

일차 결 분리 기제와 이차 결 분리 기제의 공간주파수 선별성의 유사성

남 종 호[†]

가톨릭대학교 심리학과

결 분리 과정에 관여하는 기제는 결의 속성에 따라 선형적 처리과정이 포함된 일차 탐지 기제와 비선형적 처리과정이 포함된 이차 탐지 기제가 있음이 많은 연구들에 의해 보고되었다 또한 공간주파수 정보는 이들 기제가 국소 정보를 통합하는 과정에 중요한 역할을 하는 것으로 알려졌다. 본 연구는 결 요소의 확률 분포를 조작하여 결의 밝기와 대비가 독립적으로 변할 수 있는 확률분포 공간에서 만들어진 결 자극을 사용하여 결 분리의 일차 탐지 기제와 이차 탐지 기제의 공간주파수 특성을 비교하였다. 시각도 당 0.15, 0.29, 0.58, 1.16, 2.30 주기의 다섯 공간주파수를 사용하였으며, 결 공간상의 1개 방향에 대한 결 분리 역을 측정하였다. 결 공간상에서 작용하는 결 분리 기제는 기존의 연구에서 밝힌 바와 같이 일차 결 탐지 기제에 해당하는 밝기 탐지 기제, 그리고 이차 결 탐지 기제에 해당하는 밝기 및 대비 정보가 결합된 속성에 반응하는 기제인 것으로 재차 확인이 되었다. 특히 두 기제의 공간주파수 특성은 공간주파수가 달라짐에 따라 두 기제의 민감한 축의 방향이 체계적으로 변화되기 보다는, 탐지 역의 변화가 관찰되었으며, 특히 1.16 cycles/degree에서 두 기제 모두 최대 민감도를 보이고, 공간주파수에 따른 역의 변화 패턴이 일치되었다. 본 연구는 일차 결 탐지 기제와 이차 결 탐지 기제의 공간주파수특성이 동시에 측정될 수 있는 자극 상황에서 두 기제가 상호 유사한 공간주파수특성을 보여주는 결과를 제시하였다. 일차 결 기제와 이차 결 기제 간 유사한 공간주파수 특성이 관찰된 이유, 그리고 이차 결 기제가 일차 결 기제에 비해서 상대적으로 저 공간주파수에 조율되어있는 특성에 대한 가능한 설명을 두 단계 모형을 사용하여 논의하였다.

주요어 : 결, 일차 결 분리, 이차 결 분리, 대비민감도함수, 공간주파수

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2005-000-10963-0) 지원으로 수행되었음.

연구자는 심사를 맡아주시고 보다 나은 논문이 되도록 도와주신 익명의 심시위원분들께 감사드린다.

[†] 교신저자 : 남종호 가톨릭대학교 심리학과, (420-743) 경기도 부천시 원미구 역곡2동 산43-1

E-mail : texton@catholic.ac.kr

인간의 시각 처리는 입력된 시각 장면을 구별되는 여러 영역으로 나누고, 이 영역을 전경 또는 배경으로 지각하고, 전경에 대한 추가 분석을 통하여 궁극적으로 의미 있는 대상을 파악하는 과정으로 구성되어있다. 각 영역을 분리하는 과정에 중요한 역할을 담당하는 시각 기본 속성으로는 색, 표면 결, 밝기, 국소 형태의 방위, 그리고 모양 등을 들 수 있다. 특히 초기 처리 단계에서는 색, 밝기, 결 단서(textural cue)를 이용하여 시각 장면에서 개별 대상으로 지각될 수 있는 영역들을 분리해낸다. 결 분리과정이란 영역 내의 동질성(homogeneity)을 유지하면서, 동시에 인접 영역과의 이질성(heterogeneity)을 생성해내는 것으로 이해될 수 있다(Gorea & Papathomas, 1993). 이와 같은 결 분리과정에 관여하는 기제들과 그 속성들을 밝혀내고자 많은 연구들이 수행되었다(Julez, 1975; Beck, 1982; Caelli, 1985; Beck, Sutter & Ivry, 1987; Bergen, 1991; Bergen & Landy, 1991).

시각 장면의 영역 분리 과정은, 첫째 영역 내 동질성과 영역 간 이질성을 생성하는 준거, 즉 어떤 차원을 따라 구별이 가능한 속성이 있으며, 특정한 시각 기제가 이것을 탐지하는 절차로 구성된다. 예를 들면, 밝기 차이는 영역을 분리하는 가장 기본적인 속성인데, 이를 담당하는 기제는 경계선 탐지기, 공간주파수 처리기를 거론할 수 있겠다. 그런데 어떤 두 인접 영역의 평균 밝기가 동일하더라도 서로 분리된 것으로 지각되는 사례가 존재한다. 예를 들면, 동일한 평균 밝기를 가지지만 색상이 상이한 경우, 순수하게 색에 근거하여 영역들이 분리된다. 이는 밝기 탐지 기제가 탐지하지 못하는 자극 속성의 예이며, 밝기 속성 이외에 색을 근거로 하여 영역의 경계를

탐지하는 또 다른 기제가 존재한다는 증거가 된다.

밝기의 강도 차이를 필두로 하여, 국소 선분의 방위 차이, 국소 결 요소의 공간주파수 차이 등으로 인한 결 분리 현상을 일차 결 분리(first-order texture segregation)라고 한다. 예를 들어, 인접한 두 영역을 구성하고 있는 결 요소의 선분 방위가 충분히 서로 다른 경우, 한쪽 영역을 구성하고 있는 요소의 방위를 탐지해내는 탐지기는 다른 쪽 영역을 구성하고 있는 요소의 방위를 탐지해내지 못하게 되며, 따라서 한 탐지기가 두 영역에서 상이한 출력을 발생시키게 된다. 이러한 출력의 차이가 발생하면 밝기의 강도 차이로 인한 결 분리와 마찬가지로 결과가 발생한다. 대부분의 결 분리 과정에 관한 연구는 이와 같이 국소 영역에서 추출된 정보가 어떻게 결 분리 과정에 사용되는지에 관한 연구였다.

