

평균 밝기와 대비성의 차원으로 구성된 결 공간에서 결 분리에 작용하는 두 가지 기제

Two independent mechanisms mediate discrimination of IID textures varying in mean luminance and contrast

남 종 호*
(Jong-Ho Nam)

요약 본 연구에서 사용된 결 자극(texture stimulus)은 확률의 개념을 이용하여 만들어졌다. 결 자극은 결 요소들의 확률분포로부터 계산된 평균과 분산으로 완전하게 기술되어 질 수 있으며, 또한 평균과 분산이 서로 직교(orthogonal) 변화할 수 있는 유클리드 공간 속에 위치할 수 있게 된다. 결 분리과정에 관여하는 기제는 결의 평균정보를 사용하는 기제와 결의 분산정보를 사용하는 기제가 있을 것으로 가정하였다. 본 실험에서는 유클리드 결 공간에서 짝 지워진 결 자극을 분리하는 확률을 결 자극의 평균차이와 분산차이의 함수로서 측정하였다. 두 명의 피험자로부터 얻어진 자료는 평균과 분산으로 정의된 결 공간에 두 가지 기제가 결 분리과정에 관여하고 있음을 보여주었다. 그리고 두 기제의 반응을 확률 총합(probability summation) 원리에 따라 종합적으로 처리한다는 모형이 자료를 잘 설명하였다. 그러나 두 기제가 담당하는 결 자극의 각각의 차원이 결의 평균과 분산은 아닌 것으로 밝혀졌다. 그러므로 평균과 분산이 독립적인 축을 형성하도록 구성된 유클리드 공간에서 생성된 결 자극의 분리과정에는 두 개의 상호 독립적인 기제가 관여하고 있다. 각 기제의 특성을 살펴보면, 한 기제는 결 자극의 밝기정보를 처리하고, 다른 기제는 결의 밝기(luminance)정보와 대비성(contrastness) 정보를 동시에 처리하는 것처럼 보인다.

주제어 결 분리, 2차 결 속성, 밝기, 대비성, 처리기제의 독립성

Abstract The space of IID(Independently, Identically Distributed) textures was built with axes of mean luminance and contrast, and studied on what kind of mechanisms were required to mediate texture segregation in this space. The conjecture was tested that one of these mechanisms is sensitive to the differences between the means of textures to be discriminated, whereas the other is sensitive to the differences between variances. The probability of discrimination was measured for various pairs of textures in the IID space. The data were well fit by a model in which discrimination depends on two mechanisms whose responses are combined by probability summation. The conjecture was rejected that two mechanisms respectively tuned to mean and variance of texture function in segregation. Discrimination within space is mediated by 2 independent channels, however: the 2 independent channels are not exactly tuned to texture mean and variance. One mechanism was primarily sensitive to texture mean, whereas the other was sensitive to both texture mean and variance.

Keywords texture segregation, second-order texture property, luminance, contrastness

시각 체계가 결 단서를 이용하여 시각 장면을 분리해낸다는 것은 잘 알려진 바이다. 많은 연구들이 결 분리과정에 관여하는 기제들과 그 속성들을 밝혀내고자 하였다(Julezs, 1975; Beck, 1982; Caelli,

* 가톨릭대학교 심리학과 조교수
Department of Psychology, Catholic University of Korea
e-mail : jhnam@www.cuk.ac.kr

1985; Beck, Sutter와 Ivry, 1987; Bergen, 1991: Bergen과 Landy, 1991).

결 자극에 대한 연구가 결 자극을 어떤 속성으로 정의하느냐에 따라서 결 분리에 관여하는 기제의 특성이 달라지게 되는데, Chubb, Econopouly 와 Landy(1994)는 결 지각연구에 대한 새로운 접근 방향을 제시하였다. 이 연구자들은 IID(independently, identically distributed : 독립적이며 동일하게 분포된) 결 자극을 제안하였고, 이 자극을 생성해내기 위하여 사용된 결 요소의 확률분포를 통해 이 결 자극에 대한 속성들의 기술이 가능하다고 하였다(그림 1). 여기에서 결 요소들의 확률분포가 의미하는 바는 검은 색에서 하얀 색으로 단계적으로 변화하는 회색들의 분포가 확률분포의 원리에 따른다는 것이다. 예를 들면 가로와 세로가 각각 100인 모눈종이를 상정해보자. 각 네모 안에 회색을 할당하는데, 미리 정해놓은 확률분포에 따라서 회색의 구슬이 들어있는 주머니를 준비해 놓고, 뽑혀진 구슬의 회색을 확인하고 다시 주머니에 넣는, 즉 복원추출을 하면서 회색을 칠한다면, 각각의 네모들은 인접한 네모에 할당된 회색과는 무관하게, 즉 독립적인 회색으로 칠해지게 되며, 또한 모든 네모가 동일한 크기로 칠해진다. 이렇게 만들어진 결 자극에서 포함된 결 요소들을 다시 회색밝기 차원에서 출현 빈도를 작성하면, 이 빈도표는 원래의 확률분포를 닮게된다. 그러므로 확률분포는 자신으로부터 생성되는 결 자극의 속성을 결정한다고 하겠다.

본 연구는 IID 결 분리과정에 결 요소들의 확률분포에 따른 평균과 분산의 역할에 대하여 알아보려고 하였다. 그림 1에 세 쌍의 결을 비교해 놓았다. (a)와 (b)의 경우, 좌우 결 요소들의 분포가 같기 때문에 결 분리가 일어나지 않는다. (c)와 (d)의 경우에는 결 요소들의 확률분포의 차이가 평균에 의한 밝기(luminance)로 드러난다. 또한 (e)와 (f)의 경우에는 양쪽 분포가 좌우대칭이기 때문에 평균은 같지만 분포의 분산은 다르다. 따라서 대비성(contrastness)은 확률분포의 분산에 의해서 결정되어진다. 우리는 이러한 자극 중에 대비성(contrastness)을 잘게 하고, 밝기를 다르게 한 결 자극의 쌍을 쉽게 경계선이 어디에 있는 지를 알아낼 수 있다(그림 1의 (c)와 (d)). 더욱이 밝기를 갖게 하고, 대비성(contrastness)을 다르게 했을 때에도 결 분리를 쉽게 한다(그림 1(e)와 (f)). 이 예에서 인간의 시각체계는 결 자극의 밝기차이를 탐지할 뿐만 아니라, 결 자극의 대비성 차

이도 탐지한다는 것을 알 수 있다.

