

# The properties and mechanism of probability cueing effect\*

Injae Hong<sup>1,2</sup>, Su Keun Jeong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Structure & Function of Neural network, Korea Brain Research Institute

<sup>2</sup>Department of Psychology, Yonsei University

Probability cueing effect refers to a spatial bias to a certain region where a target is frequently presented. It is thought to be one of the representative forms of incidental learning that shows the efficiency of human visual system. The probability cueing paradigm provides evidence for habitual attention, which cannot be explained by the top-down and bottom-up attention dichotomy. In the current review article, we examined the key properties of the probability cueing effect and suggested a simple model of probability learning. In addition, we propose a possible direction of neuroimaging studies to test the suggested model and to explore the neural mechanisms of probability cueing effect.

**Keywords:** probability cueing effect, visual search, statistical learning

1 차원고접수 18.07.09; 수정원고접수 19.01.28; 최종게재결정 19.01.29

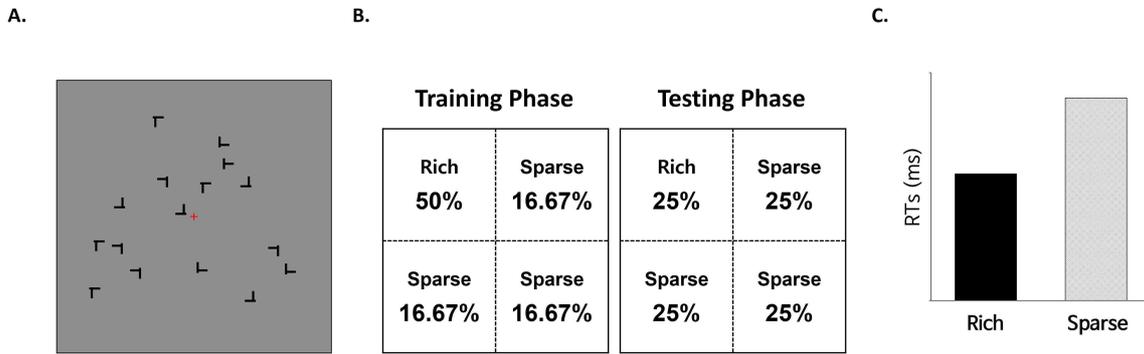
익숙한 환경에서 목표물을 탐색할 때, 우리는 목표물이 가장 있을 법한 장소로 먼저 향하곤 한다. 예를 들어, 교수가 대학원생을 찾을 때에는 운동장이 아닌 연구실로 먼저 향하고, 휴대폰을 찾을 때에는 냉장고를 열어보기보다는 책상 위를 살핀다. 이처럼 목표물이 출현할 확률이 높은 공간으로 공간 주의의 편향이 발생하는 것을 확률 단서 효과(probability cueing effect)라 한다(Druker & Anderson, 2010; Geng & Behrmann, 2002, 2005; Jiang, Swallow, Rosenbaum, & Herzig, 2013). 확률 단서 패러다임에서 참가자들은 방해 자극 가운데 목표 자극을 찾는 시각 탐색 과제(visual search task)를 수행한다(Figure 1A). 시각 탐색 공간을 몇 개의 영역으로 나누어 특정 영역에는 목표 자극이 빈번하게(“높은 확률” 또는 “Rich” 조건), 다른 영역에는 목표 자극이 드물게(“낮은 확률” 또는 “Sparse” 조건) 출현하도록 자극 출현 확률이 조작되며(Figure 1B), 참가자들은 이를 의식적으로 알지 못하지만 자극이 빈번하게 출현하던 영역에 목표 자극이

출현할 때 다른 영역에 출현할 때보다 빠르게 탐색하는 경향을 확인할 수 있다(Figure 1C; Jiang, Won, & Swallow, 2014; Won, Lee, & Jiang, 2015). 이는 암묵적으로 학습된 확률 분포에 대한 통계 지식을 이용해 목표 자극이 빈번하게 출현하는 영역으로 공간 주의를 우선적으로 이동시킬 수 있음을 의미한다. 확률 단서 효과는 확률 규칙을 습득하고자 하는 명시적 의도가 없고, 학습한 규칙을 의식하지 못하더라도 발생하는 우연 학습(incidental learning) 및 암묵 학습(implicit learning)의 일종이다.

확률 단서 효과 패러다임에서 목표 자극은 특정 영역에 빈번하게 출현하지만 영역 내에서의 구체적인 위치는 매 시행마다 서로 다를 수 있으며, 현재 시행의 목표 자극 및 방해 자극의 위치는 이전 시행의 자극 출현 위치와 독립적으로 결정된다. 따라서 참가자가 형성한 지식은 구체적이며 개별적인 사건들(각 목표 자극의 위치)이 아니라, 개별 사건의 누적을 통해 규칙성을 학습한 추상적인 확률 정보이다.

\* 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국뇌연구원 기관고유사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (19-BR-01-06 & IBS-R001-D1-2018-b01).

† 교신저자: 정수근, 한국뇌연구원 뇌신경망연구부, (41068) 대구광역시 동구 첨단로 61  
E-mail: skjeong@kbri.re.kr



**Figure 1.** A schematic illustration of the probability cueing paradigm. A. A sample search display of a trial. Participants perform a visual search task where they search for a target (T) among distractors (L). B. A sample probability distribution of the training phase (left) and the testing phase (right). The search display is divided into invisible quadrants and each quadrant has different probability of target appearance. During the training phase, the target appears at one of the quadrants with high probability (50%; “Rich” condition), and at remaining quadrants with low probability (16.67% each; “Sparse” condition). During the testing phase, the target appears at every quadrant with equal probability (25% each). C. An example result of probability cueing paradigm. If probability distribution is implicitly learned, reaction times (RTs) of the rich condition would be significantly faster than those of the sparse condition even in the testing phase, implying a spatial bias toward the quadrant with a high probability of target appearance.

확률 단서 효과 외에도 경험의 누적을 통해 시·공간적 규칙성을 추출하는 다양한 종류의 시각 통계 학습(visual statistical learning) 패러다임이 알려져 있다(Chun & Jiang, 1998; Fiser & Aslin, 2002; Turk-Browne, Jungé, & Scholl, 2005; Turk-Browne, Scholl, Chun, & Johnson, 2009). 대표적인 예로 공간 상의 통계적 관계성을 암묵적으로 학습하는 맥락 단서 효과(contextual cueing effect)를 들 수 있다. 맥락 단서 효과란 시각 탐색 시 방해 자극들의 배열이 목표 자극의 위치와 연합되어 반복 제시될 때, 방해 자극들의 배열에 의해 목표 자극의 위치로 공간 주의가 이동하는 것을 말한다(Chun, 2000; Jiang & Chun, 2001). 공간적인 규칙성을 암묵적으로 학습한다는 점에서 맥락 단서 효과는 확률 단서 효과와 유사해 보일 수 있다. 그러나 맥락 단서 효과는 발생하는 개별 사건에 대한 기억 흔적을 바탕으로 발생하기 때문에(Chun & Jiang, 1999),  $n$ 개의 반복적인 사건(목표 자극 위치와 방해 자극 배열 간의 연합)이 있다면  $n$ 개의 기억 표상을 형성하게 된다. 반면에 확률 단서 패러다임에서의 공간적 규칙성은 개별 사건이 아닌 실험 전반에 걸쳐 파악될 수 있기 때문에, 독립적인 개별 사건을 종합하여 형성된 한 개의 지식 표상(knowledge representation)에 의해 높은 확률 영역으로의 일반적인 주의 이동이 발생한다.

주의는 작동 원리에 따라 크게 하향적 주의(top-down attention)와 상향적 주의(bottom-up attention)로 구분되어 왔다. 수행하는 과제 목표나 가지고 있는 지식 등 참가자 내적인 요소에 의해 주의가 유도되는 것을 하향적 주의 이동이라 한다(Posner et al., 1982; Posner, Snyder, &

Davidson, 1980). 일반적인 시각 탐색 과제의 경우, 공간 작업기억(Oh & Kim, 2004; Woodman & Luck, 2004)이나 집행기능(Han & Kim, 2004) 부하의 영향을 받아 하향적 주의 자원을 이용하는 것으로 알려져 있다. 그러나 확률 단서 패러다임의 시각 탐색 과제는 일반적 시각 탐색과는 달리 작업기억 부하의 영향을 받지 않는다(Won & Jiang, 2015). 또한 하향적 주의 기능이 감퇴하는 노인군(Jiang, Koutstaal, & Twedell, 2016; Twedell, Koutstaal, & Jiang, 2017) 또는 파킨슨병 환자군(Sisk, Twedell, Koutstaal, Cooper, & Jiang, 2018)에게서도 유의한 확률 단서 효과가 발견되어 왔다. 따라서, 확률 단서 효과는 하향적 주의에 의한 현상으로 설명하기에는 한계가 존재한다. 한편, 자극의 현출성(salience)이나 갑작스러운 제시(abrupt onset)와 같이 참가자 외적인 요소에 의해 주의가 유도되는 것을 상향적 주의 이동이라 한다(Egeth & Yantis, 1997; Theeuwes, 1994, 2004). 확률 단서 효과는 자극 자체에 의해 발생하는 현상이 아니며, 공간 주의의 편향은 자극 자체가 아니라 자극이 나타날 법한 영역으로 이동한다는 점에서 상향적 주의에 의한 현상으로도 설명하기 어렵다. 따라서 확률 단서 효과에 관여하는 주의 자원은 하향적 주의와 상향적 주의의 이분법적인 구분에서 벗어나 논의되어야 할 것이다(Awh, Belopsky, & Theeuwes, 2012). 확률 단서 효과는 기존의 이분법적 주로 설명되지 않는 새로운 주의 자원에 대한 모델을 제시할 수 있는 유용한 패러다임이지만, 현재까지 연구된 바가 많지 않다. 특히 작동 메커니즘에 대한 설명을 제시할 수 있는 신경학적 연구는 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 개관에서는

기존의 이분법적인 상향적 및 하향적 주의 모델로 설명하기 어려운 확률 단서 효과를 높은 확률 영역으로 향하는 공간 주의의 반복적이며 습관적인 이동에 의해 발생하는 습관성 주의(habitual attention)로 보는 최근의 관점을 소개할 것이며, 이를 기반으로 한 확률 단서의 학습 원리 및 신경학적 기제에 대해 살펴보고자 한다.

