

## 연속변화탐지 과제를 통해 추정된 시각작업기억의 표상 공고성\*

박 형 범

현 주 석†

중앙대학교 심리학과

시각작업기억 내 저장된 정보와 차이가 있는 시각 자극의 출현에 의한 현저한 변화는 해당 변화가 발생한 위치로 주의를 전환시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 변화에 대한 성공적 탐지 이후 시각작업기억 표상의 상태에 대한 연구는 드물었다. 이러한 점에 착안해, 본 연구에서는 기억항목 제시 이후 두 검사 항목 배열들이 연이어 제시되는 연속변화탐지 과제를 고안하였다. 기억항목의 제시 이후 출현하는 첫 번째 검사항목 배열은 특정 한 항목에서 변화가 발생할 수 있었으며, 잠시 후 이어 제시되는 두 번째 검사항목 배열 또한 한 항목에서 변화가 발생할 수 있었다. 부분 혹은 전체 탐사 방식에 근거한 두 검사 항목 배열에 모두 변화가 발생했을 때 각각 변화는 동일하거나 서로 다른 위치에 발생하도록 처치되었다. 실험 결과 첫 번째 검사 배열에 변화가 발생한 경우 두 번째 검사 배열에 대한 변화 탐지가 부정확해졌으며, 정확도 감소는 전체 탐사 방식아래 두 배열의 서로 다른 위치에 변화가 발생했을 때 더욱 두드러졌다. 이러한 결과는 선행 변화에 대한 탐지가 뒤따르는 변화에 대한 탐지를 어렵게 만들기는 하나, 이러한 어려움은 시각작업기억의 표상 공고성의 결여 자체보다는 반응 병목이 원인인 것으로 해석된다.

주제어 : 시각작업기억, 연속변화탐지, 반응 병목, 표상 공고성

---

\* 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-0010842).

† 교신저자 : 현주석, 중앙대학교 사회과학대학 심리학과, (156-756) 서울시 동작구 흑석동 221  
E-mail : jshyun@cau.ac.kr

복잡한 외부환경 속에서 현재 주어진 과제 및 목표와 관련된 정보를 선별적으로 채택하여 짧은 시간 동안 파지하는 능력은 일상생활에서 빈번하게 이루어지는 다양한 행동에 있어 매우 핵심적인 역할을 한다. 이러한 정보처리 과정은 시각작업기억(visual working memory, VWM)이 담당하는 것으로 알려져 있으며, 최근에는 시각작업기억의 처리단계를 기능적으로 세분화하여 각 과정에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 구체적으로 시각작업기억은 과제와 관련되는 유의미한 정보에 대한 부호화(encoding) 및 감각적 표상을 견고한 객체표상으로 전환시키는 공고화(consolidation) 과정과 이를 통해 형성된 기억표상을 약 10여 초 내외의 짧은 시간 동안 보유하는 파지(retention) 과정, 그리고 저장된 기억표상을 인출(retrieval)하여 시각기관을 통해 새로이 유입되는 지각적 정보와 비교하는 비교처리(comparison) 과정으로 구성된다.

이 중 비교처리과정의 특성에 관한 최근의 연구들은 변화탐지(change-detection) 과제를 통해 저장된 기억표상과 새로이 유입되는 정보간의 비교가 매우 신속하고 빠르게 이루어짐을 주장하였다(한지은과 현주석, 2011; Hyun, Woodman, Vogel, Hollingworth, & Luck, 2009). 예를 들어, 한지은과 현주석(2011)은 조건에 따라 기억항목에 대한 공고화 과정이 요구되는 시점 또는 검사항목 출현 이후 비교처리가 요구되는 시점에 역행 패턴차폐를 제시하여 각각의 처리과정에 미치는 차폐 간섭효과를 측정된 결과, 공고화 과정에서는 자극개수 증가 및 차폐 출현간격 단축에 따라 간섭의 영향이 점차 증가한 반면 비교처리 과정에서는

그 영향이 상대적으로 미미하였음을 보고하였다. 따라서 저자들은 용량 제한적(capacity-limited)이고 어느 정도 시간이 소요되는(time consuming) 공고화 과정(Vogel, Woodman, & Luck, 2006)과는 달리 시각작업기억의 비교처리 과정은 매우 신속하게 이루어지며 기억 부하의 영향에서 상대적으로 자유롭다고 주장하였다. 비교처리 과정의 효율적 특성을 고려할 때, 시각작업기억 내 저장된 정보와 충분한 차이가 있는 자극의 출현, 즉 변화의 발생은 지각적으로 매우 현저하여 해당 위치로 자동적이고 신속한 주의전환을 유도하며 그 처리 특성이 마치 탐색과제에서 돌출(pop-out)되는 세부특징에 대한 병렬적 처리(parallel process)와 유사한 방식으로 이루어짐을 짐작할 수 있다.

한편, 효율적 비교처리과정을 통한 성공적인 변화탐지 이후에 기억표상이 어떠한 상태에 놓이는지에 대해서는 잘 알려진 바가 없다. 기본적으로 시각작업기억은 과제를 효율적으로 수행하기 위한 주요 정보의 단기 저장소(short-term storage)로서 기능하므로(Baddeley, 1986) 과제 종료 이후 특별히 시연(rehearsal)을 거치지 않는 경우 기억된 정보는 쇠퇴(decaying)되거나 새로운 정보에 의해 갱신(updating)되는 것으로 알려져 있다(Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004; Peterson & Perterson, 1959). 그러나 일상생활에서 이루어지는 과제들은 때때로 시각작업기억 표상의 연속적 활용을 요구한다. 이를테면 일상적 시각 환경에서 반복되는 도약 안구 운동(saccade)을 통해 불연속적인 형태로 시각 정보가 유입됨에도 불구하고 우리가 세상을 연속적이고 안정

적으로 지각할 수 있는 것은 유의미한 정보에 대한 시각작업기억 표상의 연속적 통합과정이 매우 중요한 역할을 하기 때문으로 알려져 있다(Irwin, 1991, 1992). 이와 더불어 인간의 정보처리능력에 있어 하향식 처리(top-down process)가 지니는 중요성을 고려할 때, 시각작업기억이 단순히 매 순간 유의미한 정보에 대한 단기 파지와 일회적 활용의 연속만을 의미하는 것은 아님을 예상할 수 있다.

본 연구는 기억표상의 연속적인 활용이 요구되는 경우의 시각작업기억 처리특성을 조사하고, 이 과정에서 변화가 지니는 의미를 추론하기 위해 수행되었다. 앞서 논의한 바와 같이, 시각작업기억에 기반한 변화의 발생은 매우 현저하므로 해당 위치에 신속하고 자동적으로 주의가 전환된다. 그렇다면 기존의 변화탐지 과제에서 요구되는 것과 달리 형성된 기억표상의 연속적인 활용이 요구되는 경우, 변화가 지니는 현출성(salience)은 연속적 과제 수행에 어떠한 영향을 미칠 것인가? 한 가지 가능성은 한 차례 변화를 탐지하는 과정에서 해당 항목에 집중되는 초점주의가 기억표상 내 유지되고 있는 정보 및 뒤따르는 변화탐지 과제의 수행에 간섭을 초래하는 경우이다. 그러나, 이러한 가정은 필연적으로 시각작업기억에 저장된 정보의 파지과정에서 지속적인 주의(sustained attention)가 요구되는지에 대한 논쟁과 맞물린다.

