

# 변별과제에서 초등학생의 안구운동 분석을 통한 발견적 주의 모델 개발

신원섭 · 신동훈\*

서울교육대학교

## Development of the Heuristic Attention Model Based on Analysis of Eye Movement of Elementary School Students on Discrimination task

Shin, Won-sub · Shin, Dong-Hoon\*

Seoul National University of Education

**Abstract:** The purpose of this study was to develop a HAM (Heuristic Attention Model) by analyzing the difference between eye movements according to the science achievement of elementary school students on discrimination task. Science achievement was graded by the results of the Korea national achievement test conducted in 2012 for a random sampling of classes. As an assessment tool to check discrimination task, two discrimination measure problems from TSPS (Test of Science Process Skill, developed in 1994) which were suitable for an eye tracking system were adopted. The subjects of this study were 20 students from the sixth grade who agreed to participate in the research. SMI was used to collect EMD (eye movement data). Experiment 3.2 and BeGaze 3.2 programs were used to plan experiments and analyze EMD. As a result, eye movements of participants in discrimination tasks varied greatly in counts and duration of fixation, first fixation duration, and dwell time, according to students' science achievement and difficulty of the problems. By the analysis of EMD, strategies of the students' problem-solving could be found. During problem solving, subjects' eye movements were affected by visual attention; bottom-up attention, top-down attention and convert attention, and aflunter attention. In conclusion, HAM was developed, and it is believed to help in the development of a science learning program for underachievers.

**Key words:** heuristic attention model, bottom-up, top-down, cognitive load.

### I. 서 론

시각은 인간에게 필요한 정보 수집과 뇌의 발달에 영향을 주는 가장 핵심적인 감각기관이다(최경주와 박민철, 2011). 시각정보는 망막의 시세포(cone cell and rod cell)를 통해 시신경에 전달되고 외측슬상핵(lateral geniculate nucleus)을 거쳐 1차 시각피질(visual cortex)에 전달된다(이민호, 2009; Snowden *et al.*, 2011). 시각정보의 전달 경로는 단일 경로를 거치는 것이 아니라 그 정보의 특성과 유형에 따라 다른 경로를 가진다. 사람은 어떤 대상을 재인하고 확인하기 위해 1차 시각피질에서 측두엽(temporal lobe)으로 연결된 복측 경로(ventral route)를 이용하고 대상의 공간적 위치를 확인하기

위해 1차 시각피질에서 후두정엽으로 연결된 배측 경로(dorsal route)를 이용한다(이민호, 2009). 이를 'what path'와 'where path'라고 한다. 인간이 무엇을 어떻게 볼까를 결정하는 것은 주의(attention)와 밀접한 관계가 있고 이것은 개인의 인지적 모델에 의해 결정된다(최민영, 2003). 인간은 단순히 망막으로부터 시각정보를 수동적으로 받아들이기만 하는 것이 아니라 주어진 과제와 목적에 따라 의도적이고 능동적으로 시각적 정보를 탐색한다(최민영, 2003; Navalparkkam, Itti, 2002; Snowden *et al.*, 2011).

시각메커니즘에 대한 연구는 선택적주의(selective attention)에 기초하여 크게 상향식주의(bottom-up attention)와 하향식주의(top-down attention)에 대한 연구가 주를 이루고 있다(정범수, 이민호, 2004;

\*교신저자: 신동훈(dhshin@snu.ac.kr)

\*\*2013.10.22(접수), 2013.11.15(1심통과), 2013.12.02(최종통과)  
<http://dx.doi.org/10.14697/jkase.2013.33.7.1471>

Choi *et al.*, 2004; Müller *et al.*, 2006; Tsotsos *et al.*, 1995). 주의과정에 대한 대표적인 연구는 ‘특징통합이론’ (Treisman, Gelade, 1980)과 안내탐색 (Wolfe *et al.*, 1989, Wolfe, 1994)이다. 특징통합이론은 시각정보의 여러 시각적 요소의 특징들로부터 전주의적 처리(pre-attentive process)와 이 특징을 통합하는 초점 주의(focal attention)로 시선결정모델을 제안했지만, 시각요소의 결합적인 탐색에서 병렬적 수행관점과 통합의 방법과 절차 등에 대한 정확한 메커니즘을 밝혀내지 못했다(이민호, 2009). 안내탐색은 복잡한 시각적 결합상황에서 여러 가지 시각요소로부터 돌출성 지도(saliency map)를 구성함으로써 특징통합이론의 단점을 보완하여 인간의 병렬적인 탐색관점을 발전시켰다. 또한 시각자료의 몇몇 속성이 주의의 전개를 조절하고 이것은 단순한 시각정보의 속성이 아니라 시각과정 초기단계에서 주입된 시각자료로부터 구체적인 추상화인 안내표상(guiding representation)이라고 하였다(Wolfe, Horowitz, 2004). 인간의 시각시스템은 대상의 특징에 의존하는 상향식주의와 인간의 인지모델에 의존하는 하향식주의가 동시에 작용하고(박상재 등, 2002; Itti *et al.*, 1998) 특정 과제를 해결하기 위해서는 문제해결전략에 의존한 하향식주의가 시선결정에 중요한 역할을 한다.

대상에 의존적인 인간의 상향식주의 모델에 대한 유의미한 연구(박민철, 최경주, 2005; 박상재 등, 2002; 최경주, 이일병 2005; 최경주, 박민철, 2011; Itti *et al.*, 1998)는 이루어졌으나, 인간의 인지모델에 의존한 하향식주의에 대한 연구는 적은 편이다 (Navalpakkam, Itti 2002). 상향식주의에 대한 모델은 대상의 시각적 정보에 의존하기 때문에 시각정보의 명암, 윤곽선, 색상, 방향성 등의 독립성분해석을 통해 돌출성 지도(saliency map)를 형성하는 것으로 개발되었다. 하지만 하향식주의의 기제는 인간의 인지모델이고 뇌에서 발생하는 복잡한 인지처리과정 이기에 그 과정을 직접적으로 조작하고 관찰할 수 없어 연구하는데 많은 어려움이 있다. 최근 Navalpakkam, Itti (2002)의 목표 지향적 주의안내 모델 연구, 이민호 (2009)의 상향식과 하향식 시선결정기능을 통합한 모델, Ban *et al.*, (2005)의 생물학적 자율정신개발 모델 등의 연구에서 인간의 상향식주의와 하향식주의를 통합한 실제적인 인간의 시각시

스템을 모델화하기 위한 연구가 시도되고 있다.

인간은 시각시스템을 이용하여 시각정보를 수집해 표상을 만들고 자신의 기억 표상과 비교함으로써 대상을 재인한다(손영숙 등, 2003). 이러한 인지사고처리과정을 직접 관찰할 수는 없지만, 특정과제를 해결하는 동안 안구운동을 분석하면 문제해결전략을 유추할 수 있고(신원섭, 신동훈, 2012, 2013; 신원섭 등, 2013; 최현동 등, 2012; Slykhuis *et al.*, 2005) 또한 도약(saccade)과 응시(fixation)와 같은 안구운동은 주의(attention)와 밀접한 관련이 있다는 것은 선행연구들(Rauthmann *et al.*, 2012; Moore, Fallah, 2001; Snowden *et al.*, 2011)로 밝혀졌기 때문에 연구참여자들이 어떻게 주의를 조절하는 지를 추론할 수 있다. 주의모델 개발은 학생들의 인지 발달 또는 학업성취 수준에 따른 시각주의의 패턴을 명시화할 수 있는 발판을 제시할 수 있고 더 나아가 학생들에게 적합한 교육자료 개발에 기초적인 연구로서 선행되어야 한다. 본 연구의 가정은 학생들에게 과제가 제시되면 먼저 과제의 특성이 학생들의 상향식주의를 이끌 것이고 동시에 과제의 문제를 정확히 파악하기 위한 의도적이고 목표지향적인 하향식주의가 점화되고, 그 이후 문제를 해결하기 위해 개개인의 인지모델에서 전략이 발현되어 문제해결과정 동안 안구운동을 이끌어간다는 것이다. 만약 문제해결을 위한 정확한 문제해결전략이 없거나 하향식주의를 유지하지 못할 경우 학생들은 과제의 시각정보에 의존한 상향식주의에 의한 안구운동을 하거나 과제해결과 상관없는 혼란적인 안구운동을 보일 것이다. 본 연구에서는 초등학생들이 변별과제를 해결하는 동안의 안구운동을 분석하여 초등학생들의 시각정보에 따른 인지적 부담(cognition load)과 문제해결전략(question solving strategy)을 분석하고 그 과정에서 안구운동에 대한 정량적인 분석과 정성적인 분석을 통해 주의와 안구운동의 관계를 규명하고자 한다. 이 관계를 바탕으로 발견적 주의 모델(heuristic attention model)을 개발하고자 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 참여자

S시 ○○초등학교 6학년 학급 중 국가수준 학업성

취도 평가의 표집학급에서 본 연구에 자발적으로 지원한 학생 중 학부모가 동의한 학생만을 대상으로 하였다. 참여한 학생들의 과학학업성취도 결과는 보통 학력 이상 8명과, 기초학력 이하 12명으로 총 20명이었고, 성별은 <Table 1>과 같다.