### 확률 단서 효과에 의해 형성된 지식의 속성

확률 단서 패러다임에서 특정 영역에 목표 자극이 빈번하게 출현하면서 공간 주의 또한 해당 영역으로 빈번하게 이동하기 때문에 높은 확률 영역으로의 공간 주의의 편향이 단기적인 반복 점화(repetition priming)에 의해 발생할 가능성이 존재한다(Jiang, Won, Swallow, & Mussack, 2014; Maljkovic & Nakayama, 1996; Walthew & Gilchrist, 2006). 일례로, 시각 탐색 시 동일한 영역으로 주의 이동이 연속해서 일어나지 못하도록 통제된 경우 확률 단서 효과가 발생하지 않았다(Kabata & Matsumoto, 2012). 이는 반복 점화 효과가 장기적인 확률 단서 효과 형성에 관여하는 중요한 요소 중 하나임을 보여준다. 그러나 확률 단서 효과는 단기적인 반복 점화만으로는 설명되지 않으며, 암묵적으로 습득 및 공고화(consolidation)된 장기적인 지식을 필요로 한다. 이를 확인하기 위해 여러 연구에서는 특정 영역에 목표 자극이 빈번하게 나타나는 훈련회기 이후, 모든 영역에 목표 자극이 동일한 확률로 제시되는 검사회기를 추가하였고, 높은 확률 영역으로 공간 주의가 반복적으로 이동하는 경우를 통제된 이후에도 일관적인 확률 단서 효과를 확인할 수 있었다(Jiang & Swallow, 2014; Jiang, Swallow, & Capistrano, 2013; Jiang, Swallow, & Rosenbaum, 2013; Jiang, Swallow, Won, Cistera, & Rosenbaum, 2015; Won et al., 2015). 이는 확률 단서 효과가 학습에 의해 형성된 장기적 지식에 의한 것임을 보여주고 있다(Jiang, Won, & Swallow, 2014). 또한, 단기적인 반복 점화가 발생하더라도 확률 단서 효과가 발생하지 않는 경우도 있다. Kruijne과 Meeter(2015)의 연구에서는 정해진 색깔의 목표 자극을 탐색하는 시각 탐색 과제를 단독자 탐색 방식(singleton search mode) 및 결합 탐색 방식(conjunction search mode)에서 수행하였다. 목표 자극의 세부특징이 80%의 확률로 반복되는 편향 구획(bias block)에서 두 탐색 방식 모두 단기적인 점화 효과가 발견되었지만, 이러한 확률이 50%의 확률로 감소하는 중립 구획(neutral block)에서는 결합 탐색 방식에서만 장기적인 확률 학습이 관찰되었다. 이는 확률 단서 효과를

단기적인 반복 점화만으로 설명하기는 어려우며, 탐색 방식과 같은 다른 중요한 요소에 의해 장기적인 지식으로 형성된다는 것을 시사한다.

확률 단서 효과의 기반이 되는 장기적 지식 형성에는 주의 이동의 반복 여부뿐만 아니라 반복의 횟수 또한 영향을 미친다. 세부특징 탐색 시 과제와 무관한 세부특징이 반복되다가 변화하는 경우, 반복 횟수가 증가함에 따라 세부특징이 변화한 자극에 대한 탐색 반응속도가 점차 느려짐을 확인할 수 있다(Brascamp, Pels, & Kristjánsson, 2011). 이는 탐색 자극의 지각적 속성이 반복된 횟수가 탐색에 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 세부특징이 빈번하게 반복되는 것처럼 확률 단서 효과 패러다임에서 높은 확률 영역으로의 공간 주의 이동이 반복적으로 발생하는데, 이러한 학습된 경험의 양에 따라 확률 단서 효과의 크기도 달라진다. 대개의 확률 단서 패러다임에서는 높은 확률 영역과 낮은 확률 영역의 목표 자극 출현 비율을 3:1로 설정하지만, 높은 확률 영역과 낮은 확률 영역의 목표 자극 출현 비율이 2:1로 감소하더라도 유의한 확률 단서 효과가 반복적으로 발견되었다(Hong, Jeong, & Kim, 2018). 또한 목표 자극의 출현확률을 위치에 따라 42:25:25:8로 조작하거나(Ferrante et al., 2017) 자극의 속성에 따라 60:30:10으로 조작한 연구(Schwark & Dolgov, 2013)에서도 마찬가지로 확률 비율에 상응하여 공간 주의의 편향 정도가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 특정 위치에서 목표 자극 탐색에 성공 시 해당 위치로의 공간 주의 이동은 강화(reinforcement)되는데(Jiang, Swallow, & Capistrano, 2013), 높은 확률 영역의 목표 자극 출현 확률이 높을수록 강화 또한 높은 빈도로 발생한다. 목표 자극 출현 확률이 높아질수록 높은 확률 영역으로의 공간 주의 이동의 연속된 시행 간 반복 횟수도 선형적으로 증가하기 때문에 앞서 설명한 반복 점화의 횟수 또한 확률 단서의 크기에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 목표 자극 출현 확률이 높아지면서 반복 점화 횟수 또한 증가하고, 이는 결과적으로 강한 확률 단서 효과로 이어지는 것으로 보인다(Brascamp et al., 2011).

확률 단서 효과는 비교적 적은 양의 경험의 누적만으로도 빠르게 형성된다. 확률적 지식에 의한 공간 주의의 편향은 내현적 주의(covert attention)와 외현적 주의(overt attention)를 통해 확인할 수 있다. 내현적 주의의 편향은 목표 자극을 탐색하는 반응 속도(낮은 확률 조건의 반응 속도 - 높은 확률 조건의 반응 속도)를 통해 알아볼 수 있는데, 이는 48개 이내의 시행만으로도 나타난다. 한편, 안구 운동 추적 장치(eye tracker)를 이용해 최초 도약 안구 운동(first saccadic

eye movement)이 발생하는 영역을 살펴봄으로써 관찰되는 외현적 주의의 편향은 96개 이내의 시행의 누적으로 발생한다(Salovich, Remington, & Jiang, 2018). 높은 확률 조건 대 낮은 확률 조건의 비율(3:1:1:1)을 감안한다면 높은 확률 영역으로 발생하는 24회와 48회의 주의 이동만으로도 비교적 빠르게 편향이 나타남을 알 수 있다. 또한 한 번 형성된 지식은 오랫동안 지속된다. 한 번 확립된 편향은 모든 영역에 목표 자극이 동일한 확률로 출현하는 검사회기가 시작된 후 500시행이 지나도록 유지되며, 1주일 이상 지속되기도 한다(Jiang, Swallow, Rosenbaum et al., 2013, 실험 1, 실험 4). 높은 확률 영역이 일정량의 훈련 이후 다른 영역으로 변경되어도 처음 형성한 지식에 따라 공간 주의의 이동이 발생하거나(실험 4), 처음 형성한 지식이 남아 공간 주의의 편향에 일부 영향을 미칠 수 있다(Sisk et al., 2018).