파지과정은 기억공고화 과정을 통해 형성된 표상을 짧은 시간 동안 효율적으로 유지하고 이 과정에서 간섭을 초래할 수 있는 요인들의 영향을 방지하는 것을 목적으로 하므로, 최근의 연구들은 기억표상을 효율적으로 유지하는

데 있어 지속적인 주의가 요구된다는 점을 주장하고 있다(Griffin & Nobre, 2003; Ikkai, McCollough, & Vogel, 2010; Makovski, Sussman, & Jiang, 2008). 기억표상의 파지와 주의자원 할당의 관계에 대해서는 여전히 많은 논란이 있으나, 적어도 유지되고 있는 정보에 대한 간섭이나 망각 등의 영향을 방지하여 기억 효율성을 증가시키는 역할을 수행할 가능성은 존재한다. 그러나 시각작업기억에 저장된 항목에 대해 선별적으로 주어진 공간적 주의가 기억 파지의 효율성을 증가시킬 수 있다는 주장이 선별적 파지에서 제외된 기억표상 내 항목들의 질적 저하를 의미하는 것은 아니므로, 이를 통해서는 본 연구에서 중점을 맞추고 있는 현저한 변화가 초래하는 영향이 유지되는 기억표상의 손상으로 이어지는지의 여부는 알 수 없다.

본 연구는 형성된 기억표상의 유지 및 지각적 입력과의 비교과정에 관한 일련의 가정을 바탕으로 현저한 선행 변화에 대한 탐지가 기억표상의 연속적인 활용에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 이해를 시도하였다. 기존의 연구들은 주로 변화탐지 과제(change detection task)를 통해 시각작업기억의 용량(capacity) 및 표상 특성을 조사하였다(Luck & Vogel, 1997; Phillips, 1974). 한편 기존의 연구들에서 수행된 변화탐지 과제에서는 대부분 기억표상의 일회성 활용을 기준으로 다양한 실험적 처치를 부여하였으므로, 본 연구에서는 기억항목 이후 두 번의 검사항목이 이어지는 연속적 변화탐지 과제(consecutive-change detection task)를 고안하였다. 실험은 주요 처치에 따라 각각의 검사항목에서 기억항목과 동일한 개수의 자극이

제시되는 전체탐사(whole probe) 과제(실험 1)와 한 개의 자극만이 제시되는 부분탐사(partial probe) 과제(실험 2)로 나뉘어졌다. 이 때, 현저한 선행변화에 유도되는 주의의 영향을 공간적 측면에서 보다 체계적으로 조사하기 위해 두 번째 검사항목에서 변화가 발생하는 위치(실험 1)나 자극이 제시되는 위치(실험 2)는 선행 변화항목과 동일하거나 또는 상이하도록 처치하였다.

### 실험 1

실험 1에서는 연속적 변화탐지 과제를 사용하여 한 차례 형성된 기억표상을 기준으로 두 번의 검사항목에서 변화탐지를 실시함으로써 시각작업기억에 저장된 정보의 연속적 활용특성을 조사하였다. 서론에서 언급된 바와 같이, 변화의 발생은 해당위치로 신속한 주의전환을 유도한다. 따라서 만약 선행 변화가 발생한 위치로 전환된 주의의 영향과 관계없이 기존 표상의 자유로운 활용이 가능하다면, 선행 검사항목(검사항목 1)에서의 변화발생 여부는 후행 변화탐지 과제(검사항목 2)의 수행에 영향을 미치지 않을 것이다. 반면 돌출되는 선행 변화의 현출성이 뒤따르는 검사항목에 대한 기억표상의 활용을 방해할 경우 후행 검사항목에서의 변화탐지 수행은 저하될 것으로 예상된다. 세부 조건에 따른 구체적인 결과 예견은 자극과 절차란에 기술하였다.

### 방 법

**참가자** 중앙대학교에서 실험심리학 및 인지

심리학 수업을 수강하는 19~29세의 피험자 10명(남성 1명, 여성 9명)이 실험의 일환으로 실험에 참여하였다. 모든 피험자는 참가 동의서에 동의를 한 뒤 실험에 참여하였으며, 정상 색상 지각 및 정상 시력 또는 정상 교정시력을 보유하고 있음을 보고하였다.

**자극과 절차** 그림 1의 (가)에 실험 1에서 사용된 자극과 절차를 도해하였다. 실험은 피험자로부터 60cm 간격을 두고 위치한 22인치 LCD 모니터를 통해 이루어졌다. 실험 1의 과제는 일반적인 변화탐지와 유사하나, 자극의 개수가 네 개로 고정되었으며 두 번의 검사항목이 연속적으로 제시된다는 점에서 다르다. 모든 시행은 화면중앙의 응시점(시각 0.30° x 0.30°)과 함께 시작된다. 응시점은 500ms 동안 제시된 이후 사라지며, 이어서 네 개의 색상 사각형(0.89° x 0.89°)이 지름을 5.91°로 하는 가상의 원을 따라 일정한 거리(9.26°)로 배치되는 기억항목이 200ms 동안 제시된다. 첫 번째 검사항목은 기억항목과 1,000ms의 자극 간 간격(inter-stimulus interval)을 두고 200ms 동안 제시된다. 피험자들은 기억항목에서 제시되는 네 개의 자극 색상을 기억한 뒤, 이를 기준으로 검사항목의 자극 색상과 비교하여 동일성 여부를 키보드의 ‘z’ 또는 ‘/’ 버튼을 통해 보고하도록 지시받았다.<sup>1)</sup> 첫 번째 검사항목에 대

1) 실험 1과 2에 걸쳐, 과제수행에 있어서 피험자가 음운루프(phonological loop)내의 암송(rehearsal)에 근거한 언어적 책략(verbal strategy)을 시도할 가능성을 통제하기 위한 조음 억제 과제(articulatory suppression task)를 요구하지는 않았다. 다양한 자극을 사용한 기존 연구들에서는 언어적 책략의 개입 가능성을 시사하는 결과들이 관

