



Differences in the Control of Anticipation Timing Response by Spatio-temporal Constraints

Seok-Hwan LEE^{1*}, Sangbum PARK²

Received: June 01, 2023. Revised: June 14, 2023. Accepted: June 16, 2023.

Abstract

Purpose: The purpose of this study was to investigate differences in the control process to satisfy spatial and temporal constraints imposed upon the anticipation timing response by analyzing the effect of spatio-temporal accuracy demands on eye movements, response accuracy, and the coupling of eye and hand movements. **Research design, data, and methodology:** 12 right-handed male subjects participated in the experiment and performed anticipation timing responses toward a stimulus moving at three velocities (0.53m/s, 0.66m/s, 0.88m/s) in two task constraint conditions (temporal constraint, spatial constraint). During the response, response accuracy and eye movement patterns were measured from which timing and radial errors, the latency of saccade, fixation duration of the point of gaze (POG), distance between the POG and stimulus, and spatio-temporal coupling of the POG and hand were calculated. **Results:** The timing and radial errors increased with increasing stimulus velocity, and the spatio-temporal constraints led to larger timing errors than the temporal constraints. The latency of saccade and the temporal coupling of eye and hand decreased with increasing stimulus velocity and were shorter and longer respectively in the spatio-temporal constraint condition than in the temporal constraint condition. The fixation duration of the POG also decreased with increasing stimulus velocity, but no difference was shown between task constraint conditions. The distance between the POG and stimulus increased with increasing stimulus velocity and was longer in the temporal constraint condition compared to the spatio-temporal constraint condition. The spatial coupling of eye and hand was larger with the velocity 0.88m/s than those in other velocity conditions. **Conclusions:** These results suggest that differences in eye movement patterns and spatio-temporal couplings of stimulus, eye and hand by task constraints are closely related with the accuracy of anticipation timing responses, and the spatial constraints imposed may decrease the temporal accuracy of response by increasing the complexity of perception-action coupling.

Keywords : Anticipation timing, Spatio-temporal constraints, Eye movements, Perception-action coupling

JEL Classification Code : I100, I1, I11, I12, I18

1. Introduction

이동하는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되는 반응을 의미하는 예측타이밍은 날아오는 공을 잡거나 쳐야하는 다양한 스포츠 상황에서 수행의 정확성을 결정짓는 주요 요인들 중 하나로 작용한다(Akpınar et al., 2012; Masaki et al., 2012). 예측타이밍 능력이 중요하게 작용하는 운동과제의 수행 시에는 반응의 시간적 정확성뿐만 아니라 공간적 정확성이 함께 요구된다(Akpınar et al., 2012; Land & McLeod, 2000; Masaki et al., 2012). 예를 들어, 야구의 타자는 성공적인 타격을 위해 공이 타격영역에 도달하는 시점뿐만 아니라 지점까지도 예측해야 하며, 타격의 정확성은 공이 도달하는 지점과 시점에 대한 예측의 정확성에 의해 결정된다. 자극이 목표영역에 도달하는 시점의 예측을 요구하는 시간적 제

1 First Author. Teacher, Jillyang Elementary School, South Korea. Email: whiteum83@gmail.com

2 Corresponding Author. Professor, Department of Physical Education, Keimyung University, South Korea. Email: sbpark@kmu.ac.kr

© Copyright: The Author(s)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

약과 지점의 예측을 요구하는 공간적 제약은 자극행로에 대한 시각적 정보처리과정과 반응의 계획 및 실행과정에 서로 다른 영향을 미칠 수 있으므로(Park, 2020), 예측타이밍의 제어기전에 대한 이해의 폭을 넓히기 위해서는 다양한 시간적 제약과 공간적 제약 조건에서 발생하는 시각적 지각과 활동의 결합방식에 대한 연구가 필요하다.

예측타이밍 반응 시의 시각적 정보처리과정에 관심을 가졌던 선행연구들은 다양한 과제상황에서 발생하는 안구운동 패턴이 자극특성 및 반응에 부과되는 시공간적 제약에 따라 조절될 수 있음을 보여준다(Land & McLeod, 2000; Lim, 2015; Mann et al., 2013; Panchuk & Vickers, 2006; Park, 2003, 2020;). 시간적 정확성이 요구되는 예측타이밍 반응 시에는 자극이 목표지점에 도달하는 시점의 예측이 중요해지며 수행자는 자극속도에 대한 지각에 근거를 두고 자극의 도달시점과 시간적으로 일치하도록 반응을 수행해야 한다(Hofeldt et al., 1996; Peters, 1997; Tresilian & Plooy, 2006). 하지만 반응의 시간적 정확성과 함께 공간적 정확성이 요구될 경우에는 자극이 목표지점에 도달할 시점뿐만 아니라 지점까지 예측해야 하므로 자극의 속도와 함께 이동방향에 대한 정보까지 처리해야 한다.

자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되는 반응의 수행과 달리 자극의 예상되는 도달지점을 향한 반응의 수행을 위해서는 손이 도달해야 할 목표지점에 대한 공간적 참조기준이 필요하며, 조준운동시의 안구운동패턴을 분석한 선행 연구들은 주시점이 그러한 역할을 수행할 수 있음을 시사한다(Bowman et al., 2009; Helsen et al., 1998; Rand & Stelmach, 2011). 고정된 목표를 향한 조준운동의 수행 시 주시점은 항상 손보다 먼저 목표에 도달하는 경향을 보였으며, 손운동이 종료될 때까지 목표에 고정되는 것으로 밝혀졌다(Bowman et al., 2009; Heinen et al., 2012; Kuntz et al., 2018; Medendorp & Crawford, 2002; Rand & Stelmach, 2011). 다양한 속도와 방향으로 이동하는 자극이 목표영역에 도달할 때 철틀로 자극을 치도록 요구한 Park(2020)의 연구에서도 주시점은 자극의 예상되는 도달지점으로 이동하였으며, 철틀은 주시점이 고정된 지점으로 이동하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시간적 정확성과 함께 공간적 정확성이 요구되는 예측타이밍 반응 시에는 자극의 예상되는 도달지점으로 주시점을 이동시키는 시점과 지점의 제어가 과제제약을 충족시키기 위한 주요 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다(Aoyama et al., 2022).

다양한 과제상황에서의 예측타이밍 반응 시에 관찰된 안구운동패턴은 예측타이밍 반응에 부과되는 시간적 및 공간적 정확성 요구가 자극행로에 대한 시각적 지각과 반응의 계획 및 실행과정에 서로 다른 제약을 부과할 수 있음을 시사한다(Land & McLeod, 2000; Lim, 2015; Mann et al., 2013; Panchuk & Vickers, 2006). 예측타이밍 반응에 부과되는 시간적 제약은 자극속도에 대한 지각에 근거를 두고 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되도록 반응할 것을 요구한다. 이러한 상황에서는 자극의 예상되는 도달지점을 향한 손의 이동이 요구되지 않으므로 자극의 도달지점에 대한 공간적 참조기준은 필요하지 않다. 예를 들어, 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 버튼을 누르는 예측타이밍 반응 시에는 자극과 손의 접촉이 이루어지지 않으므로, 자극의 도달지점에 대한 공간적 좌표는 반응의 시간적 정확성에 직접적인 영향을 미치지 않을 수 있다(Peterken et al., 1991). 반응의 시간적 정확성을 결정하는 자극속도의 지각은 자극의 출발지점에 주시점이 고정되어 있는 잠복기동안 이루어지므로(Fooker et al., 2021; Land & McLeod, 2000; Sailer et al., 2003), 잠복기 이후에 발생하는 주시점의 이동패턴은 과제의 시간적 제약을 충족시키기 위한 과정을 반영할 수 있다.