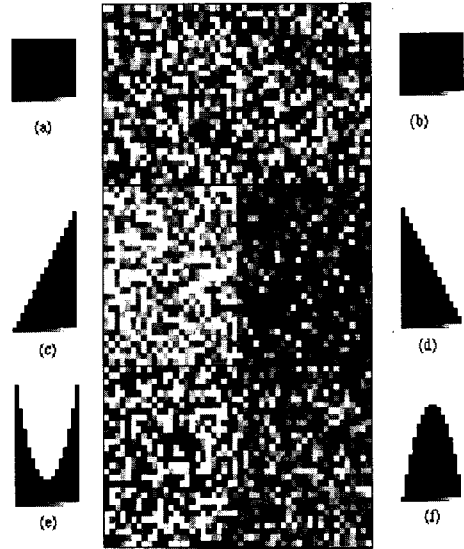


그림 1. 다양한 회색강도의 정사각형으로 구성된 IID 결. 각 결 자극은 양옆에 결 요소 분포가 있다. (a)와 (b)는 I_u , (c)는 $I_u + \lambda_1$, (d)는 $I_u - \lambda_1$, (e)는 $I_u + \lambda_2$, (f)는 $I_u - \lambda_2$. 결 자극 (c)와 (d)는 분산이, (e)와 (f)는 평균이 같다. U , λ_1 과 λ_2 에 대한 설명은 본문을 보라.

결 요소들의 확률분포들의 집합을 회색밝기에 값을 부여하여 평균치 차원에서의 변화와 분산치 차원에서의 변화를 축으로 구성하고, 이를 직교 배치시킬 수가 있다. 이 확률분포들을 이용하여 생성된 결 자극들은 특정한 밝기와 대비성을 가지게 된다. 환언하면, 결의 밝기와 대비성의 두 차원으로 결 자극에 대한 유클리드 공간을 구성할 수 있게 되는 것이다. 그러므로 IID 결 자극이 어느 정도의 밝기차이가 있어야 결 분리가 일어나는지, 또한 어느 정도의 대비성의 차이가 있어야 결 분리가 일어나는지를 정신물리학 실험을 통하여 연구할 수 있게 된다(그림 2, 3).

본 연구에서 밝히고자 하는 연구질문은 다음의 세 가지이다. 첫째는 구성된 결 자극공간에 몇 개의 결 처리기제가 관여하는 지에 관한 것이다. 가장 쉽게 생각할 수 있는 것은 이에 관여하는 기제가 하나라고 가정할 수 있다. 이 유일한 기제가 결 자극의 밝기차이와 대비성의 차이정보를 동시에 처리할 수 있다고

가정한다면, 유클리드 공간에서는 결 분리를 전혀 하지 못하는 결 자극 쌍을 이루는 축이 나타나게 될 것이다. 예를 들면 결의 밝기차이만을 탐지하는 기제는 결의 밝기는 같지만 대비성의 차이가 있는 결의 쌍을 탐지해 내지 못할 것이다. 이때 결의 대비성 축은 결 분리가 전혀 가능하지 않은 소위 맹방향(盲方向)이 될 것이다. 또한 이 기제가 90도 회전하여 결의 대비성 정보만을 처리한다면, 결의 밝기 축이 맹방향이 될 것이다. 그러므로 맹방향의 존재는 단일 기제의 가능성을 시사한다. 둘째는 밝혀진 결 처리기제가 결 자극의 어떤 측면에 민감한지에 대한 것이다. 첫 번째 연구문제에서 제기한 대로 하나의 기제만이 관여한다면 결 자극의 어떤 정보에 가장 민감하며, 어떤 측면에 가장 둔감한지를 알아낼 수 있을 것이다. 셋째는 만약 둘 이상의 결 처리기제가 관여한다면, 기제들로부터 나온 정보를 통합하는 방식과 이에 관여된 기제의 수를 밝혀내는 것이다.

결 자극

IID 결을 구성하기 위해서는 확률 분포를 수학적으로 정의하는 것이 필요하다. 확률 분포는 실수행렬로 나타낼 수 있지만, 계수를 포함하는 수식이 이 연구의 정신 물리학적 특성을 잘 나타낼 수 있다.

V 를 흑색(0.5 cd/m²)에서 백색(17.0 cd/m²)으로, 직선적으로 점차 증가하는 16개의 회색 밝기 강도의 집합이라고 하자. 그리고 V 에 대한 모든 확률 분포 p 로 정의하는데, p 는 다음과 같이 정의된다: 어떤 $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ 에 대하여, $p(v) = \frac{1}{16} + \alpha v + \beta v^2$. 이 조건을 만족하는 p 에 대하여, I_p 를 8.7분의 시각각도를 가진 정사각형의 결 요소로 이루어진 결이라고 정의한다. 이는 같은 크기로 구성된 타일 모자이크(tile mosaic)라고 생각할 수 있을 것이다. 결 요소의 밝기강도는 확률분포 p 를 따르는 서로 독립적이고 동일하게 분포된 무선허률변수이다. texture(Ω)를 그러한 결 I_p 의 전체집합으로 정의한다.

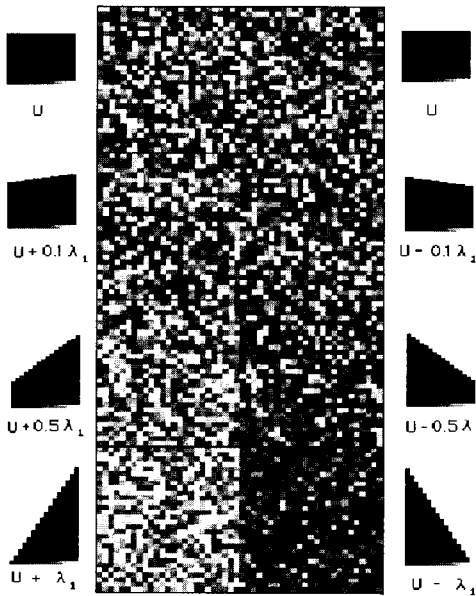


그림 2. 확률분포 조절자 (λ_1)의 계수를 증가시키에 따라 결 분리가 분명히 나타나는 일련의 결 자극들. 계수가 정적으로 커질수록 결이 밝아지고, 부적으로 커질수록 결이 어두워진다. 결의 쌍에서 계수의 절댓값은 같으므로, 결 분리가 일어나는 계수의 절댓값을 측정할 수 있다.

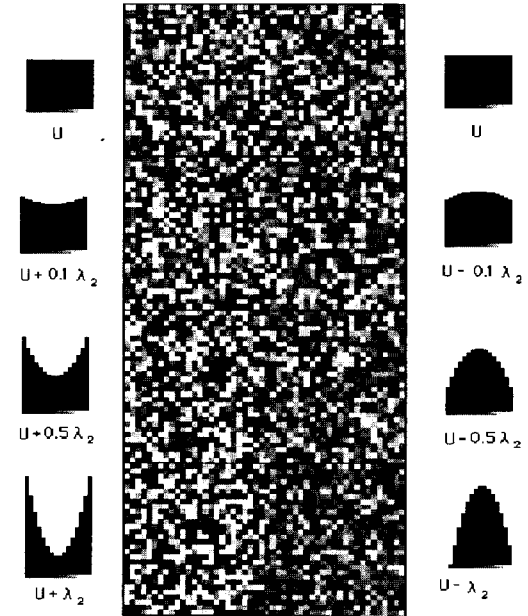


그림 3. 확률분포 조절자 (λ_2)의 계수를 증가시키에 따라 결 분리가 분명히 나타나는 일련의 결 자극들. 계수가 정적으로 커질수록 결의 대비성이 높아지고(결 요소의 이질(異質)성이 커짐), 부적으로 커질수록 결의 대비성이 낮아진다(동질(同質)성이 커짐). 결의 쌍에서 계수의 절댓값은 같으므로, 결 분리가 일어나는 계수의 절댓값을 측정할 수 있다.