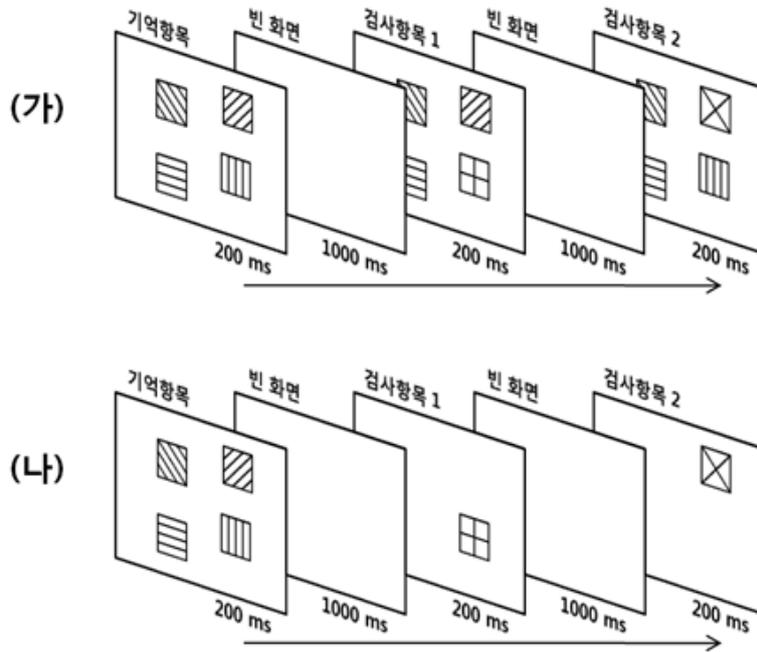


그림 1. (가) 실험 1(전체탐사)과 (나) 실험 2(부분탐사)에서 사용된 자극과 제시 절차. 각 도형 내 패턴은 서로 다른 색상을 의미한다. 피험자는 기억항목의 자극색상을 기준으로 검사항목 1과 2에서 색상의 변화 유무를 보고하도록 지시 받았다.

한 피험자의 보고가 완료되면, 동일하게 1,000ms의 자극 간 간격을 두고 두 번째 검사항목이 200ms 동안 출현한다. 이 경우에도 피험자는 기억항목에서의 자극색상을 기준으로 하여 두 번째 검사항목과의 동일성 여부를 보고하였다. 각 검사항목에서 기억항목과 동일한 개수의 자극이 제시되므로 실험 1은 전체 탐사 과제에 해당한다.

본 연구에서 사용된 연속적 변화탐지 과제

찰되기는 하였으나(Cusack, Lehmann, Veldsman, & Mitchell, 2009; Cowan, 2001; Cowan et al., 2005), 본 연구와 동일한 단순 색상 도형에 대한 색상 변화 변화탐지 과제가 시도된 기존 연구(Vogel et al., 2001)에서는 이러한 책략의 영향이 분명하지 않음을 보고하였다.

에는 두 번의 검사항목이 포함되므로 각 검사항목에서의 변화발생 여부에 따라 총 4가지의 조합이 도출된다(표 1). 표 1에서 부호 X와 O는 각각 검사항목에서 변화가 발생하지 않는 경우와 발생하는 경우를 의미한다. 각각의 조건은 총 240회의 시행 중 동일한 비율(25%,

표 1. 각 검사항목에서의 변화여부에 따른 네 가지 조건

조건명	검사항목 1	검사항목 2
X→X	변화 없음	변화 없음
X→O	변화 없음	변화 있음
O→X	변화 있음	변화 없음
O→O	변화 있음	변화 있음

60시행)로 구성되며 매 시행마다 무선적으로 배열되었다.

모든 조건은 크게 선행 검사항목에서의 변화 여부에 따라 두 가지로 구분할 수 있으며 직관적인 수준에서 다음과 같은 결과를 예견해볼 수 있다. 먼저 첫 번째 검사항목에서 변화가 발생하지 않는 경우('X→X' 및 'X→O' 조건) 피험자는 기억항목과 동일한 정보를 반복해서 보게 되므로 두 번째 검사항목에서의 변화탐지 수행은 첫 번째 검사항목에서와 동일하거나 향상될 것이다. 반면, 첫 번째 검사항목에서 변화가 발생하는 경우('O→X' 및 'O→O' 조건) 피험자의 시각경험은 상대적으로 복잡해질 가능성이 있다. 구체적으로 선행 변화 이후 후행 검사항목에서는 변화가 발생하지 않는 'O→X' 조건의 경우, 색상 변화가 발생했던 항목은 후행 검사항목에서 다시금 기억항목과 동일한 색상으로 제시된다. 따라서 성공적인 변화탐지 수행을 위해서는 선행 변화에 대한 탐지 이후에도 해당 항목의 기존 정보에 대한 효율적인 재 접근(re-access)이 요구된다. 모든 검사항목에서 변화가 발생하는 'O→O' 조건에서는 해당 시행수의 50%의 비율로 선·후행 변화가 발생하는 위치를 서로 같거나 또는 다르도록 처치하였으므로(각 30 시행) 시각경험은 더욱 복잡해진다. 앞서 논의하였듯이, 변화의 발생은 해당 위치로 자동적인 주의 전환을 촉발하므로 두 경우 모두 현저한 선행 변화에 유도된 주의의 영향에 의해 뒤따르는 시각적 변화의 현출성은 감소될 가능성이 있다. 추가적으로 만약 후행 변화탐지 수행 저하의 정도가 주의를 유도하는 선행 변화와의 공간적 거리와 관련된다면, 후행 변화

가 선행 변화와 다른 위치에서 제시되는 경우 후행 검사항목에서의 수행은 동일 위치 조건보다 상대적으로 더욱 저하될 것이다.

## 결과 및 논의

선행 및 후행 검사항목에서 관찰된 변화탐지 정확도를 그림 2의 (가)에 제시하였다. 선·후행 검사항목에서 관찰된 변화탐지 정확도에 대해 대응표본 *t*-검증(paired *t*-test)을 실시한 결과, 첫 번째 검사항목(88.8 ± 6.50%)과 두 번째 검사항목(82.6 ± 5.73%)간 유의미한 수행 차이가 관찰되었다,  $t(9) = 7.03, p < .001$ . 후행 검사항목에서의 변화탐지 수행 정확도에 선행 검사항목과 후행 검사항목의 변화발생 유무(변화 있음 vs 변화 없음)가 미치는 영향을 조사하기 위해 반복측정에 근거한 이원변량분석(repeated-measure two-way ANOVA)을 실시한 결과, 선행 검사항목과 후행 검사항목의 변화발생 여부의 주효과는 유의미하였으나, 선행 검사항목 변화 여부에 대해  $F(1, 9) = 127.42, p < .001, \eta^2 = .95$ , 후행 검사항목 변화 여부에 대해  $F(1, 9) = 8.18, p < .05, \eta^2 = .48$ , 둘 간의 상호작용은 관찰되지 않았다,  $F(1, 9) = 0.15, p > .05, \eta^2 = .02$ .

