

시간 정보의 공간적 표상 형태와 발달*

이 세 별 정 수 근†

한국뇌연구원 뇌신경망연구부

많은 시간관련 단어가 공간정보 개념을 차용하는 것에서 보듯이, 일상생활에서 시간과 공간 정보는 밀접하게 관련되어 있다. 성인을 대상으로 한 최근의 연구들은 시간에 대한 내적표상이 공간정보에 기반하고 있다는 행동 및 신경학적 증거들을 보여준다. 그러나 내적 시간표상의 구체적인 형태에 대해서는 아직도 활발히 논쟁 중이며, 그 발달 양상에 대해서는 알려진 바가 더욱 부족하다. 그러므로 본 연구에서는 수평선으로 제시된 구체적인 시간선(time line)을 사용하여 6~8세, 9~11세, 그리고 성인의 시간정보 처리의 특징을 비교하였다. 특히, 수평선 위에 경험한 시간을 직접적으로 맵핑하게 한 후, 로그-선형 융합 모형(Cicchini et al., 2014)에 기반하여 시-공간정보 연합의 형태가 선형적/비선형적인지를 검증하였다. 전체 연령집단에 걸쳐 로그형태로 축약된 시간표상이 관찰되었으나, 시간관련 단어 습득의 시기와 동일한 8~9세 사이에 연령관련한 차이가 발견되었다. 구체적으로, 6~8세 아동의 경우, 성인집단은 물론 9~11세 아동집단보다 현저히 로그형태로 왜곡된 시간지각을 보이는 반면, 성인집단과 9~11세 아동집단 간에는 유의한 차이가 존재하지 않았다. 이와 같은 결과는 내적인 시간정보 표상이 동물연구에서 밝혀진 것처럼 로그적으로 축약된 형태의 공간표상에 의존하고 있다는 가능성을 시사한다.

주요어 : 시-공간 정보 연합, 시간정보표상, 시간선추정과정, 시간개념발달

* 본 연구는 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국뇌연구원의 기초연구사업지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 18-BR-01-07/18-BR-03-02/IBS-R001-D1-2018-b01).

본 연구의 일부 데이터는 2018 Cognitive Science Society Meeting에서 발표되었습니다.

† 교신저자 : 정수근, 한국뇌연구원 뇌신경망연구부, 41068 대구시 동구 칠단로 61, 한국뇌연구원
E-mail: skjeong@kbri.re.kr

일상생활에서 흔히 쓰는 시간을 나타내는 단어 중에는 유독 공간 개념과 관련된 것이 많다. 예를 들어, 힘든 하루를 보내고 난 뒤 “하루가 참 길었다”라고 하거나 약속 시간을 바꾸고 싶을 때 “시간을 앞당겨서 만나자”라고 하기도 한다. 이는 한국어뿐 아니라 다양한 언어에서 공통적으로 발견되는 현상이다(Bender & Beller, 2014). 시각이나 청각 정보 등 구체적인 지시대상이 있는 감각정보와 달리 시간은 구체적인 대상이 없는 추상적인 개념이므로 이를 지칭하기 위해 구체적인 개념인 공간정보를 차용하는 것은 자연스러운 선택일지도 모른다. 그렇다면 시간을 표상하기 위해 공간정보를 사용하는 것은 단지 메타포일 뿐일까?

사실 이 질문은 현재 활발하게 논의되고 있는 연구주제이며, 다음과 같은 세 개의 견해가 서로 대비되어 연구가 진행 중이다(예, Bottini & Casasanto, 2013; Bueti & Walsh, 2009; Cai & Connell, 2015; Eichenbaum, 2014, 2017; Hendricks & Boroditsky, 2015; Howard et al., 2014; Lourenco & Longo, 2010): 추상적인 개념을 명시적으로 의사소통하기 위해 공간개념을 차용하는 메타포일 뿐이라는 견해(Casasanto & Boroditsky, 2008; Casasanto, Fotakopoulou & Boroditsky, 2010), 시간과 공간 정보가 공통된 신경학적 기제에 의해 처리되며 표상적/주의적 자원을 공유한다는 견해(Cai & Connell, 2015), 그리고 시간/공간/양 정보가 모두 하나의 공통된 물리적 양(general magnitude)으로 표상되어 처리된다는 견해(Walsh, 2003)가 그것이다. 메타포 이론은 시-공간 정보 연합의 형태가 불균형적(asymmetric)이라는 연구결과 -공간정보가 시간 정보에 의존하는 정도가 그 반대의 경우보다 크게 나타남-에 의해 지지되었으나(Boroditsky, 2000; Merritt et al., 2010), 최

근의 많은 연구들은 그와 반대되는 행동적/신경학적 근거들을 제시하고 있어(Cai & Connell, 2015; Charras et al., 2017; Coull et al., 2015), 최근에는 시-공간 정보처리의 공통 기제의 존재에 대한 견해가 더욱 탄력을 받고 있는 상황이다.

행동적 증거들의 경우, 시간 지각에 미치는 공간정보의 간섭효과(Frassinetti, Magani, & Oliveri, 2009; Xuan et al., 2007), 공간 정보 지각에 미치는 시간 정보의 간섭효과(Cai & Connell, 2015), 그리고 반응코드의 시-공간 연합효과(“Spatial-Temporal Association of Response Codes” STEARC effect; Ishihara et al., 2008) 등이 시-공간 연합표상의 존재를 지지하는 주요 증거들로 제공되어왔다. 예를 들어, Conson과 동료들(2008)은 시구간 변별(duration discrimination) 과제에서 긴 시구간의 반응이 오른손과 연합되었을 때, 그리고 짧은 시구간의 반응이 왼손과 연합되었을 때, 그 반대의 경우보다 반응이 더 정확하고 빠름을 관찰하여 STEARC 효과를 검증하였다.

신경학적 증거로는 공간적 위치정보와 사건의 시간순서에 관한 기억이 내측 측두(medial temporal) 영역과 전전두-두정피질 신경망(prefrontal-parietal cortical network)의 활동과 공통적으로 관련되어 있으며(Gauthier & van Wassenhove, 2016; Woo et al., 2009), 해마주위 피질(parahippocampal cortex) 영역(Davachi et al., 2003; Libby et al., 2014; Lipton & Eichenbaum, 2008)과 해마(hippocampus)에서도 시/공간 기억 정보처리에 공통적으로 관여하는 영역이 존재한다고 보고되고 있다(Deuker et al., 2016; Kyle et al., 2015). 이와 같은 행동/신경학적 증거들은 시간 정보와 공간 정보가 단순한 메타포 이상을 넘어서 인지자원을 공유하고 신경학적

수준에서의 통합이 존재할 것이라는 주장을 지지한다. Walsh(2003)는 자원의 공유를 넘어 시간과 공간이 공통된 양으로 치환되어 표상된다고 주장하지만, 그와 관련한 실험적 증거가 부족하여 결론내리기 어려운 상황이다.

시-공간 연합 표상의 정확한 형태에 대한 실험적인 증거는 부족한 상황이지만, 시간정보에 대한 공간적 표상의 형태에 대한 논의는 70년대에 시작되어 현재까지도 활발하게 진행 중이다. 특히, 두 개의 서로 다른 길이의 시구간의 주관적인 중간점이 수학적 평균이 아니라 기하학적 평균에 대응하며(Allan & Gibbon, 1991; Buhusi & Meck, 2005) 시구간 변별의 정확성이 베버의 법칙을 따라 변한다는 사실은 시간 정보가 로그 스케일을 따라 표적시간의 증가와 상관없이 동분산의 형태로 표상된다는 가정과 잘 부합되었고, 이는 여러 동물 행동 실험과 소수의 인간 대상 실험을 통해 지지되었다(Arzy et al., 2009; Church & Deluty, 1977; for a review, Howard, 2018; Rakitin et al., 1998; Singh & Howard, preprint).