반면 예측타이밍 반응에 부과되는 공간적 제약은 자극속도와 이동방향에 대한 지각에 근거를 두고 자극의 도달시점 및 지점과 일치되도록 반응할 것을 요구한다. 이러한 과제제약을 충족시키기 위해서는 손을 자극의 예상되는 도달지점으로 이동시켜야 하므로 손의 이동을 위한 공간적 좌표가 필요하며, 목표영역에서의 주시점 고정이 공간적 참조기준으로 작용할 수 있다(de Brouwer et al., 2021; Kishita et al., 2020; Park, 2020). 고정된 목표를 향한 조준운동의 수행 시와 달리 예측타이밍 반응 시에는 자극이 목표영역을 향해 이동하므로 주시점은 자극의 예상되는 도달지점에 고정되어야 하며, 목표영역에 주시점이 고정되는 시점과 지점이 반응의 시공간적 정확성에 영향을 미칠 수 있다(Aoyama et al., 2022; Hayhoe et al., 2012; Mann et al., 2013). 따라서 시간적 제약과 함께 공간적 제약이 부과될 경우에는 주시점의 고정시점과 지점, 그리고 주시점의 고정지점을 향한 손운동의 제어가 추가적으로 요구되므로 시간적 제약만 부과되는 상황에 비해 예측타이밍의 제어과정이 더 복잡해질 수 있다(Bongers & Michaels, 2008; Zaai & Michaels, 2003).

이처럼 예측타이밍 반응의 제어과정은 과제에 부과되는 제약에 따라 달라질 수 있다. 시간적 정확성이 요구되는 상황에서는 자극과 반응의 시간적 관계가 중요해지지만 시공간적 정확성이 요구되는 상황에서는 자극과 반응 사이의 시간적 및 공간적 관계가 동시에 중요성을 지닌다. 시간적 및 공간적 정확성 요구가 부과하는 제약의 차이는 자극행로에 대한 시각적 지각과 반응의 계획 및 실행과정에 서로 다른 영향을 미칠 수 있다(Danion & Flanagan, 2018; de Vries et al., 2018; Farrow & Abernethy, 2003; Mann et al., 2010). 따라서 예측타이밍의 제어기전에 대한 이해의 폭을 넓히기 위해서는 다양한 시공간적 제약이 자극행로에 대한 시각적 지각과 주시점의 이동패턴, 그리고 주시점과 반응의 시공간적 관계에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 시공간적 정확성 요구가 예측타이밍 반응 시에 발생하는 안구운동패턴과 반응의 정확성, 그리고 눈과 손의 연결에 미치는 영향을 분석함으로써 예측타이밍 반응에 부과되는 시간적 및 공간적 제약을 충족시키는 제어과정의 차이를 연구하는 것이다. 예측타이밍 반응은 자극행로에 대한 시각적 지각과 지각된 정보를 이용한 반응의 계획 및 실행에 의해 이루어지며, 과제에 부과되는 시간적 제약과 공간적 제약은 이러한 제어과정에 서로 다른 영향을 미칠 수 있다. 공간적 제약의 부과는 주시점의 이동시점과 지점, 그리고 손운동의 제어를 추가적으로 요구함으로써 시간적 제약만 부과되는 상황에 비해 제어과정의 복잡성을 증가시킬 것이다. 따라서 예측타이밍 반응의 정확성은 시간적 정확성만 요구되는 조건에 비해 시공간적 정확성이 요구되는 조건에서 감소될 것이며, 반응종료 시점에서 관찰되는 자극과 주시점, 그리고 주시점과 손의 시공간적 연결은 시간적 정확성만 요구되는 조건에 비해 시공간적 정확성이 요구되는 조건에서 강화될 것이다.

2. Method

2.1. Subjects

오른손잡이 남자 대학생 12명이 피험자로 참여하였다. 모든 피험자는 정상 또는 정상으로 교정된 시력을 보유하고 있으며, 실험 전에 자발적 실험참여 동의서를 읽고 서명하였다.

2.2. Apparatus

실험기구는 안구추적장치(eye tracker), 터치스크린(touch screen), 턱받침 장치(chin rest), 그리고 철틀(stylus)로 구성되었다.

2.2.1. Eye Tracker

예측타이밍 반응 시의 안구운동패턴을 측정하기 위해 안구추적장치(GP3 HD Eye Tracker, 150Hz System, Gazepoint, Canada)를 이용하였다. 안구의 실시간 이동은 안구추적장치의 적외선 렌즈를 통해 측정되었으며, 디지털 변환을 통해 mm 단위의 x, y 좌표로 기록되었다. 안구추적장치의 오차범위는 0.5~1도이며, 샘플링 비율은 150Hz로 설정되었다. 피험자의 안구운동은 소프트웨어 장치에서 실시간으로 추적되어 기록되었으며, 안구운동 자료는 실험 후의 분석을 위해 컴퓨터에 저장되었다. 실험기구는 안구추적장치(eye tracker), 터치스크린(touch screen), 턱받침 장치(chin rest), 그리고 철틀(stylus)로 구성되었다.

2.2.2. Touch Screen

두 가지 과제제약 조건에서 목표영역을 향해 다양한 속도로 이동하는 자극을 제시하기 위해 터치스크린(U24OLED

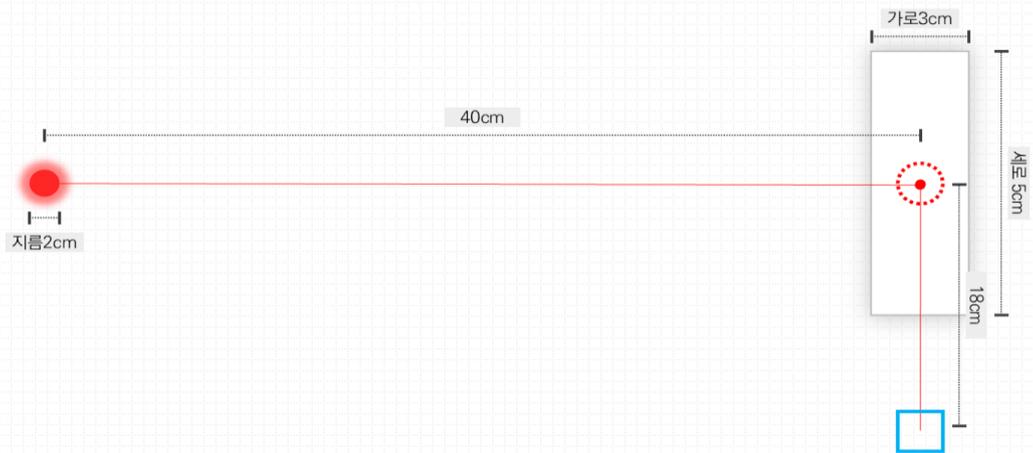


Figure 1: Experimental setting for presenting stimuli of various velocities

Edge HDMI, BitM Inc., Korea)을 사용하였다. 자극은 지름 2cm의 원형이며, 출발지점으로부터 40cm 우측에 배치된 가로세로 3cm x 5cm의 목표영역을 향해 세 가지 속도로 이동할 수 있도록 구성하였다<Figure 1>.

2.2.3. Chin Rest

턱받침 장치는 예측타이밍 반응을 수행하는 동안 발생할 수 있는 머리의 움직임을 방지하는데 이용되었다.

2.2.4. Stylus

철필(CS140B, Wacom Co., Japan)은 지름 0.8cm, 길이 12cm, 무게 14g의 막대로서 끝부분이 원형의 고무로 이루어졌으며, 준비지점으로부터 목표영역으로의 예측타이밍 반응을 수행하는데 사용되었다.

이상에서 설명된 실험기구는 시간적 및 공간적 제약조건에서 각 시기마다 무작위로 변화되는 세 가지 자극속도에 대한 예측타이밍 과제를 수행하고, 수행된 반응의 시간적 및 공간적 정확성과 반응 시에 발생하는 안구운동패턴을 측정하는데 이용되었다. 각 시기에서 수행된 예측타이밍 반응의 시간적 오차는 +와 - 부호를 지니는 ms 단위로 측정되었으며, 공간적 오차와 안구운동은 mm 단위의 x, y 좌표로 측정되었다. 안구운동은 준비지점을 철필로 접촉한 시점으로부터 반응이 종료되는 시점까지 측정되었다.