이를 확장하여, 선행 및 후행 검사항목에서의 변화발생 여부에 따른 조건 별 변화탐지 정확도를 그림 2 (나)에 제시하였다. 이후 이루어지는 차이검증에 대해서는 다중 비교에 의한 1종 오류의 가능성이 있는 경우 Bonferroni 교정을 통해 보수적인 유의확률 값을 사용하였다. 먼저 각 조건 별로 첫 번째와 두 번째 변화탐지 수행 정확도 차이에 대하여

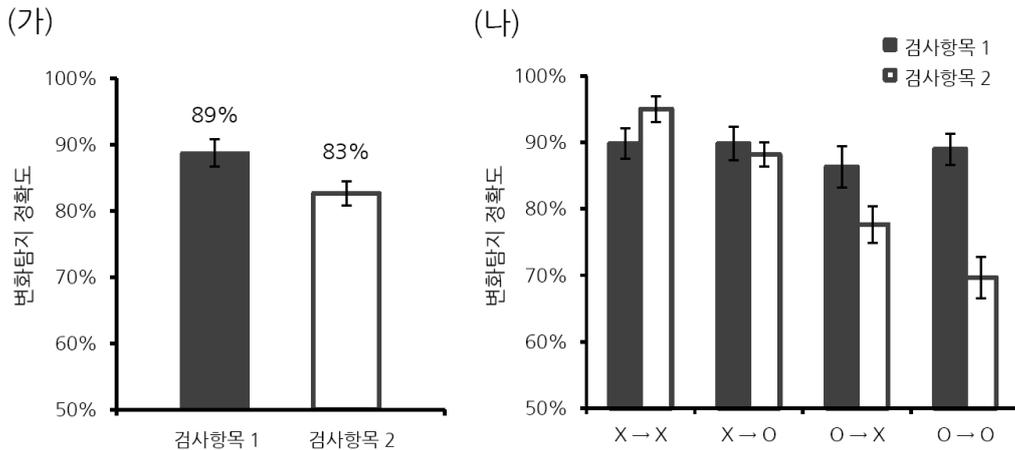


그림 2. (가) 실험 1의 각 검사항목에서 관찰된 변화탐지 정확도. (나) 선행 및 후행 검사항목에서의 변화발생 여부에 따른 조건 별 변화탐지 정확도. 각 조건의 명칭은 변화의 유무를 의미한다(오차막대: 표준 오차).

대응표본 *t*-검증(paired *t*-test)을 실시한 결과, X→X와 X→O 조건에서는 선·후행 변화탐지 정확도간에 통계적으로 유의미한 차이가 관찰되지 않았던 반면, O→X와 O→O 조건에서는 유의미한 차이를 보였다. X→X 조건에 대해  $t(9) = -2.09, p = .067$ ; X→O 조건에 대해  $t(9) = 1.34, p = .213$ ; O→X 조건에 대해  $t(9) = 3.46, p = .007$ ; O→O 조건에 대해  $t(9) = 7.77, p = .000$ .

구체적으로, 선행 검사항목에서의 변화발생 여부가 후행 검사항목의 변화탐지 수행에 미치는 영향을 조사하기 위해 X→X와 X→O 조건, 그리고 O→X와 O→O 조건에서의 후행 변화탐지 정확도를 각각 합산하여 비교한 결과, 통계적으로 유의미한 차이가 관찰되었다,  $t(9) = 11.29, p = .000$ (그림 3의 가). 이러한 결과는 선행 검사항목에서의 변화 발생이 뒤따르는 변화탐지 과제를 상대적으로 어렵게 만들었음을 의미한다.

특이한 점은 O→X 조건에 비해 O→O 조건에서 더욱 저하된 후행 변화탐지 정확도가 관찰된 것이다,  $t(9) = 2.29, p < .05$ . 한 가지 가능한 해석은 현저한 선행변화에 대한 탐지가 후행 검사항목에서 요구되는 기존 기억표상의 활용에 간섭을 초래할 뿐 아니라, 연이어 발생하는 두 번째 변화의 현출성을 감소시킴으로써 더욱 저하된 변화탐지 수행을 보였을 가능성이 있다. 그러나, 그림 3의 (나)에 도해한 것과 같이 후행 변화탐지 정확도를 기준으로 O→O 조건에서 선·후행 변화가 서로 ‘다른자리’에서 발생하였던 경우( $58.7 \pm 14.59\%$ )가 ‘같은자리’의 경우( $80.7 \pm 10.03\%$ )보다 현저하게 낮은 정확도를 보인 점,  $t(9) = 4.56, p < .001$ , 그리고 O→O 조건 내 ‘같은자리’ 시행의 수행( $80.7 \pm 10.03\%$ )이 O→X 조건의 수행( $77.7 \pm 8.79\%$ )과 서로 유의미하게 다르지 않은 점을 미루어볼 때,  $p > .05$ , O→O 조건에서의 상대적인 수행 저하는 온전히 서로 다른 위치에서

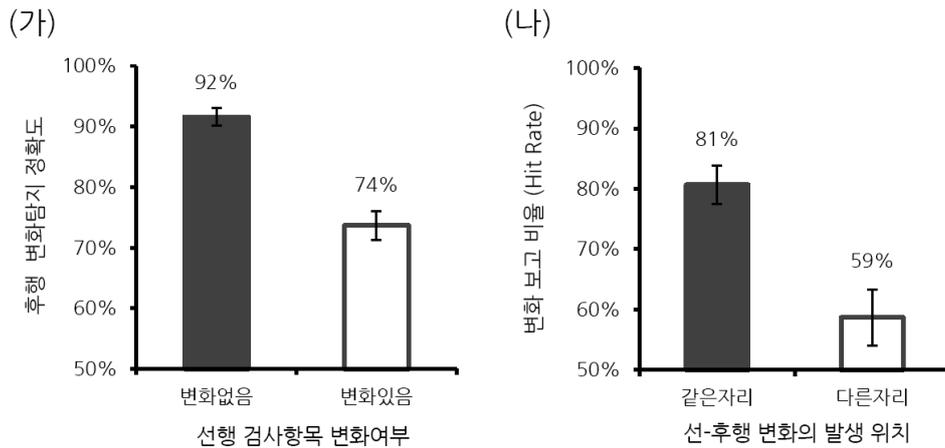


그림 3. (가) 선행 검사항목에서의 변화발생 여부에 따른 후행 변화탐지 정확도. (나) 모든 검사항목에서 변화가 발생하는 O→O 조건 내에서 선·후행 변화위치의 일치 여부에 따른 후행 변화탐지 정확도. 여기서 후행 변화탐지 정확도는 두 번째 검사항목에서의 수행 정확도를 의미한다.

발생하는 선·후행 변화가 초래하는 추가적인 간섭에 기인했을 가능성이 있다.

### 실험 2

한 차례 형성된 기억표상을 토대로 두 번의 검사항목에 활용하는 실험 1의 연속적 변화탐지 과제에서 두 번째 검사항목에서의 상대적인 수행 정확도 감소는 첫 번째 검사항목에서 변화가 발생한 경우에 국한되었다. 이는 선행 변화가 지니는 현출성이 뒤따르는 검사항목에서 요구되는 기억표상의 활용에 특정한 형태의 간섭을 일으켰을 가능성을 제안한다.

