

ex-Gaussian 모형을 활용한 인지적 과제의 반응시간 분포 분석

The ex-Gaussian analysis of reaction time distributions for cognitive experiments

박형범** · 현주석**†

Hyung-Bum Park** · Joo-Seok Hyun**†

중앙대학교 심리학과**

Department of Psychology, Chung-Ang University

Abstract

Although most behavioral reaction times (RTs) for cognitive tasks exhibit positively skewed distributions, the majority of studies primarily rely on a measure of central tendency (e.g. mean) which can cause misinterpretations of data's underlying property. The purpose of current study is to introduce procedures for describing characteristics of RT distributions, thereby effectively examine the influence of experimental manipulations. On the basis of assumption that RT distribution can be represented as a convolution of Gaussian and exponential variables, we fitted the ex-Gaussian function under a maximum-likelihood method. The ex-Gaussian function provides quantitative parameters of distributional properties and the probability density functions. Here we exemplified distributional analysis by using empirical RT data from two conventional visual search tasks, and attempted theoretical interpretation for setsize effect leading proportional mean RT delays. We believe that distributional RT analysis with a mathematical function beyond the central tendency estimates could provide insights into various theoretical and individual difference studies.

Key words: reaction time, distributional analysis, ex-Gaussian model

요약

대부분의 인지적 과제에서 관찰되는 반응시간 자료의 분포는 정적으로 편포되어 나타남에도 불구하고, 반응시간을 종속측정치로 하는 대다수의 연구들은 표본 평균에 근거한 집중경향치 분석에 의존한다. 본 연구에서는 반응시간 자료의 분포특성에 분석의 초점을 맞추어 실험적 처치의 효과를 구체적으로 추론하는 방법을 소개하였다. 평균 반응시간의 변화는 그 분포상 가우시안 및 지수 분포가 혼합된 형태로 나타난다고 가정할 수 있으며, 최대우도 추정법에 근거한 ex-Gaussian 모형 검증을 통해 반응시간 분포 특성을 수치화된 파라미터로 산출하고 확률밀도함수를 구현할 수 있다. 분석 사례를 위해 두 가지 고전적 시각탐색과제에서 얻어진 반응시간 자료를 사용하였으며, ex-Gaussian 함수를 통해 탐색배열의 항목개수의 증가가 초래하는 평균 반응시간의 지연효과에 대한 해석을 시도하였다. 수리적 모형을 통한 반응시간 분포 분석은 고전적 집중경향치 분석의 한계를 넘어 반응시간을 활용한 다양한 이론 및 개인차 연구에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 반응시간, 분포분석, ex-Gaussian 모형

※ 본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012R1A1A2044320)

† 교신저자 : 현주석(중앙대학교 사회과학대학 심리학과, 인지 및 지각 심리학 전공)

Email: jshyun@cau.ac.kr

TEL: 02-820-5128

Fax: 02-816-5124

반응시간(reaction time, RT)은 인간이 외부 환경과 상호작용하는 과정에서 이루어지는 정보처리 특성을 조사하기 위한 대표적인 측정치로, 정확도(accuracy)와 더불어 수십 년간 인지 및 실험 심리학에서의 주요 종속변인으로 활용되어왔다. 반응시간의 역사는 19세기 후반 각각 Wundt와 Galton으로 대표되는 실험심리학(experimental psychology) 및 차이심리학(differential psychology)까지 거슬러 올라가나, 비교적 최근의 인지심리학에서 대표적인 사례는 시각적 탐색(visual search) 과제를 활용한 시각적 주의(visual attention) 연구들에서 찾을 수 있다(Treisman & Gelade, 1980; Bundesen, 1990; Duncan & Humphreys, 1989; Wolfe, 1998). 실험실 장면에서 이루어지는 시각적 탐색의 경우 일상생활의 다양한 탐색 상황을 축약하므로 이 때 반응시간 자료는 인간의 시각적 주의 및 정보처리를 탐색하기 위한 주요 측정치로 사용된다.

주의처리의 원리를 탐구하고 정보처리 모형을 구축하고자 했던 연구들과 더불어, 차이심리학의 관점에서도 반응시간과 지능 사이의 관계성을 밝히고 새로운 지능 측정의 지표를 제안하고자 하는 노력이 이루어져왔다(Jensen & Munro, 1979; Jensen, Schafer, & Crinella, 1981; Frearson & Eysenck, 1986; Sternberg 1966). 이들은 행동적 반응시간이 정신 속도(mental speed)을 반영하는 것으로 간주하여 반응시간과 지능의 일반요인(general factor)의 상관을 분석하는데 초점을 맞추었다.

1. 반응시간 자료와 분포특성

평균(mean)과 변량(variance)에 근거한 고전적인 반응시간 분석은 간단한 절차를 통해 실험적 처치의 효과를 검증할 수 있으며 다양한 실험 패러다임에 적용 가능하다는 장점이 있다. 그러나 대개 인지적 과제에서 나타나는 반응시간 분포는 잔여 행동반응(residual motor response)이나 의사결정(decision making) 과정의 잡음, 추측 등 반응지연의 영향으로 오른쪽 꼬리(right tail)가 길게 늘어진 정적 편포(positive skew)의 형태로 나타난다(Luce, 1986; Van Zandt, 2000). 따라서 정상분포가 아닌 자료를 대상으로 표본의 평균 반응시간을 집중경향치(central tendency)로 간주할 경우 그 기저에 깔린 처리특성을 왜곡시킬 가능성이 있다.

구체적인 예시를 위해 Figure 1에 동일하게 500 밀리세컨드(ms)를 평균으로 하는 두 가지 가상의 반응시간 분포를 도해하였다. 그림에서 점선 그래프와 같이 정적 편포를 이루는 반응시간 자료에 대해 500ms를 대표값으로 지정하는 것은 실제 과제수행의 반응특성에 대한 오해를 초래할 가능성이 있다. 이러한 문제의 대안으로 최근의 연구들은 중앙치(median)를 보고하기도하나 이 역시 실험 참가자의 반응시간 분포특성을 효율적으로 기술하기에는 한계가 있다. 일반적으로 정적 편포를 이루는 반응시간 자료를 그 분포에 근거하여 분석하기 위한 일련의 노력은 오래 전부터 지속되어왔으나(Ratcliff, 1979; Heathcote, Popiel, & Mewhort, 1991; Heathcote, 1996; Hockley, 1984; Hohle,

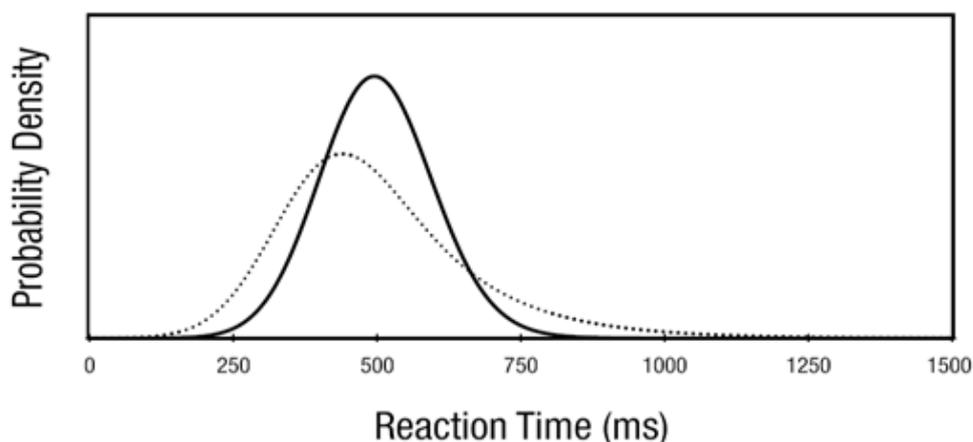


Figure 1. Two virtual RT distributions those mean RTs are equally 500ms. A solid line represents a standard Gaussian distribution and a dotted line represents positively skewed distribution.

1965), 여전히 반응시간을 주요 종속변인으로 하는 대다수의 연구들은 오직 표본 평균에 근거하여 자료를 해석하고 있다. 따라서 본 연구에서는 평균과 변량에 근거한 고전적인 집중경향치 분석이 지니는 한계를 극복하고 반응시간 자료를 보다 효율적으로 분석하기 위해 분포 특성에 초점을 맞추어 실험적 처치의 효과를 기술하고 인지적 처리과정의 질적 이해를 시도하는 방법을 개관하였다.