2.3. Procedure

실험과정에서 피험자는 머리의 움직임을 방지할 수 있도록 터치스크린으로부터 30cm 떨어진 지점에 위치하는 턱받침 장치에 턱을 걸친 후, 높낮이 조절이 가능한 실험용 의자에 편한 자세로 앉았다. 안구추적장치가 피험자의 동공을 정확하게 인식하도록 동공탐지 과정을 거친 후, 동공탐지가 정상적으로 이루어지는 것이 확인되면 주시점과 목표지점을 일치시키는 영점화 과정을 진행하였다. 안구추적장치의 정확한 설정을 확인한 다음, 과제수행 방식을 설명하였다. 과제수행 방식에 대한 충분한 설명을 들은 후, 피험자는 두 가지 과제제약 조건에서 세 가지 속도로 제시되는 자극에 대한 예측타이밍 반응을 수행하였다. 실험에서 이용된 과제제약 조건과 자극속도, 그리고 각 상황 별 자극제시시간과 시기수는 <Table 1>에 제시된 바와 같다.

Table 1: Number of Trials for Each Task Constraint and Stimulus Velocity Condition

Task Constraints	Stimulus Velocity(m/s)	Stimulus Duration(ms)	Number of Trials
Temporal	0.88	450	20
	0.66	600	20
	0.53	750	20
Spatio-temporal	0.88	450	20
	0.66	600	20
	0.53	750	20

과제제약 조건은 요구되는 반응 방식에 따라 구분되었다. 시간적 제약 조건에서는 철필을 준비지점에 배치한 상태에서 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 철필로 제자리를 치도록 요구되었으며 반응의 시간적 정확성만 강조되었다. 시공간적 제약 조건에서는 철필을 준비지점에 배치한 상태에서 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 철필로 자극을 치도록 요구되었으며 반응의 시간적 정확성과 공간적 정확성이 함께 강조되었다.

각 과제제약 조건에서의 실험시기를 수행하기에 앞서, 피험자가 실험절차와 과제수행 방식에 익숙해질 수 있도록 15회의 연습시기를 제공하였다. 시간적 제약 조건의 연습단계에서는 각 시기에 앞서 실험자가 '준비' 신호를 구두로 제공하였으며, 이때 피험자는 철필을 준비지점에 배치하고, 상체와 머리의 움직임 없이 시선만 터치스크린의 출발지점으로 이동시키도록 지시받았다. 철필을 준비지점에 배치한지 약 3~5초 후에 자극이 0.6m/s의 속도로 출발지점으로부터 40cm 떨어진 목표영역을 향해 이동하였으며, 피험자는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 철필로 제자리를 치도록 요구받았다. 시공간적 제약 조건의 연습단계에서도 시간적 제약 조건과 동일한 자극제시 절차가 이용되었으나 반응 방식에 차이가 있었으며, 피험자는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 철필로 자극을 치도록 요구받았다. 피험자가 과제지시에 보다 익숙해질 수 있도록 각 시기의 종료 후에는 예측타이밍의 오차에 대한 피드백과 요구되는 과제수행 방식에 대한 정보를 제공하였다.

각 과제제약 조건에서의 연습단계가 종료된 후 피험자는 세 가지 자극속도가 시기마다 무작위로 변화되는 상황에서 60회씩 실험시기를 수행하였다. 실험단계에서 이용된 준비신호, 자극제시 방식, 그리고 과제수행 방식은 연습단계와 동일하였으나, 자극의 이동속도는 각 시기마다 무작위로 변화되었다. 실험에서 이용된 자극속도는 자극의 이동행로에 대

한 시각적 정보처리에 허용되는 시간을 기준으로 설정하였다. 자극이 목표지점에 도달할 때까지의 시간은 자극속도와 이동거리의 조합에 의해 결정되었으며, 실험에서 이용된 자극속도와 이동거리(40cm)를 고려할 때, 자극이 출발지점에서 목표지점까지 이동하는데 소요된 시간은 450ms(0.88m/s 조건)에서 750ms(0.53m/s 조건) 사이에 분포하였다. 실험단계에서 피험자는 과제제약 조건에 따라 다른 방식으로 수행할 것을 지시받았으며, 시간적 제약 조건에서는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 철필로 제자리를 치도록 지시받았고, 시공간적 제약 조건에서는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 철필로 자극을 정확하게 치도록 지시받았다. 실험시기에서는 피험자의 제어전략에 영향을 미치지 않기 위해 반응의 시공간적 정확성에 대한 결과의 지식을 제공하지 않았다. 하지만 실험의 전 과정에 걸쳐 피험자가 동기유발 상태를 유지하고 과제지시를 명확히 인식할 수 있도록 각 시기에서의 수행에 앞서 '자극이 목표영역에 도달할 시점과 일치되게 철필로 제자리 또는 자극을 치라'는 과제지시를 제공하였다.

모든 피험자는 두 가지 과제제약 조건에서 세 가지 자극속도 조건별로 각각 20회씩 총 120회의 실험시기를 수행하였다. 과제제약 조건의 제시순서는 피험자에 따라 무작위로 결정되었으며, 각 과제제약 조건에서의 실험시기를 수행한 후에는 5분간의 휴식을 제공하였다.

2.4. Data Analysis

각 과제제약 조건에서의 자극속도 조건별로 측정되는 자료를 이용하여 다음과 같은 변수를 계산하였다.

2.4.1. Spatio-temporal Error of Anticipation Timing Response

[1]. **타이밍오차(ms)**: 철필이 터치스크린과 접촉한 시점으로부터 자극이 목표영역에 도달한 시점을 뺀 값의 절대값으로서 시간적 오차의 크기에 대한 정보를 제공함.

[2]. **반경오차(ms)**: 반응종료 시점에서의 철필 위치와 자극도달지점 사이의 간격으로서 공간적 오차의 크기에 대한 정보를 제공하며, 다음과 같이 계산됨:

$$\cdot \text{반경오차} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

[x = 철필위치와 자극도달지점 사이의 x 축 간격, y = 철필위치와 자극도달지점 사이의 y 축 간격]

2.4.2. Eye Movement Patterns

[1]. **단속성 안구운동의 잠복기(ms)**: 자극제시시점으로부터 단속성 안구운동이 개시될 때까지의 시간.

[2]. **주시점 고정기간(ms)**: 자극이 목표영역에 도달하는 시점으로부터 주시점이 목표영역에 도달하여 고정되는 시점을 뺀 값으로, 자극속도와 안구운동의 시간적 관계에 대한 정보를 제공함.

[3]. **주시점과 자극의 간격(mm)**: 반응종료 시점에서의 주시점 위치와 자극도달지점 사이의 간격으로 자극속도와 안구운동의 공간적 관계에 대한 정보를 제공하며, 다음과 같이 계산됨:

$$\cdot \text{주시점과 자극의 간격} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

[x = 주시점과 자극도달지점 사이의 x 축 간격, y = 주시점과 자극도달지점 사이의 y 축 간격]

2.4.3. Eye-hand Coupling

[1]. **시간적 연결(ms)**: 반응종료 시점으로부터 주시점의 최종 고정시점을 뺀 값으로 안구운동과 손운동의 시간적 관계에 대한 정보를 제공함.

