

## 대상의 움직임 파악에 미치는 색상 정보의 비선형적 영향

김 정 훈

KAIST 인문사회과학부

색상운동정보처리의 특성을 밝히고자, 색상운동에서의 운동밀침과 운동융집/운동해리 현상의 존재 여부, 그리고 지각된 운동방향을 정신물리학적으로 조사하였다. 등휘도 색상운동 자극을 사용한 실험 결과, 색상운동요소간에서의 운동밀침 현상이 관찰되었고, 색상운동으로 구성된 plaid의 지각된 움직임 방향은 구성요소 운동방향의 vector sum방향에서 결정되며, 색상운동요소들간의 운동융집과 운동해리는 비선형 색상운동요소를 포함하여 인접한 두 운동요소의 가장 큰 방향각도 차이에 의해 결정됨이 밝혀졌다. 아울러, 색상운동정보와 휘도운동정보간의 상호작용도 관찰되었다. 이 결과는, 휘도운동과 유사하게, 시각생리학의 연구결과와 일치되는 선형과 비선형 경로의 정보 처리특성에 의해 색상운동이 잘 설명될 수 있음을 시사한다.

**주제어** 색상운동, 휘도운동, 비선형적 처리, 운동밀침, 운동융집, 운동해리

시각 정보처리과정이 선형 시스템 분석의 틀 안에서 잘 이해될 수 있다는 점(De Valois & De Valois, 1990; Kelly, 1979)과 시각체계에서의 정보처리가 여러 시각 속성들(예, 형태, 운동, 색상, 깊이 등)에 대한 병행적이고 독립적인 처리 경로를 통해 이루어진다는 생리학적, 정신물리학적 관찰은

지난 수십 년 동안 시각체계의 구조와 기능을 밝힌 시각 연구의 초석이었다(DeYoe & van Essen, 1985; van Essen, Anderson & Felleman, 1992; Zeki, 1978). 그림 1에 요약해 놓았듯이, 여러 시각 생리 연구들은 이 정보처리의 독립성이 시각의 초기 단계에서부터 관찰됨을 밝혀 왔는데, 즉 눈의 망

본 연구는 1999년도 학술진흥재단의 연구비에 의해 연구되었음(KRF-99-041-C00497)

그림 2, 5, 8, 10은 논문 끝에 있음.

교신저자 주소 : 김정훈, 대전시 유성구 구성동 한국과학기술원 인문사회과학부, 7305-701

(E-mail: miru@kaist.ac.kr)

막에서부터 대상의 시각 속성이 P 세포와 M 세포의 활동으로 나뉘어 시상의 LGN을 거친 후 시각 피질에서 V1 → V4 → IT 혹은 V1 → V2 → V4 → IT로 연결되는 “what”경로와 V1 → MT → MST 혹은 V1 → V2 → MT → MST로 이어지는 “where”경로에서 독립적으로 처리된다는 것이다(Lenny, Trevarthen, van Essen & Wassel, 1990; Livingstone & Hubel, 1988).

독립적 시각 정보처리 경로의 핵심을 이루는 것은 그림 1에서 구분되듯이, 색상과 운동 정보의 처리이다. V4와 MT영역의 세포들이 각각 색상과 운동 정보에 반응하는 특징은 망막과 LGN의 P 세포와 M 세포의 활동 특성을 반영하는 것이다(Zeki, 1978). P 세포는 상대적으로 대상의 고 공간주파수와 저 시간주파수에 반응하고 보다 중요한 특징으로 색상정보를 추출하는 반면, M 세포는 상대적으로 대상의 저 공간주파수와 고 시간주파수에 반응하고 색상정보보다는 주로 휘도(luminance) 정보에 근거하여 반응하는 것으로 알려져 있다(예, Shapley, 1990). 이러한 M 경로의 색상정보에 대한 둔감성에 의하여 MT영역을 근간으로 하는 시각운동체계는 휘도가 아닌 색상(chromaticity)의 변화로만 정의된 운동(등휘도 색상대비, isoluminant chromatic contrast)을 탐지하지 못하는 것으로 여겨졌으며(Zeki, 1974), 몇 연구들은 실제로 사람들이 등휘도 색상운동을 지각하지 못하거나, 지각하더라도 그 속도는 물리적 운동속도에 비해 현저히 떨어짐을 보고하였다(예, Cavanagh, Tyler & Favreau, 1984; Ramachandran & Gregory, 1978).

그러나, 최근 들어 MT영역의 어떤 세포들은 등휘도 색상대비 자극에 반응하며(Dobkins & Albright, 1994), 휘도운동에의 순응이 정지된 색상자극에 운동잔여효과(motion aftereffect)를 창출하고(Derrington & Badcock, 1985; Mullen & Baker, 1985), 휘도운동에 의해 야기된 운동잔여효과를 색상운동에 의해 상쇄시킬 수 있으며(Cavanagh & Favreau, 1985; Chichilnisky, Heeger & Wandell, 1993), 색상이 애매

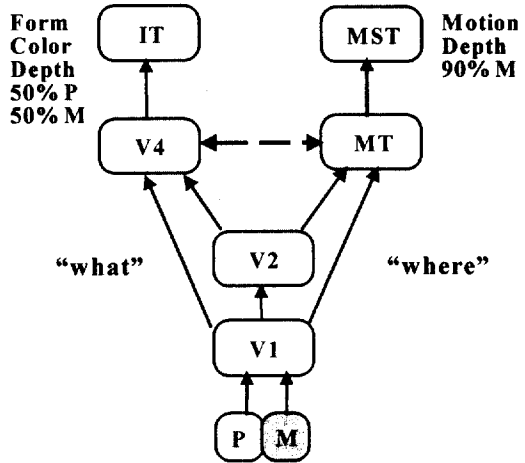


그림 1. 시각체계의 해부적 경로: “what”경로는 대략 망막의 P세포와 M세포로부터 각 50%정도의 정보로 구성되는 반면, “where”경로는 주로(90%) M세포로부터의 정보로 구성된다고 알려져 있다.

한 휘도운동의 방향결정에 영향을 줄 수 있음(Papathomas, Gorea & Julesz, 1991)이 밝혀지면서 휘도와 색상운동정보의 상호작용에 대한 연구에 관심이 고조되었다. 여기서 최근의 휘도와 색상운동정보의 상호작용을 둘러싼 논쟁을 정리하기에 앞서, 먼저 시각체계의 휘도운동 정보처리와 색상운동 정보처리에 관해 연구되어온 것을 간략히 살펴본다.

### 휘도 및 휘도대비에 근거한 운동 정보처리

많은 연구자들은 시각체계의 운동정보처리가 2 단계로 이루어진다는 데에 동의하고 있다(Adelson & Movshon, 1982; Movshon, Adelson, Gizzi & Newsome, 1986; Rodman & Albright, 1989; Welch, 1989; Wilson, Ferrera & Yo, 1992). 이를 Adelson과 Movshon이 1982년에 시각연구에 도입한 아래 그림 2에 예시한 plaid패턴을 가지고 설명해 보기로 한다.

Plaid는 다른 방위를 가지고 휘도가 코사인에 따라 변하는 두 개의 패턴을 공간적으로 겹쳐서

구성되는 패턴인데, 이 패턴이 시각연구에서 자주 사용되는 까닭은 시각체계의 초기정보처리가 대상의 공간주파수 분석에 근거한 선형적 처리(Fourier analysis)임을 가정하기 때문이다(Campbell & Gubisch, 1966; Graham & Nachmias, 1971; Westheimer, 1986; Williams, Brainard, McMahon & Navarro, 1994). Plaid는 구성요소 운동벡터들이 IOC(아래에서 설명함; 그림 2의 오른쪽에서 점선 화살표)를 중심으로 나누어 있으면 Type I, 어느 한 쪽으로 몰려 있으면 Type II로 구분된다(Ferrera & Wilson, 1990). 이 2차원 plaid의 전체 움직임(pattern motion) 방향은 먼저 구성요소인 1차원 코사인 패턴의 움직임 방향(component motion, 위치방향에 수직인 쪽, 왼쪽 그림에서 흰색 화살표, 오른쪽 그림에서 얇은 검정 화살표)이 추출된 후 이들 구성요소들의 움직임 정보들이 통합되어 결정되는 것이다. V1영역에 있는 운동방향 선택세포들이 구성요소의 움직임 정보에 반응하고, MT영역의 세포들이 패턴움직임 방향에 반응함이 생리적으로 밝혀진 바 있다(Rodman & Albright, 1989).

그런데, 이들 구성요소들의 운동방향 정보가 통합되는 방식에 대하여 그 동안 논란이 있었는데, Adelson과 Movshon은 IOC(intersection of constraint lines)라고 알려진 알고리즘을 제안하였고, 다른 연구자들은 구성요소 운동벡터들의 vector sum알고리즘을 제안(그림에서 붉은 화살표 방향)하였다(Wilson et al., 1992; Wilson & Kim, 1994a). IOC는 구성요소 운동벡터의 머리에 직교하는 제한선들(constraint lines)이 만나는 지점을 일컫는 것으로,

