에 비례하여 억제하는 기능을 갖추어야 한다. 그러나, 자극이 제시되는 조건에 변화가 없는 경우에 회귀적 억제 강도는 계속해서 증가하게 될 것이고, 해당 단위의 활성화값은 소멸되게 된다. 유사한 현상이 우리의 지각에서도 발견된다. 고정된 영상(stabilized image)을 보거나 간쓰펠트(ganzfeld)를 볼 때 경험되는 것처럼 동일한 자극이 망막의 같은 부위에 계속해서 주어지면 영상이나 색채가 사라지게 된다. 우리가 사물을 볼 수 있는 것은 눈이 끊임없이 움직이기 때문이다. 마찬가지로 이유로 신경망의 입력 단위들이 회귀적인 억제 작용에 의해 반응값이 '0'으로 떨어지는 것을 막기 위해서는 계속해서 새로운 입력자극이 주어져야 한다. 즉 사람의 눈운동을 흉내내는 장치를 모형내에 설계해 넣어야 하는데 입력 영상의 위치를 수시로 바꾸는 것을통해 이러한 눈운동의 효과를 흉내낼 수 있다. Chung(1991)이 제시한 그림 6의 신경망은 바로 이러한 논리에 따라 설계된 것이다. 그림 6의 첫번째 층과 두번째 층의 중간에 설치되어 있는 영상 이동기가 입력 영상의 위치를 바꾸어주는 기능을 함으로써 눈운동의 효과를 흉내낸다.

억제 기능을 갖춘 단위에 주어지는 입력이 계속적으로 변화된다는 것이 조명의 효과를 제거할 수 있다면 그림 6에서와 같은 신경망은 순응과 눈운동을 통해서 효과적으로 색채 항등성을 구현할 수 있다. 순응과 눈운동을 흉내내는 기능을 가진 신경망에서 색채항등성이 구현되는 과정을 설명하기 위하여 신경망의 입력 자극으로써 파란색과 빨간색이 서로 경계를 이루고 있는 입력 자극을 가정할 수 있다. 한 수용장이 파랑색을 띤 대상 표면에 노출되었다가 눈운동에 의하여 빨강색으로 된 대상 표면으로 이동되는 경우에, 파랑색을 띤

표면에 노출된 단파(S)수용기는 입력값이 크기 때문에 반응이 크며, 따라서 억제 정도도 증가될 것이다. 단파 수용기와 동일한 수용장에 노출된 장파(L)수용기는 입력값이 작기 때문에 반응 강도가 약하며 억제 정도도 반응강도에 비례하여 약하게 된다. 파랑 표면에 노출되었던 수용장이 눈운동에 의하여 빨강 표면으로 이동하게 되면, 입력은 새로운 값으로 바뀌지만 이전까지 남아있던 수용기의 억제정도는 그대로 남아있게 된다. 즉, 이동된 단파수용기는 입력값이 줄어들기 때문에 반응이 약해질 뿐만 아니라, 이전까지 증가되었던 억제정도가 유효하기 때문에 반응강도가 매우 약해지는 반면, 같은 수용장에 노출된 장파 수용기는 입력값이 크고 이전까지 남아있던 억제정도가 미약하므로 반응강도가 커지게 된다. 따라서 억제 정도에 따라서 색채의 경계에서 색채 대비 효과가 나타나게 된다. 순응과 눈운동에 의해서 조명의 효과가 제거되는 원리도 마찬가지로 억제와 수용장 이동으로 설명될 수 있다.

파란색 조명이 비추어진 파란 색지와 빨간 색지의 경계에서 수용기의 반응에 반영되는 효과도 백색 조명하에서와 동일한 원리에 의해서 발생한다. 즉, 수용장에 분포되어 있는 단파(S)수용기들은 파란 색을 띤 조명하에서 파란색지에 노출되었을 때 더욱 강하게 반응한다. 따라서 억제정도도 더욱 강해진다. 빨간색 표면으로 수용장이 이동하게 되면 단파 수용기에 약한 입력이 주어지지만 백색 조명 조건에서 보다는 큰 입력이 주어진다. 동시에 파란 조명조건에서 발생된 억제의 정도에 의해서 백색조명에서 보다 더 큰 억제를 받기 때문에 입력이 커지는 만큼 입력과 비례해서 억제도 커지게 된다. 그러므로 적절하게 억제율을 조절하면 백색조명 조건에서와 비슷한 정도의 반응을 기대할 수 있다.

장파(L)수용기에 의한 반응도 단파 수용기의 반응과 작용 원리는 동일하게 될 것이다. 즉, 파란색 조명 조건에서 파란색지에 노출되었을 때 장파(L)수용기는 백색 광원하에서보다 더욱 약하게 반응하며 억제도 그와 비례하여 매우 약하게 된다. 수용장이 붉은 색지로 이동하게 되면 입력값이 백색 광원하에서 보다 약하게 되지만 이전에 파란색지에서 형성되어 있던 억제의 정도로 약하게 억제 되므로 반응강도는 백색 조명하에서와 유사한 정도가 될 것이다.

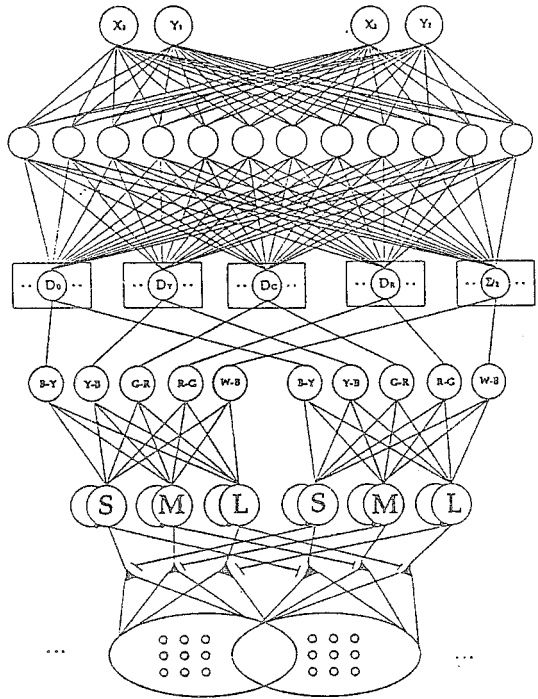


그림 7. 여섯개의 층으로 구성된 본 연구의 신경망 모형. 첫번째 층은 외부 대상으로부터 정보를 받아들이는 광수용기의 기능을 모사하는 단위들로 구성되었다. 두번째 층은 한 수용장을 구성하는 세 종류 광수용기의 반응을 각각 평균하는 기능을 하는 단위들로 구성되어 있다. 이 단위들에는 회귀적 억제 연결을 두어 광수용기의 순응 기능을 흉내내도록 하였다. 또한 첫번째 층과 두번째 층 사이에는 영상 이동기(image shifter)를 설치하여 눈 운동 기능을 수행하도록 하였다. 세번째 층에 있는 단위들은 대립 체계 A의 연결강도에 따라 두번째 층의 출력을 선형조합하여 파랑-노랑, 초록-빨강 및 흑색-백색 차원으로 극성을 부여하는 기능을 한다. 네번째 층에 있는 차이 단위들은 색채경계를 탐지하고 부분적으로 조명의 효과를 제거하는 이중 대립 세포의 기능을 모사한다. 즉 인접한 한 쌍의 대립 단위들로부터 나오는 출력차이를 계산하여 그 결과에 역(threshold)을 적용하여 값을 출력한다. 다섯번째 층에 있는 단위들은 이중 대립 단위들의 출력을 받아 색채를 결정하는 최종 출력 단위들의 활성화 정도를 결정하는 기능을 수행한다. 여섯번째의 신경망 출력 층은 색채 표상 체계의 좌표를 결정하는 기능을 수행하는 색채 인식 단위들로 구성되어 있다.

요약하면, 파란색 조명하에서 수용장이 파란색지에 노출되었다가 빨간 색지로 이동하는 경우에 단파수용

기의 반응 강도는 백색 조명 조건에서 보다는 강해지지만 억제제의 정도도 반응에 비례하여 강해지며, 광수용기의 입력강도는 백색 조명하에서 보다 약해지지만 억제제의 강도도 그와 비례하여 약해지므로, 백색 조명하에서 수용장이 이동한 경우와 유사한 효과를 기대할 수 있다. 억제율이 약하면 색채 대비 효과는 나타나지만 광량 평균화 효과가 사라질 것이며, 억제율이 너무 높으면 광량 평균화 효과는 있지만 색채 대비 효과가 사라질 것이다. 따라서 회귀적 억제율을 적절하게 설정한다면 색채 대비의 효과를 잃지 않고 적절한 정도의 광량 평균화 효과를 기대할 수 있다.

이와 같이 수용장 이동에 의하여 광수용기의 종류에 따라 선별적으로 다른 정도로 작용하는 순응의 효과가 자극의 입력과 관련된 신경망의 처음 두 개의 층에서 나타나도록 하였다. 본 연구에 사용된 신경망에서는 첫번째 층과 두번째 층 사이에 영상 이동을 설치하여 눈운동의 효과를 흉내내었고, 두번째 층에는 회귀적 억제 연결을 두어 순응 효과를 반영할 수 있도록 하였다. 연구에 사용된 신경망의 전체 구조는 그림 7에 제시되어 있는 것처럼 여섯 개의 층으로 구성되어 있다.

신경망의 구성

컴퓨터 모의실험에서 사용된 신경망의 구조는 그림 7에 제시되어 있는 것처럼 여섯 개의 층으로 구성되어 있다. 첫번째 층은 외부로부터 정보를 받아들이는 광수용기의 기능을 흉내내는 단위들로 구성되었다. 두번째 층은 한 수용장 내에 분포되어 있는 세 종류 광수용기의 반응을 각각 평균내는 기능을 하는 단위들로 구성되어 있다. 두번째 층에 있는 단위들에는 회귀적 억제 연결을 두어 광수용기의 순응 기능을 흉내내도록 하였다. 또한 첫번째 층과 두번째 층 사이에는 영상 이동을 설치하여 눈 운동 기능을 수행하도록 하였다. 세번째 층은 대립채제행렬 A의 연결강도에 따라 두번째 층의 출력을 선형조합하여 파랑-노랑, 초록-빨강 및 검정-하양 차원으로 극성을 부여하는 기능을 한다. 이러한 기능은 신경생리학적으로 망막의 신경절이나 LGN에서 발견된 세포들의 색채 대립적 기능에 해당된다. 네번째 층에 있는 차이 단위들은 색채경계를

탐지하는 이중대립 세포의 기능을 모사한다. 즉, 인접한 한 쌍의 대립 단위들로부터 나오는 출력차이를 계산하고 그 결과에 역(threshold)을 적용하여 값을 출력한다. 다섯번째 층을 구성하는 단위들은 이중 대립 단위들의 출력을 받아 색채를 결정하는 색채 인식 단위들의 활성화 정도를 결정하는 기능을 수행한다. 이 단위들의 역할은 생리학적으로 명확히 밝혀져 있지는 않지만 시뇌의 17영역과 V4영역 사이에 존재하는 시세포들의 기능에 비유될 수 있다. 마지막으로 신경망의 출력층에 있는 단위들은 색채 표상체계에서의 좌표를 결정하는 기능을 수행한다.

이와 같이 여섯개의 층으로 구성된 신경망은 광수용기에 의한 색채 정보의 부호화에서 시뇌 세포의 반응까지 지금까지 신경 생리학적으로 발견된 색처리 원리들이 충실히 반영되었으므로 본 연구의 가정이 옳다면, 색채 지각, 색 경계 탐지, 색채 대비 그리고 특히 색채항등성 능력을 나타낼 것으로 기대된다.