여러 연구들이 방위와 공간주파수를 선택적으로 탐지하는 선형 분석기가 포함된 모형을 제시하고, 이 모형이 결 분리를 효과적으로 처리할 수 있음을 보였다(Bergen & Adelson, 1988; Nothdurft, 1985a, b; Sutter, Beck, & Graham, 1989). 그러나 이러한 분석기가 탐지해내지 못하는 이차 결 속성(second-order texture property)이라고 불리는 속성이 포함된 예들이 제시되었으며, 이를 처리할 수 있도록 새로운 처리 경로와 분석 과정을 모형에 포함시키려는 노력이 있었다(Chubb & Sperling, 1988; Landy & Bergen, 1991). 그럼에도 불구하고 국소 영역을 분리하여 처리하는 기제가 어떻게 전체 장면으로 국소 정보를 통합하는지에 대한 연구는 아직 시작 단계에 있다(Arsenault, Wilkinson, & Kingdom, 1999). 특히 이차 결 영역의 분리과정과 공간주파수의 관계는 형태

지각의 모형을 구축하기 위해 밝혀져야 할 부분이다.

기존의 이차 결 탐지 기제의 공간주파수 특성에 대한 연구에서 밝힌 바로는 일차 결 탐지 기제와 마찬가지로 이차 결 탐지 기제가 다중 채널로 구성되어 있으며(Sutter, Sperling, & Chubb, 1995), 변조 주파수(modulation frequency)와 변조 방위(modulation orientation)에 조율되어 있다고 하였다(Arsenault, Wilkinson, & Kingdom, 1999). 그러나 이들 연구는 이차 결 탐지 기제에 관한 연구만을 실시하였고, 일차 결 탐지 기제와의 직접적인 비교를 하지 못하고 있다. 이는 연구자들이 사용한 자극 자체가 일차 결 탐지 기제와 이차 결 탐지 기제의 공간주파수 상의 민감도 특성을 직접적으로 비교하기 어려운 자극을 사용했기 때문일 가능성이 있다. 따라서 이를 직접 비교할 수 있는 자극을 적용한 연구를 수행할 필요가 있다.

일차 결 속성과 이차 결 속성을 동일한 결 자극 내에서 조작하기 위해서, 결 자극을 통계적으로 정의(Statistically define)하고 기술할 수 있는 IID (independently, identically distributed) 결 자극이 적합할 수 있다(IID 결 자극에 관해서는 Chubb, Econopouly, & Landy, 1994 을 참고). 이 자극을 사용하여, 남종호(1999)는 결을 구성하는 요소들의 확률분포에서 일차 IID 결의 속성은 평균으로, 이차 속성은 분산으로 반영하여 결 분리 과정에 작용하는 기제와 그 특성을 연구한 바 있다(그림 1).

남종호(1999)는 밝기와 대비의 두 차원을 반영하는, 평균과 분산의 두 직교축으로 구성된 확률분포 공간에서 선택된 확률분포를 바탕으로 생성된 IID 결의 분리과정에는 두 종류의 결 처리기제가 관여하고 있으며, 두 기제가 출력한 각각의 정보는 확률 합산(probability

summation) 방식에 의해서 처리됨을 밝혔다 또한 밝혀진 두 기제 중 하나는 축의 방향이 결 공간의 평균 축과 일치되어, 결 자극의 밝기 차원에 민감한 것으로 밝혀져, 기존의 일차 결 탐지 기제인 것으로 확인됐으나, 다른 기제는 축의 방향이 평균 축이나 분산 축의 어디에도 정확하게 일치되지 않는 방향으로 결정되어, 이차 결 탐지 기제는 결의 밝기 차원과 대비 차원이 함께 결합된 결의 속성에 민감한 부정 반정류(negative half-wave rectification) 과정

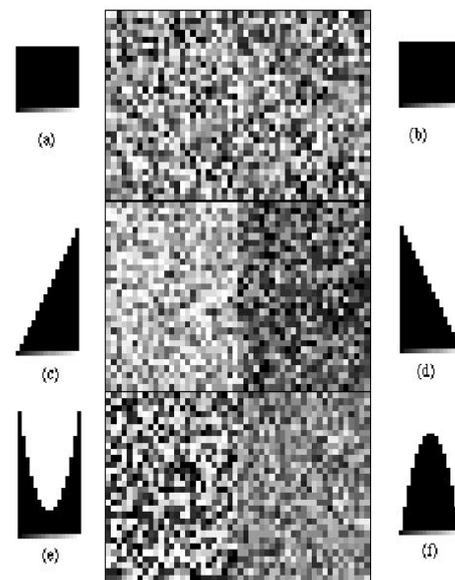


그림 1. 다양한 회색강도의 정사각형으로 구성된 IID 결. 각 결 자극을 구성하는데 사용된 결 요소 분포가 좌우 옆에 제시되어 있다. 분포의 가로축은 결 요소의 밝기 강도이며, 세로축은 해당 요소의 확률 값 상대적 빈도)을 나타낸다. (a)와 (b)는 균등(uniform) 확률 분포로써 두 분포가 동일하기 때문에 여기에서 생성된 두 결 자극은 경계를 드러내지 않는다. 결 자극 (c)와 (d)는 확률분포의 분산이 같지만 밝기차이로 인하여 결 경계가 형성된다. (e)와 (f)는 평균이 같음에도 불구하고 결 경계가 형성되는데 이는 대비의 차이에 기인한다.(남종호, 2000에서 인용)

인 것으로 드러났다. 또한 남중호(2000)는 후속 연구를 통하여 결 분리의 두 기제 중 결의 밝기와 대비의 조합에 민감한 기제(이후 밝기+대비 탐지 기제로 함)는 밝기와 대비가 특정한 방식으로 결합된 정보만을 처리하는 단일 과정으로 이루어져 있음을 밝혔다.

그런데 남중호(2000)의 연구는 결 요소 크기가 두 기제에 상반된 영향을 준다는 결과를 얻었다. 밝기 탐지 기제는 결 요소의 크기가 커질수록 역이 높아졌으며, 밝기+대비 탐지 기제는 역이 낮아지는 결과가 얻어졌다. 그런데 이 연구의 자극 구성에는 결 요소의 크기가 클수록 분리된 결 영역의 시각도당 공간주파수는 낮아지는 부적 상관이 있었다. 따라서 이러한 결과는 두 기제가 공간주파수에 따라 역 패턴이 달라지는 특성을 지니고 있으나, 역 변화 패턴에서 최대 민감도가 서로 다른 대비민감도 함수 형태를 지녔기 때문에 관찰되었을 가능성도 고려할 수 있다. 즉, 남중호의 연구에서 두 기제가 결 요소의 크기에 따라 상반된 경향의 역 변화를 보인 것은 상반된 경향을 보이고 있는 공간빈도 범위 내에서 역을 측정할 결과일 가능성이 있다.