Type I과 Type II plaid 모두 예언하는 운동방향은 그림 2에서 수직으로 위쪽 방향이다. 후자의 알고리즘에서 핵심적인 사항은 물리적으로 정의된 구성요소의 휘도 운동벡터 뿐 아니라(Fourier spectrum 상에서 운동에너지가 관찰됨), 구성요소의 겹침으로 나타나는, 즉 휘도대비 운동벡터(그림 2의 Type I에서 수평으로 보이는, 그리고 Type II plaid에서 오른쪽으로 기울어져 보이는 회색 선)가 모두 포함되는 vector sum 작용이다. Fourier spectrum상에서는 이 방향(방위)에 수직이므로 왼쪽 위 방향, 초록 화살표)으로 움직이는 운동에너지가 관찰되지 않는 이유로 이 운동요소를 연구자들은 non-Fourier 운동요소(Chubb & Sperling, 1988; Wilson & Kim, 1994a) 혹은 second-order운동요소(Cavanagh & Mather, 1989)로 지칭하였다. 두 알고리즘이 예언하는 지각된 패턴 움직임의 방향은 Type I의 경우 매우 유사하지만 Type II의 경우 상당히 다를 수 있는데, 그림 2의 Type II의 예에서 IOC는 점선 화살표로 표시된 움직임 방향을, vector sum은 얇은 검은 화살표(Fourier 운동요소)와 초록 화살표(non-Fourier 운동요소)로 표시된 운동요소들의 vector sum 방향(파란 화살표)을 예언한다. 실제 사람들이 이 plaid의 움직임을 지각한 방향이 Type I의 경우 IOC와 vector sum알고리즘이 예언하는 방향과 일치하였으나, Type II의 경우 지각된 움직임 방향은 IOC의 예언과는 벗어난 구성요소의 휘도 운동벡터(Fourier 운동요소)와 이들의 겹침으로 생성된 휘도대비 운동벡터(non-Fourier 운동요소)들의 vector sum 방향과 일치하는 연구 결과가 보고된

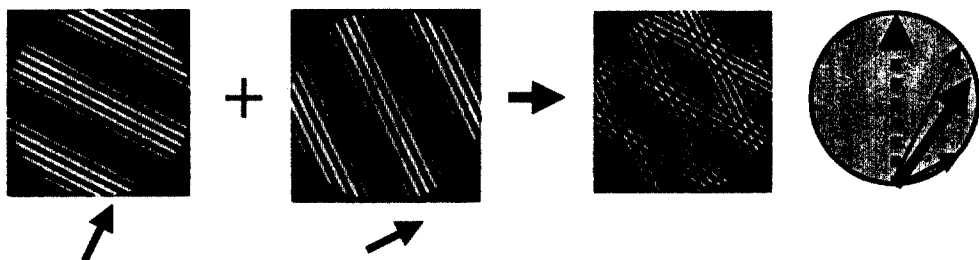


그림 3. Type II non-Fourier CM 패턴

바 있다(Wilson & Kim, 1994b; Yo & Wilson, 1992).

Plaid의 지각된 운동방향에 대하여 IOC와 vector sum알고리즘의 예언 차이를 극대화할 수 있는 한 방법은 Type II plaid를 구성함에 있어 그림 3에 예시한 바와 같이 plaid가 오직 두 개의 구성요소 운동만을 가지도록 하는 것이다. 이 예의 경우 정지된 고 공간주파수 코사인 패턴(carrier)을 저 공간주파수의 휘도대비로 움직이게 하는 것인데 (contrast modulation), CM 패턴으로 불리는 이 일차원 패턴을 두 개 겹치면 세 운동요소(두 개의 Fourier 운동요소와 하나의 non-Fourier 운동요소)를 포함하는 기존의 코사인 plaid와는 달리 오직 두 운동벡터만이 포함된다(Chubb & Sperling, 1988; Kim & Wilson, 1996). 이 non-Fourier CM plaid에 대하여 IOC는 그림에서 점선 화살표로 표시된 방향, vector sum은 굵은 화살표로 표시된 방향으로 움직임이 지각될 것을 예언하는데, 사람들은 vector sum 알고리즘이 예언하는 방향으로 지각함이 보고되었다(Wilson & Kim, 1994b).

지금까지의 연구들을 종합하면, 시각체계는 휘도에 근거한 Fourier 혹은 first-order운동정보와 휘도대비에 근거한 non-Fourier 혹은 second-order 운동정보를 독립적으로 처리한 후 이들 운동벡터들을 vector sum 작용으로 통합함을 알 수 있는데, Wilson 과 Kim(1994a)은 이 경로들이 각각 V1 → MT → MST와 V1 → V2 → MT → MST로 구분되는 두 독립 운동경로일 것으로 생각하고, 시각체계의 운동정보처리 계산모형을 제안하였는데, 이를 그림 4에 도식적으로 표현하였다.

### 색상에 근거한 운동정보처리

휘도 정보가 개입되지 않은 순수한 색상 운동정보의 처리 특성을 연구하기 위하여 자주 사용되는 자극이 등휘도 색상대비 패턴이다(De Valois & De Valois, 1990). 예로 순수한 적록 색상 패턴은 색상이 코사인을 따라 적색에서 적록의 혼합색,

녹색 그리고 다시 이 순서가 반복되며 변하는 것인데, 즉 이는 두 등색상 휘도 패턴(isochromatic luminance gratings)을 180도 위상을 달리하여 공간적으로 합하는 것으로 중요한 점은 두 색상의 휘도를 동일하게 유지시키는 것이다. 이 패턴은 공간적으로 동일한 휘도를 가지며 오직 두 색상만이 180도 위상 차이를 가지며 코사인에 따라 변한다.

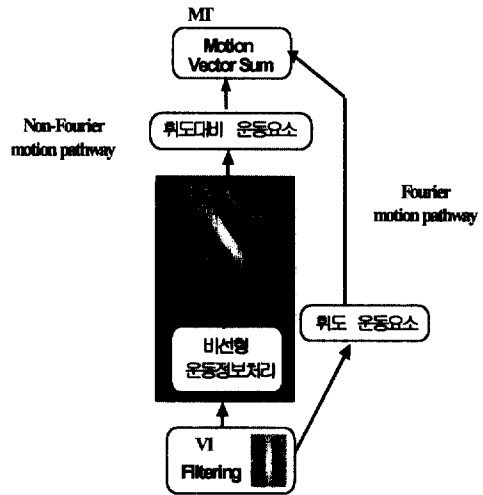


그림 4. Fourier와 non-Fourier 운동정보처리 경로와 해부적 경로의 대응

Krauskopf와 Farell(1990)은 등휘도 색상을 가진 두 개의 일차원 색상 패턴을 공간적으로 겹쳐 구성한 plaid가 어떤 조건에서 패턴운동(운동응집, coherent motion)으로 지각되지 않고 두 구성요소가 각각의 운동방향으로 움직이는지를(운동해리, transparent motion) 조사하였는데, 두 구성요소가 MacLeod와 Boynton(1978)의 color space상에서 주축(cardinal-axes) 내에서 정의될 때만 (즉, 두 구성요소 모두 red-green이거나 혹은 모두 blue-yellow 등휘도 색상변화) 패턴운동방향으로 움직이는 운동응집이 관찰되고, 두 구성요소가 주축간에서 정의될 때는 (즉, 한 구성요소는 red-green, 다른 요소는 blue-yellow 등휘도 색상변화) 운동해리가 관찰됨을 보고하였다. 이들은 이 결과를 바탕으로 색상운동은

대답과정 색상차원에서만 처리된다고 결론지었다.

그러나, Cropper, Mullen과 Badcock(1996)은 등회도 색상운동간의 운동응집과 운동해리를 결정하는 요인은 Krauskopf와 동료들의 주장처럼 두 운동요소가 주축의 색상을 공유하는가에 달려 있는 것이 아니라 두 운동요소간의 운동방향 각도라고 주장하였다. 이들은 두 색상 운동요소를 주축 내에서 뿐 아니라 주축간에서 추출하고, 이들의 운동방향 각도를 작게는 5도에서 크게는 90도까지 변화시키며 운동응집 여부를 조사하였다. 실험 결과, 두 색상운동요소가 주축 내(예, red-green으로만)에서 혹은 주축간(예, red-green과 blue-yellow)에서 정의된 것과는 상관없이 두 운동요소의 운동방향 각도가 30도 이내로 작으면 운동응집이 그 이상이면 운동해리가 관찰됨을 보고하였다. 색상 운동요소의 운동방향 각도와 관련된 운동응집/운동해리 분리는 휘도 운동정보처리에서 관찰된 것과 동일한 결과이다(Kim & Wilson, 1993). Krauskopf와 그의 동료들도 후속 연구를 통하여 운동응집이 반드시 주축 내의 색상을 공유하는 두 색상패턴들 만에서 일어나는 것이 아님을 밝히며 그들의 결론을 수정한 바 있다(Farell, 1995; Krauskopf, Wu & Farell, 1996). 이 연구들에서 아주 흥미 있는 또 다른 관찰은 어떤 자극 조건에서도 두 운동요소가 각각 색상차원과 휘도차원으로 구성되었을 때는 운동응집이 일어나지 않는다는 점이다. 즉 색상차원 내에서는 휘도차원 내에서 그렇듯이 위치 혹은 운동방향 간의 상호작용이 있으나, 색상운동과 휘도운동간에서는 이러한 상호작용이 없다는 것이다.

이러한 색상운동과 휘도운동간의 상호작용 기여는 앞에서 정리한 다른 연구자들의 색상과 휘도 운동의 상호순응, 운동방향 상쇄, 색상의 애매한 휘도 운동방향결정에의 영향 등의 결과들과 모순되는 것이다. Farell(1999)은 최근에 이러한 모순된 듯 보이는 결과들을 색상운동의 휘도운동에의 영향이 1차원 운동과 2차원 운동에 다르게 적

용되는 것임을 보이며 해결하려 하였다. 즉, 1차원 휘도운동에 색상운동이 더해지면 1차원 운동의 지각된 속도는 감소하는 반면, 2차원 휘도운동(plaid)에 색상정보가 더해지면 지각된 속도는 변하지 않음을 관찰하였다. 나아가, 2차원 등회도 색상 plaid의 한 구성요소에 휘도정보를 더하면 지각된 plaid의 운동방향은 IOC예언에서 벗어나지만, 2차원 휘도 plaid의 한 구성요소에 색상정보를 더해도 지각된 plaid의 운동방향은 IOC예언에서 벗어나지 않음을 관찰하였다. 이는 Kooi와 De Valois(1992)의 연구결과와 유사한 것이다. 따라서, 앞서 색상과 휘도운동의 상호작용을 보인 연구결과들은 색상 정보의 1차원 운동에 미치는 영향에 기인한 것이며, 상호작용의 기여를 보인 연구결과들은 색상 정보의 2차원 운동에 미치는 영향에 기인한 것이라는 주장이다.

