

시각작업기억 연구를 위한 변화탐지 과제의 방법론적 제약 및 이론적 시사점에 대한 고찰*

현 주 석[†]

중앙대학교 심리학과

변화탐지 과제는 시각작업기억의 정보처리 특성을 이해하기 위한 과제로 널리 사용되어 왔다. 그러나 과거 분명치 않았던 변화탐지 과제의 여러 방법론적 제약들에 대한 재고의 필요성이 최근에 이르러 제기된 바 있다. 본 개관 논문에서는 이러한 변화탐지 과제의 방법론적 심층 논리를 소개하고 최근 지적된 과제 활용에 있어서의 제약들에 대한 이해를 시도하였다. 또한 이러한 제약 아래 방법론적 개선이 요구되는 변화탐지 과제의 주요 사안들을 구체적으로 논의하고 이에 비추어 관찰된 실험 결과에 대한 보수적인 해석이 필요함을 강조하였다.

주제어: 변화탐지 과제, 시각작업기억, 방법론적 근간, 개관

* 이 논문 또는 저서는 2016년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2016S1A5A2A01026073).

† 교신저자 : 현주석, 중앙대학교 사회과학대학 심리학과, (06974) 서울시 동작구 흑석로 84
Email : jshyun@cau.ac.kr

일상생활에서 주요 정보를 잠시 저장하고 활용하는데 사용되는 작업기억(working memory)은 인간의 고등 인지 기능과 깊은 관련이 있다 (Atkinson & Shiffrin, 1971; Baddeley, 1983; Baddeley, 1986; Luck & Hollingworth, 2008). 고전적 기억 연구에서 작업기억은 감각기억과 장기기억을 매개하는 임시저장소의 역할을 수행하는 것으로 해석되었으나 (Atkinson & Shiffrin, 1971; Baddeley & Hitch, 2014; Hurlstone, Hitch, & Baddeley, 2014; Shiffrin & Atkinson, 1969; Sperling, 1967) 최근에는 저장소만이 아니라 기억 정보를 선별 및 통제하는 고등 인지기능으로서의 역할이 강조된다 (Hu, Hitch, Baddeley, Zhang, & Allen, 2014).

최근 작업기억 연구들에서는 이와 같은 이론적 정의를 토대로 다양한 기억 측정 패러다임이 고안되었다. 이 중에는 단순한 지필 검사 형태인 경우도 있었으나 (Baddeley, Della Sala, Gray, Papagno, & Spinnler, 1997; Conway, Cowan, Bunting, Theriault, & Minkoff, 2002) 통제된 실험 연구를 위해 자극과 절차가 매우 정교하게 설계된 경우 또한 드물지 않다. 본 연구는 작업기억의 하위 체계들 중 하나인 시각작업기억(visual working memory, 이하 VWM) 연구를 위한 과제 패러다임으로서 최근 널리 사용되어 온 변화탐지(change detection) 과제의 특성을 살펴 방법론적 이해를 도모하고 해당 과제 패러다임의 문제점을 살펴 이에 대한 개선을 위한 주요 사안들을 탐색하였다.

변화탐지 과제의 특성

변화탐지 과제는 VWM에 대한 실험 연구

분야에서 큰 대중성을 확보해왔으나 최근 해당 과제에 관여하는 정보처리 특성에 대한 서로 다른 해석 및 그에 따른 단점이 지적되어 과제 개선 및 대안적 과제 고안의 필요성이 제기된 바 있다 (Alvarez & Cavanagh, 2004; Awh, Barton, & Vogel, 2007; Gilchrist & Cowan, 2014; Rouder, Morey, Morey, & Cowan, 2011). 그럼에도 불구하고 변화탐지 과제는 단순성과 융통성이라는 장점을 토대로 현재까지 널리 사용되고 있으며 기초 및 응용 전 분야에 걸쳐 VWM 관찰을 위한 보편적 측정 과제로서 인정받았다 (Allen, Hitch, Mate, & Baddeley, 2012; Cowan, Blume, & Saults, 2013; Fuller, Luck, McMahon, & Gold, 2005; Gold, Wilk, McMahon, & Luck, 2003; Gorgoraptis, Catalao, Bays, & Husain, 2011; Hyun, 2011; Oakes, Ross-Sheehy, & Luck, 2006; Thiele, Pratte, & Jeffrey, 2011; Zhang & Luck, 2011). 본 단락에서는 이러한 VWM에 대한 이론적 모형에 토대를 둔 변화탐지 과제의 특성을 이해하고 변화탐지 과제를 사용한 VWM 수행 측정 방법과 측정치 환산의 논리 및 장단점 등을 소개하였다.

변화탐지 과제 구성의 논리 및 수행 측정 변화탐지 과제는 1초 가량의 시간 차이를 두고 순차 제시되는 항목들 간 시각적 차이 여부에 대한 보고를 요구하는 단순한 과제이다. 이때 기억 부담의 증감 처치를 위해 단일 혹은 다양한 시각 속성들의 조합에 바탕을 둔 시각적으로 단순하거나 복잡한 항목들이 과제 자극으로 사용된다. 예를 들어 기억이 요구되는 항목(이하 기억항목)은 단일 혹은 둘 이상의 세부특징들의 조합으로 구성되며 이러한 세부

특징들로는 색상, 방위, 크기 및 형태 등을 예로 들 수 있다. 이 때 각각의 세부특징들은 서로 다른 항목에 걸쳐 상이한 차원값(feature value)이 부여되는 것이 일반적이다. 예를 들어 색상 변화탐지 과제에서는, 각각의 항목들에 범주 구분이 분명한 역치 이상의 색상들(supra-threshold colors)이 부여되며 필요에 따라서는 이러한 색상들 간의 결합(conjunction)이 처치되기도 한다(Jiang, Olson, & Chun, 2000; Luck & Hollingworth, 2008; Luck & Vogel, 1997; Wheeler & Treisman, 2002). 그 밖에도 실사 사물(real object) 및 얼굴 사진, 도안과 낱자 및 단어 등과 같은 사물 수준(object level)에 이르기까지, 자극 범주가 명백히 구분되는 다양한 시각 속성들이 변화탐지과제의 자극에 특별한 제한 없이 사용되었다(Alvarez & Cavanagh, 2004; Hollingworth, 2003; Park, Han, & Hyun, 2015; Pashler, 1988; Zelinsky, 2001).

변화탐지 과제의 각 시행에서 실시되는 기억검사는 기억항목의 제시 방식에 따라 전체 탐사(whole probe)와 부분 혹은 단일 탐사(partial or single probe) 형태로 나뉜다(Gilchrist & Cowan, 2014; Griffin & Nobre, 2003; Johnson, Hollingworth, & Luck, 2008; Luck & Vogel, 1997; Park, Zhang, & Hyun, 2017a; Vogel & Luck, 2000). 전체탐사 실험은, 기억항목과 대응되는 위치에 해당 항목과 동일한 검사항목들을 제시하는 변화없음 시행(no-change trial)과 검사항목들 중 하나를 그와 대응되는 기억항목과는 다른 항목으로 교체한 변화있음 시행(change trial)으로 구성된다. 반면 부분탐사 실험은 일부 기억항목들에 준 특정 하위 항목들 중 하나에 대해 변화있음 혹은 없음 처치가 시도되

며 더 나아가 단일탐사에서는 특정 단일 기억항목에 대해 이와 같은 처치가 시도된다. 세 유형 모두 이론적으로는 기억 항목에 대한 정확한 파지가 가능할 경우 착오없는 변화탐지가 가능한 것으로 가정되나 다양한 가외 변인들(예: 군집화 책략 등; Jiang et al., 2000; Jiang, Chun, & Olson, 2004)의 영향력을 배제하기 위해 단일탐사 기법이 주로 권장된다(Griffin & Nobre, 2003; Johnson et al., 2008; Pailian & Halberda, 2015; Park et al., 2017a; Wheeler & Treisman, 2002).

변화탐지 과제의 정확한 수행은 제시된 기억항목들에 대한 정확하고 선명한 VWM 표상을 형성하고 이를 착오 없이 파지 및 인출해 검사항목과 비교해 정확히 재인하는 능력을 필요로 한다. 따라서 변화탐지 과제는 VWM의 표상 형성 및 파지, 인출 더 나아가 재인 같은 일련의 정보처리 과정에 의존하는 복합적 과제 패러다임으로 정의되기도 한다(Hyun, Woodman, Vogel, Hollingworth, & Luck, 2009; Luck & Vogel, 2013; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, Woodman, & Luck, 2001; Vogel, Woodman, & Luck, 2005, 2006).

특히 변화탐지 과제는 기억된 항목에 대한 인출과 재인을 요구하는 단기재인(short-term recognition) 과제에 해당된다. VWM이 시야에 잠시 출현했다 사라진 사물 또는 사건을 단기 파지하는 능력임을 고려할 때(Luck & Hollingworth, 2008; Luck & Vogel, 1997), 기억 대상 항목들에 대한 단기파지를 요구하고 그와 동일한 혹은 일부가 교체된 항목(들)을 검사자극으로 제시해 상호 일치 여부를 판단하도록 요구하는 변화탐지 과제는 단기재인 검

사의 보편적 논리에 정확히 부합된다(Kahana & Sekuler, 2002; Sternberg, 1966, 1969). 따라서 변화탐지 과제에서 가장 핵심적인 종속 측정치는 기억과 검사 항목 간 비교를 토대로 변화의 유무를 정확히 보고하는 변화탐지 정확도이다. 성공적인 변화탐지는 기억부담이 초래하는 망각 및 간섭을 최소화하고 기억항목의 정확한 단기파지를 달성할 것을 요구한다(Kahana & Sekuler, 2002; Sternberg, 1966, 1969; Viswanathan, Perl, Visscher, Kahana, & Sekuler, 2010; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, McCollough, & Machizawa, 2005). 따라서 기억부담의 수준은 변화탐지 과제의 난이도와 직결되며 이에 따른 변화 탐지정확도는 기억부담에 대처하는 개인의 VWM 수행 능력을 반영하는 일차적 측정 지표로 정의된다.