## 2. 연구 절차

본 연구에서는 과학교육 전문가 2명, 초등 과학교육전공 석사 학위자 3명으로 구성된 전문가집단을 구성하였고 과제 선정과 실험 설계, 실험결과 분석방법에 대한 타당성과 신뢰도를 높이기 위한 협의과정을 거쳤다. 실험설계는 독일 SMI(Senso Motoric Instruments)사의 Experiment 3,2프로그램을 이용해 1차 실험을 설계하였고, 본 실험의 적합성과 타당성을 높이기 위해 초등학생 일반학급 10명을 대상으로 사전실험(pilot test)을 실시하였다(Holmqvist, et al. 2011). 사전실험의 결과분석을 바탕으로 실험 자료의 제시 방법과 시간을 수정하여 2차 실험설계를 하였다. 이 실험은 SMI사의 iView X™ RED 장비를 사용하였고, 연구 참여자의 안구보정타당도와 안구추

적비율을 확인한 후 분석대상을 선정하여 안구운동 데이터를 정량적·정성적으로 분석하였다.

## 3. 실험 자료

변별과제로 사용한 실험 자료는 권재술과 김범기(1994)가 개발한 TSPS(test of science process skill) 검사지에서 전문가협의와 사전실험을 거쳐 안구운동추적시스템에 적합한 2문제를 선정하였다(Fig. 1).

변별 Task 1번과 4번 모두 시각정보 중 윤곽(edge) 정보만을 가진 평면자료로 네 개의 선택지 보기에서 다른 그림 하나를 선택하는 문제였다. Task 1번은 윤곽정보의 복잡성에 따라 학생들의 인지부담(cognition load)이 다를 것으로 예상했고 Task 4번은 Shepard와 Metzler의 1971년 심전 회전 연구에서 사용된 도형과 유사한 형태로 심상을 통해 네 개의 선택지 보기에서 다른 도형을 찾는 것이기에 Task 1번에 비해 곤란도가 높은 문제였다. Task 4번의 선택지 ②, ③, ④ 보기는 보기 ①의 도형을 오른쪽으로 180°, 45°, 270°로 각각 회전한 것이다. 이로 인해 대상을 재인하는데 그 대상을 보는 시각이나 관점에 따

**Table 1**  
Gender of Subjects

Subject	Over average science achievement								Below Basic science achievement												total (person)
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Male	1	1	1			1	1		1							1	1		1	1	10
Female				1	1			1	1		1	1	1	1	1				1		10

1. 다음 4개의 그림 중 다른 하나를 찾으시오. ----- ( )      4. 다음 4개의 도형 중 다른 하나를 찾으시오. ----- ( )

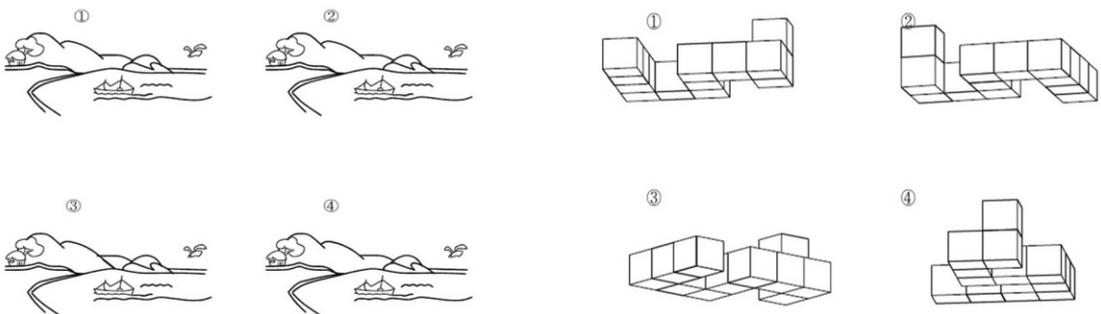


Fig. 1 Experiment Stimulus

라 다르게 형성된다는 관점 의존적(viewpoint-dependent) 이론과 그 대상이 구성하는 구조적인 형태가 변하지 않으면 대상을재인하는데 필요한 시간은 시각이나 관점과 관련 없이 일정하다는 관점 독립적(viewpoint-independent) 이론을 고려해야 하는 과제였다(손영숙 등, 2003).

#### 4. 실험 설계

실험은 안구운동 보정(calibration) → 보정타당도(validation) → 사전과제(Pre-task) 1,2 → 과제 안내(inform task) → Task 1 → Task 4 단계의 순으로 설계하였다. 첫 번째, 보정(calibration) 단계에서는 화면의 목표 점(target)을 다섯 곳으로 지정해 학생들의 시선을 보정하였다. 안구 반경 모양이 개인별로 다르기 때문에 이 단계는 안구 운동 추적 실험에서 반드시 필요하다(신원섭, 신동훈, 2013; Holmqvist *et al.*, 2011). 두 번째, 보정타당도(validation)단계에서는 목표점(target)과 참여자 동공의 최대 편차(deviation)는 X, Y축에 대하여 모두 0.5° 이하일 때에만 계속 실험을 진행하였다(신원섭, 신동훈, 2013). 안구운동 추적 연구에서는 동공의 최대 편차 값은 0.5° 이하를 최적의 값으로 요구하고 있기 때문에(Holmqvist *et al.*, 2011; SMI, 2011a) X, Y축에 대한 동공의 편차가 0.5° 이하가 나올 때까지 보정과 보정타당도 단계를 반복하여 실시하였다. 세 번째, 사전과제(pre-task)를 60초간 제시하여 참여자가 실험과 자료를 제시하는 방법을 익히고, 적용할 수 있는 시간을 부여하였다. 네 번째 과제 안내단계에서 과제를 해

결한 후 스페이스 바를 누르면 다음 과제로 이동된다는 것과 과제가 제시된다는 것을 설명하였다. 그 이후, 변별 과제는 사전실험(pilot test) 결과 과제를 해결하는데 최대 2분의 시간이 소요되었기 때문에 본 실험에서도 120,000ms동안 시간을 주었다. 과제는 곤란도가 낮은 1번을 먼저 제시 한 후에 4번을 제시하였고 문제 풀이가 끝나면 답을 말하는 동시에 스페이스바를 눌러 다음 과제로 넘어가도록 하였다.

#### 5. 자료 수집 및 분석 방법

##### 1) 안구 운동 추적기

본 연구에 사용한 안구 운동 추적기는 동공의 크기와 위치를 측정할 수 있는 SMI사의 iView XTM RED 장비로, 적외선 조명과 컴퓨터 기반의 이미지 프로세싱을 사용해 동공의 움직임과 동공의 상대적인 크기까지 측정 가능하다(신원섭, 신동훈, 2012; 2013; SMI, 2011a). 또한 비침습적인(non-invasive) 특징이 있어 참여자의 어떠한 신체적 접촉 없이도 사용할 수 있기 때문에 초등학생들에게 사용하기 적합하다(신원섭, 신동훈 2012; 2013; Tang, Pienta, 2012). 안구 추적 모드는 양안이고, 본 연구에 사용한 샘플링 속도는 120 Hz이다(SMI, 2011a). 실험 자료는 1680px(pixel) × 1050px(가로×세로)의 화면으로 제시되었다.

##### 2) 자료 수집 및 분석 방법

연구 참여자 20명의 보정타당도는 X, Y축에 대하여 최대 편차 값은 0.5° 이하였고, 안구운동추적비율

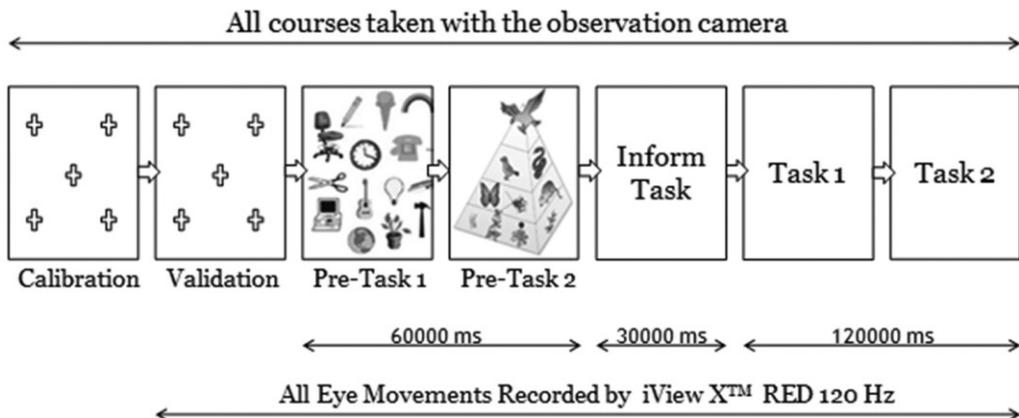


Fig. 2 Experiment Design

(tracking ratio)의 평균값은 91.4%였다(Table 2). 학생들의 보정타당도와 안구운동추적비율이 분석대상으로 적합하여 모든 학생들의 분석대상으로 설정하였고 보통학력 이상의 학생들을 A 그룹, 기초학력 이하의 학생들을 B 그룹으로 구분하여 분석하였다.