반응시간 자료의 분포는 다음과 같은 정보를 제공한다. 첫째로, 단위시간에 따른 반응 보고비율을 통해 실험 참가자의 주된 반응 경향을 조건 간에 비교할 수 있다. 둘째는 분포의 형태로, 이는 반응시간 분포의 변산 및 왜도(skewness)에 의해 결정된다. 이와 같이 반응빈도가 집중된 시간 및 분포의 모양 두 가지 요인의 조합을 통해 실험적 처치가 반응시간에 초래한 영향을 보다 구체적으로 추정할 수 있다. 예를 들어 통제조건에 비해 처치조건이 평균 200ms의 반응시간 지연을 나타냈다고 가정할 때, 가능한 처치조건인 반응시간 분포 두 가지를 Figure 2에 도해하였다. 처치조건에서 관찰된 반응시간 지연은 통제조건인 반응시간 분포를 유지한 채 전반적으로 지연된(rightward shift) 분포와(Figure 2A), 지연반응 비율 증가에 따른

편포성의 증가(Figure 2B) 두 가지 경우 내에서 초래될 수 있다. 각각의 경우는 모두 통제 조건으로부터 동일한 평균 반응시간 증가를 초래하지만, 서로 분명하게 다른 처치의 효과를 반영하므로 구체적인 처치의 효과를 추론하기 위해서는 반응시간 분포를 살펴보는 것이 요구된다.

2. ex-Gaussian 함수와 반응시간 분포분석

반응시간 자료의 분포를 분석하기 위한 방법 중 한 가지는 Vincentizing이라 불리는 비모수적 기법(non-parametric technique)으로, 개별참가자의 반응시간 분포에 분위수 정규화(quantile normalization) 절차를 통해 집단의 평균 반응시간 분포를 구현하는 것이다(Ratcliff, 1979). 그러나 실험적 처치의 효과 측면에서 반응시간 분포의 변화를 구체적으로 파악하기 위해서는 수리적 모형(mathematical model)에 근거하여 경험적 반응시간 분포를 효율적으로 기술하는 파라미터를 추정하는 방법이 사용될 수 있다.

과제특성 및 분석의 초점에 따라 다양한 수리적 모형을 적용할 수 있는데(Luce, 1986; Van Zandt, 2000), 대표적으로 ex-Gaussian을 비롯하여 Weibull, Wald 모

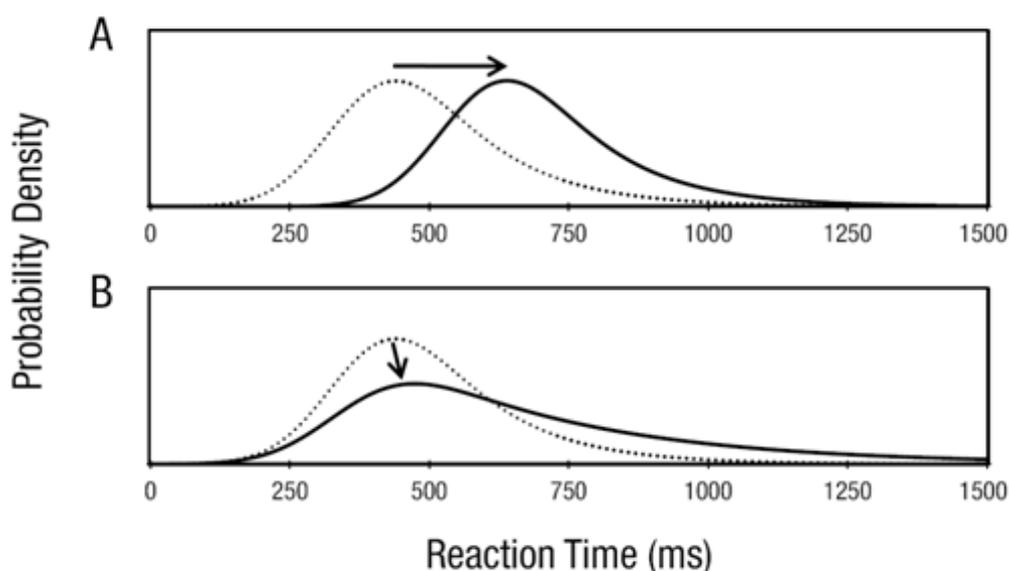


Figure 2. Two possible RT distributions (solid lines) resulting in 200ms mean RT delay from the control RT set (dotted line). This effect of 200ms delay in mean RT can be reflected by (A) a rightward shift, or (B) a stretching of right tail of RT distribution.

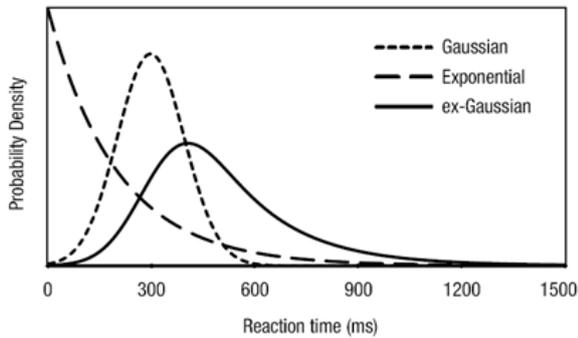


Figure 3. The ex-Gaussian probability density function (sold line) resulted from a mixture of a Gaussian function (short dashed line) and an exponential function (long dashed line).

형 등을 꼽을 수 있다. 각각의 모형은 서로 배타적이거나 완전하다는 것을 의미하지는 않는다(see for review, Van Zandt, 2000; Rouder & Speckman, 2004).

본 논문에서는 ex-Gaussian 모형을 채택하여 반응시간 분포를 기술하였다. ex-Gaussian 모형은 반응시간 분포에 대한 직관적인 가정에 바탕을 두며, 다양한 실험과제를 수행한 많은 연구들에서 경험적 반응시간 자료 분포를 기술하는데 효율적(well-fitted)임이 반복적으로 보고된 바 있다(Ratcliff & Murdock, 1976; Hockley, 1984; Heathcote et al., 1991; Rohrer & Wixted, 1994; Balota & Spieler, 1999; Balota & Yap, 2011). 또한 통계 패키지나 MATLAB에 기반한 toolbox 등을 통해 비교적 간편하게 분석이 가능하고(RTSYS: Heathcote, 1996; DISTRIB toolbox: Lacouture & Cousineau, 2008; QMPE: Brown & Heathcote, 2003), 실험 참가자들의 경험적 반응시간 자료를 수리적 함수에 적용, 수치화된 파라미터를 산출함으로써 반응시간 분포 특성을 기술하는 요인들의 양적 분석을 통해 실험적 처치의 효과를 분석할 수 있도록 한다는 점에서 그 장점이 있다.

ex-Gaussian 모형은 반응시간 분포가 가우시안 분포와 지수 분포의 복합으로 나타난다고 가정하며(exponentially modified Gaussian distribution; Figure 3), 이에 따라 분포 특성을 결정하는 세 가지 파라미터 μ (뮤)와 σ (시그마), 그리고 τ (타우)를 산출한다. μ 와 σ 는 가우시안 분포에서의 평균과 변량을 반영하며, τ 는 지수 분포의 오른쪽 꼬리 길이를 통해 편포성의 정도를 반영한다.

ex-Gaussian 분포의 평균과 변량은 각각 $\mu + \tau$ 와 $\sigma^2 + \tau^2$ 이다(Ratcliff, 1978).

다음 공식을 통해 최대우도 추정법(maximum likelihood estimation)에 근거한 ex-Gaussian 함수의 확률밀도함수(probability density function)를 구현할 수 있다:

$$f(x|\mu, \sigma, \tau) = \frac{1}{\tau} \exp\left(\frac{\mu}{\tau} + \frac{\sigma^2}{2\tau^2} - \frac{x}{\tau}\right) \Phi\left(\frac{x - \mu - \frac{\sigma^2}{\tau}}{\sigma}\right)$$

공식에서 exp는 지수 분포를, Φ 부분은 가우시안 분포의 누적밀도함수(cumulative density function)를 나타낸다. 구체적으로, 경험적 반응시간 자료를 토대로 반복적 알고리즘을(iterative algorithm)을 적용하여 반응시간 분포를 가장 적합하게 기술하는 ex-Gaussian 파라미터 값을 산출할 수 있으며, 모형 검증의 적합도(goodness-of-fit)는 우도 값(likelihood value)에 의해 평가된다(see for tutorial, Myung, 2003).