Gegenfurtner와 Hawken(1996)은 색상과 휘도운동간의 상호작용에 관한 모순된 연구결과들을 주로 운동정보처리의 시간적 특성을 달리하는 두 운동경로의 존재로 설명하려 했다. 즉, 빠른 정보처리의 특성을 지닌 운동경로는 주로 휘도정보에 근거한 운동을 탐지하고 상대적으로 색상운동에는 둔감하지만 대상의 운동방향을 지각하는데 애매하지 않은 반면, 느린 정보처리의 특성을 지닌 운동경로는 색상정보에 민감하지만 대상의 속도, 방향 등의 지각에는 애매하다는 것이다. 이 느린 운동경로의 생태학적 의미는 대상의 표면정보(대표적으로 색상 그 자체)를 다른 외부 요인들(예로 광원의 변화에 따른 음영 등)에 관계없이 안정되게 추출하는 데에 있다고 제안했다. 이들 주장의 핵심은, 시각체계는 대상의 운동정보를 빠른 그리고 느린 경로에서 뿐 아니라, second-order운동, 주위에 기반한 운동(Cavanagh, 1992), 깊이정보에 근거한 운동(Regan, 1991) 등 여러 경로에서 독립적으로 처리하며, 이 정보들이 주어진 상황에 반응하기에 최적인 방향으로 통합된다는 것이다.

## 연구과제

시각체계의 색상운동과 휘도운동 정보처리에 관한 앞선 연구들을 요약하면, (1) 색상운동과 휘도운동은 독립적으로 처리되며(Cavanagh, 1996; Cropper & Derrington, 1996), (2) 휘도운동 처리경로는 빠르게 움직이고 짧게 제시되며 휘도대비가 낮은 운동패턴에 적합하고, 색상운동 처리경로는 상대적으로 처리시간이 오래 걸리나 대상의 표면 정보를 일관되게 추출하는데 적합하며(Gegenfurtner & Hawken, 1996), (3) 색상 운동처리 경로는 주로 대립과정 색상에 반응하지만(Krauskopf & Farell, 1990), 운동방향이 유사할 경우 color space에서 다른 주축에 있는 색상운동간에는 상호작용이 있고(Cropper et al., 1996), (4) 색상운동과 휘도운동간의 상호작용은 자극상황에 따라 다르게 나타난다(Farell, 1999).

본 연구에서는 위에 요약한 연구결과들과 관련하여 색상정보가 운동 정보처리에 미치는 영향을 세 방향으로 나누어 살펴보고자 하였는데, 특히 색상정보의 비선형적 처리특성에 초점을 두었다. 첫째 연구과제는, 색상운동정보간 상호작용의 특성을 밝히는 것이다. 다시 말해, 비록 생리학 연구에서 아직 색상운동방향 선택 세포가 발견되지는 않았으나 여러 정신물리학 실험은 그 존재를 시사하고 있는데, 이들이 선택적 휘도운동방향 반응단위들간에 존재하는 것으로 알려진 운동방향에 따른 반응 억제적 관계를 가지고 있는가 하는 점이다. 이를 알아보기 위해 휘도운동요소간에 존재하는 것으로 알려진 운동밀침(motion repulsion)현상이 색상운동요소간에도 존재하는지 조사하였다. 또한 운동방향 각도가 큰 경우에 있어서의 운동응집/운동해리 여부를 조사하였다. 둘째는, 색상정보의 비선형적 처리과정 자체에 관한 연구이다. 색상정보는 운동정보가 M 경로에서 그러하듯이,  $V1 \rightarrow V4 \rightarrow IT$ 와  $V1 \rightarrow V2 \rightarrow V4 \rightarrow IT$ 로 가는 두 경로에서 처리되는데, V2영역의 비선형적 운동정

보처리를 고려할 때(von der Heydt, Peterhans & Baumgartner, 1984; Wilson et al., 1992; Wilson & Kim, 1994a), 색상정보의 비선형적 처리의 특성을 밝히는 것은 색상정보가 운동처리에 미치는 영향을 밝히는데 중요한 관건이 될 것이다. 최근의 한 연구는 색상운동정보처리가 기본적으로 비선형적임을 시사하고 있다(Baker, Boulton & Mullen, 1998). 이들은 상대적으로 먼 공간(약 시각각도 7도)에 다른 세부패턴특징을 갖는 등휘도 색상패턴의 움직임이 지각됨을 보고하였는데, 이는 초기시각단계의 선형적 공간주파수 필터의 작용으로는 설명할 수 없는 결과이다(Kelly, 1982). 이를 알아보기 위해 second-order 구조인 색상대비를 움직이는 plaid의 지각된 움직임 방향의 계산에 비선형 처리과정이 개입되는지를 조사하였다. 셋째는, 색상운동과 휘도운동간의 비선형적 통합에 관한 연구로 색상운동요소와 휘도운동요소로 구성된 plaid에서의 운동응집/운동해리 여부와 운동밀침현상의 존재 여부를 조사하였다.

## 실험 1

휘도운동방향 반응단위들간에는 억제적 비선형 상호작용이 존재하는데, 이에 따른 한 현상적 경험은 공간적으로 근접한 운동요소들이 서로를 밀침으로 인해서, 지각되는 운동방향이 정의된 운동방향에서 이탈되는 것이다(Marshak & Sekuler, 1979; Mather & Moulden, 1980; Snowden, 1989; Kim & Wilson, 1996; Kim & Wilson, 1997). 운동밀침이라고 일컬어지는 이 현상은 운동요소들의 운동방향 각도차이의 함수로 관찰된다. 실험 1a에서는 색상운동요소들간에도 이 밀침 현상이 존재하는지를 살펴봄으로써 색상운동의 비선형적 처리특성을 밝히고자 하였고, 실험 1b에서는 색상운동과 휘도운동간의 운동밀침현상을 살펴봄으로써 색상운동과 휘도운동간의 상호작용을 조사하였다.

방법

**참여자.** 본 연구자와 실험의 목적에 대해 알지 못하는 KAIST와 충남대학교 학생들을 포함하여 4 명이 참여하였다. 이들은 정상시력을 가졌고, 색시는 없었다.

**도구.** 수평주파수 85 Hz인 19인치 EIZO 모니터를 사용하여 자극제시를 하였고, 자극의 통제는 Power Mac Cube 450을 이용하였으며, 실험 프로그램은 MatLab으로 구성하였다.

**자극과 절차.** 실험은 먼저 각 실험 참가자의 등회도 색상 포인트의 측정으로 시작되었다. 이를 위해, 휘도 cosine grating과 색상 공간의 red-green 주축에서 정의된 수직 cosine grating을 구성하여 홀수 frame에는 색상 grating이, 짝수 frame에는 휘도 grating을 평균휘도 31.6 cd/m<sup>2</sup>의 gray 배경에,

CIE (x, y) = (0.284, 0.319), 제시하였다. 모니터의 gun space상에서 RGB(255, 0, 0)은 CIE (x, y) = (0.555, 0.3164)이었고, RGB(0, 255, 0)은 CIE (x, y) = (0.285, 0.570), RGB(0, 0, 255)는 CIE (x, y) = (0.156, 0.084)에 해당하였다. 이들은 50 cm의 거리에서 시각각도 14 × 7도 크기인 직사각형 안에 제시되었는데, 공간주파수는 0.5 c/deg, 시간주파수는 4 Hz이었고, 각 grating들은 frame당 90도의 위상차이를 갖도록 하였다. 공간주파수와 시간주파수는 본 실험에서 사용될 운동자극과 동일하게 선택하였다. 처음에는 색상 cosine grating이 휘도정보를 포함하고 있는 이유로 전체 패턴이 왼쪽 한 방향으로 지각되는데, 참가자는 이 패턴이 더 이상 어느 한 방향으로 움직이는 것으로 보이지 않을 때까지 green요소의 휘도를 계속 감소시켰다. 즉, 마치 패턴이 고정된 위치에서 깜박이는 것으로 지각될 때의 green휘도를 등회도 포인트로 정하고 이를 컴퓨터의 color look-up table에 반영하여

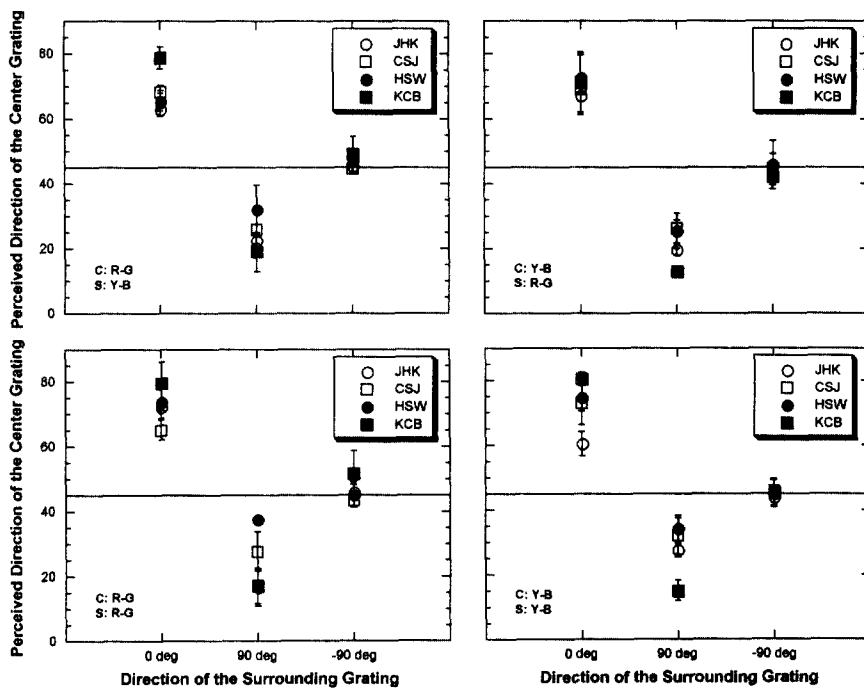


그림 6. 주변운동 방향에 따른 중심운동의 지각된 방향 (색상운동)