안구운동의 모든 데이터는 응시 최저 시간(fixation minimum duration)을 임의 지정함으로써 도약운동과 응시운동으로 구분될 수 있다(신원섭, 신동훈 2012, 2013; SMI, 2011b). 최근의 안구 운동 추적 연구의 응시 시간(fixation duration)은 200 ms로 설정한 경우가 대부분이지만(최현동 등, 2012; Cook *et al.*, 2011; Liu, Shen, 2011; Tsai *et al.*, 2012), 이 연구에서의 실험 자료의 시각적 정보는 복잡하지 않고 과제를 해결하는 동안의 인지전략을 정확히 파악하기 위해서는 짧은 응시시간과 정확한 응시위치를 파악하는 것이 매우 중요하기 때문에 응시 최저 시간(fixation minimum duration)을 100ms으로 설정하였고 최대 분산(maximum dispersion)은 50 px(pixel)로 설정하여 분석하였다. 모든 참여자의 각

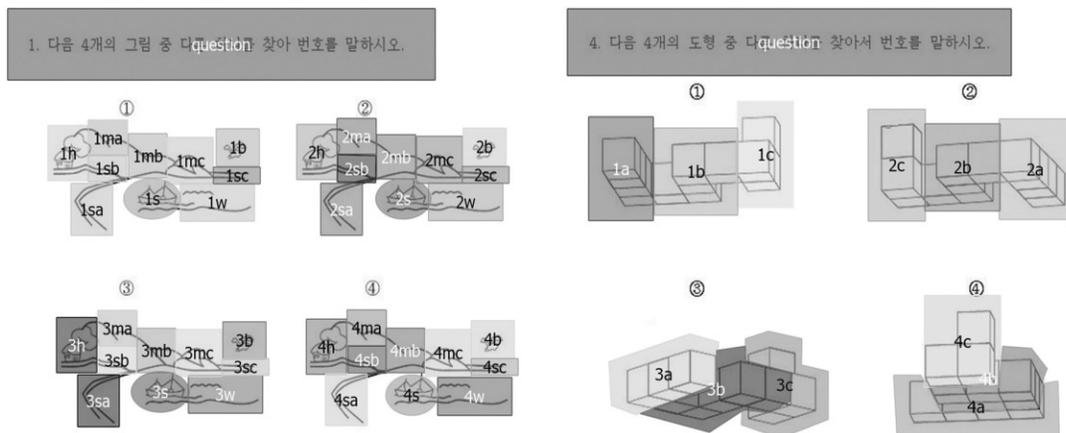
과제에 대한 첫 번째 응시(first fixation)는 Snowden *et al.* (2011)이 말한 응시의 유사성(similarity)과 근접성(proximity) 규칙을 고려하여 분석에서 제외하였다(Holmqvist *et al.*, 2011). 본 실험에서 수집한 안구운동 중에서 과제의 시각적 정보의 인지적 부담을 알아보기 위해 관심영역(area of interest)을 <Fig. 3>과 같이 설정하여 각 시각정보의 첫 번째 평균응시시간(first average fixation time)을 분석하였다.

문제해결전략과 인지사고과정을 분석하기 위해 실험 자료가 제시된 화면을 16×16로 분할하여 각 영역에 대한 시선흐름(scan-path)을 정성적으로 분석하였다(Fig. 4). 또한 과학성취도 보통학력 이상과 기초학력 이하 두 그룹의 각 과제의 시각정보에 대한 평균 응시시간(average fixation time)을 정량적으로 분석하여 학생들의 주의(attention)의 정도와 자신의 답에 대한 확실성(assurance)을 판단하였다. 모든 안구운동 데이터는 BeGaze 3.2 프로그램을 이용해 분석하였다.

**Table 2**  
*Eye-tracking Ratio of Subjects*

Subject	A group								B group												Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
D. X [°]	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.1	0.37
D. Y [°]	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	0.5	0.3	0.33
TR [%]	95.8	94.2	88.5	94.2	92	91.7	84.7	92	89.4	94	89.5	89.9	91.5	93.6	90.1	94.3	85.1	86	85.3	83.3	91.41

\* D: Deviation, TR: Tracking Ratio



**Fig. 3** Designation of AOI (area of interest)

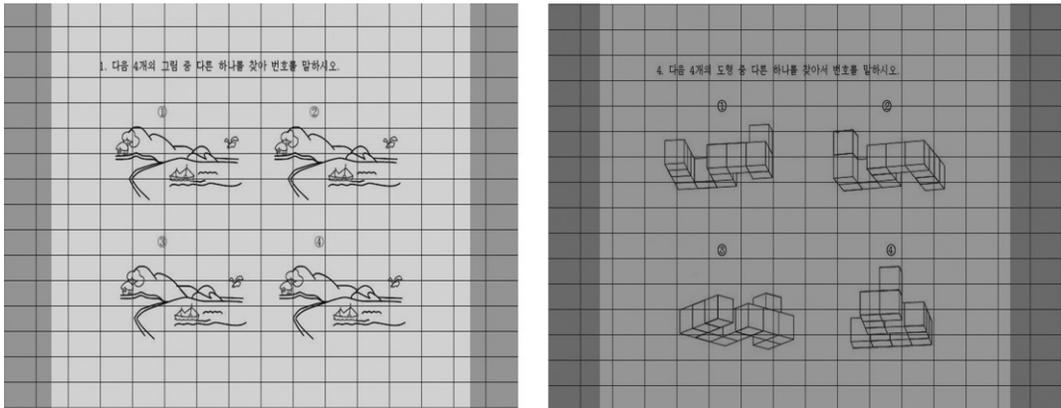


Fig. 4 Division of Stimulus's Screen

### III. 연구 결과 및 논의

#### 1. 변별과제의 인지적 부담(cognition load)

Task 1번은 4가지 선택지 보기에서 다른 그림을 변별하는 문제로 모두 평면에 윤곽선 시각정보만 가지고 있다. 각 선택지 보기의 AOI에 대한 학생들의 첫 번째 평균응시시간(first average fixation time)은 <Fig. 5>와 같다.

본 연구에서 어떤 한 시각적 정보를 주의(attention) 하면 그 시각적 정보는 단기기억(Short-term memory)이나 장기기억(Long-term memory)에 저장되기 때문에 다른 선택지 보기에게 동일한 시각정

보를 다시 응시할 때에는 첫 응시보다 더 짧은 응시시간이 나타나는 것을 확인했다. Task 1은 네 개의 동일한 선택지 보기가 제시되었기 때문에 첫 번째 평균응시시간을 분석하기 위해서는 네 개의 선택지 보기에서 각 AOI에 대해 첫 번째 응시시간이 가장 큰 것을 학생개인별로 추출하여 다시 그룹으로 평균값을 구하는 절차를 거쳐야 했다. 학생들은 한 개의 선으로 이루어진 윤곽선보다 두 개 이상의 윤곽선으로 구성된 집, 새 등의 시각정보에서 첫 번째 평균응시시간이 높았고 더 많은 인지적 부담을 갖는 것으로 판단된다. 특이한 점은 답 영역인 'mb' 영역의 첫 번째 보통학력 이상 학생들의 평균응시시간이 기초학력 이하의 학생들보다 83 ms 더 긴 응시시간을 보였고, 이는 답 영