자극의 표면 반사율 측정

신경망에서 인식해야 하는 색채자료로는 ‘한국 색채’에서 제작한 색상지 중에서 유채색 5개(빨강, 노랑, 초록, 파랑 그리고 보라)와 무채색 1개(흰색)가 임의

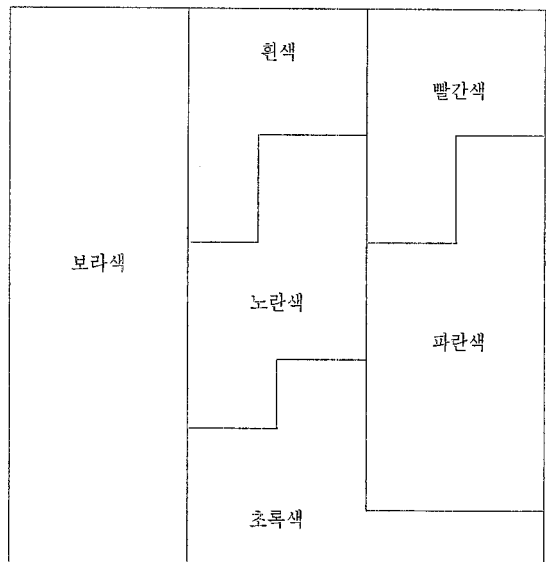


그림 8. 입력 영상으로 이용된 몬드리안 : 상하로 배열된 색지간의 경계가 좌우로도 배열되도록 구성되었다.

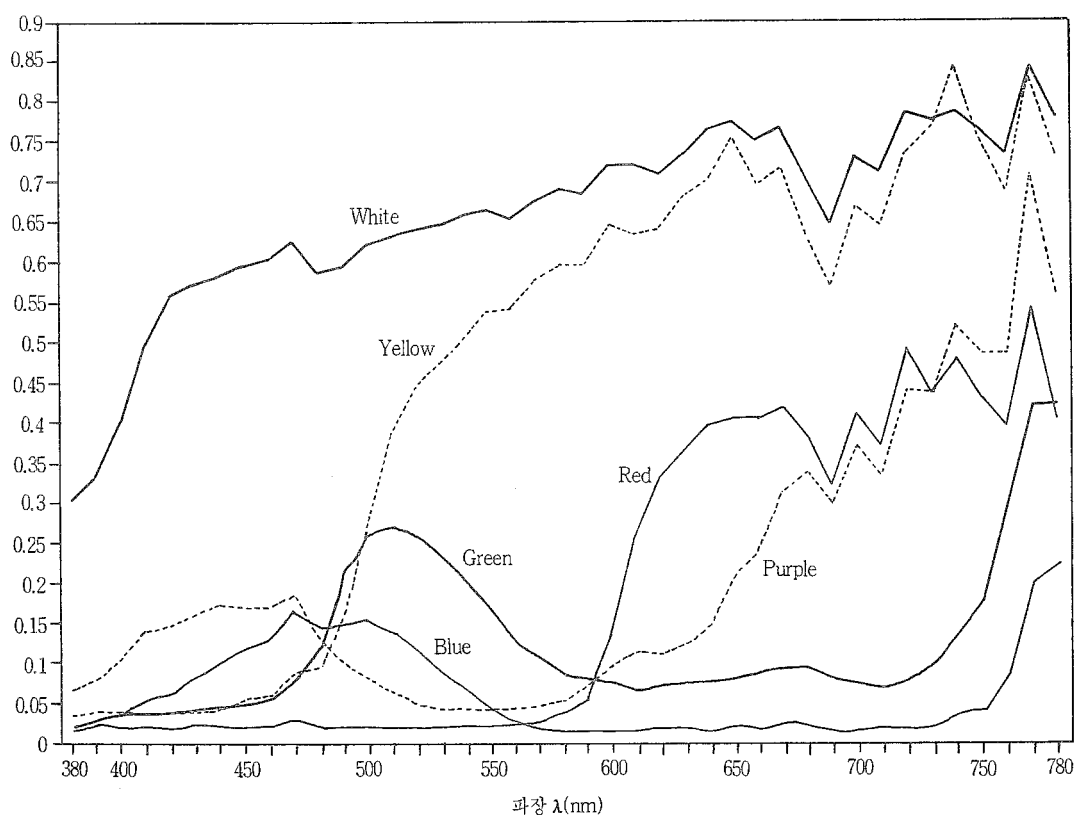


그림 9. 입력 영상을 구성하는 각 자극의 파장별 표면 반사율(표 3-1에 근거)

로 선택되어 구성된 가상적 몬드리안이 이용되었다. 그 형태는 그림 8에 제시되어 있다. 몬드리안을 구성하는 각 색지는 분광기를 사용하여 표면 반사율(surface reflectance)이 측정되었다.

각 색지의 파장별 강도를 측정하는데 사용된 분광기(spectrophotometer)는 초점거리 75cm의 SPEX 1702이고, 전기신호의 처리에는 EG & G PARC 124A Lock-in Amp를 이용하였다. 표면 반사율 측정 시 이용된 광원은 250W의 고압 제논등(High-pressure Xenon Arc Lamp)이었다.

측정된 각 색지의 파장 강도분포는 광원에 따른 상대적인 값이므로 광원의 파장 강도 분포를 근거로 하여 표준 표면 반사율로 변환되었다. 몬드리안을 구성하는데 이용된 색지들의 파장별 반사율이 그림 9에 제시되어 있고, 국제조명기구의 계산방법에 따라 계산된 CIE 색 좌표가 그림 10에 제시되어 있다.

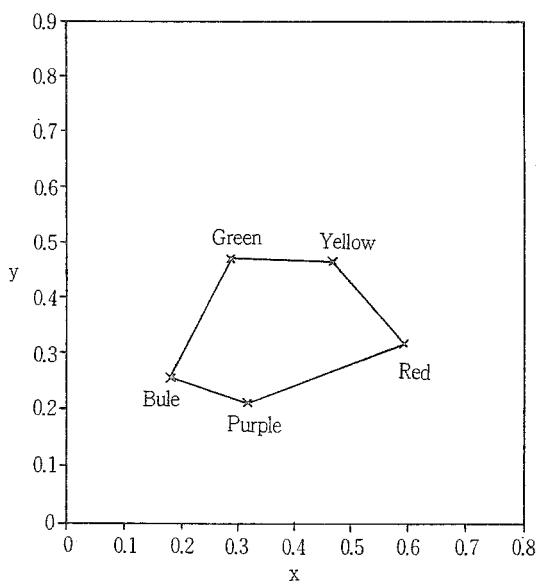


그림 10. 자극색지들의 CIE 색 좌표

컴퓨터 모의실험

색채지각 신경망은 앞에서 제시된 방법에 따라서 C 언어로 프로그램되었다. 모의실험에 사용된 컴퓨터는 처리 속도가 168MHz인 IBM PC 486이었다. 모의실험 절차는 대별하여 입력값 결정, 신경망의 계산 절차, 학습, 수행력평가로 나누어 볼 수 있다.

1) 신경망의 입력값 결정

신경망에 주어지는 입력영상은 그림 8에 제시되어 있듯이 서로 다른 6가지 색지로 구성된 가상적인 몬드리안이다. 몬드리안 위를 이동하는 수용장은 좌우로만 이동되므로 그림에서 보듯이 상하로 배열된 색지간의 경계가 좌우로도 배열되도록 구성되었다. 몬드리안을 구성하는 색지는 백색, 빨간색, 노란색, 파란색, 초록색, 보라색으로서 해당 색지에 대한 파장별 표면 반사율의 측정치는 그림 9에 제시되어 있고, CIE 색 좌표는 그림 10에 제시되어 있다. 전체 몬드리안은 48×48 화소단위로 구성되었고, 상위층에 있는 단위들의 수용장에 해당되는 신경망의 첫번째 층은 3×3 화소 단위로 구성되었다.

첫번째 층의 모든 화소에는 세 종류의 추상체에 해당되는 단위들이 모두 있는 것으로 가정하였다. 입력영상이 주어지면 그림 7의 첫번째 층에 제시되어 있는 것처럼 3×3 수용장 두개가 좌·우로 나란히 배열되어 몬드리안의 한 부분에 놓여지게 된다. 따라서 한 번에 주어지는 입력은 3×6 화소가 된다. 신경망의 입력값을 결정하는 단계에서 몬드리안 상의 수용장의 이동 방법은 한번에 3화소씩 좌에서 우로 이동되도록 하였고, 처음에 입력이 주어지면 1주기(cycle) 동안에 전체 몬드리안 영상을 1회 계산하게 되는데 3×6 화소로 구성된 두 개의 수용장이 몬드리안의 좌측상단에서 우측으로 3화소씩 15회 이동하면서 각 단위들의 활성화 값을 계산한다. 이와 같이 3행에 대한 수용장 이동이 끝나면 앞에서 계산된 몬드리안의 화소들 바로 다음 부분으로 수용장이 이동되어 다시 오른쪽으로 15회 이동한다. 이와 같이 좌에서 우로 15회씩 상단에서 하단으로 16회 이동하면 전체 몬드리안의 입력값이 1회 계산되어 1주기가 종료된다. 한 주기가 끝나는 것은 신경망이 전체 몬드리안을 1회 본 것에 해당한다. 이와 같이 이동하면 좌·우측 수용장이 색채 경계를 사이에

두고 있을 때 유효한 값이 탐지된다.

개별적인 광수용기들에 비유될 수 있는 신경망의 첫번째 층은 한 단위가 한 화소를 맡고 있는 것으로 가정되었다. 따라서 몬드리안의 한 화소에 대하여 세 종류의 광수용기 각각 1개씩 3개의 광수용기 유형에 따라 각각 활성화 값이 계산되었다. 개념적으로 개별 광수용기에 주어지는 입력은 자극색지의 표면 반사율 $S(\lambda)$ 와 조명의 파장별 강도 분포 $I(\lambda)$, 그리고 수용기 유형 k 에 따른 파장별 민감도 함수 $Q_k(\lambda)$ 에 의하여 결정된다. 즉 색상지의 표면 반사율 $S(\lambda)$ 와 조명의 파장 강도 분포 $I(\lambda)$ 를 곱하여 표면에서 반사되는 빛의 양 $L(\lambda)$ 를 구한 뒤 ($L(\lambda) = S(\lambda) * I(\lambda)$), 여기서 감각기 유형에 따른 파장별 민감도 함수 $Q_k(\lambda)$ 를 곱하여 전체 가시 스펙트럼 범위에 걸쳐 유한 적분함으로써 각 감각기에 주어지는 입력값 q_k 가 계산된다($q_k = \int L(\lambda) Q_k(\lambda) d\lambda$). 입력 영상의 한 점에서 표면 반사율과 조명의 파장 강도 분포는 동일하므로 광수용기에 따른 입력값 q_k 의 차이는 $Q_k(\lambda)$ 에 따라서 달라지게 된다.

감각기의 파장별 민감도 함수 $Q_k(\lambda)$ 는 Bowmaker와 Dartnall(1980)이 미세 분광 측정 방법(microspectrophotometry)을 이용하여 인간의 망막에 존재하는 광수용기에서 측정한 함수가 이용되었다. 이들이 측정 한 수용기의 민감도 함수가 그림 11에 제시되어 있다.

모의실험에서 입력값을 정하는 데 있어서 눈의 광학적 특성을 고려하여 입력값에 약간의 수정을 가하였다. 눈으로 유입되는 빛은 광수용기에 이를 때까지 여

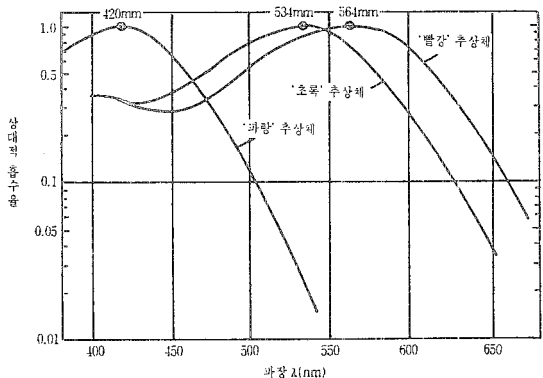


그림 11. 미세 분광 측정 방법(microspectrophotometry)에 의하여 측정된 인간의 추상체 색소의 상대적 파장 흡수 곡선 (Bowmaker와 Dartnall, 1980).