[2]. **공간적 연결(mm)**: 주시점의 최종 고정지점과 철필의 반응종료 지점 사이의 간격으로 안구운동과 손운동의 공간적 관계에 대한 정보를 제공하며, 다음과 같이 계산됨:

$$\cdot \text{공간적 연결} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

[x = 주시점과 철필위치 사이의 x 축 간격, y = 주시점과 철필위치 사이의 y 축 간격]

계산된 변수들은 과제제약 조건과 자극속도 조건별로 평균화되었으며, 평균화된 변수들에 대해 2 과제제약(시간적 제약, 시공간적 제약) × 3 자극속도(0.53m/s, 0.66m/s, 0.88m/s)의 반복측정된 이원분산분석을 실시하였다. 시공간적 제약

조건에서만 측정된 반경오차와 공간적 연결은 자극속도(0.53m/s, 0.66m/s, 0.88m/s)의 주효과에 대한 반복측정된 일원 분산분석을 실시하였다. 독립변수의 주효과가 유의할 경우에는 수준 간의 차이에 대한 사후검정을 위해 대비 검정 (contrast test)을 사용하였다. 모든 자료분석의 유의수준은 5%로 설정하였다.

3. Results

3.1. Spatio-temporal Accuracy of Anticipation Timing Response

3.1.1. Timing Error

예측타이밍의 시간적 정확성을 반영하는 타이밍오차를 분석한 결과 과제제약 조건의 주효과와, $F(1,11)=6.58, p<.05$, 자극속도의 주효과가 유의하였다, $F=(2,22)=10.93, p<.05$. 과제제약 조건의 주효과에 대한 사후검증 결과, 타이밍오차는 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 유의하게 큰 것으로 나타났다. 자극속도의 주효과에 대한 사후검증 결과, 자극속도가 빨라질수록 타이밍오차는 커졌으며<Figure 2>, 속도-0.53m/s 조건보다 속도-0.66m/s 및 속도-0.88m/s 조건에서($p<.05$), 그리고 속도-0.66m/s 조건보다 속도-0.88m/s 조건에서 유의하게 큰 것으로 밝혀졌다($p<.05$).

3.1.2. Radial Error

시공간적 제약조건에서만 측정된 반경오차에 대한 분석에서도 자극속도의 주효과가 유의하였다, $F(2,22)=10.65, p<.05$. 자극속도의 주효과에 대한 사후검증 결과, 반경오차는 자극속도가 빨라질수록 커졌으며<Figure 3>, 속도-0.53m/s 조건보다 속도-0.66m/s 및 속도-0.88m/s 조건에서($p<.05$), 그리고 속도-0.66m/s 조건보다 속도-0.88m/s 조건에서 유의하게 큰 것으로 나타났다($p<.05$).

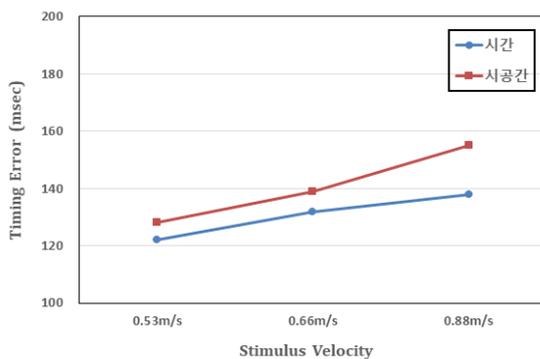


Figure 2: Mean Timing Error Measured in Each Task Constraint-Stimulus Velocity Condition

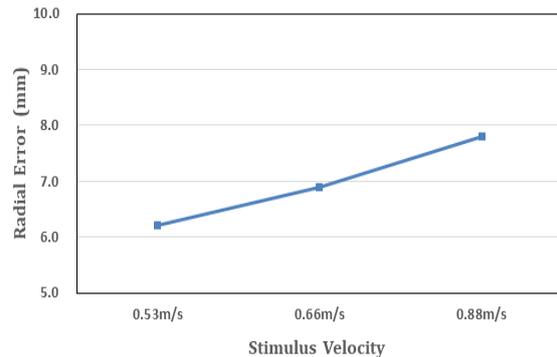


Figure 3: Mean Radial Error Measured in Each Task Constraint-Stimulus Velocity Condition

3.2. Eye Movement Patterns

3.2.1. Latency of Saccadic Eye Movement

단속성 안구운동의 잠복기에 대한 분석에서는 과제제약 조건의 주효과와, $F(1,11)=11.23, p<.05$, 자극속도의 주효과가 유의하였다, $F=(2,22)=47.03, p<.001$. 과제제약 조건의 주효과에 대한 사후검증 결과, 단속성 안구운동의 잠복기는 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 유의하게 짧은 것으로 나타났다. 자극속도의 주효과에 대한 사후검증 결과, 단속성 안구운동의 잠복기는 자극속도가 빨라질수록 짧아지는 것으로 나타났으며<Figure 4>, 속도-0.53m/s 조건보다

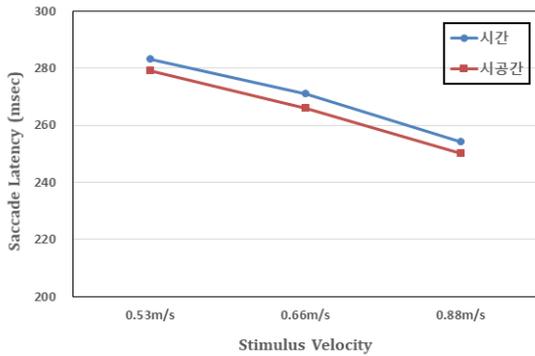


Figure 4: Mean Saccade Latency Measured in Each Task Constraint-Stimulus Velocity Condition

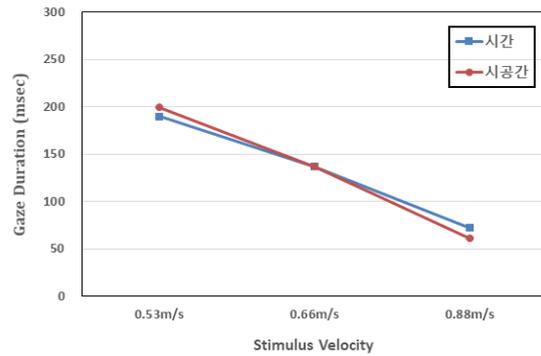


Figure 5: Mean Gaze Duration Measured in Each Task Constraint-Stimulus Velocity Condition

속도-0.66m/s 및 속도-0.88m/s 조건에서($p < .001$), 그리고 속도-0.66m/s 조건보다 속도-0.88m/s 조건에서 유의하게 짧아지는 것으로 나타났다($p < .05$).

3.2.2. Duration of Gaze Fixation

주시점 고정기간에 대한 분석에서는 과제제약 조건의 주효과는 유의하지 않았으나, $F(1,11)=0.01, p > .05$, 자극속도의 주효과는 유의하였다, $F(2,22)=62.61, p < .001$. 자극속도의 주효과에 대한 사후검증 결과, 주시점 고정기간은 자극속도가 빨라질수록 짧아지는 것으로 나타났으며 <Figure 5>, 속도-0.53m/s 조건보다 속도-0.66m/s 및 속도-0.88m/s 조건에서 ($p < .001$), 그리고 속도-0.66m/s 조건보다 속도-0.88m/s 조건에서 유의하게 짧아지는 것으로 나타났다($p < .001$).

3.2.3. Gaze Error

주시점과 자극의 간격에 대한 분석에서는 과제제약 조건의 주효과와, $F(1,11)=5.39, p < .05$, 자극속도의 주효과가 유의하였다, $F(2,22)=21.5, p < .001$. 과제제약 조건의 주효과에 대한 사후검증 결과, 자극이 목표영역에 도달하는 시점에서의 주시점과 자극의 간격은 시공간적 제약 조건보다 시간적 제약 조건에서 유의하게 큰 것으로 나타났다($p < .05$). 자극속도의 주효과에 대한 사후검증 결과, 속도-0.88m/s 조건에서의 간격이 다른 속도 조건보다 유의하게 큰 것으로 밝혀졌으며 ($p < .001$), 속도-0.66m/s와 속도-0.53m/s 조건 사이에는 유의차가 없었다 <Figure 6>.