세 가지 ex-Gaussian 파라미터의 조합에 따른 가상의 반응시간 확률밀도 그래프를 Figure 4에 예시하였다. 그림에서 분포 B, C, 그리고 D는 모두 분포 A에서 평균 200ms 지연된 반응시간을 도출해낸다. μ 와 σ , 그리고 τ 값이 각각 500, 100, 0 ms인 가우시안 분포 A를 기준으로 할 때, 분포 C는 형태를 유지한 단순 지연을 나타내며 ex-Gaussian 파라미터 중 μ 값에서만 증가가 있다. 이와는 대조적으로 분포 B는 τ 값의 증가에 의해 나타나며 이는 편포성 증가를 반영한다. μ 와 τ 두 가지 파라미터가 모두 평균 반응시간 지연에 영향을 미치는 경우, D와 같은 반응시간 분포를 추정할 수 있다.

3. ex-Gaussian 함수를 이용한 시각적 탐색과제의 반응시간 분석

3.1 실험과제 및 자료수집

본 단락에서는 두 가지 시각적 탐색과제에서 얻어진 반응시간 자료를 토대로 ex-Gaussian 함수를 활용하여 항목개수 처치가 반응시간에 초래하는 영향을 살펴본다. 일반적인 시각탐색과제에서 실험 참가자는 다수의 방해자극 가운데서 하나의 표적 자극의 출현

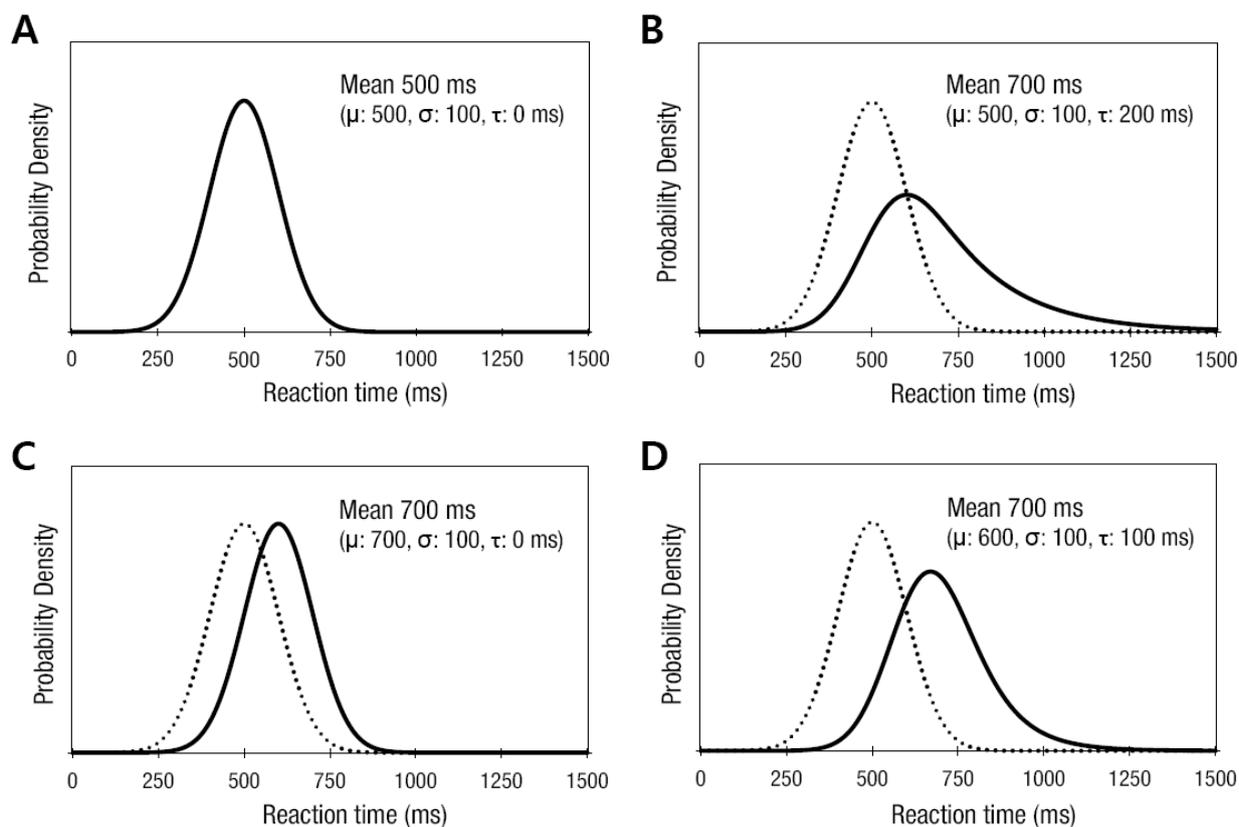


Figure 4. PDF(probability density functions) in a combination of three ex-Gaussian parameter values underlying given mean estimates. Dashed line in panel B, C, and D is a Gaussian PDF of panel A.

여부를 판단하는 과제를 수행하며, 탐색배열의 제시 시점으로부터 표적 유무를 판단하고 행동적 보고에 소요된 시간을 종속추정치로 사용한다. 이 때 탐색 효율성(search efficiency)은 탐색 배열에 제시되는 항목 개수 증가에 따른 반응시간의 지연 정도로 정의할 수 있으며, 반응시간 기울기(RT slope)를 통해 산출된다(e.g., ms/item). 반응시간과 항목개수의 관계에 근거한 기울기 함수는 시각적 주의처리 기제와 관련된 다양한 모형을 검증하는데 있어 중요한 지표로 작용되어 왔다(Wolfe, 1994).

탐색 효율성 지표를 활용한 고전적 시각탐색 연구들은 단순 세부특징 탐색(simple feature search)과 결합 탐색(conjunction search) 과제를 통해 표적자극과 방해 자극이 동일한 세부특징 차원을 공유하는지의 여부에 따라 서로 구분되는 탐색기제를 관찰하였다(Nakayama & Silverman, 1986; Treisman, 1982; Treisman & Sato, 1990). 단순 세부특징 탐색의 경우 표적자극은 방해 자극과 현저하게 구분되므로 항목개수와 관계없이 표적 자극에 매우 신속한 주의이동이 발생한다. 이 때 표적

탐색에 소요되는 반응시간은 항목개수와 관계없이 일정한 형태로 나타난다. 반면, 방해자극이 표적자극과 공유된 세부특징을 지닌 결합 탐색에서는 각각의 항목에 순차적인 주의이동이 일어나므로, 탐색 배열에 제시되는 항목개수가 증가함에 따라 표적 탐색에 소요되는 시간이 선형적으로 증가하는 것으로 알려져 있다(Treisman, 1988). 두 가지 경우는 병렬적 처리(parallel process)와 순차적 처리(serial process)의 다소 복잡하고 명확히 결론을 내리기 어려운 이론적 배경과 관련이 있는데(Townsend, 1971; Cave & Wolfe, 1990; see for review, Thornton & Gilden, 2007), 이 때 단순 평균 반응시간 추정치를 넘어 그 분포를 살펴보는 것은 논쟁이 되는 모형을 설명하는 데 있어 중요한 방법이 될 수 있다(Wolfe, 2003).