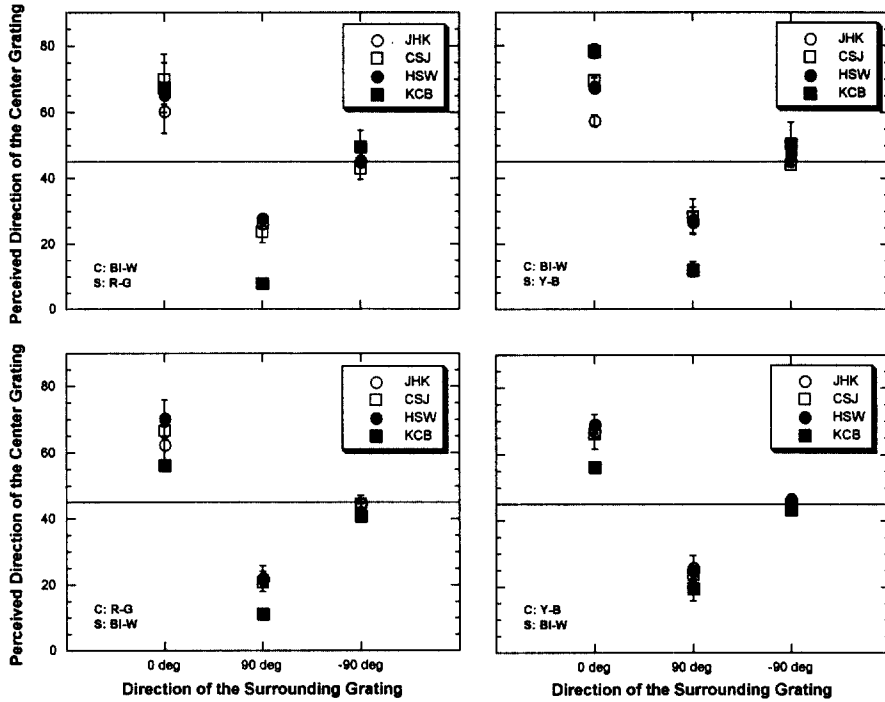


그림 7. 주변운동 방향에 따른 중심운동의 지각된 방향 (색상/취도 운동)

본 실험에서 사용될 패턴의 색상취도로 삼았다. 이를 3회 반복하여 평균을 구했고, yellow-blue cosine grating에도 같은 방법을 적용하였다.

실험 1a에 사용된 패턴은 전체 시각각도 14도 크기에 한 원의 지름이 4도인 7개의 multi-aperture cosine grating으로서, 그림 5에 제시한 바와 같다. 중심원에는 위를 0도로 정의하고 시계반대 방향으로 정적 각도를 정의하였을 때 45도 방향으로 움직이는 cosine grating이 제시되었고, 주변원에는 시행에 따라, 0도, 90도, -90도로 움직이는 cosine grating이 제시되었다. 참가자는 모니터의 왼쪽 주변에 제시된 십자가 초점을 응시하도록 요구받았고, 패턴은 이 초점에서 5도 떨어진 주변시에 제시하였는데, 이는 상이한 공간의 운동들이 여러 세포에 의해 처리되도록 한 것이다(Watson, 1983, 1987). 중심원과 주변원 안에 제시되는 cosine grating은 R/G-Y/B, Y/B-R/G, R/G-R/G, Y/B-Y/B로 실

험조건마다 달리 하였다. 참가자는 약한 불빛만이 켜진 실험실에서 한눈을 가리고 움직이는 패턴을 관찰하였는데, 참가자의 과제는 1초 동안 제시되는 패턴을 보고, 패턴이 사라진 후 화면에 제시되는 막대를 마우스를 움직여 중심원에 제시된 cosine grating의 지각된 움직인 방향을 보고하는 것이었다. 시행 수는 각 주변원의 운동방향 당 20회씩, 총 60회였고, 각 조건에서의 지각된 방향의 평균을 분석하였다. 실험 1b에서 사용된 자극과 절차는 실험 1a와 동일하였는데, 단지 중심원과 주변원에 제시된 cosine grating이 R/G-BL(ack)/W(hite), BL/W-R/G, Y/B-BL/W, BL/W-Y/B로 구성된 점이 달랐다.

### 결과 및 논의

주변원에서 움직이는 cosine grating의 운동방향



이 중심원에서 움직이는 cosine grating의 지각된 움직임 방향 판단에 미치는 영향을 그림 6와 7에 제시하였다.

그림 6에서 볼 수 있듯이, 중심운동과 주변운동을 모두 색상운동으로 구성한 경우, 모든 색상운동의 조건에서 주변운동의 방향이 0도 혹은 90도로 중심운동과 45도의 차이를 보일 때, 지각된 중심운동의 방향은 평균 27도 정도 정의된 운동방향으로부터 이탈되었다. 반면에 주변운동의 방향이 중심원의 운동방향과 크게 차이가 날 경우는 중심원의 지각된 운동방향은 주변운동에 의해 영향을 받지 않았다.

그림 7은 중심운동과 주변운동을 색상운동과 휘도운동으로 구성하였을 때 주변운동이 중심운동의 지각된 운동방향에 미치는 영향을 정리해 놓은 것이다. 이 조건에서도 주변운동이 중심운동의 운동방향과 큰 차이가 없을 때는 중심운동의 지각된 방향에 약 25도 정도의 밀침을 유발시킨 반면, 큰 차이가 있을 때는 중심원의 지각된 운동 방향에 영향을 주지 않았다. 이 실험에서는 참가자의 안구운동을 측정하지 않았으나, 무선적으로 제시된 주변운동의 방향들 중 특정한 조건에서만 운동밀침 현상이 관찰된 것으로 미루어 안구운동이 관찰된 결과에 어떤 영향을 주었다고 볼 수 없다. 만약 참가자가 초점을 응시하지 않고 패턴을 응시하였다면, 중심자극의 운동방향은 물리적 방향(45도)으로 지각되었을 것이다(Kim & Wilson, 1997).

실험 1의 결과는 색상운동간에도 휘도운동간에도 존재하는 것으로 밝혀진 운동단위간의 억제적 상호작용이 존재함을 시사하며, 나아가 색상운동과 휘도운동간에도 상호작용이 있음을 밝혀준다. 이 실험에서 관찰된 밀침의 정도는 휘도운동에서 관찰된 밀침의 정도와 크게 다르지 않다(Kim & Wilson, 1996, 1997).

## 실험 2

색상지각과 색상운동정보처리가 기본적으로 비선형적임을 시사하는 연구들이 있다(Baker, Boulton & Mullen, 1998; Wachtler, Albright, Sejnowski, 2001). 그러나, 이들이 사용한 자극들은 상대적으로 먼 공간(약 7도)에 색상패턴을 제시하는 방법을 쓴 이유로 색상에 대한 second-order 구조(예, 색상대비)에 대한 처리의 특성을 직접 밝히지를 못하였다. 이에 실험 2에서는 두 색상이 180도 위상을 달리하여 움직이는 plaid와 색상대비가 움직이는 plaid를 구성하여 이 패턴들의 지각된 움직임 방향을 조사함으로써, 색상운동 방향의 계산에 개입되는 비선형성을 살펴보고자 하였다.

### 방법

**참여자.** 본 연구자와 실험 1에 참여하지 않았으며 실험의 목적에 대해 알지 못하는 KAIST 학생들을 포함하여 4명이 참여하였다. 이들은 정상 시력을 가졌고, 색시는 없었다.

**도구.** 실험 1과 동일하였다.

**자극과 절차.** 실험 참가자의 등휘도 색상 포인트의 측정은 실험 1과 동일한 방법으로 실행되었다. 실험 2에 사용된 패턴은 다른 방향으로 움직이는 두 개의 일차원 cosine grating을 공간적으로 겹쳐 구성한 시각각도 19도의 원형 plaid이었다. 두 종류의 plaid가 사용되었는데, 그림 8에 예시한 바와 같이, 한 종류는 움직이는 색상도(R-G 혹은 Y-B)로 구성되었고, 다른 종류는 한 주축의 움직임이 없는 고 공간주파수 cosine grating의 색상대비를 저 공간주파수로 움직이게 구성한 것이다. 두 번째 패턴은 휘도운동에서 contrast-modulating 패턴으로 일컬어진 것과 동일한 개념의 것으로(Chubb & Sperling, 1988; Wilson & Kim, 1994b), 이