먼저 고전적 변화탐지의 연구의 경우 변화탐지 과제의 기억부담 수준은 대개 기억항목의 개수 증감을 통해 처치되었다(Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2001; Vogel, Woodman et al., 2005; Woodman & Vogel, 2005). 이러한 처치의 가정과 논리는 매우 단순한데 구체적으로, VWM에는 저장 용량에는 한계가 있으므로 기억이 요구되는 항목 개수가 증가하면 기억부담이 상대적으로 증가할 수밖에 없으며 따라서 변화탐지 정확도 저하로 이어진다는 간단한 논리에 기초한다. 이러한 가정과 논리를 토대로 고전적 변화탐지 연구들은 증가하는 기억항목 개수가 증가할 때 특정 기억항목 개수 조건을 기점으로 변화탐지 정확도가 급격히 감소하는 것을 발견했으며 이를 토대로 VWM 저장 용량에는 항목 개수 기준으로 평균 3-4 항목 정도의 한계가 있음을 주장했다

(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2001).

변화탐지 과제에서는 VWM 부담의 수준을 달리하기 위한 또 다른 처치가 고려된다. 이는 기억항목의 시각적 복잡성에 대한 처치인데 예를 들어 기억항목의 개수가 동일한 두 변화탐지 과제이더라도 기억이 요구되는 항목들이 시각적으로 복잡한 과제에서 상대적으로 기억부담이 크다는 가정에 근거한다(Alvarez & Cavanagh, 2004; Awh et al., 2007; Eng, Chen, & Jiang, 2005; Fougne, Asplund, & Marois, 2010; Gao et al., 2009; Hardman & Cowan, 2015; Song & Jiang, 2006). 시각적 복잡성 처치는 항목개수 증감과는 달리 기억이 요구되는 항목 간 유사성 증감이 기억부담의 변화를 초래한다고 가정하는 점에서 분명한 차이가 있다. 이에 대한 상세한 소개는 변화탐지 과제의 문제점을 소개할 다음 단락에서 제공된다.

변화탐지과제의 문제점

무엇보다도 변화탐지 과제는 구성 자극 및 과제 구성 논리의 단순성 때문에 VWM 연구에서 널리 사용되었다. 변화탐지 과제의 핵심 가정은 기억이 요구되는 시각자극의 속성에 대한 작업기억 부호화 및 파지가 성공적일 경우 그 기억항목과 상이한 검사자극의 제시와 동시에 발생하는 현저한 변화에 대해 정확한 탐지가 가능하다는 점이다. 이러한 가정에 기초해 변화탐지 정확성 및 반응시간이 측정에 기초한 VWM의 특성이 조사되었으며 그 흔적은 기초심리학뿐만 아니라 응용 분야에서도 발견된다(Allen et al., 2012; Cowan et al., 2013;

Fuller et al., 2005; Gold et al., 2003; Gorgoraptis et al., 2011; Hyun, 2011; Oakes et al., 2006; Ross-Sheehy, Oakes, & Luck, 2003; Thiele et al., 2011; Zhang & Luck, 2011). 그럼에도 불구하고 변화탐지 과제에는 현재까지 이론적 타당성에 대한 검토를 요구하는 몇 가지 문제점들이 존재한다. 다음 단락에서는 이런 문제점들에 대한 소개해 이에 대한 해결책의 필요성을 강조한다.

정보처리단계의 불명확성 변화탐지에 관여하는 정보처리 과정은 대략적으로 부호화, 파지 및 비교처리 처리 과정의 세 이론적 단계로 구분된다(Han & Hyun, 2011; Hyun et al., 2009; Kang & Hyun, 2011; Vogel, McCollough et al., 2005; Vogel et al., 2006). 이러한 순차적 처리 단계 중 개인의 VWM 수행은 파지 단계에서 수행되는 기억 표상의 유지 능력에 의해 좌우되는 것으로 가정되는데(Adam, Mance, Fukuda, & Vogel, 2015; Tsubomi, Fukuda, Watanabe, & Vogel, 2013; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, McCollough, et al., 2005) 이는 변화탐지 과제의 자극 및 절차 구현에 있어서 중요한 제약을 초래한다.

먼저 변화탐지 과제에 사용되는 항목들에 대한 시각적 복잡성 증감 및 그에 따른 기억 부담 수준에 대한 처치가 변화탐지 정보처리 단계에 초래하는 영향에 대한 논란이 있었는데 그 이유는 다음과 같다. 먼저 기억항목의 시각적 복잡성에 대한 처치는 기억부담 수준에 대한 영향력 이전에 자극 복잡성 자체가 초래하는 감각적 부호화(sensory encoding)에 간섭을 초래한다(Eng et al., 2005; Kurawe &

Zimmer, 2015; Todd, Han, Harrison, & Marois, 2011; Vogel, McCollough et al., 2005). 따라서 기억항목의 시각적 복잡성에 대한 처치가 변화탐지 정확도를 증감시킬 경우 그것이 기억항목에 대한 부호화 과정에 초래된 감각적 부담 때문인지 아니면 부호화 성공 이후 초래된 기억 부담 때문인지 정확한 판단이 어려워진다. 따라서 이러한 가능성에 대한 명확한 통제와 구분 없이 기억항목에 대한 시각적 복잡성 처치가 VWM에 초래하는 영향을 명확히 규명하는 것은 사실상 어려울 수 있다.

기억항목의 시각적 복잡성 증가는 기억항목에 대한 부호화의 어려움뿐만 아니라 기억항목과 검사항목 각각을 구성하는 세부특징간 비교 대안(comparison alternatives)들의 확률적 증가를 초래해 검사항목이 출현과 동시에 제시되는 재인 처리과정에도 영향을 미친다(Bamber, 1969; Farell, 1985; Hyun et al., 2009). 이러한 비교 대안의 증가는 기억항목과 검사항목 간 시각적 유사성의 증가를 의미하며, 기억항목과 검사항목 간의 탐지의 대상이 되는 변화의 강도(change magnitude)를 저하시켜 검사항목 출현 시 예상되는 변화의 현출성(change saliency)을 감소시킨다. 이처럼 변화의 현출성 저하가 초래한 탐지 실패는 사실상 기억부담의 수준과 구분되는 해석을 요구하며 결과적으로 기억항목의 시각적 복잡성 증가에 따른 변화탐지 실패가 전적으로 기억부담의 증가가 원인인 것으로 해석하는 것은 문제가 있다(Awh et al., 2007; Barton, Ester, & Awh, 2009; Fukuda, Awh, & Vogel, 2010).

특히 상이한 세부특징들 간의 결합에 근거한 복잡성 처치뿐만 아니라 기억항목 간 공유

되는 특정 단일세부특징의 차원값(feature value)이 서로 유사하게 처리되어도(예: 파란색 vs. 하늘색) 기억항목의 시각적 복잡성은 역시 증가할 수 있다(Agam et al., 2009; Lin & Luck, 2012; Viswanathan et al., 2010; Zhou, Kahana, & Sekuler, 2004). 더군다나 특정 단일 세부특징 차원값이 유사한 상황에서 항목들간 상이한 세부특징 차원 간 결합에 기초한 기억 저장이 요구되면 이러한 처리의 목적에 해당하는 기억부담의 증가에 앞서 감각적 부호화 실패 및 재인 오류 가능성이 가파르게 증가한다(Dube, Zhou, Kahana, & Sekuler, 2014; Kahana & Sekuler, 2002; Viswanathan et al., 2010; Zhou et al., 2004).

또한 과거 여러 VWM 연구는 둘 이상의 세부특징을 보유한 기억항목에 대한 성공적인 변화탐지는 기억항목의 세부특징들 간 통합(integration)에 의해 형성된 단속적(discrete) 기억 표상에 근거한다고 주장한 바 있다(Awh et al., 2007; Johnson et al., 2008; Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2001; Xu & Chun, 2006). 반면 이를 지지하지 않는 연구들은 기억지연시간 동안 기억 표상에 초점주의가 집중되지 못하면 기억항목들을 구성하는 세부특징들이 서로 해리(dissociate)된다고 주장한다(Magnussen, 2000; Magnussen, Greenlee, & Thomas, 1996; Rensink, 2000a, 2000b, 2002). 이러한 반론은 복잡한 자극에 대해 성공적인 부호화 및 VWM 공고화 처리(Vogel et al., 2006) 이후 라도 기억 표상이 해리될 수 있으며, 기억항목에 대한 견고한 기억 표상의 형상에 성공한 이후일지라도 해당 표상에 대한 초점주의 유지에 실패할 경우 변화탐지 수행이 저하될 수 있음을 의미해 이

론적으로 문제가 된다(Allen et al., 2012; Brown & Brockmole, 2010; Zokaei, Heider, & Husain, 2014).

더 나아가 VWM 수행은 변화탐지 과제에서처럼 기억항목과 검사항목과의 비교에 기초한 재인에만 의존하지는 않는다. 기억항목에 대한 인출과 활용은 기억재인이 아닌 회상(recall)을 요구하는 경우가 빈번하며, 경우에 따라서는 회상에 근거한 기억항목의 재구성(reproduction)이 성공적 과제 수행에 결정적인 역할을 한다. 작업기억의 실제 활용 과정과 변화탐지 수행 사이의 이러한 간극은 결과적으로 변화탐지 과제가 VWM 처리 과정의 일부 측면만을 관찰한다는 제약을 의미하므로 변화탐지 수행 결과에 기초한 기억 모형을 VWM에 관한 처리 모형으로 일반화시키기에는 무리가 있다는 비판이 가능하다.

마지막으로 부호화, 과제 및 비교처리 과정은 변화탐지 과제와 같은 재인 처리 상황에 국한된 이론적 구분일 뿐이며 실제 VWM이 활용되는 일상생활의 재인 과제 수행이 이러한 단계적 정보처리에 의존한다고 일반화시키는 것은 그 근거가 매우 불분명하다. 예를 들어 VWM에 저장되는 정보 표상은 외부로부터 입력된 감각정보만이 아니라 장기기억으로부터 표상 인출에 의해서도 형성 가능하다. 따라서 현재까지 수행된 대다수의 변화탐지 과제는 입력 자극에 대한 감각적 부호화가 아닌 장기기억에서 인출된 정보에 근거한 VWM 표상 형성 과정에 대해 직접적 시사점을 제공하기 어렵다. 이러한 제약은 최근의 기억연구에서 작업기억과 장기기억의 밀접한 연계성을 부각시키는 연구 동향을 고려할 때 그 문제점

이 더욱 부각될 수 밖에 없다(Brady, Konkle, Alvarez, & Oliva, 2008; Brady, Konkle, Gill, Oliva, & Alvarez, 2013; Hollingworth, 2005, 2006; Luck & Hollingworth, 2008; Maxcey & Woodman, 2014; Oberauer, Awh, & Sutterer, 2017).