따라서 Sutter 등(1995)의 연구, 그리고 Arsenault 등(1999)의 연구에서 밝힌 이차 결 탐지 기제의 공간주파수 반응 특성과 일차 결 탐지 기제의 공간주파수 반응 특성을 비교하여, 최적 공간주파수가 상이하게 나타나는지, 또는 동일하게 나타나는지를 밝힐 필요가 있다. 남중호(2000)의 연구에서 밝힌 바와 같이 결 요소의 크기로 인한 밝기 탐지 기제와 밝기+대비 탐지 기제의 역 변화 패턴이, 각 기제가 갖는 최적 공간주파수가 서로 상이하기 때문에 관찰된 것이라면, 동일한 결 요소로 구성을 하더라도, 여러 공간주파수에 대한 각

기제의 역 변화 패턴이 상이하게 나타날 것이다. 그러나 공간주파수의 특성이 두 기제에 기여하고 있는 공통된 수용기들 그리고 유사한 하위 기제들이 발생시키는 신호 강도에 의존하는 것이라면, 밝기 탐지 기제와 밝기+대비 탐지 기제의 대비민감도 함수는 동일한 공간주파수에 최대 민감도를 보이는, 상호 유사한 패턴을 보일 것이다.

방 법

참가자 정상시력 또는 교정된 정상시력을 가진 세 사람이 실험에 참가하였다. 참가자 중 한사람은 연구자 자신이었으며 (NHJ), 다른 한 실험 참가자는 정신물리학 실험에 익숙한 관찰자였으며(PYS), 나머지 한 참가자는 정신물리학 실험에 익숙하지 않은 관찰자였다(YSJ). 연구자를 제외한 두 실험 참가자는 실험 참가에 대한 보수를 받았다.

기구 및 자극 실험의 전 과정은 Matlab과 PsychToolbox (Brainerd, 1997; Pelli, 1997)로 제작된 프로그램을 통해 애플사의 파워PC 8500 (Apple PowerPC 8500/180)을 사용하여 통제되었다. 결 자극은 매킨토시 모노크롬 21 인치 모니터에 제시되었다. IID 결 자극을 구성하는 결 요소는 선형성(linearity)이 유지된 9개의 회색강도로 구성되었다(제시 화면의 회색강도에 대한 선형성을 구하는 절차에 대해서는 남중호(2000)를 참고). 결 요소의 회색강도는 $7.96 i$ cd/m^2 , $i = 0, 1, \dots, 8$ 였다.

결 자극은 총 면적이 동일한 IID 결 한 쌍으로 이루어져있다. 하나의 IID 결을 형성하는데 사용되는 확률분포는 결 공간상의 한 지점이며, 짝을 이루는 다른 하나의 IID 결은 결

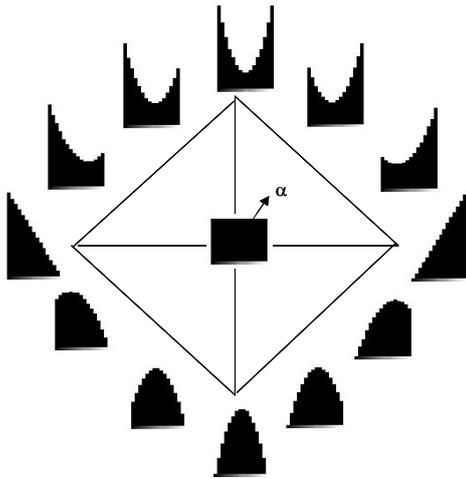


그림 2. 평균밝기와 분산이 축으로 구성된 확률분포 공간. 원점에는 균등 분포 (uniform distribution)가 있다. 확률분포 공간의 세로축은 분산의 증감을, 가로축은 평균의 증감을 나타낸다. α 는 원점에서의 상대적 거리로써 외곽 마름모꼴에 도달하면 최댓값이 1이 되며, 특정 방향에 있어서 한점과 원점으로부터 대칭으로 떨어진 다른 점이 결 자극을 구성하는 쌍이 된다. 원점에서 어느 정도 멀어져야 경계가 탐지되는 결을 구성하도록 하는 확률분포가 되는지가 탐지 역 값으로 사용된다. α 는 외곽의 확률분포와 원점의 균등분포에 대한 선형조합의 정도를 조절하는 변수로 이해될 수 있다. 마름모의 주변에는 결 공간의 각 방향에서 최대로 변형 가능한 확률분포의 형태가 제시되었다. 확률분포에서 가로축은 결 요소의 밝기 강도이고, 세로축은 해당 결 요소의 확률 값 상대적 빈도를 나타낸다. 남종호, 2000에서 변용)

공간상에서 그 지점과 원점에서 점대칭인 지점의 확률분포로 만들어졌다(그림 2). 결 자극은 가로 128열과 세로 128줄의 결 자극요소로 구성되었다(그림 3). 결 자극 요소는 4x4 픽셀 (picture element)로 구성되었다. 피험자와 화면까지의 거리는 70cm가 되도록 하였으며, 이 경우 결 자극을 이루는 결 요소 하나의 시각

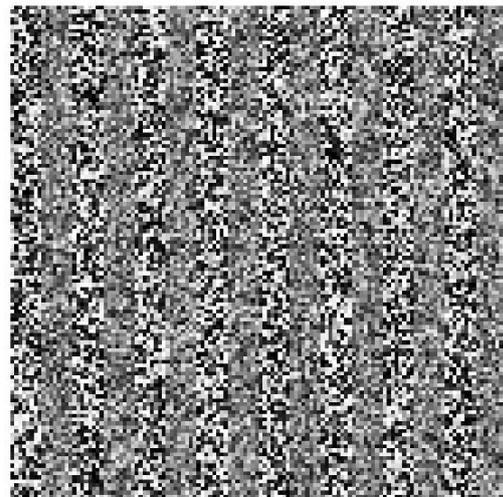


그림 3. 실험 자극 예 그림의 예는 8 cycles/display의 자극이며, 시각(visual angle)으로는 16 cycles/degree의 세로 결 분리 자극이다. 결 분리 경계는 시행마다 무선으로 좌우 이동되어 국소 단서로 인한 수행을 방지하였다.

은 6.45' ($1' = \frac{1}{60}^\circ$)이었다.