한편, 확률 단서 효과는 시각 탐색의 관점(viewpoint)에 따라 발생하지 않을 수 있다. 목표 자극의 빈번한 출현 영역은 탐색 환경 또는 참가자가 화면을 지각하는 방향이라는 두 가지의 준거를 바탕으로 부호화될 수 있다. 전자는 환경중심적(environment-centered) 관점으로 빈번한 출현 영역이 실험실 구조 또는 모니터 내에서 갖는 상대적 위치를 의미하며, 후자는 자기중심적(viewer-centered) 관점으로 참가자의 관점에서 고정적인 상·하·좌·우의 방위를 의미한다. Jiang, Swallow와 Capistrano(2013)는 확률 단서의 학습이 어느 관점에서 부호화 및 이용될 수 있는지 알아보았다. 높은 확률 영역을 탐색 환경에 고정된 채 참가자들이 매 시행마다 탐색 위치를 변경해가며 시각 탐색을 수행하도록 함으로써 자기중심적 관점에서의 높은 확률 영역이 매 시행 변화한 경우에는 확률 단서 효과가 나타나지 않았다. 반면, 참가자의 이동과 함께 높은 확률 영역도 함께 변화함으로써 환경중심적 관점에서의 높은 확률 영역이 변화한 경우에는 유의한 확률 단서 효과가 발견되었다. 이는 목표 자극의 출현 영역은 참가자 자신을 준거삼아 자기중심적 관점에서 부호화됨을 보여주며, 높은 확률 영역을 가리킬 수 있는 탐색 환경의 구체적인 속성은 확률 지식 형성 시 누락되는 것으로 해석될 수 있다. 그러나, 확률 정보가 언제나 자기중심적 관점에서 부호화되는 것만은 아니다. 예를 들어, 캠퍼스 내 도보 공간과 같은 실험실 밖의 넓은 환경에서 시각 탐색 과제를 수행한 경우에는, 환경중심적 또는 자기중심적 관점 모두에서 확률 단서를 습득하는 것으로 나타났으며(Jiang, Won, Swallow et al., 2014), 확률 정보에 대해 명시적인 지식이 있는 경우에도 환경중심적 및 자기중심적 관점 모두에서 확률 단서 효과를 보이는 것으로 나타났다(Jiang et al., 2016).

정리하자면, 확률 단서 효과는 시간적으로 또는 비율적으로 강력한 특징을 갖지만 부호화되는 관점에 의해 제한적으로 발생할 수 있다. 따라서 추후의 확률 단서 효과 연구는 이러한 특징을 고려해야 할 것이다.

### 공간 지도: 확률 단서 효과의 전제조건

기존의 연구들은 실험실 컴퓨터 모니터 화면이라는 제한적인 공간에서 벗어나 다양한 환경에서의 확률 단서 효과를 확인하였다. 특히 참가자가 지각할 수 있는 공간이라면 공간의 크기나 대상에 관계 없이 확률 단서 효과가 발견되는 것으로 보인다. 먼저, 확률 단서 효과는 탐색 공간의 크기에 구애받지 않는다. 예를 들어, 넓은 실험실 공간(Smith, Hood, & Gilchrist, 2010; Smith, Wallace, Hood, & Gilchrist, 2009; Won et al., 2015) 또는 실험실 밖 환경(Jiang, Won, Swallow et al., 2014)에서 시각 탐색 과제를 수행하는 경우에도 참가자의 탐색 속도와 머리 움직임을 통해 확률 단서 효과를 확인할 수 있었다. 또한 확률 단서 효과는 물체 상에서도 발생할 수 있다. 참가자들은 서로 다른 범주에 속한 물체의 상단 또는 하단에 나타나는 목표 자극에 대해 보고하는 시각 탐색 과제를 수행하였을 때에도 물체 범주에 따라 달라지는 높은 확률 영역을 학습할 수 있었다(Chua & Gauthier, 2016).

확률 단서 효과는 지각되는 공간뿐만 아니라 지각되지 않는 인지적 표상 내에서도 발생할 수 있다. Won과 Leber(2016)의 연구에서 참가자들은 네 개의 자극을 작업기억에 파지한 상태에서 후속단서가 가리키는 속성을 가진 작업기억 속 자극의 위치를 보고하는 기억탐색 과제를 수행하였다. 이 때 후속단서는 특정 위치에 나타난 자극 속성을 빈번하게 가리키도록 조작되었다. 실험 결과, 높은 확률 위치의 자극 속성을 낮은 확률 위치의 자극 속성에 비해 정확하게 보고하는 것을 확인하였고, 이는 시각 작업기억 표상 내에서 탐색을 수행할 때에도 확률 분포가 학습되어 주의 편향이 발생할 수 있음 시사한다.

확률 단서 효과는 목표 자극이 아닌 방해 자극에 대해서도 나타날 수 있다. 목표 자극의 영역별 출현 확률이 아닌, 방해 자극의 영역별 출현 확률을 조작하는 경우 확률 단서 효과는 방해 자극의 탐색 방해를 억제하는 방식으로 발생한다. 방해 자극의 영역별 확률 분포를 학습하면 방해 자극의 현출성이 높더라도 방해 자극이 출현하지 않는 것만큼의 탐색 효율을 보인다(Goschy, Bakos, Müller, & Zehetleitner, 2014; Wang & Theeuwes, 2018a, 2018b). Wang과

Theeuwes의 연구와 더불어 Ferrante 등(2017)의 연구에서는 방해 자극이 높은 확률로 출현하는 영역에 목표 자극이 출현하면 탐색 속도가 느려지는 것을 통해 방해 자극 자체가 아니라 방해 자극이 빈번하게 출현하는 영역으로의 주의 이동이 억제됨을 추가적으로 확인할 수 있다. 또한 방해 자극의 영역이 매 시행 변화하더라도 사전 단서에 의해 높은 확률 영역이 예측된다면 방해 자극의 출현을 성공적으로 억제할 수 있었다(Leber, Gwinn, Hong, & O'Toole, 2016). 이는 암묵적 기대에 따라 억제할 영역을 융통적으로 조절 가능성을 의미한다.

지금까지 살펴본 바에 따르면, 확률 단서 효과가 발생하는 환경은 다양하지만, 대부분의 확률 단서 효과 연구에는 공간 정보라는 공통적인 요소가 있다. 다시 말해, 공간 정보가 파악될 수 있다면 탐색 환경에 구애받지 않고 확률 정보를 학습할 수 있는 것으로 보인다. 물체 내에서 확률 정보를 학습하는 경우(Chua & Gauthier, 2016), 물체는 세부특징 또는 세부특징들이 이루는 구조에 따라 상단 또는 하단의 공간 정보를 안내하는 지표를 가진다고 볼 수 있다. 또한 넓은 공간에서 시각 탐색 과제를 수행하는 경우, 참가자들은 몇 번의 탐색을 통해 공간의 넓이, 구조, 랜드마크 등을 통합하여 하나의 공간 표상을 형성할 수 있다(Li, Aivar, Tong, & Hayhoe, 2018). 즉, 표상된 공간 정보를 바탕으로 목표 자극과 방해 자극의 출현 확률에 따른 우선순위가 할당될 수 있다면 확률 단서 효과가 나타날 수 있는 것으로 보인다(Ferrante et al., 2017; Jiang, Swallow, & Capistrano, 2013).

### 습관성 주의: 확률 단서 효과의 주의 자원

확률 단서 효과를 발생시키는 주의 자원을 습관성 주의(habitual attention)라 하며, 이는 목표주도 주의(goal-driven attention)와 개념적으로 구분된다(Addleman, Tao, Remington, & Jiang, 2017; Jiang, Swallow, & Rosenbaum, 2013). 목표주도 주의는 매 시행마다 조정 가능한 선언적 주의(declarative attention)이며, 명시적인 단서에 의해 주의를 이동시키기 때문에 매 시행 또는 매 구획마다 공간 주의를 이동시킬 위치를 변경하는 것이 용이한 반면, 습관성 주의는 충분한 시간동안 경험을 누적하여 발생하는 경험기반 주의(experience-based attention)이며, 과제를 수행하는 동안 암묵적이고 점진적으로 발생하는 절차적 주의(procedural attention)이기 때문에 매 시행 주의 편향을 변경하는 것이 비교적 어렵다. 목표주도 주의의 예시로는 명시

적 내인성 단서(endogenous cue)나 지시문에 의해 선형적으로 주어지는 지식을 이용하는 경우를 들 수 있다. 목표 자극이 제시될 위치를 시각 탐색 전 화살표로 가리키거나(Ji & Kim, 2017; Posner, 1980), 목표 자극의 출현 확률 또는 위치와 관련한 정보를 시각 탐색 과제 전 알려주는 경우(Jonides, 1980), 암묵적 학습 과정이 없더라도 명시적 단서 및 지시가 가리키는 영역으로 공간 주의를 우선적으로 이동시킬 수 있다(Addleman et al., 2017).

습관성 주의의 예시로는 암묵적 확률 단서나 맥락 단서처럼 경험학습을 통한 주위의 이동을 들 수 있다. 습관성 주의와 목표주도 주의는 질적으로 다르기 때문에 두 주의 자원을 동시에 사용하는 것은 어려우며, 습관성 주의와 목표주도 주의를 모두 이용할 수 있는 경우에는 목표주도 주의가 습관성 주의를 방해할 수 있다. 예를 들어, 명시적 내인성 단서와 암묵적 확률 단서가 동시에 목표 자극의 영역을 가리키는 경우 참가자들은 암묵적 확률 단서는 학습하지 못하였으며, 명시적 내인성 단서에 따라 공간 주의를 이동시키는 것으로 나타났다(Jiang, Swallow, & Rosenbaum, 2013).