이제 U 를 V 에 대한 균등분포로 정의한다. 즉

$$U(v) = \frac{1}{16}, \forall v \in V. \quad \text{덧붙여,}$$

$$\lambda_1(v) = \frac{1}{120}(v-7.5),$$

$\lambda_2(v) = \frac{1}{560}(v^2-15v+35)$ 로 정의하자. 이 세 종류의 함수는 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

(i) 서로 직교적(orthogonal)이다: 즉

$$U \cdot \lambda_1 = U \cdot \lambda_2 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 = 0 \quad (1)$$

(ii) $U + \lambda_1$ 와 $U + \lambda_2$ 는 확률분포(probability distribution)이다. 환언하면,

$$\sum_{v=0}^{15} (U + \lambda_1) = \sum_{v=0}^{15} (U + \lambda_2) = 1$$

$$U(v) + \lambda_1(v) \geq 0, \forall v \in V \text{ 와}$$

$$U(v) + \lambda_2(v) \geq 0, \forall v \in V \text{ 이다.} \quad (2)$$

여기서 λ_1 과 λ_2 는 U 의 조절자(modulator)라고 부른다. 조절자란 의미는 확률분포가 되기 위한 필요 조건¹⁾을 위배하지 않으면서 확률분포의 형태를 다르게 변형시킨다는 것이다.

(iii) 각 λ_1 과 λ_2 는 가역적(reversible)인데, 왜냐하면 $U - \lambda_1$ 와 $U - \lambda_2$ 도 또한 확률분포이다. 환언하면,

$$\sum_{v=0}^{15} (U - \lambda_1) = \sum_{v=0}^{15} (U - \lambda_2) = 1$$

$$U(v) - \lambda_1(v) \geq 0, \forall v \in V \text{ 와}$$

$$U(v) - \lambda_2(v) \geq 0, \forall v \in V \text{ 이다.} \quad (3)$$

(iv) 마지막으로 λ_1 과 λ_2 은 최대형(maximal)인데, 만일 $A\lambda_1$ 과 $A\lambda_2$ 가 $A > 1$ 이면, λ_1 과 λ_2 은 U 의 조절자로서의 조건을 상실하는데, 왜냐하면 어떤 경우는 음의 발생확률을 갖게 되기 때문이다.

다음은 U , λ_1 과 λ_2 을 이용하여 구성된 결 공간상에 존재하는 확률분포를 설명하기 위한 것이다.

α 와 β 를 0과 1사이의 실수라고 하자. 또한

$X_{U+\lambda_1}$, $X_{U+\lambda_2}$ 과 X_U 를 각 침자에 따라 분포된 확률에 따르는 V 값을 가지는 무선변인이라고 하자. 여기서 새로운 무선확률변수 Y 를 다음과 같이 정의한다.

$$Y = \begin{cases} X_{U+\lambda_1}, & \text{확률 } \alpha\beta \\ X_{U+\lambda_2}, & \text{확률 } \alpha(1-\beta) \\ X_U, & \text{나머지 경우} \end{cases} \quad (4)$$

어떤 $v \in V$ 에 대하여, $Y = v$ 인 확률은

$$\alpha\beta (U(v) + \lambda_1(v)) + \alpha(1-\beta)(U(v) + \lambda_2(v)) + (1-\alpha)U(v)$$

와 동일하다. 다시 이 식을 정리하면 $[U + \alpha(\beta\lambda_1 + (1-\beta)\lambda_2)](v)$ 와 같다. 이는 결 $I_{U+\lambda_1}$, $I_{U+\lambda_2}$, I_U 를 $\alpha\beta$, $\alpha(1-\beta)$, $(1-\alpha)$ 의 비율로 각각 조합하면 IID 결 $I_{U+\alpha(\beta\lambda_1+(1-\beta)\lambda_2)}$ 를 만들어낼 수 있다는 유용한 사실을 제공한다. 상세하게 설명하자면 각 결 요소 τ 에 대하여, 정의하면,

$$I_{U+\alpha(\beta\lambda_1+(1-\beta)\lambda_2)}(\tau) = \begin{cases} I_{U+\lambda_1}(\tau), & \text{확률 } \alpha\beta \\ I_{U+\lambda_2}(\tau), & \text{확률 } \alpha(1-\beta) \\ I_U(\tau), & \text{확률 } (1-\alpha) \end{cases} \quad (5)$$

유사한 방식으로 결 $I_{U+\alpha\beta\lambda_1-(1-\beta)\lambda_2}$, $I_{U-\alpha(\beta\lambda_1+(1-\beta)\lambda_2)}$ 와 $I_{U-\alpha\beta\lambda_1-(1-\beta)\lambda_2}$ 를 적절한 비율의 I_U , I_{λ_1} 와 I_{λ_2} 를 사용하여 생성할 수 있다.

$$I_{U+\alpha\beta\lambda_1-(1-\beta)\lambda_2}(\tau) = \begin{cases} I_{U+\lambda_1}(\tau), & \text{확률 } \alpha\beta \\ I_{U-\lambda_2}(\tau), & \text{확률 } \alpha(1-\beta) \\ I_U(\tau), & \text{확률 } (1-\alpha) \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{U-\alpha(\beta\lambda_1+(1-\beta)\lambda_2)}(\tau) = \begin{cases} I_{U-\lambda_1}(\tau), & \text{확률 } \alpha\beta \\ I_{U-\lambda_2}(\tau), & \text{확률 } \alpha(1-\beta) \\ I_U(\tau), & \text{확률 } (1-\alpha) \end{cases} \quad (7)$$

$$I_{U-\alpha\beta\lambda_1-(1-\beta)\lambda_2}(\tau) = \begin{cases} I_{U-\lambda_1}(\tau), & \text{확률 } \alpha\beta \\ I_{U+\lambda_2}(\tau), & \text{확률 } \alpha(1-\beta) \\ I_U(\tau), & \text{확률 } (1-\alpha) \end{cases} \quad (8)$$

1) 모든 경우의 발생 확률을 합할 경우 1이 되어야 하며, 어떤 경우도 음의 발생 확률일 수는 없다.