결 공간주파수는 다섯 주기의 격자 파형이 사용되었다. 이는 화면 자극에서 1, 2, 4, 8, 16 주기를 가졌으며, 이를 시작도당 주기로 변환하면 각각 0.15, 0.29, 0.58, 1.16, 그리고 2.3 cycles/degree(이후 cpd로 함)였다. 결 자극은 가로 방향, 또는 세로 방향으로 영역분리가 되었다(그림 3). 그리고 확률분포가 결 공간의 원점에서 방사선 방향으로 변화하게 되는 11개의 자극조건이 선택되었다. 11개의 방사선 방향은 그림 2에서 각도로 표현될 수 있는데, 0°에서 180°까지 18°씩 간격을 유지시켰다. 그러나 0°와 180°는 실험에서 동일한 조건이므로, 중복 제시한 경우가 되었다

절차 각 시행은 다음과 같이 구성되어 있었다. 평균밝기(31.84 cd/m²)의 회색화면에 결 자

극이 제시되고 250msec 후에 사라졌다. 피험자는 제시된 결 자극이 가로로 나누어져 있었는지, 세로로 나누어져 있었는지를 두 가지 대안 중 하나를 강제로 선택하게 하는 강제선택 과제(2AFC: Two-alternative forced choice)에 따라 반응하였다. 반응 후에 판단이 옳았는지에 대한 피드백이 주어졌다. 반응의 정확성은 다음 번에 제시될 자극을 구성하는 확률분포 쌍을 생성해내는 매개변수(그림 2의 α)를 변화시키는데 사용되었다. 매개변수는 각 방향이 가지는 최댓값의 1% 단위로 변화하였으며, 두 번 연속해서 맞으면 감소하고, 한 번 틀리면 증가하는 계열과 세 번 연속해서 맞으면 감소하고, 한 번 틀리면 증가하는 계열을 동시에 사용하였다. 이는 피험자의 수행정도에 따라 적합한 역 주변의 자극강도에 대한 관찰치를 얻을 수 있도록 하는데 목적이 있었다. 그리고 각 방향에 대한 자극 제시 횟수는 별도로 저장하여 횟수가 동일하도록 하였다.

각 조건 별로 200회의 시행을 하였다. 따라서 결 공간의 원점에서 11 개 방향, 5 가지 주기의 55개의 조건에 200회 시행을 하였으므로 총 시행은 11,000회가 되었다. 자극 제시 절차상 모든 조건은 무선으로 혼합되어 제시 되도록 하였다. 개별 피험자는 11,000회의 관찰을 220회의 작은 단위로 나누어 이를 한 블록으로 간주하여 수행하였다.

분석모형 본 연구에서는 남중호 (1999, 2000)에서 가정한 모형을 채택하여 분석하였다. 채택한 모형은 다음과 같다: (a) 경계를 이루고 있는 결의 평균밝기, 결의 대비, 또는 이 둘의 어떤 조합의 차이에 민감한 기제가 있으며, (b) 어떤 한 기제가 결 경계를 탐지하는 확률과 다른 기제가 결 경계를 탐지하는 확률은

서로 독립적이고, (c) 두 기제 중 적어도 하나가 결 경계를 탐지하면, 결 경계가 탐지된다.

이에 따라 자료 분석에 사용될 모형은 다음과 같은 식으로 구성되었다. 두 기제는 자극 강도에 따라 결 경계를 탐지하는 확률이 있으며, 이를 계산하는 함수로는 Weibull 함수가 사용되었다. 일반적으로 Weibull 함수는 보통 두 개의 변수를 가지고 있으며, 가장 일반적인 형태의 탐지 함수는 다음과 같다:

$$P_{\text{탐지}} = 1 - 2^{-\left(\frac{r}{S}\right)^K}, \quad (1)$$

여기서 P 는 탐지 확률, S 는 중심 변수로서 역을 나타냄, K 는 기울기 변수, 그리고 r 는 자극 강도(그림 2의 α 와 같은 의미)이다. 이 탐지 확률 함수는 0에서 1까지의 값을 갖는다. 그런데 강제선택과제의 정확탐지 확률은 이론적으로 최소 0.5의 값을 갖는다. 따라서 (1)의 탐지 확률을 0.5와 1 사이에 있도록 식을 변형하면 다음과 같다:

$$P_{\text{정확탐지}} = 1 - 2^{-\left(\frac{r}{S}\right)^{K-1}}. \quad (2)$$

이 탐지 함수를 밝기와 대비의 확률분포 공간상에서 어느 방위에도 성립할 수 있도록 방위 변수가 세 번째 변인으로 포함된 식은 다음과 같다:

$$P = 1 - 2^{-\left|\frac{r \cdot \cos(\theta - \delta)}{S}\right|^K - 1}, \quad (3)$$

여기서 P 는 정확탐지 확률, S 는 중심 변수, K 는 기울기 변수, δ 는 축의 방향, 그리고 r 와 θ 는 자극 강도를 나타내는 좌표 값으로써 실험에서 사용된 극좌표에서 계산되었다. 그러므로 확률 합산(probability summation)에 의해서

두 기제 중 적어도 하나의 기제가 결 경계를 탐지할 확률을 계산하여, 다음과 같이 두 개의 정신물리학 함수로 구성된 모형의 형태는 다음과 같았다:

$$P = 1 - 2 \left| \frac{r \cdot \cos(\theta - \delta_f)}{S_f} \right|^{K_f} - \left| \frac{r \cdot \cos(\theta - \delta_g)}{S_g} \right|^{K_g} - 1, \quad (4)$$

여기서 밝기 탐지 기제(f)의 정신물리학 함수를 구성하는 변수로써, S_f 는 중심 변수, K_f 는 기울기 변수이며, δ_f 는 축의 방향을 가리킨다. 밝기+대비 탐지 기제(g)의 정신물리학 함수를 구성하는 변수로써, S_g 는 중심 변수, K_g 는 기울기 변수, δ_g 는 축의 방향을 가리킨다. 그러나 일차 결 속성에 의한 결 분리 과정은 이미 많은 연구에서 밝혀진 사실이므로, 밝기 탐지 기제는 축이 고정된 것으로 가정할 수 있다. 따라서 최종 모형의 형태는 다음과 같았다:

$$P = 1 - 2 \left| \frac{r \cdot \cos(\theta)}{S_f} \right|^{K_f} - \left| \frac{r \cdot \cos(\theta - \delta_g)}{S_g} \right|^{K_g} - 1. \quad (5)$$

이 모형은 밝기와 대비 차원으로 구성된 결 공간을 대상으로 이루어진 기존 연구(남종호, 1999, 2000)에서 검증된 바와 같이 우도검증에 의해 정신물리학 실험절차를 통하여 얻은 자료를 잘 설명한다.