습관성 주의의 대표적 예시인 확률 단서 효과는 따라서 목표주도 주의에 의한 시각 탐색과는 다른 특징을 갖는다. 습관성 주의에 의해 형성된 확률 지식은 과제 특정적으로, 습관성 주의로 습득한 확률 지식은 시각 탐색의 범주에 속하는 과제 간에서만 일관적으로 이용될 수 있으며 다른 범주의 과제로는 전이(transfer)되지 않는다. 예를 들어, 방해 자극 가운데 목표 자극을 찾는 시각 탐색 과제로 확률 지식을 학습한 후 풍경 사진 내에서 목표 자극을 찾는 풍경 탐색 과제(scene search task)로 검사회기를 진행하더라도 학습된 확률 지식을 바탕으로 목표 자극을 탐색하는 것으로 나타났다(Salovich et al., 2018). 또한 Jiang 등(2015)의 연구에서는 탐색 자극의 모양이나 탐색 난이도처럼 시각 탐색 과제의 구체적인 속성이 변화하더라도 확률 단서 패러다임을 통해 습득한 확률 지식은 이용되지만, 수행해야 하는 과제 자체가 달라지는 경우에는(예, 시각 탐색 과제에서 의사결정 과제로의 전환) 시각 탐색 시 획득하였던 확률 지식이 더 이상 사용되지 않는 것으로 나타났다. 반면 습관성 주의와 달리 목표주도 주의에 의한 확률 지식은 과제 간에 일반화되어 사용될 수 있다. Addleman 등(2017)은 시각 탐색 과제 수행 시 목표 자극의 위치를 명시적 지시를 이용해 높은 확률 위치에 대한 사전 정보를 제공하거나(실험 1) 내인성 단서인 화살표를 통해 매 시행 제시함으로써(실험 2) 시각 탐색 시 높은 확률 영역으로 발생한 공간 주의의 편향이 기억 표상의 강화로 이어지는지를 확인하였다. 실험 1과 실험 2 모두에서 공

간 주의의 편향과 더불어, 높은 확률 영역에 나타났던 기억 자극에 대한 정확도 또한 높아지는 것으로 나타났다. 그러나, 암묵적 확률 단서를 이용해 시각 탐색 과제를 수행한 결과, 기억 과제로의 주의 편향의 전이는 발생하지 않았다(실험 3). 과제 간 전이 현상이 서로 다른 까닭은 암묵적 확률 단서가 습관성 주의에 기반하는 반면, 명시적 지시나 내인성 단서는 목표주도 주의에 기반하여 서로 다른 주의 자원을 사용하기 때문이라 여겨진다.

둘째로, 경험기반 주의는 목표주도 주의와 달리 연령의 영향에 민감하게 변화하지 않는다. 노인군과 젊은 성인군을 대상으로 암묵적으로 확률 정보를 습득하도록 하였을 때 두 집단은 유사한 크기의 확률 단서 효과를 보인 반면(Jiang et al., 2016), 높은 확률 영역에 대한 명시적 지시에 따라 시각 탐색을 수행한 경우에는 노인군이 젊은 성인군에 비해 목표주도 주의의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다(Twedell et al., 2017). 뿐만 아니라 노화에 따라 환경중심적 관점에서의 공간 표상 능력이 감퇴하더라도 젊은 성인군과 마찬가지로 자기중심적인 확률 단서를 학습하는 것으로 나타났다(Montefinese, Sulpizio, Galati, & Committeri, 2015). 이러한 결과는 노화에 따라 전반적인 인지 기능이 감퇴하더라도 습관성 주의를 기반으로 하는 암묵 학습은 노화의 영향이 비교적 적거나 없는 인지 기능 중 하나이며, 경험기반 주의가 목표기반 주의와 같은 다른 양상의 주의와 질적으로 구분된다는 점을 지지하기도 한다. 습관성 주의를 측정하는 도구를 개발함으로써 목표기반 주의와 구분되는 노인군의 인지 기능을 측정하는 대안 도구로 사용할 수 있으며, 또는 감퇴한 목표기반 주의를 대체할 수 있는 훈련 도구를 개발하는 데에 습관성 주의 패러다임이 이용될 수 있을 것으로 기대된다(Sisk et al., 2018).

### 확률 단서에 관한 지식은 어떻게 형성되는가?

새로운 주의 자원을 설명할 수 있는 예시로서 확률 단서 효과가 소개되면서 연구의 흐름은 점차 확률 단서 효과의 학습 과정에 대한 고민으로 이어지고 있다. 확률 단서 효과의 발생 과정에 관한 모델은 Jiang, Swallow와 Capistrano(2013)의 연구에서 시작한다. Jiang 등은 목표주도 주의와 관련한 선언적 주의(declarative attention)와 매 시행 즉각적으로 발생하는 공간 주의 이동과 관련한 절차적 주의(procedural attention) 이중 시스템(dual system)의 작용으로 확률 단서 효과를 설명하였다. 선언적 주의를 공간 주의를 이동시키기 이전에 이용하는 우선순위 지도(priority map)를 의미한다.

이는 ‘어디 요소(Where component)’라고도 불리며(Jiang, 2017), 이후의 지각적 선택이나 행동 계획에 영향을 준다. 우선순위 지도의 활성화 수준은 현재의 혹은 장기적인 목표에 따라 결정될 수 있으며, 활성화 수준의 크기에 따라 해당 영역으로 공간 주의가 이동하게 된다. 우선순위가 동일한 영역들 간에는 공간 주의를 무선적으로 이동시킨다(Wolfe, Alvarez, & Horowitz, 2000). 절차적 주의를 실시간으로 발생하는 공간 주의의 이동을 의미한다. 이는 ‘어떻게 요소(How component)’라고 불리며, 벡터에 따라 공간 주의를 이동시킨 영역에서 목표 자극을 성공적으로 탐색한다면 해당 영역으로의 공간 주의 이동은 연합(association) 및 강화(reinforcement)된다(Jiang, 2017). 다시 말해, 암묵적인 확률 정보의 학습은 어떻게 요소에서 담당한다.

Jiang(2017)의 모델에서는 ‘어떻게 요소’에서 학습된 주의 이동 벡터가 ‘어디 요소’의 우선순위 지도와 어떻게 상호작용 하는지 명확히 하지 않았으나, Ferrante 등(2017)은 확률 학습 경험이 우선순위 지도에 반영되어 탐색 우선순위가 결정된다고 주장한다. Ferrante 등의 모델에서는 확률 정보가 탐색 목표뿐만 아니라 자극의 현출성, 보상과의 연합 등 탐색과 관련된 다른 신호들과 함께 탐색 공간 상의 우선순위 지도에 활성화 수준으로 반영된다. 신호의 합이 높은 곳에는 높은 활성화 수준이, 신호의 합이 낮은 곳에는 낮은 활성화 수준이 부여되며, 활성화 수준은 신호가 발생할 때마다 갱신되어 높아지고 낮아지는 과정을 반복한다. 활성화 수준이 높은 영역이 높은 탐색 우선순위를 가져가기 때문에, 신호(목표 자극의 출현)가 빈번하게 발생하는 높은 확률 영역으로 공간 주의의 편향이 발생한다.

Ferrante 등(2017)은 우선순위 지도가 변화하는 과정을 설명함으로써 지식 표상의 정교화 과정은 설명할 수 있으나, 확률 지식의 공고화가 어떻게 우선순위 지도에 반영되는지에 대한 설명이 부족하다. 구체적으로, 확률 단서 효과의 크기에 상한이 있어 경험의 누적에도 불구하고 일정 수준으로 유지된다는 점, 균등한 확률로 목표 자극이 탐색 공간에 나타나는 시행을 반복적으로 경험한 후에도 여전히 높은 확률 영역으로의 공간 주의 편향이 발생하는 점에 대해서는 설명하지 못한다. 만일 신호가 발생할 때마다 우선순위 지도가 갱신된다면 불균등한 경험이 반복되는 상황에서는 확률 단서 효과가 점차 커져야 할 것이며, 균등한 경험이 반복되는 경우에는 확률 단서 효과가 사라져야 할 것이기 때문이다.

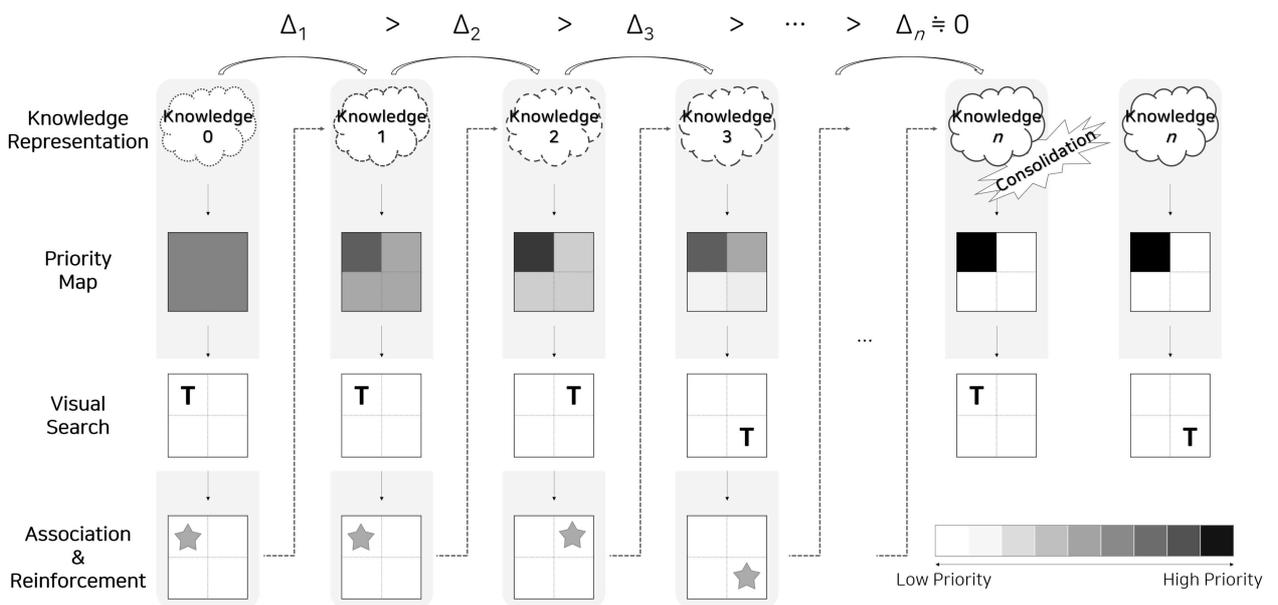
본 논문에서는 이에 따라 확률 단서 효과의 발생 과정을 설명하기 위해 베イズ 추론 통계와 유사한 방식의 학습과정을 반영하여 개선된 모델을 제안한다(Figure 2). 베イズ 추론