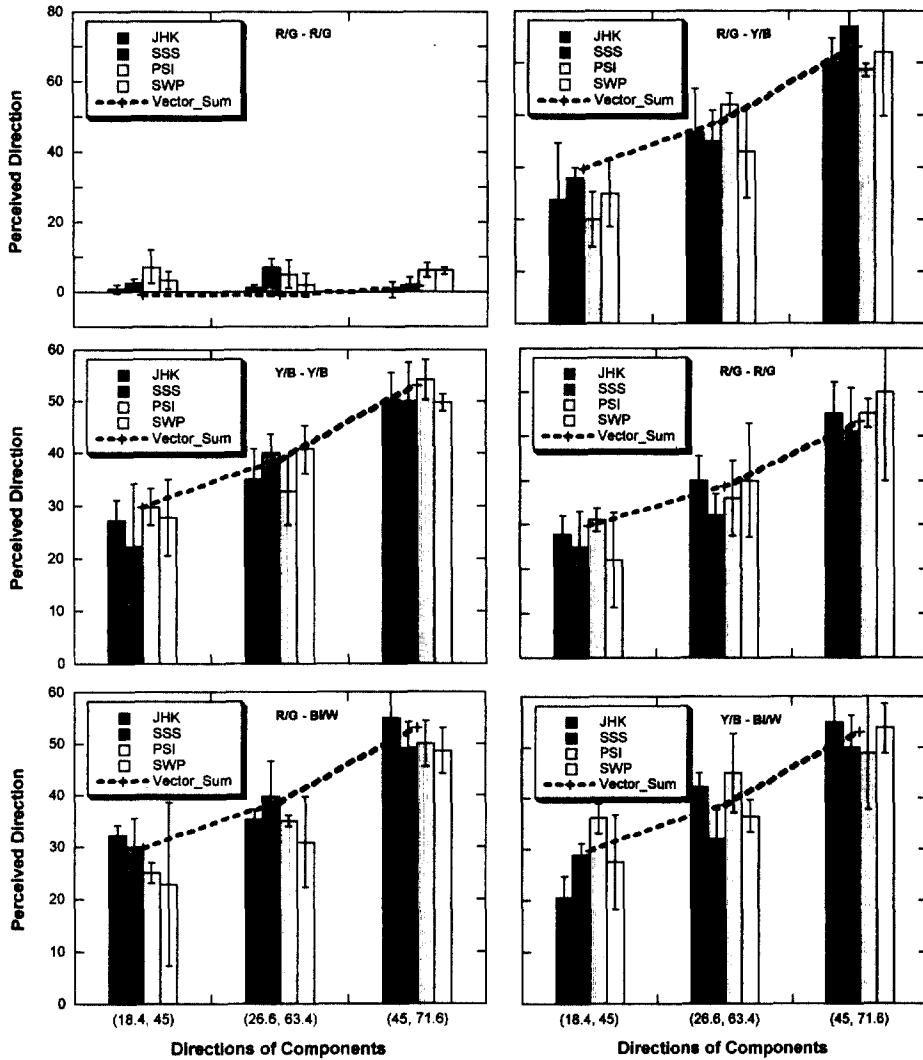


그림 9. 구성운동요소의 방향에 따른 plaid의 지각된 운동방향

패턴에서의 움직임은 비선형 second-order 구조의 움직임뿐이다. Plaid를 구성하는 두 운동요소의 운동방향의 각도는 (18.4, 45), (26.6, 63.4), (45, 71.6)로 구성되었다. 참가자의 과제는 모니터의 중앙에 제시된 점을 응시하며 1초 동안 제시되는 plaid 패턴을 보고, 패턴이 사라진 후 화면에 제시되는 막대를 마우스를 움직여 지각된 움직임 방향을 보고하는 것이었다. 사용된 plaid의 운동요소들이 응

집하여 움직이는가는 사전에 확인하였는데, 이 패턴의 구성요소들은 패턴운동방향의 한쪽으로 몰려있는 Type II plaid로서 이전의 연구(Ferrera & Wilson, 1990; Kim & Wilson, 1993)에서 관찰된 것처럼 항상 응집하여 움직이는 것으로 참가자들은 보고하였다. 시행 수는 운동요소들의 운동방향 조건 당 20회씩, 총 60회였고, 각 조건에서의 지각된 방향의 평균을 분석하였다. 각 운동요소의 색상도

는 R/G-R/G, Y/B-Y/B, R/G-Y/B이외에도 색상운동과 휘도운동이 혼합된 R/G-BL/W와 Y/B-BL/W로 구성하였다.

## 결과 및 논의

그림 9의 첫 번째 그래프는 R/G 주축에서 정의된 색상도를 움직인 Type II plaid의 지각된 움직임 방향의 결과를 요약해 놓은 것인데, 모든 참가자는 0도에 가까운 방향으로 이 패턴이 움직이는 것으로 지각하였음을 보여주고 있다. Plaid의 구성이 Y/B-Y/B, R/G-Y/B, R/G-BL/W, Y/B-BL/W인 경우에서도 이 결과와 크게 다르지 않아 결과 그래프를 생략하였다. 그림의 나머지 그래프들은 색상대비 그리고 휘도대비를 움직인 plaid의 경우 패턴의 지각된 운동방향을 요약해 놓은 것인데, 지각된 방향은 구성요소들의 운동방향의 조합이 달라짐에 따라 변하였다.

여기서 주목할 점은 색상운동의 방향 계산이 선형적이라면 어느 경우에도 Adelson과 Movshon (1982)의 IOC 규칙에 따라 지각된 운동방향은 0도일 것이지만 참가자들은 이 패턴의 운동을 IOC 규칙이 예언하는 방향으로 지각하지 않았다는 것이다. 반면에 색상대비와 휘도대비를 움직인 패턴의 지각된 방향은 두 운동요소의 vector sum 방향과 일치하는 것이었다. 사용된 운동요소의 조합 조건에서 vector sum 방향은 각각 29.7, 38.7, 53.1도인데, 이는 관찰된 값과 거의 일치하는 것이다. 이 실험 결과는 색상운동처리경로에서 먼저 비선형 second-order 구조의 추출과정이 있으며, 추출된 운동요소들간의 비선형 계산에 의해 색상운동의 지각된 방향을 결정함을 시사해 준다. 또한, 색상도만을 움직인 경우 지각된 방향이 IOC 규칙의 예언 값과 일치하는 듯이 보이는 경우에도 squaring으로 대표되는 두 운동요소의 비선형과정에 의해 창출되는 제 3의 운동요소(두 운동요소방향의 평균에서 수직인 방향)를 포함한 vector sum

방향이 각각 -0.92, -.62, 1.74임을 감안하면, 본 실험에서 사용된 plaid의 운동방향은 IOC 규칙이 아닌 vector sum 방향으로 지각된다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 휘도운동에서 관찰된 정보처리의 특성과 완전히 일치하는 것이다(Kim & Wilson, 1994a, b).

## 실험 3

실험 1에서 관찰된 색상운동과 휘도운동간의 밀집현상은 색상운동과 휘도운동간의 상호작용을 시사하는 것인데, 실험 3에서는 색상운동과 휘도운동의 비선형적 통합의 특성을 다른 과제를 사용하여 조사하기 위해 계획되었다. 휘도운동요소들간의 상호작용을 알 수 있는 대표적인 현상이 운동요소들의 방향각도의 함수로 전환되는 운동응집과 운동해리이다(Kim & Wilson, 1993; Mingolla, Todd & Norman, 1992; Smith, 1992). 기본적인 관찰은 운동요소가 선형적(휘도의 움직임)이든 비선형적(휘도대비의 움직임)이든 간에 관계없이 오직 두 개의 운동요소만으로 구성된 plaid는 두 운동요소의 운동방향 각도차이가 90도보다 작으면 운동요소의 개별적 움직임이 지각되지 않고 전체 패턴의 움직임이 지각되는 반면(운동응집), 그 이상의 방향각도 차이이면 개별 운동요소들의 움직임이 지각된다는(운동해리) 것이다. 이 현상은 휘도운동 단위들간의 상호작용으로 잘 설명된다(Wilson & Kim, 1994a). 본 실험에서는 이전 연구들과 관련지어 두 운동요소의 방향각도 함수로 운동응집과 운동해리를 살펴봄으로써, 색상운동들의, 그리고 색상운동과 휘도운동정보들의 통합에도 이러한 비선형적 관계가 존재하는지를 조사하였다.

## 방법

**참여자.** 본 연구자와 이전의 실험에 참여하지 않았으며 실험의 목적에 대해 알지 못하는 KAIST

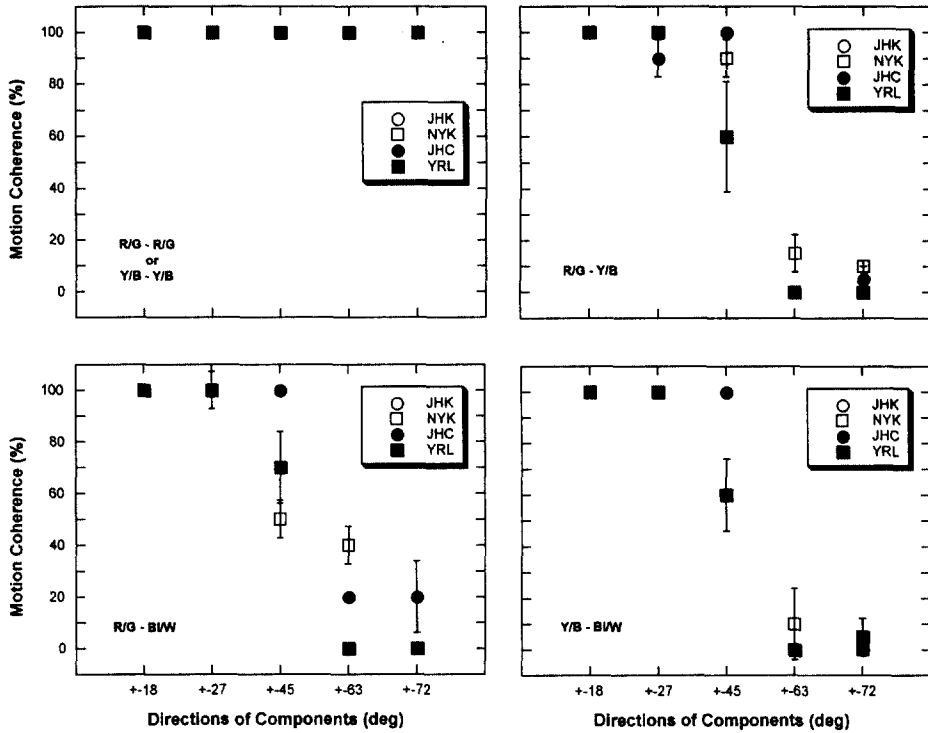


그림 11. 구성운동요소의 방향에 따른 plaid의 운동응집(색상운동) 비율

학생들을 포함하여 4명이 참여하였다. 이들은 정상시력을 가졌고, 색시는 없었다.

도구. 실험 1과 동일하였다.