반면, Gibbon (1977)에 따르면, 베버의 법칙과 기하학적 평균을 따르는 현상은 로그형태의 시간스케일을 가정하지 않아도 설명이 가능하다. 즉, 시간 정보 자체는 선형 스케일을 따라 표상되나, 시구간 거리가 증가함에 따라 반응 분산이 비례적으로 증가하는 경우("scalar variability"), 베버의 법칙을 따르는 것과 같은 반응을 관찰할 수 있다. 실제 밀리 초 단위에서의 시구간 변별 실험에서, 반응분산이 자극 시구간의 증가함에 따라 비례적으로 증가함이 관찰되었고, 이를 시간연구에서 전통적으로 사용되는 변동계수(coefficient of variation)로 변환할 경우, 자극 시구간의 변화와 상관없이 일정한 크기로 관찰된다(Gibbon & Church,

1981; Gallistel, 1999; Wearden & Jones, 2007). 이처럼 서로 다른 형태의 시간표상을 지지하는 증거들이 계속 보고되고 있으며, 최근 들어서는 이 논쟁의 해결을 위해 시간정보처리와 관련된 신경학적 증거를 찾으려는 노력들이 진행 중이다.

예를 들어, 앞에서도 논의했던 것처럼, 시간 정보처리에 관여하는 다양한 영역들의 반응 양상에 초점을 두고 신경학적 표상의 형태를 밝히려는 연구들이 보고된다(MacDonald et al., 2011; Tiganj, Gershman, Sederberg, & Howard, preprint). Kim과 동료들(2013)은 시구간 분절과제(temporal bisection task) 수행 중에 쥐의 내측 전전두 피질(medial prefrontal cortex)안의 신경세포의 활동패턴이 부적 가속도를 가지고 단조롭게 증가하는 것을 관찰하였고, 이는 로그 스케일에 따른 시간표상 가정과 부합하는 패턴이라 보고하였다(Kim et al., 2013). 반면, 시각 피질(visual cortex)과 보조운동영역(supplementary motor)의 활성화가 시간정보의 변화에 반응하여 선형적 증가를 보인다는 연구도 동시에 보고되고 있다(Buhusi & Meck, 2005; Coull et al., 2004).

즉, 시간정보의 공간적 표상이 로그 스케일을 따르는지 아니면 선형 스케일을 따르는지에 대한 논의는 여전히 합의에 이르지 못한 상태이다. 뿐만 아니라, 시간정보처리에서의 오류가 여러 신경학적 질병의 주요한 증상 중의 하나이며, 기억이나 읽기, 인과추론 등의 고위 인지기능에 미치는 영향을 고려할 때(윤주인, 박영신, 2014; 송윤지, 김소연, 2018; Casini et al., 2018; Howard & Eichenbaum, 2013; Rey et al., 2002; Singh et al., 2018), 시간정보 표상에 대한 이해는 여전히 시급하고 중요한 연구주제이다.

그러므로 본 연구에서는 새로운 행동적 접근법을 사용하여 시간정보 표상의 형태에 대한 이해를 더하고자 한다. 전통적으로 시간정보 처리 과정에 대한 연구는 제한된 시 구간(밀리 초에서 수 초)과 방법론, 그리고 성인 참가자들의 실험 결과에만 의존해 진행되어왔고, 그로 인해 초 단위를 넘어서는 시간처리에 대한 연구가 부족한 상황이다. 뿐만 아니라, 소수의 동물실험을 제외하고는 시-공간 정보 표상의 연관성을 연구하기 위해 점화효과나 간섭효과 등의 간접적인 측정방법에 주로 의존해왔다. 예를 들면, 오른쪽으로 향하는 화살표가 긴 시구간과 연합되었을 때의 반응이 그 반대의 경우보다 빠름을 통해, 공간정보와 시간 정보간의 연합을 추론하였다(Droit-Volet & Coull, 2015).

본 연구는 일상생활에서 가장 많이 사용되는 수초(few seconds) 단위부터 분 단위(minutes, 60분 이하)까지의 시간정보처리의 특징을 파악할 수 있는 “시간선 추정과제(Lee & Jeong, 2018)”를 이용하여 6~8세, 9~11세, 그리고 성인집단의 분 단위 시간정보 표상과 처리방식에 있어서의 차이점 및 공통점을 탐색해보았다. 특히, 시간정보의 공간적 표상을 간접적인 방법으로 활성화하기 보다는, 구체적인 시간선 위에 지각한 시간 정보를 공간적으로 직접 구현하게 하여 지각표상의 형태를 명시적으로 측정하였다.

구조적으로 비슷한 숫자선(number line) 과제에서 자극 숫자와 반응 숫자간의 공간적 맵핑이 지각된 수 표상의 추정치로 여겨지는 것처럼(Siegler & Booth, 2004; Siegler & Opfer, 2003), 구체적인 시간선 위에 구현된 시간의 분포 역시 내적시간표상의 중요한 특질을 드러낼 수 있을 것이라 기대하였다. 특히, 숫자선 과제에

서 제도 교육을 받기 전, 수 개념이 확립되지 않은 상태에서 나타난 로그적 수 표상이 이후 수 개념발달과 함께 선형적 수 표상으로 변화하는 것처럼(Kim & Opfer, 2017; Siegler & Booth, 2004; Siegler & Opfer, 2003), 시간정보 표상의 형태 역시 6~8세, 9~11세, 성인 집단 사이에 질적인 변화가 발생하는지 역시 주요한 연구 질문이었다. 또한, 최근의 숫자선 과제를 사용한 연구에서 로그적 반응 패턴이 중앙집중 반응편향(Anobile et al., 2012; Ciccini et al., 2014)이나 어린 아동의 미숙한 비율판단(proportion judgment)의 결과물(Barth & Palladino, 2011)로 해석된다는 보고가 증가하고 있는 점을 고려하여, 로그/선형 반응패턴이 시간정보 처리 맥락에서 가지는 의미에 대해서 여러 방향으로 논의해 볼 것이다.

방 법

실험참가자

성인과 두 아동집단이 연구에 참여하였다. 성인 집단은 오하이오 주립대학 학부생 36명(평균연령 = 19.75세)으로 구성되었고, 심리학 개론수업 수강요건 충족을 위해 참여하였다. 아동의 경우 오하이오 주립대학 주변의 초등학교에서 6~8세(50명, 평균연령 = 7.19세), 9~11세(56명, 평균연령 = 9.59세), 총 106명의 아동이 실험에 참가하였고, 부모의 서면동의서가 제출되었다. 실험참가 아동들에게는 스티커와 연필이 지급되었다. 제시된 자극과 상관없이 일관되게 동일한 반응을 보였던 성인 두 명과 6세 아동 한 명의 데이터는 최종분석에서 제외되었다.

절차

성인 실험의 경우, 오하이오 주립대학 인지 발달연구실 내 실험실에서 진행되었으며, 아동 실험의 경우 아동이 다니는 학교 내 조용한 공간에서 실시되었다. 실험 참가자에게는 총 4회기의 시간선 추정과제가 제시되었는데, 그림 1에서 보듯이, 이 과제는 제시된 동영상 을 보는 동안 자연스럽게 시간정보가 입력되는 입력시기(encoding)와 단기 기억의 영향력을 제거하기 위한 수학계산문제풀이, 그리고 마지막 검사회기(time line estimation)로 구성되었다. 입력시기 동안에는 음향정보가 제거된 3 분 길이의 동영상이 제시되었으나, 실험참가자는 동영상의 실제 길이를 알지 못하였고, 각 회기마다 서로 다른 동영상 자극이 사용되었다. 그러나 동영상 간 수행에 유의한 차이가 없어, 이후 분석과정에서는 4개의 동영상 수행을 모두 통합하여 분석하였다.