통계는 특정 사건이 발생할 사후 확률을 사전 확률 또는 신념에 추가적인 정보를 더해가면서 추론해내는 방법(Lee & Wagenmakers, 2013)으로, 확률 단서 효과 또한 이전까지의 자극 출현 확률에 현재 발생한 사건의 정보를 더하여 발생하는 것으로 예측할 수 있다. 개별 사건에 대한 경험을 하기 전의 0번째 지식, 즉 시각 탐색 과제를 시작하기 전의 지식 표상에는 목표 자극의 출현 확률이 영역에 따라 다를 것이라는 사전 정보가 없기 때문에 모든 영역에 자극이 출현할 확률이 동일하다는 가정을 세울 수 있다. 실험 진행 전, 사전 지식이 없기 때문에 모든 영역의 탐색 우선순위가 동일하므로 무선적으로 또는 순차적으로 시각 탐색을 진행한다. 암묵적 지식표상에는 시각 탐색 시 이득이 되는 정보(공간적인 규칙성)만이 포함되며, 그 외에 시각 탐색 시 이득을 주지 않는 구체적이 속성들(예, 자극의 모양이나 난이도)은 누락된다(Jiang et al., 2015).

특정 영역에 목표 자극이 출현한다면 해당 영역의 탐색 우선순위는 증가하고, 다른 영역의 우선순위는 감소하면서 매 시행마다 탐색 우선순위는 조정된다. 예를 들어, Figure 2에서 보듯이, 첫 시행에서 목표 자극이 2사분면에 나타났다면 이 사건은 지식 표상에 반영되어 지식 표상이 형성하는 영역별 탐색 우선순위는 조정된다. 그 결과 2사분면의 탐색

우선순위는 높아지고, 1, 3, 4분면의 탐색 우선순위는 상대적으로 낮아진다. 참가자는 조정된 우선순위 정보에 따라 두 번째 시행의 시각 탐색을 수행한다. 두 번째 시행에서도 2사분면에 목표 자극이 출현했다면 2사분면의 탐색 우선순위는 첫 번째 시행보다 높게 조정될 것이다. 세 번째 시행에서 목표 자극이 1사분면에 출현했다면 1사분면의 탐색 우선순위는 두 번째 시행보다 높아지며, 2, 3, 4사분면의 우선순위는 이전 시행에 비해 낮아질 것이다. 이처럼 탐색이 진행될수록 특정 영역에 목표 자극이 빈번하게 출현하고, 새로운 사건이 발생할 때마다 이전의 지식 표상에 새로운 사건을 더해져  $n$  번째의 새로운 지식 표상이 형성된다. 경험이 누적됨에 따라 추론된 확률 지식은 점차 목표 자극의 실제 출현 확률 분포에 수렴해간다.

추론된 확률 지식이 실제 확률 분포에 수렴해간다는 것은 사건이 누적됨에 따라 개별 사건이 확률적 추론에 미치는 영향은 점차 감소한다는 것을 의미하며, 이에 따른 지식 표상의 변화량( $\Delta$ ) 또한 감소한다. 지식 표상의 변화량은 지식 표상의 수정을 멈추는 시점을 결정한다. 누적된 사건의 수가 비교적 적은 훈련 초반에는 각 사건이 갖는 예측력이 크기 때문에 새로운 사건이 발생할 때마다 지식은 큰 폭으로 변화한다. 즉, 목표 자극이 출현한 영역에서의 자극 출현 확률은



**Figure 2.** A simple cognitive model of probability cueing effect. A priority map is generated based on the knowledge representation, and the visual search occurs according to the degree of priority. When a target is successfully detected, the attentional shift to the target region is reinforced, and the priority map is updated accordingly. As the trial progresses, the amount of change in the knowledge representation ( $\Delta$ ) converges to zero. Once the knowledge is consolidated, the priority map is used for the upcoming visual search without further updates. Each column represents a trial, and the shaded area represents the cognitive processes.  $2 \times 2$  matrix implies a search array, which is divided into invisible quadrants. The brightness of each quadrant in the second row indicates the search priority. “T” of the third row indicates the target region, and a star-shaped figure of the fourth row indicates that the attentional shift to the region is reinforced.

큰 폭으로 증가하고, 목표 자극이 출현하지 않은 영역의 자극 출현 확률은 큰 폭으로 감소한다. 그러나 누적된 사건이 상대적으로 많은 훈련 후반에는 각 사건이 갖는 예측력이 작기 때문에 새로운 사건에 의한 지식의 변화 폭은 비교적 작다. 지식의 변화 폭이 작다는 것은 새로운 사건에 의해 지식이 거의 수정되지 않는다는 것을 의미하며(Schultz & Dickinson, 2000), 실제 확률 분포에 도달한 지식 표상은 이후의 확률 정보 변화에 민감하지 않도록(Jiang, Swallow, Rosenbaum, et al., 2013) 공고화되는 것으로 보인다.

새롭게 제안하는 확률 단서 학습 모델은 Jiang(2017)과 Ferrante 등(2017)의 모델과 비교하여 다음의 장점을 갖는다. 먼저, 어디 요소와 어떻게 요소의 순환적인 상호작용 관계를 설명하는 동시에 어디 요소와 어떻게 요소의 역할을 순차적으로 나열함으로써 두 요소를 절차적으로 구분지을 수 있다. 둘째로, 지식 표상의 형성에 기여하는 개별 사건의 정보를 고려할 수 있다. 정보가에 따른 지식 표상의 변화 크기를 관찰함으로써 Ferrante 등 또는 Jiang의 모델에서 설명하지 않았던 학습의 변화 정도나 공고화 과정을 살펴볼 수 있다. 셋째로, 신경영상 연구를 통해 모델을 수량적으로 검증할 수 있다. 어디 요소와 어떻게 요소에 관여하는 네트워크를 살펴보고, 지식 표상에 영향을 미치는 개별 사건의 정보가의 변화를 활성화 정도의 변화에 따라 수량적으로 나타낼 수 있다.

신경학적 기제에 관한 연구의 중요성에도 불구하고 확률 단서 학습과 관련한 fMRI 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 확률 단서 효과에 관한 연구는 우반구가 손상된 무시증(neglect) 환자를 대상으로 시작되었으며(Geng & Behrmann, 2002), 우측 두정엽(right parietal lobe), 전두엽(frontal lobe), 기저핵(basal ganglia) 등 뇌손상을 입은 환자군을 대상으로 한 연구에서도 여전히 확률 단서 효과가 확인되었다(Lucas et al., 2013; Shaqiri & Anderson, 2012, 2013; Sisk et al., 2018; see Jiang, 2017). 일련의 환자군 대상 연구는 확률 단서 효과는 특정 영역의 독립적인 기능에 의한 것이 아니라, 여러 뇌 영역 간의 상호작용 및 보완에 의해 발생하는 것임을 암시한다(Reber, 2013). 확률 단서를 학습하기 위해서는 시각 탐색을 통해 개별 사건을 우선적으로 처리해야 하고, 이로부터 추상적인 규칙성을 추출하여 기존의 지식에 통합함으로써 지식을 수정해야 하는 여러 단계를 거쳐야 한다. 따라서 국소 영역이 아닌, 다양한 영역들의 상호작용에 의해 확률 단서 학습이 발생할 것을 기대할 수 있으며, 이를 위해서는 정상군을 대상으로 한 fMRI 연구가 필요할 것이다.

앞서 소개했듯이, 확률 단서 효과가 발생하는 과정은 여러 단계로 나누어 설명할 수 있으며, 각 단계 별로 서로 다른 신경학적인 패턴을 확인할 수 있을 것이다. 먼저 시각 탐색을 수행하기 전, 이전 시행에서 만들어졌던 지식 표상을 바탕으로 우선순위 지도를 형성한다. 우선순위 지도는 암묵적 지식에 의해 형성되기 때문에 의식적 작업기억 부하가 가해지는 경우나(Won & Jiang, 2015) 절차 지식은 습득할 수 있는 전두엽 손상 환자(Geng & Behrmann, 2002)에게서도 일관적으로 활성화 및 이용될 수 있다.