결 과

자료의 관찰 지점은 각도와 원점으로부터의 거리라는 극좌표와 유사한 방식으로 얻어졌지만, 각 방향에 대한 최댓값이 원점을 중심으로

로 원이 아닌 정마름모꼴 상에 놓이게 되므로, 원점으로부터의 절대적인 거리는 각도에 따라 달라진다. 즉, 원점에서의 거리(α)는 최댓값 1에 따른 상대적인 값을 갖게 되므로 각도에 따라 일반 극좌표에서 갖게 되는 절댓값이 다르다. 따라서 각 방향 조건에 따라 절대적인 거리로 환산하여 일반적인 극좌표(r, θ)로 변환시켜 모형(식 5)에 필요한 자료로 구성하였다. 이 자료들에 대한 최대 우도값을 갖게 만드는 모형의 매개변수를 결정하였다.

표 1은 각 공간주파수에 대하여 축의 방향 하나를 밝기 차원을 나타내는 0°에 고정시킨 연구 모형을 적용시킨 결과를 보여주고 있다. 세 명의 피험자들로부터 얻은 자료를 살펴보면, PYS의 0.15 cpd에서의 예외를 제외하고는 밝기+대비 탐지 기제가 보이는 축은 모두 90°와 180°사이에 있었다. 또한 축의 방향이 공간주파수가 커짐에 따라 체계적으로 변화하는 것처럼 보이지는 않는다. 각 공간주파수에서 얻어진 축의 각도가 피험자 내에서 유사한 각도임을 보여주고 있다. 하나의 예외는 0.15 cpd에서 얻어진 것인데, 피험자 NJH와 PYS에서 대비 차원 축(90°)에 가깝게 기울어진 형태를 보이고 있으나(각각 97.4°와 85.6°), YSP의 경우에는 이러한 형태가 보이지 않고 다른 공간주파수의 경우와 유사하다(139.2°).

밝기+대비 탐지 기제가 갖는 공간상의 축의 방향이 공간주파수에 따라 체계적으로 변동하는 대신에 탐지 역이 공간주파수와 밀접한 관련을 가지고 변하고 있음을 보이고 있다. 결의 밝기 탐지 기제의 경우 최적 공간주파수는 1.16 cpd이며, 결의 밝기+대비 탐지 기제의 경우 또한 가장 민감한 공간주파수가 1.16 cpd임을 보여주고 있으며, 각 공간주파수에 따라 탐지 역이 U 형태로 체계적 변화를 보이고

표 1. 최대 우도법으로 얻어진 실험 참가자의 각 시각도 조건별 결 탐지 기제의 축 방향과 역

피험자	시각도 당 주기	기제 f (밝기 경계 탐지)			기제 g (밝기와 대비 경계 탐지)		
		축 f (고정)	역(S_f)	기울기(K_f)	축 g (δ_g°)	역(S_g)	기울기(K_g)
NJH	2.30	0	0.1183	1.2304	134.0	0.1194	3.5463
	1.16	0	0.0900	2.6046	129.4	0.1098	2.3942
	0.58	0	0.0988	1.8026	124.0	0.1321	2.1839
	0.29	0	0.1223	1.9349	128.7	0.2166	2.7298
	0.15	0	0.1926	3.5709	97.4	0.4135	2.5767
PYS	2.30	0	0.1031	1.7834	152.6	0.1084	1.6806
	1.16	0	0.0704	1.5221	147.3	0.1043	2.2603
	0.58	0	0.0846	2.1171	145.7	0.1340	4.2625
	0.29	0	0.1453	2.9248	133.7	0.2723	1.6536
	0.15	0	0.3318	2.9833	85.6	0.5853	1.9018
YSJ	2.30	0	0.1130	1.7597	126.5	0.1356	3.6292
	1.16	0	0.0909	3.5295	124.2	0.1128	2.5509
	0.58	0	0.1064	1.3684	128.2	0.1267	1.7907
	0.29	0	0.1171	1.4307	131.7	0.2067	3.5386
	0.15	0	0.1984	2.5848	139.2	0.5441	1.7899

표 2. 공통 축을 사용한 모형에서 최대 우도법으로 얻어진 실험 참가자의 결 분리 축 방향과 역

피험자	시각도 당 주기	기제 f (밝기 경계 탐지)			기제 g (밝기와 대비 경계 탐지)		
		축 f (고정)	역(S_f)	기울기(K_f)	축 g (δ_g°)	역(S_g)	기울기(K_g)
NJH	2.30	0	0.1130	1.3056	128.7	0.1282	3.3616
	1.16		0.0916	3.0669		0.1088	2.1976
	0.58		0.0986	1.3986		0.1291	2.6047
	0.29		0.1237	1.9062		0.2181	2.6456
	0.15		0.1965	3.1299		0.4961	1.7105
PYS	2.30	0	0.0965	2.4745	144.9	0.1275	1.3396
	1.16		0.0662	1.5136		0.1087	3.2170
	0.58		0.0833	2.1839		0.1364	5.3917
	0.29		0.1478	2.9343		0.2167	2.1445
	0.15		0.3530	2.9361		0.8448	1.2463
YSJ	2.30	0	0.1117	1.5192	127.7	0.1343	4.6706
	1.16		0.0932	3.8642		0.1079	1.9290
	0.58		0.1052	1.0630		0.1347	2.0033
	0.29		0.1179	1.6166		0.2142	3.0064
	0.15		0.1967	3.3089		0.4818	1.7966

있다.

결의 밝기+대비 탐지 기제가 보이는 축의 방향이 공간주파수와 체계적인 결합을 보이지 않고, 그 변동성도 0.15 cpd 이외에는 서로 상이하지 않았다. 따라서 실험에 사용된 모든 공간주파수에 동일한 모형을 적용했을 경우에도 공간주파수에 따른 역의 체계적인 변화가 유지되는지를 알아보았다. 상이한 공간주파수 조건에서 얻은 자료들을 사용하여 동시에 최대 우도값을 산출해내는 변동 축 방향과 각 공간주파수에 대한 다섯 개의 역을 결정하는 모형을 적용하였다. 환언하면, 다섯 공간주파수 조건에서 공통적으로 사용되는 고정 축(0°)과 변동 축(δ_g°)을 적용하면서, 각 조건들에 적합한 역(S_f 와 S_g)와 기울기(K_f 와 K_g)를 변동시켰다. 다섯 공간주파수 조건에서 얻은 자료를 동시에 적용시켜서 우도 값의 총합을 최대로 만드는 모형의 매개변인들의 결과를 표 2에 제시하였다. 그리고 그림 4는 표 2의 자료

를 다섯 공간주파수 조건에 따른 역의 변화로 나타내었다. 이 그림은 두 가지 기제의 결 방향 탐지역이 공간주파수에 따라 서로 유사한 U 형태의 패턴으로 변화하고 있으며, 공통적으로 가장 민감한 공간주파수가 1.16 cycles/degree 임을 보이고 있다.