본 논문에서는 ex-Gaussian 모형검증을 통한 반응시간 분포분석의 적용 사례를 소개하는 것에 논의의 중점을 둔다. 최대우도 추정법에 근거하여 모형 적합도가 높은 ex-Gaussian 확률밀도함수를 구현하기 위해서는 많은 시행수가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 Harvard

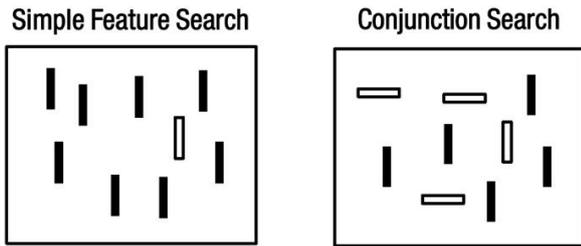


Figure 5. Example displays of two visual search tasks. Participants searched for a red (white in figure) vertical rectangle among green (black in figure) vertical rectangles (simple feature search) or green vertical and red horizontal rectangles (conjunction search). Figure 6. Mean search performances as a function of (A) accuracy x set size and (B) correct RT x set size. The error bars above and in all subsequent charts represent the standard error of mean (SEM).

대학교의 Visual Attention Lab에서 제공하는 시각탐색 과제 공개 데이터 세트를 사용하였다(http://search.bwh.harvard.edu/new/data_set.html; see for original data use, Wolfe, Palmer, & Horowitz, 2010; see also, Wolfe, 1998). 사용된 자료는 9명의 실험 참가자들로부터 단순 세부 특징 탐색과 결합 탐색과제 당 각각 4,000 시행을 실시한 것으로, ex-Gaussian 함수를 통해 개인별 반응시간 분포를 추정하기에 매우 충분한 시행 수를 제공한다.

실험은 공학용 소프트웨어 MATLAB 및 Psychophysics Toolbox를 통해 구현되었다(Brainard, 1997). 탐색 자극

은 방위(3.5° x 1°)와 색상(초록과 빨강)으로 구성되며 각의 과제에서 표적은 빨간색 세로 막대로 지정되었다(Figure 5). 따라서 방해자극은 단순탐색에서 초록색 세로막대, 결합탐색에서 초록색 가로 막대 및 빨간색 가로 막대이다. 항목개수는 조건에 따라 3, 6, 12, 18 개로 나뉘어졌으며, 화면 중앙을 기준으로 22.5° 크기의 사각형 내에 무선적으로 제시되었다. 매 시행은 짧은 소리 톤과 함께 시작되며, 500ms 이후 탐색 배열이 제시되었다. 실험 참가자들은 표적으로 지정된 자극의 출현 여부를 키보드를 통해 보고하였으며, 500ms의 피드백 제시 이후 1,000ms의 시행간 간격을 두고 다음 시행이 시작되었다. 실험 참가자들은 최대한 빠르고 정확하게 표적을 탐색하도록 지시 받았다.

3.2 자료분석

전체 시행의 정확도 및 정답시행에서의 반응시간 자료가 분석에 사용되었다. 반응시간 자료는 그 특성상 극단치(outlier)를 일부 포함하므로 타당한 수준에서 이를 제거할 필요가 있다. 극단치를 제거하는 방법은 다양하지만 1종 오류의 위험을 최대한 피할 수 있는 방법을 선택해야 한다(Ratcliff, 1993). 대표적으로 많이 사용되는 방법 중 하나는 평균을 기준으로 특정 표준편차(standard deviation, SD) 범위에서 벗어난 자료를 극단치로 간주하는 것이다. 그러나 본 논문에서 다루는 반응시간 분포와 같이 평균이 집중경향치로

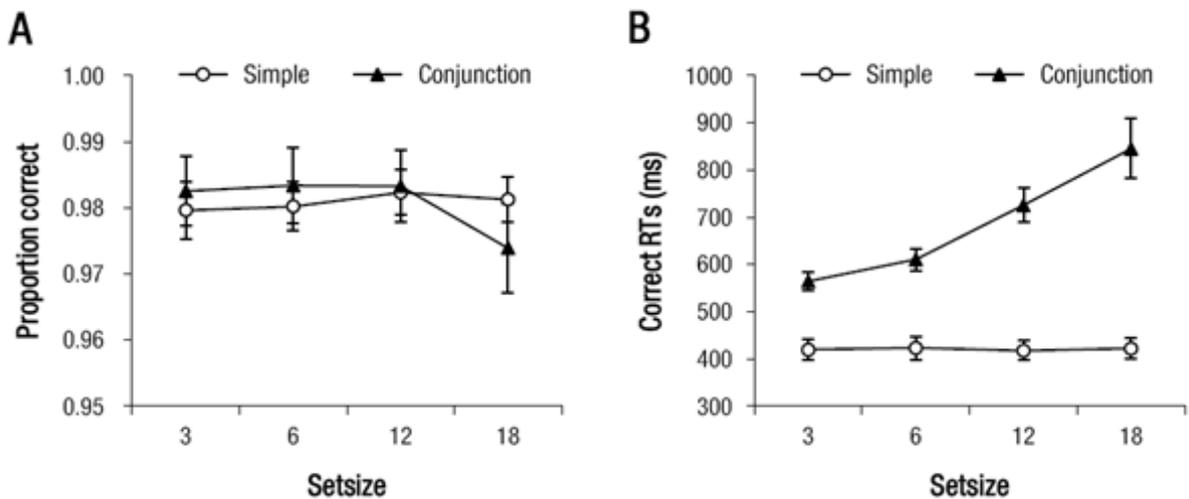


Figure 6. Mean search performances as a function of (A) accuracy x setsize and (B) correct RT x setsize. The error bars above and in all subsequent charts represent the standard error of mean (SEM).

간주되지 않는 경우, 임의의 반응시간 구간을 지정하는 ‘Cut-off’ 방법이 대안으로 사용될 수 있다. 일반적으로 비정상적으로 빠르거나 느린 반응시간은 과제에서 요구되는 인지적 처리 이외의 특성을 반영하는 극단치로 간주하는데, 연구자의 주관이 들어가므로 연구목적 및 과제특성을 고려하여 신중할 필요가 있다.

여기에서는 200ms 보다 빠르거나 2,000ms 보다 느린 반응시간을 보인 시행들은 결과분석에서 제외하였다. 그 결과, 단순 세부특징 탐색 과제에서 전체 35,277개의 정답시행 중 1.30%에 해당하는 459 시행(3개의 빠른 시행 및 456개의 느린 시행)이 제거되었으며, 결합 탐색과제에서는 전체 35,968개의 정답시행 중 1.31%에 해당하는 472 시행(3개의 빠른 시행 및 467개의 느린 시행)이

제거되었다. 방대한 표본 대비 제거된 시행 비중, 그리고 느린 반응의 기준으로 지정한 2,000ms이 두 과제에서의 평균 반응시간(단순: 420.53ms, 결합: 657.48ms) 및 표준편차(단순: 326.87ms, 결합: 368.82ms)를 기준으로 단순 및 결합탐색에서 각각 +4.83 SD, +3.56 SD로 비교적 보수적임을 고려할 때, 제거된 시행은 반응빈도에 초점을 둔 분포 분석에서 미미한 영향을 초래할 것으로 간주할 수 있다.