우선순위 지도는 순차적 주의 이동의 근거를 제공하고 효율적인 시각 탐색을 가능하게 하기 때문에 공간정보를 표상하고 공간 주의의 운용과 밀접한 관련을 맺는 영역들의 상호작용에 의해 표상될 것이다. 먼저 두정엽내구(intraparietal sulcus; IPS), 상구(superior colliculus; SC), 전두 안구영역(frontal eye field; FEF) 등 영역의 네트워크를 통해 우선순위 지도가 활성화될 것이다(Baluch & Itti, 2011; Fecteau & Munoz, 2006; Jiang, 2017; Serences & Yantis, 2007). 후두정피질(posterior parietal cortex; PPC), 구체적으로 두정엽내구는 공간정보와 우선순위를 표상하는 대표적인 영역으로 알려져 있으며(Bisley & Goldberg, 2010; Culham & Kanwisher, 2001; Serences & Yantis, 2006), 전두 안구영역은 하향적 지식을 이용하여 내현적 주의를 이동시키는 것으로 알려져 있다(Thompson & Bichot, 2005). 내현적 주의를 우선순위가 높은 영역으로 먼저 이동할 것이며, 이에 따라 해당 영역으로 안구운동과 관련된 상구의 활성화가 발생할 것이다(Basso & Wurtz, 1998; Katyal, Zughni, Greene, & Ress, 2010; Krauzlis, Lovejoy, & Zénon, 2013).

내현적 주의의 순차적 이동에 따라 특정 영역에서 목표 자극을 탐색 시 해당 영역으로의 공간 주의의 이동은 긍정적인 피드백과 함께 강화받는다. 이러한 연합학습의 과정은 보상영역인 선조체(striatum; Delgado, Nystrom, Fissell, Noll, & Fiez, 2000) 등의 활동을 통해 나타날 것이다. 연합학습의 결과물을 바탕으로 지식 표상이 수정되기 때문에 이전의 지식을 인출하며 기억을 재형성하는 과정이 필요하다. 해마(hippocampus)와 미상(caudate)은 기억 형성 뿐만 아니라 시각 통계 학습(Turk-Browne et al., 2009) 및 맥락 단서 학습(Greene, Gross, Elsinger, & Rao, 2007)에도 관여하는 것으로 알려져 있으며, 특히 맥락 단서 학습 시 해마는 공간 정보를 부호화 및 인출하는 것으로 알려진 상측 두정엽(superior parietal lobule)과 기능적 연결성을 보인다(Manelis & Reder, 2012). 공간 정보에 관한 기억 표상을 형성하는 확률 단서 패러다임에서도 유사한 영역들의 활성화

가 관찰될 것으로 기대된다.

확률 단서 효과가 발생하기 위해서는 각 단계가 순환적으로 발생하여야 한다. 각 단계에 관여하는 영역들이 신경 신호를 주고받음으로써 상호작용을 한다면 우선순위 및 시각 탐색과 관련한 네트워크에서 학습 및 기억표상 수정과 관련한 영역들로, 그리고 그 반대 방향으로 이어지는 기능적 연결성을 관찰할 수 있을 것이다. 한편, 지식 표상이 훈련에 의해 점차 정교해짐에 따라 각 사건이 갖는 예측력이 점차 감소하기 때문에 어디 요소와 어떻게 요소가 주고받는 정보의 양 또한 시간에 따라 감소할 것으로 예상된다. 따라서 지식 표상이 정교해져 실제의 확률 분포에 수렴할수록 기능적 연결성은 점차 감소하는 양상을 보일 것이다. 위와 같이 제안된 신경영상 연구를 통해 수정된 확률 단서 학습 모델을 새롭게 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

확률 단서 효과의 신경학적 기제를 탐색함으로써 다음의 두 가지 효과를 기대할 수 있다. 첫째, 추상적 정보를 요약적으로 해석 및 이용하는 인지처리과정을 이해할 수 있다. 다양한 정보를 효율적으로 압축하여 이용하는 인지 기능의 효율성에 대해 이해하고, 이러한 정보의 가공 능력이 행동 변화로 어떻게 이어지는지에 대한 이해를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 둘째, 지식 표상에 담긴 정보를 수량화하여 살펴볼 수 있다는 강력한 장점을 가진다. 정보의 양적인 변화와 더불어 확률 단서 효과의 개별차를 살펴봄으로써 경험의 양과 지식의 강도에 따른 개인의 시각 탐색 효율을 수치화하여 예측할 수 있다. 이는 목표주도 주의와 구분되는 별개의 인지 기능으로서의 암목적 학습 능력을 측정할 수 있는 도구를 개발하거나, 노인 및 환자군의 손상된 목표주도 주의를 보완할 수 있는 훈련 도구를 개발하는 데에 이용될 수 있을 것이다.

## 종합논의

본 논문에서는 확률 단서 효과 연구의 진척 상황을 살펴보고, 확률 단서 효과의 학습 과정을 설명하는 모델과 이를 뒷받침할 수 있는 신경학적 연구의 가능성에 대해 논의하였다. 먼저, 확률 단서 효과의 속성에 대해 살펴보았다. 확률 단서 효과는 시간적으로 강력하며, 비울적으로 민감한 효과이나 학습 시 확률 정보를 표상하는 관점에 따라 제한적으로 발생하기도 한다.

두 번째로, 확률 단서 효과가 발생하기 위한 전제조건으로써의 공간 정보에 대해 논의하였다. 확률 단서 효과는 다양한 환경에서 발생하지만 이러한 다양성의 기저에는 공간 정

보라는 공통점이 존재한다. 공간 정보를 가지며, 공간 정보가 과제 수행에 이용되는 환경이라면 지각 가능한 공간 및 대상이나 추상적인 인지적 표상 내에서도 확률 단서 효과를 확인할 수 있었다. 확률 단서 효과는 경험의 누적을 통해 형성되는 습관성 주의를 통해 발생하며, 질차적이고 점진적으로 발생 및 이용된다는 특징을 갖는다. 따라서 습관성 주의를 명시적이고 선언적인 목표주도 주의와 개념적, 질적으로 구분되는 속성을 갖는다.

마지막으로 확률 단서 효과의 학습 과정을 어디 요소와 어떻게 요소의 상호작용 관점에서 살펴보았다. 어디 요소에 의해 활성화된 우선순위 지도를 바탕으로 어떻게 요소는 시각 탐색을 수행하며(Jiang, 2017), 개별 시행의 목표 자극 탐색 영역에 따라 우선순위 지도는 매 시행 수정된다(Ferrante et al., 2017). 두 요소 간의 상호작용에 의한 지식 표상의 변화는 개별 사건의 실제 확률 정보에 대한 예측력, 즉 정보가 0에 수렴해 확률 지식 표상이 실제 확률 정보와 근접 시까지 이루어질 것이다. 확률 단서 효과는 여러 단계에 걸쳐 다양한 인지적 처리 과정을 요구하고, 각 단계에 따른 정보의 상호 교환을 통해 점진적으로 발생하기 때문에 다양한 뇌 영역이 확률 학습에 관여할 것으로 기대할 수 있다. 대표적으로는 두정엽내구, 상구, 전두 안구영역 등과 선조체, 해마, 미상 등의 영역이 신경 신호를 주고 받으며 확률 단서 학습에 관여하는 것으로 보인다. 확률 단서 효과의 학습과정은 학습이 진행될수록 개별 사건이 확률 정보 학습에 미치는 정보가 감소하며 영역들 간의 기능적 연결성이 점차 감소하는 양상을 통해 보여질 것이다.

확률 정보의 암목적 학습과 관련한 연구는 공간 주의 이외에도 다양한 인지 기능이 상황에 따라 유연하게 변화할 수 있는지를 살펴보기 위해 서로 다른 과제를 이용하여 진행되었다. 예를 들어, 탐색 자극을 담고 있는 위치고정 틀(placeholder)의 자극 속성이 목표 자극을 담고 있을 확률 정보를 지닐 때, 높은 확률의 틀의 위치가 매 시행 변화하더라도 위치고정 틀의 자극 속성에 따라 확률 정보를 이용하는 것으로 나타났다(Schwark & Dolgov, 2013). 이는 시각 탐색 과제 시 공간 주의 지도 뿐만 아니라 세부특징 지도(feature map)를 통해서도 확률 정보를 학습 및 이용할 수 있음을 의미한다. 또한, 확률 정보를 암묵적으로 학습함으로써 인지 조절 능력에 변화를 줄 수 있다. 주의 포획(attentional capture) 현상을 살펴본 연구에서는, 목표 자극의 특성을 예측하는 확률 정보를 암묵적으로 학습함으로써 현출적인 자극의 주의 포획 정도를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다(Cosman & Vecera, 2014). 이러한 연구는 확률 학

습을 통해 주의 조절 능력이 길러질 수 있으며, 이를 통해 자동적인 처리로 여겨지는 주의 포획을 억제할 수 있음을 보여주고 있다. 확률 정보에 대한 암묵적 학습은 시각 탐색 뿐만 아니라, 스트룹 과제, 사이먼 과제, 에릭슨 플랭커 과제와 같은 인지통제 과제를 수행하면서도 발생할 수 있다(Crump, Gong, & Milliken, 2006; Crump, Vaquero, & Milliken, 2008; Hübner & Mishra, 2016; Wendt, Kluwe, & Vietze, 2008). 맥락에 따라 일치(congruent) 조건 또는 불일치(incongruent) 조건을 서로 다른 확률로 예측하도록 조작하는 경우, 불일치 조건을 높은 확률로 예측하는 맥락에서의 일치 효과가 일치 조건을 높은 확률로 예측하는 맥락에서의 일치 효과에 비해 유의하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 위의 연구들은 확률 정보를 암묵적으로 학습함으로써 주의 및 인지 조절에 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 나아가, 암묵적으로 학습된 확률 정보가 인지적 오류를 줄이거나 과제 수행의 효율성을 높이기 위해 사용되는 과정을 살펴봄으로써 인지처리 기능의 유연성을 이해할 수 있으며, 경험 학습을 통한 정보통합 과정이 서로 다른 주의 자원들과 맺는 관계성을 살펴보는 데에 용이하다.