측정치 불명확성 및 자극과 절차 통제의 필요성 기억부담의 수준과 변화탐지 정확도 사이의 인과적 연관성을 고려해 특정 항목 개수의 변화탐지 정확도를 기억 수행 측정치로 사용하기에 앞서 고민이 필요한 사안이 있다. 먼저 기존 연구들에서는 기억항목의 개수가 점차 증가할 경우 특정 항목개수 조건을 기점으로 변화탐지 정확도가 급격히 감소한 것을 관찰했다(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2001). 대개 이러한 감소 시점의 항목 개수는 개인의 VWM 용량 한계를 추정할 측정치로 해석되었는데 여기에는 다소 이론적인 문제가 있다.

집단의 평균적 수행 자료에 근거한 고전적인 변화탐지 연구들은 특정 항목개수 조건에서의 급격한 탐지정확도 감소가 결국 참가자 모두에 걸친 평균적 수행 자료에 근거한 만큼 개인의 VWM 저장 용량에 한계가 있다는 보편적 시사점만을 제공한다. 따라서 변화탐지 과제에서 개인의 저장 용량에 대한 직접 추정(예: N 개) 및 개인차 특성 같은 구체적이고 실용적인 시사점은 제공하기 어렵다. 이를 보완하기 위한 후속 연구들은 VWM 용량을 초과하는 기억항목들에 대한 탐지 정확도의 급격한 감소가 무엇보다도 개별 참가자가 시도하는 추측 반응의 현저한 증가에 기인한 것으로 해석했다(Cowan, 2001; Cowan et al., 2005;

Park, Zhang, & Hyun, 2017b; Rouder et al., 2008). 즉 용량 한계를 초과한 기억항목 개수가 사용된 변화탐지 시행들 중에는 기억 저장에 성공한 항목들만이 아니라 실패한 항목들에 대한 변화탐지가 강제된 시행들이 있다. 이처럼 기억에 없는 항목들(items not in memory)에 대한 반응의사결정은 이론적으로 추측(guessing)에 의존하며 이러한 추측 반응은 용량을 초과하는 기억항목들이 증가함에 따라 함께 늘어난다. 결과적으로 개인의 VWM 용량에 대한 정확한 추정을 위해서는 변화탐지 수행 결과에서 이러한 추측 반응들을 배제하는 보정 과정의 개입이 절대적으로 중요하다.

이러한 추측 반응에 대한 보정이 추가되더라도 항목 단위(item-based)에 기초한 추정치 환산 방식에는 여전히 이론적 쟁점이 남아있다. 먼저, 보정이 가해진 개인의 VWM 용량 추정치는 개인이 몇 개 항목에 대한 저장을 토대로 특정 항목 조건의 변화탐지 정확도를 산출했는지를 가늠해준다는 점에서 매우 직관적 수행 측정치를 제공한다. 그러나 항목단위 구분이 불분명하고 통계적 다양성을 내포한 복잡한 시각장면에 대한 처리에 VWM이 개입함을 시사한 변화맹(change-blindness) 연구들은(Simons, Chabris, & Schnur, 2002; Simons & Levin, 1997; Simons & Rensink, 2005) VWM 정보 표상이 반드시 항목 단위에 기초하지는 않을 가능성을 드러낸다.

이러한 가능성은 개인의 VWM 용량 추정에 의존한 고전적 변화탐지 연구에 대한 반론의 계기를 제공한다. 구체적으로 변화탐지 방식을 고수한 많은 고전적 VWM 연구들은 과제 수행의 사용된 VWM 표상이 단속적인 특성을

가진다고 명시했다. 예를 들어 객체근원적(object-based) 항목 단위 표상 방식을 지지한 연구들은 기억용량을 초과하는 항목 개수들에 대한 변화탐지가 요구될 경우 선택된 소수 항목들에 대한 고선명도 표상이 형성되며 이들을 토대로 변화탐지가 수행된다고 가정한다(Luck & Vogel, 2013; Park et al., 2017b; Vogel & Luck, 1997; Zhang & Luck, 2008). 따라서 선택받지 못한 항목들에 대한 변화탐지는 전적으로 무선적 추측에 의존하며 이러한 추측 반응을 배제한 후 산출된 보정치는 변화탐지 수행에 사용된 고선명도 기억 표상의 개수에 관한 정량적 추정을 제공한다고 주장한다(Adam et al., 2015; Cowan, 2001; Luck & Vogel, 2013; Pashler, 1988; Rouder et al., 2008; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, McCollough, et al., 2005).

이에 반해 자원모형(resource model)은 기억항목들 전체가 산출하는 시각적 복잡성 수준에 따라 개별 기억항목에 탄력적으로 배분되는 처리 자원량에 의해 변화탐지 수행이 결정된다고 주장한다(Alvarez & Cavanagh, 2004; Bays, 2015; Bays, Catalao, & Husain, 2009; Bays & Husain, 2008; Van den Berg & Ma, 2014; Van den Berg, Shin, Chou, George, & Ma, 2012; Wilken & Ma, 2004). 자원모형에서는 결국 항목 단위에 근거한 개수 추정치보다는 기억 수행이 요구된 자극들 전체가 산출하는 시각적 복잡성의 추정을 중요시하며, 고전적 연구들에서 환산된 개인의 VWM 용량 추정치는 오히려 해당 연구에서 사용된 자극과 절차에 국한된다는 반론이 제기된다(Bengson & Luck, 2016; Suchow, Fougny, & Brady, 2014). 자원모

형의 반론은 한때 변화탐지 수행 결과로부터 환산된 개인의 VWM 용량 추정 방식 및 이 추정 결과에 기초한 개인차 연구가 크게 환영받았음을 고려할 때(Drew, McCollough, & Vogel, 2006; Fukuda & Vogel, 2009; McCollough, Machizawa, & Vogel, 2007; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, McCollough et al., 2005) 그 의미가 더욱 중요해진다.

그 밖에도 변화탐지 수행에 대한 양적 측정에는 기억부담 수준에 영향을 초래할 수 있는 자극과 절차 측면의 가의 변인에 대한 통제의 필요성이 다수 발견된다. 예를 들어 변화탐지 과제의 항목 개수 증가는 제시되는 자극들 간 거리를 단축시켜 과제 자극의 밀도를 증가시키므로 항목들간 군집화 책략(grouping strategy) 등의 개입 가능성이 증가한다(Wertheimer, 1924/1950; Woodman, Vecera, & Luck, 2003). 특히 변화탐지 대상 항목의 감각적 처리 과정에 영향을 초래할 수 있는 안구운동 역시 필요에 따라서는 통제 또는 강제할 필요가 있으며 자극과 응시점 간 거리인 이심률(eccentricity) 역시 기억항목에 대한 감각적 부호화 과정에 영향을 줄 수 있다(Hyun, 2008; Woodman & Luck, 2003). 또한 각 시행 내에서 서로 유사한 기억 및 검사 배열이 반복되므로 기억-검사 배열 간 혼동(sample-test array confusion)에 의한 과제 정확도 감소가 문제가 된다(Hyun et al., 2009).

변화탐지 과제에서 기억지연시간은 기억 정보의 파지에 영향을 미칠 것으로 흔히 예상되는 주요 변인 중 하나이다. 고전적 변화탐지 과제에서 흔히 사용된 기억과 검사 자극 간 기억지연 시간은 대개 1초 내외였으므로

(Hyun et al., 2009; Schmidt, Vogel, Woodman, & Luck, 2002; Vogel et al., 2001; Vogel et al., 2006), 감각기억의 개입 가능성에 대한 우려가 제기된다. 또한 부호화의 어려움이 예상되는 기억자극(예: 얼굴)이 사용된 경우 노출 시간이 1초 이상 연장된 사례가 발견되나(Curby & Gauthier, 2007; Eng et al., 2005), 이러한 특별한 경우를 제외하고는 대개 100-500ms 정도의 짧은 시간이 사용되므로(Hyun et al., 2009; Hyun & Luck, 2007; Luck & Vogel, 1997; Schmidt et al., 2002; Vogel et al., 2001; Vogel et al., 2006) 자극 부호화에 대한 간섭에 대한 우려가 제기될 수 있다. 검사항목의 노출 시간 역시 1초 이상인 경우부터(Hyun et al., 2009; Hyun & Luck, 2007; Luck & Vogel, 1997) 검사항목이 참가자의 반응 시점에 사라지는 방식을 통해 시행별로 변화한 경우도 발견된다(Wheeler & Treisman, 2002). 전자에 비해 후자의 경우 시행 소요 시간이 평균적으로 단축될 가능성이 있으나 참가자가 시행 종료를 서두를 경우 검사자극 노출 시간이 의도치 않게 단축되어 오히려 변화탐지 정확도가 저하될 가능성이 있다.

작업기억모형 반영의 한계 변화탐지과제를 사용한 현재까지 연구는 작업기억 모형(Baddeley, 1986)의 핵심을 이루는 중앙집행기와 같은 고등인지 기능에 대한 분명한 해석을 제공하기 어렵다. Baddeley의 작업기억 모형은 중앙집행기를 고전적 기억모형에 추가함으로써 단기기억 파지의 중요한 목적 중 하나인 정보의 능동적 선택과 통제 기능을 부각시켰다(Baddeley, 1996; D'esposito et al., 1995; Hu et

al., 2014; Logie & Marchetti, 1991). 특히 감각체계 별로 독립적인 기억저장소를 가정하는 작업기억 모형의 이론적 틀에 근거할 때 개별 기억저장소들에 저장될 정보를 선택하고 파지 및 인출을 조율하는 중앙집행기의 개념과 그에 따른 역할을 규명하는 것은 이론적으로 매우 중요하다.

VWM에 대한 중앙집행기의 영향력 중 기억에 저장될 정보가 선택되고 파지 및 인출되는 과정에 대한 경험적 증거들은 이미 다수의 변화탐지 연구에서 확보된 것으로 판단된다(Vogel, McCollough et al., 2005; Vogel, Woodman et al., 2005; Woodman & Vecera, 2011; Woodman & Vogel, 2005). 이 연구들은 기억항목의 다수 세부특징을 표상하는 과정과 기억 지연시간 및 인출 과정에서 예상되는 기억 간섭에 대한 억제 가능성 등을 조사함으로써 선택적 정보처리 능력이 VWM 수행에 분명한 영향력을 초래함을 보고했다. 그럼에도 불구하고 이 연구 결과들을 중앙집행기의 전반적 기능과 연계해 해석하려는 시도는 지금까지 흔치 않았다. 그 이유는 무엇보다도 변화탐지 과제에 관여하는 정보처리가 근본적으로 시각각 저장소라는 작업기억의 하위 체계 내에서 진행되기 때문에, 여러 기억 저장소를 총괄 통제하는 중앙집행기의 상위 체계 기능을 일반적 수준에서 설명하기에는 무리가 있기 때문이다(Suchow et al., 2014).