러 가지 구조물들에 의하여 영향을 받게 된다. 즉 망막 상에 존재하는 감각기를 자극하는 빛의 양은 각막, 수양액, 수정체, 유리체, 반점 색소, 그리고 망막 자체에서 영향을 받아 반사되거나 흡수되거나 산란됨으로써 손실된다. 이때 각막, 수양액, 수정체, 유리체, 망막 자체 등에서 발생하는 빛의 손실은 여러 파장에 걸쳐 고르게 발생하므로(Boynton & Clarke, 1964; Vos, 1963; Vos & Boogaard, 1963; Wolf & Gardiner, 1965) 광수용기 유형에 따른 파장별 흡수량을 결정하는데 무시될 수 있다. 그러나 수정체와 반점 색소는 파장에 따라 투과율에 차이가 있기 때문에(Alpern, Thompson 및 Lee, 1965; Norren과 Vos, 1974; Brown과 Wald, 1963) 개별 수용기의 반응을 결정하기 전에 투과율을 고려하여 대상에서 반사되어 눈으로 유입되는 빛의 파장 강도 분포 $L(\lambda)$ 를 수정해 주어야 한다. 따라서 모의실험을 하는데 개별 수용기의 입력값 q_k 를 계산할 때 $L(\lambda)$ 에 투과율 $T(\lambda)$ 를 곱하여 주었다. 계산에 이용된 투과율 값은 표 1에 제시되어 있다. 눈으로 유입되는 파장 강도 분포 $L(\lambda)$ 에 투과율 $T(\lambda)$ 를 곱하여 주면 눈으로 유입된 빛의 파장 강도 분포가 실제로 망막에 도달되어 수용기에 흡수되는 빛의 파장 강도 분포와 유사해진다. 이와 같이 계산된 광수용기의 입력값 q_k 는 그대로 광수용기의 반응 강도 q_k 로 이용되었다.

이상의 내용을 하나의 공식으로 나타내면 공식 (10)과 같다:

$$q_k = \int S(\lambda) I(\lambda) T(\lambda) Q_k(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (10)$$

여기서 k , q_k , λ , $S(\lambda)$, $I(\lambda)$, $T(\lambda)$, $Q_k(\lambda)$ 는 광수용기의 유형, 광수용기 유형에 따른 반응 강도, 파장, 자극의 표면 반사율, 조명의 파장 강도 분포, 파장별 투과율, 수용기 유형에 따른 파장별 민감도를 각각 나타낸다. 실제 모의 실험시에 파장 λ 와 관련된 모든 함수는 10nm 단위로 분할하여 계산되었다.

2) 신경망의 계산절차

입력값들이 결정된 후 그림 7에 제시된 것처럼 여섯 개의 층으로 구성된 신경망에서 개별 단위들의 활성화 값이 각각 계산되었다. 첫번째 층인 광수용기 층은 한 수용장내에 광수용기 유형당 9개(3×3)의 단위들로 구성되므로 총 27개(수용기 유형×유형별 갯수: 3×

9)의 단위들로 구성되어 있었다. 개별 단위의 활성화 값은 앞에서 제시된 q_k 와 동일하다고 가정되었으므로 공식 (10)에 의하여 계산되었다.

두번째 층에 있는 단위들은 3×3 화소로 구성된 한 수용장에 걸쳐서 단(S), 중(M), 장(L)과 수용기 유형별로 반응을 평균하는 기능을 한다. 또한 각 단위들에

표 1. 파장에 따른 함수로 나타낸 수정체와 반점색소(macular pigment)의 투과율(Wyszecki와 Stiles, 1982에서 발췌)

$\lambda(\text{nm})$	$t_L(\lambda)$	$t_M(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$t_L(\lambda)$	$t_M(\lambda)$
400	0.0631	0.8222	550	0.8511	1.0000
405	0.1000	0.7586	555	0.8610	
410	0.1514	0.6918	560	0.8710	
415	0.2138	0.5957	565	0.8810	
420	0.2818	0.5012	570	0.8913	
425	0.3548	0.4519	575	0.9019	1.0000
430	0.4266	0.4315	580	0.9120	
435	0.4898	0.4169	585	0.9226	
440	0.5370	0.3981	590	0.9311	
445	0.5754	0.3758	595	0.9397	
450	0.5957	0.3467	600	0.9462	1.0000
455	0.6237	0.3236	605	0.9528	
460	0.6383	0.3199	610	0.9594	
465	0.6531	0.3388	615	0.9661	
470	0.6683	0.3589	620	0.9727	
475	0.6839	0.3890	625	0.9772	1.0000
480	0.6998	0.3846	630	0.9817	
485	0.6998	0.3846	635	0.9863	
490	0.7244	0.3890	640	0.9908	
495	0.7413	0.4365	645	0.9931	
500	0.7499	0.5309	650	0.9954	1.0000
505	0.7674	0.6383	655	0.9977	
510	0.7762	0.7413	660	1.0000	
515	0.7852	0.8222	665	1.0000	
520	0.7943	0.8913	670	1.0000	
525	0.8035	0.9441	675	1.0000	1.0000
530	0.8128	0.9772	680		
535	0.8222	1.0000	685		
540	0.8318	1.0000	690		
545	0.8414	1.0000	695		

* $\lambda(\text{nm})$ 는 파장, $t_L(\lambda)$ 는 수정체의 투과율, $t_M(\lambda)$ 는 반점 색소의 투과율을 각각 나타낸다.

는 회귀적인 연결을 두어 해당 단위의 입력 정도에 비례하여 억제 기능을 수행하도록 하였다. 회귀적 억제 기능은 광수용기에서 발생하는 순응 기능에 해당된다.

두번째 층에 있는 단위 i 의 활성화 값 a_i 는 다음의 공식 (11)에 의하여 결정되었다.

$$a_{i(t)} = \text{Input}_{i(t)} - I_{i(t)} \dots\dots\dots (11)$$

$\text{Input}_{i(t)}$ 는 시간 t 에서 단위 i 로의 입력을 나타내며 공식 (12)에 의하여 결정되었다.

$$\text{Input}_{i(t)} = \frac{1}{N} \sum \text{Output}_{j(t)} \dots\dots\dots (12)$$

여기서 N 은 단위 a 로 입력을 주는 단위 j 의 수, $\text{Output}_{j(t)}$ 는 시간 t 에서 j 단위의 출력을 각각 나타낸다. Output_j 는 일정 범위의 값을 갖도록 하기 위해 Output_j 의 최대값을 이용하여 표준화시켰다. 공식 (11)에서 $I(t)$ 는 시간 t 에서의 억제 정도으로써 공식 (13)에 의하여 결정되었다.

$$I(t) = \text{Input}_{i(t)} ((I_{\max} - I_{(t-1)}) \times I_t + I_{(t-1)}) \dots\dots (13)$$

여기에서 $I_{\max}$ 는 1로써 최대 억제값을 나타내며 $I_{(t-1)}$ 은 $t-1$ 시간에서의 억제값 I_t 은 억제율을 각각 나타낸다. 첫번째 층과 두번째 층 사이에는 영상 이동기들이 있어서 눈운동의 효과를 흉내내도록 하였다. 영상 이동기들은 시각장에서 수용장을 이동시키는 기능을 한다.

색채 대립적인 기능을 수행하는 단위들로 구성된 세번째 층에 있는 단위들은 빨강-초록(+R-G), 초록-빨강(+G-R), 노랑-파랑(+Y-B), 파랑-노랑(+B-Y), 흑색/백색(B/W)이라는 다섯 종류로 구별된다. 이 단위들은 수용기의 반응을 평균하는 두번째 층에 있는 단위들로부터 입력을 받아 서로 직교적인 빨강-초록(R-G)과 파랑-노랑(B-Y) 차원으로 좌표 체계를 변형시키는 기능을 한다. 세번째 층에 있는 단위들의 입력 Input_i 는 두번째 층에 있는 단위들의 출력에 각 단위들과 연결된 연결강도를 곱한 뒤, 입력을 받는 단위와 연결되어 있는 모든 단위들의 출력을 합산함으로써 결정되었다. 이를 수식으로 나타내면 공식 (14)와 같다.

$$\text{Input}_i = \sum_j W_{ij} * \text{Output}_{j_i} \dots\dots\dots (14)$$

공식 (14)에서 Input_i 는 i 단위로의 입력, W_{ij} 는 j 단위에서 i 단위로의 연결강도, Output_j 는 j 단위의 출력을 각각 나타낸다. 여기에서 연결강도 W_{ij} 는 앞에 제시된 연결강도 행렬 A 에 의해서 결정되었다. 행렬 A 에서 파랑-노랑(+B-Y), 노랑-파랑(+Y-B), 초록-빨강(+G-R), 빨강-초록(+R-G), 백색/흑색(W/B) 단위들의 입력값을 결정하는 벡터들은 Chung과 Han(1990)이 제안한 (3, -1, -2), (-3, 1, 2), (-1, 5, -4), (1, -5, 4), (2, 2, 2) 벡터들을 각각 표준화시킨 벡터들이었다. 여기에서 알 수 있듯이 보색 벡터들 간에는 부호가 반대이고, 보색이 아닌 기본색을 결정하는 벡터들 간에는 서로 직교를 이룬다. 계산에 이용된 대립체계 연결강도는 행렬 A 처럼 각 벡터들을 표준화시킨 단위 벡터들로 구성된 행렬을 이용하였다.

네번째 층은 인접한 수용장을 달고 있는 색채 대립 단위에서 출력되는 값의 차이나 평균을 계산하는 단위들로 구성되어 있었다. 빨강과 초록에 대한 차이 단위인 D_{r-g} 와 D_{g-r} , 그리고 노랑과 파랑에 대한 차이 단위인 D_{y-b} 와 D_{b-y} 에 대한 입력은 세번째 층의 두 해당 단위들의 출력차이로써 공식 (15)에 의하여 계산되었으며,

$$\text{Input}_i = \text{Output}_1 - \text{Output}_2 \dots\dots\dots (15)$$

흑백도는 양(+)의 값만이 가정되므로 흑백도를 계산하는 단위에 대한 입력은 해당 단위들의 출력 평균의 공식 (16)에 의하여 계산되었다.

$$\text{Input}_i = (\text{Output}_1 + \text{Output}_2) / 2 \dots\dots (16)$$

공식 (15)와 (16)에서 Output 항의 아래 첨자는 서로 다른 인접한 두 수용장을 나타낸다. 이 네번째 층에 있는 단위들의 출력값은 계산된 값에 역치함수를 적용하여 다음과 같이 결정되었다.

$$\text{Output}_i = \begin{cases} \text{Input}_i, & \text{if } |\text{Input}_i| > \theta \\ 0 & |\text{Input}_i| < \theta \end{cases} \dots\dots (17)$$

공식 (15), (16), (17)에 의해서 완만하게 변화되는 조명의 효과를 제거하고 색의 경계를 사이에 두고 두 수용장이 인접한 경우에 유효한 출력값이 계산되도록 하였다. 따라서 네번째 층에 있는 이중 대립 단위들은

흑백도를 나타내는 단위를 제외하고는 색채 경계에서만 유효한 출력값을 갖게 된다.

신경망의 다섯번째 층은 이중 대립 단위의 출력값을 받아서 출력 층으로 값을 전달하는 기능을 하며, 단위들의 입력값은 공식 (14)에 의하여 결정되었다. 여섯번째 층은 신경망의 출력층으로서 한 수용장에 대하여 두 개의 세포가 짝 지워져서 주어진 자극의 색 좌표를 결정하는 것으로 가정되었다. 출력층 단위들의 입력값도 다섯번째 층에 있는 단위들과 마찬가지로 공식 (14)에 의하여 결정되었다.