**자극과 절차.** 실험 참가자의 등휘도 색상 포인트의 측정은 이전 실험들과 동일한 방법으로 실행되었다. 실험 3에 사용된 패턴은 실험 2에서와 같은 두 종류의 plaid로, 그림 10에 예시한 바와 같이 한 종류는 움직이는 색상도(R-G 혹은 Y-B)로 구성되었고, 다른 종류는 한 주축의 움직이지 않는 고 공간주파수 cosine grating의 색상대비를 저 공간주파수로 움직이게 구성한 것이다. 실험 2의 패턴과 다른 점은 구성요소들의 운동방향이 패턴 운동방향의 좌우로 나뉘어 있는 Type 1 plaid라는 점이다(Ferrera & Wilson, 1990). Plaid를 구성하는

두 운동요소의 운동방향의 각도는 +18, +27, +45, +63, +72이었다. 참가자의 과제는 모니터의 중앙에 제시된 점을 응시하며 1초 동안 제시되는 plaid 패턴을 보고, 두 구성요소의 움직임을 볼 수 없고 전체 패턴의 움직임을 지각할 수 있을 때는 키보드의 "1"을, 개별요소들이 서로 미끄러지듯이 움직이는 것으로 지각될 때는 키보드의 "2"를 눌러 반응하는 것이었다. 시행 수는 운동요소들의 운동방향 조건 당 10회씩, 총 50회였고, 각 조건에서의 운동응집의 비율을 분석하였다. 각 운동요소의 색상도는 R/G-R/G, Y/B-Y/B, R/G-Y/B이외에도 색상운동과 휘도운동이 혼합된 R/G-BL/W와 Y/B-BL/W로 구성하였다.

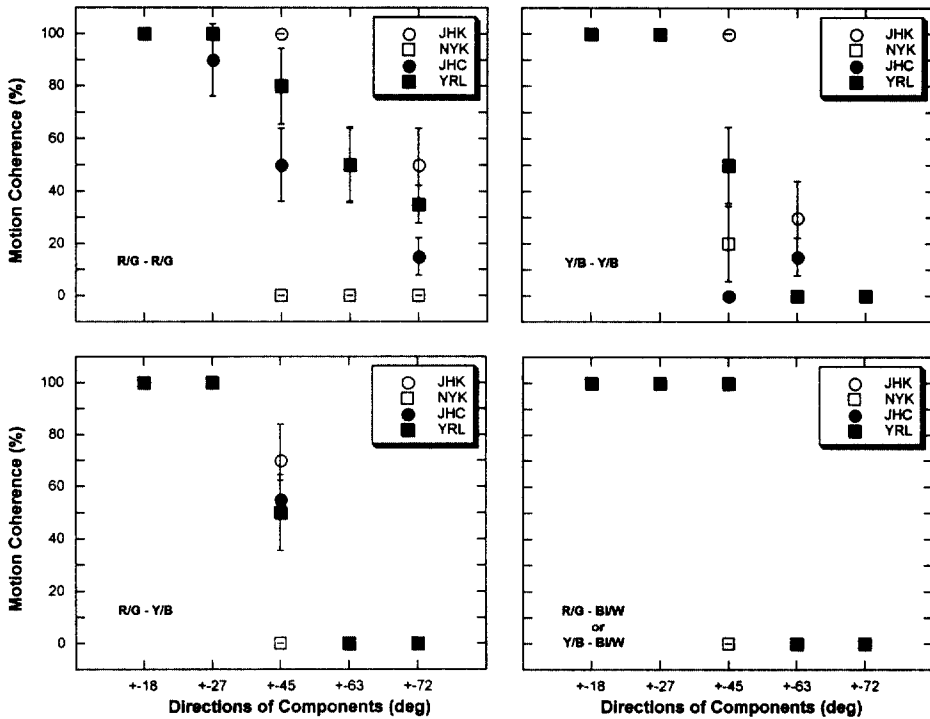


그림 12. 구성운동요소의 방향에 따른 plaid의 운동응집 비율(색상대비운동)

결과 및 논의

Plaid를 구성하는 두 요소가 color space 상의 같은 주축에서 움직이는 경우(R/G-R/G 혹은 Y/B-Y/B), 모든 참가자는 구성요소의 운동방향 각도의 차이에 관계없이 운동응집을 관찰하였다. 이 결과는 그림 11의 첫 번째 그래프에 정리되어 있다. 그러나, 두 운동요소가 다른 주축상의 색상도로 구성되었거나, 색상운동과 휘도운동으로 구성된 plaid에서는 운동요소의 방향각도차이에 따라 운동응집과 운동해리를 관찰하였는데, 방향각도차이가 54도보다 작으면 운동응집을, 126도 이상이면 운동해리를 관찰하였다. 방향각도가 90도 일 때는 참가자에 조금 달랐지만, 평균적으로 운동응집과 운동해리의 비율이 약 50% 정도이었다.

색상대비와 휘도대비가 움직이는 요소로 구성

된 plaid의 경우 운동방향 각도차이에 따른 운동응집과 운동해리의 정도를 그림 12에 정리하였다. 색상대비의 움직임만으로 구성된 경우에는, 색상도의 움직임으로 구성된 plaid의 경우와 유사하게 참가자들은 운동방향각도의 차이가 작으면 운동응집을, 운동방향 각도의 차이가 크면 운동해리를 관찰하였다. 그러나, 이 경우, 동일한 주축에서의 색상대비 움직임으로 정의된 plaid의 경우에도 운동방향의 각도차이 함수로 운동응집과 운동해리가 전이되는 점이 달랐다. 그림의 마지막 그래프는 색상대비운동과 휘도대비운동 요소들로 구성된 경우의 결과를 보이는 것인데, 4명의 참가자 중 한 명을 제외하고는 모두 방향각도차이가 90도보다 작으면 운동응집을, 그 이상이면 운동해리를 관찰하였다.

색상대비나 휘도대비의 움직임으로 구성된 plaid

에서 관찰된 운동응집의 여부는 휘도대비 움직임으로만 구성된 plaid에서 관찰된 이전의 연구결과와 일치하는 것이다(Kim & Wilson, 1993). 즉, 오직 비선형 second-order 구조의 움직임만이 존재하는 plaid의 운동응집/운동해리는 운동처리 단위간에 존재하는 촉진/억제적 상호작용에 의해 결정됨을 시사해 주는 결과로서, 이 상호작용은 색상운동과 휘도운동간에도 존재함을 밝혀주고 있다.

그런데, 흥미로운 점은 color space상의 동일한 주축 내에서 움직이는 운동요소들로 구성된 plaid의 경우는 항상 운동응집이 관찰된 반면, 다른 주축 내에서 정의된 운동요소로 구성된 plaid의 경우에는 방향각도의 함수로 운동응집의 여부가 결정된다는 점이다(그림 11). 휘도자극의 경우 선형적 운동요소들의 공간적 겹침은 항상 두 운동요소방향의 평균 방향과 그에 수직인 방향에서 제 3의 비선형 운동요소가 창출되는데, 이로 말미암아 운동요소들의 최대 운동방향 각도차이가 90도를 넘는 경우는 없어 항상 운동응집이 관찰된다(Adelson & Movshon, 1982; Kim & Wilson, 1993; Wilson & Kim, 1994a). 본 실험에서 얻어진 결과에 따르면, 동일한 주축 내의 색상운동처리에도 제 3의 운동요소가 창출되어 항상 운동응집이 관찰되는 것으로 보이는데, 다른 주축간의 색상운동처리에서는 이 비선형 운동요소가 창출되지 않아 운동응집과 운동해리는 오직 두 운동요소간의 방향각도 차이의 함수로 결정되는 것으로 보인다.

### 종합 논의

오랫동안 의심되었던 색상운동의 존재는 본 실험에서도 검증되었다. 그러나, 여러 시각생리학과 정신물리학에서 밝혀 온 색상과 운동정보의 병행적이며 독립적인 처리 경로의 존재를 고려하면, 색상운동의 처리기제와 그 특성을 밝히는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히, 아직 휘도운동을 담당하는 세포들에 비유될 색상운동 세포들이 생리적으로

규명되고 있지 못하기 때문에 더욱 그러하다.

본 연구에서는 색상정보가 운동지각에 미치는 영향을 운동밀침, 운동방향, 운동응집/운동해리 현상과 관련하여 정신물리학적으로 조사하여, 색상운동정보처리의 특성을 밝혀 보고자 하였다. 실험의 결과를 요약하면, 상이한 공간에 존재하는 색상운동요소간에서의 운동밀침현상이 관찰되었고, 색상운동으로 구성된 plaid의 지각된 움직임 방향은 구성요소 운동방향의 vector sum 방향에서 결정되고, 색상운동요소들간의 운동응집과 운동해리는 비선형 색상운동요소를 포함하여 가장 큰 두 운동요소의 방향각도 차이에 의해 결정된다는 것이었다. 아울러, 색상운동정보는 휘도운동정보와 상호작용 하는데, 그 결과 운동밀침, 운동방향의 결정, 운동응집의 여부는 색상운동정보처리에서 관찰된 동일한 요인들에 의해 결정된다는 것이었다.