또한 변화탐지 과제의 측정치는 어디까지나 기억표상에 대한 명시적 회상이 아닌 단순 재인에 기초한다는 점에 주목할 필요가 있다. 이는 최근 유행하는 기억회상이나 재현에 기초한 명시적 측정(Bays et al., 2009; Bays &

Husain, 2008; Park et al., 2017a; Zhang & Luck, 2008, 2009) 시도와는 분명히 구분된다. 이러한 구분은 변화탐지 과제 수행의 결과물이 기억에 표상된 정보의 명시적 재구성이 아닌 해당 기억 표상을 매개로 한 암묵적 재인의 산물일 수 있다는 점에서 이론적으로 문제가 된다 (Agam et al., 2009; Buttle & Raymond, 2003; Fernandez-Duque & Thornton, 2000; Hyun et al., 2009; Shin & Hyun, 2013). 즉 작업기억의 특성으로는 명시적 조작이나 능동적 통제가 강조되는데(Baddeley, 1996; D'esposito et al., 1995; Logie & Marchetti, 1991), 만약 변화탐지 과정이 암묵적 수준의 자동적 정보처리에 의해 좌우된다면 사실상 작업기억 모형에 제공하는 이론적 시사점은 그 의미가 크게 반감된다.

종합논의

변화탐지 과제는 VWM 연구에 있어서 감각적 정보가 작업기억 수준의 정보로 전환되는 과정과 기억과 지각 및 재인 과정에 대한 관찰을 돕는 매우 유용한 기억과제이다. 또한 변화탐지 과제는 자극과 절차의 단순성 및 융통성으로 인해 작업기억에 관한 여러 연구들에서 활용되고 있다. 그럼에도 불구하고 변화탐지 과제에는 분명한 이론적, 방법론적 제약들이 있으며 이러한 제약에 대한 분명한 이해 없이 변화탐지 과제의 수행 결과를 토대로 VWM의 정보처리 특성에 대한 단정적 해석을 시도하는 것은 분명히 무리가 있다. 본 연구는 앞서 지적된 변화탐지 과제의 문제점에 대해 아래와 같은 대안적 방향에 대한 고려를 제안한다. 첫째, 변화탐지 과제의 정보처리 과정의 다

양성을 고려할 때 시각적 복잡성 처치가 초래하는 감각적 간섭의 가능성을 완전히 통제하기는 현실적으로 매우 어려우나 적어도 그것을 최소화하기 위한 대표적 방법에 대한 고려가 필요하다. 이러한 방법의 가장 단적인 사례는 역치 초과 자극을 사용하는 방법인데, 이는 개별 기억항목 자극 구현을 위해 특정 세부특징 차원값을 선택할 때 다른 항목들의 해당 세부특징 차원값과 현격한 차이가 있도록 선택하는 방법이다. 예를 들어 기억 자극을 구현할 때 자극들 간 서로 범주가 분명히 구분되는 색상 및 방위값들을 선택하면 기억 항목들 간 색상 혹은 방위 차원 각각의 유사성에 의한 간섭이 감소하며 따라서 세부특징들 간의 결합 수준에만 복잡성 처치가 국한될 가능성이 증가한다(Awh et al., 2007; Fukuda et al., 2010; Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2001). 다만 이러한 논리에 기초한 자극의 복잡성 처치는, 단일 세부특징 차원이 아닌 서로 다른 역치 이상 세부특징 간의 결합 처치가 충족되어야 한다는 점에서 관찰 결과의 일반화에 제약이 있다(Bays et al., 2009; Bays & Husain, 2008; Donkin, Nosofsky, Gold, & Shiffrin, 2013; Donkin, Tran, & Nosofsky, 2013; Huang, 2010).

물론 이러한 제약에 대한 극복이 전혀 불가능한 것은 아니다. Kahana와 Sekuler (2002)는 색상 혹은 방위 등과 같이 서로 질적으로 상이한 세부특징의 결합 보다는 정현파 막대자극(sine-wave gratings)의 직교 조합(orthogonal combination)에 근거한 복합 패턴 즉 격자무늬(lattice 혹은 compound gratings) 패턴을 사용해 시각적 복잡성을 처치하였다. 이러한 정현파

막대 자극에 기초한 격자무늬 자극은 색상 및 방위 등과 같은 서로 질적으로 상이한 세부특징들에 비해, 개별 세부특징 차원을 구성하는 정편파 막대들의 진폭, 주기 및 위상 정보를 달리해 역치 이상 및 이하 자극을 탄력적으로 구현할 수 있다는 장점이 있다. 또한 직교 조합된 막대 자극 범주들 간 정신물리학적 매개 변수(예: Weber 계수) 값에 의해 정상화된(normalized) 비교가 가능한 점에서 색상 혹은 방위, 형태 등의 상이한 차원을 사용할 경우 보다 정량적이고 객관적인 결과 해석이 가능하다는 장점이 있다.

역치이상 자극 사용만을 부호화 과정의 간섭을 감소시키기 위한 최선의 방법으로 제시하기에는 무리가 있다는 반론도 가능하다. 예를 들어 Olsson과 Poom (2005)은 단일세부특징 차원 내에서 범주 구분이 분명한 자극들을 사용했음에도 불구하고 추정된 VWM 저장용량이 1개로 국한된 것을 발견했다. 이는 경우에 따라서는 앞서 Kahana와 Sekuler (2002)의 실험에서처럼 단일 세부특징 차원에서 감각적 범주가 분명히 구분되도록 처치하더라도 사실상 기억 표상 및 파지 과정의 간섭(예: 초점주의 실패)에 의해 변화탐지 수행이 저하될 수 있음을 시사한다(Allen et al., 2012; Brown & Brockmole, 2010; Zokaei et al., 2014). 이러한 가능성은 Kahana와 Sekuler의 연구에 뒤이은 후속 연구에서도 항목간 유사성(inter-item similarity)에 의한 단기파지 간섭 가능성을 소개하면서 중요시된 바 있다(Viswanathan et al., 2010). 따라서 역치이상 세부특징 사용이 기억항목의 감각적 부호화를 방해하는 시각적 복잡성을 통제하기 위한 최적의 방법이라고 단언하기

보다는 그 가능성을 감소시키기 위한 최소한의 처치로 보는 것이 바람직하다.

시각적 복잡성의 증가는 기억부담 처치를 위해 기억항목의 개수를 단순 증가시킬 경우 또한 문제가 된다. 일반적으로 항목 개수 증가에 따른 시각적 복잡성의 증가는 부호화 및 재인과정에서의 부담을 줄이기 위한 기억 외적인 참가자 책략 예를 들어 군집화 책략의 개입 등으로 인해 변화탐지 과제의 수행 결과를 해석하는데 있어서 어려움을 초래한다(Jiang et al., 2004; Jiang et al., 2000). 물론 단 두 개의 기억항목이 제시되어도 필요하다면 군집화 책략이 사용될 수 있으므로 이러한 책략 개입이 항목 개수가 극단적으로 증가한 경우에만 필연적으로 수반되는 것은 아니다. 다만 항목개수 증가에 따른 자극 밀도의 증가는 이러한 군집화를 용이하게 하므로(Wagemans et al., 2012), 그 개입 가능성은 상대적으로 증가할 수밖에 없다.

최근 일련의 연구들은 VWM 수행을 결정하는 기억 표상의 다양성을 강조했는데, 예를 들어 다수 항목으로부터 산출이 예상되는 통계적 표상(ensemble representation)에 기초한 전일적 및 맥락적(holistic and contextual) 정보는(Brady & Alvarez, 2011; Brady, Konkle, & Alvarez, 2009; Brady & Tenenbaum, 2010)은 변화탐지가 요구되는 기억항목의 개수가 증가하면 그 활용 가능성이 증가한다. 특히 고전적 변화탐지 연구에서는 기억항목으로 사용된 자극 배열을 검사항목에도 거의 동일하게 노출시키는 전체탐사 방식이 주로 사용되었으므로 이러한 통계적 표상의 개입 가능성이 매우 컸다고 볼 수 있다. 이러한 문제점은 변화탐지

연구에서 기억항목 배열과 동일하거나 한 항목만을 교체하는 전체탐사 방법보다는 기억항목 중 특정 한 항목만을 검사해 책략 사용을 방해하거나 재인과정에서의 정보처리 부담을 감소시키는 단일탐사 방법이 권장되는 근거가 되기도 한다(Griffin & Nobre, 2003; Jiang, Lee, Asaad, & Remington, 2015; Johnson et al., 2008; Pailian & Halberda, 2015; Park et al., 2017a; Wheeler & Treisman, 2002).

요약해 볼 때 행동적인 수준의 관찰을 시도한 대다수의 변화탐지 과제에 관여하는 처리 단계별 오류 가능성을 정확히 구분하고 통제하는 방법을 고안하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이러한 어려움은 특히 앞서 언급한 바와 같이 변화탐지 과제에 사용되는 기억항목이나 검사항목들을 상대적으로 범주화가 용이한 역치이상의 세부특징들로 구성해야 한다는 제약 및 특정 재인검사 방식의 사용 요구와 같은 한계점을 초래한다. 따라서 변화탐지 처리 단계에 대한 이론적 구분이 명확해지고 해당 단계 구분에 따른 독립적인 관찰법이 고안되기 이전까지는 이러한 제약 아래 실시된 변화탐지 연구 결과의 일반화에는 신중한 해석이 요구된다.

둘째, VWM 용량을 초과하는 기억항목들에 대한 추측 반응의 현저한 증가에 대한 보정 방식의 적절한 사용이다(Cowan, 2001; Cowan et al., 2005; Park et al., 2017a; Pashler, 1988; Rouder et al., 2008). 기억에 저장되지 못한 항목들에 대한 추측 반응의 보정은 개인의 정확한 VWM 용량을 추정하는데 있어서 매우 중요한데 이를 위해서는 먼저 신호탐지 이론에 기초한 탐지민감도 지표(예: d')의 사용을 고려

할 수 있다(Donkin, Nosofsky et al., 2013; Donkin, Tran et al., 2013; Green & Swets, 1966; Salmela & Saarinen, 2013). 이는 먼저 변화있음 시행의 변화항목의 출현을 신호(signal)로 간주해 이를 제대로 탐지해 보고한 정반응인 적중(hit) 혹은 변화항목이 없음을 제대로 보고한 정기각(correct-rejection) 비율 그리고 신호 탐지에 실패한 오반응인 실수(miss) 혹은 신호가 없음에도 불구하고 있다고 오인한 탈루(false alarm) 비율에 따른 d' 을 계산한다. 여기서 추정된 d' 은 기억저장 용량을 초과하는 항목개수 조건에서 신호에 해당하는 '변화'를 탐지하지 못하고 추측에 의존해 산출된 반응의 영향력을 배제함으로써 탐지 정확도와 달리 개별 항목 개수 조건에서 상대적으로 정확한 변화탐지 민감도 추정치를 제공한다.