다섯번째 층과 여섯번째 층을 구성하는 단위들의 활성화 값은 신경망에서 구성단위들의 활성화 함수로 빈번히 사용되는 로지스틱(logistic) 함수를 이용하였다. McClelland와 Rumelhart(1988)에 따르면 로지스틱 함수는 연속적이면서 비선형적인 특성을 갖추고 있으므로 은닉단위와 연결된 연결강도를 결정하는데 용이한 함수이다. 로지스틱 함수는 공식 (18)에 제시되어 있다.

$$a^{(i)} = \frac{1}{1 + e^{-\text{Input } i(t)}} \dots\dots\dots (18)$$

3) 신경망의 학습

앞에서 언급된 것처럼 색채정보 처리에 관여하는 시각 신경계의 활동은 아직까지 명백하게 밝혀져 있지 못하다. 수용기나 색채 대립 세포, 그리고 이중 대립 세포의 기능 등은 비교적 알려져 있는 편이나 이중 대립 세포 이후부터 V4영역까지의 신경 정보 전달 방식은 아직까지 규명되어 있지 않다. 신경망에서 이중 대립 단위의 출력을 이용해서 색채를 결정하기 위해서는 이중 대립 단위로부터 색채 결정 단위까지의 연결 방법을 결정해야 한다. 본 모형에서는 이중 대립 단위 층과 색 좌표 결정단위 사이에 은닉단위 층을 두고 단위들 간의 연결강도를 학습에 의해서 결정하였다. 색채 처리에서 비선형성의 문제는 신경망에 은닉 단위들을 추가함으로써 해결될 수 있으며, 은닉단위의 연결계수를 결정하는데 효과적인 방법은 McClelland와 Rumelhart(1988)가 제안한 역전파 학습방법이다. 역전파 학습방법은 해(解)가 존재하는 한 해를 구할 수 있는 퍼셉트론(perceptron : Rosenblatt, 1959)의 장점과 오류의 최소값이 알려지지 않은 상태에서 오류함수의 최소값

을 효율적으로 찾아가는 기울기 감소법(gradient descent : Widrow & Hoff, 1960)을 조합한 것으로서 은닉단위와 관련된 오류를 계산하여 은닉단위와 연결된 연결계수를 결정할 수 있다는 장점이 있다.

역전파 학습방법은 출력 단위에서 오류를 계산하여 출력 단위의 오류를 줄이는 방향으로 연결강도를 조절하는 방법이다. 이 학습방법의 절차는 두 단계로 구성되어 있다. 첫번째 단계에는 입력을 주고 각 단위의 출력값 a_{pj} 를 계산한다. 계산된 출력값을 목표값과 비교하여 각 출력단위의 오류항 δ 를 계산한다. 두번째 단계에서는 후진적으로 신경망의 은닉 단위들 각각에 대하여 오류항 δ 를 계산한다. 두번째 단계에서는 각각의 연결강도에 대하여 연결강도를 통해서 입력을 받는 단위의 오류항과 연결강도를 통해서 입력을 주는 단위의 활성화값 간에 곱을 구한다. 이 값은 연결강도에 관련된 오류의 미분값에 비례적으로 결정되므로 연결계수 오류 미분값(weight error derivative)이라고 불린다.

즉 j 단위에서 i 단위로의 연결강도의 변화량 ΔW_{ij} 는 다음의 공식 (19)에 의하여 계산되었다.

$$\Delta W_{ij} = \varepsilon \delta_{pi} a_{pj} \dots\dots\dots (19)$$

여기에서 ε 는 학습률, δ_{pi} 는 패턴 p 에 대한 단위 i 의 오류값, 그리고 a_{pj} 는 패턴 p 에 대한 단위 j 의 활성화값을 각각 나타낸다.

출력단위의 오류 δ_{pi} 와 은닉단위의 오류 a_{pi} 는 각각 공식 (20)과 공식 (21)에 의해서 계산되었다.

$$\delta_{pi} = (t_{pi} - a_{pi}) f'_i(\text{input}_{pi}) \dots\dots\dots (20)$$

$$\delta_{pi} = f'_i(\text{input}_{pi}) \sum \delta_{pk} W_{kj} \dots\dots\dots (21)$$

여기에서 δ_{pi} 는 패턴 p 에 대한 단위 i 의 오류값, t_{pi} 는 패턴 p 에 대한 단위 i 의 목표값, a_{pi} 는 패턴 p 에 대한 단위 i 의 활성화값, $f'_i(\text{input}_{pi})$ 는 패턴 p 에 의한 단위 i 로의 입력의 미분값, δ_{pk} 는 패턴 p 에 대한 k 단위의 오류값, 그리고 W_{kj} 는 j 단위에서 k 단위로의 연결강도를 각각 나타낸다.

실제 학습시에는 학습 속도를 높이기 위하여 공식 (19)에 관성항(momentum term)을 추가하여 공식 (22)를 이용하였다.

$$\Delta W_{ij(t)} = \varepsilon(\delta_{pi} a_{pj}) + \alpha \Delta W_{ij(t-1)} \dots\dots\dots (22)$$

여기에서 $\Delta W_{ij(i)}$ 는 시간 i 에서 j 단위에서 i 단위로의 연결강도 변화량, ε 는 학습률, δ_{pi} 는 입력패턴 p 에 대한 i 단위의 오류값, a_{pj} 는 입력 패턴 p 에 대한 j 단위의 활성화 정도, 그리고 α 는 판성향의 계수를 각각 나타낸다.

이와 같은 학습 법칙을 이용한 구체적인 학습절차는 다음과 같다. 표준 조명 상태에서 신경망의 첫번째 층에 활성화값을 입력한 후 색지별로 네번째 층의 값을 계산하였다. 색지별로 네번째 층의 활성화 값을 입력값으로 하고, 여섯번째 층의 색지별 CIE 색 좌표값을 목표값으로 하여 네번째 층과 다섯번째 층, 다섯번째 층과 여섯번째 층의 연결강도를 학습시켰는데 여섯 색지에 대한 전체 오류자승화(total error sum of square)가 .0001에 이르면 학습을 중지시켰다.

4) 신경망의 수행능력 평가

신경망 모형의 수행능력 평가는 표준 조명하에서 학습된 신경망에 여러 가지 다른 조명 상태에서 입력 몬드리안 영상을 제시한 후 출력된 CIE 색 좌표를 검사하였다. 순응과 눈운동에 의하여 조명의 효과가 제거되는 정도를 더 명확히 평가하기 위하여 정적 모형과 동적 모형으로 구분하여 신경망의 수행력을 비교하였다. 정적 모형은 수용장이 이동되지 않고 색채를 지각하도록 고안된 모형으로 외측 억제제를 통해서 조명의 효과를 부분적으로 제거하는 모형이고, 동적 모형은 정적 모형의 기능에 순응과 눈운동 효과가 추가로 반영된 모형이다. 조명의 효과를 제거하고 대상의 색을

지각하는데 순응과 눈운동의 역할이 중요하다면 정적 모형보다 동적 모형이 더 우수한 수준의 색채 항등성을 보일 것이다.

가상적인 표준 조명 하에서 영상 이동기의 이동 방향에 따라 다섯번째 층과 연결된 연결로의 계수들을 학습에 의하여 결정된 후 다른 조명 상태에서 구성된 몬드리안 자극을 입력하고 계산된 출력 단위들의 활성화 값을 검사하였다. 검사시에는 몬드리안의 색채 경계에서만 출력값들이 계산되며, 한 색지에 대하여 반응한 출력값의 평균을 해당 색지에 대한 반응으로 가정하였다. 학습된 신경망의 수행력 평가에 이용된 조명은 10개의 일광, 4개의 형광등, 1개의 수은등, 1개의 가상 표준조명, 2개의 백열등, 6개의 가상조명 등 모두 24개의 조명이 이용되었다. 가상 표준 조명은 모든 파장의 강도가 동일한 조명으로써 신경망의 학습에 이용된 조명이므로, 표준 조명 조건에서 모형의 수행력은 학습 상태를 나타낸다. 검사 목적으로 사용된 10개의 서로 다른 일광의 파장 강도 분포는 그림 12에, 4개의 형광등에 대한 파장 강도 분포는 그림 13에, 수은등의 파장 강도 분포는 그림 14에 제시되어 있다. 색채온도 2850 K의 백열등 조명의 파장 강도 분포는 그림 15에, 색채온도 3100 K의 백열등의 파장 강도 분포는 그림 16에 제시되어 있다. 검사에 이용된 가상 조명은 그림 9에 제시된 표면 반사율을 표준화 시켜서 사용하였다.

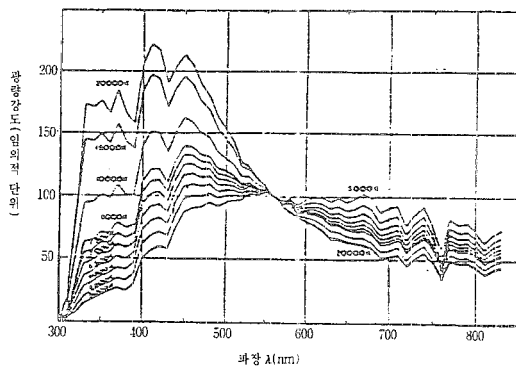


그림 12 일광 조명을 계산하는 CIE방법에 따라 계산된 10개의 서로 다른 일광의 상대적 광량 강도 분포(relative radiant power distribution)(Wyszecki와 Stiles, 1982에서 발췌).

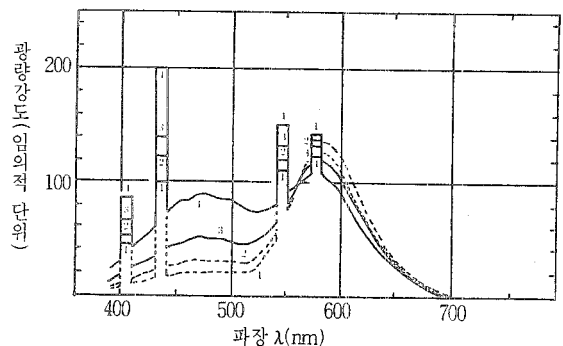


그림 13. 일반 형광등의 상대적 파장 광량 강도 분포: (1) 표준적 포근한 흰색(standard warm white) 형광등; (2) 흰색 형광등; (3) 표준적 차가운 흰색(standard cool white) 형광등; 그리고 (4) 일광을 흉내낸 형광등. 분포 곡선은 $\lambda = 560\text{nm}$ 에서 100의 값을 갖도록 적절한 상수를 이용하여 척도화 하였다(Wyszecki와 Stiles, 1982).

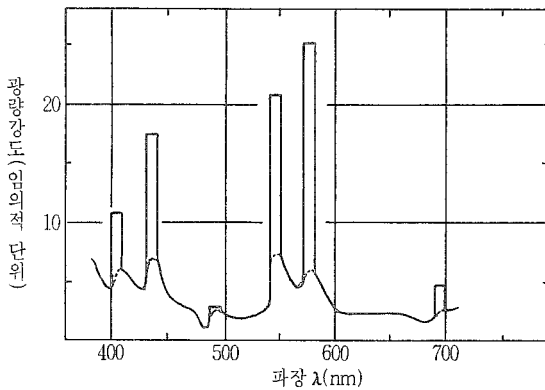


그림 14. 수은등의 상대적 파장 강도 분포(Wyszecki와 Stiles, 1982).

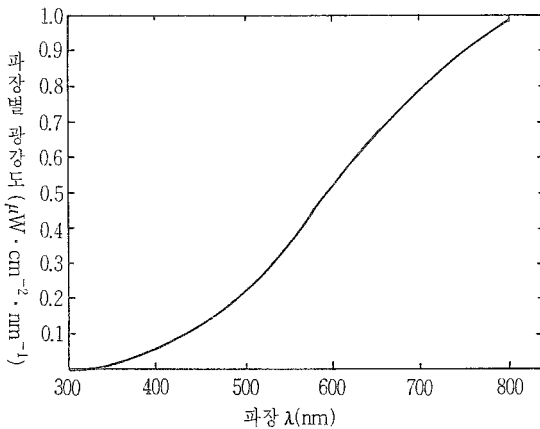


그림 15. 색채온도 2850 K에서 백열등(tungsten filament lamp)의 파장 강도 분포(Wyszecki와 Stiles, 1982).

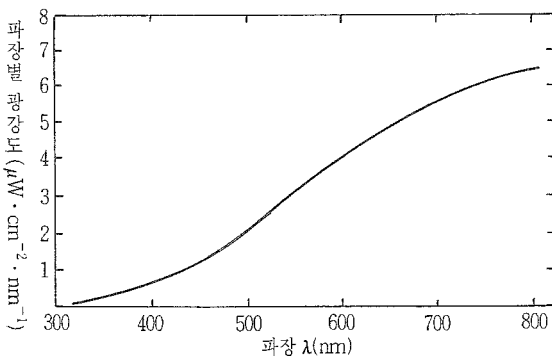


그림 16. 색채온도 3100 K에서 백열등(tungsten-halogen filament lamp)의 파장 강도 분포(Wyszecki와 Stiles, 1982).