특히 피험자들은 모든 검사항목에서 변화가 발생하며 두 변화가 다른 위치에서 출현하는 O→O 조건의 ‘다른자리’ 시행에서 우연 수준의 낮은 수행 정확도를 보였는데, 이는 현저한 선행 변화를 탐지하는 과정에서 유지되는 나머지 항목들에 대한 기억표상이 정확도

(fidelity) 측면에서 상대적으로 손상(impairment) 되었을 가능성, 또는 선행 변화에 유도된 초점주의와 후행 변화가 발생하는 위치간의 공간적 차이를 반영하는 결과일 가능성이 있다. 그러나 이러한 간섭의 원인을 파악하기 위해서는 각 검사항목에서 기억항목과 동일한 개수의 자극이 출현하는 전체탐사 상황에서의 피험자의 시각경험을 추론해볼 필요가 있다. 즉, O→O 조건의 ‘다른자리’ 시행에서 후행 검사항목의 색상 변화는 기억항목을 기준으로 할 때에는 한 개 자극에 해당되나, 동시에 선행 변화항목은 기억항목과 동일한 색상으로 되돌아가므로 피험자는 첫 번째 검사항목을 기준으로 할 때 두 개 자극의 색상이 물리적으로 변화하는 시각경험을 하게 된다. 이와 같은 지각적 복잡성 및 요구되는 정보처리가 증가된 상황에서 피험자는 두 번째 검사항목이 제시되었을 때 선행 변화항목의 색상이 기억자극과 동일함을 우선적으로 확인하여 상대

적으로 변화 없음을 보고하는 경향을 보였을 가능성이 있다. 전체 10명의 피험자 중 4명이 해당 조건에서 50% 이하의 정확도를 보였음을 고려할 때, 선·후행 변화가 서로 다른 위치에서 발생하는 시행에서 관찰된 급격한 수행 저하는 전체탐사 과제의 자극구성이 초래한 반응편향에 의한 것으로 판단된다.

이와 같은 가능성을 확인하기 위해 실험 2에서는 각 검사항목에서 하나의 자극만이 제시되고 이에 대해 기억항목과의 동일성 여부를 보고하는 부분탐사(partial probe) 과제를 실시하였다. 부분탐사 상황에서 후행 변화가 선행 변화와 다른 항목에서 이루어질 경우, 검사자극을 제외하고 선행 변화의 위치를 포함한 나머지 공간에는 어떤 자극도 제시되지 않으므로 실험 1의 전체탐사 상황에 의해 초래되는 지각적 간섭 및 반응편향의 영향을 배제할 수 있다. 따라서 만약 현저한 선행 변화를 탐지하는 과정에서 기억표상 내 유지되는 나머지 항목들의 상대적인 손상이 일어난다면, O→O 조건 내 ‘다른자리’ 시행에서 실험 1과 동일한 결과패턴이 관찰될 것이다. 반면, 선행 변화의 출현에 따른 후행 변화탐지 수행 저하의 원인이 유지되는 기억표상의 손상이나 변화항목에 유도된 초점주의의 공간적 특성과는 관계가 없다면, 부분탐사의 효과는 선·후행 변화의 발생 위치 간 후행 검사항목 수행 차이를 상쇄시키는 방식으로 나타날 것이다.

## 방 법

**참가자** 실험 1과 동일한 피험자 10명이 실험에 참여하였으며, 실험 1과 2를 수행한 순서

는 전체 피험자에서 역균형화되었다.

**자극과 절차** 실험 2의 부분탐사 과제에서는 각 검사항목에서 한 개의 자극만이 제시되므로, 변화여부와 관계없이 모든 조건에서 선·후행 검사항목 간 제시되는 자극의 위치가 서로 동일하거나 상이하도록 처치된 점을 제외하면 모든 처치는 실험 1과 동일하였다(그림 1의 나).

## 결과 및 논의

그림 4의 (가)는 선행 검사항목( $86.7 \pm 5.09\%$ )과 후행 검사항목( $82.5 \pm 5.15\%$ )의 변화탐지 정확도를 나타낸다. 실험 1과 유사하게 두 번째 검사항목에서의 수행 정확도는 첫 번째 검사항목보다 유의미하게 저하됨이 관찰되었다,  $t(9) = 3.45, p < .01$ . 실험 1과 동일하게 선행 검사항목과 후행 검사항목에서의 변화발생 여부(변화 있음 vs 변화 없음)가 후행 검사항목에서의 변화탐지 수행 정확도에 대해 미치는 영향을 알아보기 위해 반복측정에 근거한 이원변량분석(repeated-measure two-way ANOVA)을 실시한 결과, 선행 검사항목에서의 변화발생 여부의 주효과만이 유의미하였으며,  $F(1, 9) = 35.07, p < .001, \eta^2 = .80$ , 후행 검사항목의 변화발생 여부의 주효과는 유의미하지 않았다,  $F(1, 9) = 0.14, p > .05, \eta^2 = .02$ . 또한 상호작용 역시 관찰되지 않았다,  $F(1, 9) = 0.02, p > .05, \eta^2 = .003$ . 이는 후행 검사항목에서의 변화탐지 수행 정확도는 선행 검사항목에서의 변화발생 유무에 의해서만 지배적인 영향을 받았음을 의미한다.

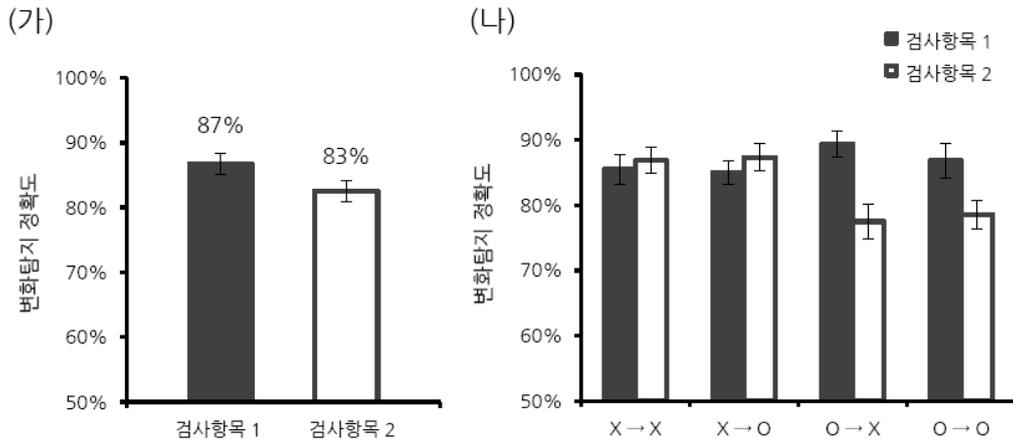


그림 4. (가) 실험 2의 각 검사항목에서 관찰된 변화탐지 정확도. (나) 선행 및 후행 검사항목에서의 변화 발생 여부에 따른 조건 별 변화탐지 정확도. 각 조건의 명칭은 변화의 유무를 의미한다.