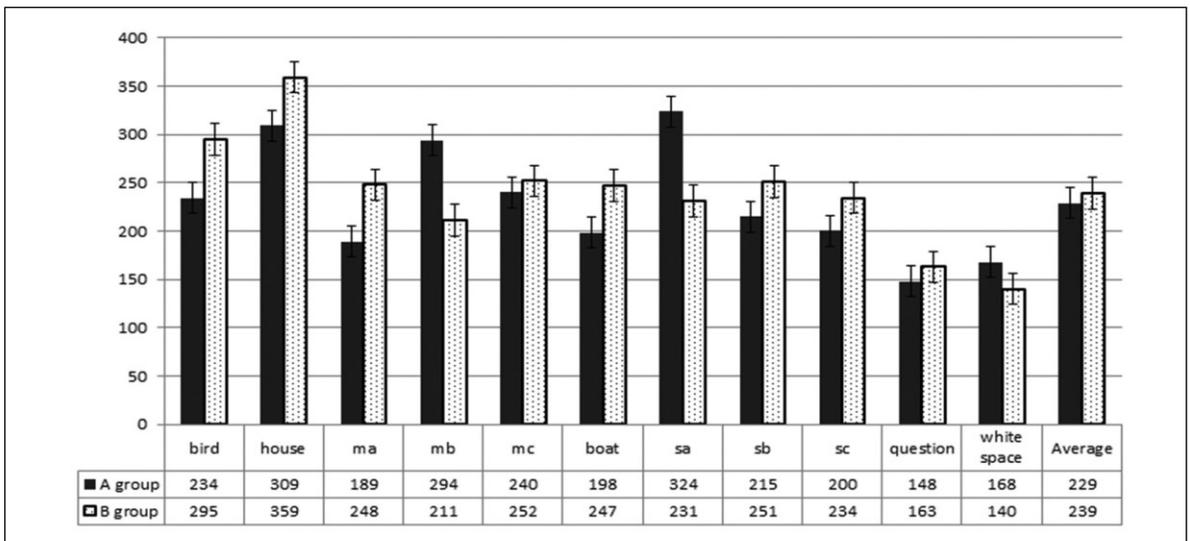


Fig. 5 First Average Fixation Time of Task 1's AOI

역을 응시하여 바로 윤곽선의 차이점을 돌출하는 인지사고 과정으로 인해 이 영역에 대한 첫 번째 평균응시시간이 높은 것으로 판단된다.

Task 4번의 선택지 ②, ③, ④ 보기는 선택지 보기 ①의 도형을 오른쪽으로 180°, 45°, 270°(왼쪽으로 90°)로 각각 회전한 것이다. 그룹별로 각 AOI에 응시도입시간(entry time)을 평균하여 응시순서(sequence)를 분석한 결과 보통학력 이상학생들의 응시순서는 1b - 2c - 1c - 2b - 3b - 4c - 3a - 1a - 3c - 4b - 4a - 2a 순이었고, 기초학력 이하 학생들의 응시순서는 1b - 2b - 3b - 2c - 1c - 1a - 4c - 4b - 2a - 3a - 4a - 3c 순이었다. 대상을 재인하기 위해 표상을 형성하는데 관점 독립적(viewpoint-independent)이라면 한 시각적 정보의 AOI에서 첫 번째 응시시간은 다음 선택지 보기에서 그 대상을 재인하는데 줄어들어야 한다. 하지만 Task 4번의 첫 번째 평균응시시간을 비교한 결과 학생개인은 물론 그룹별 평균을 낸 것 또한 응시순서에 따라 각 AOI에 대한 첫 응시시간이 줄어들지 않고 증가하였다(Fig. 6). 이는 대상을 재인하는 데에 시각과 관점에 따라 걸리는 시간이 다르다는 관점 의존적 이론(viewpoint-dependent)을 지지한다. 손영숙 등(2003)은 개념적 요소를 담지 않은 표상의 경우 반드시 주의가 이루어져야 그 대상을 재인할 수 있고 30° 정도의 관점의 전환은 재인하는데 시간적 이득을 볼 수 있지만 60° 이상의 경우 관점 의존적이라고 하였다. Task 4번의 경우 학생들이 이전에 보지 못한 도형이기에 사전 개념적 요소에 영향을 받지 않았고 선

택지 보기의 회전의 정도에 따라 재인하는데 인지적 부담이 많은 것으로 판단된다.

## 2. 주의와 안구운동 도식

사람의 안구운동은 도약(saccade), 응시(fixation), 미세한 떨림 등으로 나타나지만 실제로 시각적 정보를 받아들이기 위해서는 시각적 정보를 탐색하기 위해 10~30 ms 정도로 빠르게 이동하는 도약(saccade)과 시각적 정보에 대해 인지사고과정을 하는 100~1000 ms 동안 고정하는 응시(fixation)로 구분할 수 있다(신원섭, 신동훈 2013; Snowden *et al.*, 2011). 도약과 응시의 안구운동이 주의(attention)와 연관되어 있다는 사실은 여러 연구들에 의해서 밝혀졌다(이유부, 이석한, 2013; Navalpakkam, Itti, 2002; Rauthmann *et al.*, 2012; Moore, Fallah, 2001; Snowden *et al.*, 2011). 주의가 일어날 때 뇌의 활성화 영역은 양전자 단층촬영(PET)실험을 통해 측두엽이라는 것은 알려졌지만(Corbetta *et al.*, 1995), 사람은 안구운동의 대부분을 의식하지 못할 뿐 아니라(신원섭, 신동훈, 2013; Snowden *et al.*, 2011), 인간의 뇌가 어떻게 주의를 특정 공간으로 이끌어가는 지, 정확히 어디에서 주의를 시작되는지 알 수 없다(신원섭, 신동훈, 2013; Bermúdez, 2012; Snowden *et al.*, 2011). 하지만 선행연구의 결과를 통해 주의를 선택적으로 일어나고(Müller *et al.*, 2006) 시각적 정보에 의존하는 상향식주의(bottom-up attention)와 능동적이

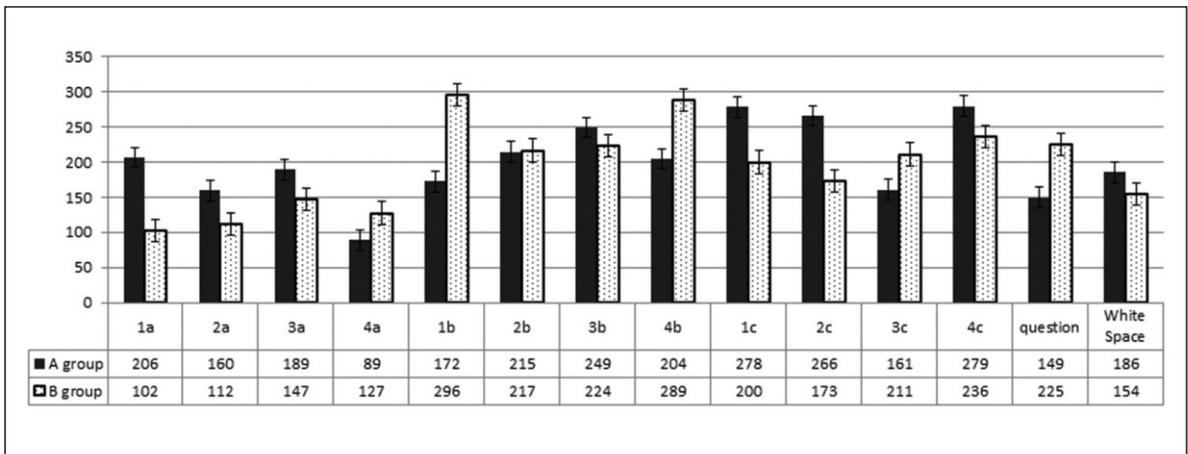


Fig. 6 First Average Fixation Time of Task 4's AOI

고 목표지향적인 하향식주의(top-down attention)로 구분할 수 있다(정범수, 이민호, 2004; Choi et al., 2004; Müller et al., 2006; Tsotsos et al., 1995). 실험 자료 제시화면을 16×16으로 분할하여 한 곳에 연 이어서 나타난 응시는 한 번으로 축약하여 압축된 시선흐름(compressed scan-path)을 <Table 3>과 같이 분석하였다.

이 표에서 한 시각적 요소를 여러 선택지에서 계속적으로 주의한 것을 음영으로 진하게 표시하였다.

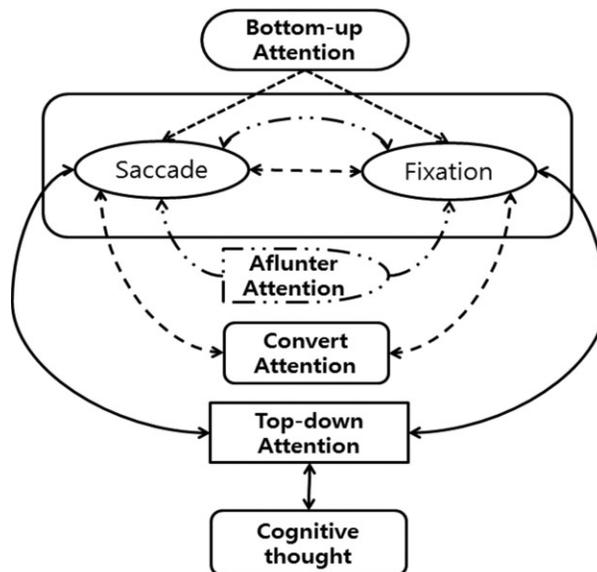
모든 학생들의 압축된 시선흐름을 분석하여 각 안구운동이 상향식주의와 하향식주의 중 어떤 주의에 의한 것인지를 추론하였다. 이를 통해 주의와 안구운동에 대한 관계를 <Fig. 7>과 같이 모식적으로 나타내었다.