결과 및 논의

본 연구에서 제안된 신경망의 색채 지각 능력을 평가하기 위해서 표준조명 조건에서 여섯 가지 색지에 대한 출력 단위의 반응을 학습시킨 후 여러 가지 다른 조명 하에서 신경망 출력 단위의 반응을 평가하였다. 신경망의 수행능력을 평가하는 단계에서 눈운동과 순응의 효과를 모방한 영상 이동과 억제 효과의 효과를 명확히 파악하기 위하여 두가지 신경망의 수행정도를 비교하였다. 한가지는 눈운동의 효과가 반영되지 않은 정적 모형이고, 다른 한가지는 영상이동기를 움직이도록 하여 눈운동의 효과를 반영한 동적 모형이다.

동적 모형의 수행력을 결정하는데는 억제율과 억제 시행수라는 두 개의 매개변수가 중요한 역할을 한다. 그러므로 실험에 이용된 전체 검사 조명에 걸쳐서 모든 색지에 대한 이탈 거리(원래 색지의 색좌표와 모형에 의해 계산된 색좌표간의 거리)를 최소화하는 억제율과 억제 시행수를 결정할 필요가 있다. 두 변수들은 연속적인 값이므로 무한히 많은 값을 가질 수 있기 때문에 억제 시행수는 1에서 19까지, 억제율은 .05에서 .50까지로 임의로 범위를 제한하고, 각 범위를 10단계로 구분하여 모든 조합에 대하여 동적 모형의 수행력을 알아보았다. 수행 결과 억제율이 .35이고 억제 시행수가 좌와 우로 각각 1회씩 이동시키는 경우에 동적 모형의 이탈 거리가 최소화되는 것으로 나타나 억제율과 억제 시행수를 각각 .35와 1로 고정시켰다. 또한 CIE색채 공간에서 좌표값은 0에서 1사이의 값이므로 거리를 계산하면 값이 매우 작아지기 때문에 이탈 거리는 x, y 좌표값을 각각 10000배 하여 계산되었다.

학습된 표준 조명 하에서 정적 신경망과 동적 신경망의 수행정도가 그림 17에 제시되어 있다. 그림에서 검은 원과 점선은 원래 자극의 표면 반사율을 나타내고, 검은 사각형과 일점쇄선은 정적 모형의 수행을, 그리고 검은 세모와 실선은 동적 모형의 수행을 나타낸다. 그림에 제시된 각 색지에 대한 출력 단위의 CIE 색 좌표는 입력 몬드리안의 각 색채 경계에서 계산된 값을 평균한 것이다. 그림 17에서 볼 수 있듯이 학습된 조명 조건에서 입력 자극에 대한 수행은 두 모형간에 거의 완전히 일치한다. 이것은 그림에 제시된 수행 수

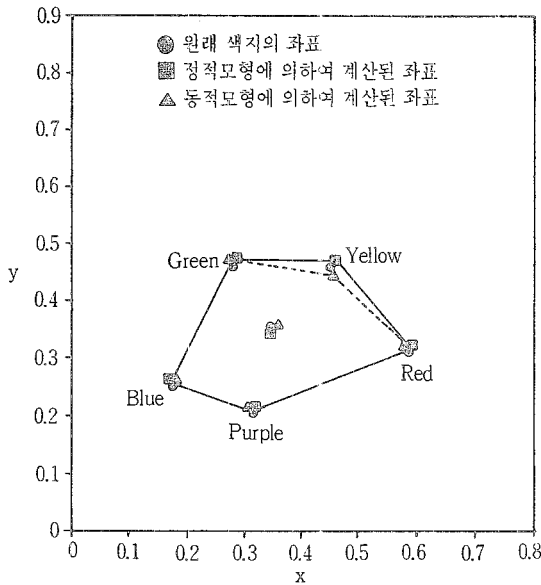


그림 17. 표준조명하에서 신경망의 수행. 가운데 표시는 백색에 대한 수행을 나타내고 주변의 폐곡선은 유채색에 대한 수행을 나타낸다. 점선과 검은 원은 원래 색지의 좌표, 일점쇄선과 검은 사각형은 정적 모형의 수행, 실선과 검은 삼각형은 동적 모형의 수행을 각각 나타낸다.

준에서 학습이 종료되었다는 것을 보여준다.

표준 조명 상태에서 학습이 이루어졌으므로 조명이 표준 상태와 유사한 조건에서는 정적 모형과 동적 모형의 수행이 비슷한 수준으로 우수할 것으로 기대할 수 있다. 억제와 영상 이동에 의하여 불규칙한 조명의 영향이 효과적으로 제거된다면 조명이 표준상태에서 이탈된 정도가 심하면 심할수록 정적 모형의 수행에 비하여 동적 모형의 수행이 우수해야 한다. 이와 같은 가설을 검증하기 위하여 각 좌표간에 계산된 이탈 거리를 모형(2: 동적, 정적), 조명(6: 표준, 일광, 형광 등, 수은등, 백열등, 가상등), 색지(6: 하양, 빨강, 노랑, 초록, 파랑, 보라)에 걸쳐서 완전요인방안으로 변량분석하였다. 신경망에 의하여 계산된 색좌표의 이탈 거리는 모의 실험에 이용된 모든 조명에 대하여 정적 모형의 수행(767.63 ± 669.45)보다 동적 모형의 수행(577.10 ± 602.31)이 유의미하게 우수하였다($F_{(1,216)} = 15.20, p < .001$). 따라서 모의 실험에 이용된 전체 조명에 걸쳐서 동적 모형이 정적 모형보다 조명의 영향을 효과적으로 제거함을 알 수 있다.

열 개의 일광 조명 조건에 따른 정적 신경망과 동적 신경망의 수행 결과가 그림 18에 제시되어 있다. 그림에서 검은 사각형은 정적 모형의 수행을 나타내고, 검은 삼각형은 동적 모형의 수행을 나타내며, 십자표시는 두 모형의 평균 수행을 나타낸다. 그림에서 볼 수

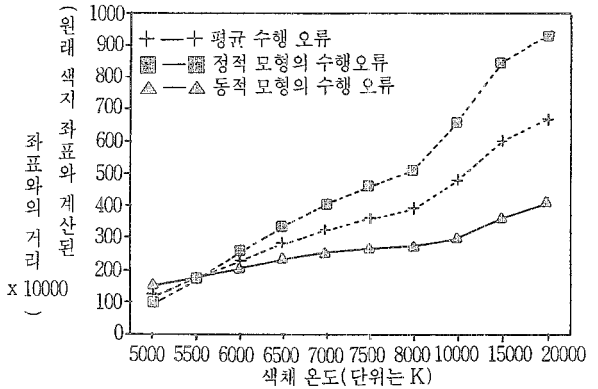


그림 18. 열 개의 일광 조명 조건에 따른 정적 신경망과 동적 신경망의 수행 오류. 검은 사각형은 정적 모형의 수행 오류를 나타내고, 검은 삼각형은 동적 모형의 수행 오류를 나타내며, 십자표시는 두 모형의 평균 수행 오류를 나타낸다.

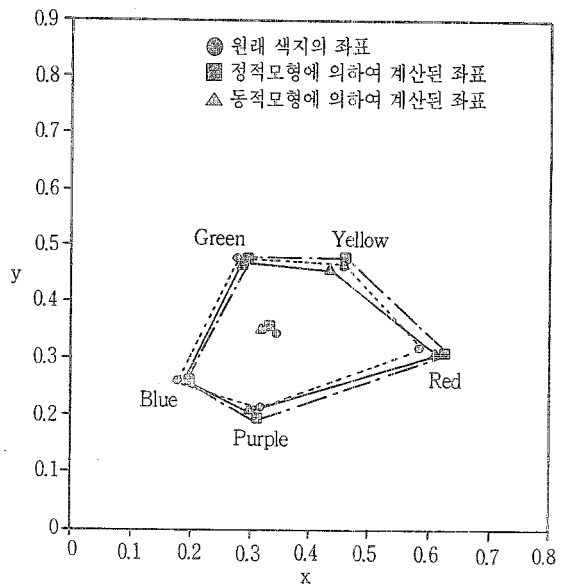


그림 19. 블랙바디 5500 K 조명(그림 3-9의 조명)에서 신경망의 수행. 점선과 검은 원은 원래 색지의 좌표, 일점쇄선과 검은 사각형은 정적 모형의 수행, 실선과 검은 삼각형은 동적 모형의 수행을 각각 나타낸다.

있듯이 표준 조명과 유사한 색채온도 5500 K의 조명 조건에서는 두 모형의 수행 정도가 비슷한 수준으로 우수하며, 조명의 색채 온도가 올라감에 따라서 정적 모형의 이탈 거리는 점차 증가되지만 동적 모형의 이탈 거리는 거의 증가되지 않는다. 정적 모형에서는 조명이 표준조명과 차이가 커짐에 따라서 조명의 변화가 신경망의 수행 결과에 그대로 반영되는 반면, 동적 모형의 경우에는 수행 결과에서 조명의 영향이 효과적으로 제거됨을 알 수 있다. 검사에 이용된 10개의 일광 조명 조건에서 동적 모형의 이탈 거리(265.01 ± 206.42)는 정적 모형의 이탈 거리(465.06 ± 367.90)보다 유의미하게 짧았다($F_{(1,118)} = 13.49, p < .001$).

그림 19에는 그림 12에서 제시된 색채온도 5500 K 조명하에서 정적 신경망과 동적 신경망의 수행정도가 제시되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 모형 모두 수행력이 우수하며, 두 모형의 수행력 간에는 별 차이가 없다. 그러므로 표준 조명과 유사한 조명조건에서는 정적 모형과 동적 모형의 수행 정도가 모두 우수함을 알 수 있다.

여러 가지 조명 조건에 따른 모형의 전체 이탈 거리의 평균은 표준 조명(28.90 ± 47.28), 일광(365.03 ± 313.56), 형광등(561.29 ± 418.83), 수은등(662.15 ± 225.82), 백열등(790.47 ± 478.31), 가상등(1328.20 ± 792.44)의 순으로 나타나 학습 조건인 표준 조명 조건과 일광 조명 조건에서의 수행이 백열등 조명이나 가상등 조명에서 수행보다 유의미하게 우수한 것으로 나타났다($F_{(5,216)} = 56.07, p < .001$). 가상 조명은 그림 9에 제시된 표면 반사율을 근거로 하여 임의적으로 만든 조명으로서 연구에 이용된 다른 조명에 비하여 파장에 따른 강도 분포에서 차이가 크다. 가상 조명 조건에서 신경망의 수행 이탈 거리가 가장 큰 것은 가상 조명의 파장 강도 분포가 다른 조명에 비하여 불규칙하기 때문인 것으로 이해될 수 있다.

여러 가지 조명 조건에 따른 정적 모형과 동적 모형의 이탈 거리가 그림 20에 제시되어 있다. 그림에서 검은 막대는 동적 모형의 수행을, 흰 막대는 정적 모형의 수행을 각각 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 정적 모형의 경우에는 표준 조명(20.13 ± 7.46), 일광

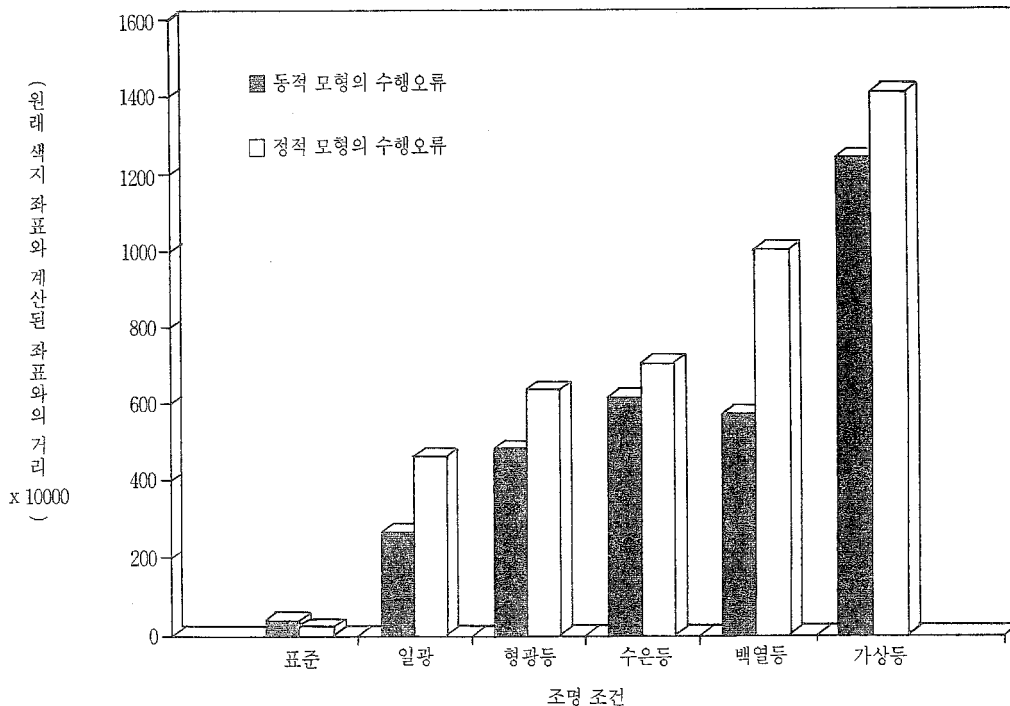


그림 20. 조명 조건에 따른 정적 모형과 동적 모형의 수행 오류. 검은 막대는 동적 모형의 수행 오류, 흰 막대는 정적 모형의 수행 오류를 나타낸다.