3.3 실험결과 및 논의

각 탐색과제에서 얻어진 탐색 정확도 및 정반응 반응시간을 Figure 6에 요약하였다. 단순 세부특징 탐색

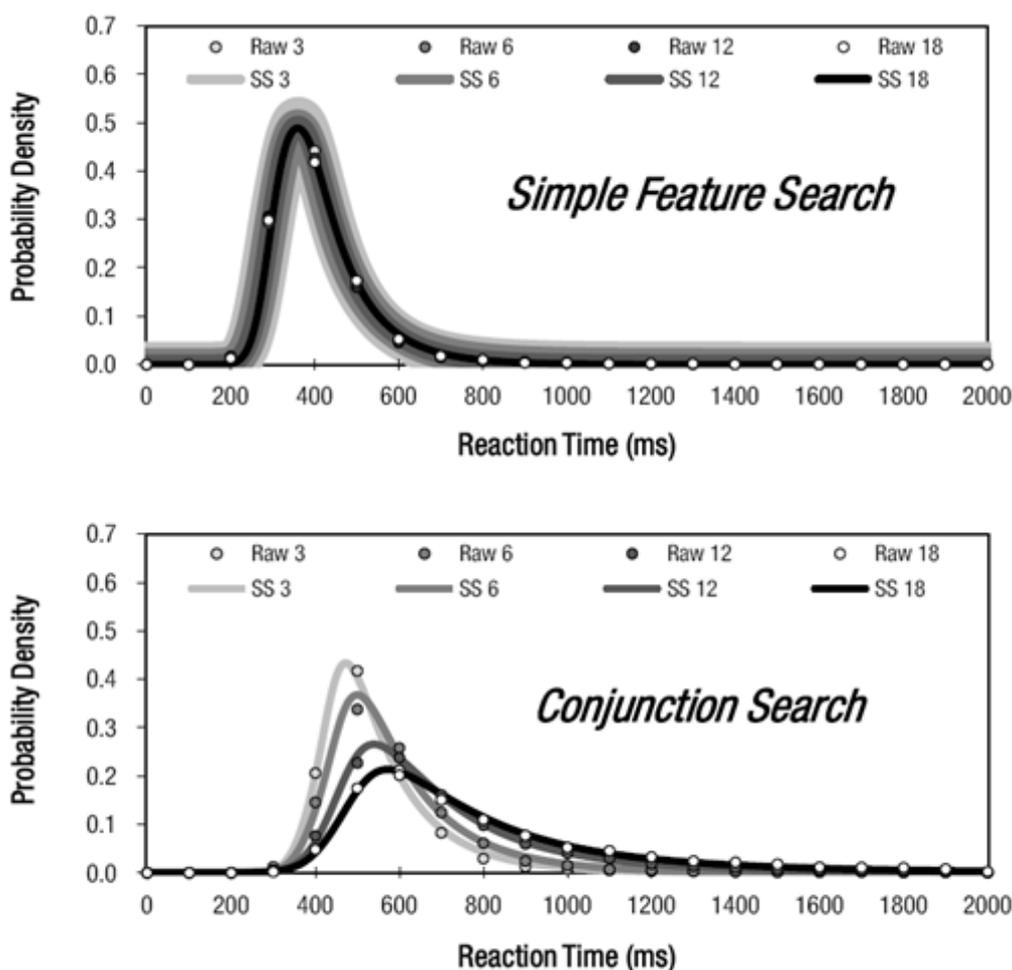


Figure 7. Probability density functions for RT distributions of each search task. Solid lines (SS in legend) represent the fitted ex-Gaussian functions and markers (Raw in legend) represent proportion response distribution of raw RT data in 100 ms-wide bins. Setsize is represented by lightness from setsize 3 (lightest grey line) to setsize 6, 12, and 18 (dark line).

의 경우, 항목개수 3, 6, 12, 18개 조건에서 정확도(각각 97.96, 98.02, 98.23, 98.12%; Figure 6A) 및 정반응 평균 반응시간(각각 419.2, 422.7, 416.7, 420.8ms; Figure 6B)은 항목개수가 증가함에도 불구하고 탐색과제 수행이 매우 효율적이었음을 의미한다. 이는 항목개수에 따른 유의미한 주효과가 관찰되지 않았다는 점에 의해 지지된다, 정확도에서 $F(3, 24) = .80, p = .504$, 정반응 반응시간에서 $F(3, 24) = .56, p = .647$.

결합 탐색의 경우, 항목개수 3, 6, 12, 18개 조건에서 정확도(98.25, 98.33, 98.33, 97.39%; Figure 6A) 및 정반응 평균 반응시간(564.4, 610.4, 725.3, 843.2ms; Figure 6B)은 실험 참가자들이 항목개수가 증가함에 따라 색상과 방위가 결합된 세부특징 탐색 과제 수행에서 어려움을 겪었음을 의미한다. 이러한 해석은 다양한 고전적 시각탐색 연구들에서 보고된 주장과 일치하며, 항목개수 변인의 주효과가 정확도와 반응시간 모두에서 유의미하게 나타났음에 의해 지지된다, 정확도에서 $F(3, 24) = 6.17, p < .01$, 그리고 반응시간에서 $F(1, 18) = 41.37, p < .001$. 구체적인 추수분석을 위해 쌍별 비교(follow-up pairwise comparison)를 실시한 결과, 유의미한 항목개수 효과는 정확도에서 항목개수 12-18개 구간에서만 발생하였으며($t(8) = 3.27, p < .05$), 정반응 반응시간에서 모든 항목개수 구간에서 관찰되었다(3-6개, 6-12개, 12-18개 구간에서 각각 $t(8) = -5.16, p < .001, t(8) = -5.32; p < .001, t(8) = -4.12, p < .01$).

다음으로, 반응시간 분포 분석을 위해 정반응 반응시간 자료를 최대우도 추정법에 근거한 ex-Gaussian 모형에 적용하고 산출된 확률밀도함수를 Figure 7에 도해하였다. 그래프에서 곡선(SS, setsize)은 ex-Gaussian 확률밀도함수를, 원형 표식(Raw)은 원 자료에서 100ms 구간마다 관찰된 반응비율을 의미한다. 곡선과 표식 모두에서 색상이 열린 회색에서 검정색으로 진행될 수록 항목개수가 3, 6, 12, 18개로 증가한 조건을 의미한다(용이한 식별을 위해 원 자료 항목개수 18 조건에서의 표식은 흰색으로 표기하였음). 항목개수 조건마다 원 자료에서의 반응비율이 확률밀도 곡선상에 유사하게 위치한다는 점을 통해 ex-Gaussian 함수가 반응시간 자료의 분포를 매우 적합하게 추정한다는 점을 알 수 있다.

탐색과제의 종류에 따라 항목개수 효과는 분명한 차이를 나타낸다. Figure 7 상단의 단순 세부특징 탐색

에서 반응시간 분포는 그 모양 및 반응빈도가 집중된 시간적 특성에 있어 항목개수 조건간에 거의 동일한 형태로 그려진다. 반면 Figure 7 하단의 결합탐색에서는 항목개수가 3, 6, 12, 18개로 증가함에 따라 반응시간 분포가 명확하게 변화한 점을 관찰할 수 있다. 중요한 것은, 평균 반응시간 분석에서 관찰된 유의미한 항목개수 효과(Figure 6B)가 단순히 결합 세부특징 표적 탐색에 소요되는 시간을 전반적으로 더디게 만들었다기보다는 반응시간 분포의 편포성을 증가시키는 다른 형태의 지연 효과와 복합적으로 발생하였다는 점이다.

결합탐색에서 항목개수 효과가 어떠한 형태로 평균 반응시간의 지연을 초래하였는지 구체적으로 조사하기 위해, Figure 8에 ex-Gaussian 모형 검증을 통해 산출된 세 가지 ex-Gaussian 파라미터 값을 요약하였다. 먼저 단순 세부특징 탐색의 경우(Figure 8 좌측), 항목개수 변인(3, 6, 12, 18개)과 ex-Gaussian 파라미터(μ, σ, τ)의 상호작용은 관찰되지 않았으며($F(6, 48) = 1.25, p = .299$), 항목개수의 주효과 역시 관찰되지 않았다($F(3, 24) = .88, p = .099$). 각각의 파라미터 별로 항목개수에 대한 반복 측정 일원변량분석(repeated-measure 1-way ANOVA)을 실시한 결과, 모든 파라미터에서 주효과는 유의미하지 않았다, $\mu(F(3, 24) = 1.02, p = .400)$, $\sigma(F(3, 24) = .75, p = .535)$, $\tau(F(3, 24) = 1.42, p = .263)$. 이러한 결과는 단순 세부특징 탐색에서 표적 탐색은 항목개수 증가와 관계 없이 매우 효율적으로 일어난다는 기존 연구 결과들과 일치한다.