이후 수학문제 풀이시기에는 간단한 산술계산 문제가 제시되었고, 연령집단에 따라 그 난이도가 조절되었다. 이 회기는 단기 기억의 영향으로 인한 최신 효과(recency effect)를 배제하기 위한 시간끝기용이었으므로, 그 결과를 분석하지 않았다.

검사회기에는 시간선 위에 제시된 시각자극(동영상 안의 정지 이미지)을 보고, 그 시각자극이 동영상 안에서 발생한 상대적인 시간을 추정하여 수직선 위의 거리로 표기하게 하였다. 각 비디오마다 총 30개의 정지 이미지가 6 초마다 추출되었으며, 그 중 10개의 자극을 무선적으로 선택하여 각 검사회기에 제시하였다. 결론적으로 각 실험참가자는 4회기에 걸쳐, 총 40개의 시각자극에 대한 시간정보를 추정하였다. 총 소요시간은 연령집단에 따라 다소 차이가 있었으나, 대략 20-30분 정도였다. 실험참가자의 반응에 대한 피드백은 제공되지 않았다. 실험절차는 전 연령집단에 걸쳐

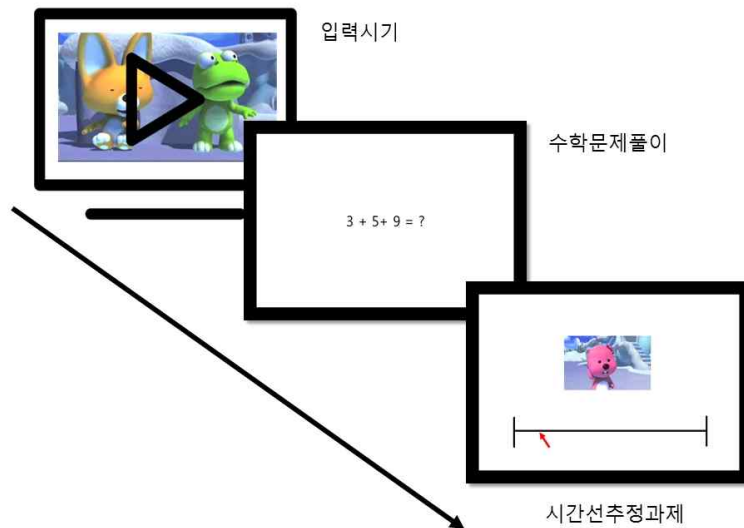


그림 1. 시간선 추정과제 절차

동일하였으나, 6~8세 아동의 경우 이해를 돕기 위해 실험제시문과 더불어 실험자가 구두로 아래와 같이 절차를 설명하였다.

“이번 게임에서는 네가 조금 전에 봤던 비디오의 한 장면이 수평선과 함께 제시될 거야. 수평선은 비디오를 보는 동안 지나간 시간을 나타내고, 그 왼쪽 끝은 비디오의 시작, 그리고 오른쪽 끝은 비디오의 끝을 나타낸다. 네가 할 일은 제시된 장면 사진을 보고 비디오가 시작하고 얼마의 시간이 흐른 후 그 장면이 나왔었는지 이 수평선 위에 표시하는 거야. 이 수평선 위의 어느 지점이라도 표시할 수 있어.”

종속측정치

시간정보 표상의 형태를 확인하기 위해 다음과 같은 로그-선형 융합 모형(Cicchini et al., 2014)을 이용하여 회귀분석을 실시하고, 로그 경향치를 추정하였다.

$$R = a \left\{ (1 - \lambda)T + \lambda * \frac{T_{end}}{\ln(T_{end})} * \ln(T) \right\}$$

여기서, R은 주어진 자극에 대한 참가자의 추정시거리를 나타내고, T는 주어진 자극의 실제 시거리, a는 scaling factor, Tend는 시간선의 오른쪽 끝 시거리(180초), λ는 비선형 경향치를 나타낸다(Anobile, Cicchini, & Burr, 2012). 여기서 λ가 0이면 추정치와 실제 제시된 시간의 완벽한 선형관계를, 1인 경우 완벽한 로그관계를 의미한다.

그 외에도 오차와 분산이 계산되었다. 오차의 경우, 제시된 시구간과 시간선 위에 표시된 시구간의 차이를 전체 시구간(180초)으로

나눈 절대오차비율(Percent Absolute Error)이 분석에 사용되었다(Siegler & Booth, 2004). 분산의 경우, 제시된 각각의 시구간의 반응에 대한 표준편차를 계산한 후, 이를 반응평균으로 나눈 변동계수(Coefficient of Variance)가 분석에 사용되었다(Gibbon, 1977). 변동계수는 측정단위가 다르거나 평균 차이가 많이 나는 계열 정보들 간의 분산을 상대적으로 비교하는 데 사용되는 통계치로, 기존 밀리초 단위의 시구간 지각 연구들에서 Scalar variability를 검증하기 위해 사용되어 왔다. 즉, 변동계수가 제시된 시구간의 증가에 따라 일정하다면, 이는 반응 분산이 반응표준에 비례하여 증가함을 의미한다. 이는 곧, Gibbon(1977)의 예측대로 시간 정보가 선형 스케일에 표상되나, 분산의 비율적 증가로 인해, 시구간 지각에서의 배버법칙이 관찰되는 이유로 여겨진다. 따라서 본 연구에서도 변동계수가 제시된 시구간의 증가에 상관없이 일관적인지 아니면 변동계수가 변화되는지가 주요관심사였다.

결 과

로그적으로 축약된 시간정보표상과 발달적 변화

그림 2에서 보듯이, 제시된 시구간(duration)이 증가함에 따라 시간선 위에 표시된 시구간 역시 증가하는 경향성을 전 연령집단에 걸쳐 확인할 수 있었다. 이는 각 연령집단의 실험 참가자가 과제구조를 정확히 이해하고, 제시된 시각자극과 연합된 시간정보를 인출하여 과제를 수행하였음을 의미한다. 그러나 그림 2의 그래프에 제시된 사선과 참가자의 반응패턴의 불일치에서 보듯이, 제시된 시구간과 지

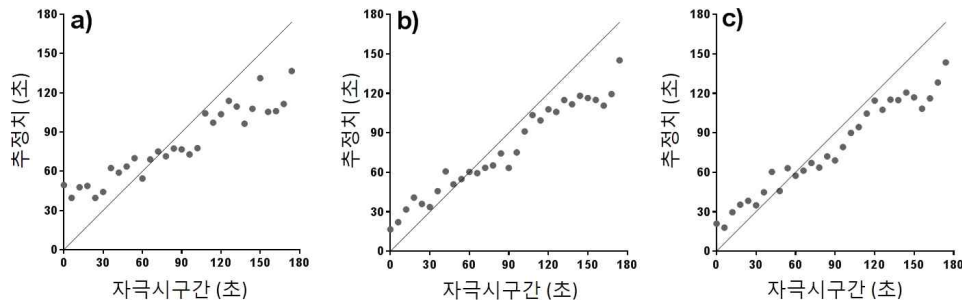


그림 2. 자극 시간 증가에 따른 실험참가자의 평균 추정 시간의 변화, a) 6~8세 아동, b) 9~11세 아동, c) 성인집단, 그래프에 제시된 사선은 자극시간과 평균 추정시간이 선형적인 일대일 대응을 이루었을 때의 가상적인 반응선을 나타냄.