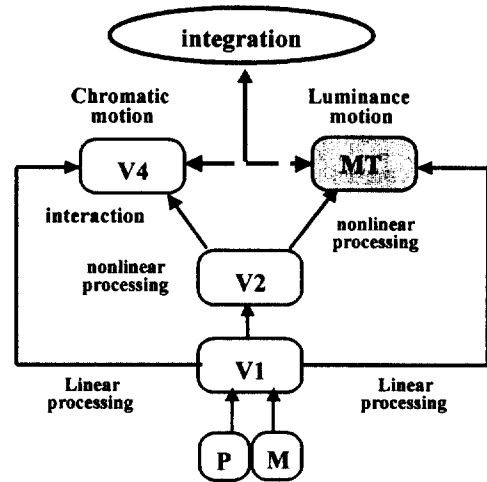


그림 13. 색상운동과 휘도운동 처리경로

이러한 관찰들을 바탕으로 색상운동정보처리의 특성을 그림 13에 도식한 처리경로를 따라 정리해 본다. 먼저, 색상운동의 정보처리 특성은 휘도운동의 정보처리 특성과 매우 유사하다는 점이다. 즉, 휘도운동의 정보처리와 마찬가지로, 선형적 처리와 비선형적 처리의 두 경로가 존재한다는 점이

다. 선형적 처리 경로는 망막과 LGN의 대립과정 세포의 활동에 근거한 색상정보의 추출과 색상도의 움직임 정보가 V1→V4에서 추출되는 것으로 구성된다. 따라서, 색상운동의 최적 공간주파수와 시간주파수의 제약은 색상의 민감도 함수에 의해 결정된다. 즉, 휘도 정보에 비해 저 공간주파수와 저 시간주파수에 민감하다(Mullen, 1985; Shapley, 1990). 비선형적 처리경로는 선형 색상정보에 대한 비선형 과정을 포함하는데, 본 실험에서 색상대비 운동패턴의 지각된 운동방향 결과를 보면 휘도운동에서의 rectification과정과 다르지 않음을 알 수 있다(Wilson et al., 1992). 이 과정은 V1 → V2 → V4에서 이루어지는데, V2 영역이 여러 생리학 연구에서 밝힌 것처럼 비선형 처리가 일어나는 후보지로 간주할 수 있다(Zhou & Baker, 1993). 이곳에서 second-order 구조인 색상대비정보가 추출된다. 다음에 모든 선형적, 그리고 비선형적 색상운동정보는 V4영역에서 통합되는데, 색상운동 처리단위들간에는 상호작용이 존재한다. 최적으로 반응하는 운동방향의 차이가 매우 작은 경우(30도 이내)를 제외하고는 운동처리 단위간에 비선형적 억제 관계가 있어 운동각도 차이에 따라 운동응집/운동해리, 그리고 운동밀집 현상을 유발한다(Kim & Wilson, 1993, 1996, 1997). 색상운동정보는 이후 휘도운동정보와 통합된다. 이들간에도 유사한 운동방향에 작용하는 억제적 상호작용이 있다. 그 결과 색상운동과 휘도운동간의 운동응집/운동해리, 그리고 운동밀집 현상을 유발한다. 이러한 색상운동 정보처리의 특성은 기존의 휘도운동 계산모형을 적용하여 잘 예언될 수 있을 것이다.

그러나, 색상운동 정보처리, 그리고 휘도운동과의 상호작용 특성을 이해하는 작업은 이제 시작이다. 특히 color space상의 다른 주축에서 정의된 색상운동간의 상호작용은 위의 도식에서 잘 설명되지 않는다. 본 연구에서 관찰한 것은 다른 주축에서 정의된 색상운동에서는 비선형적 운동요소가 추출되지 않는다는 점인데, 이는 휘도운동의

처리특성과 다른 점이다. 즉, 휘도운동에서는 시공간주파수가 유사한 두 운동요소들의 공간적 겹침은 항상 비선형 운동요소를 창출하여 운동방향각도에 관계없이 운동응집이 관찰되는데, 다른 주축에서 정의된 색상운동에서는 그렇지 않았다. 한편, 색상운동과 휘도운동간의 통합에 있어, 시공간주파수의 영향을 체계적으로 조사할 필요가 있다. 연구자들은 두 운동정보에 대한 시공간적 민감도가 다르다는 것을 밝히고 있는데, 이 차이가 두 운동요소의 통합에 어떤 영향을 미칠 것인지를 밝히는 것은 매우 중요한 문제이다. 그리고 휘도와 색상에 대한 탐지나 변별역에 차이가 있음은 잘 알려져 있는 사실인데(예, Granger & Heurley, 1973), 이 요소를 방지하기 위해 본 연구에서 사용한 긴 자극제시시간 이외의 조건에서 관찰된 결과들이 어떤 체계적 변화를 보이는지 연구하는 것도 앞으로의 과제이다. 또, 등휘도 색상자극의 사용에 있어 간과할 수 없는 방법상의 문제는 등휘도 포인트 측정의 정확도이다. Regan(2000)을 비롯한 몇 연구자들은 현재 사용되고 있는 등휘도 색상 포인트 측정의 방법들에 대해 개관하며 문제점들을 지적하였는데, 본 연구에서 차용한 Sperling과 동료들(예, Lu, Lemes & Sperling, 1999)의 direction-nulling 방법도 비록 그들이 방법의 엄격성에 대해 심도 있게 논의하였으나 이 비판에서 완전히 자유로울 수는 없다. 이 문제는 등휘도 색상 연구에서 시급히 해결되어야 할 것이다.

색상운동을 최근 Sperling과 동료들은 first-, second-, 그리고 third-order 운동처리의 도식 속에서 설명하고자 시도했다(Lu, Lemes & Sperling, 1999; Lu & Sperling, 1995). 휘도의 움직임에 의해 정의되는 first-order 운동과 휘도 변산, 즉 휘도대비나 texture의 움직임에 의해 정의되는 second-order 운동은 연구자들간에 동의가 있는 터인데, 이에 덧붙여 배경과 구분되는 어떠한 전경의 움직임에 의해 정의되는 운동을 third-order 운동으로 제안하며, 등휘도 색상운동도 바로 이 third-order 운동기제에 의해 처

리된다는 것이다. 이 기제는 일종의 feature-tracking 기제이다. 그러나, 본 연구에서 관찰된 결과에 의하면 시각생리학의 연구결과와 일치되는 선형(first-order)과 비선형(second-order) 경로의 정보 처리 특성에 의해 색상운동과 관련된 현상들이 휘도운동과 관련된 현상들과 매우 유사하게 잘 설명될 수 있기 때문에, 색상운동의 기제로 third-order 운동경로의 첨가가 필요하다고 보지 않는다.

### 참고문헌

- Adelson, E. H. & Movshon, J. A. (1982). Phenomenal coherence of moving visual patterns. *Nature*, 300, 523-525.
- Baker Jr, C., Boulton, J. & Mullen, K. (1998). A nonlinear chromatic motion mechanism. *Vision Research*, 38, 291-302.
- Campbell, F. & Gubisch, R. (1966). Optical quality of the human eye. *Journal of Physiology*, 186, 558-578.
- Cavanagh, P. & Farvreaux, O. E. (1985). Color and luminance share a common motion pathway. *Vision Research*, 25, 1595-1601.
- Cavanagh, P. (1992). Attention-based motion perception. *Science*, 257, 1563-1565.
- Cavanagh, P. (1996). When colours move. *Nature*, 379, 26.
- Cavanagh, P., Tyler, C. & Farvreaux, O. E. (1984). Perceived velocity of moving chromatic gratings. *Journal of the Optical Society of America A*, 1, 893-899.
- Chichilnisky, E., Heeger, D. & Wandell, B. (1993). Functional segregation of color and motion perception examined in motion nulling. *Vision Research*, 33, 2113-2125.
- Chubb, C. & Sperling, G. (1988). Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 5, 1986-2007.
- Cropper, S. & Derrington, A. (1994). Motion of chromatic stimuli: first-order or second-order?. *Vision Research*, 34, 49-58.
- Cropper, S. & Derrington, A. (1996). Rapid colour-specific detection of motion in human vision. *Nature*, 379, 72-74.
- Cropper, S., Mullen, K. & Badcock, D. (1996). Motion coherence across different chromatic axes. *Vision Research*, 36, 2475-2488.
- De Valois, R. & De Valois, K. (1990). *Spatial vision*. NY: Oxford University press.
- Derrington, A. M., Badcock, D. R. (1985). The low level motion system has both chromatic and luminance inputs. *Vision Research*, 25, 1879-1884.
- DeYoe, E. A. & van Essen, D. C. (1985). Segregation of efferent connections and receptive field properties in visual area V2 of the macaque, *Nature*, 317, 58-61.
- Dobkins, K. R. & Albright, T. D. (1994). What happens if it changes color when it moves?: The nature of chromatic input to macaque visual area MT. *Journal of Neuroscience*, 14, 4854-4870.
- Farell, B. (1995). Spatial structure and the perceived motion of objects of different colors. In Papathomas, T., Chubb, C., Georea, A. & Kowler, E., *Early vision and beyond* (pp. 121-131). Cambridge MA: MIT.
- Farell, B. (1999). Color and luminance in the perception of 1- and 2-dimensional motion. *Vision Research*, 39, 2633-2647.
- Ferrera, V. & Wilson, H. R. (1990). Perceived direction of moving two-dimensional patterns. *Vision Research*, 30, 273-287.
- Gegenfurtner, K. & Hawken, M. (1996). Interaction of motion and color in the visual pathways. *Trends in Neuroscience*, 19, 394-401.
- Gegenfurtner, K. (1998). Thresholds for the identification of the direction of motion of plaid patterns defined by luminance or chromatic contrast. *Vision Research*, 38, 881-888.
- Graham, N. & Nachmias, J. (1971). Detection of grating patterns containing two spatial frequencies: A comparison of single-channel and multiple-channel models. *Vision Research*, 11, 251-259.
- Granger, E. M. & Heurtley, J. C. (1973). Visual chromaticity-modulation transfer function. *Journal of the Optical Society of America*, 63, 1173-1174.
- Kelly, D. (1979). Manipulation of two-dimensionally periodic stimulus patterns. *Behavior Research Methods*