그림 4는 공식 (5), (6), (7)과 (8)을 사용하여 생성된 IID 결 자극공간의 영역을 나타내 주고 있다. 마름모꼴의 정점(頂點)에는 확률분포 $U + \lambda_2$ 가 있으며, 저점(低點)에는 $U - \lambda_2$ 가 있다. 오른쪽 모서리에는 $U + \lambda_1$ 가 있으며, 왼쪽 모서리에는 $U - \lambda_1$ 가 있다. 원점에는 확률분포 U 가 있다. 0과 1사이의 실수 β 에 대하여, 확률분포 p_1 로부터 p_2 로 직선으로 이으면, 이 직선상의 확률분포는 $\beta p_1 + (1 - \beta) p_2$ 가 된다. 그러므로 이 마름모꼴의 공간상에서 결 I_{p_1} 을 β 의 확률로 I_{p_2} 을 $1 - \beta$ 의 확률로 섞어만들면, $I_{\beta p_1 + (1 - \beta) p_2}$ 가 된다. 그러므로 이 공간상에서 정점과 오른쪽 모서리를 잇는 확률분포는 $\beta(U - \lambda_1) + (1 - \beta)(U + \lambda_1) = U + \beta\lambda_1 + (1 - \beta)\lambda_2$ 이며, 원점에서 이 지점에 이르는 직선 방향으로 α 거리 상에 있는 확률분포는 $\alpha(U + \beta\lambda_1 + (1 - \beta)\lambda_2) + (1 - \alpha)U = U + \alpha(\beta\lambda_1 + (1 - \beta)\lambda_2)$ 가 된다. 여기서 α 는 정신물리학적 측정에서 대단히 중요한 계수가 된다.

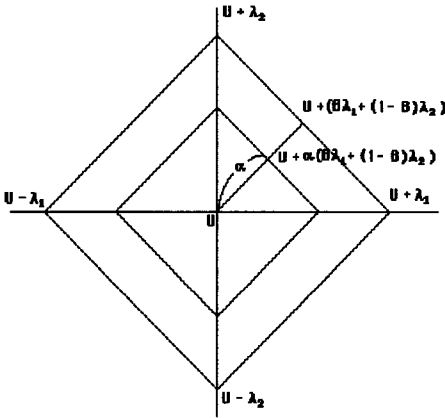


그림 4. 평균밝기와 분산이 축으로 구성된 결 공간. 원점은 U 로 표시되어 있다. α 는 원점에서의 상대적 거리로써 최대값은 1이며, 외곽 마름모꼴로 나타나 있다. β 는 0에서 1까지 변한다.

그림 5는 그림 3에서의 확률분포에 대응하는 IID 결 자극 공간을 보여주고 있다. 이 공간에서 결은 위에서 아래로 대비성 정도가 점차적으로 줄어들고 있으며, 오른쪽에서 왼쪽으로 밝기가 점차 어두워지고 있다.

검증모형

여기서 texture(Ω)내의 분리과정이 두개의 독립적인 채널 T_1 과 T_2 를 통해 설명될 수 있는지를 알아보려고 하였다. 우리가 검증하고자 하는 특정한 가설은 다음의 정의를 사용하여 쉽게 공식화 할 수 있다. V 의 실수 함수 f , 그리고 texture(Ω)에 속하는 IID 결 I_p 와 I_q 에 대하여,

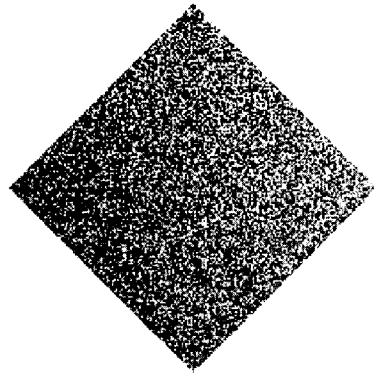


그림 5. IID 결 공간. 세로축은 분산을, 가로축은 평균을 나타낸다. 상하방향으로 고 분산에서 저 분산으로, 좌우방향으로 저 평균에서 고 평균으로 진행된다.

$$D_{p,q}(f) = \frac{[I_p \text{의 결 요소에 적용한 함수 } f] - [I_q \text{의 결 요소에 적용한 함수 } f]}{\dots} \quad (9)$$

여기서 공간합(spatial summation)이란 I_p 와 I_q 에 똑같이 한정된 개수의 결 요소에 대하여 부과된 가중치로 이해될 수 있다. 일반적으로 $D_{p,q}(f)$ 는 무선변인이 된다. 공간합에 이용되는 결 요소의 개수가 충분히 크다면, 중심극한정리(central limit theorem)에 의해서 $D_{p,q}(f)$ 는 대략 정상분포를 따를 것이고, 이것이 사실이라고 가정한다.

그림 6과 그림 7에서 보면, 결 공간(그림 5)에서 표집한 한 벌의 결이 서로 분리될 수 있음을 볼 수 있다. 만일 그러하다면, 여기에는 적어도 두개의 결 분리 기제가 필요하다는 것이 명백해진다. 두개의 기제를 가진 모델이 가장 우선적으로 고려된 것이다. 만일 한 기제가 실험에서 얻은 자료를 설명하는데 필요하지 않게 되면, 쉽게 단 하나의 기제를 가진 모델로 변형시킬 수 있을 것이다.

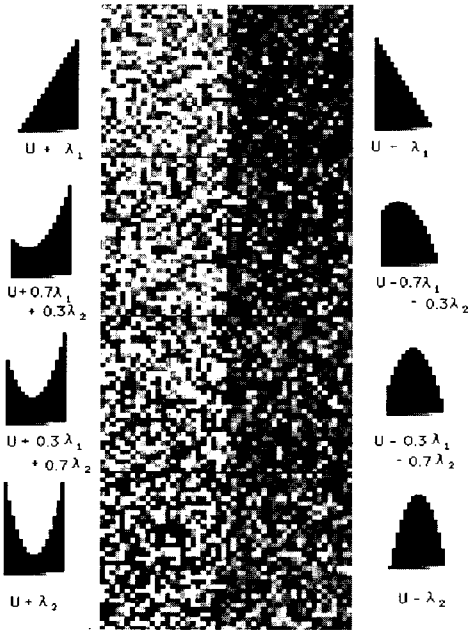


그림 6. IID 결 공간상에서 최대로 조절된 확률분포를 갖는 한 짝의 결 모입. 왼편의 결은 공간상의 제 1 사분면에서, 오른편은 제 3 사분면에서 얻은 것이다.