각된 시구간에는 분명한 차이가 존재하였다. 이는 절대오차비율을 통해 확인할 수 있었고 (그림 3a), 또한 그 크기에 있어서 각 연령집단 간 유의한 차이도 발견되었다($F(2, 136) = 18.3, p < .001, \eta^2 = .212$). 특히 6~8세 아동 집단의 수행이 다른 두 집단과 확연히 구별되었다(6~8세 vs. 9~11세, $T(136) = 4.100, p < .001$; 6~8세 vs. 성인, $T(136) = 5.840, p < .001$; 9~11세 vs. 성인, $T(136) = 2.310, p = .068$).

오차의 분포 형태는 자극 시구간의 크기에 따라, 또 연령집단에 따라 달라졌다(그림 2).

구체적으로, 초기 시구간(0~60초)의 경우, 지각된 시구간의 크기가 제시된 시구간보다 큰 반면, 이후의 시구간(60초 이후)에서는 지각된 시구간의 크기가 제시된 시구간의 크기보다 작았다.

이는 선형 융합 모형(Cicchini et al., 2014)을 이용하여 계산된 비선형 경향치를 통해 확인할 수 있었으며, 연령집단에 따라 그 정도가 변했다(표 1 및 그림 3(b)참조; $F(2, 136) = 7.03, p < .001, \eta^2 = .094$, Geisser-Greenhouse 보정사용). 비슷한 구조를 가진 시간선 과제에서의 수행과 마찬가지로(Booth & Siegler, 2006;

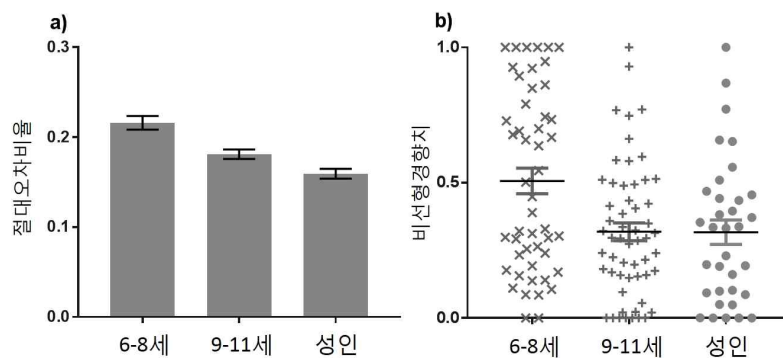


그림 3. a) 연령집단에 따른 평균 절대오차비율의 분포, 오차막대는 표준오차를 나타냄, b) 연령집단에 따른 비선형 경향치의 분포. 각 데이터 포인트는 각 집단 내 개인의 표준 비선형 경향치를 나타낸다. 1 = 완벽한 비선형(로그) 경향, 0 = 완벽한 선형 경향.

표 1. 연령집단에 따른 비선형 경향치, 절대오차비율, 변동계수의 평균(표준편차)

연령집단	비선형 경향치	절대오차비율	변동계수
6-8세 아동	.507(.331)	.216(.053)	.395(.049)
9-11세 아동	.319(.246)	.181(.039)	.443(.065)
성인	.317(.246)	.159(.032)	.430(.064)

Siegler & Opfer, 2003; Siegler, Thompson & Opfer, 2009), 가장 어린 6~8세 아동집단은 9~11세 아동과 성인집단에 비해 유의하게 더 높은 비선형 경향치를 보여주었다(6~8세 vs. 9~11세, $T(136) = 3.390, p = .003$; 6~8세 vs. 성인, $T(136) = 3.000, p = .010$; 9~11세 vs. 성인, $T(136) = .027, p > .999$). 특히, 6~8세 아동의 비선형경향치의 경우, 비슷한 연령의 아동들이 0-100 범위의 숫자선 과제에서 보여준 평균점수 .42(Kim & Opfer, 2017)와 비슷한 점수분포를 보여주었다. 반면 성인들은 숫자선 과제의 수행 시 숫자 범위에 상관없이 비선형 경향치가 0에 수렴하는 완벽한 선형추정 반응이 주로 보고되었고, 이는 시간선 추정과는 대비되는 결과이다(Anobile, Cicchini, & Burr, 2012).

흥미롭게도 그림 3(b)에서 보듯이 비선형 경향치의 개인 간 차이도 전 연령집단에 걸쳐 뚜렷하게 관찰되었다. 즉, 연령에 따라 비선형성이 감소하는 전반적인 경향이 존재하지만, 성인집단 내에서도 상당수의 실험참가자가 6~8세 아동과 같은 수준의 비선형성을 보여주었고, 마찬가지로 소수의 6~8세 아동들은 성인과 같은 수준의 수행을 보여주었다. 이는 비선형 경향치가 입력된 시간정보의 표상에 대한 중요한 정보를 제공하고 있는 동시에, 시간정보 처리 효율성에서의 개인차는 물론 연령집단 차이를 측정할 수 있는 좋은 통계치임을 보여준다.

이전 시행과 현재 시행 간의 계열의존효과

본 실험과 비슷한 구조를 가진 숫자선 연구에서는 로그형태의 반응곡선이 지각된 시간표상의 형태를 반영하는지, 아니면 중앙집중경향(central tendency of judgments)과 같은 의사결정에서의 편향에 의한 결과물인지가 오랜 논쟁이었다. 특히, Cicchini, Anobile, 그리고 Burr (2014)의 주장에 따르면 불확실한 상황에서 사람들의 의사결정은 자극분포의 평균으로 회귀하는 경향이 있고, 그 결과 숫자개념이 불명확한 어린 아동이나, 혹은 성인 역시도 평소 사용하지 않는 범위의 숫자가 제시되었을 때 로그형태의 반응곡선을 도출하게 된다. 그러므로 Cicchini와 동료들(2014)은 사람들이 불확실한 상황에서 숫자선 과제를 수행할 때, 평균으로 회귀하는 반응을 하기 위해 지속적으로 제시된 숫자들의 평균을 계산하는 “역동적 입력전략(dynamic encoding strategy)”을 사용할 것이라고 예측하였다. 그리고, 이러한 전략은 이전 시행과 현재 시행의 수행 간 “계열의존성(serial dependency)”의 형태로 나타날 것이라 주장하였다.

본 연구에서도 이를 참고하여, 이전 수행과 현재 수행간의 계열적 의존성이 존재하는지, 그리고 그 계열적 의존성이 시간선 추정 수행을 예측할 수 있는지 검증해보았다. 우선, 회귀분석을 이용하여 현재 자극 시구간과 이전

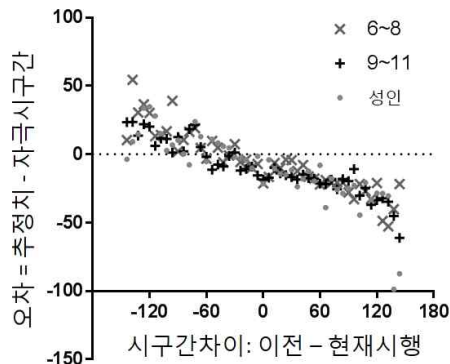


그림 4. 이전 시행과 현재 시행 간의 거리가 오차에 미치는 영향

시행에서의 자극 시구간의 차이(lag)가 오차의 변화를 예측할 수 있는지 분석해 보았는데, 그림 4에서 보듯이, 반응오차에서의 계열의존성을 전 연령집단에 걸쳐 확인할 수 있었다(6~8세 아동, $B = -.236$, $F(1, 47) = 220$, $p < .001$, $R^2 = .824$; 9~11세 아동, $B = -.204$, $F(1, 47) = 281$, $p < .001$, $R^2 = .857$; 성인, $B = -.244$, $F(1, 47) = 104$, $p < .001$, $R^2 = .688$).