결합탐색의 경우(Figure 8 우측), 항목개수 변인과 ex-Gaussian 파라미터간에 유의미한 상호작용이 관찰되었으며($F(6, 48) = 6.52, p < .001$), 항목개수의 주효과 역시 관찰되었다($F(3, 24) = 40.47, p < .001$). 항목개수의 주효과를 초래한 각각의 파라미터 값에 대하여 반복 측정 일원변량분석(repeated-measure 1-way ANOVA)을 실시한 결과, 모든 파라미터에서 유의미한 주효과가 관찰되었다, $\mu(F(3, 24) = 40.72, p < .001)$, $\sigma(F(3, 24) = 10.57, p < .001)$, $\tau(F(3, 24) = 14.34, p < .001)$. 항목개수와 ex-Gaussian 파라미터간의 유의미한 상호작용은 항목개수 증가에 따른 τ 값의 상대적으로 가파른 증가에 기인하는 것으로 판단되며, 항목개수가 증가하는 구간(3-6개, 6-12개, 12-18개)에 따른 각 ex-Gaussian 파라미

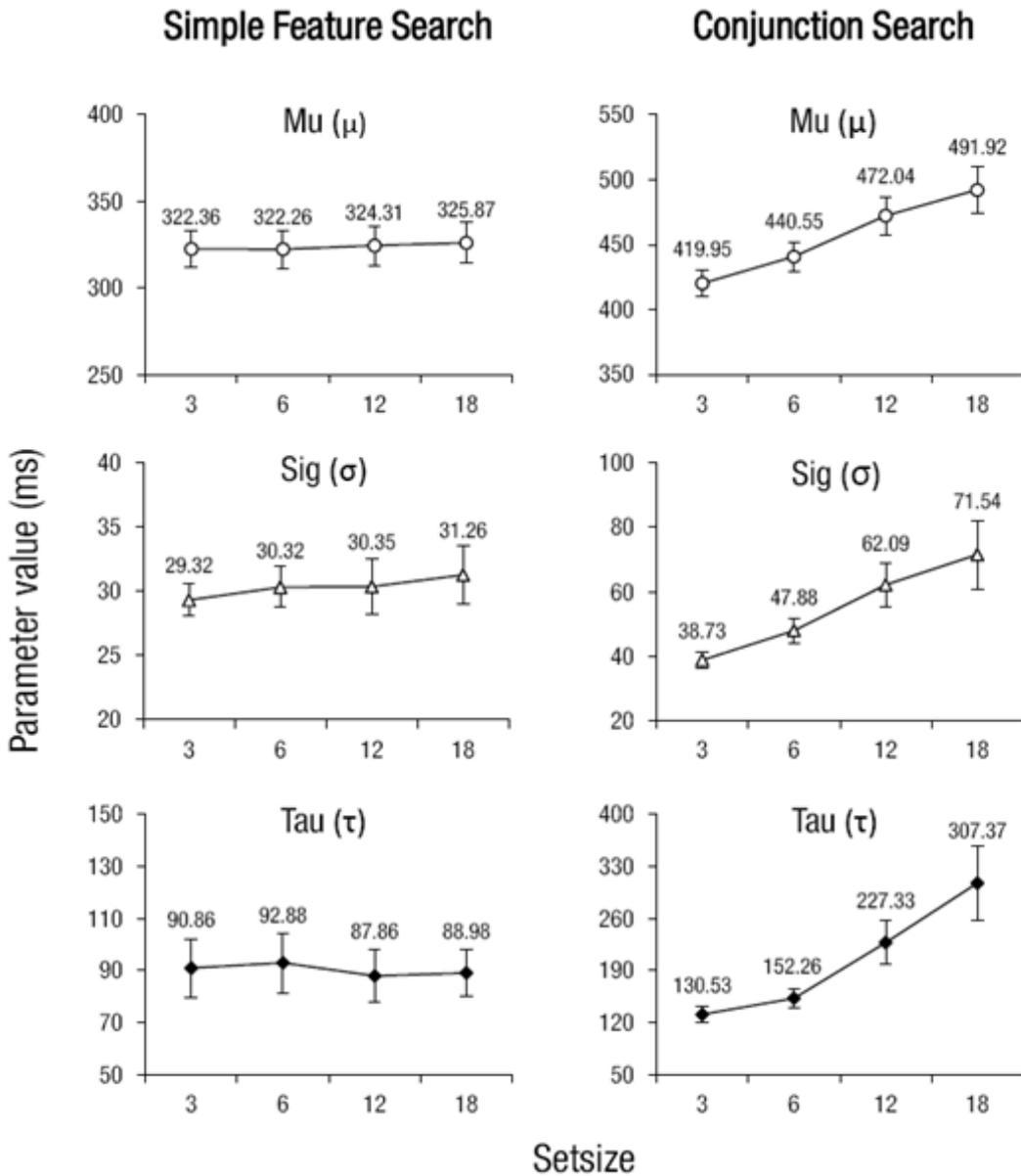


Figure 8. Average ex-Gaussian parameter values at each setsize conditions in simple search task (left) and conjunction search task (right).

터의 기울기(μ : 6.87, 5.25, 3.31ms/item, σ : 3.05, 2.37, 1.58ms/item, τ : 7.25, 12.51, 13.34ms/item)의 차이에 의해 뒷받침된다. 이는 결합 탐색 상황에서 항목개수 증가가 세 가지 ex-Gaussian 파라미터에 가산적 효과(additive effect)를 초래하기 보다는, 의사결정 과정에 가중된 잡음을 초래함으로써 상대적으로 지연 반응의 비율을 더욱 증가시키는 형태로 관찰되었음을 의미한다.

종합하여 결합 탐색과제에서 평균 반응시간의 지연을 초래하는 항목개수 효과는 반응시간 분포상에서 가우시안 및 지수 분포 영향을 함께 나타내며, 이는

표적과 단일 세부특징 차원을 공유하는 방해자극 속성으로 인해 개별 항목에 순차적인 주의를 할당하는 완전한 순차적 탐색기제를 반영한다기보다는 표적 제시 여부를 평가하고 행동반응을 내리기까지의 의사결정 과정에서 초래되는 잡음을 동시에 반영할 가능성을 시사한다.

4. 종합 논의

본 논문에서는 반응시간 자료의 분포 분석을 통해

평균과 변량에 근거한 고전적인 반응시간 자료 분석이 지니는 한계를 극복하고 실험적 처치의 효과를 구체적으로 추론하는 방법을 소개하였다. 분석 사례를 위해 단순 세부특징 탐색 및 결합 세부특징 탐색의 두 가지 고전적 시각탐색과제에서 얻어진 경험적 반응시간 자료가 사용되었으며, ex-Gaussian 모형 검증을 통해 조건에 따른 반응시간 분포 특성을 수치화된 파라미터로 산출하고 반응시간에 따른 확률밀도함수를 구현하였다. 분석 결과, 결합 탐색과제에서 탐색배열의 항목개수 증가에 의해 초래되는 평균 반응시간의 지연은 반응시간 분포의 단순 이동보다는 가우시안 및 지수 분포의 영향이 혼합된 형태로 나타났다. 또한 항목개수 증가에 따른 ex-Gaussian 파라미터 값의 증가패턴이 τ 에서 가장 분명하게 관찰되었다는 점은 결합 세부특징 표적에 대한 탐색이 완전한 순차적 주의처리에만 의존하지 않음을 주장한 기존 연구들에 부합하는 증거를 제시한다(Dehaene, 1989; Bichot, Rossi, & Desimone, 2005; Desimone & Duncan, 1995; McElree & Carrasco, 1999).

반응시간 분포분석을 통해 인지적 과제에서의 실험적 처치, 특히 개인차를 조사한 연구들은 ex-Gaussian의 τ 파라미터가 실험 참가자간 과제수행 특성 차이를 설명하는데 있어 가장 중요한 요인임을 보고하였다. 예를 들어, 조현병이나 ADHD 환자 군에서 관찰되는 인지적 과제의 평균 반응시간 증가를 반응시간 분포 특성에 초점을 맞추어 분석한 최근의 연구들은 정상인 집단에 비해 지연된 환자 집단의 반응시간이 그 분포의 편포성 증가, 즉 지연반응 비율 증가에 지배적인 영향을 받음을 관찰하였다(Leth-Steensen, Elbaz, & Douglas, 2000; Hwang, Gau, Tzang, & Hsu, 2013). 따라서 연구자들은 환자 집단에서 관찰되는 인지적 과제의 반응시간 증가가 전반적인 정보처리 속도의 결합에 의한 것이라기보다는 상대적으로 빈번한 주의통제의 일탈(lapses of attention control)을 반영한다고 주장하였다. 유사한 효과는 환자 군에서만 뿐만 아니라 연령이나 일반지능 등의 요인과 관련된 주의처리 능력 및 작업기억 용량의 개인차 연구들에서 다수 관찰된 바 있다(Spieler, Balota, & Faust, 1996; West, Murphy, Armiljo, Craik, & Stuss, 2002; Schmiedek, Oberauer, Wilhelm, Süß, & Wittmann, 2007; Tse, Balota, Yap, Duchek, & McCabe, 2010; Zahn,

Roberts, Cohen, & Schooler, 1998). 이러한 연구 결과들은 인지적 과제에서 얻어진 반응시간 스펙트럼에서 느린 반응시간의 특성이 개인의 일반 지능(general intelligence) 및 주의 통제, 작업기억 용량(working memory capacity)과 더욱 높은 상관을 보인다는 worst performance rule (Larson & Alderton, 1990; Coyle, 2003)의 가정과 일맥상통한다.