(465.06 ± 367.90), 형광등(639.32 ± 431.28), 수은등(708.43 ± 183.43), 백열등(1005.70 ± 572.52)의 순서대로 이탈 거리가 증가하며 동적 모형에서는 표준 조명(37.63 ± 68.39), 일광(265.01 ± 206.42), 형광등(483.25 ± 399.70), 백열등(575.25 ± 222.51), 수은등(615.87 ± 270.93), 가상등(1243.86 ± 773.44)의 순서로 이탈 거리가 커져서 모형과 조명간의 상호작용효과는 유의미하지 않았다.

통계적으로 유의미한 수준은 아니지만 그림 20에서 보듯이 정적 모형에서는 수은등 조건에서의 수행이 백열등 조건에서의 수행보다 우수한 경향이 있고, 동적 모형에서는 수은등 조건에서보다 백열등 조건에서의 수행이 우수한 경향이 있다. 그림 15와 그림 16에 제시된 백열등의 파장 강도 분포를 보면 그림 14에 제시된 수은등의 파장 강도 분포에 비하여 조명의 장파 부분이 일관성 있게 강한 것으로 나타난다. 따라서 동적 모형에서는 조명에서 강하게 나타나는 극단의 파장들을 효과적으로 제거하고 있음을 보여준다.

그림 21에는 절대온도 3100 K의 백열등 조명 조건에서 정적 모형과 동적 모형의 수행 정도가 표시되어 있

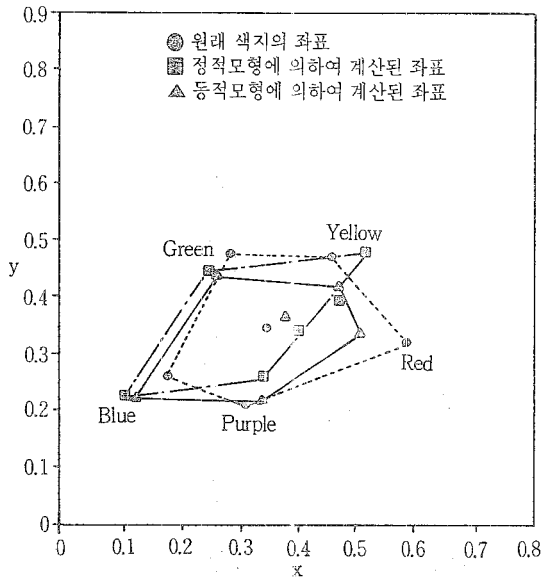


그림 21. 백열등(tungsten-halogen filament lamp) 3100 K 조명 (그림 3-13의 조명)에서 신경망의 수행. 점선과 검은 원은 원래 색지의 좌표, 일점쇄선과 검은 사각형은 정적 모형의 수행, 실선과 검은 삼각형은 동적 모형의 수행을 나타낸다.

다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 정적 모형보다 동적 모형에서 수행력이 더 우수함을 알 수 있다. 특히 조명에서 대부분의 장파 강도가 상대적으로 강한 것과 빨간색지에 대한 수행에서 정적 모형의 수행보다 동적 모형의 수행이 우수한 것을 보면 동적 모형이 조명에서 강한 장파장의 효과를 제거하는데 효과적임을 보여준다. 그림 19와 그림 21의 결과를 종합하면 조명이 표준 조명과 유사하면 두 모형 모두 수행력이 우수하며, 조명이 표준 조명에서 이탈될수록 정적 모형의 수행보다 동적 모형의 수행이 우수함을 알 수 있다.

색지에 따른 두 모형의 이탈 거리는 보라(337.94 ± 294.12), 노랑(526.26 ± 537.53), 초록(544.33 ± 588.16), 파랑(758.26 ± 503.88), 하양(767.85 ± 620.86), 빨강(1099.53 ± 897.89)의 순서로 나타나 보라나 노랑, 초록에 대한 수행이 파랑이나 빨강에 대한 수행보다 우수한 것으로 나타났다($F_{(5,216)} = 19.46, p < .001$). 그러므로 두 모형은 가시 스펙트럼상에서 양극단 중 한쪽 파장에 의하여 결정되는 색보다는 상대적으로 강한 중간 파장에 의해서 결정되는 색에 대한 수행이 우수함을 알 수 있다.

색지별 정적 모형과 동적 모형의 이탈 거리 평균이 그림 22에 제시되어 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 두 모형에서 수행력에 따른 색지의 순서는 유사하지만 정적 모형에서는 보라(388.61 ± 322.38), 노랑(525.71 ± 405.29), 초록(598.41 ± 578.30), 파랑(845.06 ± 599.14), 하양(857.71 ± 547.55), 빨강(1390.28 ± 930.00)의 순서로 색깔에 따라 이탈 거리가 증가하는 폭이 크며, 동적 모형에서는 보라(287.27 ± 259.77), 초록(490.24 ± 605.29), 노랑(526.81 ± 652.83), 파랑(671.46 ± 379.65), 하양(678.00 ± 686.32), 빨강(808.79 ± 778.56)의 순서로 색깔에 따라 이탈 거리가 별로 증가되지 않으므로 모형과 색지간의 상호작용효과는 유의미하였다($F_{(5,216)} = 2.85, p < .02$). 노랑과 초록 색깔에 대한 수행에서는 두 모형의 이탈 거리간의 차이가 적는데 반하여 빨강과 파랑 색깔에 대해서는 두 모형의 이탈 거리간의 차이가 크다. 이러한 차이는 조명의 파장 강도 분포에서 중간 파장보다는 양극단의 파장이 수용장 이동에 의하여 더 잘 제거된다는 것을 보여준다. 일반적으로 조명의 파장 강도 분포는 광원의 색온도에 따라 중간 파장들보다는 양극단의 파장들이 많이 변화된다는 점을

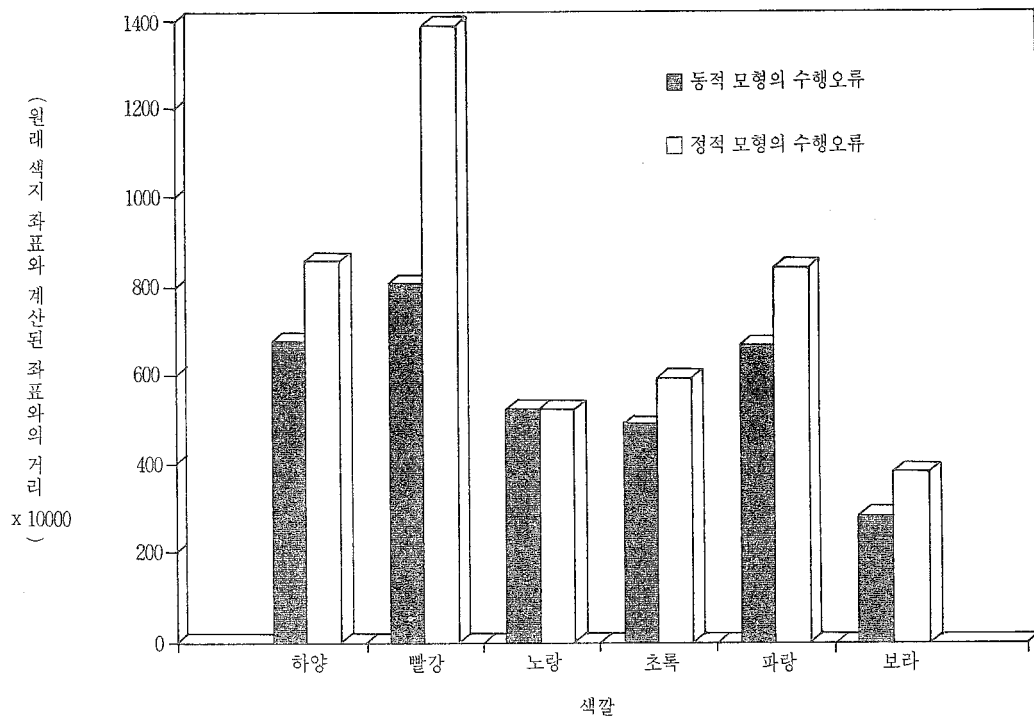


그림 22. 색채에 따른 정적 모형과 동적 모형의 수행 오류. 검은 막대는 동적 모형의 수행 오류, 흰 막대는 정적 모형의 수행 오류를 나타낸다.

고려할 때 동적 모형에서는 수용장 이동을 통하여 조명에서 강한 파장의 효과를 더 강하게 제거하였음을 알 수 있다.

조명과 색지별로 수행력을 보면 수은등을 제외한 모든 조명에서 노랑이나 파랑, 보라 등의 색에 대한 수행은 대체로 우수하고 빨강이나 하양, 파랑에 대한 수행력은 대체로 떨어진다. 그러나 수은등 조명에서는 하양에 대한 수행이 가장 우수하여 조명과 색지의 상호작용효과는 유의미한 것으로 나타났다($F_{(25,216)} = 1.76, p < .02$). 이것은 수은등이 가시 스펙트럼상에서 약간의 굴곡이 있기는 하지만 다른 조명에 비하여 파장강도분포가 비교적 고르기 때문인 것으로 생각된다. 모형과 조명 및 색지에 대한 3차 상호작용효과는 유의미하지 않았다.

모형의 수행 결과들을 종합하면 색지에 따라서 차이가 있기는 하지만 조명이 표준 조명에서 이탈될수록 정적 모형의 이탈 거리는 크게 증가되며 동적 모형의 이탈 거리는 별로 증가되지 않는다. 이것은 동적

모형이 조명의 영향을 효과적으로 제거한다는 것이며, 억제와 눈운동에 의한 광수용기의 순응 과정이 색채 항동성을 일으키는 효과적인 요인임을 나타낸다.

본 연구에서는 색채처리와 관련하여 지금까지 밝혀진 신경 생리학적인 연구 결과들을 바탕으로 망막에서 시뇌까지 여섯개의 층으로 구성된 색채처리 신경망 모형을 개발하였다. 특히 동적 모형과 정적 모형의 수행력 비교를 통하여 눈운동과 광수용기의 순응과정이 조명의 효과를 제거하는데 효과적임을 확인하였다. 본 신경망은 인간 신경계의 정보처리과정에 근거하여 구성되었지만 인간의 생물학적 시각과 관련하여 몇 가지 고려되어야 하는 문제들이 있다. 첫째로 인간은 움직이는 사물을 볼 때 뿐만 아니라 고정된 사물을 볼 때도 설사 없이 불규칙하게 눈운동이 발생한다. 본 연구의 동적 모형에서는 눈운동이 규칙적으로 발생하는 것으로 가정하였다. 모형이 인간과 생물학적으로 좀더 유사한 특징을 지니기 위해서는 불규칙한 눈운동이 발생하여도 규칙적인 눈운동에서 발생하는 효과와 유사

한 결과를 보일 수 있도록 모형이 변화되어야 하며 그러기 위해서는 눈운동을 일으키는 기제에 대한 생물학적 발견들이 선행되어야 할 것이다.