이는 Cicchini 등(2014)의 주장대로 실험참가자들이 “역동적 입력책략(dynamic encoding)”을 사용했을 가능성을 보여준다. 또한 각 개인별

로 위와 동일한 회귀분석을 실시하여 수행 간 계열적 의존성의 정도(회귀분석의 B값을 사용)를 계산한 후, 시간선 추정에서 나타난 비선형 경향치와의 관계를 살펴보았다. 그림 5에서 보여주는 것처럼, 전 연령집단에 걸쳐 유의한 연관성을 확인할 수 있었다(6~8세 아동, $B = 1.4$, $F(1, 47) = 35.1$, $p < .001$, $R^2 = .427$; 9~11세 아동, $B = 1.42$, $F(1, 54) = 30.9$, $p < .001$, $R^2 = .364$; 성인, $B = 1.49$, $F(1, 32) = 25.6$, $p < .001$, $R^2 = .445$). 이는 시행 간 계열적 의존성의 정도가 높은 참가자의 시간선 추정이 더 비선형적임을 가리킨다.

곧, Cicchini 등(2014)의 주장처럼, 시간선 추정과정에서 나타난 로그형태의 반응곡선은 “역동적 입력책략”의 사용으로 인해 발생한 “중앙집중” 반응 편향의 부산물일 가능성을 시사한다. 그러나 시계열 의존적인 오차의 변화는 기억과정과 연관된 인지 실험에서는 흔히 발견되는 패턴이므로, “역동적 입력책략” 사용에 의해서만 발생한다고 결론내리기는 어렵다. 이후 변동계수에 대한 분석과 함께, 일 반논의에서 더욱 자세히 논의할 것이다.

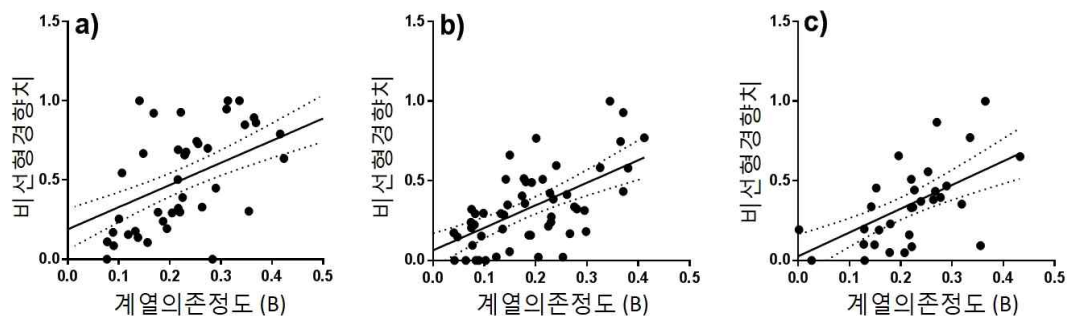


그림 5. 시행 간 계열의존성 정도와 시간선 추정의 비선형 경향치와의 관계, a) 6~8세 아동, b) 9~11세 아동, c) 성인집단. 제시된 실선은 추정된 회귀선이며, 점선은 95% 신뢰구간을 나타냄.

자극 시구간 증가에 따른 변동계수의 변화

자극 시구간의 증가에 따른 변동계수(coefficient of variation)의 변화양상은 기존 시구간 지각(duration perception) 연구에서 빈번하게 사용되는 측정치이다. 이는 시구간 지각에서의 안정성을 측정함과 동시에 시간의 심적표상에 대한 중요한 정보를 전달한다고 여겨지기 때문이다(Block et al., 1999; Buhusi & Meck, 2005; Gibbon, 1977; Lewis & Miall, 2009). 구체적으로, 지각된 시구간 정보가 선형 스케일로 표상되는지 비선형(로그) 스케일로 표상되는지에 대한 행동적 증거의 하나로 사용되어왔다. 예를 들어, 변동계수가 자극 시구간의 증가와 상관없이 일정하다면, 즉, 분산이 자극 증가와 비례하게 증가한다면, 이는 “scalar variability”의 증거로, 지각된 시간이 선형 스케일을 따라 표상됨을 나타낸다(Church & Gibbon, 1982; Gibbon, 1977; Wearden & Jones, 2007). 반면, 변동계수가 자극 시구간의 증가함에 따라 체계적으로 감소한다면, 이는 지각된 시간이 로그 스케일을 따라 등분산의 형태로 표상됨을 지지한다(Eichenbaum, 2017; Howard et al., 2014;

Kim et al., 2013).

본 연구에서는 그림 6(a)가 보여주듯이 전 연령집단에 걸쳐 자극 시간이 로그 스케일에 따라 증가하면서 변동계수가 체계적으로 감소함을 관찰하였다(6~8세 아동, $B = -.593$, $F(1, 27) = 167$, $p < .001$, $R^2 = .861$; 9~11세 아동, $B = -.782$, $F(1, 27) = 682$, $p < .001$, $R^2 = .962$; 성인, $B = -.613$, $F(1, 27) = 259$, $p < .001$, $R^2 = .905$). 이는 전 연령집단에 걸쳐 관찰된 0보다 유의하게 큰 비선형 경향치 지수와 더불어 시간의 내적 표상이 등분산을 가진 로그형태를 따른다는 주장을 뒷받침하는 결과이다.

그 외에도 연령이 증가함에 따라 변동계수의 평균크기가 감소하는 경향성을 보였으나(그림 6b), 그 차이가 통계적으로 유의하지 않았다.

논 의

본 연구에서는 수평선으로 제시된 구체적인 시간선을 사용하여 6~8세, 9~11세, 그리고 성

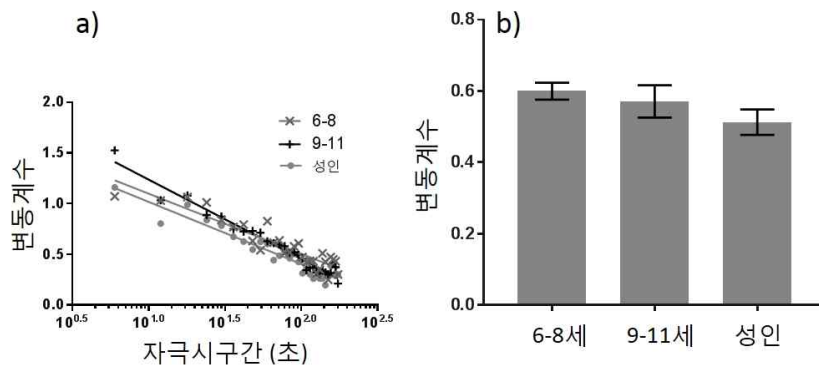


그림 6. a) 자극 시구간의 증가(로그 스케일)에 따른 표준화된 분산의 변화, b) 연령 집단 간 평균 변동계수의 분포

인의 시간정보 표상 형태와 정보 처리의 특징을 비교하였다. 수평선위에 경험한 시간을 직접적으로 맵핑하게 하여 자극으로 제시된 시간과 경험한 시간과의 관계를 분석한 결과, 전 연령집단에 걸쳐 자극 시간이 증가함에 따라 지각된 시간 역시 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 6~8세의 어린 아동도 시간 정보를 추가적인 계산없이 공간정보로 치환하여 사용할 수 있음을 보여주어, 시-공간 정보처리 사이의 밀접한 연관을 암시한다. 또한, 로그-선형 융합 모형(Cicchini et al., 2014)에 기반하여 시-공간정보 연합의 형태가 로그형태로 축약된다는 것을 확인하였다. 즉, 경험한 초기 시구간을 과대추정하고, 후기 시구간을 과소추정하는 경향성을 확인할 수 있었는데, 이는 시각이나 후각 등의 감각정보처리에서도 흔히 관찰되는 현상이다(Howard, 2018). 뿐만 아니라, 표적 시간의 증가에 따라 변동계수가 체계적으로 감소함을 확인하였는데, 이는 곧 자극 시간의 강도에 상관없이 분산이 일정함을 의미한다. 즉, Gibbon(1977)의 Scalar variability 이론과 달리 분산의 비율적 증가가 관찰되지 않았으며, 오히려 시간 정보가 로그 스케일 위에 등분산을 가지고 표상된다는 이론과 더욱 부합하는 결과이다.