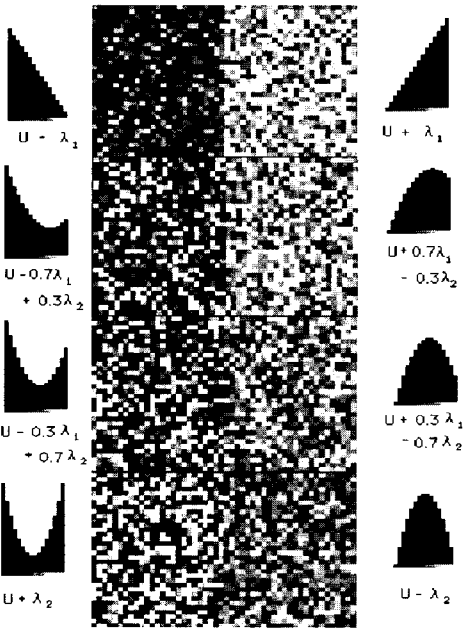


그림 7. IID 결 공간상에서 최대로 조절된 확률분포를 갖는 한 짝의 결 모입. 왼편의 결은 공간상의 제 2 사분면에서, 오른편은 제 4 사분면에서 얻은 것이다.

연구문제는 다음과 같다: 집합 texture(Ω)의 원소 IID 결, I_b 와 I_q 에 대하여 다음에 제시하는 조건들(1~4)이 유지된다면, V 에 대한 실수 함수 f 와 g 로 특징 지워지는 채널 T_1 과 T_2 가 존재하는가?

1. T_1 이 결 I_b 와 I_q 의 경계를 탐지하는 확률은 $D_{p,q}(f)$ 가 가정하는 값의 확률에 따르는 단조 증가하는 함수이다.
2. T_2 가 결 I_b 와 I_q 의 경계를 탐지하는 확률은 $D_{p,q}(g)$ 가 가정하는 값의 확률에 따르는 단조 증가하는 함수이다.
3. T_1 이 결 I_b 와 I_q 의 경계를 탐지하는 확률과 T_2 가 결 I_b 와 I_q 의 경계를 탐지하는 확률은 서로 독립적이다.
4. 실험 참가자는 T_1 또는 T_2 중 적어도 하나가 결 I_b 와 I_q 의 경계를 탐지하면, 결 경계를 탐지한다.

이와 관련하여 Chubb, Econopouly와 Landy (1994)는 위의 조건 1과 2가 성립하면, 어떤 가역적인 조절자 ϕ 에 대하여, T_1 이 $I_{U+\phi}$ 와 $I_{U-\phi}$ 의 경계를 탐지할 확률 $P_1(\phi)$ 은 $f \cdot \phi$ 의 엄격한 의미의 증가함수라고 밝혔다. $f \cdot \phi$ 는 다음과 같이 정의된다:

$$f \cdot \phi = \sum_{v \in V} f(v)\phi(v).$$

유사하게 T_2 이 $I_{U+\phi}$ 와 $I_{U-\phi}$ 의 경계를 탐지할 확률 $P_2(\phi)$ 또한 $g \cdot \phi$ 의 엄격한 의미의 증가함수이다. 계산상의 편리함을 고려하여 $P_1(\phi)$ 와 $P_2(\phi)$ 가 $f \cdot \phi$ 와 $g \cdot \phi$ 각각의 Weibull 함수라고 가정한다. 즉 중심 변수 S_1 과 S_2 , 그리고 기울기 변수 K_1 과 K_2 에 대하여, 다음과 같이 공식화 할 수 있다.

$$P_1 = 1 - 2^{- (S_1 f \cdot \phi)^{K_1}} \text{ 과}$$

$$P_2 = 1 - 2^{- (S_2 g \cdot \phi)^{K_2}}$$

마지막으로 조건 3과 4에 따라서 $I_{U+\phi}$ 와 $I_{U-\phi}$ 의 경계를 탐지할 확률은 확률 총합에 의해서 결정되어진다:

$$P_{\text{탐지}}(\phi) = 1 - (1 - P_1(\phi))(1 - P_2(\phi)) \tag{10}$$

$$= 1 - 2^{- (S_1 f \cdot \phi)^{K_1} - (S_2 g \cdot \phi)^{K_2}}$$

여기서 이 연구에서 사용된 모든 조절자는 λ_1 과 λ_2 의 선형조합이므로 $P_{\text{탐지}}(\phi)$ 의 계산에 효과적으로 들어가는 f 의 부분은 λ_1 과 λ_2 에 투영된 f 이다. 그러므로 $\phi = C\lambda_1 + D\lambda_2$ 라고 가정하면, 길이 L_f 와 각도 θ_f 를 지닌 벡터에 대해서 이 투영은

$L_f \cos(\theta_f) + L_f \sin(\theta_f)$ 으로 얻어진다. 그러므로

$$f \cdot \phi = L_f [\lambda_1 \cdot \lambda_1 C \cos(\theta_f) + \lambda_2 \cdot \lambda_2 D \sin(\theta_f)]$$

이다. 유사한 방식으로 길이 L_g 와 각도 θ_g 를 지닌 벡터에 대해서 이 투영은 $L_g \cos(\theta_g) + L_g \sin(\theta_g)$ 으로 얻어진다. 그러므로

$$g \cdot \phi = L_g [\lambda_1 \cdot \lambda_1 C \cos(\theta_g) + \lambda_2 \cdot \lambda_2 D \sin(\theta_g)]$$

이다. 여기서 $L_f \lambda_1 \cdot \lambda_1$, $L_f \lambda_2 \cdot \lambda_2$, $L_g \lambda_1 \cdot \lambda_1$ 와 $L_g \lambda_2 \cdot \lambda_2$ 는 모두 양수이므로, 수식 (10)에서 중심화(centering) 변수 S_1 과 S_2 에 흡수될 수 있다. 그러므로 검증해야할 최종적인 모델은 다음과 같다.

$$P_{\text{합치}}(\phi) = 1 - 2 \begin{bmatrix} -S_1 (C \cos(\theta) + D \sin(\theta))^{K_1} \\ -S_2 (C \cos(\theta_g) + D \sin(\theta_g))^{K_2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

따라서 모델은 S_1 , S_2 , K_1 , K_2 , θ_f 와 θ_g 의 6개의 변수를 가지고 있다.

방법

피험자 : 두 명이 실험에 참가하였다. 한 명은 시력이 교정된 연구자 자신이었으며, 다른 한 명은 정신물리학 실험에 익숙한 정상시력의 관찰자였다.