확률 단서 효과는 여러 사건들을 종합하여 의미있는 정보를 추출한다는 점에서 인간의 효율적이며 고차원적인 인지 기능을 보여주지만, 이와 관련한 다각적인 연구는 아직 미비한 실정이다. 예를 들어, 발달과정 간의 확률 단서 효과의 차이나, 동일 발달과정 내의 확률 단서 효과의 개인차 연구를 통해 행동 효율성에 영향을 미치는 경험학습의 역할에 대해 탐색해볼 수 있을 것이며, 확률 지식의 발생 과정 및 신경학적 기제에 대해서도 탐색해볼 수 있을 것이다. 확률 단서 효과에 관한 다양한 관점에서의 연구를 통해 인간의 정보 처리 능력에 대한 이해에 한 걸음 접근할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- Addleman, D. A., Tao, J., Remington, R. W., & Jiang, Y. V. (2017). Explicit goal-driven attention, unlike implicitly learned attention, spreads to secondary tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *44*, 356-366. <https://doi.org/10.1037/xhp0000457>
- Awh, E., Belopolsky, A. V., & Theeuwes, J. (2012). Top-down versus bottom-up attentional control: A failed theoretical dichotomy. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*, 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.06.010>
- Baluch, F., & Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in Neurosciences*, *34*, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.02.003>
- Basso, M. A., & Wurtz, R. H. (1998). Modulation of neuronal activity in superior colliculus by changes in target probability. *The Journal of Neuroscience*, *18*, 7519-7534. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.18-18-07519.1998>
- Bisley, J. W., & Goldberg, M. E. (2010). Attention, intention, and priority in the parietal lobe. *Annual Review of Neuroscience*, *33*, 1-21. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-060909-152823>
- Brascamp, J. W., Pels, E., & Kristjánsson, Á. (2011). Priming of pop-out on multiple time scales during visual search. *Vision Research*, *51*, 1972-1978. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.07.007>
- Chua, K.-W., & Gauthier, I. (2016). Category-specific learned attentional bias to object parts. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *78*, 44-51. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1040-0>
- Chun, M. M. (2000). Contextual cueing of visual attention. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 170-178. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01476-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01476-5)
- Chun, M. M., & Jiang, Y. (1998). Contextual cueing: Implicit learning and memory of visual context guides spatial attention. *Cognitive Psychology*, *36*, 28-71. <https://doi.org/10.1006/cogp.1998.0681>
- Chun, M. M., & Jiang, Y. (1999). Top-Down Attentional guidance based on implicit learning of visual covariation. *Psychological Science*, *10*, 360-365. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00168>
- Cosman, J. D., & Vecera, S. P. (2014). Establishment of an attentional set via statistical learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*, 1-6. <https://doi.org/10.1037/a0034489>
- Crump, M. J. C., Gong, Z., & Milliken, B. (2006). The context-specific proportion congruent Stroop effect: Location as a contextual cue. *Psychonomic Bulletin and Review*, *13*, 316-321. <https://doi.org/10.3758/BF03193850>
- Crump, M. J. C., Vaquero, J. M. M., & Milliken, B. (2008). Context-specific learning and control: The roles of awareness, task relevance, and relative salience. *Consciousness and Cognition*, *17*, 22-36. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.01.004>
- Culham, J. C., & Kanwisher, N. G. (2001). Neuroimaging of

- cognitive functions in human parietal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *11*, 157-163. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(00\)00191-4](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(00)00191-4)
- Delgado, M. R., Nystrom, L. E., Fissell, C., Noll, D. C., & Fiez, J. A. (2000). Tracking the hemodynamic responses to reward and punishment in the striatum. *Journal of Neurophysiology*, *84*, 3072-3077. <https://doi.org/10.1152/jn.2000.84.6.3072>
- Druker, M., & Anderson, B. (2010). Spatial probability aids visual stimulus discrimination. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*(August), 1-10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00063>
- Egeth, H. E., & Yantis, S. (1997). Visual attention: Control, representation, and time course. *Annual Review of Psychology*, *48*, 269-297. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.48.1.269>
- Fecteau, J. H., & Munoz, D. P. (2006). Saliency, relevance, and firing: a priority map for target selection. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.06.011>
- Ferrante, O., Patacca, A., Di Caro, V., Della Libera, C., Santandrea, E., & Chelazzi, L. (2017). Altering spatial priority maps via statistical learning of target selection and distractor filtering. *Cortex*, *102*, 67-95. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.09.027>
- Fiser, J., & Aslin, R. N. (2002). Statistical learning of higher-order temporal structure from visual shape sequences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *28*, 458-467. <https://doi.org/10.1037//0278-7393.28.3.458>
- Geng, J. J., & Behrmann, M. (2002). Probability cuing of target location facilitates visual search implicitly in normal participants and patients with hemispatial neglect. *Psychological Science*, *13*, 520-525. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00491>
- Geng, J. J., & Behrmann, M. (2005). Spatial probability as an attentional cue in visual search. *Perception and Psychophysics*, *67*, 1252-1268. <https://doi.org/10.3758/BF03193557>
- Goschy, H., Bakos, S., Müller, H. J., & Zehetleitner, M. (2014). Probability cueing of distractor locations: Both intertrial facilitation and statistical learning mediate interference reduction. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1195. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01195>
- Greene, A. J., Gross, W. L., Elsinger, C. L., & Rao, S. M. (2007). Hippocampal differentiation without recognition: an fMRI analysis of the contextual cueing task. *Learning and Memory*, *14*, 548-553. <https://doi.org/10.1101/lm.609807>
- Han, S. H., & Kim, M.-S. (2004). Visual search does not remain efficient when executive working memory is working. *Psychological Science*, *15*, 623-628. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00730.x>
- Hong, I., Jeong, S.-K., & Kim, M.-S. (2018). Task relevance affects the context-dependency of implicit learning. *Journal of Vision*, *18*, <https://doi.org/643.10.1167/18.10.643>.
- Hübner, R., & Mishra, S. (2016). Location-specific attentional control is also possible in the Simon task. *Psychonomic Bulletin and Review*, *23*, 1867-1872. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1057-y>
- Ji, E. & Kim, M.-S. (2017). Unconscious endogenous attention. *The Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, *29*, 21-40.
- Jiang, Y., & Chun, M. M. (2001). Selective attention modulates implicit learning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *54A*, 1105-1124. <https://doi.org/10.1080/02724980042000516>
- Jiang, Y. V. (2017). Habitual versus goal-driven attention. *Cortex*, *102*, 107-120. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.06.018>
- Jiang, Y. V., Koutstaal, W., & Twedell, E. L. (2016). Habitual attention in older and young adults. *Psychology and Aging*, *31*, 970-980. <https://doi.org/10.1037/pag0000139>
- Jiang, Y. V., & Swallow, K. M. (2014). Changing viewer perspectives reveals constraints to implicit visual statistical learning. *Journal of Vision*, *14*, 1-16. <https://doi.org/10.1167/14.12.3>
- Jiang, Y. V., Swallow, K. M., & Capistrano, C. G. (2013). Visual search and location probability learning from variable perspectives. *Journal of Vision*, *13*, 1-13. <https://doi.org/10.1167/13.6.13>
- Jiang, Y. V., Swallow, K. M., & Rosenbaum, G. M. (2013). Guidance of spatial attention by incidental learning and endogenous cuing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*, 285-297. <https://doi.org/10.1037/a0028022>
- Jiang, Y. V., Swallow, K. M., Rosenbaum, G. M., & Herzig, C. (2013). Rapid acquisition but slow extinction of an attentional bias in space. *Journal of Experimental*