논 의

본 연구는 평균(결의 밝기)과 분산(결의 대비)의 두 차원을 직교 배치하여 구성된 확률 분포 공간에서 생성된 결 분리에 작용하는 기제는 두 종류가 있음이 관찰되었으며, 한 기제가 결의 평균 밝기에 민감하다는 가정을 하였을 때도 기존의 연구(남종호, 1999, 2000)에서 얻은 결과와 일치하는 결과를 얻었다. 특히 일차 결 탐지 기제와 이차 결 탐지 기제가 보이는 공간주파수 특성이 상당히 유사한 패턴을 보이는 결과를 주목할 만하다. 즉, 모형

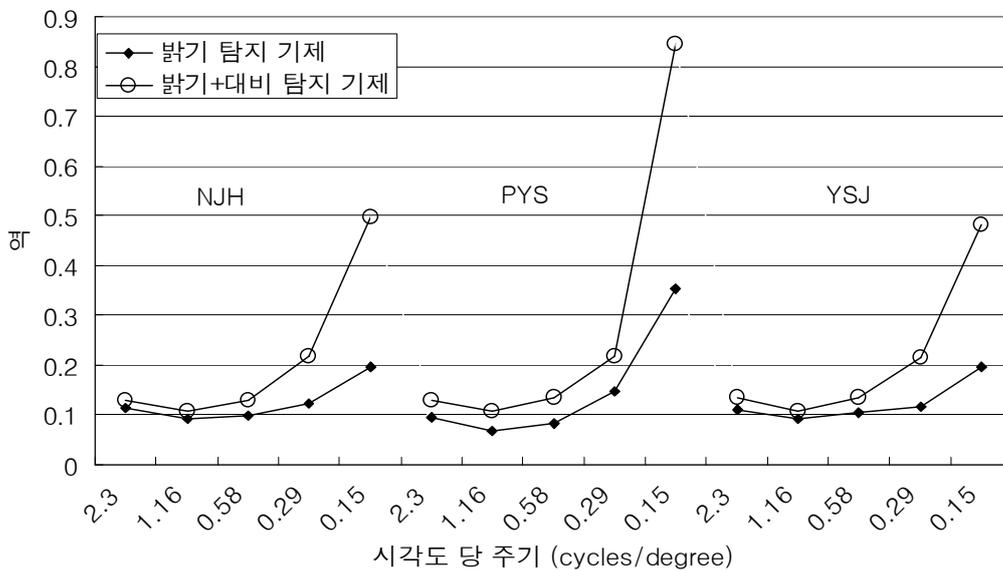


그림 4. 공통 축을 사용한 모형에서 밝기 탐지 기제와 밝기+대비 탐지 기제의 시각도 당 주기에 따른 역의 변화

에서 얻은 두 기체의 민감도 방향이 결 공간 주파수에 따라 체계적으로 변화되기보다는 탐지 역에서의 체계적인 변화로 나타났다.

또한 기존의 연구와 비교를 하면, 이차 결 분리 기체의 공간주파수를 살핀 Sutter 등(1995)의 연구에서 Gabor 변동의 최대 민감도 주파수는 1 cpd였으며, 이 경우 국소 변동을 일으키는 시각 반송 소음(搬送騒音 carrier noise)의 최적 공간주파수는 8~16 cpd였다. 본 연구에서 가장 예민한 결 분리 공간주파수는 1.16 cpd이며, 사용된 결 요소 공간주파수는 9.3 cpd로서 Sutter 등(1995)의 결과와 상당히 유사하였다.

본 연구에 적용된 이차 결 분리 기체의 공간주파수 특성은 Sutter 등(1995)의 결과와 유사할 뿐만 아니라, 이때 일차 결 분리 기체의 공간주파수 특성은 이차 결 분리 기체의 그것과 유사하다. 따라서 일차 결 기체와 이차 결 기체가 탐지할 수 있는 결 자극의 조건을 동일하게 구성한다면 두 기체의 공간주파수 반응 특성은 유사하다고 할 수 있다. 그러므로 이 결과는 남중호(2000)의 연구 결과가 결 요소의 크기로 인한 두 기체의 역 변화 패턴이 공간 빈도 주파수의 최적 주파수가 상이하기 때문에 얻어진 것이라는 설명을 지지하지 않

았다.

그럼에도 불구하고, 유사한 패턴의 U 형태로 체계적 변화를 보이는 결과가 이차 결 탐지 기체가 밝기와 대비 정보에 동시에 민감한 기체이고, 따라서 밝기 정보에 의해서 공간주파수 특성이 드러나기 때문에 이러한 결과가 얻어졌을 가능성을 제기할 수 있다. 그러나 이차 결 탐지 기체는 결 공간에서 밝기 정보가 없이 대비 정보로만 결 분리가 가능한 방향에 대한 수행에서도 공간주파수에 따른 유사한 패턴의 U 형태로 탐지 역의 변화를 보인다(표 3). 따라서 이러한 U 형태의 역 변화 패턴은 이차 결 탐지 기체 자체의 공간주파수 특징이라고 할 수 있다.

하지만 일반적으로 일차 선형 필터에 비해 이차 선형 필터가 상대적으로 저 공간주파수에 조율되었다고 알려져 있다. 일차 결 분리 기체의 공간주파수에 대하여 대표적으로 참조할 수 있는 연구인 Campbell과 Robson(1968)의 연구에서 정현파를 자극으로 이용하여 보여준 대비 민감도 함수는 3~5 cpd에서 최대 민감도를 보인다. 반면, 이차 결 분리 기체의 공간주파수를 살핀 Sutter 등(1995)의 연구에서 Gabor 변동의 최대 민감도 부분은 1 cpd였다. 이렇게 최대 민감도를 보이는 주파수의

표 3. 결의 평균 밝기는 동일하고 대비만 다른 축 (대비 차원 축)상에서 얻어진 결 분리 역 공통 축 모형과 개별 축 모형을 적용해서 얻어진 결과와 유사한 역 변화 패턴을 보이고 있다.