추가적으로 그림 4의 (나)에 도해된 선·후행 검사항목에서의 변화발생 여부 조건 간 수행 정확도 차이에 대하여 Bonferroni 교정 대응 표본 *t*-검증(paired *t*-test)을 실시한 결과, X→X와 X→O 조건에서는 선·후행 변화탐지 정확도간 유의미한 차이가 관찰되지 않았던 반면, O→X와 O→O 조건에서는 유의미한 차이를

보였다, X→X 조건에 대해  $t(9) = -0.63, p = .542$ ; X→O 조건에 대해  $t(9) = -1.01, p = .338$ ; O→X 조건에 대해  $t(9) = 3.36, p = .008$ ; O→O 조건에 대해  $t(9) = 3.50, p = .007$ . 또한, 후행 검사항목의 변화탐지 수행은 선행 검사항목에서 변화가 발생한 경우에 그렇지 않은 경우보다 유의미하게 저조하였음이

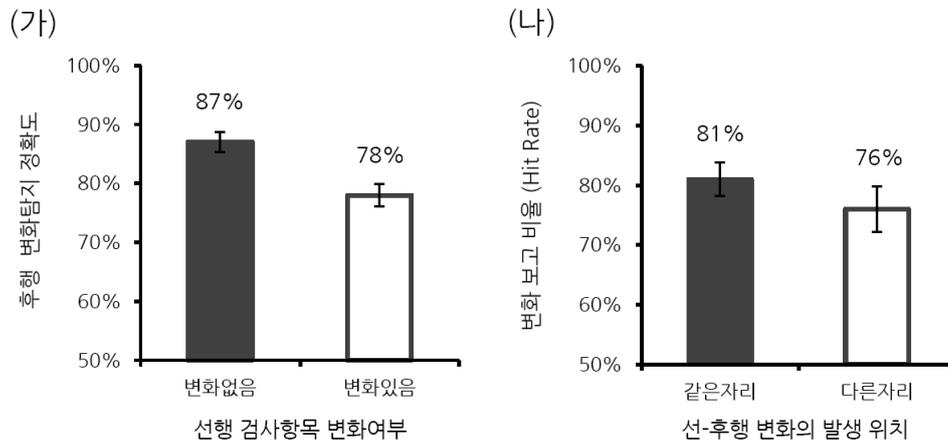


그림 5. (가) 선행 검사항목에서의 변화발생 여부에 따른 후행 변화탐지 정확도. (나) 모든 검사항목에서 변화가 발생하는 O→O 조건 내에서 선·후행 변화위치의 일치 여부에 따른 후행 변화탐지 정확도.

관찰되었다,  $t(9) = 5.92, p = .001$ (그림 5의 가). 이처럼 실험 1과 일치하는 결과 패턴은 기억표상의 연속적인 활용이 요구되는 경우에 현저한 선행 변화에 대한 탐지가 기존 기억표상 정보의 활용을 간섭한다는 본 연구의 가설을 지지하며, 간섭의 효과는 검사항목의 제시 방식과는 독립적으로 나타난다는 점을 의미한다.

반면, 부분탐사 과제의 효과는 O→O 시행에서 선·후행 변화가 발생하는 위치의 일치성 여부에 따른 차이를 상쇄시키는 형태로 발생하였다(그림 5의 나). 즉, ‘같은자리’ 시행과 ‘다른자리’<sup>2)</sup> 시행간 후행 변화탐지 수행의 차이는 통계적으로 유의미하지 않았다,  $t(9) = 0.96, p > .05$ .

### 종합 논의

본 연구에서는 기억항목 이후 두 번의 검사항목에 대해 각각 기억 자극과의 동일성 여부를 보고해야 하는 연속적 변화탐지 과제를 사용하여 한 차례 형성한 기억표상의 연속적 활용이 요구되는 경우에 이루어지는 시각작업기억 처리특성을 조사하였다. 실험 1과 2의 결과는 공통적으로 후행 검사항목에서의 변화탐

지 효율성이 선행 검사항목에서 변화가 발생하는 경우에만 한정적으로 저하되는 현상을 보여주었다. 이는 변화가 지나는 현출성과 그에 대한 탐지과정이 기억표상을 연속적으로 활용하는 데 있어 효율적이고 독립적인 처리 과정에 간섭을 일으켰음을 반영한다.

결과에서 나타난 선행 변화의 발생에 따른 후행 변화탐지 과제의 수행 저하의 이면에는 다양한 가능성이 존재한다. 그러나 기본적으로 이는 모두 변화의 현출성이 초래하는 영향 하에 놓여있으므로 먼저 변화에 대한 시각작업기억의 처리특성에 대해 살펴볼 필요가 있다. 서론에서 언급한 바와 같이, 비교처리과정에 대한 최근의 연구들은 적어도 색상과 같이 분명한 범주를 지니는 자극들의 경우 저장된 기억표상과 새로이 유입되는 정보간의 차이, 즉 변화에 대한 탐지과정이 매우 자동적이고 신속하게 수행됨을 주장한다(Hyun, et al., 2009). 또한, 사건관련전위(event-related potentials, ERPs) 측정법을 통해 변화탐지 과제에서 검사항목이 제시되는 시점을 기준(time-lock)으로 초점주의가 특정 시야로 이동할 때 두뇌 후두부의 대측으로부터 발견되는 N2pc 성분의 발현시점(onset latency)이 자극 개수의 증가와 관계없이 신속하였음을 보고한 현주석(2009)의 연구는 변화가 발생한 항목으로의 초점주의 전환이 매우 자동적으로 발생하는 현상임을 시사한다.

그러나 변화가 매우 효율적으로 탐지된다는 점이 그 직후 이어지는 정보처리 과정에 있어 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 의미하지는 않는다. 오히려 변화의 지각적 현출성 및 이에 대한 효율적 탐지가 지나는 생태학적

2) 변화의 위치 즉 ‘자리’의 차이에 따른 공간적 주의의 개입 가능성에 대한 관찰은 선행 그리고 후행 변화항목 간 단순한 공간적 불일치 여부에 초점을 맞추고 있으므로, 두 항목 위치 간 점진적 거리 변화의 영향력에 대한 관찰은 고려되지 않았다. 결과적으로 실험 2의 변화 위치 처치는, 두 위치 간 동일 및 차이 여부가 초래하는 변화탐지 정확도의 변화 가능성에 대한 단순 검증에 해당된다.

함의를 고려할 때, 본 연구의 연속적 변화탐지 과제와 같은 상황에서 선행 변화에 대한 탐지는 뒤따르는 후행 변화탐지 과제를 수행하는데 요구되는 기존 기억표상의 추가적인 활용에 특정한 방식으로 간섭을 미쳤을 가능성이 있다.