둘째로는 본 모형에서 조명의 효과를 과잉제거하고 있는 것이 아닌가하는 문제이다. 본 연구에서는 조명의 효과를 제거하기 위하여 순응과 눈운동을 가정하고 억제율과 억제 시행수를 조절하여 조명의 효과를 제거하였다. 그러나 앞에서 논의 되었던 인간의 색채 항등성은 완전하지 못하며(Troost와 de Weert, 1989), Walraven 등(1989)의 자료를 참고할 때 그들이 이용한 조명은 본 모형에 사용된 조명과는 다르겠지만 그림 1과 그림 21을 비교하면 본 모형의 수행력은 인간의 수행력보다 더 우수한 경향이 있다. 인간의 색채 지각 현상을 더 정확히 설명하려면 모형이 인간과 더욱 유사한 수행을 보이도록 변화될 필요가 있으며, 모형을 변화시키기 위해서는 다양한 조명조건에 걸친 인간의 색채경험에 대한 정신 물리학적 자료들이 요구된다.

세번째로는 본 신경망의 상위수준에서 연결계수들을 결정하기 위한 역전과 학습방법이 생물학적으로 얼마나 가능성이 있는가의 문제이다. 시각 체계를 구성하는 신경들은 많이 사용되면 연결강도가 강해지는 단순 상관 학습법칙에 의하여 연결계수가 결정될 가능성이 많다. 본 신경망에서는 색채 지각의 비선형성을 해결하기 위해서 역전과 학습방법을 이용하였는데 이러한 학습방법이 생리적인 근거를 지니기 위해서는 직접 연결된 두 신경간의 연결 강도뿐만 아니라 여러 단계를 거친 신경들간의 연결 강도가 결정되는 방법에 대한 신경생리학적인 지지 증거들이 필요하다.

네번째로는 여러 가지 크기의 수용장 기능이 반영되지 않았다. 시각계에는 서로 다른 크기의 수용장에 각각 반응하는 세포들이 있다(Walraven 등, 1990). 따라서 공간 빈도가 서로 다른 색채 처리 수용장을 가지고 있는 세포들의 상호 작용에 의해서 색채 항등성이 영향을 받을 가능성이 있다. 즉, 큰 수용장에 반응하는 세포가 부분적으로 평균 광량을 계산하고, 작은 수용장에 반응하는 세포가 고빈도의 색채 경계에 반응할 가능성도 있다. 본 모형에서는 한가지 크기의 수용장만을 가정하였지만 여러 가지 크기의 수용장을 가정한다면 수용장의 크기에 따라서 억제 시행과 수용장의

이동 방향을 변화시켜야 할 것이다. 여러 가지 크기의 수용장에서 얻은 정보가 조합되어야만 인간이 보는 정도로 조명의 효과가 제거될 가능성도 있다.

다섯번째는 망막에 존재하는 세포들간에도 색 정보 처리와 관련된 상호작용이 발생할 가능성이 있다. Daw(1973)에 의하면 구체적인 기능은 밝혀져 있지 않지만 여러개의 추상체들과 연결이 되어 있는 수평세포들이 존재하며 이것들은 추상체들간에 상호작용을 일으킬 수 있다. 또한 아직까지 그 기능이 명확하게 밝혀져 있지 않지만 인간의 망막에서 양극세포와 무축색 세포 뿐만 아니라 추상체와도 신경 연결을 가지고 있는 망막 중간세포(interplexiform cell)들이 Linberg와 Fisher(1986)에 의하여 발견되었으며, 이 세포들은 망막의 여러 층에 있는 세포들간의 되먹임(feedback) 정보전달기능을 하는 것으로 추정된다. 이와 같이 망막 세포들의 상호작용에 의하여 세포들의 색채 정보처리가 영향을 받을 가능성이 있으나, 이러한 가능성은 본 모형에 반영되어 있지 않다.

여섯째는 이중 대립 세포의 역치가 조건에 따라 변화될 가능성이 있다는 것이다. 외부로부터 자극이 주어졌을 때 정보처리의 상위 수준에서 하위 수준의 세포들을 통제하는 되먹임 기능이 있다면 그 정보에 따라서 하위 수준의 세포들의 반응이 달라질 수 있다. 특히 시뇌에 있는 이중 대립 세포는 상위 시뇌 세포들로부터 영향을 받을 가능성이 많다. 되먹임 정보가 색채 처리에 관여하는 중요한 요인이라면 본 신경망에서처럼 한 방향으로만 정보가 전달되도록 구성된 모형으로는 그 기능을 모방하기 위해서 다른 추가적 기제가 필요하다.

본 연구에서 개발된 모형은 조명의 과장강도분포를 별도로 계산하지 않고, 광수용기의 순응과정과 눈운동, 색채 대립세포의 기능, 그리고 이중대립 세포의 기능 등에 의하여 조명의 효과를 제거하였다. D'Zmura와 Lennie(1986)에 의하면 대상에서 반사되는 빛은 정반사광과 난반사광으로 구분된다. 그리고 Lee(1986)와 Flock(1984) 등은 정반사광의 SPD가 조명의 과장강도분포를 반영하므로 인간의 시각체계가 정반사광을 이용하여 조명의 색을 지각하며, 이것이 색채 항등성에 영향을 준다고 주장한다. 본 신경망에 Lee(1986) 등의 주장을 수용한다면 신경망의 초기수

준에서 정반사광과 난반사광을 구별하는 기능이 추가되어야 하며 상위 수준에는 정반사광을 이용하여 표면에서 반사되는 빛의 파장강도분포를 교정해주는 기능이 필요하다. 이와 같은 기능이 추가되면 표면으로부터 반사되는 빛에서 조명과 반사율을 정확하게 분리해낼 수 있을 것이다. 그러나 모형에 이러한 기능을 반영하기 전에 인간이 정반사광을 이용하여 조명의 효과를 제거한다는 실증적인 자료들이 제공되어야 할 것이다.

결 론

색채 지각 연구 분야에서 해결해야 하는 중요한 과제 중의 하나는 색채 항등성 현상을 설명하는 것이다. 전통적으로 색채 항등성은 서로 독립적인 세계의 흑백도 체계를 가정하는 Land(1964, 1974, 1977)의 레티넥스 알고리즘이나, 조명의 파장강도분포와 파장별 표면 반사율을 소수의 기저함수들로 분할하여 수용기의 순응 과정을 이용하는 D'Zmura와 Lennie(1986) 등의 순응/기저함수 접근 방법과 같은 색채시각 계산이론들로 설명되어 왔다. 이와 같은 이론들은 색채 항등성 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있는 여러 가지 원리들을 제공하지만 생리학적인 타당성이 부족하다는 단점이 있다.

인간의 시각 신경계는 신경계산을 통하여 색채항등성을 실현하는 전형적인 예라고 할 수 있다. 신경망은 시각체계의 신경처리를 모방하기에 용이한 개념적 구조이므로 본 연구에서는 기존의 신경 생리학적 연구결과들이 반영된 신경망을 이용하여 모의 실험을 수행하였다. 신경망을 구성할 때 색채처리과정 중에서 신경 생리학적으로 비교적 잘 밝혀진 초기 색채처리과정은 고정형 신경망으로 구성되었고, 아직 잘 밝혀지지 않은 상위 색채처리과정은 적응형 신경망으로 구성되었다. 적응형 신경망으로 구성된 부분의 연결 계수는 학습에 의하여 결정하였다. 신경망의 학습에 이용된 방법은 은닉단위를 학습시키기에 용이한 역전파 학습 방법이었다. 표준 조명 조건에서 신경망을 학습시킨 후 다른 여러 가지 조명 조건에서 신경망의 색채 지각 능력을 검사한 결과 신경망은 조명의 효과를 제거하고 대상의 고유한 표면 반사율에 근거하여 색채를 지각할

수 있는 것으로 나타났다.

본 모의실험에서는 기존의 연구 결과들에 근거하여 순응과 눈운동이 조명의 영향을 제거하는 효과가 있을 것이라고 기대하였으므로, 신경망의 첫번째 층과 두번째 층 사이에 영상 이동기를 두어 눈운동 기능을 흉내 내도록 하였고, 두번째 층에 있는 단위들에 회귀적 억제 연결을 두어 광수용기의 순응 과정을 흉내내도록 하였다. 순응과 눈운동이 색채 항등성에 기여하는 정도를 명확히 알아보기 위하여 수용장 이동과 회귀적 억제가 기능하는 동적 모형과 수용장이 이동되지 않는 정적 모형으로 구분하여 두 모형간의 수행력을 비교하였다. 정적 신경망은 영상이동에 의하여 새로운 입력 값이 주어지는 기능이 없다는 것을 제외하면 동적 신경망과 동일하였다. 조명 조건이 표준 조명 조건에서 이탈되는 정도가 심할수록 정적 모형의 이탈 거리는 많이 증가하는 반면 동적 모형의 이탈 거리는 적게 증가하였다(그림 20 참조). 따라서 광수용기의 순응과 눈운동이 색채 항등성을 일으키는데 효과적인 요인일 것이라는 본 연구의 가정이 모의 실험을 통하여 지지되었다.

실제 시각 신경계의 복잡성에 비하여 본 연구에 이용된 색처리 신경망 모형에 반영된 신경 세포들의 반응 특성들은, 인간의 망막에서 발견된 세 종류 광수용기의 반응 특성이나 신경절과 외측 슬상핵에서 발견된 색채 대립 세포의 기능 그리고 영장류의 시뇌에서 발견된 이중 대립 세포의 색채 경계 탐지 기능 등과 같이 매우 단순한 기능들이었다. 그럼에도 불구하고 색채지각, 색 경계 탐지 능력 그리고 조명의 효과를 제거하고 대상의 표면 반사율에 근거하여 색채를 알아내는 능력 등이 우수한 것으로 나타났으므로 본 모형에 반영된 기능들이 색채 항등성을 가능하게 하는데 주요한 기능을 한다는 것이 확인되었다.

기존의 색채 처리 신경망들(정찬섭·한광희, 1990; Chung과 Han, 1990; Heisey & Skrzypeck, 1987)에서는 순응이나 눈운동 기능이 반영되지 않고 광수용기의 기능과 색채 대립 기능을 이용하여 부분적으로 조명의 효과를 제거하였다. 따라서 색채 경계를 탐지하거나 조명의 효과를 제거하고 대상 고유의 표면 반사율을 알아내는 기능이 부족하였다. 본 연구에서는 순응과 눈운동이 색채 항등성을 일으키는데 중요한 역할

을 한다는 논리에 근거하여 신경망에 처음의 두 층에 순응과 눈운동의 기능을 반영하고 중간의 두 층에 색채 대립 기능과 이중대립 세포의 기능을, 그리고 출력에 관련된 두개의 층에서 색채를 표상하는 기능을 갖도록 구성하였다. 모의 실험결과 본 신경망은 순응과 눈운동 과정을 모사하여 조명의 영향을 효과적으로 제거할 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서 개발된 신경망은 색채 경계의 탐지와 조명의 효과를 제거하는 능력이 우수한 것으로 나타났다. 후속 연구에서 경계선 탐지를 통하여 형태를 인식하는 기능이 추가된다면 균일 광도의 서로 다른 색채로 이루어진 영상에서도 형태 지각이 가능할 것이다. 또한 본 신경망은 색채 처리의 독립성에 기반을 두고 개발된 모형이므로 깊이나 형태지각 그리고 문자인식과 같은 색채 이외의 지각 능력을 갖춘 신경망과 조합되기가 용이하므로 통합적인 인공 시각 기관을 개발하는데 직접적으로 적용 가능한 기초자료로 쓰일 수 있다.