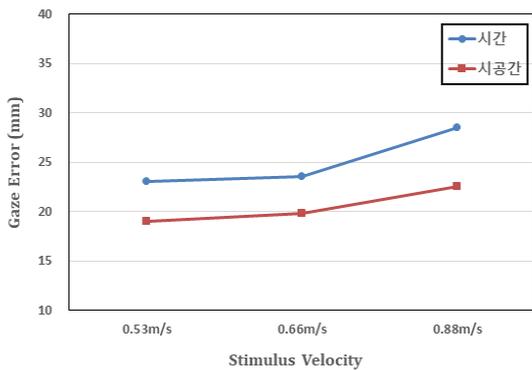


Figure 6: Mean Gaze Error Measured in Each Task Constraint-Stimulus Velocity Condition

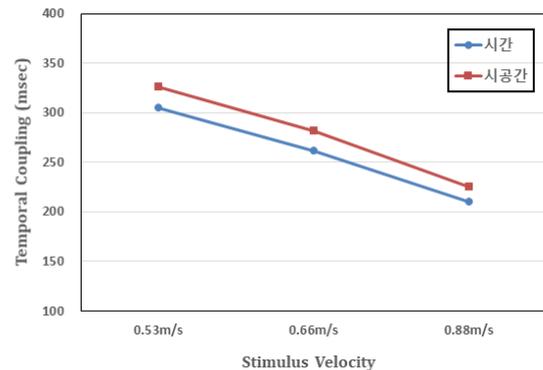


Figure 7: Mean Temporal Coupling Measured in Each Task Constraint-Stimulus Velocity Condition

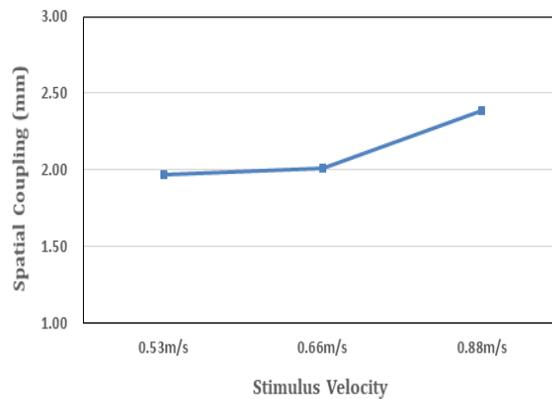


Figure 8: Mean Spatial Coupling Measured in Each Task Constraint-Stimulus Velocity Condition

3.3. Eye-hand Coupling

3.3.1. Temporal Coupling

시간적 연결에 대한 분석에서는 과제제약 조건의 주효과와, $F(1,11)=5.04$, $p<.05$, 자극속도의 주효과가 유의하였다, $F(2,22)=26.02$, $p<.001$. 과제제약 조건의 주효과에 대한 사후검증 결과, 시간적 연결은 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 유의하게 긴 것으로 나타났다($p<.05$). 자극속도의 주효과에 대한 사후검증 결과, 시간적 연결은 자극속도가 증가할수록 짧아지는 것으로 나타났으며 <Figure 7>, 속도-0.53m/s 조건보다 속도-0.66m/s 및 속도-0.88m/s 조건에서, 그리고 속도-0.66m/s 조건보다 속도-0.88m/s 조건에서 유의하게 짧은 것으로 나타났다($p<.001$).

3.3.2. Spatial Coupling

공간적 연결에 대한 분석에서는 자극속도의 주효과가 유의하였다, $F(2,22)=23.94$, $p<.001$. 자극속도의 주효과에 대한 사후검증 결과, 속도-0.88m/s 조건에서의 간격이 다른 속도 조건에서보다 유의하게 큰 것으로 밝혀졌으며($p<.001$), 속도-0.66m/s와 속도-0.53m/s 조건 사이에는 유의차가 없었다 <Figure 8>.

4. Discussion

예측타이밍의 제어과정에서 자극의 목표도달 시점과 일치되는 반응을 요구하는 시간적 제약과 자극도달 시점과 일치되는 반응을 요구하는 공간적 제약은 자극행로에 대한 시각적 지각과 활동의 계획 및 실행과정에 서로 다른 영향을 미칠 수 있다(Lim, 2015; Mann et al., 2013; Panchuk & Vickers, 2006; Park, 2020). 시간적 제약만 부과되는 상황과 비교할 때, 시공간적 제약이 함께 부과될 경우에는 자극의 도달시점과 일치되도록 자극을 향해 손을 이동시켜야 하므로 요구되는 손운동의 계획과 실행과정의 복잡성이 증가될 수 있다(Tresilian, 2004). 예측타이밍 반응에 부과되는 시간적 제약이 동일할 경우 공간적 제약의 추가적인 부과는 자극행로에 대한 지각과 활동의 계획 및 실행과정의 복잡성을 증가시킴으로써 반응의 시공간적 측면에 영향을 미칠 수 있으며, 다양한 과제상황에서 측정된 타이밍오차는 그러한 가설에 대한 증거를 제공한다.

타이밍오차는 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 더 커지는 것으로 나타났으며, 두 가지 과제제약 조건 모두에서 자극속도가 빠를수록 증가하였다. 본 실험의 시간적 및 시공간적 제약 조건에서 자극이 목표지점에 도달할 때까지의 시간은 동일하였으므로, 이러한 결과는 시간적 제약이 반응의 시간적 정확성에 미치는 영향이 공간적 제약의 부과 여부에 따라 달라질 수 있음을 시사한다(Tresilian et al., 2003; Tresilian et al., 2009). 예측타이밍 반응의 정확성은 자극 특성에 대한 시각적 지각과 요구되는 반응의 계획 및 실행에 허용되는 시간에 따라 달라질 수 있으며, 자극의 이동거리가 동일할 때 자극속도의 증가는 이러한 시간을 단축시킴으로써 반응의 정확성을 감소시킬 수 있다(Lim, 2015; Tochikura et al., 2020; Tresilian, 2004; Tresilian & Lonergan, 2002). 반응의 시간적 정확성과 함께 공간적 정확성이 요구될 경우 수

행자는 제한된 시간 내에 자극이 목표영역에 도달하는 시점 및 지점과 일치되는 활동을 계획하고 실행해야 한다. 이러한 시공간적 제약은 반응의 시간적 정확성만 요구되는 상황보다 더 많은 정보의 처리와 복잡한 활동의 계획 및 실행을 요구할 수 있으며, 그와 같은 과제요구를 충족시키는 과정에서 예측타이밍 반응의 시간적 정확성, 즉 타이밍오차의 증가를 유도하였을 수 있다(Tresilian et al., 2009).

다양한 과제상황에서 관찰된 안구운동패턴은 반응에 부과되는 시공간적 제약에 따른 시각적 지각과 활동계획 및 실행과정의 차이에 대한 보다 직접적인 정보를 제공한다(Kim et al., 1997; Murdison et al., 2013). 단속성 안구운동의 잠복기는 250ms~283ms의 범위에 분포하였으며, 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서, 그리고 두 가지 제약조건 모두에서 자극속도가 빨라질수록 더 짧아지는 것으로 나타났다. 이동하는 자극의 속도와 방향에 대한 정보는 주시점이 자극의 출발지점에 고정되어 있는 잠복기동안 처리되며, 잠복기는 그러한 자극특성에 대한 정보의 처리에 소요된 시간을 반영한다(Bennett et al., 2007; Bennett et al., 2010; Sailer et al., 2003). 이동하는 자극에 대한 시각적 지각에 허용되는 시간은 자극속도가 증가할수록 짧아지며 수행자는 보다 짧은 시간 내에 반응을 완료해야 하므로, 자극속도에 따른 잠복기의 조절은 자극속도가 부과하는 시간적 제약을 충족시키는 제어과정으로 보인다(Kim et al., 1997; Li et al., 2018).