- Psychology: Human Perception and Performance*, 39, 87-99. <https://doi.org/10.1037/a0027611>
- Jiang, Y. V., Swallow, K. M., Won, B.-Y., Cistera, J. D., & Rosenbaum, G. M. (2015). Task specificity of attention training: the case of probability cuing. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 77, 50-66. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0747-7>
- Jiang, Y. V., Won, B.-Y., & Swallow, K. M. (2014). First saccadic eye movement reveals persistent attentional guidance by implicit learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40, 1161-1173. <https://doi.org/10.1037/a0035961>
- Jiang, Y. V., Won, B.-Y., Swallow, K. M., & Mussack, D. M. (2014). Spatial reference frame of attention in a large outdoor environment. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40, 1346-1357. <https://doi.org/10.1037/a0036779>
- Jonides, J. (1980). Towards a model of the mind's eye's movement. *Canadian Journal of Psychology*, 34, 103-112. <http://doi.org/10.1037/h0081031>
- Kabata, T., & Matsumoto, E. (2012). Cueing effects of target location probability and repetition. *Vision Research*, 73, 23-29. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2012.09.014>
- Katyal, S., Zughni, S., Greene, C., & Ress, D. (2010). Topography of covert visual attention in human superior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 104, 3074-3083. <https://doi.org/10.1152/jn.00283.2010>
- Krauzlis, R. J., Lovejoy, L. P., & Zénon, A. (2013). Superior colliculus and visual spatial attention. *Annual Review of Neuroscience*, 36, 165-182. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062012-170249>
- Kruijne, W., & Meeter, M. (2015). The long and the short of priming in visual search. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 77, 1558-1573. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0860-2>
- Leber, A. B., Gwinn, R. E., Hong, Y., & O'Toole, R. J. (2016). Implicitly learned suppression of irrelevant spatial locations. *Psychonomic Bulletin and Review*, 23, 1873-1881. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1065-y>
- Lee, M. D., & Wagenmakers, E.-J. (2013). *Bayesian Cognitive Modeling: A Practical Course*. New York: Cambridge University Press.
- Li, C.-L., Aivar, M. P., Tong, M. H., & Hayhoe, M. M. (2018). Memory shapes visual search strategies in large-scale environments. *Scientific Reports*, 8, 4324. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22731-w>
- Lucas, N., Schwartz, S., Leroy, R., Pavin, S., Diserens, K., & Vuilleumier, P. (2013). Gambling against neglect: Unconscious spatial biases induced by reward reinforcement in healthy people and brain-damaged patients. *Cortex*, 49, 2616-2627. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.06.004>
- Maljkovic, V., & Nakayama, K. (1996). Priming of pop-out: II. The role of position. *Perception and Psychophysics*, 58, 977-991. <https://doi.org/10.3758/BF03206826>
- Manelis, A., & Reder, L. M. (2012). Procedural learning and associative memory mechanisms contribute to contextual cueing: Evidence from fMRI and eye-tracking. *Learning and Memory*, 19, 527-534. <https://doi.org/10.1101/lm.025973.112>
- Montefinese, M., Sulpizio, V., Galati, G., & Committeri, G. (2015). Age-related effects on spatial memory across viewpoint changes relative to different reference frames. *Psychological Research*, 79, 687-697. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0598-9>
- Oh, S. H., & Kim, M.-S. (2004). The role of spatial working memory in visual search efficiency. *Psychonomic Bulletin and Review*, 11, 275-281. <https://doi.org/10.3758/BF03196570>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Reber, P. J. (2013). The neural basis of implicit learning and memory: a review of neuropsychological and neuroimaging research. *Neuropsychologia*, 51, 2026-2042. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.06.019>
- Salovich, N. A., Remington, R. W., & Jiang, Y. V. (2018). Acquisition of habitual visual attention and transfer to related tasks. *Psychonomic Bulletin and Review*, 25, 1052-1058. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1341-5>
- Schultz, W., & Dickinson, A. (2000). Neuronal coding of prediction errors. *Annual Review of Neuroscience*, 23, 473-500. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.23.1.473>
- Schwark, J., & Dolgov, I. (2013). The influence of spatial and feature probability cuing in visual search. *Perception*, 42, 470-472. <https://doi.org/10.1068/p7469>
- Serences, J. T., & Yantis, S. (2006). Selective visual attention and perceptual coherence. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.11.008>
- Serences, J. T., & Yantis, S. (2007). Spatially selective representations of voluntary and stimulus-driven attentional

- priority in human occipital, parietal, and frontal cortex. *Cerebral Cortex*, *17*, 284-293. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhj146>
- Shaqiri, A., & Anderson, B. (2012). Spatial probability cuing and right hemisphere damage. *Brain and Cognition*, *80*, 352-360. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.08.006>
- Shaqiri, A., & Anderson, B. (2013). Priming and statistical learning in right brain damaged patients. *Neuropsychologia*, *51*, 2526-2533. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.09.024>
- Sisk, C. A., Twedell, E. L., Koutstaal, W., Cooper, S. E., & Jiang, Y. V. (2018). Implicitly-learned spatial attention is unimpaired in patients with Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, *119*, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.07.030>
- Smith, A. D., Hood, B. M., & Gilchrist, I. D. (2010). Probabilistic cuing in large-scale environmental search. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*, 605-618. <https://doi.org/10.1037/a0018280>
- Smith, A. D., Wallace, F., Hood, B., & Gilchrist, I. D. (2009). Mechanisms of large-scale environmental search: Probability cueing depends on the relationship between landmarks and target distribution. *Cognitive Processing*, *10*(Suppl 2), 305-306. <https://doi.org/10.1007/s10339-009-0312-9>
- Theeuwes, J. (1994). Endogenous and exogenous control of visual selection. *Perception*, *23*, 429-440. <https://doi.org/10.1068/p230429>
- Theeuwes, J. (2004). Top-down search strategies cannot override attentional capture. *Psychonomic Bulletin and Review*, *11*, 65-70. <https://doi.org/10.3758/BF03206462>
- Thompson, K. G., & Bichot, N. P. (2005). A visual salience map in the primate frontal eye field. *Progress in Brain Research*, *147*, 251-262. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(04\)47019-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(04)47019-8)
- Turk-Browne, N. B., Jungé, J. A., & Scholl, B. J. (2005). The automaticity of visual statistical learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, *134*, 552-564. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.134.4.552>
- Turk-Browne, N. B., Scholl, B. J., Chun, M. M., & Johnson, M. K. (2009). Neural evidence of statistical learning: Efficient detection of visual regularities without awareness. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*, 1934-1945. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21131>
- Twedell, E. L., Koutstaal, W., & Jiang, Y. V. (2017). Aging affects the balance between goal-guided and habitual spatial attention. *Psychonomic Bulletin and Review*, *24*, 1135-1141. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1214-3>
- Walthew, C., & Gilchrist, I. D. (2006). Target location probability effects in visual search: An effect of sequential dependencies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*, 1294-1301. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.5.1294>
- Wang, B., & Theeuwes, J. (2018a). How to inhibit a distractor location? Statistical learning versus active, top-down suppression. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *80*, 860-870. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1493-z>
- Wang, B., & Theeuwes, J. (2018b). Statistical regularities modulate attentional capture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *44*, 13-17. <https://doi.org/10.1037/xhp0000472>
- Wendt, M., Kluwe, R. H., & Vietze, I. (2008). Location-specific versus hemisphere-specific adaptation of processing selectivity. *Psychonomic Bulletin and Review*, *15*, 135-140. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.1.135>
- Wolfe, J. M., Alvarez, G. A., & Horowitz, T. S. (2000). Attention is fast but volition is slow. *Nature*, *406*, 691. <https://doi.org/10.1038/35021132>
- Won, B.-Y., & Jiang, Y. V. (2015). Spatial working memory interferes with explicit, but not probabilistic cuing of spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *41*, 787-806. <http://doi.org/10.1037/xlm0000040>
- Won, B.-Y., & Leber, A. B. (2016). Search for targets in visual working memory is biased by statistical learning. *Journal of Vision*, *16*, 365. <https://doi.org/10.1167/16.12.365>
- Won, B.-Y., Lee, H. J., & Jiang, Y. V. (2015). Statistical learning modulates the direction of the first head movement in a large-scale search task. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *77*, 2229-2239. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0957-7>
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2004). Visual search is slowed when visuospatial working memory is occupied. *Psychonomic Bulletin and Review*, *11*, 269-274. <https://doi.org/10.3758/BF03196569>

## 확률 단서 효과의 속성과 발생 기제

홍인재<sup>1,2</sup>, 정수근<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국뇌연구원 뇌신경망연구부, <sup>2</sup>연세대학교 심리학과

독립적으로 발생한 사건들을 경험적으로 누적하여 하나의 규칙성을 발견하고, 이를 이용해 자극 출현 확률이 높은 공간으로 공간 주의의 편향이 유발되는 것을 확률 단서 효과(probability cueing effect)라 한다. 확률 단서 학습은 다수의 사건들로부터 통계적 규칙성을 암묵적으로 추론해낸다는 점에서 인간의 효율적인 정보 통합 능력을 보여준다. 확률 단서 학습은 기존의 상향 및 하향적 주의 모델로 설명되지 않는 습관성 주의의 증거를 제시한다는 점에서 중요성이 크지만 확률 단서 효과의 발생 기제에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 본 개관 논문에서는 선행 연구들을 통해 확률 단서 효과의 속성을 살펴보았다. 또한, 확률 단서 학습이 발생하는 과정에 대한 기존의 모델과 수정된 모델을 제안하고, 이를 검증하기 위한 신경학적 연구의 방향성을 논의하였다.

**주제어:** 확률 단서 효과, 시각 탐색, 통계학습, 개관