인간은 외부자극에 의해 상향식 주의(bottom-up attention)가 발생하고 이로 인해 도약과 응시와 같은 안구운동이 일어난다. 안구운동추적결과 상향식주의에 의한 도약과 응시는 일정한 순서가 없었으며, 개인에 따라 도약이 먼저 일어나거나 혹은 바로 응시가 나타나기도 했다. 그 이후 목표지향적인 의도적이고 능동적인 하향식주의로 발화되어 안구운동을 이끌어 간다. 이 과정에서 선택적주의가 이루어지지 않은 주변영역에서도 암묵적 주의(convert attention)가 발생하여 안구운동을 이끌게 된다. 본 연구에 참여한 학생들의 안구운동을 분석하던 중 B5의 학생과 같이 과제를 해결하는 것과 관련 없는 영역에 대한 안구운동과 자신이 가지고 있는 문제해결전략과 관련 없는 안

**Table 3**  
*Task Solving Process Analysis*

S	Compressed Scan-path String	Task Solving Process
A8	<b>G4-D3-H3-I3-G5-G4-G3-H4-I4-K6-J6-J5-I5-F6-E6-J6-J12-F12-E11-F12-F10-G6-F6-J6-I6-I3-F4</b>	<b>Question(1) → 2,1,3ma,mb,bc → option No.3 → check answer → review question</b> Top-down attention
B5	<b>F6-E4-D4-E4-F4-G4-H4-J7-J8-I7-F7-E7-G7-K8-F6-F13-F14-K14-J15-J6-I5-F4-H5-I4-F4-F5-G4-E4-H4-G5-G7-H5-H4-G3-F3-H3-I3-H14-I14-E16-H16-G15-H14-I15</b>	Bottom-up attention → <b>Question(4) → 2,1b → 3,4a → White space → White space → review question → White space</b> Bottom-up attention Top-down attention

\* S : subject



**Fig. 7** Human Attention and Eye movement

구운동을 하는 경우가 다른 학생들에게도 나타났다. 이 주의를 문제해결을 지연하고, 맹목적이고, 혼란스럽게 시선을 이동하였기 때문에 본 연구에서는 혼란 주의(aflunter attention)로 명명하였다. 혼란 주의는 보통학력 이상의 학생들보다 기초학력 이하 학생들의 문제해결과정에서 더 많이 나타났다.

### 3. 문제해결전략(Problem Solving Strategy)

#### 1) 문제해결전략

그룹별 학생들의 과제에 대한 응답결과는 <Table 4>와 같고 전체학생들의 Task 1번에 대한 정답률은 70%, Task 4번의 정답률은 45%로 Task 4의 곤란도가 더 높은 것을 알 수 있다. A 그룹의 경우 Task 1의 정답률은 87.5%, 4의 경우 75%, B 그룹의 경우 Task 1의 정답률은 58.3%, 4의 경우 25%로 기초학력 이하의 학생들이 두 변별과제에서 보통학력 이상

의 학생들보다 더 많은 인지적 부담을 가진 것으로 판단된다.

대부분의 과제에서 문제해결과정은 첫째, 문제를 정확히 파악하고 둘째, 문제에서 주어진 정보를 분석하여 답을 찾고 셋째, 답을 바로 말하거나 재확인 과정을 거친 후 답을 말하는 세단계이다. 본 연구와 같은 변별문제에서의 문제해결전략은 각 개인의 인지 모델에 따라 절차적 지식(procedural knowledge)으로 존재하고 과제를 파악하는 동시에 자동적으로 실행된다. 과제를 해결하는 동안의 응시시간과 횟수, 응시전환의 의미 있는 일치를 분석하면 문제해결전략을 구체적으로 추론할 수 있다(신원섭, 신동훈, 2013; Henderson, 1992; Goldberg, Kotval, 1999; Snowden *et al.*, 2011; Tang, Pienta, 2012). 학생들의 문제해결전략을 분석하기 위해 압축된 시선흐름(compressed scan-path)을 분석하였고 문제해결전략은 <Table 5>와 같다.

**Table 4**  
*Subjects Correct Answer Ratio*

Subject	A group								B group												Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Task 1 [%]	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	×	×	×	○	○	○	×	○	○:70
Task 4 [%]	○	○	○	○	×	○	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○:45

\* ○: Correct Answer, ×: Incorrect Answer

**Table 5**  
*Problem Solving Strategy*

Task.1 Problem-solving strategies		Strategy users (person)
1	focus on one part and compare another option	A group(8) B group(12)
2	focus on one part and compare others options	A group(6) B group(10)
3	compare two whole options, and the other two comparison pictures	A group(0) B group(0)
Task.4 Problem-solving strategies		Strategy users (person)
1	Generate imagery by rotating shape	A group(2) B group(7)
2	Count the number of each part of the shape	A group(6) B group(9)
3	Generate imagery by rotating shape and count the number of whole shape	A group(0) B group(2)

Task 1번을 해결하는 전략은 첫째, 선택지에서 특정 한 부분을 다른 하나의 선택지 보기와 쌍을 이루어 비교하는 방법, 둘째, 선택지의 특정 한 부분을 네 개의 모든 선택지보기와 비교하는 방법, 셋째, 선택지 보기의 모든 정보를 다른 선택지 보기와 비교한 후 차이점이 없을 경우 다른 선택지 보기와 다시 전체적으로 비교하는 방법으로 세 가지이다. 학생들이 한 가지 이상의 문제해결 전략방법을 동시에 사용한 경우와 한 가지 방법만을 사용한 경우가 있었다. 특히 세 번째 전략은 학생들이 사용하지 않았으나, 답이 없다고 말한 기초학력 학생들과 틀린 학생들의 경우 단순한 선택지 보기를 훑어보는 안구운동이 나타났다. 이것은 학생들이 문제를 해결할 수 있는 전략을 가지고 있지만 과제의 곤란정도에 따라 문제해결을 포기하거나 혼란 주의(Aflunter attention)로 인해 선택지 보기에서 무의미한 안구운동이 이루어진 것으로 판단된다. 또한 문제해결전략을 통해 학생들이 문제를 해결할 때 작업기억(working memory)의 영향을 받고 있다는 것과 개인의 작업기억의 능력에 따라 해결하는 전략 또한 상이하다는 것을 알 수 있었다.

Task 4번을 해결하는 전략은 첫째, 선택지 보기의 대상을 회전심상하여 해결하는 방법, 둘째, 선택지 보기에서 각 해당하는 곳의 직육면체 개수를 세어서 해결하는 방법, 셋째, 첫 번째와 두 번째 방법을 모두 사용하는 것이다. 학생들의 경우 선택지 보기에서 회전

심상을 재인하여 직관적으로 문제를 해결하는 경우보다 선택지 보기의 각 위치가 해당하는 부분의 직육면체 개수를 세는 전략을 더 많이 사용하였다. 실험 설계 단계에서 성인에게 사전실험결과 성인들도 두 번째 전략을 사용하는 경우가 많았다. Task 4번의 경우 기초학력 이하의 학생들은 답의 확실성(assurance) 없이 답하는 경우가 나타났고 정답률 또한 25%로 같은 대상을 회전하였을 때 그 대상의 재인하는 표상형성에 어려움을 겪고 있는 것을 알 수 있었다.