안구운동의 잠복기가 자극속도와 함께 과제에 부과된 시공간적 제약조건에 따라 달라졌다는 사실은 예측타이밍 반응에 부과되는 시간적 제약뿐만 아니라 공간적 제약 또한 자극특성에 대한 시각적 지각에 허용되는 시간에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다(Akpınar et al., 2012; Lim, 2015). 잠복기 동안 처리되는 자극 정보는 잠복기 이후의 안구운동패턴과 손운동의 계획과정에서 이용되므로 자극의 속도와 이동방향, 크기 등과 같이 동시에 처리해야 정보가 많아지거나 요구되는 반응이 복잡할수록 잠복기는 길어져야 한다(Berret et al., 2014). 예측타이밍 반응의 시간적 정확성만 요구되는 시간적 제약 조건에서 수행자는 자극속도에 대한 지각에 근거를 두고 자극의 도달시점을 예측하고 예측된 시점과 일치되는 반응을 계획하고 실행시켜야 한다. 반면 시공간적 제약 조건에서는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 함께 지점에 대한 예측이 필요하므로 수행자는 자극의 이동속도뿐만 아니라 방향에 대한 정보를 처리해야 하며, 예측된 지점을 향한 손운동을 계획하고 실행시켜야 한다. 결과적으로 자극특성에 대한 시각적 지각과 요구되는 활동의 계획 및 실행과정은 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 더 복잡해지며, 그로 인해 보다 긴 잠복기가 필요할 수 있다.

하지만 본 실험에서 관찰된 잠복기는 시공간적 제약 조건보다 시간적 제약 조건에서 더 긴 것으로 나타났다. 이러한 결과는 공간적 제약의 부과로 인한 반응계획과 실행의 복잡성 증가가 반응의 활동부분에서 요구되는 시간을 증가시킬 수 있으며, 그러한 시간의 확보를 위해 안구운동의 잠복기가 오히려 단축될 수 있음을 시사한다(Berret et al., 2014). 예측타이밍 반응 시 수행자는 자극이 목표영역에 도달하기 전에 반응을 개시시켜야 한다. 시간적 제약 조건에서 요구된 반응은 복잡성이 낮았으므로 반응의 계획과 실행에 요구되는 시간이 비교적 짧았을 수 있다. 반면 시공간적 제약 조건에서는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되도록 반응하기 위해 주시점과 손운동의 정교한 조절이 필요하였으므로 반응의 계획과 실행에 요구되는 시간이 상대적으로 길어졌을 것이다. 결과적으로 예측타이밍 반응에 허용되는 전체시간에서 활동부분에 요구되는 시간의 비중은 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 높았을 것이며, 이러한 시간의 확보를 위해 수행자는 안구운동의 잠복기를 단축시키면서 목표영역을 향한 주시점의 이동시점을 앞당겼을 수 있다(Tresilian & Lonergan, 2002). 이러한 잠복기의 단축은 자극속도와 이동방향에 대한 지각의 정확성을 감소시킬 수 있으며(Marinovic et al., 2008, 2009), 타이밍오차가 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 더 크게 나타났다는 사실은 그러한 가능성을 지지한다.

자극과 주시점이 목표영역에 도달하는 시점의 시간적 관계를 반영하는 주시점 고정기간은 과제제약 조건 사이의 차이를 보이지 않았으며, 주시점은 두 가지 조건 모두에서 자극속도가 빨라질수록 목표영역에 빨리 도달하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 자극속도가 부과하는 시간적 제약이 공간적 제약의 부과 여부와 무관하게 주시점의 목표도달 시점에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 본 실험에서 관찰된 주시점 고정기간은 과제제약 조건과 자극속도에 따라 60ms~199ms 사이에 분포하였으며, 모든 조건에서 주시점이 자극보다 먼저 목표영역에 도달하는 것으로 나타났다. 공간적 목표를 향한 조준운동의 수행 시 목표에 대한 주시점의 고정은 손운동을 위한 공간적 참조기준으로 작용할 수 있으며(Heinen et al., 2012; Park et al., 2018), 시공간적 정확성을 요구하는 예측타이밍 반응 시에도 자극의 도달지점과 일치되는 손운동의 수행을 위해서는 자극의 예상되는 도달지점으로 주시점을 이동시켜야 한다(de Brouwer et al., 2021; Kishita et al., 2020; Park, 2020). 이동하는 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 손을 목표지점으로 이동시키기 위해서는 손의 동작시간을 고려해야 하므로, 예측타이밍 반응 시 주시점은 자극보다 먼저 목표영역에 도달해야 한다(Aoyama et al., 2022; Cámara et al., 2018; Fookan et al., 2021; Mann et al., 2013).

하지만 시간적 정확성만 요구되는 예측타이밍 반응 시에는 잠복기동안 지각된 자극속도를 근거로 자극이 목표영역에

도달할 시점을 예측할 수 있으므로(Sailer et al., 2003), 목표영역을 향한 주시점의 이동이 필요하지 않을 수 있다. 아울러 이러한 상황에서는 자극의 도달지점을 향한 손운동이 요구되지 않으므로 자극의 도달지점에 대한 공간적 참조기준으로서의 주시점 고정도 불필요하다. 그럼에도 불구하고 시간적 제약 조건과 시공간적 제약 조건에서 측정된 주시점 고정기간에는 차이가 없었으며, 두 조건 모두에서 주시점을 자극보다 먼저 예측되는 자극의 도달지점에 고정시키는 예측성 안구운동이 나타났다. 안구운동의 잠복기가 과제제약 조건에 따라 달랐음에도 불구하고 두 가지 과제제약 조건에서 관찰된 주시점 고정기간의 차이가 없었다는 사실은 공간적 제약의 추가적인 부과가 주시점의 이동속도에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다(Reppert et al., 2018).

이동하는 자극을 추적하는 과정에서 발생하는 안구운동의 목적은 자극을 따라잡는 것이므로 주시점의 이동속도는 자극속도와 비례한다(Fooker et al., 2021; Park, 2020). 시간적 및 시공간적 제약 조건에서 발생한 주시점의 이동속도가 자극속도의 영향만 받을 경우, 안구운동의 잠복기에서 나타난 시간의 차이만큼 주시점이 목표영역에 도달하는 시점 역시 차이를 보여야 한다. 하지만 그러한 차이가 없었다는 사실은 주시점의 이동속도가 시공간적 제약 조건보다 시간적 제약 조건에서 더 빨랐다는 것을 의미하며, 과제제약에 따른 주시점 이동속도의 조절이 잠복기의 지연을 보상하는 제어전략일 수 있음을 시사한다(Li et al., 2018). 예측타이밍 반응 시 예측성 안구운동전략은 반응의 시간적 정확성을 향상시키는 것으로 나타났으므로, 자극의 예상되는 도달지점에 대한 주시점의 고정은 반응의 공간적 참조기준으로 작용함과 동시에 반응의 시간적 정확성을 향상시키기 위한 제어과정을 반영할 수 있다(Kishita et al., 2020; Park, 2005).

주시점 이동과 손운동의 시간적 관계를 의미하는 시간적 연결은 자극속도가 증가할수록 짧아졌으며, 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 더 길어지는 것으로 나타났다. 시공간적 정확성이 요구되는 예측타이밍 반응 시 목표영역에서의 주시점 고정은 손운동을 위한 공간적 좌표로 작용하므로, 손이 목표영역에 도달하기 전에 주시점이 먼저 목표영역에 고정되어야 한다(Aoyama et al., 2022; Cámara et al., 2018; Mann et al., 2013). 본 실험에서 관찰된 주시점은 시공간적 제약 조건뿐만 아니라 시간적 제약 조건에서도 손운동이 종료되기 전에 목표영역에 도달하였으며, 이러한 결과는 시간적 정확성만 요구되는 예측타이밍 반응 시에도 동작의 종료에 앞서 주시점이 목표영역에 먼저 도달해야 함을 시사한다.