좀 더 직관적인 추정치에 해당하는 다른 한 가지는 적중과 정기각 및 실수와 탈루 비율을 고려한 항목개수 단위의 추정치인 K 값을 변화탐지 수행의 지표로 사용하는 방법이다(Cowan, 2001; Pashler, 1988; Vogel et al., 2006). 여기서 추정된 K 값은 기억에 저장되지 못한 항목에 대한 추측 반응의 확률을 고려해 특정 기억항목 개수 조건에서 해당 참가자가 정확히 몇 개의 항목을 기억에 저장해 변화탐지 정확도를 산출했는지를 추정한다. K 값은 개별 시행에서 기억 저장에 성공한 평균적 항목 개수를 명시하므로 VWM 저장 용량의 직관적 추정 지표로 d' 에 비해 현재 널리 사용되고 있다(Adam et al., 2015; Luck & Vogel, 2013; Pailian & Halberda, 2015; Rouder et al., 2011; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, McCollough et al., 2005). 특히 K 값 환산은 항목단위에 기초

한 단속적 표상 모형을 가정한 변화탐지 실험에 유용하며 Pashler's K는 전체탐사 과제에, Cowan's K는 단일탐사 과제에서의 개인의 VWM 용량 추정에 적합한 것으로 보고된 바 있다(Rouder et al., 2011). K 값 환산의 세부 절차 및 환산 공식은 해당 연구들을 참고하기 바란다.

셋째, 과거 변화탐지 과제 연구에서 그 중요성이 과소 평가된 행동 측정 자료에 대한 재조명의 필요성이다. 예를 들어 과거 변화탐지 수행 평가를 위한 관찰 측정치 중 그 중요성이 과소평가되었던 것이 있다. 이는 변화탐지 반응시간(change detection RT)인데, 정확도와 불가분의 관계에 있을 것으로 예상되는 반응시간 측정치는 지금까지 여러 변화탐지 연구들에서 탐지 정확도 측정치의 신뢰도 평가를 위한 요약 보고 수준에 머물거나 혹은 속도-정확도 교환(speed-accuracy tradeoff) 여부의 확인을 위한 보조 자료로 간주되었다(Hyun et al., 2009; Hyun & Luck, 2007). 그러나 최근에는 변화탐지 과제의 반응시간 측정치에 대한 수리적 분석을 통해 VWM의 정보 표상 방식에 대한 수렴적 가설 검증을 시도한 경우가 발견된다(Park et al., 2017b; Donkin, Nosofsky et al., 2013; Gilchrist & Cowan, 2014; Nosofsky & Donkin, 2016).

반응시간 자료는 대개 다수 시행에서 산출된 반응시간 측정치들에 대한 산술 평균 즉 평균 반응시간과 같은 기술적 통계치로 요약된다. 평균 반응시간은 계산상의 편의와 대중성으로 인해 실험적 처치가 초래하는 정보처리 속도의 변화를 가늠하기 위한 대표적 측정치로 널리 사용된다. 그러나 개별 시행들의

반응시간 측정치들을 빈도분포 형태로 시각화시켜 보면 평균 반응시간을 집중경향치(central tendency measure)로서의 신뢰하기 어렵다. 먼저 특정 처치 조건을 구성하는 다수 시행들의 반응 시간값들을 자극 출현 시점으로부터 특정 시점까지 배치해 빈도 혹은 확률 분포를 구성한다고 가정해보자. 해당 분포에는 일부 시행의 예외적 반응시간 측정치들에 의해 정적 편포(positive skew)가 나타날 가능성이 크다(Heathcote, Popiel, & Mewhort, 1991). 이러한 편포가 모든 반응시간 자료에서 꼭 나타나는 것은 아니지만, 편포가 있음에도 불구하고 평균 반응시간을 집중경향치로 사용할 경우 편포를 초래한 소수 시행의 측정치(극단치)들에 의해 그 대표성이 저하된다(Palmer, Horowitz, Torralba, & Wolfe, 2011). 따라서 반응시간 자료의 정적 편포 가능성은 평균 반응시간 자료를 토대로 특정 정보처리 과정의 기제를 밝히려는 모든 연구들에 공히 문제가 되며 변화탐지 과제에 대한 분석 또한 예외가 아니다. 경우에 따라서는 이에 대한 대안으로 중앙치 혹은 최빈치가 고려되기도 하나 이 역시 편포의 형태를 단일 측정치로 요약한다는 점에서 역시 그 대표성에 한계가 있다.

수리적 모형에 기초한 반응시간 분포 자료 분석 방법이 대중화되며 이 문제에 대한 부분적 해결 가능성이 발견된다(Zandt, 2000). 예를 들어 반응시간 분포를 수리적으로 분석하기 위한 대표적 방법 중 하나로 ex-Gaussian 분석이 있다(Banno & Saiki, 2015; Cowan & Saults, 2013; Park et al., 2017b). 이 분석 방법은 반응시간 자료의 분포 형태를 Gaussian 함수 성분과 exponential 함수 성분의 조합 형태로 가정

해, Gaussian 함수의 평균인 μ 와 분산인 σ 그리고 exponential 함수 곡선의 경사도를 반영하는 τ 등의 세 가지 추정치를 확보해 이들을 토대로 반응시간 자료의 분포 형태를 구체적으로 기술한다(Banno & Saiki, 2015; Cowan & Sauls, 2013; de Wit & Kninoshita, 2015; Park et al., 2017b).

단적인 예를 들자면 Park 등 (2017b)은 변화탐지 과제에서 항목 개수를 증가에 따른 변화탐지 반응시간을 측정하고 해당 항목개수 조건 별로 반응시간 측정치의 분포에 대한 ex-Gaussian 분석을 시도했다. 그 결과 세 추정치 모두 기억항목의 개수가 네 개가 되는 시점까지 점차 증가하되 네 개를 넘어서자 μ 와 σ 는 더 이상 증가하지 않았지만 τ 의 증가는 지속되는 것을 관찰하였다. 이를 토대로 Park 등은 기억항목 개수 네 개를 기점으로 증가가 정체된 μ 와 σ 는 기억에 성공적으로 표상된 소수의 고선명도 항목(in-memory items with high precision)에 의한 신속, 정확한 반응의사결정을 반영한다고 해석했다. 반면 항목개수 네 개를 초과 시점 이후에도 지속 증가한 τ 는, 기억항목 개수가 증가에 따라 기억 표상에 실패한 항목(not-in-memory items with zero precision)에 대한 추측 의사결정 대안(guessing alternative)의 양적 증가를 반영한 것으로 해석하였다. 이처럼 그들의 ex-Gaussian 분석 방식은 변화 탐지정확도나 K 값과 같은 정확도 차원의 관찰만으로는 검증이 어려웠던 VWM 표상 가설들에 대해 반응시간 분석에 기초한 수렴적 검증 가능성을 제공했다는 시사점이 있다.

다만 Park 등의 ex-Gaussian 분석은 정확반응

만이 고려된다는 점에서 기억항목 개수 4개 이상 조건에서 산출된 다수의 오류시행 즉 추측 반응의 RT 자료를 배제했다는 문제가 있다. 또한 ex-Gaussian 모형 자체는 정교한 이론에 토대를 둔 처리 모형(processing model)이라기보다는 자료의 일반적 패턴을 서술하는 기술적 모형(descriptive model)이므로 ex-Gaussian 추정치 토대로 모형 검증 차원의 단정적 해석을 시도하는 것은 무리일 수 있다는 비판 역시 뒤따른다(Blanco & Alvarez, 1994; Heathcote et al., 1991; Matzke & Wagenmakers, 2009; Sternberg & Backus, 2015). 따라서 정반응과 오반응 양자를 총괄할 수 있는 좀 더 세부적인 반응의사결정 모형(예: (Donkin, Nosofsky et al., 2013; Nosofsky & Donkin, 2016))에 기초한 대안적 반응시간 분석 방식이 제안된 바 있다.

이처럼 변화탐지 반응시간 측정치는 정확도에 대한 추가 해석을 위한 보조적 자료로서의 역할뿐만 아니라 기억 모형에 대한 검증을 위한 주요 종속추정치로서의 역할이 예상되는 비교적 타당한 측정치에 해당된다. 향후 객관적이고 타당한 반응시간 분석 모형의 제안 여부에 따라서는 기존에 수행된 다수의 변화탐지 연구 결과들에 대한 재조명 및 수렴적 해석이 가능할 것이 예상된다.

넷째, 현재까지의 변화탐지 연구는 이를 포함하는 상위기억체계인 작업기억의 정보처리 기제에 대한 일반적인 시사점을 크게 제공하지 못한 것으로 판단된다. 대개 이러한 시사점의 제공은 변화탐지 과제가 핵심이 되기보다는 변화탐지 과제를 통해 부가된 기억부담 혹은 중앙집행기능에 대한 일시적 간섭이 감각, 지각적 수준의 선별적 정보처리 과정에

초래하는 변화 가능성을 조사한 이중 과제 연구들에서 일부 가능해졌다(Han & Kim, 2004; Han & Kim, 2009; Johnson et al., 2008; Soto, Heinke, Humphrey, & Blanco, 2005; Woodman, Vogel, & Luck, 2001). 그러나 이러한 사례들은 궁극적으로는 VWM 표상된 정보들에 대한 조작에 관여하는 중앙집행기의 실체보다는 인지적 통제 능력에 대한 간섭이 감각, 지각적 정보처리에 미치는 영향에 집중했다는 점에서 변화탐지 과제를 통해 작업기억의 실체를 밝히려는 직접적인 노력의 일환으로 보기에는 여전히 거리가 있다.