2) AOI별 평균응시시간(Average fixation time)

Task 1에 대한 평균문제해결시간은 A 그룹의 경우 34,182 ms, B 그룹은 50,298 ms Task 4의 경우 A 그룹은 31,820 ms, B 그룹은 37,428 ms이었다. 과제해결시간이 다른 경우 평균응시시간을 단순히 비교할 수 없기 때문에 상대적으로 두 과제에서 문제해결시간이 길었던 B그룹의 각 AOI에 대한 평균응시시간은 두 그룹의 문제해결시간에 대한 비율을 곱하여 산출하였다.

$$*산출식: B그룹 AOI의 AFT = B그룹 AOI의 원(raw)AFT \times \frac{A그룹 평균문제 해결시간}{B그룹 평균문제 해결시간}$$

Task 1의 경우 정답영역인 'mb' 영역에 대한 AFT(average fixation time)은 A 그룹이 B 그룹보다 월등히 높았고 이는 주의가 일어나지 않는 영역에

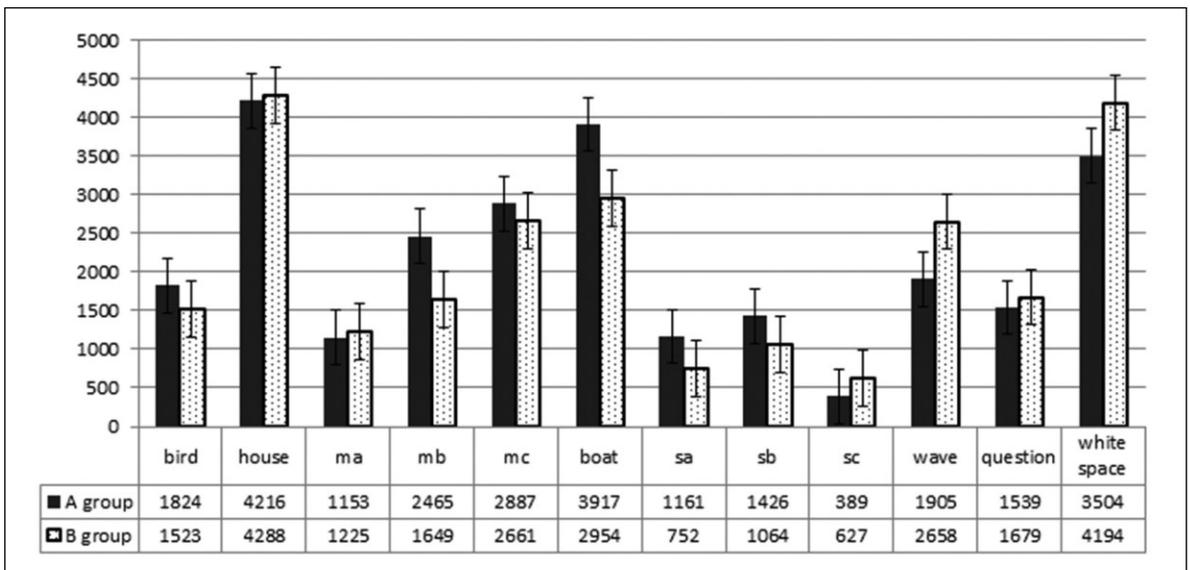


Fig. 8 Average Fixation time of Task 1' AOI

서는 표상이 형성되지 않기 때문에 B 그룹의 정답률이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한 집과 배와 같이 복잡한 시각적 정보는 많은 AFT를 이끈다는 것을 확인할 수 있었고 문제를 해결하는 동안 모든 단서 AOI에 대한 전체평균응시시간(total average fixation time)은 A 그룹이 B 그룹보다 10%정도 높은 것으로 나타났다.

Task 4의 경우 정답영역은 'a(1a, 2a, 3a, 4a)' 영역인데 비해 'b' 영역과 'c' 영역에서 더 많은 응시가 이루어졌다(Fig. 9). 정답인 '3a'에 대한 A그룹과 B 그룹의 AFT는 150ms으로 차이가 적음에도 불구하고 B 그룹의 정답률은 급격히 떨어졌다. 이는 기초학력 이하의 학생들의 회전심상 능력이 보통학력 이상의

학생보다 낮다는 것을 의미한다.

학생들 각 개인별 AOI에 대한 AFT분석결과 답을 확신하는데 필요한 정확한 응시 없이 답을 선택한 경우를 확인할 수 있었고 특히, 기초학력 이상의 학생들은 문제해결에 대한 확실성(assurance)없이 답하는 경우가 많았다.

#### 4. 발견적 주의 모델

학생들의 문제해결과정과 연구결과 1, 2, 3의 바탕으로 신동훈(2006)이 사용한 모형개발법을 근거로 발견적 주의 모델(Heuristic Attention Model)을 개발하였다(Fig. 10).

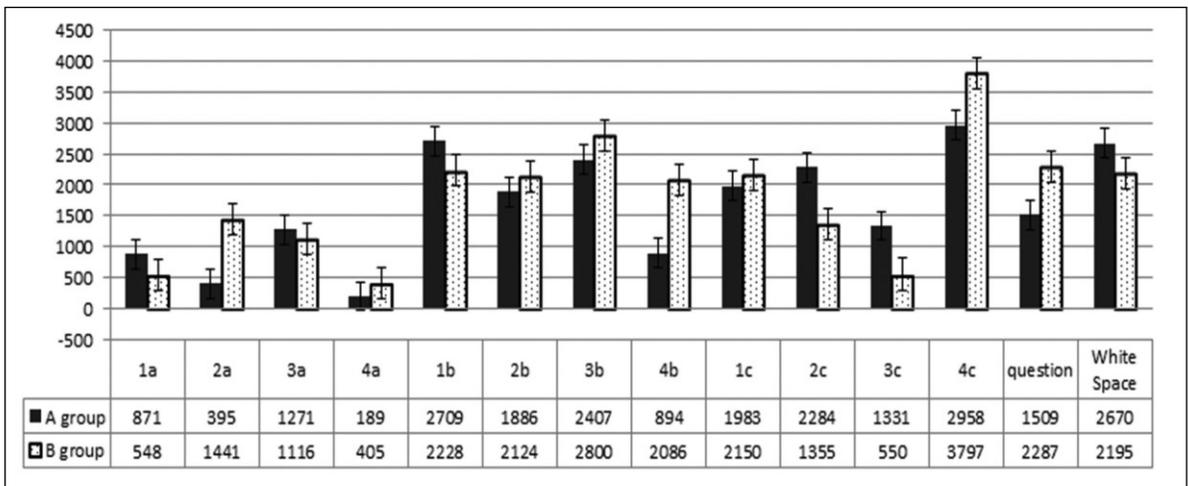


Fig. 9 Average Fixation time of Task 4' AOI

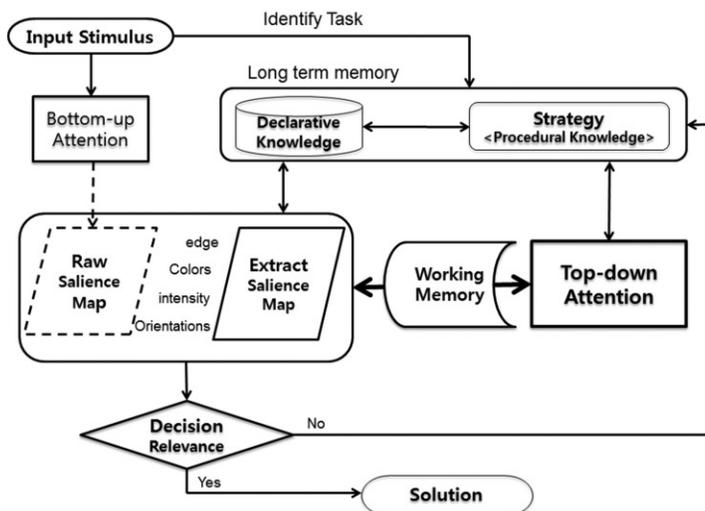


Fig. 10 Heuristic Attention Model

1) Top-down attention와 Bottom-up attention

인간은 자연현상이나 어떤 문제를 해결하기 위해 다양한 시각적 정보를 사용한다. 특정 시각적 정보는 주의의 전개에 영향을 미친다(Wolfe & Horowitz, 2004). 학생들의 문제해결과정 분석결과 과제에 대한 안내가 있었음에도, 과제가 처음 제시되었을 때 그 자료의 시각적 정보에 의존한 상향식주의 안구운동과 과제의 문제를 즉시 확인하는 하향식주의 안구운동 모두를 500 ms 이내에서 확인할 수 있었다(Fig. 11).

과제를 해결하기 위해서는 문제를 정확히 파악하고 목표지향적인 하향식 주의에 의해 문제해결과정이 이루어져야한다. 본 연구에서 제시한 모델은 시각자료 제시 초기에 나타나는 하향식주의와 상향식주의를 모두 나타낸다.

2) Long-term memory

장기기억은 지식에 기반하고(Navalparkkam, Itti, 2002), 지식은 선언적 지식(declarative knowledge)과 절차적 지식(procedural knowledge)으로 구분할 수 있다. 문제를 해결하기 위해서는 각 개인의 인지모듈에서 절차적 지식을 사용한다. 이 절차적 지식에 의해 주의가 발현되는데, 이는 하향식주의이다. 시각적 자료의 대상이 우리가 알고 있던 대상이라면 선언적 지식의 개념요소와 상호작용할 것이고, 만약 그렇지 않다면 개념적 요소의 영향을 받지 않기 때문에 <Fig. 10>과 같이 도식하였다. 절차적 지식은 곧 학생들의 문제해결전략이고, 이것은 이전의 경험을 통해 형성된다.