이러한 가정을 바탕으로 본 연구에서 선행 검사항목에서의 변화 발생에 의한 후행 변화탐지 수행 저하의 원인은 크게 두 가지로 생각해볼 수 있다. 첫 번째는 현저한 선행변화에 대한 탐지가 기존 기억표상 유지과정에 손상을 주었을 가능성이다. 시각작업기억의 처리단계 중 유지과정은 부호화 및 공고화 과정을 거쳐 기억표상이 형성된 이후, 활용이 요구되기까지 물리적 자극이 사라진 짧은 시간 동안 보유하는 것을 목적으로 한다. 이 때 공고화 과정을 거친 기억표상은 간섭에 취약한 감각 표상과는 달리 견고하고 추상적인 형태로 저장되는 것으로 알려져 있다. 반면, 서론에서 살펴본 바와 같이 최근 다양한 연구들은 이미 형성된 기억표상의 유지과정에 있어 지속적인 주의자원의 역할과 더불어 공간적 차원의 선별적 처리에 초점을 맞추고 있다. 이를 알아보기 위한 한 가지 방법은 시각자극의 제시가 종료된 이후 유지기간(retention-interval)에 잠재적인 표적의 정보를 단서로 제시하는 역행단서법(retro-cueing paradigm)을 이용하는 것이다. 예를 들어, Griffin과 Nobre(2003)는 변화탐지 과제에서 조건에 따라 기억항목(memory array) 제시 이전 또는 이후에 단서를 통해 공간적 주의를 유도한 결과, 선행 및 역행단서 조건 모두에서 주의를 주어진 항목에 대해 비 정보적인(neutral) 단서를 제시한 조건

보다 상대적으로 높은 기억 정확도를 관찰하였다. 역행단서는 기억공고화 과정을 거쳐 추상적인 형태의 객체표상이 형성된 이후에 제시되므로, 이러한 결과는 표상 내부(internal representations)에서도 공간적 주의에 의한 선별적 유지(selective maintenance)가 가능하다는 점을 시사한다. 또한 Ikkai 등(2010)은 사건관련 전위 측정을 통해 시각작업기억에 정보를 유지하는 단계에서 그 용량에 비례하여 지속적으로 나타나는 대측지연활동(contralateral delay activity, CDA)을 발견하였다. 그 외 기억표상의 파괴과정에서 특정 항목에 선별적으로 유도된 주의가 뒤따르는 검사항목에서의 지각적 간섭을 저하시킨다는 Makovski 등(2008)의 주장은 이러한 시사점을 뒷받침한다.

그러나 역행단서에 의해 유도된 공간적 주의가 해당 항목의 기억 효율성을 상대적으로 개선시킬 수 있다고 해서 기억표상을 유지하는데 있어 지속적인 주의가 반드시 요구된다고 얘기할 수는 없다. 다시 말해, 기억표상 내 특정 항목에 선별적으로 주어진 주의가 나머지 항목들의 기억 효율성을 저하시켰는지는 알 수 없다. 만약 시각작업기억의 정보가 효율적으로 유지되기 위해 반드시 지속적인 주의가 요구된다면, 파괴과정에서 충분한 간섭을 일으키는 주의전환이 발생하는 경우에 기억 효율성은 저하되어야 한다. 그러나 Hollingworth와 Maxcey-Richard(2012)는 역행단서가 제시되는 변화탐지 과제에서 단서 이후 어려운 탐색과제를 추가하여 단서항목에 대한 지속적 주의를 방지한 결과, 탐색과제와 기억과제가 혼합된 이중과제 조건에서 단서 효과(cueing effect)의 정도는 기억 단일과제의 경우

에 비해 저하되지 않았음을 보고하였으며, 다수의 연구가 유사한 결과를 보고하였다 (Johnson, Hollingworth, & Luck, 2008; Hollingworth & Henderson, 2002). 본 연구의 실험 2에서 선·후행 변화의 위치가 서로 ‘다른 자리’에서 발생할 때에 ‘같은자리’에 비해 변화에 대한 탐지 적중률이 저하되지 않았던 결과는 선행 변화에 전환된 초점주의가 기억표상의 유지과정에서 나머지 항목들에 대한 손상을 초래하지 않았음을 의미한다.

비록 실험 1의 ‘다른자리’ 시행에서는 현저히 낮은 수행이 관찰되었으나, 이는 각 검사항목에서 기억항목과 동일한 자극 수가 제시되는 전체탐사 상황이 초래하는 반응편향의 영향이었음이 실험 2의 부분탐사 과제를 통해 확인되었다. 즉, 전체탐사 상황에서 선·후행 변화가 다른 자리에서 발생할 경우 앞서 변화가 발생했던 항목은 후행 검사항목에서 다시금 기억자극과 동일한 색상으로 제시되므로 피험자들은 상대적으로 ‘변화 없음’을 보고하는 경향을 보인 것으로 해석된다. 반면, 실험 2에서는 각 검사항목에서 한 개의 자극만이 제시되는 부분탐사 과제를 사용하였으므로 동일한 상황에서 선행 변화의 위치에 주어진 피험자의 주의 고정점(anchor point)에는 아무런 자극도 제시되지 않았으며, 따라서 선·후행 변화간 발생위치의 일치 여부에 따른 차이가 발견되지 않았다. 따라서 선행 변화에 유도된 초점주의의 영향이 기존 기억자극의 유지에 간섭을 일으켰을 것이라는 가능성은 타당하지 않은 것으로 판단된다.

대안적인 두 번째 가능성은 선행 변화의 대한 탐지가 기존 기억표상 정보에 대한 접근

및 인출과정에서 병목현상(bottleneck effect) 및 의사결정의 불확실성(decision uncertainty)을 초래했을 경우이다. 흔히 변화맹(change-blindness)라고 불리는 현상은 주의 분산 등의 요인에 의해 감각기관을 통해 입력되는 자극에 대한 기억표상 형성이 실패한 경우에 발생하나 (Simons & Levin, 1997), 동시에 작업기억에 안정적인 기억표상을 형성하더라도 적절한 인출에 실패하는 경우에도 발생한다(Hollingworth, 2003). 또한 Hyun 등(2009)은 항목개수를 달리한 변화탐지 과제에서 반응시간(reaction time)과 도약 안구 운동 및 사건관련전위 발현시점을 분석하여 작업기억 내 저장된 정보와 새로 유입되는 지각적 정보의 차이, 즉 변화 그 자체는 매우 자동적이고 신속하게 자각되지만, 비교처리의 상대적인 후기 과정에서 해당 변화를 확인하고 반응선택(response selection)에 이르기까지는 추가적인 정보처리가 요구됨을 제안하였다. 이와 같은 연구 결과들에 근거할 때, 본 연구에서 후행 변화탐지 수행의 저하가 선행 검사항목에서 변화가 발생하는 경우에 한해서만 나타났던 결과는 선행 변화를 확인하고 반응하는 과정에서 요구되는 부가적인 정보처리가 뒤따르는 검사항목에서 요구되는 기존 기억표상의 접근 및 인출과정에 병목현상과 같은 형태의 간섭을 일으켰기 때문으로 판단된다.