변화탐지 과제를 기초로 이러한 시사점 제공에 좀 더 근접한 연구 사례는 VWM에 대한 개인차 연구에서 발견되는데 예를 들어 Vogel 등 (2005)은 순차적으로 제시된 두 개 기억 항목 세트에 대한 과지를 요구하고 선행 항목들에 후행 항목들이 더해져 과지하도록(append) 혹은 선행 항목들에 후행 항목들을 추가하지 않도록(exclude) 요구했다. 이들의 과제에서 가장 중요한 것은 참가자들 중 저용량 개인(low-capacity individual)로 분류된 개인들이 후행 출현하는 항목들이 선행 항목들에 추가되어 과지하는 것을 의도적으로 억제(filtering)할 수 있는지의 여부였다. 그 결과 고용량과 저용량 개인들 간 선, 후행 항목을 더해서 과지하는 것에는 문제가 없었으나, 저용량 개인들의 경우 고용량 개인에 비해 후행 항목들에 대한 과지 억제에 실패하는 것이 관찰되었다.

Vogel 등의 연구 사례는 중앙집행기의 핵심 기능에 해당하는 실행 통제(executive control)에 기억간섭으로부터의 억제 기능이 중요한 역할을 담당함을 고려할 때 그 시사점이 매우 큰

것으로 평가된다. 다만 변화탐지 정확도와 병행 측정된 전기생리학적 지표인 대측지연활동(contralateral delayed activity; CDA)를 토대로 검증이 진행되었다는 점에서(Drew et al., 2006; McCollough et al., 2007; Vogel & Machizawa, 2004) 기술적인 난이도와 함께 행동적 수준의 변화탐지 과제 단독으로는 핵심 가설에 대한 검증이 어렵다는 점을 분명히 강조할 필요가 있다.

마지막으로 변화탐지 과제의 수행 관찰에 있어서 자극 및 절차와 관련해 통제를 고려해야 할 가외 변인들이 있다. 이 변인들은 앞서 소개된 바와 같이 변화탐지 과제가 당면한 이론적인 문제점들 외에 연구자의 통제 노력에 의해 방법론적인 해결이 비교적 수월한 것들에 해당된다. 예를 들어 항목개수 증가에 따른 화면상의 자극 밀도 증가에 대한 통제는 기억 및 검사 항목으로 제시되는 각 배열의 전체 자극의 개수를 고정할 때 기억항목 개수에 상응하는 일부 항목에 대한 과지 및 검사를 선별적으로 요구해 기억 부담의 수준을 증감시키는 것이 가능하다(Hyun, 2009; Hyun et al., 2009; Vogel & Machizawa, 2004; Vogel, McCollough et al., 2005). 다만 일반적인 변화탐지 과제의 항목 개수 처치와는 달리 기억 및 검사 항목 배열 중 특정 개수의 항목에만 기억 및 검사가 요구되는 이와 같은 처치는 기억항목 제시 시점에 출현한 다수 항목들 중 해당 항목들에 대한 감각, 지각적 선택 과정의 선행에 따른 선별적 과지를 요구한다. 따라서 해당 항목들에 대한 감각적 선택 과정에서 의도치 않은 감각, 지각 처리 부담이 추가될 수 있다는 점에 유념할 필요가 있다(Hyun,

2009).

변화탐지 과제에서 시야상 자극 위치 차이로 인한 감각적 부호화의 차별이 문제될 경우 응시점으로부터 개별 항목까지의 거리 즉 이심률을 고정시키는 처치가 고려된다. 예를 들어 단서유도 방식(cueing paradigm)에 기초한 초점 주의의 부여가 기억항목에 대한 변화탐지에 미치는 영향 등을 측정할 때와 같이 시야상의 공간적 선택에 따른 선택적 정보처리가 중요할 경우 응시점으로부터 동일 거리상에 해당 자극을 배치해 이러한 목적을 달성할 수 있다(Fernandez-Duque & Thornton, 2000; Hyun & Luck, 2007; Schmidt et al., 2002; Scott-Brown, Baker, & Orbach, 2000; Vogel & Luck, 2000). 하지만 응시를 고정 혹은 유도하는 경우에는 안구운동추적을 통해 시선 이동을 확인할 필요가 발생하므로 기술적인 난이도의 증가가 수반된다(Carlson-Radvansky & Irwin, 1995; Hyun et al., 2009; Irwin, 1992; Irwin & Andrews, 1996). 또한 시행 개시 시점에 출현해 종료 시점에 사라지는 응시점 제시 방식은 유사한 항목의 순차적이고 반복적인 출현으로 인해 두 항목 세트가 혼동되는 것을 방지하는 장점이 있으며, 동일 목적아래 참가자의 변화탐지 반응에 뒤이어 시행 종료 시점에 소리 피드백을 제시해 이와 같은 혼동을 방지한 경우도 발견된다(Hyun et al., 2009).

10여초 이내의 기억 지연시간을 사용할 경우 변화탐지 수행의 타당성을 확보하는 것에는 문제가 없는 것으로 평가된다(Vogel et al., 2001). 1초 이내의 기억 지연시간 사용에 대해서는 감각적 기억의 개입에 대한 직관적 우려가 가능하지만 적어도 500ms를 초과하는 지연

시간을 사용할 경우 감각기억의 평균적 파지 시간(<350ms; Coltheart, 1980a; Coltheart, 1980b; Gegenfurtner & Sperling, 1993; Sperling, 1960)을 충분히 초과하는 시간이므로 이론적으로 큰 문제가 없는 것으로 판단된다(Vogel et al., 2006). 검사자극의 노출 시간으로는 적어도 1초 이상을 제시해 재인 과정에 초래되는 감각적 제약을 최소화시키는 것이 바람직하나 이 역시 100ms 정도까지 극단적으로 되더라도 해당 노출시간이 감각 부호화에 큰 영향을 주지 않는다는 점에서 문제가 되지 않는 것으로 판단된다(Di Lollo, 1980; Sperling, 1960). 또한 참가자의 반응과 함께 기억항목의 사라지는 방식은 다수 시행의 확보와 시행 시간의 단축이라는 장점이 있으므로 필요에 따라서는 사용을 고려할 수 있다.

지금까지 변화탐지 과제의 특성 및 문제점을 소개하고 그에 따른 해결의 실마리를 제공하기 위한 사안들을 논의하였다. 종합해 볼 때 변화탐지 수행에 대한 관찰에 기초해 제안된 VWM 모형의 타당성 향상을 위해서는 변화탐지 과제 구성의 배경이 된 이론과 논리를 정확히 이해하려는 시도가 중요한 것으로 판단된다. 특히 이러한 이해의 결여에서 비롯된 변화탐지 수행 측정치의 곡해가 초래될 경우 VWM 표상의 특성과 정보 처리 과정에 대한 정확한 이해는 사실상 매우 어려울 수 있다. 예를 들어 개인의 저장 용량 추정치로 확고히 인정 받아온 K 값 환산치 역시 VWM 표상 논쟁의 관점에서는 그 환산의 논리에 대해 의문이 제기된 바 있으며(Rouder et al., 2008; Rouder et al., 2011), 본 연구에서 소개한 ex-Gaussian 모형에 근거한 반응시간 분석법 또한

예외가 될 수 없다(Blanco & Alvarez, 1994; Heathcote et al., 1991; Matzke & Wagenmakers, 2009; Sternberg & Backus, 2015).

따라서 변화탐지 정확도나 반응시간에 기초한 VWM 연구를 수행하기 위해서는 변화탐지 수행에 관여하는 다양한 정보처리 단계 중 어느 단계에 영향을 미칠 것인가에 대한 분명한 예측이 전제되어야 한다. 특히 변화탐지 과제에 근거해 VWM 수행 특성 및 그에 대한 이론적 모형을 구축하기 위해서는 단일 중속 측정치에 근거한 획일적 해석보다는 복수의 중속 측정치와 관찰의 수준을 달리하는 수렴적 접근이 필요할 것이다. 향후 변화탐지 과제의 사용을 통해 VWM의 실체를 밝히려는 시도에는 해당 과제의 활용에 앞서 과제 구성의 이론적 배경 및 그로 인한 변화탐지 과제의 장단점에 대한 분명한 이해를 토대로 신중한 해석이 요구될 것으로 판단된다.

References

Adam, K. C. S., Mance, I., Fukuda, K., & Vogel, E. K. (2015). The Contribution of Attentional Lapses to Individual Differences in Visual Working Memory Capacity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27, 1601-1616.

Agam, Y., Hyun, J.-S., Danker, J. F., Zhou, F., Kahana, M., & Sekuler, R. (2009). Early neural signature of visual short-term memory. *NeuroImage*, 44, 531-536.

Allen, R. J., Hitch, G. J., Mate, J., & Baddeley, A. D. (2012). Feature binding and attention in working memory: a resolution of previous

contradictory findings. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65, 2369-2383. doi: 10.1080/17470218.2012.687384

Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2004). The capacity of visual short-term memory is set both by information load and by number of objects. *Psychological Science*, 15, 106-111.

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1971). The control of short-term memory. *Scientific American*, 225, 82-90.

Awh, E., Barton, B., & Vogel, E. K. (2007). Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychological Science*, 18, 622-628.

Baddeley, A. D. (1983). Working memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 302, 311-324.

Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Clarendon.

Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 49A, 5-28.

Baddeley, A. D., Della Sala, S., Gray, C., Papagno, C., & Spinnler, H. (1997). Testing central executive functioning with a pencil and paper test. In P. M. A. Rabbitt (Ed.), *Methodology of Frontal and Executive Functions* (pp. 61-80). Hove: Psychology Press.

Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (2014). Evidence for two attentional components in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning & Memory*, 40,

- 1499-1509.
- Bamber, D. E. (1969). Reaction times and error rates for "same"- "different" judgments of multidimensional stimuli. *Perception & Psychophysics*, 6, 169-174.
- Banno, H., & Saiki, J. (2015). The processing speed of scene categorization at multiple levels of description: The superordinate advantage revisited. *Perception*, 44, 269-288.
- Barton, B., Ester, E. F., & Awh, E. (2009). Discrete resource allocation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1359-1367.
- Bays, P. M. (2015). Spikes not slots: noise in neural populations limits working memory. *Trends in Cognitive Science*, 19, 431-438.
- Bays, P. M., Catalao, R. F. G., & Husain, M. (2009). The precision of visual working memory is set by allocation of a shared resource. *Journal of Vision*, 9, 1-11.
- Bays, P. M., & Husain, M. (2008). Dynamic shift of limited working memory resources in human vision. *Science*, 321, 851-854.
- Bengson, J. J., & Luck, S. J. (2016). Effects of strategy on visual working memory capacity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23, 265-270.
- Blanco, M. J., & Alvarez, A. A. (1994). Psychometric intelligence and visual focussed attention: Relationship in nonsearch tasks. *Intelligence*, 18, 77-106.
- Brady, T. F., & Alvarez, G. A. (2011). Hierarchical encoding in visual working memory: Ensemble statistics bias memory for individual items. *Psychological Science*, 22, 384-392.
- Brady, T. F., Konkle, T., & Alvarez, G. A. (2009). Compression in visual short-term memory: Using statistical regularities to form more efficient memory representations. *Journal of Experimental Psychology: General*, 138, 487-502.
- Brady, T. F., Konkle, T., Alvarez, G. A., & Oliva, A. (2008). Visual long-term memory has a massive storage capacity for object details. *Proceedings of the National Academy of Science*, 105, 14325-14329.
- Brady, T. F., Konkle, T., Gill, J., Oliva, A., & Alvarez, G. A. (2013). Visual long-term memory has the same limit on fidelity as visual working memory. *Psychological Science*, 24, 981-990. doi: 10.1177/0956797612465439
- Brady, T. F., & Tenenbaum, J. B. (2010). Encoding higher-order structure in visual working memory: A probabilistic model. In S. Ohlsson & R. Catrambone (Eds.), *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 411-416). Austin, TX: Cognitive Science.
- Brown, L. A., & Brockmole, J. (2010). The role of attention in binding visual features in working memory: Evidence from cognitive aging. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63, 2067-2079.
- Buttle, H., & Raymond, J. E. (2003). High familiarity enhances visual change detection for

- face stimuli. *Perception and Psychophysics*, 65, 1296-1306.
- Carlson-Radvansky, L. A., & Irwin, D. E. (1995). Memory for structural information across eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21, 1441-1458.
- Coltheart, M. (1980a). Iconic memory and visible persistence. *Perception and Psychophysics*, 27, 183-228.
- Coltheart, M. (1980b). The persistence of vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 290, 57-69.
- Conway, A. R. A., Cowan, N., Bunting, M. F., Theriault, D. J., & Minkoff, S. R. B. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30, 163-183.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 87-185.
- Cowan, N., Blume, C. L., & Saults, J. S. (2013). Attention to attributes and objects in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39, 731-747. doi: 10.1037/a0029687
- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Ismajatulina, A., & Conway, A. R. A. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51, 42-100.
- Cowan, N., & Saults, J. S. (2013). When does a good working memory counteract proactive interference? Surprising evidence from a probe recognition task. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142, 12-17.
- Curby, K. M., & Gauthier, I. (2007). A visual short-term memory advantage for faces. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 620-628.
- D'esposito, M., Detre, J. A., Alsop, D. C., Shin, R. K., Atlas, S., & Grossman, M. (1995). The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, 378, 279-281.
- de Wit, B., & Kninoshita, S. (2015). An RT distribution analysis of relatedness proportion effects in lexical decision and semantic categorization reveals different mechanisms. *Memory & Cognition*, 43, 99-110.
- Di Lollo, V. (1980). Temporal integration in visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 75-97.
- Donkin, C., Nosofsky, R., Gold, J. M., & Shiffrin, R. M. (2013). Discrete-slots models of visual working-memory response times. *Psychological Review*, 120, 873-902.
- Donkin, C., Tran, S. C., & Nosofsky, R. (2013). Landscaping analyses of the ROC predictions of discrete-slots and signal-detection models of visual working memory. *Attention, Perception & Psychophysics*, 76, 2103-2116.
- Drew, T., McCollough, A. W., & Vogel, E. K. (2006). Event-related potential measures of

- visual working memory. *Clinical EEG and Neuroscience*, 37, 286-291.
- Dube, C., Zhou, F., Kahana, M. J., & Sekuler, R. (2014). Similarity-based distortion of visual short-term memory is due to perceptual averaging. *Vision Research*, 96, 8-16. doi: 10.1016/j.visres.2013.12.016
- Eng, H. Y., Chen, D., & Jiang, Y. (2005). Visual working memory for simple and complex visual stimuli. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 1127-1133.
- Farell, B. (1985). "Same" - "different" judgments: A review of current controversies in perceptual comparisons. *Psychological Bulletin*, 98, 419-456.
- Fernandez-Duque, D., & Thornton, M. (2000). Change detection without awareness: Do explicit reports underestimate the representation of change in the visual system?. *Visual Cognition*, 7, 323-344.
- Fougnie, D., Asplund, C. L., & Marois, R. (2010). What are the units of storage in visual working memory?. *Journal of Vision*, 10, 1-11.
- Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2010). Discrete capacity limits in visual working memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 20, 177-182.
- Fukuda, K., & Vogel, E. K. (2009). Human variation in overriding attentional capture. *The Journal of Neuroscience*, 29, 8726-8733.
- Fuller, R. L., Luck, S. J., McMahon, R. P., & Gold, J. M. (2005). Working memory consolidation is abnormally slow in schizophrenia. *Journal of Abnormal Psychology*, 114, 279-290.
- Gao, Z., Li, J., Liang, J., Chen, H., Yin, J., & Shen, M. (2009). Storing fine detailed information in visual working memory-Evidence from event-related potentials. *Journal of Vision*, 9, 1-12.
- Gegenfurtner, K. R., & Sperling, G. (1993). Information transfer in iconic memory experiments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 845-866.
- Gilchrist, A. L., & Cowan, N. (2014). A two-stage search of visual working memory: investigating speed in the change-detection paradigm. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76, 2031-2050. doi: 10.3758/s13414-014-0704-5
- Gold, J. M., Wilk, C., McMahon, R., & Luck, S. J. (2003). Working memory for visual features and conjunctions in schizophrenia. *Journal of Abnormal Psychology*, 112, 61-71.
- Gorgoraptis, N., Catalao, R. F. G., Bays, P. M., & Husain, M. (2011). Dynamic updating of working memory resources for visual objects. *The Journal of Neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 31, 8502-8511. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0208-11.2011
- Green, D., & Swets, J. (1966). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. New York: Wiley.
- Griffin, I. C., & Nobre, A. C. (2003). Orienting attention to locations in internal representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 1176-1194.
- Han, J.-E., & Hyun, J.-S. (2011). The consolidation and comparison processes in visual working memory tested under

- pattern-backward masking. *Korean Journal of Cognitive Science*, 22, 365-384.
- Han, S.-H., & Kim, M.-S. (2004). Visual search does not remain efficient when executive working memory is working. *Psychological Science*, 15, 623-628.
- Han, S. W., & Kim, M.-S. (2009). Do the contents of working memory capture attention? Yes, but cognitive control matters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1292-1302.
- Hardman, K. O., & Cowan, N. (2015). Remembering complex objects in visual working memory: do capacity limits restrict objects or features?. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41, 325-347. doi: 10.1037/xlm0000031
- Heathcote, A., Popiel, S. J., & Mewhort, D. J. (1991). Analysis of response time distributions: An example using the Stroop task. *Psychological Bulletin*, 109, 340-347.
- Hollingworth, A. (2003). Failures of retrieval and comparison constrain change detection in natural scenes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 388-403.
- Hollingworth, A. (2005). The relationship between online visual representation of a scene and long-term scene memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 31, 396-411.
- Hollingworth, A. (2006). Visual memory for natural scenes: Evidence from change detection and visual search. *Visual Cognition*, 14, 781-807.
- Hu, Y., Hitch, G. J., Baddeley, A. D., Zhang, M., & Allen, R. J. (2014). Executive and perceptual attention play different roles in visual working memory: Evidence from suffix and strategy effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 40, 1665-1678.
- Huang, L. (2010). Visual working memory is better characterized as a distributed resource rather than discrete slots. *Journal of Vision*, 10, 8. doi: 10.1167/10.14.8
- Hurlstone, M. J., Hitch, G. J., & Baddeley, A. D. (2014). Memory for serial order across domains: An overview of the literature and directions for future research. *Psychological Bulletin*, 140, 339-373.
- Hyun, J.-S. (2008). The spatial-effect profile of visual attention in perception and memory. *Korean Journal of Cognitive Science*, 19, 311-330.
- Hyun, J.-S. (2011). Understanding visual working memory based on significant examples of behavioral studies. *The Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, 23, 45-90.
- Hyun, J.-S., & Luck, S. J. (2007). Visual working memory as the substrate for mental rotation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 154-158.
- Hyun, J.-S., Woodman, G. F., Vogel, E. K., Hollingworth, A., & Luck, S. J. (2009). The comparison of visual working memory representations with perceptual inputs. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1140-1160. doi: 10.1037/

- a0015019
- Hyun, J. S. (2009). Properties of visual working memory representations as examined by memory-perception comparison process. *The Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, 21, 265-282.
- Irwin, D. E. (1992). Memory for position and identity across eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 307-317.
- Irwin, D. E., & Andrews, R. V. (1996). Integration and accumulation of information across saccadic eye movements. In T. Inui & J. L. McClelland (Eds.), *Attention and Performance XVI* (pp. 125-155). Cambridge, MA: MIT Press.
- Jiang, Y., Chun, M. M., & Olson, I. R. (2004). Perceptual grouping in change detection. *Perception and Psychophysics*, 66, 446-453.
- Jiang, Y., Olson, I. R., & Chun, M. M. (2000). Organization of visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 2, 683-702.
- Jiang, Y. V., Lee, H. J., Asaad, A., & Remington, R. (2015). Similarity effects in visual working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23, 1-7.
- Johnson, J. S., Hollingworth, A., & Luck, S. J. (2008). The role of attention in the maintenance of feature bindings in visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 41-55. doi: 10.1037/0096-1523.34.1.41
- Kahana, M. J., & Sekuler, R. (2002). Recognizing spatial patterns: a noisy exemplar approach. *Vision Research*, 42, 2177-2192.
- Kang, H.-I., & Hyun, J.-S. (2011). The property of attentional-resource allocation by the processing stages of visual working memory. *The Korean Journal of Cognitive and Biological Psychology*, 23, 487-504.
- Kurawe, M. A., & Zimmer, H. D. (2015). Costs of storing colour and complex shape in visual working memory: Insight from pupil and slow waves. *Acta Psychologica*, 158, 67-77.
- Lin, P. H., & Luck, S. J. (2012). Proactive interference does not meaningfully distort visual working memory capacity estimates in the canonical change detection task. *Frontiers in Psychology*, 3, doi: 10.3389/fpsyg.2012.00042
- Logie, R. H., & Marchetti, C. (1991). Visuo-spatial working memory: Visual, spatial or central executive?. *Advances in Psychology*, 80, 105-115.
- Luck, S. J., & Hollingworth, A. (2008). *Visual Memory*: Oxford University Press.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390, 279-281.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (2013). Visual working memory capacity: from psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences*, 17, 391-400.
- Magnussen, S. (2000). Low-level memory processes in vision. *Trends in Cognitive Science*, 23, 247-251.