자극 및 장치 : 실험의 전과정은 매킨토시사의 애플 24 그래픽스 어댑터(Apple 24 Graphics Adaptor)를 장착한 애플 쿼드라 800(Apple Quadra 800)을 사용하여 통제되었다. 결 자극은 매킨토시 컬러 모니터 (애플 고해상도 RGB 모니터)에 제시되었다. 회색강도에 대한 단계는 직선성(linearity)을 유지할 수 있게 별도의 절차²⁾를 사용하여 정해졌으며

- 2) 회색강도의 직선성은 다음과 같은 절차로 얻어졌다. 세 개의 회색강도 (L_{hi} , L_{mid} , L_{low})를 포함하는 규칙적인 결 무늬에 대한 판단을 하도록 요구한다. 세 개의 회색강도는 전체 면적에서 L_{hi} 와 L_{low} 는 각각 25%씩이고, L_{mid} 는 50%를 차지하게 된다(그림 8). 세로 줄무늬의 모양으로 분리되는 결에서 한 단편은 50%의 L_{mid} 와 각각 25%씩의 L_{hi} 와 L_{low} 로 이루어져 있고, 다른 단편은 각각 50%씩의 L_{hi} 와 L_{low} 로 이루어져 있다. 이와 같은 자극화면을 충분히 먼 거리에서 관찰하게되면, 결의 요소들은 거의 확인되지 않으며, 오로지 결의 평균밝기에 의해서만 결 분리가 일어나게 된다. L_{mid} 를 이러한 경계가 사라지도록 강도를 조절하고, 경계가 사라졌을 때 회색강도를 L_{hi} 와 L_{low} 의 중간강도로 지정하게 된다. 이러한 절차를 다양한 L_{hi} 와 L_{low} 를 사용하

그 중 일부(16 단계)만이 실험에 사용되었다. 결 요소로 사용될 회색의 밝기 범위는 가장 어두운 회색(0.5 cd/m²)에서 가장 밝은 회색(17.0 cd/m²)까지 16 단계로 나누었다. 결 자극을 이루는 결 요소 하나의 시각은 8.7이었다. 결 자극은 가로 50열과 세로 50줄의 결 자극요소로 구성되었다. 결 자극은 시행에 따라서 가로 방향, 또는 세로 방향으로 2 주기의 격자 파형을 포함하였는데(그림 9), 시각도당 0.26 주기였다. 화면까지의 거리는 60cm를 유지하도록 하였다.

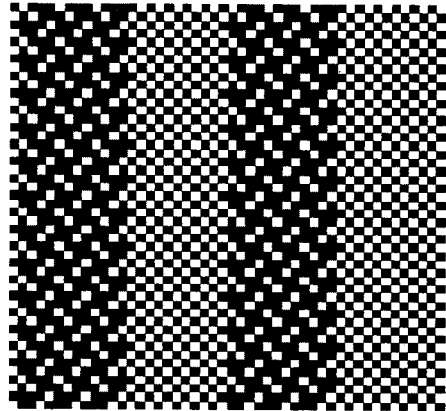


그림 8. 회색강도의 직선화에 사용된 자극형태. L_{mid} 는

L_{hi} 와 L_{low} 의 중간에 설정된다. 만일 설정이 올바르게 정해지면, 영역 전체가 동질의 영역으로 보이게 된다.

절차 : 실험은 불빛이 없는 암실에서 행해졌다. 피험자는 자극이 제시되는 모니터에서 60cm 떨어져 관찰하도록 하였다. 모든 자극의 평균 밝기는 8.8 cd/m²였으며, 16개의 결 요소의 밝기는 $1.1i + 0.5$ cd/m², $i = 0.1, \dots, 15$ 였다. 자극은 두개의 결 자극이 번갈아 나타나면서 격자 파형이 2 주기가 되고 그 영역의 반을 차지하도록 하였다. 두개의 결 자극은 $I_{U+\alpha(\beta\lambda_1 + \gamma(1-\beta)\lambda_2)}$ 과 $I_{U-\alpha(\beta\lambda_1 + \gamma(1-\beta)\lambda_2)}$ 인데, γ 가 -1 또는 1의 두 값 중의 하나로 결정되고, β 의 값은 0에서 1까지 0.1 단위로 변화하였다. 따라서 두개의 γ

여, 가능한 전 회색강도에서 L_{mid} 을 결정했을 때, 완성된 표를 룩업 테이블(lookup table)라고 부른다. 이 표를 완성한 후에 필요한 수만큼의 회색을 추출해서 실험에 사용하게 된다.

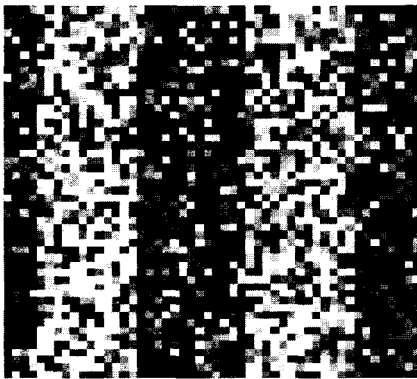
값과 10개의 β 의 값으로 모두 20개의 조합을 만들어 내었으며, 이는 IID 공간상에서 모두 20개의 방사선 방향으로 배치되었다. 이때 매 시행마다 사각 파형의 방향이 무선적으로 바뀌며, 피험자는 이 방향을 2AFC 방법에 따라 수평방향인지, 수직방향인지를 판단하도록 하였다. 정신물리학 측정방법인 계단법(staircase method) 두 개를 한 조가 되도록 하였다. 하나는 71% 정확 수준에 접근하도록 되어있었으며, 다른 하나는 79% 정확 수준에 접근하도록 구성되어 있었다. 따라서 모두 40개의 계단법이 동시에 사용되었다. 각 방향에 대하여 계단법 종류(71% 또는 79%)에 상관없이 전체적으로 300회의 시행이 실시되어졌다. 각 실험 참가자는 6000회의 관찰을 자신

의 집중력에 따라 300 ~ 600회의 작은 단위로 나누어 수행하였다. 각 시행은 다음과 같이 구성되어 있었다. 평균 밝기의 회색 화면 중앙에 결 자극이 제시되고 250msec 후에 사라졌다. 피험자는 제시된 결 자극의 분리방향이 가로였는지, 세로였는지를 판단하여 반응하도록 되었다. 반응 후에 판단이 옳았는지에 대한 피드백이 주어졌다. 반응의 정확성은 계단법(staircase method)에 따라 다음 번에 제시될 자극 쌍을 생성해내는 매개변수 α 를 변화시키는데 사용되었다.

결과

그림 10에 제시된 좌표 (x, y) 는 피험자에게 제시한 결 자극 쌍 $I_{U+(x\lambda_1+y\lambda_2)}$ 와 $I_{U-(x\lambda_1+y\lambda_2)}$ 의 정보를 나타내 준다. 즉 x 는 자극 쌍의 평균차이를 나타내 주고, y 는 자극 쌍의 분산차이를 나타내 준다. x 와 y 가 부호가 같을 경우는 자극 쌍이 한쪽은 평균이 낮고 분산도 작게 구성되고, 다른 쪽은 평균이 높고 분산도 크게 구성되었다는 것을 말한다. 부호가 다를 경우는 자극 쌍이 한쪽은 평균이 낮고 분산은 크게 구성되고, 다른 쪽은 평균이 높고 분산은 작게 구성되었다는 것을 말한다. 각 점선을 따라서 정신물리학 함수가 구해질 수가 있다. 최대 우도(maximum likelihood) 절차를 따라서 Weibull 함수에 자료들이 적합하도록 매개변수를 구해내었다. 모두 20개의 정신물리학 함수가 구해졌다. 따라서 40개의 매개변수로서 결 공간에서의 얻어진 자료를 설명해낼 수 있게 되었다. 이러한 40개의 매개변수로서 구성된 모델이 제시하는 기대 확률을 $P_{\text{우도}}$ 이라고 하자.