피험자	NJH		PYS		YSJ	
	역(S_g)	기울기(K_g)	역(S_g)	기울기(K_g)	역(S_g)	기울기(K_g)
2.30	0.1721	3.1804	0.2098	6.3362	0.1670	3.4005
1.16	0.1425	4.8383	0.1903	3.3530	0.1363	1.7745
0.58	0.1590	6.8669	0.2422	6.2827	0.1617	0.3243
0.29	0.2917	5.9065	0.5378	1.0793	0.2816	2.4112
0.15	0.5029	2.5757	0.5224	7.6202	0.6721	2.1764

차이가 일차 결 분리 기제와 이차 결 분리 기제가 보이는 차이 때문이라고 단순하게 해석할 수 있다. 그러나 탐지 역을 측정하는데 사용한 자극을 고려한다면 다른 해석도 가능하다.

이를 위하여 Sutter 등(1995)이 제시한 연구모형을 기준틀을 삼아 살펴보도록 하겠다(그림 5). Sutter 등(1995)은 연구모형으로 일차 단계와 이차 단계로 구성된 2 단계 모형을 제시하였다. 첫 번째 단계는 시각 반송 소음(visual carrier noise)을 선형처리 후 정류하는 필터로 구성되어 있으며, 두 번째 단계는 일차 단계의 출력을 선형 처리하는 필터로 구성되어 있다. 이들은 두 단계의 필터들이 상호작용을 하여 탐지될 수 있는 최적의 공간주파수를 형성한다고 하였다.

이 모형에서 일차 단계의 필터가 시각 신호

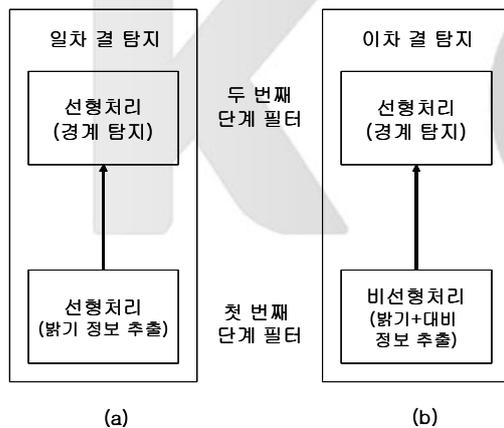


그림 5. 결 탐지 모형. (a) 일차 결 탐지 모형. 시각 입력을 첫 번째 단계의 선형 필터가 처리한 후, 두 번째 단계의 선형 필터가 경계를 탐지한다. (b) 이차 결 탐지 모형. 시각 입력을 첫 번째 단계의 비선형 필터가 처리한 후, 두 번째 단계의 선형 필터가 경계를 탐지한다. (Sutter, Sperling, & Chubb (1995)의 모형을 도식화 함.)

를 선형 처리 후 정류한 신호를 입력으로 이차 단계의 필터가 선형 처리하여 결 분리를 할 수 있기 위해서는, 첫 번째 단계의 필터가 두 번째 단계의 필터에 필요한 충분한 강도의 신호를 출력시키고, 첫 번째 단계 필터의 신호를 처리해줄 수 있는, 상응하는 이차 단계 필터의 존재가 동시에 이루어져야 한다.

본 연구에서 사용된 자극의 이차 결 요소 자극 정보는 최대 9.3 cpd 크기의 첫 번째 단계 필터가 탐지하는 것으로 볼 수 있다. 이차 결 분리 기제의 경우 이러한 크기의 필터가 최적으로 연합된 두 번째 단계의 선형 필터의 크기는, Sutter 등(1995)의 연구 결과에 따르면 0.58~1.16 cpd 라고 할 수 있다. 그런데 일차 결 처리 기제의 공간주파수의 특성이 이차 결 처리 기제와 유사한 이유가 일차 결 기제의 경우에도 첫 번째 필터와 두 번째 필터 사이에 유사한 관련성을 지니고 있기 때문일 수 있다. 즉, 일차 결 분리 기제에서도 두 번째 단계의 크기와 첫 번째 단계의 필터 크기가 1:1/8 ~ 1/16 의 이차 결 분리 기제와 동일한 관계를 가진다고 가정할 수 있다. 이 경우 분리 기제의 첫 번째 단계에서 활성화되어 두 번째 단계의 결 탐지에 가능한 신호를 발생시키는 필터(filter)가, 본 연구에서 사용된 자극의 제약으로 인하여, 일차 결 분리 기제와 이차 결 분리 기제 각각에서 동일한 크기의 필터를 사용했기 때문에 두 번째 단계의 필터가 지닌 공간주파수 특성이 유사하게 나타났다고 해석할 수 있을 것이다.

또한 일반적으로 일차 기제에 비해 이차 기제가 상대적으로 저 공간주파수에 조율되어 있는 이유를 이 모형에 근거해서 다음과 같이 설명할 수 있다. 일차 결 분리 기제의 경우 첫 번째 단계의 필터가 이차 결 분리 기제에

비해 고 공간주파수의 국소 정보를 처리할 수 있으며, 결과적으로 이 필터와 상응하고 있는 두 번째 단계의 필터는 이차 결 분리 기제에 비해 최적 주파수가 더 높은 특성을 보이게 된다고 설명할 수 있다. 그러나 이차 결 자극을 처리하는 기제의 경우 국소 변동(local modulation)을 처리하여 충분한 신호를 발생시키는 일차 단계의 필터의 최소 크기는 한계가 있을 수 있다. 이는 결 요소의 시각도 크기가 작아질수록 이차 결 분리의 역이 일차 결 분리의 역에 비해서 상대적으로 높아진다는 결과에서 쉽게 추론될 수 있다(남중호, 2000) 즉, 첫 번째 단계의 선형처리 정류 필터가 고 공간주파수를 지닌 결 요소의 국소 변동을 처리하여 생성한 출력으로는 이에 상응하고 있는 두 번째 단계의 필터가 선형처리를 하기에 충

분하지 않기 때문이라고 할 수 있다.

본 연구에서 관찰된 일차 결 분리 기제와 이차 결 분리 기제의 공간주파수 특성이 유사하다는 결과를 근거로 일차 결 처리 기제와 이차 결 처리 기제에 포함되어있다고 가정한 두 단계의 필터에 대하여 다음의 두 가지 가능성이 제시될 수 있다. 첫 번째는 그림 5에 제시된 바와 같이 서로 독립적인 경로를 지나지만 두 번째 단계의 필터가 상호 유사한 공간주파수 특성을 보이는 경우이다. 두 번째는 첫 번째 단계의 필터는 독립적으로 각각 선형 처리와 비선형 처리를 하는 필터가 있으나, 출력은 동일한 두 번째 단계의 선형 필터로 처리되는 경우이다. 첫 번째 단계의 필터 크기가 동일한 경우, 첫 번째 단계에서 보낸 신호를 두 번째 단계의 선형 필터가 결 경계를 탐지할 때 선형 출력과 비선형 출력을 구분 없이 공통적으로 처리하여 공간주파수 특성이 유사하게 나타나는지, 또는 별개의 처리가 따로 존재하지만 공간주파수 특성은 유사한지는 후속 연구에서 밝혀져야 할 것이다(그림 5, 6).