- Magnussen, S., Greenlee, M. W., & Thomas, J. P. (1996). Parallel processing in visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 202-212.
- Matzke, D., & Wagenmakers, E.-J. (2009). Psychological interpretation of the ex-Gaussian and shifted Wald parameters: A diffusion model analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 798-817.
- Maxcey, A. M., & Woodman, G. F. (2014). Can we throw information out of visual working memory and does this leave informational residue in long-term memory?. *Frontiers in Psychology*, 22. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00294
- McCollough, A. W., Machizawa, M. G., & Vogel, E. K. (2007). Electrophysiological measures of maintaining representations in visual working memory. *Cortex*, 43, 77-94. doi: 10.1016/S0010-9452(08)70447-7
- Nosofsky, R. M., & Donkin, C. (2016). Response-time evidence for mixed memory states in a sequential-presentation change-detection task. *Cognitive Psychology*, 84, 31-62.
- Oakes, L. M., Ross-Sheehy, S., & Luck, S. J. (2006). Rapid development of feature binding in visual short-term memory. *Psychological Science*, 17, 781-787.
- Oberauer, K., Awh, E., & Sutterer, D. W. (2017). The role of long-term memory in a test of visual working memory: Proactive facilitation but no proactive interference. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 43, 1-22.
- Olsson, H., & Poom, L. (2005). Visual memory needs categories. *Proceedings of National Academy of Science*, 102, 8776-8780.
- Pailian, H., & Halberda, J. (2015). The reliability and internal consistency of one-shot and flicker change detection for measuring individual differences in visual working memory capacity. *Memory & Cognition*, 43, 397-420.
- Palmer, E. M., Horowitz, T. S., Torralba, A., & Wolfe, J. (2011). What are the shapes of response time distributions in visual search?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37, 58-71.
- Park, H., Han, J.-E., & Hyun, J.-S. (2015). You may look unhappy unless you smile: The distinctiveness of a smiling face against faces without an explicit smile. *Acta Psychologica*, 157, 185-194.
- Park, H., Zhang, W., & Hyun, J.-S. (2017a). The aftermath of memory retrieval for recycling visual working memory representations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79, 1393-1407. doi: 10.3758/s13414-017-1314-9
- Park, H., Zhang, W., & Hyun, J.-S. (2017b). Dissociating models of visual working memory by reaction-time analysis. *Acta Psychologica*, 173, 21-31.
- Pashler, H. (1988). Familiarity and visual change detection. *Perception and Psychophysics*, 44, 369-378.
- Rensink, R. A. (2000a). The dynamic representation of scenes. *Visual Cognition*, 7,

- 17-42.
- Rensink, R. A. (2000b). Visual search for change: A probe into the nature of attentional processing. *Visual Cognition*, 7, 345-376.
- Rensink, R. A. (2002). Change detection. *Annual Review of Psychology*, 53, 245-277.
- Ross-Sheehy, S., Oakes, L. M., & Luck, S. J. (2003). The development of visual short-term memory capacity in infants. *Child Development*, 74, 1807-1822.
- Rouder, J. N., Morey, R. D., Cowan, N., Zwilling, C. E., Morey, C. C., & Pratte, M. S. (2008). An assessment of fixed-capacity models of visual working memory. *Proceedings of the National Academy of Science*, 105, 5975-5979.
- Rouder, J. N., Morey, R. D., Morey, C. C., & Cowan, N. (2011). How to measure working memory capacity in the change detection paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 324-330. doi: 10.3758/s13423-011-0055-3
- Salmela, V. R., & Saarinen, J. (2013). Detection of small orientation changes and the precision of visual working memory. *Vision Research*, 76, 17-24.
- Schmidt, B. K., Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2002). Voluntary and involuntary attentional control of visual working memory. *Perception and Psychophysics*, 64, 754-763.
- Scott-Brown, K. C., Baker, M. R., & Orbach, H. S. (2000). Comparison blindness. *Visual Cognition*, 7, 253-267.
- Shiffrin, R. M., & Atkinson, R. C. (1969). Storage and retrieval processes in long-term memory. *Psychological Review*, 76, 179-193.
- Shin, Y., & Hyun, J. -S. (2013). Understanding the experience of visual change detection based on the experience of a sensory conflict evoked by a binocular rivalry. *Science of Emotion & Sensibility*, 16, 341-350.
- Song, J. -H., & Jiang, Y. (2006). Visual working memory for simple and complex features: an fMRI study. *NeuroImage*, 15, 963-972.
- Soto, D., Heinke, D., Humphrey, G. W., & Blanco, M. J. (2005). Early involuntary top-down guidance of attention from working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 31, 248-261.
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and applied*, 74, 1-29.
- Sperling, G. (1967). Successive approximations to a model for short-term memory. *Acta Psychologica*, 27, 285-292.
- Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, 153, 652-654.
- Sternberg, S. (1969). Memory scanning: Mental processes revealed by reaction time experiments. *American Scientist*, 57, 421-457.
- Sternberg, S., & Backus, B. T. (2015). Sequential processes and the shapes of reaction time distributions. *Psychological Review*, 122, 830-837.
- Suchow, J. W., Fougine, D., & Brady, T. F. (2014). Terms of the debate on the format and structure of visual memory. *Attention*,

- Perception, & Psychophysics*, 76, 2071-2079.
- Thiele, J. E., Pratte, M. S., & Jeffrey, N. R. (2011). On perfect working-memory performance with large number of items. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 958-963.
- Todd, J. J., Han, S. W., Harrison, S., & Marois, R. (2011). The neural correlates of visual working memory encoding. *Neuropsychologia*, 49, 1527-1536.
- Tsubomi, H., Fukuda, K., Watanabe, K., & Vogel, E. K. (2013). Neural limits to representing objects still within view. *Journal of Neuroscience*, 33, 8257-8263. doi: 10.1523/JNEUROSCI.5348-12.2013
- Van den Berg, R., & Ma, W. J. (2014). "Plateau"-related summary statistics are uninformative for comparing working memory models. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76, 2117-2135.
- Van den Berg, R., Shin, H., Chou, W.-C., George, R., & Ma, W. J. (2012). Variability in encoding precision accounts for visual short-term memory limitations. *Proceedings of the National Academy of Science*, 109, 8780-8785.
- Viswanathan, S., Perl, D. R., Visscher, K. M., Kahana, M., & Sekuler, R. (2010). Homogeneity computation: How interitem similarity in visual short-term memory alters recognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17, 59-65.
- Vogel, E. K., & Luck, S. J. (1997). ERP evidence for a general-purpose visual discrimination mechanism. *Society for Neuroscience Abstracts*, 23, 1589.
- Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2000). Selective access to visual working memory. *Cognitive Neuroscience Society 2000 Annual Meeting Abstract Program*, 97.
- Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 428, 748-751.
- Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa, M. G. (2005). Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory. *Nature*, 438, 500-503.
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2001). Storage of features, conjunctions and objects in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 27, 92-114.
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2005). Pushing around the locus of selection: Evidence for the flexible-selection hypothesis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 1907-1922.
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2006). The time course of consolidation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 1436-1451.
- Wagemans, J., Elder, J. H., Kubovy, M., Palmer, S. E., Peterson, M. A., Singh, M., & von der Heydt, R. (2012). A century of Gestalt psychology in visual perception I. Perceptual grouping and figure-ground organization. *Psychological Bulletin*, 138, 1172-1217.

- Wertheimer, M. (1924/1950). Gestalt theory. In W. D. Ellis (Ed.), *A sourcebook of Gestalt psychology* (pp. 1-11). New York: The Humanities Press.
- Wheeler, M. E., & Treisman, A. M. (2002). Binding in short-term visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *131*, 48-64.
- Wilken, P., & Ma, W. J. (2004). A detection theory account of change detection. *Journal of Vision*, *4*, 1120-1135.
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2003). Serial deployment of attention during visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 121-138.
- Woodman, G. F., & Vecera, S. P. (2011). The cost of accessing an object's feature stored in visual working memory. *Visual Cognition*, *19*, 1-12.
- Woodman, G. F., Vecera, S. P., & Luck, S. J. (2003). Perceptual organization influences visual working memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *10*, 80-87.
- Woodman, G. F., & Vogel, E. K. (2005). Fractionating working memory: Consolidation and maintenance are independent processes. *Psychological Science*, *16*, 106-113.
- Woodman, G. F., Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2001). Visual search remains efficient when visual working memory is full. *Psychological Science*, *12*, 219-224.
- Xu, Y., & Chun, M. M. (2006). Dissociable neural mechanisms supporting visual short-term memory for objects. *Nature*, *440*, 91-95.
- Zandt, V. (2000). How to fit a response time distribution. *Psychonomic Bulletin & Review*, *7*, 424-465.
- Zelinsky, G. J. (2001). Eye movements during change detection: Implications for search constraints, memory limitations, and scanning strategies. *Perception & Psychophysics*, *63*, 209-225.
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, *453*, 233-235.
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2009). Sudden death and gradual decay in visual working memory. *Psychological Science*, *20*, 423-428.
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2011). The Number and Quality of Representations in Working Memory. *Psychological Science*, *22*, 1434-1441. doi: 10.1177/0956797611417006
- Zhou, F., Kahana, M. J., & Sekuler, R. (2004). Short-term episodic memory for visual textures: A roving probe gathers some memory. *Psychological Science*, *15*, 112-118.
- Zokaei, N., Heider, M., & Husain, M. (2014). Attention is required for maintenance of feature binding in visual working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*, 1191-1213.

1 차원고접수 : 2017. 04. 26
수정원고접수 : 2017. 07. 24
최종게재결정 : 2017. 07. 29

A Review of methodological limitations of change detection task and their theoretical implications for studying visual working memory

Joo-Seok Hyun

Department of Psychology, Chung-Ang University

Change detection tasks have been widely used for understanding the information processing properties of visual working memory. Nevertheless, there has been a recent concern against the use of change detection task due to its several methodological limitations that had been unnoticed in the past. The present review introduced the methodological backbone of change detection task, aiming toward an understanding of recent challenges against its use. The study further discussed several major aspects of change detection task in detail that would demand methodological improvement, and accordingly emphasized the necessity of conservative interpretations on the observed experimental results.

Key words: change detection task, visual working memory, methodological backbone, review