다음은 같은 최대 우도 절차를 따라서 6개의 매개변수로서 구성된 모형이 모든 자료들을 설명할 수 있는지를 시도하였다. 수식 (III)로 표현되는 모델에 따라 각 실험 참가자에 대한 변수가 구해졌다(표 1). 6개의 매개변수로서 구성된 모델이 제시하는 기대 확률을 $P_{\text{제한}}$ 이라고 하자. 그림 11은 이 절차에서 얻어진 것이다. 두 모델의 설명력을 비교하기 위하여 Wilks가 기술한 우도 검증(likelihood test) 방법을 사용하였다(Hole, Port와 Stone, 1971). X 를 자료가 수집된 자극공간상의 점들의 집합이라고 하자. X 에 속한 각 점 (x, y) 에 대하여 $N(x, y)$ 를 피험자가 관찰한 회수로 $k(x, y)$ 를 옮겨 판단한 회수로 정의하면, X 에 속한 점들에 대하여 확률을 배정하는 어떤 함수에 대하여, 즉 어떤 모델에 대하여, 모델의 우도란 모형이 사실이라는 가정 하에 얻어진 자료의 확률이다:



(a)



(b)

그림 9. 자극 예. (a) 횡 방향의 IID 결($I_{U+\lambda_1}$ 과 $I_{U-\lambda_1}$) 사각 파형. (b) 종 방향의 IID 결($I_{U+\lambda_2}$ 과 $I_{U-\lambda_2}$) 사각 파형.

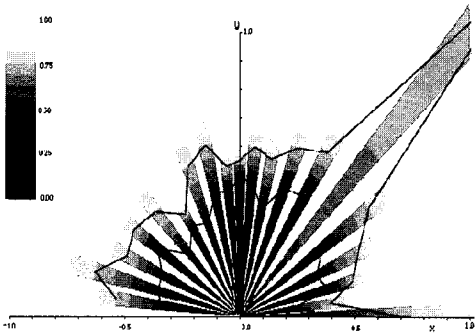


그림 10. 피험자 JN에 대한 $P_{\text{제한}}$ 이 예측한 정확 결 분리 확률. 방사선 방향의 회색막대는 측정된 결 분리 방향을 나타낸다. 한 지점의 회색막대는 왼쪽에 있는 세로 회색막대에 상응하여 정확 결 분리 확률을 나타낸다. 안쪽 선은 각 방향에서의 50% 탐지지점을 이은 것이고, 바깥쪽 선은 75% 탐지 지점을 이은 것이다.

피험자	추정 함수	방향 Rad(degree)	α	β
JN	f_{JN}	0.054 (3.1°)	0.17	1.2
	g_{JN}	1.83 (104.9°)	0.23	2.9
JM	f_{JM}	0.35 (20.2°)	0.15	2.6
	g_{JM}	2.30 (132.03°)	0.22	2.9

표 1. 6개의 변수를 가진 제한 모델에서 얻은 변수값들

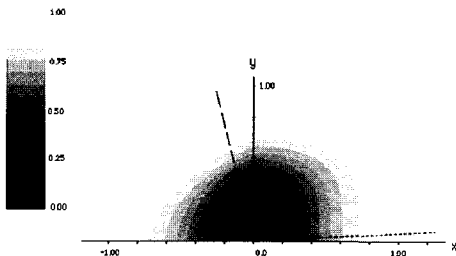


그림 11. 피험자 JN으로부터 얻은 $P_{\text{제한}}$ 이 예측한 정확 결 분리 확률. 왼쪽의 세로 회색막대는 좌표 상에 상응하는 확률을 나타낸다. 좌표에 나타난 두 점 선은 모델에서 밝혀낸 기제가 가장 민감한 방향을 나타낸다.

$$A[P] = \prod(P(x,y))^{k(x,y)}(1-P(x,y))^{N(x,y)-k(x,y)}$$

Wilks의 공리에 따르면 한 모델 P_1 이 다른 모델 P_2 의 진정한 의미에서의 부분집합일 때, 다음 값 $-2 \log_e \left[\frac{A[P_1]}{A[P_2]} \right]$ 은 두 모델이 가진 매개변수의 수의 차이를 자유도로 하는 카이제곱 분포를 따른다는 것이다.

$$\varepsilon = -2 \log_e \left[\frac{A[P_{\text{제한}}]}{A[P_{\text{무제한}}]} \right]$$

ε 는 $\chi^2_{40-6} = \chi^2_{36}$ 의 분포를 따라야만 한다. 하지만 본 연구에서는 Wilks의 공리에 적합한 모델을 세우지 못하였으므로, 부트스트랩(bootstrap)절차를 사용하여 얻어진 가능성 값이 확률분포에서 어디에 있는지를 알아내야 했다(Efron과 Tibshirani, 1993). 컴퓨터 모의 실험을 통하여 얻어진 비의 분포 상에서 실험으로 얻은 값 $\varepsilon_{\text{모의}}$ (= 25.21)을 비교하면, JN 으로부터 얻은 자료는 27 백분율(percentile)을 보이고 있다. 즉 두 모델이 서로 다르다고 할 수 없다는 검증 결과를 보이고 있다. 환언하면, 6개의 매개변수를 사용한 모델로도 자료를 잘 설명한다고 할 수 있다. 즉 적은 수의 매개변수로 똑같은 자료를 충분히 설명할 수 있다는 것이다. 또한 JM으로부터 얻은 자료($\varepsilon_{\text{모의}} = 33.68$)는 분포(그림 12) 상에서 JN의 자료보다는 높은 백분율을 보이고 있다(58.9 percentile). 그러나 여전히 $P_{\text{제한}}$ 과 $P_{\text{무제한}}$ 의 두 모델이 서로 다르다는 결론을 내리는 데는 실패하였다.

논의

본 연구에서 얻어진 자료는 IID 결 공간에서 결 분리를 하지 못하는 방향은 존재하지 않고 모든 방향에서 결 분리가 가능하였다. 이는 결의 평균값과 대비성으로 이루어진 결 공간에서 결 분리를 하는데는 적어도 두 개의 기제가 존재함을 시사하는 바이다. 또한 모델 검증결과는 결 요소의 확률분포를 평균과 분산의 차원에서 변화시킨 결 공간에서 결 분리를 가능케 하는데 단 두 개의 기제가 필요함이 밝혀졌다. 그리고 이 두 기제에서 제공된 정보는 확률 덧셈 원리에 따라서 결합되어진다고 보여졌다.