로그형태의 반응곡선: 내적 표상? 반응편향?

동물연구나 뇌신경학적 연구에서 보고되는 결과와의 유사성에도 불구하고, 본 실험에서 관찰된 로그 형태의 반응곡선이 단순한 반응편파의 결과물일 가능성을 무시할 수는 없다. 특히 Cicchini 등(2014)의 주장처럼, “역동적 입력”의 증거일 수도 있는 오차에서의 시행 간 계열의존성(serial dependency)이 나타났고, 그 의

존정도가 심해질수록 시간추정의 정확도가 떨어지는 경향성도 확인되었다. 즉, 시간이라는 객관적인 매개체가 없는 자극 강도를 추정하는 데 있어서, 불확실함을 해소하기 위해 실험참가자들은 이전에 제시된 자극과 현재 제시된 자극 간의 평균에 의존했고, 그로 인해 시간 추정의 정확성이 떨어져서 로그형태의 반응곡선을 보였을 가능성도 존재한다. 그러나 시행 간 계열의존성이 역동적 입력이 아닌 다른 원인에 의해 발생했을 가능성 역시 고려되어야 한다.

예를 들어, 학습된 일련의 무의미단어 목록을 자유회상(free recall) 시켰을 때, 한 단어의 활성화(회상)는 시간적으로 인접한 단어의 활성화 확률을 높이는 인접성(contiguity) 효과가 나타나며(Sederberg, 2010), 계열적 수행(sequential performance)시 한 항목의 인출은 관련된 다른 항목의 활성화를 유발하기도 한다(김신혜, 진영선, 2014). 이전 시행의 자극이 현재 시행의 자극의 처리에 영향을 미치는 것은 기억 요소가 포함된 인지실험에서 흔하게 발견되는 현상이며, 이는 본 연구에서 관찰된 계열의존성 효과와도 유사한 결과이다. 따라서 계열의존성 효과만으로 시간 표상 자체가 로그형태인지, 아니면 반응 편향으로 인해 로그형태처럼 보이는 것인지를 결론 내리긴 부족하며, 이와 관련한 후속연구가 진행 중에 있다.

로그형태로 축약된 시간표상

반면, 시간 정보가 로그형태로 축약되어 표상된다는 것은 기억연구 전통에서는 오래된 가정이다(Murdock & Crowder, 1977; James, 1890). 기억은 어떤 일이 언제 발생했는지에 대한 정보를 담고 있으며, 그 정보는 로그형

태로 축약된 시간선위에 표상되어있기 때문에, 더 먼 과거의 기억은 덜 정확하고 덜 빠르게 접근가능하다고 여겨진다(Howard et al., 2015).

해마(hippocampus)와 전전두엽(prefrontal cortex) 영역의 기억정보처리 역할에 관한 최근의 연구들은 기억과제의 딜레이 시간동안 계열적이고 선택적으로 반응하며 시간과 관련한 정보를 제공하는 시간세포를 발견하였다(MacDonald et al., 2011; Pastalkova et al., 2008). 즉, 어떤 시간세포가 특정 순간에 활성화되는가를 측정하여, 얼마나 오래전에 딜레이가 시작되었는지를 추정할 수 있었다. 특히, 순서적으로 뒤에 위치한 시간수용장(temporal receptive field)는 더 넓게 퍼져있어 더 부정확하였고, 시간적으로 가까운 딜레이를 표상하는 시간반응필드는 더 많은 신경세포를 포함하는 반면, 먼 딜레이를 표상하는 시간반응필드는 더 적은 신경세포를 포함하고 있었다(Howard et al., 2014; Kraus et al., 2015; Salz et al., 2016; Tiganj, Gershman, Sederberg, & Howard, 2018).

이는 시간에 대한 신경학적 표상이 본 실험에서 관찰된 행동적 표상과 마찬가지로 로그적으로 축약되어 있음을 지지하는 증거들이다. 대다수의 실험들이 쥐를 대상으로 이루어졌으나, 최근 Tiganj, Cromer, Roy, Miller 와 Howard (2018)는 원숭이의 전전두엽에서도 동일한 패턴의 시간세포 활성화를 관찰하였고, 본 실험의 결과 패턴도 함께 고려할 때, 인간의 전전두엽이나 해마 등에서도 비슷한 활성화 패턴을 가지는 시간세포의 존재를 확인할 수 있을 것이라 기대된다.

결론적으로, 본 연구의 결과가, 기존 시간 관련 연구는 물론(로그 축약 반응곡선, 표적시간 증가에 따른 변동계수의 감소) 기억연구에서의 발견(계열의존적 회상)과도 상응하는 점

을 종합적으로 고려해 볼 때, 기저의 로그적으로 축약된 시간표상을 반영하는 것이라 결론내리는 것이 더 타당하다고 생각된다. 그리고, 구조적으로 동일한 형태를 지니고 있는 숫자선 과제에 대한 최근의 연구들에서, 숫자선 과제의 수행이 수에 대한 표상 뿐 주의, 비율판단 등의 복합적인 인지과정의 산물이라는 견해들을 고려할 때, 로그 반응곡선의 원인을 직접적으로 규명하기 위해서, 후속 연구에서는 역동적 입력에 따른 반응편향의 영향이나 비율정보 처리의 영향을 통제한 상태에서 시간 정보의 표상을 조사할 필요가 있을 것이다.

시간 표상의 발달

본 실험에서는 로그형태로 축약된 시간 표상의 존재를 전체 연령집단에 걸쳐서 관찰하였지만, 축약 정도에 있어서는 유의한 차이가 존재하였다. 6~8세 아동의 경우, 성인집단은 물론 9~11세 아동집단 보다 현저히 더 로그형태로 왜곡된 시간지각을 보이는 반면, 성인집단과 9~11세 아동집단 간에는 수행에 있어서 유의한 차이가 존재하지 않았다. 이 결과는 두 가지 중요한 사실을 보여준다. 우선, 숫자선 과제에서 보여준 것과 비슷하게 연령과 관련한 로그-선형 변화가 나타났다. 그러나 숫자선 과제와 분명하게 다른 점은, 성인집단에서도 유의한 비선형경향치가 발견되었을 뿐 아니라, 성인집단 내에서도 어린 아동과 동일한 수준의 수행을 보여주는 개인이 존재한다는 점이다. 특히 Anobile 등 (2012)의 연구에 따르면, 성인에게 숫자선 과제와 주의자원을 많이 요구하는 다른 과제를 동시에 수행하게 할 경우, 0에 수렴하던 성인의 비선형 경향치

가 4·5세 아동의 숫자선 과제 수행처럼, 혹은 본 연구에서의 시간선 과제 수행에서 관찰된 비선형경향치와 비슷한 수준(4)으로 증가함이 관찰되었고, 개인간 반응 차이 또한 증가하였다. 이를 고려해 볼 때, 연령이 증가함에 따라 표상형태 자체가 변화하기 보다는 다양한 책략사용으로 부정확한 시간 표상을 보완하는 능력이 발달함과 동시에 주의 자원활용의 개인차로 인해 책략사용의 효율성이 달라지고, 이는 곧 비선형경향치에서의 개인차를 유발할 수 있다고 추측해 볼 수 있다. 물론 본 연구의 결과만으로 위의 예측이 충분히 지지되기는 어렵기에 추가적인 연구가 진행 중이다.