참고문헌

- 정찬섭 · 한광희(1990). 색채지각의 신경망모형. 한국 인지과학회 춘계학술발표대회 논문집. 23-27.
- Alpern, M., Tompson, S., & Lee, M. S. (1965). Spectral transmittance of visible light by the living human eye, *Journal of the Optical Society of America*, 55, 723-727.
- Arend, L., & Reeves, A. (1986). Simultaneous color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 3, 1743-1751.
- Brown, P. K., & Wald, G. (1963). Visual pigments in human and monkey retinas, *Nature*, 200, 37.
- Bowmaker, J. K., & Dartnail, H. J. A. (1980). Visual pigments of rods and cones in a human retina. *Journal of Physiology*, 298, 501-511.
- Boynton, R. M., & Clarke, F. J. J., (1964). Sources of entoptic scatter in the eye, *Journal of the Optical Society of America*, 54, 1170.
- Brill, M. H. (1978). A device performing illuminant-invariant assessment of chromatic relations. *Journal of Theoretical Biology*, 71, 473-478.
- Buchsbaum, G. (1980). A spatial processor model for object colour perception. *Journal of the Franklin Institute*, 310, 1-26.
- Chung, C. S. (1991). Connectionist models of color vision. *Proceedings of the Korea-US Bilateral Workshop on Computers, Artificial Intelligence and Cognitive Science (Seoul, Korea, August 16-20)*, 92-106.
- Chung, C. S., & Han, K. H. (1990). A neural network for color vision. *Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks (Iizuka, Japan, July 20-24)*, 485-491.
- Dannemiller, J. L. (1989). Computational approaches to color constancy: Adaptive and ontogenetic considerations. *Psychological Review*, 96, 255-266.
- Daw, N. W. (1968). Colour-coded ganglion cells in the goldfish retina: extension of their receptive fields by means of new stimuli. *Journal of Physiology (London)*, 197, 597-562.
- Daw, N. W. (1973). Neurophysiology of color vision. *Physiological Reviews*, 53, 571-611.
- DeMonasterio, F. M., & Gouras, P. (1975). Functional properties of ganglion cells of the rhesus monkey retina. *Journal of Physiology*, 251, 167-195.
- DeValois, R. L., & DeValois, K. K. (1975). Neural coding of color. In E. C. Carterette & M. P. Friedman (Eds), *Handbook of Perception*, 5, (pp. 117-168) New York: Academic press.
- D'Zmura, M., & Lennie, P. (1986). Mechanisms of color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 3, 1662-1672.
- Flock, H. R. (1984). Illumination: inferred or observed? *Perception and Psychophysics*, 35, 293.
- Heisey, I. K., & Skrzypek, J. S. (1987). Color constancy and early vision: A connectionist model, *IEEE first INNS IV*, 317-325.
- Helmholz, H. Von (1852). On the theory of com-

- pound colors. *Philosophical Magazine*, 4, 519–534.
- Helmholz, H. von (1911). *Physiological Optics*. Translated by J. P. Southall, 1924. Rochester, NY: Optical Society of America.
- Helson, H. (1938). *Fundamental problems in color vision I: The principle governing changes in hue, saturation, and lightness of non-selective samples in chromatic illumination*. *Journal of Experimental Psychology*, 23, 439–476.
- Hering, E. (1920). *Outlines of a theory of the light sense*. Translated by L. M. Hurvich, & D. Jameson, 1964. Cambridge: Harvard Univ. Press.
- Horn, B. K. P. (1974). Determining Lightness from an image. *Computer Graphics and Image Processing*, 3, 277–299.
- Hubel, D. H., & Livingstone, M. S. (1987). Segregation of form, color, and stereopsis in primate area 18. *Journal of Neuroscience*, 7, 3378–3415.
- Hurlbert, A. C. (1986). Formal connections between lightness algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 3, 1684–1693.
- Hurvich, L. M., & Jameson, D. (1974). Opponent process as a model of neural organization. *American Psychologist*, 29, 88–102.
- Ingle, D. J. (1985). The goldfish as a retinex animal. *Science*, 227, 651–654.
- Jameson, D. (1985). Opponent-colors theory in light of physiological findings. In W. H. Ottoson & S. Zeki (Eds.), *Central and peripheral mechanisms of color vision*. New York: Macmillan.
- Jameson, D., & Hurvich, L. M. (1989). Essay concerning color constancy. *Annual Review of Psychology*, 40, 1–22.
- Judd, D. B. (1940). Hue saturation and lightness of surface colors with chromatic illumination. *Journal of the Optical Society of America*, 30, 2–32.
- Judd, D. B., & Wyszecki, G. (1975). *Color in business, science, and industry* (3rd ed.). New York: Wiley.
- Kaufman, L. (1976). *Sight and mind: An introduction to visual perception*. London & New York: Oxford University Press.
- Land, E. H. (1964). The retinex. *American Scientist*, 52, 247–264.
- Land, E. H. (1974). The retinex theory of color vision. *Proceedings of The Royal Institution of Great Britain*, 47, 23–58.
- Land, E. H. (1977). The retinex theory of color vision. *Scientific American*, 237, 108–128.
- Land, E. H. (1983). Recent advances in retinex theory and some implication for cortical computation: Color vision and the natural image III. *Proceedings of The National Academy of Science of USA*, 80, 5163–5169.
- Land, E. H. (1986). Recent advances in retinex theory. *Vision Research*, 26(1), 7–21.
- Land, E. H., Hubel, D. H., Livingstone, M. S., Perry, S. H., & Burns, M. M. (1983). Colour-generating interactions across the corpus callosum. *Nature*, 303, 16, 616–618.
- Land, E. H., & McCann, J. J. (1971). Lightness and Retinex theory. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 1–11.
- Lee, Hsien-Che (1986). Method for computing the scene-illuminant chromaticity from specular highlights. *Journal of the Optical Society of America A*, 3, 1694–1699.
- Lennie, P. (1984). Recent developments in the physiology of color vision. *Trends in Neuroscience*, 7, 243–248.
- Linberg, K. A., & Fisher, S. K. (1986). An ultrastructural study of interplexiform cell synapses in the human retina. *The Journal of comparative neurology*, 243, 561–576.
- Livingstone, M. S. (1988). Art, illusion and the visual system. *Scientific American*, 68–75.
- Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1984). Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 4, 309–356.

- Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1987). Connections between layer 4B of area 17 and the thick Cytochrome oxidase stripes of area 18 in the Squirrel monkey, *Journal of Neuroscience*, 7, 3371–3377.
- Maloney, L. T., & Wandell, B. A. (1986). Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance, *Journal of the Optical Society of America A*, 3, 29–33.
- Marks, W. B., Dobelle, W. H., & MacNichol, Jr. E. F. (1964). Visual pigments of single primate cones, *Science*, 145, 1181–1183.
- Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco, Freeman.
- McCann, J. J., McKee, S. P., & Taylor, T. H. (1976). Quantitative studies in Retinex theory : A comparison between theoretical predictions and observer responses to the 'Color Mondrian' experiments, *Vision Research*, 16, 445–458.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1988). *Explorations in parallel distributed processing: A handbook of models, programs, and exercises*. MA: MIT Press.
- Michael, C. R. (1978). Color vision mechanisms in monkey striate cortex : simple cells with dual opponent-color receptive fields, *Journal of neurophysiology*, 41, 1233–1249.
- Nakauchi, S., Usui, S., & Miyake, S. (1990). A three-layered neural network model which simulates color-opponent Processing, *Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks (Iizuka, Japan, July 20–24)*, 481–484.
- Newton, I. (1952, 1704). *Opticks*. New York: Dover publications.
- Newhall, S. M., Nickerson, D., & Judd, D. B. (1943). Final report of the O. S. A. sub-committee on spacing of the Munsell colors, *Journal of the Optical Society of America*, 33, 385.
- Norren, D. V., & Vos, J. J. (1974). Spectral transmission of the human ocular media, *Vision Research*, 14, 1237–1243.
- Rosenblatt, F. (1959). Two theorems of statistical separability in the perceptron. In *Mechanisation of thought processes: Proceedings of a symposium held at the National Physical Laboratory, November 1958. Vol. 1* (pp. 421–456). London: HM stationery Office.
- Sokolov, E. N., & Izmailov, C. A. (1983). The Conceptual Reflex Arc : A Model of Neural Processing as Developed Colour Vision. In Hans-George Geissler (Ed.), *Modern Issues in Perception*. (pp. 192–216) North-Holland.
- Troost, J. M., & de Weert, C. M. M. (1991). Surface reflectance and human color constancy: Comment on Dannemiller(1989). *Psychological Review*, 98, 143–145.
- Usui, S., Nakauchi, S., & Nakano, M. (1990). Reconstruction of Munsell color space by a five-layered neural network. *International joint conference on neural networks, June 17–21, 1990; proceedings Vol. II*. (pp. 515–520). NJ: IEEE Neural Networks Council.
- Valberg, A., Seim, T., Lee, B. B., & Tryti, J. (1987). Simulation of responses of spectrally-opponent neurones on the macaque lateral geniculate nucleus to chromatic and achromatic light stimuli, *Vision Research*, 27, 867–882.
- Vos, J. J. (1963). Contribution of the fundus oculi to entopic scatter, *Journal of the Optical Society of America*, 53, 1449.
- Vos, J. J. & Boogaard, J. (1963). Contribution of the cornea to entoptic scatter, *Journal of the Optical Society of America*, 53, 869.
- von Kries, J. (1905). Die Gesichtsempfindungen. In W. Nagel (ed.), *Handbuch der Physiologie der Menschen*, (pp. 109–282) Brunswick: Wieweg.

- Wald, G., & Brown, P. K. (1965). Human color vision and color blindness. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 30, 345–359.
- Walraven, J., Benzschawel, T. L., & Rogowitz, B. E. (1989). Color constancy interpretation of chromatic induction. *Die Farbe*.
- Walraven, J., Enroth-Cugell, C., Hood, D. C., MacLeod, D. I. A., & Schnapf, J. L. (1990). The control of visual sensitivity: Receptor and postreceptor processes. In L. Spillmann & J. S. Werner (Eds.), *Visual perception: The neurophysiological foundations*. San Diego, CA: Academic Press.
- White, E. L. (1989). *Cortical circuits: Synaptic organization of the cerebral cortex structure, function, and theory*. Boston: Birhä user.
- Widrow, G., & Hoff, M. E. (1960). Adaptive switching circuits. *Institute of Radio Engineers, Western Electronic Show and Convention, Convention Record, Part 4*, 96–104.
- Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1966). Spatial and chromatic interaction in the lateral geniculate body of rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, 29, 1115–1156.
- Wolf, E., & Gardiner, J. S. (1965) Studies on the scatter of lights in the dioptic media of the eye as a basis of visual glare, *Archives of the Ophtalmology*, 74, 338–345.
- Woodworth, R. S. (1938). *Experimental Psychology*. New York: Holt.
- Worthey, J. A. (1985). Limitations of color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 1014–1026.
- Worthey, J. A., & Brill, M. H. (1986). Heuristic analysis of von Kries color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 1, 1708–1712.
- Wyszecki, G., & Stiles, W. (1982). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulas* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Young, T. (1802). On the theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92, 12–48.
- Zeki, S. (1980). The representation of colors in the cerebral cortex. *Nature*, 284, 412–418.
- Zrenner, E., Abramov, I., Akita, M., Cowey, A., Livingstone, M., & Valberg, A. (1990). Color perception: Retina to cortex. In L. Spillmann & J. S. Werner (Eds.), *Visual perception: The neurophysiological foundations*. San Diego, CA: Academic Press.

Realizing Color Constancy with a Dynamic-light-adapting Neural Network Model

Kwang Hee Han and Chan Sup Chung

Yonsei University

According to the adaptation theory, changes in the sensitivity of the cones caused by illumination play a very critical role in color constancy. However, since the sensitivity of the cones may rapidly dissipate as the levels of adaptation grows up, adaptation theory assumes that eye-movement is an essential part controlling the sensitivity of the cones not to be saturated. A neural network model for color vision was developed to simulate the function of adaptation and eye-movement as specified in adaptation theory. Color constancy was the focal interest in the designing of the neural network. A six-layered neural network was designed in such a way to accommodate a number of human principles of color processing from retina to cortex. Units in each of the six layers were made to mimic the three kinds of cones, adaptation of cones, color-opponent units, double-opponent units, interconnecting units between area 17 and V4, and the units in area V4, respectively. The fifth layer were treated as hidden and its connections with the fourth and sixth layers were made to be adaptively determined by back-propagation algorithm. Outputs of the network were mapped onto the CIE color space by the units in the sixth layer. The effect of eye-movement was simulated by shifting the input color image back and forth across the input field. Hence, the neural network thus developed was dynamic in nature. In order to evaluate the effect of installing adaptation and eye-movement mechanisms in the neural network on approximating color constancy, the performance of the dynamic neural network was compared with that of a static one of which structure is identical to the dynamic one except the absence of adaptation and eye-movement mechanisms. The performance of the dynamic neural network approached to color constancy in a satisfactory level and was significantly superior to that of the static neural network.