밝혀진 각 기제는 서로 다른 결 자극의 속성에 민감한데, 그 하나는 여러 연구에서 보여준 바와 같이, 결 자극의 밝기차원에 관여하는 기제이다. 이 것은 그림 12에 표시된 수평축에 근접한 선으로 표시되어 있다. 그러나 다른 기제는 결의 대비성 차원에 민감하기도 하지만, 결 자극의 밝기차원에도 관여하는 기

제로 밝혀졌다. 이 것은 좌상 쪽으로 기울어진 선으로 표시되어있다.

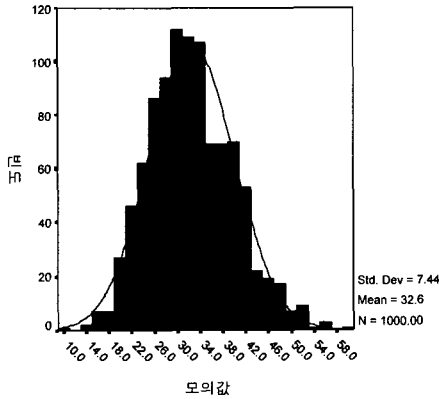


그림 12. 피험자 JM에 대한 도미의 분포. 1000회에 걸친 결과를 제시한 것이다.

그러나 순수하게 결 자극의 밝기차이만을 탐지하고, 대비성의 차이만을 탐지하는 기제를 상징하는 모델도 충분히 이 자료를 설명할 가능성을 생각할 수도 있다. 환언하면, 우리가 얻은 자료는 순수하게 결 자극의 밝기차이만을 탐지하고, 대비성의 차이만을 탐지하는 기제에 의해 설명될 가능성은 없는지를 알아볼 필요가 있다. 이 가능성을 검증하기 위해서, 다시 한번 우도 검증방법을 사용하였다. 모델에서 사용된 방향 변수를 고정시켰다. 즉 $P_{제한}$ 에서 $\theta_f = 0$ 그리고 $\theta_g = \frac{\pi}{2}$ 의 경우를 사용한다. 따라서 다음과 같은 모델이 된다: $\phi = C\lambda_1 + D\lambda_2$ 에 대하여

$$P_{검증}(\phi) = 1 - 2^{-(S_1 C)^{K_1} - (S_2 D)^{K_2}}$$

이 경우에는 $P_{제한}$ 에서 축의 변화를 담당하는 매개 변수를 고정해서, $P_{검증}$ 을 만들어냈기 때문에 Wilks가 제안한 정리에 부합한다. 그러므로

$$\mathcal{E} = -2 \log_e \left[\frac{\Lambda(P_{검증})}{\Lambda(P_{제한})} \right]$$

은 χ^2 의 분포를 따른다.

이 χ^2 검증은 피험자 JN의 경우, $\chi^2_{\frac{1}{2}} = 10.47$, $p < 0.01$ 이고, 피험자 JM의 경우, $\chi^2_{\frac{1}{2}} = 11.52$, $p < 0.01$ 이었으므로, 두 자료 모두에서 기각되었다. 그러므로 순수하게 결의 평균밝기에만 민감한 기제와 순수하게 결의 대비성에만 민감한 기제를 가정하는 모델과 본 모델은 상이한 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서 밝혀진, 결 자극의 밝기와 대비성 처

리에 동시에 관여하는 기제의 반응 특성을 고려해보면, 반정류 기제(half-wave rectifying mechanism)가 가능한 후보로 부각된다. 즉, 결 요소가 주변의 밝기보다 낮은 경우에 강하게 반응하는 부정 반정류 기제(negative half-wave rectifying mechanism)와 그 반대 방향으로 작용하는 정적 반정류 기제(positive half-wave rectifying mechanism)를 들 수 있는데, 본 연구에서 밝힌 바로는 부정 반정류 기제가 더 적합한 것으로 보인다. 이 기제는 자극의 다른 연구에서도 발견되고 있다. 결의 대비성을 직접 판단하게 했던 연구에서 이 기제가 작용함을 시사하는 결과를 보였다(Chubb & Nam, 1998; Nam & Chubb, 1998).

이와 같은 기제가 결 자극처리 뿐만 아니라 다른 시각과정에 공통적으로 작용하리라고 생각하기 쉽다. 만일 동일한 기제가 운동지각에도 관여한다면, 결의 밝기와 대비성 정보에 모두 민감한 기제의 역할이 관심의 대상이 된다. 자극내의 밝기차이가 제공하는 운동정보가 없는 상황에서 운동을 경험하는 경우를 2차 운동지각이라고 하며, 그 동안 활발하게 진행되어 왔다(Ledgeway 와 Smith, 1994; Johnston 과 Clifford, 1997). 2차 운동 연구에서 밝힌 바에 따르면, 밝기차이가 제공하는 정보에 의해 주관되는 1차 운동지각과정과 밝기차이가 제공하는 정보가 없으면서 운동지각을 가능하게 해주는 2차 운동지각 중에 결의 대비 정보만으로 생성되는 2차 운동지각과정은 서로에게 영향을 주고받지 않는 독립적인 기제로 밝혀졌다(Ledgeway 와 Smith, 1994). 그러나 본 연구에 따르면 독립적이지 않을 수 있다는 가능성을 제시하고 있다.

후속 연구에서는 이러한 차이를 보이는 연구들에 대한 분석과 1차 운동과 2차 운동의 독립성에 관여하는 요인에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

참고문헌

- 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., & 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.
- Caelli, T. (1985). Three processing characteristics of visual texture segmentation. *Spatial Vision*, 1, 19-30.
- Chubb, C. F., 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. F. & Nam, J-H (1998). Two Channels: One linear, one negative half-wave rectifying, explain much about texture and motion perception. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (suppl.)*, 39, 461.
- Efron, B., & Tibshirani, R. (1993). *An Introduction to the bootstrap*. New York: Chapman & Hill.
- Hoel, P. G., Port, S. C., & Stone, C. J. (1971). *Introduction to Statistical Theory*. Houghton Mifflin, MA:Boston.
- Johnston, A. & Clifford, C. W. G. (1997). Perceived motion of contrast-modulated gratings. *Vision Research*, 35, 1771-1783.
- Julesz, B. (1975). Experiments in the visual perception of texture. *Scientific American*, 232, 34-43.
- Ledgeway, T., & Smith, A. (1994). Evidence for Separate Motion-detecting Mechanisms First- and Second-order Motion in Human Vision. *Vision Research*, 34, 2727-2740.
- Nam, J-H & Chubb, C. F. (1998). Perceived texture contrast is determined by a negative half-wave rectifying mechanism. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (suppl.)*, 39, 649.