3) Saliency map

시각정보는 여러 가지 요소들(윤곽, 색깔, 깊이, 방향 등)로 구성되어 있고, 시각정보로부터 추출된 돌출성 지도(saliency map)는 두 가지 버전으로 나타낼 수 있다. 초기 시각정보 탐색단계에서 상향식주의의 영향을 받아 몇몇 시각정보특성들로 구성된 RSM(raw saliency map)이 형성되고, 목표지향적인 하향식주의에 의해 ESM(extract saliency map)이 구성된다. 과제해결 분석결과 학생들은 해결 전 단계에서 시각적 정보의 특성에 의존한 RSM으로 답을 찾는 경우가 나타났다. 하지만 대부분의 학생들은 하향식주의에 의존한 ESM을 통해 문제를 해결하였다. 기초학력이하의 학생들은 문제를 해결하는 과정에서 종종 하향식주의를 이탈하고 시각적 정보에 의존한 RSM을 형성하는 것으로 관찰되었다. 과제의 곤란도(level of difficulty)가 낮은 경우 상향식주의에 의존한 RSM으로 과제를 해결할 수 있으나 곤란도가 높은 경우 하향식주의에 의존한 ESM을 구성할 수 있어야 문제를 해결할 수 있다.

4) Working memory

인간의 작업기억(working memory)은 제한적이고 인지발달단계에 따라 발전한다. 초등학교생들의 경우 각 개인의 경험에 따라 작업기억에 차이가 있을 수 있으며 문제해결과정에서 안구운동의 분석을 통해 학생들의 작업기억 능력(competence)을 추론할 수 있고 그에 따른 주의의 패턴을 찾을 수 있다(Fig. 12). 학생들은 하나의 시각정보를 두 가지 선택지에서 비교하

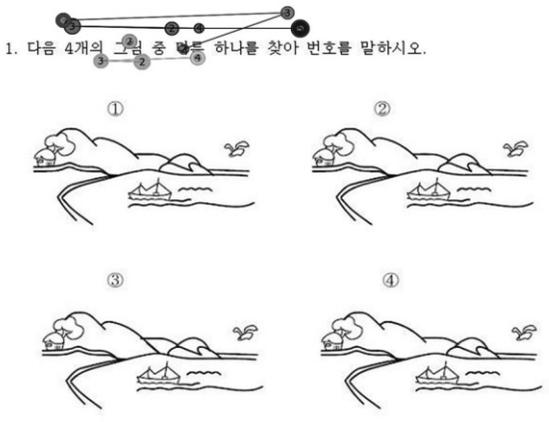
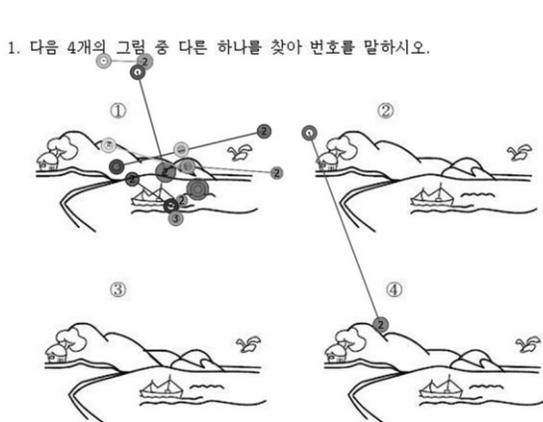


Fig. 11 Scan-path during the first 500 ms

기도 하고 여러 가지 시각적 요소를 병렬적으로 비교하기도 하였다. 작업기억 과제에서 응시의 적합성을 측정 및 결정하고(Navalparkkam, Itti, 2002), 시선 경로를 조절하기 때문에 주의를 작업기억에 의존한다.

주의(attention)의 과정은 시각적 정보의 단순한 특징(색, 위치, 기울기, 방향 등)들을 찾는 단계인 전주의적 처리(pre-attentive process) 단계와 이 시각적 특징들을 구조화하는 초점주의(focal attention) 단계를 거친다고 하였다(Snowden *et al.*, 2011; Treisman, Gelade, 1980; Treisman, 1986). 또한 시각정보의 안내표상(guiding representation)으로 인해 주의를 안내하고(Wolfe, Horowitz, 2004), 정보의 병렬적인 탐색이 가능하다. 이러한 시각탐색과정을 통해 추론된 답은 적합성(relevance)판단과정을 거쳐 최종 답으로 출력되거나 적절하지 않을 경우 다시 각 개인의 인지사고전략을 발화하게 된다. HAM(heuristic attention model)은 문제해결과정에서 나타난 학생들의 안구운동과 기존의 주의와 기억에 대한 선행연구들을 종합하여 개발하였고, 특정 과제를 해결하지 못하는 학생들의 곤란상황을 순차적으로 분석하는데 효과적일 것으로 판단된다.

#### IV. 결론 및 교육적 적용

본 연구에서는 초등학생들이 변별과제를 해결하는 동안의 안구운동을 분석하여 초등학생들의 시각정보에 따른 인지적 부담(cognition load)과 문제해결전략(question solving strategy)을 분석하였고 그 해결과정에서 안구운동의 정량적인 분석과 정성적인 분석을 통해 주의와 안구운동의 관계를 도식하고, 발견적 주의모델(heuristic attention model)을 개발하

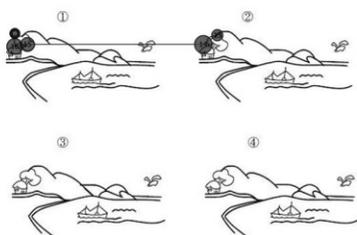
였다. 연구 결론은 다음과 같다.

첫째, 초등학생들은 시각적인 정보의 복잡성에 따라 인지적 부담이 가중되어 각 시각요소에 대한 첫 번째 평균응시시간(first average fixation time)은 윤곽선 정보가 복잡한 곳에서 높았고 회전한 대상을재인하는 데에는 관점 의존적(viewpoint-dependent)이었다. 이는 학습 자료를 만들거나 평가문제를 제작할 때 학생들의 시각적 인지발달 수준을 고려해야한다는 것을 의미한다. 또한 특정 시각적 정보의 곤란도는 해당 시각적 요소의 첫 번째 응시시간을 측정하여 판단할 수 있다.

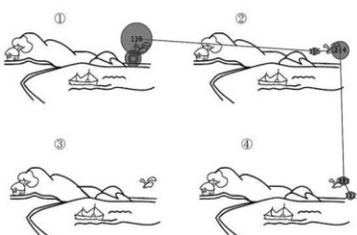
둘째, 문제해결과정에서의 안구운동을 정성적으로 분석하여 주의와 안구운동의 관계를 도식하였다. 선행연구들과 같이 상향식주의와 하향식주의가 모두 발생하는 것을 확인하였고 문제해결과정에서 자신의 문제해결전략과 관련 없는 안구운동을 토대로 혼란 주의(aflunter attention)가 안구운동을 이끈다는 것을 제안하였다. 학생들이 문제를 해결하는 동안 혼란 주의가 발생하는 곳을 분석하면 학생이 어디에서 어려움을 겪고 있는지를 이해하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

셋째, 안구운동에서 응시와 응시전환을 추출하여 압축된 시선흐름(compressed scan-path)을 분석하였고 이를 통해 학생들의 문제해결전략을 도출하였다. 이것을 통해 학생들의 작업기억능력이 문제를 해결하는 방법에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 국내에서 안구운동추적기를 활용한 교육적 연구는 주로 응시시간과 횟수를 분석하여 시선점유율에 대한 연구가 대부분이지만 인지사고과정을 분석한 경

1. 다음 4개의 그림 중 다른 하나를 찾아 번호를 말하십시오.



1. 다음 4개의 그림 중 다른 하나를 찾아 번호를 말하십시오.



1. 다음 4개의 그림 중 다른 하나를 찾아 번호를 말하십시오.

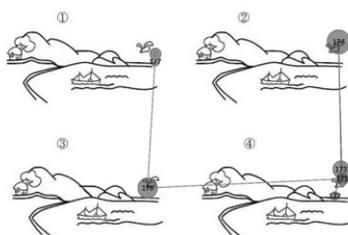


Fig. 12 Attention Pattern by Individual Working Memory Competence

우는 많지 않다. 앞으로 안구운동추적기를 활용한 교육 연구는 응시시간과 횡수를 분석하여 점유율을 분석하는 것과 더불어 어떤 상황이나 과제에서 학생들의 인지사고과정을 추론하는 연구도 병행되어야 한다.