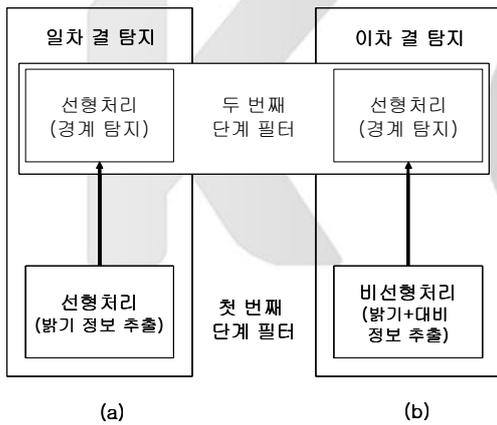


그림 6. 공유되는 선형 필터가 있는 결 탐지 모형 (a) 일차 결 탐지 모형. 시각 입력을 첫 번째 단계의 선형 필터가 처리한 후, 두 번째 단계의 선형 필터가 경계를 탐지한다. (b) 이차 결 탐지 모형. 시각 입력을 첫 번째 단계의 비선형 필터가 처리한 후, 두 번째 단계의 선형 필터가 경계를 탐지한다. 그림 5의 모형과 동일하지만 두 번째 단계의 선형 필터가 공유되는 점이 다르다.

참고문헌

남중호 (1999). 평균밝기와 대비성의 차원으로 구성된 결 공간에서 결 분리에 작용하는 두 가지 기제. *인지과학*, 10, 39-49.

남중호 (2000). 부정적 반정류 과정에 의한 결 경계 탐지. *한국심리학회지:실험 및 인지*, 12, 153-165.

Arsenault, A. S., Wilkinson, F. & Kingdom, F. A. (1999). Modulation frequency and orientation tuning of second-order texture mechanisms. *Journal of Optical Society of America A*, 16(3), 427-435.

- Beck, J. (1982). Textural Segmentation. In J. Beck (Ed.), *Organization and Representation in Perception* (pp. 285-317). LEA, NJ:Hillsdale.
- Beck, J., Sutter, A., & Ivry, R. (1987). Spatial frequency channels and perceptual grouping in texture segregation. *Computer Vision and Image Processing*, 37, 299-325.
- Bergen, J. R. (1991). Theories of visual texture perception, In J. Cronley-Dillon (Series Ed.) & D. Regan (Vol. Ed.), *Vision and Visual Dysfunction: vol 10. Spatial Vision* (pp. 114-134). CRC Press, New York:Macmillan.
- Bergen, J. R., & Adelson, E. H. (1988). Early Vision and Texture Perception. *Nature*, 333, 363-364.
- Bergen, J. R., & Landy, M. S. (1991) Computational modeling of visaul texture segregation. In M. S. Landy & J. A. Movshon (Eds.) *Computational Models of Visual Processing* (pp. 253-271). MIT Press, MA:Cambridge.
- Brainard, D. H. (1997) The Psychophysics Toolbox, *Spatial Vision* 10, 433-436.
- Caelli, T. (1985). Three processing characteristics of visual texture segmentation. *Spatial Vision*, 1, 19-30.
- Campbell, F. W. & Robson, J. G. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of grating. *Journal of Physiology*, 197, 551-566.
- Chubb, C., Econopouly, J., & Landy, M. (1994). Histogram contrast analysis and the visual segregation of IID textures. *Journal of Optical Society of America A*, 11, 2350-2374.
- Chubb, C. & Sperling, G. (1988). Drift-balanced random stimuli: A general basis for studying non-Fourier motion perception. *Journal of Optical Society of America A*, 5, 1986-2007.
- Gorea, A. & Papathomas, T. V. (1993). Double-opponency as a generalized concept in texture segregation illustrated with stimuli defined by color, luminance and orientation. *Journal of Optical Society of America A*, 10, 1450-1462.
- Julesz, B. (1975). Experiments in the visual perception of texture. *Scientific American*, 232, 34-43.
- Landy, M. S. & Bergen, J. R. (1991). Texture segregation and orientation gradient. *Vision Research*, 31, 679-691.
- Nothdurft, H. C. (1985a). Orientation sensitivity and texture segmentation in patterns with different line orientation, *Vision Research*, 25, 551-560.
- Nothdurft, H. C. (1985b). Sensitivity for structure gradient in texture discrimination tasks, *Vision Research*, 25, 1957-1968.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies, *Spatial Vision*, 10, 437-442.
- Sutter, A., Beck, J. & Graham, N. (1989). Contrast and spatial variables in texture segregation: Testing a simple spatial-frequency channels model. *Perception & Psychophysics*. 46, 312-332.
- Sutter, A., Sperling, G. & Chubb, C. (1995). Measuring the Spatial Frequency Selectivity of Second-order Texture Mechanisms. *Vision Research*, 35, 915-924.

1 차원고접수 : 2006. 11. 2.

최종게재결정 : 2006. 12. 21.

Similarity of Spatial Frequency Selectivity between First- and Second-order Texture Mechanisms

Jong-Ho Nam

Department of Psychology, the Catholic University of Korea

It has been well known that there are two kinds of texture segregation mechanisms; first-order texture detecting mechanism of linear processing, and second-order mechanism of nonlinear processing. The importance of spatial frequency selectivity has been demonstrated in constructing higher level of pattern perception from local texture segregated area. This study using a probability distribution space consisted of independent mean and variance dimensions measured segregation thresholds of various directions of texture pairs in space. Five spatial frequencies were applied to each direction respectively. In this space, two mechanisms were confirmed as previous studies identified; one was luminance-sensing, the other was negatively rectifying, luminance-and-contrast-sensing. Their thresholds varied similarly across the spatial frequencies, were peak at the same spatial frequencies, 1.16 cycles/degree. When an identical stimulus pattern was prepared to measure first- and second-order texture properties, similar selectivity of spatial frequency between two mechanisms was observed. It was discussed that two stage model could be used for the observed similarity of spatial frequencies between two texture detection mechanisms and general notion of second-order filter's tuning to lower spatial frequency than first-order.

Keywords : texture segregation, first-order texture, second-order texture, contrast sensitivity function, spatial frequency