한편 본 연구에서 수행된 실험들에서는 첫 번째 검사항목이 제시되면 기억항목과의 일치성 여부를 키보드를 통해 보고받은 이후 나머지 절차인 빈 화면과 두 번째 검사항목이 출현하였으므로, 반응선택 과정에서 소요되는 후기 정보처리의 상대적인 지연 및 반응에 대

한 즉각적인 피드백이 후행 변화탐지 과제를 수행하는데 있어 부가적인 간섭을 초래했을 가능성이 있다.<sup>3)</sup> 따라서 후속연구에서는 모든 자극제시 절차가 종료된 이후 각각의 검사항목에 대한 보고를 수집할 필요가 제기되었다. 또한 실험 1과 2에 걸쳐 동일한 참가자를 사용하였으며 성별 측면의 통제에 있어서도 균질한 피험자 집단을 구성하지 못했다는 문제점이 있다. 이는 역균형화를 통해 순서 효과 등에 대한 통제를 직접 시도하긴 하였으나 그럼에도 불구하고 성차와 같은 가외변인의 개입 가능성을 배제할 수 없다. 마지막으로, 피험자는 기억과제가 비교적 어려울 경우, 시각작업기억 저장소뿐만 아니라 음운 루프를 사용한 언어적 책략이 시도될 가능성이 있는데 실험 1과 2에서는 이러한 통제를 위해 대개 부가되는 조음억제 과제 등이 강제되지 않았다. 이처럼 반응 과정의 간섭, 참가자의 편파적 구성 그리고 언어적 책략의 개입 가능성에 대한 통제가 정확히 수반되지 않았다는 점은 본 연구의 현재 결과에 대한 해석에 있어서의 취약성과 함께 보수적인 결론이 요구됨을 의미한다. 이러한 한계점들에 대한 보완은 추후

3) 각 검사항목에서의 반응에 따른 즉각적인 피드백이 후행 변화탐지 과제 수행에 미치는 영향을 알아보기 위해 선행 검사항목의 정반응 여부에 따라 후행 검사항목의 정확도 차이를 분석하였다. 실험 1의 경우 선행 검사항목이 정답일 때 후행 검사항목의 정확도( $84.0 \pm 4.86\%$ )는 오답( $71.9 \pm 7.48\%$ )인 경우와 유의미한 차이를 보였으나,  $t(9) = 7.74, p < .001$ , 실험 2에서는 선행 검사항목의 정반응 여부에 따라 후행 검사항목에서의 정확도(선행 검사항목이 정답일 때  $83.4 \pm 4.59\%$ , 오답일 때  $78.2 \pm 12.51\%$ )의 유의미한 차이가 관찰되지 않았다,  $t(9) = 1.35, p = .209$ .

연구에서 반드시 필요한 것으로 판단된다.

종합하여, 본 연구는 한 차례 저장된 기억 표상의 연속적 활용이 요구되는 과제를 활용하여 시각작업기억 표상의 공고성 및 다중 활용특성을 조사하였다. 결과에서 선행 변화에 대한 탐지가 뒤따르는 변화탐지 과제 수행에 초래한 간섭은 해당 위치로 전환된 초점주의가 유지되는 기존 기억표상의 질적인 손상을 반영한 것이라기보다는 변화를 재차 확인하고 반응선택을 하는 비교처리 후기 과정이 후행 변화탐지 과제에서 요구되는 기억표상의 재접근과 인출과정에서 병목현상(bottleneck effect) 또는 반응선택과 관련된 불확실성(decision-making uncertainty)을 초래하였을 가능성을 제안한다. 이와 같은 가능성을 보다 명확하게 확인하기 위해 후속연구에서는 회상 과제(recall task)와 같이 표상의 질적 정확도(fidelity)를 반영하는 실험방법이 이루어질 필요가 있다.

### 참고문헌

한지은, 현주석 (2011). 역행 차폐를 통해 본 시각작업기억의 공고화 및 비교처리 과정. *인지과학*, 22(4), 365-384.

현주석 (2009). 기억 표상과 지각적 입력 간 비교 과정을 통해 본 시각작업기억 표상의 특성. *한국심리학회지: 인지 및 생물*, 21(4), 265-282.

Baddeley A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford, UK: Oxford Univ. Press

Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in

- adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 83-100.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and brain sciences*, 24(1), 87-114.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Scott Saults, J., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive psychology*, 51(1), 42-100.
- Cusack, R., Lehmann, M., Veldsman, M., & Mitchell, D. J. (2009). Encoding strategy and not visual working memory capacity correlates with intelligence. *Psychonomic bulletin & review*, 16(4), 641-647.
- Griffin, I. C., & Nobre, A. C. (2003). Orienting attention to locations in internal representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 1176-1194.
- Hollingworth, A. (2003). Failures of retrieval and comparison constrain change detection in natural scenes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 388-403.
- Hollingworth, A., & Henderson, J. M. (2002). Accurate visual memory for previously attended objects in natural scenes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(1), 113-136.
- Hollingworth, A., & Maxcey-Richard, A. M. (2012). Selective maintenance in visual working memory does not require sustained visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. Advance online publication.
- 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(4), 1140-1160.
- Irwin, D. E. (1991). Information integration across saccadic eye movements. *Cognitive psychology*, 23(3), 420-456.
- Irwin, D. E. (1992). Memory for position and identity across eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(2), 307-317.
- Ikkai, A., McCollough, A. W., & Vogel, E. K. (2010). Contralateral delay activity provides a neural measure of the number of representations in visual working memory. *Journal of Neurophysiology*, 103(4), 1963-1968.
- 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(1), 41-55.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(20), 279-281.
- Makovski, T., Sussman, R., & Jiang, Y. V. (2008). Orienting attention in visual working memory

- reduces interference from memory probes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34, 369-380.
- Peterson, L., & Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of experimental psychology*, 58(3), 193-198.
- Phillips, W. A. (1974). On the distinction between sensory storage and short-term visual memory. *Perception & Psychophysics*, 16(2), 283-290.
- Simons, D. J., & Levin, D. T. (1997). Change blindness. *Trends in cognitive sciences*, 1(7), 261-267.
- 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 and Performance*, 27(1), 92-114.
- 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(6), 1436-1451.

1 차원고접수 : 2013. 06. 04

수정원고접수 : 2013. 07. 15

최종게재결정 : 2013. 07. 30

## The Fidelity of Representations in Visual Working Memory Assessed by a Consecutive-Change Detection Task

Hyung-Bum Park

Joo-Seok Hyun

Department of Psychology, Chung-Ang University

A salient change arising from a mismatch between information in visual working memory (VWM) and a visual stimulus has been known to trigger a shift of attention to the location of the change. However, little is known about what occurs to the memory representation in VWM once after the mismatch was successfully detected. In order to address this issue, we devised a *consecutive-change detection* task where two successive sets of test items were presented after a single set of memory items. In the task, the single memory array was followed by the first test array either with or without a changed item. After a brief interval, the second test array followed the first test array, again either with or without a changed item. When the first and second test arrays both had changes, the changes would have occurred at the same or different locations, and the test arrays were manipulated to have either partial or whole probes. Detection of the change in the second test array went inaccurate if the first array had a change, and this relative impairment was more evident when those two changes occurred across different locations on the tests arrays of whole probes. The results indicate that detection of a preceding visual change can disrupt detection of another subsequent change, and also suggests the impairment may owe to a response bottleneck rather than the lack of representational fidelity *per se* in VWM.

*Key words* : visual working memory, consecutive-change detection, response bottleneck, representational fidelity