넷째, 본 연구의 결과를 토대로 발견적 주의 모델(heuristic attention model)을 개발하였다. HAM은 과제를 해결하기 위한 인간의 기억과 주의, 시각정보에 대한 일련의 과정을 도식한 것으로 선택적주의(selective attention)의 메카니즘을 기반으로 개발되었다. HAM은 앞으로 학생들의 문제해결과정을 분석하는데 효과적인 방법을 제시할 것이고 특히 문제해결에 곤란을 겪는 부진학생들의 문제해결과정을 이해하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

## 국문 요약

본 연구에서는 변별과제를 해결하는 동안 초등학생의 안구운동을 분석하여 발견적 주의모델을 개발하였다. 연구 참여자는 초등학교 6학년 20명이었고 모두 부모의 동의 절차를 거친 자발적인 지원자였다. 본 연구에 사용된 변별과제는 권재술과 김범기(1994)가 개발한 과학탐구능력 검사지에서 아이트래킹으로 실험 가능한 두 과제를 선택하였다. 학생들의 안구운동의 수집은 SMI사의 iView X TM RED 120 Hz 를 사용하였고 실험설계와 분석은 동사의 Experiment 3.2와 BeGaze 3.2의 소프트웨어를 사용하였다. 학생들의 모든 안구운동은 응시시간에 대한 정량적인 분석과 문제해결과정에서 학생개인의 인지사고과정을 추론하는 정성적인 분석과정을 거쳤다. 본 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 학생들의 실험 자료의 시각정보의 복잡한 정도에 따라 인지적 부담이 가중되었고 대상을 재인하는 관점 의존적이었다. 둘째, 실험 자료의 제시로 상향식주의가 발화되었고 하향식주의에 의해 의도적이고 목표지향적인 안구운동과 혼란 주의에 의한 안구운동을 구분할 수 있었다. 이를 토대로 인간의 주의와 안구운동을 도식할 수 있었다. 셋째, 압축된 시선흐름(compressed scan-path)을 분석하여 학생들의 문제해결전략을 도출하였다. 넷째, 본 연구의 결과를 통해 발견적 주의 모델(HAM)을 개발하였다. 이 발견적 주의 모델은 앞으로 학생들의 문제해결과정을 분석하는데 효과적인 분석관점을 제공할 것으로 기대된다.

주제어 : 발견적 주의 모델, 상향식주의, 하향식주의, 인지적 부담

## 참고 문헌

- 권재술, 김범기(1994). 초·중학생들의 과학탐구능력 측정도구의 개발. 한국과학교육학회지, 14(3), 251-264.
- 박민철, 최경주(2005). 모션 기반 선택적 주의 시스템. 한국콘텐츠학회지, 5(6), 87-96.
- 박상재, 신장규, 이민호(2002). 독립성분분석 알고리즘을 이용한 갈라영상에서의 상향식 선택적 주의 집중 시각 모델. 경북대학교 센서기술연구소, 13(1), 150-154.
- 손영숙, 이현구, 옥애니, 김민식(2003). 선택적 주의와 관점의 변화가 무의미 도형의 재인에 미치는 영향. 한국심리학회지, 15(2), 259-274.
- 신동훈(2006). 생물학 가설 생성에서 나타나는 과학적 감성의 생성 과정 설명을 위한 신경 인지적 모형 개발. 한국생물교육학회지, 34(2), 232-245.
- 신원섭, 신동훈(2012). 초등 교사들의 과학교과서 그래프 이해 과정에 대한 안구 운동 분석. 초등과학교육, 31(3), 386-397.
- 신원섭, 신동훈(2013). 관찰 문제에서 초등학생의 과학 학업성취도에 따른 안구운동 분석. 초등과학교육, 32(2), 185-197.
- 신원섭, 신동훈, 전영석(2013). UX관점에서 Eye-tracking을 이용한 교육용 게임 UI연구. 정보교육학회논문지, 17(2), 211-224.
- 이민호(2009). 선택적 주의집중 인공시각 시스템. 전자공학회지, 36(11), 52-65.
- 이유부, 이석한(2013). 상향식 돌출과 하향식 단서 결합 기반 시각주의를 이용한 얼굴검출. 정보과학학회지, 40(2), 99-107.
- 정범수, 이민호(2004). 인체의 상향식 선택적 주의 집중 시각 기능을 모방한 능동 스테레오 감시 시스템의 개발. 한국센서학회지, 13(2), 144-151.
- 조인수(1998). 시각변별과제 전이조작에 따른 정신지체아의 선택적 주의집중과 학업성취수준 변화. 발달장애학회지, 2, 1-14.
- 최경주, 박민철(2011). 인간의 주의시각에 기반한 시각정보 선택방법. 멀티미디어학회지, 14(3), 378-391.
- 최경주, 이일병(2005). 인간의 시각적 주의 특성에 바탕을 둔 현저한 영역 탐지. 정보과학학회지 : 소프트웨어 및 응용, 31(2), 189-202.

- 최민영(2003) 사용자의 시각적 인지 특성에 기초한 시선 추적 분석 방법에 대한 연구. *디자인학연구*, 16(4), 197-206.
- 최현동, 신원섭, 신동훈(2012). 초등과학영재와 일반 아동의 분류 과정에서 나타나는 안구 운동 패턴의 차이. *초등과학교육*, 31(4), 501-512.
- Choi, S. B., Ban, S. W., & L, M. (2004). Human-Like Selective Attention Model with Reinforcement and Inhibition Mechanism. *Neural Information Processing Lecture Notes in Computer Science*, 3316, 694-699.
- Cook, M., Wiebe, E. N., & Carter, G. (2011). Comparing visual representation of DNA in two multimedia presentations. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 20(1), 21-42.
- Corbetta, M., Shulman, G. L., Miezin, F. M., & Petersen, S. E. (1995). Superior cortex activation during spatial attention shifts and visual feature conjunction. *Science* 270, 802-805.
- Goldberg, J. H., & Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(6), 631-645.
- Haciomeroglu, E. S., & Chicken, E. (2012). Visual thinking and gender differences in high school calculus. *International Journal of Mathematical Education in Science & Technology*. 43(3), 303-313.
- Henderson, J. M. (1992). Visual attention and eye movement control during reading and picture viewing. In K. Rayner (Ed.), *Eye movements and visual cognition: scene perception and reading* (pp. 260-283). New York: Springer-Verlag.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Anderson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking : A comprehensive guide to methods and measures*, pp. 9-144. Oxford University Press.
- Itti, L., Koch, C., & Niebur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell*, 20(11), 1254-1259.
- Liu, C. J., & Shen, M. H. (2011). The influence of different representations on solving concentration problems at elementary school. *Journal of Science Education and Technology*, 20, 621-629.
- Moore, T., & Fallah, M. (2001). Control of eye movements and visual attention. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*. 98, 1273-1276.
- Müller, H. J., & Krummenacher, J. (2006). Visual search and selective attention. *VISUAL COGNITION*, 14(4/5/6/7/8), 389-410.
- Navalpakkam, V., & Itti, L. (2002) A Goal Oriented Attention Guidance Model. *Biologically Motivated Computer Vision Lecture Notes in Computer Science*, 2525, 453-461.
- Rauthmann, J. F., Seubert, C. T., Sachse, P., & Furtner, M. R. (2012). Eyes as windows to the soul: Gazing behavior is related to personality. *Journal of Research in Personality*, 46, 147-156.
- Senso Motoric Instruments. (2011a). *BeGaze Manual version 3.1*.
- Senso Motoric Instruments. (2011b). *iView X™ Manual*.
- Slykhuis, D. A., Wiebe, E. N., & Annetta, L. A. (2005). Eye-tracking students' attention to powerpoint photographs in science education. *Journal of Science Education and Technology*, 14(6), 509-520.
- Snowden, R., Thompson, P., & Troscianko, T. (2011). *Basic vision : An introduction to visual perception*. 오성주 역, 학지사, 2013.
- Tang, H., & Pienta, N. (2012). Eye-Tracking Study of Complexity in Gas Law Problems. *Journal of Chemical Education*, 89(8), 988-994.
- Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A Feature-integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Treisman, A. (1986). Features and objects in visual processing. *Scientific American* 255, November, 106-115.
- Tsai, M. J., Hou, H. T., Lai, M. L., Liu, W. Y., & Yang, F. Y. (2012). Visual attention for solving multiple-choice science problem: An eye-tracking analysis. *Computer & Education*, 58, 375-385.
- Tsotsos, J. K., Culhane, S. M., Wai, W., Lai, Y., Davis, N., & Nuflo, F. (1995). Modeling visual attention via selective tuning. *Artificial Intelligence*, 78, 507-545.
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Review: Neuroscience*, 5(6), 495-501.
- Wolfe, J. M. (1994). Guided search 2.0: A revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1(2), 202-238.
- Wolfe, J. M., Cave, K. R., & Franzel, S. L. (1989). Guided search: An alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(3), 419-433.