둘째, 기존 언어적인 시간 개념(예, 어제, 오늘, 오전, 오후 등) 발달연구에서 관찰된 것처럼, 시간단어의 개념이 적었던 본 연구에서도 8세와 9세 사이에 유의한 수행변화가 관찰되었다(Friedman & Laycock, 1989; Friedman & Lyon, 2005; Gosse & Roberts, 2013; Pathman et al., 2013; Pathman & Ghatti, 2014; Zelanti & Droit-Volet, 2011). 이와 같은 유사성은 시간단어 발달과 숫자선 과제에서 관찰된 변화가 더 근본적인 동일한 정보처리 구조의 변화에 수반된 결과이거나, 혹은 둘 간에 선후 또는 인과관계가 성립될 가능성을 제시한다. 물론 본 연구의 결과만으로는 이를 설명할 수는 없지만, 후속연구를 통해 계속 탐색해 볼 계획이다.

본 연구는 성인과 다양한 연령의 아동에게 동일한 과제를 사용하여, 일상생활에서 밀접히 사용되지만 실험증거가 부족하였던 수초에서 분단위의 시간정보의 공간적 표상의 형태를 탐색해보았다. 특히, 동물을 대상으로 한 행동/신경학적 연구에서 관찰된 로그적으로 축약된 시간 정보 표상을 성인과 아동 모두에

게서 확인했다는 점은 시간정보 표상의 형태가 문화적 학습의 결과라기보다는 생물학적 기반에 의한 것일 가능성을 시사한다고 여겨진다.

참고문헌

- 김신혜, 진영선 (2014). 계열적 수행의 연령차와 인출 단서의 효과. *한국심리학회지: 발달*, 27(1), 141-158.
- 송윤지, 김소연 (2018). 시간 정보 처리 기능이 아동의 문법 발달에 미치는 영향-초등학교 2학년과 3학년을 대상으로. *한국심리학회지: 발달*, 31(2), 145-167.
- 윤주인, 박영신 (2014). 과거와 미래사건의 순서에 대한 추론의 발달과 집행기능. *한국심리학회지: 발달*, 27(4), 51-74.
- Allan, L. G., & Gibbon, J. (1991). Human bisection at the geometric mean. *Learning and Motivation*, 22, 39-58.
- Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2012). Linear mapping of numbers onto space requires attention. *Cognition*, 122(3), 454-459.
- Arzy, S., Adi-Japha, E., & Blanke, O. (2009). The mental time line: an analogue of the mental number line in the mapping of life events. *Consciousness and Cognition*, 18(3), 781-785.
- Barth, H. C., & Paladino, A. M. (2011). The development of numerical estimation: Evidence against a representational shift. *Developmental Science*, 14(1), 125-135.
- Bender, A., & Beller, S. (2014). Mapping spatial frames of reference onto time: A review of

- theoretical accounts and empirical findings. *Cognition*, 132(3), 342-382.
- Block, R., Zakay, D., & Hancock, P. (1999). Developmental changes in human duration judgments: A meta-analytic review. *Developmental Review*, 19(1), 183-211.
- Booth, J., & Siegler, R. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental psychology*, 42(1), 189-201.
- Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring: Understanding time through spatial metaphors. *Cognition*, 75, 1-28.
- Bottini, R., & Casasanto, D. (2013). Space and time in the child's mind: metaphoric or ATOMIC? *Frontiers in Psychology*, 4, 803.
- Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1831-1840.
- Buhusi C. V., Meck W. H. (2005) What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Review Neuroscience*, 6, 755-765.
- Cai, Z. G., & Connell, L. (2015). Space-time interdependence: Evidence against asymmetric mapping between time and space. *Cognition*, 136C, 268-281.
- Casasanto, D., & Boroditsky, L. (2008). Time in the mind: using space to think about time. *Cognition*, 106(2), 579-593.
- Casasanto, D., Fotakopoulou, O., & Boroditsky, L. (2010). Space and time in the child's mind: Evidence for a cross-dimensional asymmetry. *Cognitive Science*, 34(3), 387-405.
- Casini, L., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2018). It's about time: revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Developmental Science*, 21(2), 1-14.
- Charras, P., Droit-Volet, S., Brechet, C., & Coull, J. T. (2017). The spatial representation of time can be flexibly oriented in the frontal or lateral planes from an early age. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 43(4), 832-845.
- Church, R. M., & Deluty, M. Z. (1977). Bisection of temporal intervals. *Journal of Experimental Psychology. Animal Behavior Processes*, 3(3), 216-228.
- Church, R. M., & Gibbon, J. (1982). Temporal generalization. *Journal of Experimental Psychology. Animal Behavior Processes*, 8(2), 165-186.
- Cicchini, G. M., Anobile, G., & Burr, D. C. (2014). Compressive mapping of number to space reflects dynamic encoding mechanisms, not static logarithmic transform. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(21), 7867-72.
- Conson, M., Cinque, F., Barbarulo, A. M., & Trojano, L. (2008). A common processing system for duration, order and spatial information: Evidence from a time estimation task. *Experimental Brain Research*, 187(2), 267-274.
- Coull, J. T., Charras, P., Donadieu, M., Droit-Volet, S., & Vidal, F. (2015). SMA selectively codes the active accumulation of temporal, not spatial, magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27, 2281-2298.

- Coull, J. T., Vidal, F., Nazarian, B., & Macar, F. (2004). Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation. *Science*, 303(5663), 1506-1508.
- Davachi, L., Mitchell, J. P., & Wagner, A. D. (2003). Multiple routes to memory: Distinct medial temporal lobe processes build item and source memories. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(4), 2157-2162.
- Deuker, L., Bellmund, J. L., Navarro Schröder, T., & Doeller, C. F. (2016). An event map of memory space in the hippocampus. *ELife*, 5, e16534.
- Eichenbaum, H. (2014). Time (and space) in the hippocampus. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 17, 65-70.
- Eichenbaum, H. (2017). On the integration of space, time, and memory. *Neuron*, 95(5), 1007-1018.
- Frassinetti, F., Magnani, B., & Oliveri, M. (2009). Prismatic lenses shift time perception. *Psychological Science*, 20(8), 949-954.
- Friedman, W. J., & Laycock, F. (1989). Children's analog and digital clock knowledge. *Child Development*, 60, 357-371.
- Friedman, W. J., & Lyon, T. D. (2005). The development of temporal-reconstructive abilities. *Child Development*, 76, 1202-1216.
- Gallistel, C. R. (1999). Coordinate transformations in the genesis of directed action. In B. O. M. Bly & D. E. Rummelhart (Eds.), *Cognitive science* (pp. 1-42). New York: Academic.
- Gauthier, B., & van Wassenhove, V. (2016). Time is not space: core computations and domain-specific networks for mental travels. *Journal of Neuroscience*, 36(47), 11891-11903.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84(3), 279-325.
- Gibbon, J., & Church, R. M. (1981). Time left: linear versus logarithmic subjective time. *Journal of Experimental Psychology. Animal Behavior Processes*, 7(2), 87-107.
- Gosse, L. L., & Roberts, K. P. (2013). Children's use of a 'Time line' to indicate when events occurred. *Journal of Police and Criminal Psychology*, 29(1), 36-43.
- Hendricks, R. K., & Boroditsky, L. (2015). Constructing mental time without visual experience. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(8), 1-2.
- Howard, M. W. (2018). Memory as perception of the past: Compressed time in mind and brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(2), 124-136.
- Howard, M. W., & Eichenbaum, H. (2013). The hippocampus, time, and memory across scales. *Journal of Experimental Psychology. General*, 142(4), 1211-1230.
- Howard, M. W., MacDonald, C. J., Tiganj, Z., Shankar, K. H., Du, Q., Hasselmo, M. E., & Eichenbaum, H. (2014). A Unified mathematical framework for coding time, space, and sequences in the hippocampal region. *Journal of Neuroscience*, 34(13), 4692-4707.
- Howard, M. W., Shankar, K. H., Aue, W. R., & Criss, A. H. (2015). A distributed representation of internal time. *Psychological Review*, 122(1), 24-53.
- Ishihara, M., Keller, P., Rossetti, Y., & Prinz, W.