동일한 자극속도 조건에서 관찰된 시간적 연결이 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 더 길었다는 사실은 공간적 정확성 요구의 추가적인 부과가 주시점의 고정시점으로부터 손운동이 종료될 때까지의 시간을 지연시킬 수 있음을 시사한다. 과제의 공간적 정확성 요구가 증가할수록 보다 정교한 운동명령의 계획이 요구되며, 계획된 운동명령의 실행과정에서 동작시간이 증가될 수 있다(Berthier et al., 1996). 시간적 제약 조건에서는 공간적 정확성 요구가 부과되지 않았으므로 반응을 위한 운동명령의 복잡성이 상대적으로 낮았을 것이며, 손운동의 제어에 필요한 시간 역시 짧았을 수 있다. 반면 시공간적 제약 조건에서는 지름 2cm의 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 일치되게 철필로 자극을 치도록 요구되었으며, 그러한 공간적 제약의 부과로 인해 손운동의 제어에 필요한 시간이 증가되었을 수 있다(Kuntz et al., 2018; Mon-Williams et al., 2001; Tresilian et al., 2009).

주시점과 자극의 공간적 관계를 반영하는 주시점과 자극의 간격은 두 가지 과제제약 조건 모두에서 자극속도가 빨라질수록 더 커지는 것으로 나타났다. 동작종료 시점에서 관찰되는 주시점과 자극의 간격은 자극속도와 방향에 대한 지각의 정확성을 반영할 수 있다. 예측타이밍 반응 시 자극속도의 증가는 자극특성에 대한 보다 신속한 정보처리를 요구함으로써 자극이 목표영역에 도달하는 시점과 지점에 대한 예측의 오류를 증가시킬 수 있다(Deconinck et al., 2011; Etchells et al., 2010). 본 실험의 속도-0.88m/s 조건에서 관찰된 주시점과 자극의 간격이 다른 속도 조건보다 컸다는 사실은 자극속도의 증가가 자극의 도달지점에 대한 예측의 오류를 증가시키며, 결과적으로 주시점 이동의 정확성을 감소시킬 수 있음을 시사한다(Etchells et al., 2010). 시공간적 제약 조건에서 관찰된 바와 같이, 자극속도가 증가할수록 자극과 철필이 도달한 지점 사이의 간격인 공간적 연결 역시 커졌다는 사실은 자극속도의 증가에 따른 지각의 오류가 주시점 이동의 정확성뿐만 아니라 손운동의 정확성에도 영향을 미칠 수 있으며, 자극속도가 부과하는 시간적 제약이 눈과 손의 연결을 약화시킬 수 있음을 시사한다(de Brouwer et al., 2021; Park, 2020).

주시점과 자극의 간격은 과제제약에 따라서도 달라졌으며 시간적 제약 조건보다 시공간적 제약 조건에서 더 작은 것으로 나타났다. 시공간적으로 일치되는 예측타이밍 반응을 수행하기 위해서는 자극이 목표영역에 도달하기 전에 주시점을 예상되는 자극의 도달지점으로 이동시켜야 하며, 이 때 주시점이 고정된 지점은 손운동을 위한 공간적 좌표로 작용할 수 있다(Heinen et al., 2012; Johansson et al., 2001; Park et al., 2018). 과제의 공간적 정확성 요구를 충족시키기 위해서는 자극의 도달지점에 대한 예측과 예측된 지점을 향한 주시점 이동의 정확성이 요구되며, 반응종료 시점에서 손이 목표영역에 도달하는 지점은 주시점과 공간적으로 연결되는 것으로 밝혀졌다(Cámara et al., 2018; Mann et al.,

2013). 하지만 시간적 정확성만 요구되는 상황에서는 자극의 도달지점에 대한 예측의 중요성이 낮아지며, 주시점이 고정되는 지점이 반응의 정확성에 미치는 영향 또한 감소될 수 있다. 따라서 과제의 제약 조건과 자극속도에 따른 주시점과 자극의 간격 차이는 과제가 부과하는 시공간적 제약을 충족시키기 위한 제어과정을 반영할 수 있으며, 자극의 도달지점을 향한 주시점 이동의 정확성은 시간적 정확성만 요구되는 상황보다 시공간적 정확성이 함께 요구되는 상황에서 더 높아질 수 있음을 시사한다.

5. Conclusion

종합해 볼 때, 본 연구의 결과는 시간적 및 공간적 제약의 부과가 예측타이밍 반응의 제어과정에 서로 다른 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 시간적 제약만 부과될 경우에는 자극이 목표영역에 도달하는 시점의 예측이 중요해지며, 수행자는 안구운동의 잠복기 증가를 통해 자극속도에 대한 지각과 반응의 시간적 정확성을 향상시키는 것으로 나타났다. 하지만 시간적 제약조건에서는 자극의 도달지점을 향한 손운동이 요구되지 않았으며, 이러한 과제제약의 특성으로 인해 자극의 도달지점에 대한 주시점 이동의 정확성은 감소되었으며 주시점 고정시점과 손운동 종료시점 사이의 시간적 연결도 짧아지는 것으로 밝혀졌다. 반면 공간적 제약의 추가적인 부과는 자극의 도달시점뿐만 아니라 지점의 정확한 예측을 요구하며, 자극의 예상되는 도달지점을 향한 주시점과 손운동의 정확성을 확보해야 한다. 이러한 과제제약의 충족을 위해 수행자는 안구운동의 잠복기를 단축시킴으로써 주시점과 자극의 시간적 연결과 간격, 그리고 주시점과 손의 공간적 연결을 강화시키는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 결과는 예측타이밍 반응에 부과되는 시간적 및 공간적 제약이 주시점의 이동패턴과 눈과 손의 연결에 서로 다른 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 제어과정의 차이는 반응의 정확성과 밀접히 관련될 수 있음을 시사한다.

References

- Akpınar, S., Devrılmaz, E., & Kirazci, S. (2012). Coincidence-anticipation timing requirements are different in racket sports. *Perceptual and Motor Skills, 115*(2), 581-593.
- Aoyama, C., Goya, R., Suematsu, N., Kadota, K., Yamamoto, Y., & Shimegi, S. (2022) Spatial Accuracy of Predictive Saccades Determines the Performance of Continuous Visuomotor Action. *Frontiers in Sports and Active Living, 3*:775478. doi: 10.3389/fspor.2021.775478
- Bennett, S. J., de Xivry, J. J. O., Barnes, G. R., & Lefèvre, P. (2007). Target acceleration can be extracted and represented within the predictive drive to ocular pursuit. *Journal of Neurophysiology, 98*(3), 1405-1414.
- Bennett, S. J., de Xivry, J. J. O., Lefèvre, P., & Barnes, G. R. (2010). Oculomotor prediction of accelerative target motion during occlusion: Long-term and short-term effects. *Experimental Brain Research, 204*(4), 493-504.
- Berret, B., Bisio, A., Jacono, M., & Pozzo, T. (2014). Reach endpoint formation during the visuomotor planning of free arm pointing. *European Journal of Neuroscience, 40*(10), 3491-3503.
- Berthier, N. E., Clifton, R. K., Gullapalli, V., McCall, D. D., & Robin, D. J. (1996). Visual information and object size in the control of reaching. *Journal of Motor Behavior, 28*(3), 187-197.
- Bongers, R. M., & Michaels, C. F. (2008). The role of eye and head movements in detecting information about fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 34*(6), 1515-1523.
- Bowman, M. C., Johannson, R. S., & Flanagan, J. R. (2009). Eye-hand coordination in a sequential target contact task. *Experimental Brain Research, 195*(2), 273-283.
- Cámara, C., de la Malla, C., López-Moliner, J., & Brenner, E. (2018). Eye movements in interception with delayed visual feedback. *Experimental Brain Research, 236*(7), 1837-1847.
- Danion, F. R., & Flanagan, J. R. (2018). Different gaze strategies during eye versus hand tracking of a moving target. *Scientific Reports, 8*(1), 1-9.
- de Brouwer, A., Flanagan, R., & Spering, M., (2021). Functional Use of Eye Movements for an Acting System. *Trends in Cognitive Sciences, 25*(3), 252-263.
- de Vries, S., Huys, R., & Zanone, P. G. (2018). Keeping your eye on the target: Eye-hand coordination in a repetitive Fitts' task. *Experimental Brain Research, 236*(12), 3181-3190.
- Deconinck, F. J. A., van Polanen, V., Savelsbergh, G. J., & Bennett, S. J. (2011). The relative timing between eye and hand in rapid sequential pointing is affected by time pressure, but not by advance knowledge. *Experimental Brain Research, 213*(1), 99-109.
- Etchells, P. J., Benton, C. P., Ludwig, C. J., & Gilchrist, I. D. (2010). The target velocity integration function for saccades. *Journal of Vision, 10*(6), 1-14.
- Farrow, D., & Abernethy, B. (2003). Do expertise and the degree of perception-action coupling affect natural anticipatory performance? *Perception, 32*(9), 1127-1139.
- Fooken, J., Kreyenmeier, P., & Spering, M. (2021). The role of eye movements in manual interception: A mini-review. *Vision Research, 183*, 81-90.