반응시간 분포의 편포성을 반영하는 τ 파라미터는 주의 및 작업기억 용량의 개인차와 밀접한 관련이 있음이 반복적으로 보고되었지만, 특정 ex-Gaussian 파라미터가 구체적으로 어떤 인지적 처리특성을 의미한다고 직접적으로 연결시키기에는 무리가 있다. 실제로 ex-Gaussian 활용한 일련의 연구들은 각 파라미터에 대해 다양한 해석을 시도하는데, 크게 구분하자면 μ 와 τ 중 어떤 것이 주의처리 및 반응선택 등과 관련된 순수한 고차적 인지처리를 반영하는지에 대한 주장이 엇갈린다(see for review, Matzke & Wagenmakers, 2009).

더욱 분명하게 말해서 ex-Gaussian 모형은 경험적 반응시간 자료를 효율적으로 추정하고 처치의 효과를 보다 구체적으로 추론할 수 있도록 하는 기술적(descriptive) 방법으로 이해할 수 있다(Luce, 1986). 따라서 정보처리 특성의 이해를 위한 반응시간 분포의 분석을 위해서는 random walk 모형(Ratcliff, 1978; Nosofsky & Palmeri, 1997) 및 diffusion 모형(Ratcliff & Rouder, 1998, 2000)과 같이 이론적 기반에 근거한 계산적 모형(computational model)과의 관계성을 통해 반응시간 자료를 분석할 필요가 있다. 부분적인 가정은 다르지만 간략한 수준에서 상기 모형들은 정보로부터 연속적인 증거의 축적(evidence accumulation)을 통해 반응기준(response criteria)에 도달하기까지의 일련의 정보처리를 가정한다. Diffusion 모형에서 중요한 파라미터는 반응기준과 drift rate로 정의할 수 있는데, ex-Gaussian과 diffusion 모형의 파라미터간 관계성을 조사한 연구들은 drift rate가 감각적 정보로부터의 정보 수집 효율성을 나타낸다는 점에 근거하여 ex-Gaussian τ 파라미터와의 관련성을 주장하였으나 (Schmiedek et al., 2007; Spieler, 2001), drift rate는 μ 와 τ 모두에 영향을 준다는 결과도 보고되었다(Ratcliff, 1978).

ex-Gaussian 함수와 같은 수리적 모형을 비롯하여 분위수 정규화 및 Vincentizing 기법 등 반응시간 분포

에 대한 기술적 분석은 그 자체로 정보처리 특성에 대한 명확한 이론적 시사점을 도출해내기에는 다소 제한이 있다. 이러한 이유로 ex-Gaussian 함수를 필두로 한 반응시간 분포 분석에 대한 관심은 주로 집단 및 개인차 연구 분야에서 집중되어왔다. 그러나 본 연구를 통해 저자는 적어도 충분한 이론적 가정을 바탕으로 반응시간 분포 특성에 대한 가설 검증을 시도할 경우, 논쟁이 되는 다양한 이론적 쟁점에 대한 새로운 증거를 제시할 가능성을 제안한다.

최근의 연구들은 반응시간 분포 분석을 통해 고전적 시각탐색 모형 및 시각적 주의 특성에 대한 재검증을 시도하고 있다(Cousineau & Shiffrin, 2004; Schall, Purcell, Heitz, Logan, & Palmeri, 2011; Anderson & Folk, 2010). 예를 들어, 본 연구에서 사용된 데이터 세트의 원저자는 반응시간 분포를 통해 시각 탐색과제에서 표적자극의 출현 여부에 따른 탐색 종료(search termination)에 관한 새로운 증거들을 제시하였다(Wolfe et al., 2010). 구체적으로, 이들은 반응시간 분포에 대한 비모수적 표준화 절차인 x-점수 변환(x-score transform)을 개발하여 분포 형태에 대한 분석을 시도한 결과, 시각탐색 표적이 출현하는 경우(target present)와 그렇지 않은 경우(target absent) 간의 분포가 서로 간에 매우 유사하다는 점을 관찰하였다. 이는 해당 저자를 포함하여 기존의 시각탐색 모형이 가정하던 바에 부합하지 않는 증거로, 논의부에서 기존에 발표되어왔던 Guided search 모형(Wolfe, 1994)이 수정, 보완되어야 할 필요성을 제기하였다.

유사한 맥락에서 반응시간 분포 분석은 시각적 주의 연구뿐만 아니라 작업기억의 특성을 탐구하는 연구에도 시사점을 제공할 수 있을 것으로 보인다. 일반적으로 작업기억의 용량은 매우 제한적인 것으로 알려져 있으나(Luck & Vogel, 1997; Cowan, 2001), 작업기억이 어떠한 방식으로 기억표상을 조직화하는지에 대해서는 지속적인 논쟁이 이어지고 있다. 크게 칸막이 모형(slot model)과 자원 모형(resource model)의 범주로 나뉘는 작업기억의 표상특성에 관한 논쟁은 주로 정확도 자료를 통해 기억 속 항목의 양적, 질적 특성에 대한 추론을 시도해 왔다(Zhang & Luck, 2008; Anderson & Awh, 2012; Bays & Husain, 2008; Wilken & Ma, 2004). 그러나 기억에 저장된 정보에 접근하고 인출 및 평가하여 행동 반응에 도달하기까지의 과정

을 내적 정보에 근거한 일련의 의사결정 처리로 간주할 경우(Pearson, Raškevičius, Bays, Pertzov, & Husain, 2014), 칸막이 및 자원 모형에서 가정하는 기억표상 특성에 따라 서로 분명히 구분되는 반응시간 분포를 예견할 수 있다. 이와 같은 이론적 가정을 토대로 본 연구의 저자는 ex-Gaussian 모형 검증을 통해 반응시간 분포 분석을 시도하여 작업기억 표상특성에 관한 새로운 증거를 제공하는 연구를 진행 중에 있다.

ex-Gaussian 모형은 경험적 반응시간 분포를 매우 적합하게 기술하고 개인 및 조건 별 반응시간 분포 특성을 수치화하여 그 효과를 양적으로 분석함으로써 고전적인 집중경향치 분석이 지니는 한계를 극복할 수 있다는 점에서 그 시사점을 가진다. 앞서 언급한 바와 같이 반응시간을 종속측정치로 하는 다양한 실험 패러다임에 적용 가능하고 비교적 간편한 절차를 통해 분석할 수 있으므로 인지 및 지각 심리학 뿐 아니라 인구 통계적 환경 또는 임상적 증후에 따른 인지적 특성과 같이 집단 및 개인차를 다루는 다양한 심리학 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Anderson, B. A., & Folk, C. L. (2010). Variations in the magnitude of attentional capture: Testing a two-process model. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*(2), 342-352.
- Anderson, D. E., & Awh, E. (2012). The plateau in mnemonic resolution across large set sizes indicates discrete resource limits in visual working memory. *Attention, Perception, & Psychophysics, 74*(5), 891-910.
- Balota, D. A., & Spieler, D. H. (1999). Word frequency, repetition, and lexicality effects in word recognition tasks: Beyond measures of central tendency. *Journal of Experimental Psychology: General, 128*(1), 32-55.
- Balota, D. A., & Yap, M. J. (2011). Moving beyond the mean in studies of mental chronometry: The power of response time distributional analyses. *Current Directions in Psychological Science, 20*(3), 160-166.