- and Instrumentation, 11, 26-30.
- Kelly, D. (1982). Fourier components of moving gratings. *Behavior Research Methods and Instrumentation*, 14, 435-437.
- Kim, J. & Wilson, H. R. (1993). Dependence of plaid motion coherence on component grating directions. *Vision Research*, 33, 2479-2489.
- Kim, J. & Wilson, H. R. (1996). Direction repulsion between components in motion transparency. *Vision Research*, 34, 1835-1842.
- Kim, J. & Wilson, H. R. (1997). Motion integration over space: interaction of the center and surround motion. *Vision Research*, 38, 991-1005.
- Kooi, F. & De Valois, K. (1992). The Role of color in the motion system. *Vision Research*, 32, 657-668.
- Krauskopf, J., Wu, H. & Farell, B. (1996). Coherence, cardinal directions and higher-order Mechanisms. *Vision Research*, 36, 1235-1245.
- Krauskopf, J. & Farell, B. (1990). Influence of colour on the perception of coherent motion. *Nature*, 348, 328-331.
- Lenny, P., Trevarthen, C. van Essen, D., & Wassel, H. (1990). Parallel processing of visual information. In Spillman, L. & Werner, J. S. (Eds.), *Visual Perception: The Neurophysiological Foundations*. (pp. 103-128). San Diego: Academic Press.
- Livingstone, M. & Hubel, D. (1988). Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception, *Science*, 240, 740-749.
- Lu, Z.-L. & Sperling, G. (1995). The functional architecture of human visual motion perception. *Vision Research*, 35, 2697-2722.
- Lu, Z.-L., Lesmes, L. A., & Sperling, G. (1999) The mechanism of isoluminant chromatic motion perception. *Proceedings of National Academy of Science, USA*, 96, 8289-8294.
- MacLeod, D. I. A. & Boynton, R. M. (1978). Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *Journal of the Optical Society of America*, 69, 1183-1186.
- Marshak, W. & Sekuler, R. (1979). Mutual repulsion between moving visual targets. *Science*, 205, 1399-1401.
- Mather, G. & Moulden, B. (1980). A simultaneous shift in apparent direction: further evidence for a distribution shift model of direction coding. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 325-333.
- Movshon, J. A., Adelson, E. H., Gizzi, M. S. & Newsome, W. T. (1986). The analysis of moving visual patterns. In Chagas, C., Gattass, R. & Gross, C. (Eds), *Pattern Recognition Mechanisms* (pp. 117-151). New York: Springer-Verlag.
- Mullen, K. T. & Baker, C. L., Jr. (1985). A motion aftereffect from an isoluminant stimulus. *Vision Research*, 25, 685-688.
- Mullen, K. T. (1985). The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *Journal of Physiology (Lond.)*, 359, 382-400.
- Nakayama, K. (1985). Biological image motion processing: a review. *Vision Research*, 25, 625-660.
- Papathomas, T. V., Gorea, A. & Julesz, B. (1991). Two carries for motion perception: color and luminance. *Vision Research*, 31, 1883-1891.
- Ramachandran, V. S. & Gregory, R. L. (1978). Does colour provide an input to human motion perception? *Nature*, 275, 55-56.
- Reagan, D. (2000). *Human perception of objects*. MA: Sinauer Associates.
- Rodman, H. R. & Albright, T. D. (1989). Single-unit analysis of pattern-motion selective properties in the middle temporal visual area (MT). *Experimental Brain Research*, 75, 53-64.
- Shapley, R. M. (1990). Visual sensitivity and parallel retinocortical channels. *Annual Review of Psychology*, 41, 635-658.
- Snowden, R. J. (1989). Motions in orthogonal directions are mutually suppressive. *Journal of the Optical Society of America, A* 6, 1096-1101.
- van Essen, D., Anderson, C. & Felleman, D. (1992). Information processing in the primate visual processing: an integrated systems perspective. *Science*, 255, 419-423.
- von der Heydt, R., Peterhans, E. & Baumgartner, G. (1984). Illusory contours and cortical neuron responses. *Science*, 224, 1260-1262.
- Wachtler, T., Albright, T. D., & Sejnowski, T. J. (2001). Nonlinear interactions in color perception: nonlinear processing of chromatic signals from

- remote inducers. *Vision Research*, 41, 1535-1546.
- Watson, A. B. (1987). Estimation of local spatial scale. *Journal of the Optical Society of America A*, 4, 1579-1582.
- Welch, L. (1989). The perception of moving plaids reveals two motion processing stages. *Nature*, 337, 734-736.
- Westheimer, G. (1986). The eye as an optical instrument. In Thomas, J. et al. (Eds), *Handbook of Perception* (pp. 4.1-4.20). NY: Wiley.
- Williams, D., Brainard, D., McMahon, M. & Navarro, R. (1994). Double-pass and interferometric measures of the optical quality of the eye. *Journal of the Optical Society of America A*, 11, 3123-3135.
- Wilson, H. R. & Kim, J. (1994a). A model for motion coherence and transparency. *Visual Neuroscience*, 11, 1205-1220.
- Wilson, H. R. & Kim, J. (1994b). Perceived motion in the vector sum direction. *Vision Research*, 34, 1835-1842.
- Wilson, H. R., Ferrera, V. P. & Yo, C. (1992). A psychophysically motivated model for two-dimensional motion perception. *Visual Neuroscience*, 9, 79-97.
- Yo, C. & Wilson, H. R. (1992). Perceived direction of moving two-dimensional patterns depends on duration, contrast, and eccentricity. *Vision Research*, 32, 135-147.
- Zeki, S. M. (1974). Functional organization of a visual area in the posterior bank of the superior temporal sulcus of the rhesus monkey. *Journal of Physiology*, 236, 549-573.
- Zeki, S. M. (1978). Functional specialization in the visual cortex of the rhesus monkey, *Nature*, 274, 423-428.
- Zhou, Y., & Baker, C. L. (1993). A processing stream in mammalian visual cortex neurons for non-Fourier responses. *Science*, 261, 98-101.

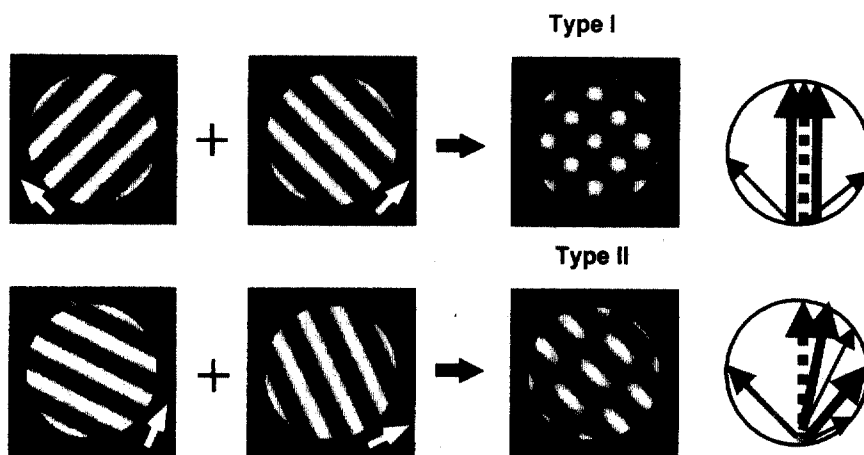


그림 2. 1차원 코사인 패턴과 2차원 plaid(오른쪽 원안의 화살표들에 대한 자세한 설명은 본문 참조)

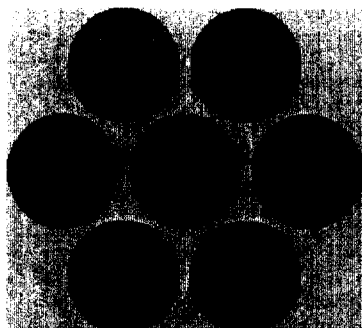


그림 5. 실험 1에 사용된 자극 패턴의 예: 중심의 R/G cosine grating은 45도, 주변의 Y/B는 0도 방향으로 움직임)

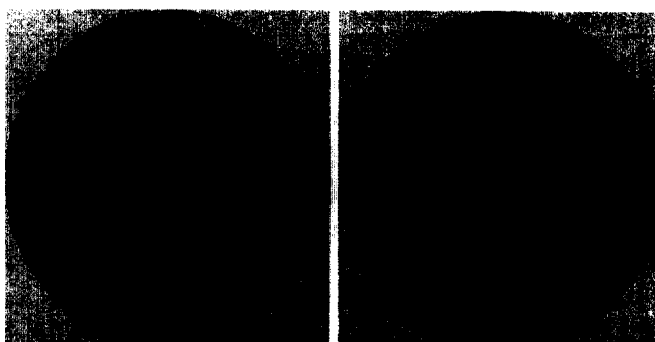


그림 8. Type II plaid 예  
(왼쪽: R/G-Y/B 색상운동, 오른쪽: R/G-R/G 색상대비운동)

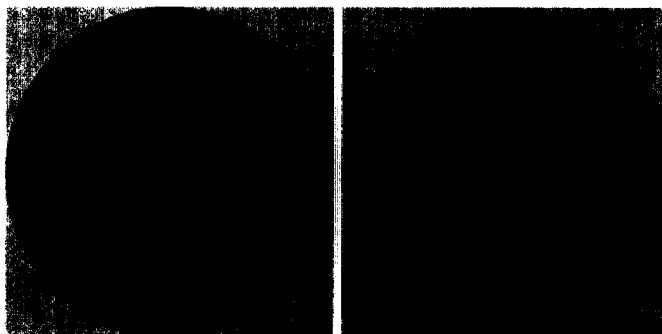


그림 10. Type I plaid 예  
(왼쪽: Y/B-Y/B 색상운동, 오른쪽: R/G-Y/B 색상대비운동)

## Nonlinear contribution of chromatic information to identifying an object motion

Jeounghoon Kim

School of Humanities and Social Science, KAIST

Given parallel and independent processing streams for color and motion, it is worth to investigate the mechanism for an isoluminant chromatic motion, which has long been denied but now psychophysically demonstrated in many studies. I investigated characteristics of interaction of chromatic motion across cardinal axes and luminance motion. Using a multi-aperture pattern and a plaid composed of isoluminant chromatic gratings and luminance grating, perceived direction, motion coherence/transparency, and motion repulsion were psychophysically measured. Experimental results showed the existence of chromatic motion repulsion, vector-sum computation for perceived motion direction of chromatic plaids, and the dependency of motion coherence/transparency on the angular difference of component motion directions. There was the interaction of chromatic and luminance motion. These results indicate that chromatic motion processing is very analogous to luminance motion processing. It seems that there are two processing streams, one responsible for pure chromatic modulation and the other for 2nd-order chromatic contrast profile (at low temporal frequency), suggesting there is no reason to construct a 3rd-order structure for chromatic motion.

**keywords** chromatic motion, luminance motion, nonlinear processing, motion repulsion, motion coherence, motion transparency

1차 원고접수 2001. 6. 5.  
수정 원고접수 2001. 9. 12.  
최종 게재 결정 2001. 9. 20.