- Hayhoe, M. M., McKinney, T., Chajka, K., & Pelz, J. B. (2012). Predictive eye movements in natural vision. *Experimental Brain Research*, 217(1), 125-136.
- Heinen, T., Jeraj, D., Vinken, P. M., & Velentzas, K. (2012). Land where you look? Functional relationships between gaze and movement behaviour in a backward salto. *Biology of Sport*, 29(3), 177-183.
- Helsen, W. F., Elliott, D., Starkes, J. L., & Ricker, K. L. (1998). Temporal and spatial coupling of point of gaze and hand movements in aiming. *Journal of Motor Behavior*, 30(3), 249-259.
- Hofeldt, A. J., Hoefle, F. B., & Bonafede, B. (1996). Baseball hitting, binocular vision, and the Pulfrich phenomenon. *Archives of Ophthalmology*, 114(12), 1490-1494.
- Johansson, R. S., Westling, G., Bäckström, A., & Flanagan, J. R. (2001). Eye-hand coordination in object manipulation. *Journal of Neuroscience*, 21(17), 6917-6932.
- Kim, C. E., Thaker, G. K., Ross, D. E., & Medoff, D. (1997). Accuracies of saccades to moving targets during pursuit initiation and maintenance. *Experimental Brain Research*, 113(2), 371-377.
- Kishita, Y., Ueda, H., & Kashino, M. (2020). Eye and Head Movements of Elite Baseball Players in Real Batting. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2:3. doi: 10.3389/fspor.2020.00003
- Kuntz, J. R., Karl, J. M., Doan, J. B., & Wishaw, I. Q. (2018). Gaze anchoring guides real but not pantomime reach-to-grasp: Support for the action-perception theory. *Experimental Brain Research*, 236(4), 1091-1103.
- Land, M. F., & McLeod, P. (2000). From eye movements to actions: How batsmen hit the ball. *Nature Neuroscience*, 3(12), 1340-1345.
- Li, Y., Wang, Y., & Cui, H. (2018). Eye-hand coordination during flexible manual interception of an abruptly appearing, moving target. *Journal of Neurophysiology*, 119(1), 221-234.
- Lim, J. (2015). Effects of spatial and temporal constraints on interceptive aiming task performance and gaze control. *Perceptual and Motor Skills*, 121(2), 509-527.
- Mann, D. L., Abernethy, B., & Farrow, D. (2010). Action specificity increases anticipatory performance and the expert advantage in natural interceptive tasks. *Acta Psychologica*, 135(1), 17-23.
- Mann, D. L., Spratford, W., & Abernethy, B. (2013). The head tracks and gaze predicts: How the world's best batters hit a ball. *PLoS ONE*, 8(3), e58289.
- Marinovic, W., Plooy, A., & Tresilian, J. R. (2008). The time course of amplitude specification in brief interceptive actions. *Experimental Brain Research*, 188(2), 275-288.
- Marinovic, W., Plooy, A., & Tresilian, J. R. (2009). The utilisation of visual information in the control of rapid interceptive actions. *Experimental Psychology*, 56(4), 265-273.
- Masaki, H., Sommer, W., Takasawa, N., & Yamazaki, K. (2012). Neural mechanisms of timing control in a coincident timing task. *Experimental Brain Research*, 218(2), 215-226.
- Medendorp, P. W., & Crawford, D. J. (2002). Visuospatial updating of reaching targets in near and far space. *Neuroreport*, 13(5), 633-636.
- Mon-Williams, M., Tresilian, J. R., Coppard, V. L., & Carson, R. G. (2001). The effect of obstacle position on reach-to-grasp movements. *Experimental Brain Research*, 137(3-4), 497-501.
- Murdison, T. S., Paré-Bingley, C. A., & Blohm, G. (2013). Evidence for a retinal velocity memory underlying the direction of anticipatory smooth pursuit eye movements. *Journal of Neurophysiology*, 110(3), 732-747.
- Panchuk, D., & Vickers, J. N. (2006). Gaze behaviors of goaltenders under spatial-temporal constraints. *Human Movement Science*, 25(6), 733-752.
- Park, H., Jang, D., & Park, S. (2018). Gaze Anchoring as a Spatial Reference for the Target during Aiming Movements. *Korean Journal of Sport Psychology*, 29(2), 65-79.
- Park, S. (2003). Visual Information Processing and Control Mechanism for Coincident Timing Response. *Korean Journal of Sport Psychology*, 14(4), 1-16.
- Park, S. (2005). Optimal eye movement strategies for enhancing the efficiency of coincident timing response. *Korean Journal of Sport Psychology*, 16(4), 161-177.
- Park, S. (2020). Coupling of Visual Perception and Action during the Performance of Anticipation Timing Task with Spatio-temporal Accuracy Demands. *Korean Journal of Sport Psychology*, 31(2), 135-149.
- Peterken, C., Brown, B., & Bowman, K. (1991). Predicting the future position of a moving target. *Perception*, 20(1), 5-16.
- Peters, M. (1997). Gender differences in intercepting a moving target by using a throw or button press. *Journal of Motor Behavior*, 29(4), 290-296.
- Rand, M. K., & Stelmach, G. E. (2011). Adaptation of gaze anchoring through practice in young and older adults. *Neuroscience Letters*, 492(1), 47-51.
- Reppert, T. R., Servant, M., Heitz, R. P., & Schall, J. D. (2018). Neural mechanisms of speed-accuracy tradeoff of visual search: Saccade vigor, the origin of targeting errors, and comparison of the superior colliculus and frontal eye field. *Journal of Neurophysiology*, 120(7), 372-384.
- Sailer, U., Eggert, T., Ditterich, J., & Straube, A. (2003). Predictive pointing movements and saccades toward a moving target. *Journal of Motor Behavior*, 35(1), 23-32.
- Tochikura, I., Sato, D., Imoto, D., Nuruki, A., Yamashiro, K., Funada, R., & Maruyama, A. (2020). Baseball players' eye movements and higher coincident-timing task performance. *Perceptual and Motor Skills*, 127(3), 571-586.
- Tresilian, J. R. (2004). The accuracy of interceptive action in time and space. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 32(4), 167-173.
- Tresilian, J. R., & Lonergan, A. (2002). Intercepting a moving target: Effects of temporal precision constraints and movement amplitude. *Experimental Brain Research*, 142(2), 193-207.
- Tresilian, J. R., Oliver, J., & Carroll, T. (2003). Temporal precision of interceptive action: Differential effects of target size and speed. *Experimental Brain Research*, 148(4), 425-438.

- Tresilian, J. R., & Plooy, A. M. (2006). Systematic changes in the duration and precision of interception in response to variation of amplitude and effector size. *Experimental Brain Research*, 171(4), 421-435.
- Tresilian, J. R., Plooy, A. M., & Marinovic, W. (2009). Manual interception of moving targets in two dimensions: Performance and space-time accuracy. *Brain Research*, 1250, 202-217.
- Zaal, F. T., & Michaels, C. F. (2003). The information for catching fly balls: Judging and intercepting virtual balls in a CAVE. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(3), 537-555.