- Bays, P. M., & Husain, M. (2008). Dynamic shifts of limited working memory resources in human vision. *Science*, 321(5890), 851-854.
- Bichot, N. P., Rossi, A. F., & Desimone, R. (2005). Parallel and serial neural mechanisms for visual search in macaque area V4. *Science*, 308(5721), 529-534.
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10(4), 433 - 436.
- Brown, S., & Heathcote, A. (2003). QMLE: Fast, robust, and efficient estimation of distribution functions based on quantiles. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(4), 485-492.
- Bundesen, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological review*, 97(4), 523-547.
- Cave, K. R., & Wolfe, J. M. (1990). Modeling the role of parallel processing in visual search. *Cognitive psychology*, 22(2), 225-271.
- Cousineau, D., & Shiffrin, R. M. (2004). Termination of a visual search with large display size effects. *Spatial Vision*, 17(4), 327 - 352.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(01), 87-114.
- Coyle, T. R. (2003). A review of the worst performance rule: Evidence, theory, and alternative hypotheses. *Intelligence*, 31(6), 567 - 587.
- Dehaene, S. (1989). Discriminability and dimensionality effects in visual search for featural conjunctions: A functional pop-out. *Perception & Psychophysics*, 46(1), 72-80.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual review of neuroscience*, 18(1), 193-222.
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological review*, 96(3), 433-458.
- Frearson, W., & Eysenck, H. J. (1986). Intelligence, reaction time (RT) and a new 'odd-man-out' RT paradigm. *Personality and Individual Differences*, 7(6), 807-817.
- Heathcote, A., Popiel, S. J., & Mewhort, D. J. (1991). Analysis of response time distributions: An example using the Stroop task. *Psychological Bulletin*, 109(2), 340-347.
- Heathcote, A. (1996). RTSYS: A DOS application for the analysis of reaction time data. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 28(3), 427-445.
- Hockley, W. E. (1984). Analysis of response time distributions in the study of cognitive processes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 10(4), 598-615.
- Hohle, R. H. (1965). Inferred components of reaction time as a function of foreperiod duration. *Journal of Experimental Psychology*, 69(4), 382-386.
- Hwang Gu, S. L., Gau, S. S. F., Tzang, S. W., & Hsu, W. Y. (2013). The ex-Gaussian distribution of reaction times in adolescents with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Research in developmental disabilities*, 34(11), 3709-3719.
- Jensen, A. R., & Munro, E. (1979). Reaction time, movement time, and intelligence. *Intelligence*, 3(2), 121-126.
- Jensen, A. R., Schafer, E. W., & Crinella, F. M. (1981). Reaction time, evoked brain potentials, and psychometric g in the severely retarded. *Intelligence*, 5(2), 179-197.
- Lacouture, Y., & Cousineau, D. (2008). How to use MATLAB to fit the ex-Gaussian and other probability functions to a distribution of response times. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 4(1), 35-45.
- Larson, G. E., & Alderton, D. L. (1990). Reaction time variability and intelligence: A "worst performance" analysis of individual differences. *Intelligence*, 14(3), 309-325.
- Leth-Steensen, C., King Elbaz, Z., & Douglas, V. I. (2000). Mean response times, variability, and skew in the responding of ADHD children: a response time distributional approach. *Acta psychologica*, 104(2), 167-190.
- Luce, R. D. (1986). *Response Times: Their Role in Inferring Elementary Mental Organization*. Oxford University Press, New York, NY.

- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279-281.
- Matzke, D., & Wagenmakers, E. J. (2009). Psychological interpretation of the ex-Gaussian and shifted Wald parameters: A diffusion model analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(5), 798-817.
- McElree, B., & Carrasco, M. (1999). The temporal dynamics of visual search: evidence for parallel processing in feature and conjunction searches. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(6), 1517-1539.
- Myung, I. J. (2003). Tutorial on maximum likelihood estimation. *Journal of Mathematical Psychology*, 47(1), 90-100.
- Nakayama, K., & Silverman, G. H. (1986). Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature*, 320(6059), 264-265.
- Nosofsky, R. M., & Palmeri, T. J. (1997). An exemplar-based random walk model of speeded classification. *Psychological review*, 104(2), 266-300.
- Pearson, B., Raškevičius, J., Bays, P. M., Pertzov, Y., & Husain, M. (2014). Working memory retrieval as a decision process. *Journal of vision*, 14(2), 1-15.
- Ratcliff, R., & Murdock, B. B. (1976). Retrieval processes in recognition memory. *Psychological Review*, 83(3), 190-214.
- Ratcliff, R. (1978). A theory of memory retrieval. *Psychological Review*, 85(2), 59-108.
- Ratcliff, R. (1979). Group reaction time distributions and an analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86(3), 446-461.
- Ratcliff, R., & Rouder, J. N. (1998). Modeling response times for two-choice decisions. *Psychological Science*, 9(5), 347-356.
- Ratcliff, R., & Rouder, J. N. (2000). A diffusion model account of masking in two-choice letter identification. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 26(1), 127-140.
- Rohrer, D., & Wixted, J. T. (1994). An analysis of latency and interresponse time in free recall. *Memory & Cognition*, 22(5), 511-524.
- Rouder, J. N., & Speckman, P. L. (2004). An evaluation of the Vincentizing method of forming group-level response time distributions. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(3), 419-427.
- Schall, J. D., Purcell, B. A., Heitz, R. P., Logan, G. D., & Palmeri, T. J. (2011). Neural mechanisms of saccade target selection: gated accumulator model of the visual-motor cascade. *European Journal of Neuroscience*, 33(11), 1991-2002.
- Schmiedek, F., Oberauer, K., Wilhelm, O., Süß, H. M., & Wittmann, W. W. (2007). Individual differences in components of reaction time distributions and their relations to working memory and intelligence. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(3), 414-429.
- Spieler, D. H., Balota, D. A., & Faust, M. E. (1996). Stroop performance in healthy younger and older adults and in individuals with dementia of the Alzheimer's type. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(2), 461-479.
- Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, 153(3736), 652-654.
- Thornton, T. L., & Gildea, D. L. (2007). Parallel and serial processes in visual search. *Psychological review*, 114(1), 71-103.
- Townsend, J. T. (1971). A note on the identifiability of parallel and serial processes. *Perception & Psychophysics*, 10(3), 161-163.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97-136.
- Treisman, A. (1982). Perceptual grouping and attention in visual search for features and for objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8(2), 194-214.
- Treisman, A. (1988). Features and objects: The fourteenth Bartlett memorial lecture. *The quarterly journal of experimental psychology*, 40(2), 201-237.
- Treisman, A., & Sato, S. (1990). Conjunction search revisited. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 459-478.
- Tse, C. S., Balota, D. A., Yap, M. J., Duchek, J. M.,

- & McCabe, D. P. (2010). Effects of healthy aging and early stage dementia of the Alzheimer's type on components of response time distributions in three attention tasks. *Neuropsychology*, 24(3), 300-315.
- Van Zandt, T. (2000). How to fit a response time distribution. *Psychonomic bulletin & review*, 7(3), 424-465.
- West, R., Murphy, K. J., Armilio, M. L., Craik, F. I., & Stuss, D. T. (2002). Lapses of intention and performance variability reveal age-related increases in fluctuations of executive control. *Brain and cognition*, 49(3), 402-419.
- Wilken, P., & Ma, W. J. (2004). A detection theory account of change detection. *Journal of Vision*, 4(12), 1120-1135.
- Wolfe, J. M. (1994). Guided search 2.0 a revised model of visual search. *Psychonomic bulletin & review*, 1(2), 202-238.
- Wolfe, J. M. (1998). What can 1 million trials tell us about visual search?. *Psychological Science*, 9(1), 33-39.
- Wolfe, J. M. (2003). Moving towards solutions to some enduring controversies in visual search. *Trends in cognitive sciences*, 7(2), 70-76.
- Wolfe, J. M., Palmer, E. M., & Horowitz, T. S. (2010). Reaction time distributions constrain models of visual search. *Vision research*, 50(14), 1304-1311.
- Zahn, T. P., Roberts, B. P., Schooler, C., & Cohen, R. (1998). Manual and saccadic reaction time with constant and variable preparatory intervals in schizophrenia. *Journal of abnormal psychology*, 107(2), 328-337.
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, 453(7192), 233-235.

원고접수: 2014.05.07

수정접수: 2014.06.05

게재확정: 2014.06.12