- (2008). Horizontal spatial representations of time: Evidence for the STEARC effect. *Cortex*, 44, 454-461.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*, Vol. 1. New York, NY, US: Henry Holt and Co.
- Kim, D., & Opfer, J. E. (2017). A unified framework for bounded and unbounded numerical estimation. *Developmental Psychology*, 53(6), 1088-1097.
- Kim, J., Ghim, J.-W., Lee, J. H., & Jung, M. W. (2013). Neural correlates of interval timing in rodent prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 33(34), 13834-13847.
- Kraus, B. J., Brandon, M. P., Robinson, R. J., Connerney, M. A., Hasselmo, M. E., & Eichenbaum, H. (2015). During running in place, grid cells integrate elapsed time and distance run. *Neuron*, 88(3), 578-589. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.031>
- Kyle, C. T., Stokes, J. D., Lieberman, J. S., Hassan, A. S., & Ekstrom, A. D. (2015). Successful retrieval of competing spatial environments in humans involves hippocampal pattern separation mechanisms. *ELife*, 4, e10499.
- Lee, S. & Jeong, S. K. (2018). The effects of age and event structure on timeline estimation task. In Kalish, C., Rau, M., Rogers, T., Zhu, J., Vlach, H., Lupyan, G., Binzak, J., Plate, R., & Seidenberg, M. (Eds.). *Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Madison, WS: Cognitive Science Society.
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2009). The precision of temporal judgement: milliseconds, many minutes, and beyond. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1897-1905.
- Libby, L. A., Hannula, D. E., & Ranganath, C. (2014). Medial temporal lobe coding of item and spatial information during relational binding in working memory. *Journal of Neuroscience*, 34(43), 14233-14242.
- Lipton, P. A., & Eichenbaum, H. (2008). Complementary roles of hippocampus and medial entorhinal cortex in episodic memory. *Neural Plasticity*, 2008, 1-8.
- Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2010). General magnitude representation in human infants. *Psychological Science*, 21(6), 873-881.
- MacDonald, C. J., Lepage, K. Q., Eden, U. T., & Eichenbaum, H. (2011). Hippocampal "time cells" bridge the gap in memory for discontinuous events. *Neuron*, 71(4), 737-749.
- Merritt D. J., Casasanto D., & Brannon E. M. (2010). Do monkeys think in metaphors? Representations of space and time in monkeys and humans. *Cognition*, 117, 191-202.
- Murdock, B. B., & Crowder, R. G. (1977). Principles of learning and memory. *The American Journal of Psychology*, 90(2), 329.
- Pastalkova, E., Itskov, V., Amarasingham, A., & Buzsáki, G. (2008). Internally generated cell assembly sequences in the rat hippocampus. *Science*, 321(5894), 1322-1327.
- Pathman, T., & Ghetti, S. (2014). The eyes know time: A novel paradigm to reveal the development of temporal memory. *Child Development*, 85(2), 792-807.
- Pathman, T., Larkina, M., Burch, M., & Bauer, P.

- J. (2013). Young children's memory for the times of personal past events. *Journal of Cognition and Development*, 14(1), 120-140.
- Rakitin, B. C., Gibbon, J., Penney, T. B., Malapani, C., Hinton, S. C., & Meck, W. H. (1998). Scalar expectancy theory and peak-interval timing in humans. *Journal of Experimental Psychology. Animal Behavior Processes*, 24(1), 15-33.
- Rey, V., De Martino, S., Espesser, R., & Habib, M. (2002). Temporal processing and phonological impairment in dyslexia: Effect of phoneme lengthening on order judgment of two consonants. *Brain and Language*, 80, 576-591.
- Salz, D. M., Tiganj, Z., Khasnabish, S., Kohley, A., Sheehan, D., Howard, M. W., & Eichenbaum, H. (2016). Time cells in hippocampal area CA3. *Journal of Neuroscience*, 36(28), 7476-7484.
- Sederberg, P. B., Miller, J. F., Howard, M. W., & Kahana, M. J. (2010). The temporal contiguity effect predicts episodic memory performance. *Memory & Cognition*, 38(6), 689-699.
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, 75(2), 428-444.
- Siegler, R. S., Thompson, C. A., & Opfer, J. E. (2009). The logarithmic to linear shift: One learning sequence, many tasks, many time scales. *Mind, Brain, and Education*, 3(3), 143-150.
- Siegler, R., & Opfer, J. (2003). The development of numerical estimation evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science*, 237-243.
- Singh, I., & Howard, M. W. (preprint). Scanning along a compressed timeline of the future, BioRxiv, 1-16.
- Singh, I., Tiganj, Z., & Howard, M. W. (2018). Is working memory stored along a logarithmic timeline? Converging evidence from neuroscience, behavior and models, *Neurobiology of Learning and Memory*, 153, 104-110.
- Tiganj, Z., Cromer, J. A., Roy, J. E., Miller, E. K., & Howard, M. W. (2018). Compressed timeline of recent experience in monkey lateral prefrontal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30(7), 935-950.
- Tiganj, Z., Gershman, S. J., Sederberg, P. B., & Howard, M. W. (preprint). Estimating scale-invariant future in continuous time, 1-18.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483-488.
- Wearden, J. H., & Jones, L. A. (2007). Is the growth of subjective time in humans a linear or nonlinear function of real time? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(9), 1289-1302.
- Woo S. H., Kim K. H., & Lee K. M. (2009). The role of the right posterior parietal cortex in temporal order judgment. *Brain and Cognition*, 69(2), 337-343.
- Xuan B., Zhang D., He S., Chen X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision*, 7(10), 13 1-5.
- Zélandi, P. S., & Droit-Volet, S. (2011). Cognitive

한국심리학회지: 발달

abilities explaining age-related changes in time perception of short and long durations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(2), 143-157.

1차원고접수 : 2018. 07. 14.

수정원고접수 : 2018. 08. 29.

최종게재결정 : 2018. 08. 31.

Development of Spatial Representations of Time

Saebyul Lee

Su Kuen Jeong

Korea Brain Research Institute
Department of Structure and Function of Neural Network

Time and space are intimately related in real life, as can be seen from the nearly universal use of spatial concepts in time words across cultures. However, whether the form of spatiotemporal representations relies on the linear or on the logarithmic scale is still under debate. In addition, there is a lack of research investigating the development of spatiotemporal representations. Here, we examined the form of spatiotemporal representations across 6-8-year-olds, 9-11-year-olds, and adults using a novel timeline estimation paradigm. We asked participants to view a three-minute-long video clip and mark the temporal distance of a specific scene of the video on a horizontal timeline. We found non-linearity between their estimates and stimulus temporal distances, which decreased as the participants' ages increased. Six-to-eight-year-old children showed the greatest non-linearity compared to other age groups, and there was no significant difference in the magnitude of non-linearity in estimation between 9-11-year-olds and adults. These results imply that humans might have a logarithmically compressed spatial representation of time across age groups.

Key words : spatio-temporal representation, temporal representation, time line estimation, temporal concept development